

# 团 体 标 准

T/CASEI ××××—××××

## 油气管道凹陷评价与修复技术规范

Technical specification for evaluation and repair of dents in oil and gas pipelines

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施



中国特种设备检验协会 发布

## 目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 缩略语.....	3
5 总则.....	3
6 凹陷完整性管理流程.....	4
7 数据收集.....	5
8 凹陷特征识别.....	6
9 凹陷筛选.....	11
10 适用性评价.....	12
11 现场开挖.....	14
12 减缓与修复.....	17
附录 A（资料性） 凹陷类型和形成过程.....	20
附录 B（规范性） 凹陷几何特征识别和表征方法.....	22
附录 C（规范性） 凹陷筛选.....	37
附录 D（规范性） 凹陷适用性评价方法.....	45
附录 E（资料性） 现场开挖记录.....	60
附录 F（规范性） 可接收的管道凹陷修复方法选择和流程.....	64
附录 G（资料性） 管道凹陷评价案例.....	66
参考文献.....	78

## 前 言

本文件按 GB/T 1.1—2020 给出的规则起草。  
本文件由中国特种设备检验协会提出并归口。  
本文件起草单位：略。  
本文件主要起草人：略。

# 油气管道凹陷评价与修复技术规范

## 1 范围

本文件规定了油气管道凹陷的数据收集、特征识别表征、凹陷筛选、适用性评价、现场开挖、以及减缓与修复等技术内容。本标准提供的数据筛选工具和详细评价方法为油气管道输送系统凹陷的长效管理决策提供技术支持。

本文件适用于输送石油与天然气、城市燃气的埋地钢质管道系统，为管道运行管理、检测和评价人员提供有关埋地钢质管道凹陷完整性管理的行业实践指南。低温、高温、氢气、CO<sub>2</sub>等厂区架空或厂际埋地钢质管道也可参照使用。

本文件不适用于燃气聚乙烯（PE）等塑料管道。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 19624 在用含缺陷压力容器安全评定
- GB/T 27699 钢质管道内检测技术规范
- GB/T 30582 基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价
- GB 32167 油气输送管道完整性管理规范
- GB/T 35013 承压设备合于使用评价
- GB/T 36701 埋地钢质管道管体缺陷修复指南
- SY/T 6477 含缺陷油气管道剩余强度评价方法
- SY/T 6996 钢质油气管道凹陷评价方法

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 凹陷 **dent**

由外力引起的管道表面的局部向内凹陷，产生管壁塑性变形和管道曲率的扰动，并非所有凹陷都会影响管道的安全运行。

### 3.2

#### 平滑凹陷 **plain dent**

没有重合特征、轮廓曲率平滑过渡的凹陷或凹痕。

### 3.3

**约束凹陷 constrained (restrained) dent**

与外部石头等硬物接触的凹陷，硬物限制管壁因内部压力波动而导致的运动。

3.4

**非约束凹陷 unconstrained (unrestrained) dent**

不与硬物接触、形变自由的凹陷。这类凹陷，当管道内部压力波动时，外部硬物或压头不会限制管壁的变形移动。

3.5

**波纹 ripple**

管道光滑表面处轻微的隆起或波纹。

3.6

**褶皱 wrinkle**

管道外壁可见的局部起伏类缺陷，特征为局部曲率大，形成载荷多为轴向压缩或弯曲载荷。

3.7

**弯曲 buckle**

在轴向或弯曲载荷作用下，管道横截面承受纵向压应力，因横向不稳定而引起的管壁变形。

3.7

**沟槽 gouge**

由硬物等引起管道表面材料缺失和壁厚减薄。

3.8

**重合特征缺陷 interacting defect**

凹陷与腐蚀、焊接、凿槽、裂纹等现象同时存在的缺陷，降低了管道凹陷的适用性。

3.9

**多峰凹陷 multi-peak dent**

有多个顶点的凹陷。

3.10

**凹陷轮廓 dent profile**

变形的管壁位置沿或垂直于管壁轴线（通常通过凹陷的最深点）的二维几何描述。

3.11

**回弹 rebound**

不论内部压力水平如何，由于压头的移除，凹痕的形状都会发生变化。

3.12

**回圆 rerounding**

由于内部压力增加而引起的凹痕形状的变化。

3.13

**椭圆度 ovality**

管道横截面圆度的偏差（即卵形或宽椭圆形），也称不圆度。

3.14

**ILI 管道内检测 in-line inspection (ILI)**

使用仪器从管道内部对其进行的检测，发现管体异常的特征。

## 3.15

**压力谱 pressure spectrum**

通过雨流计数形成的直方图，描述了压力循环的大小和频率（或单位时间内的次数）。

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DFDI (Ductile Failure Damage Indicator): 延性损伤失效指标

DSAW (Double Submerged Arc Weld): 双向埋弧焊

ERW (Electric Resistance Weld): 电阻焊

FAD (Failure Assessment Diagram): 失效评估图

FEA (Finite Element Analysis): 有限元分析

ILI (In-Line Inspection): 内检测，或在线检测

IM (Integrity Management): 完整性管理

MAOP (Maximum Allowable Operating Pressure): 最大允许工作压力

MFL (Magnetic Flux Leakage): 漏磁

MOP (Maximum Operating Pressure): 最大工作压力

NDT (nondestructive testing): 无损检测

OD (outer diameter): 外径

PDCA (Plan, Do, Check, Act): 计划，执行，检查，改进

RP (Recommended Practice): 推荐做法

RSF (Remaining Strength Factor): 剩余强度因子

RSF<sub>a</sub> (Allowable Remaining Strength Factor): 许用剩余强度因子，一般取 0.9

*P* (restraint parameter): 约束参数

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): 监控与数据采集

SCF (Stress Concentration Factor): 应力集中系数

SLD (Strain Limit Damage): 应变极限损伤

SMAW (Shielded Metal Arc Weld): 保护式电弧焊

SMS (Safety Management System): 安全管理系统

SMYS (Specified Minimum Yield Stress): 规定最小屈服应力

S-N (Stress-Cycle Life Curve): 应力循环寿命曲线

SP (Shape Parameter): 形状参数

SSI (Spectrum Severity Indicator): 压力谱严重性指数

TMCP (thermo-mechanical control processing): 热机械控制加工

## 5 总则

5.1 油气管道凹陷应遵循完整性管理计划-执行-检查-行动（PDCA）循环，见图 1。凹陷的管理应为连续循环闭环管理，应不断归纳总结凹陷失效类型和机理，持续改进检测与评价方法、提高管理的有效性。

5.2 管道企业应收集、整理所有凹陷数据，并进行集成管理，是支持有效决策的基础。

5.3 管道企业应对根据定期检测结果，对比分析和评估凹陷状况和成因，识别可能对管道完整性造成损害的变形缺陷，并采取修复或消除损伤性变形缺陷。

5.4 油气管道凹陷应采用分类管理方式。根据凹陷的类型、形成机理、可能失效方式、评价方法等进行针对性评价和管理。同时，也应关注不同输送介质管道凹陷评价内容的选择，如压力波动较少的管道疲劳失效敏感性低，可不进行疲劳寿命评估。

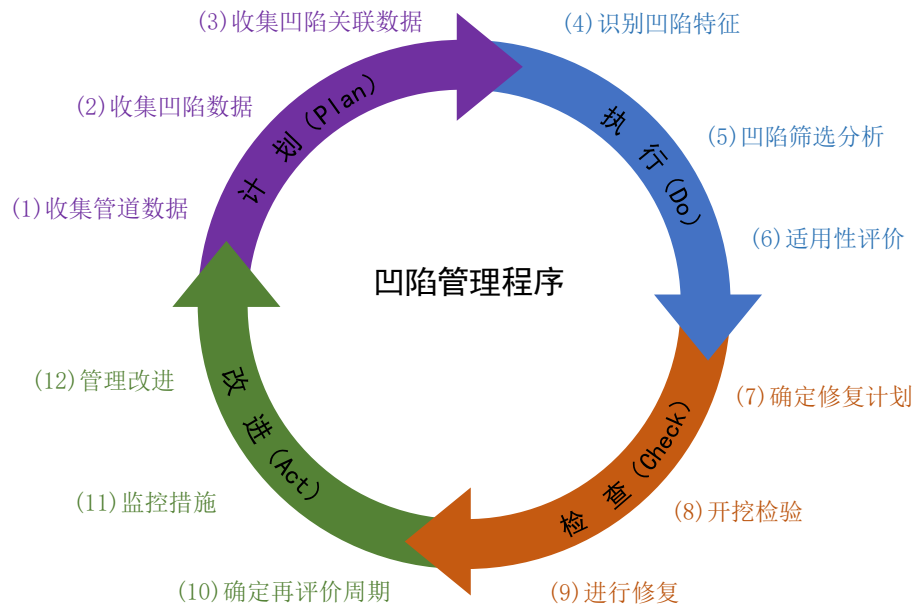


图 1 基于 PDCA 的管道凹陷管理框图

## 6 凹陷完整性管理流程

6.1 凹陷的评估与管理包含数据收集、凹陷识别、几何重合特征和运行分析、凹陷筛查、适用性评价、维修维护决策、管理改进等 7 个过程要素，详见图 2。将执行过程可划分为四个步骤：

- a) 收集和整合数据，识别凹陷特征；
- b) 凹陷筛选和评估；
- c) 凹陷维修维护措施；
- d) 持续改进。

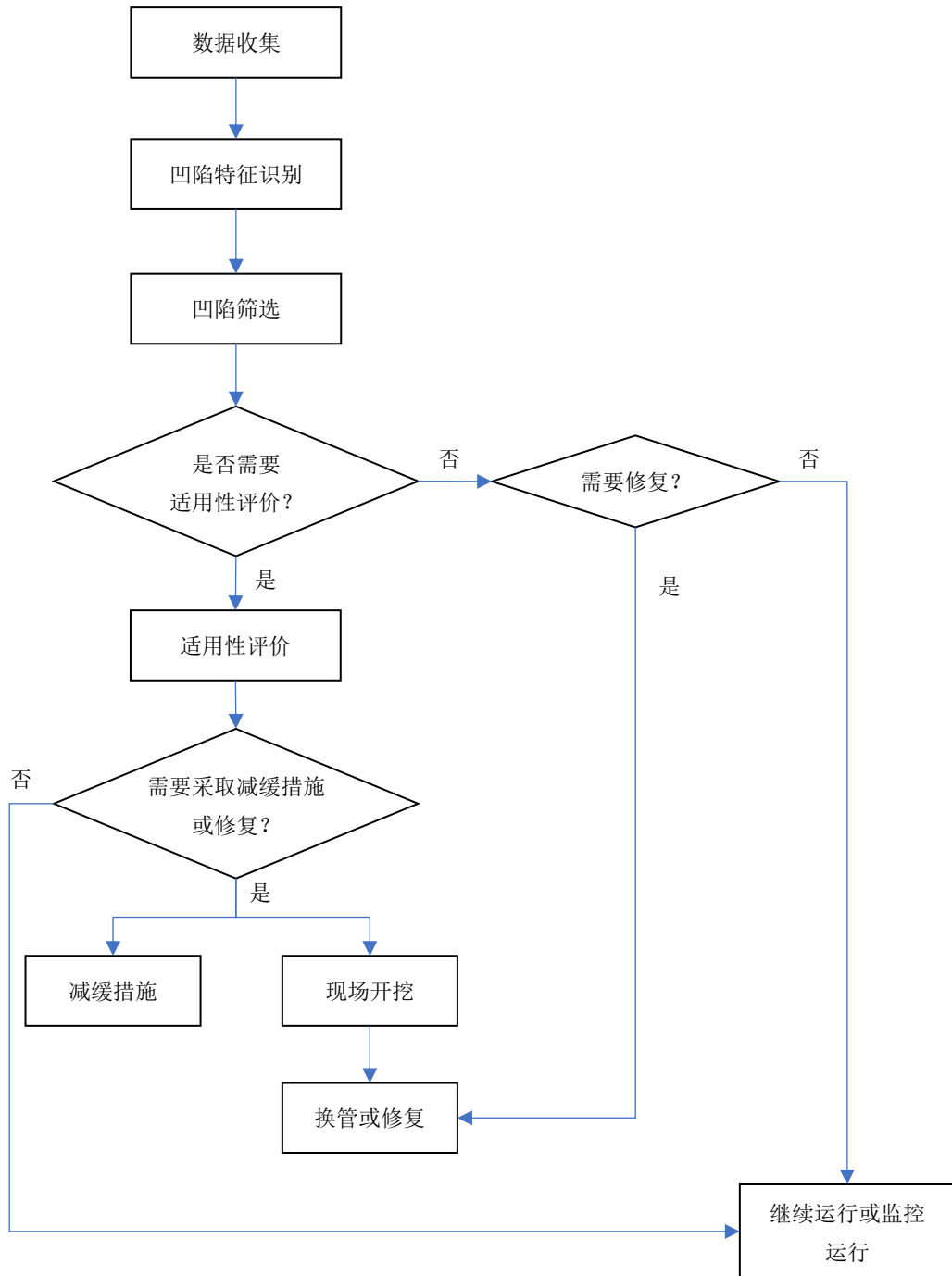


图 2 凹陷评价与修复管理要素与流程

## 7 数据收集

7.1 凹陷的适用性评价前，应分类收集管道的几何、材料、运行参数、外部载荷等数据，数据收集内容见表 1，用于识别凹陷特征、约束条件，并确定评价方法和修复措施。

7.2 收集到的数据应客观、真实、准确，并能满足凹陷的评价需求。

7.3 应建立凹陷信息管理数据库，并纳入完整性管理平台，定期更新数据，便于凹陷管理决策。



表 1 数据收集表

一级分类	二级	内容	备注
含凹陷管道 相关数据	管道规格	管道钢级、管径、壁厚等详细数据。	
	材质和性能	1. 管道材质； 2. 管道的屈服强度、抗拉强度、韧性、均匀延伸率、疲劳裂纹扩展速率等力学性能，也可通过拉伸、冲击或疲劳实验测试获得。	涉及焊缝时，应包含焊缝材料和力学性能数据。
	埋设信息	1. 管道埋深、高程等； 2. 管道外防腐层和阴极保护信息； 3. 管道套管等其他信息。	
	环境信息	1. 管道凹陷区域周围的地质条件及地表环境； 2. 管道凹陷区域地区等级。	
	运行数据	1. 管道凹陷位置的运行压力以及历史压力波动谱、温度等数据； 2. 管道输送介质。	
	检测数据	1. 管道变形和漏磁等内检测数据； 2. 管道外检测数据。	
凹陷详细数 据	几何数据	1. 凹陷的长、宽、深； 2. 凹陷环向钟点位置； 3. 凹陷处管道椭圆度情况。	
	轮廓数据	1. 凹陷详细的三维几何轮廓数据； 2. 凹陷的环向和轴向剖面轮廓曲线图。	由变形精确内检测或三维扫描外检测等获得。
	约束条件	1. 凹陷是否与岩石硬物等压头接触； 2. 凹陷是否存在高压下与压头接触，低压或无压时与压头不接触的情况； 3. 凹陷处应力集中程度。	验证约束条件的唯一方法是现场开挖检测。
	重合特征	1. 与环焊缝和螺旋焊缝的位置关系，是否重合； 2. 凹陷处是否有腐蚀、机械划伤缺陷； 3. 凹陷处是否有裂纹缺陷； 4. 是否存在多个凹陷相互作用； 5. 凹陷处管道是否有分层等缺陷。	
其他相关数 据	施工活动	涉及有第三方施工时，需包含第三方施工相关资料。	
	地质活动	涉及地质沉降、滑坡等引起管道有移位时，需根据相关资料分析管道的整体位移变形。	

## 8 凹陷特征识别

### 8.1 几何特征识别

8.1.1 凹陷几何特征识别的目的为表征凹陷几何形貌，辨识与其它特征缺陷差异。

8.1.2 凹陷的几何形状可以使用 ILI 或现场测量技术进行测量，并重建凹陷的三维几何形貌，分析识别凹陷的长度、宽度和深度，凹陷处管道不同位置管道横截面的椭圆度等关键几何参数。

8.1.3 应对比分析不同检测周期或不同检测工具收集到的同一凹陷检测数据，判断数据差异原因。影响凹陷检测结果的因素包括检测技术的差异、成熟度、设备精度、检测条件、运行工况、数据分析、以及其他相关因素。

8.1.4 针对约束凹陷，凹陷特征识别时应记录对应的运行压力，不同运行压力可能导致凹陷形状发生变化。

8.1.5 应识别凹陷最深点，并形成凹陷的二维纵向和横向轮廓图，便于凹陷约束条件、应变和形状参数确定。

8.1.6 凹陷二维轮廓表征时，可根据信号数据中存在的噪声水平对凹陷轮廓进行平滑或近似处理。信号处理原则为保留凹陷轮廓形状和深度，形成单调凹陷轮廓，用于评估单峰凹陷的特征长度和面积，附录 B.3 提供了单峰平滑凹陷轮廓特征长度和面积的表征方法。

8.1.7 凹陷轮廓数据应去除由噪声或性能不佳传感器引起的无效数据，但不应去除凹陷椭圆度信息，表征凹陷几何特征时应包含凹陷处管道的椭圆度。

8.1.8 基于内检测数据的凹陷识别准则。满足下列条件的可识别为凹陷：

- 几何特征满足应变  $\frac{d_{tot}}{L_{10\%}^{AX}} > 0.05$ ，或锐度  $\frac{L_{10\%}^{AX}}{OD} \leq 0.25$ ；
- 几何特征满足  $\frac{(D_{Nom} - D_{Min})}{D_{Nom}} \geq 1\%$ ，或  $d_{tot} > d_{ov}$ ；
- 存在与管道塑性变形相关的磁特征信号；
- 几何特征具有多个峰值。

其中，相关参数含义见图 3， $L_{10\%}^{AX}$  是指轴向凹陷长度，其定义为轴向轮廓方向上，从凹陷最深位置到深度为最大深度值 10% 的位置所测量的长度。

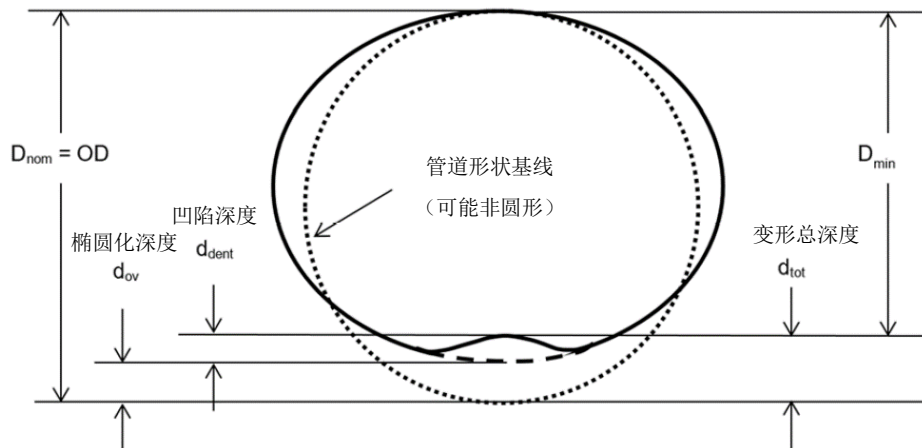


图 3 凹陷参数定义

## 8.2 约束条件识别

8.2.1 凹陷由外部压头作用管体形成，根据约束条件将凹陷分为约束与非约束凹陷。如果在管道运行期间，压头在凹陷处与管道保持接触，则凹陷特征会受到约束，为约束凹陷。如果压头在凹陷形

成后且管道处于使用状态时与管道脱离接触，凹陷特征不受约束，为非约束凹陷。此外，也存在管道运行期间，由于压力变化导致管道部分时刻与压头接触的少数情况，成为部分约束凹陷。

8.2.2 约束条件是凹陷变形状态的特征，影响凹陷的适用性评价结果，应进行识别。

8.2.3 开挖检验是凹陷约束条件特征的唯一识别方法。开挖前可通过 ILI 检测数据和开挖历史经验推断约束条件，但结果非完全可靠。位于管道顶部（介质顺流方向管道环向 4 点钟和 8 点钟位置上方）的凹陷更可能是第三方损坏，一般为非约束凹陷；位于管道底部（4 点钟和 8 点钟位置下方）的凹陷更可能是岩石挤压凹陷，一般为约束凹陷。

8.2.4 凹陷约束条件可通过 ILI 检测数据，利用经验公式计算约束参数，并评估凹陷的约束特征。

$$\rho = \max \left\{ \frac{18 \times |A_{15\%}^{AX} - A_{15\%}^{TR}|^{\frac{1}{2}}}{L_{70\%}^{TR}}, 8 \times \left( \frac{L_{15\%}^{AX}}{L_{30\%}^{AX}} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left( \frac{L_{30\%}^{AX} - L_{50\%}^{AX}}{L_{80\%}^{TR}} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1)$$

其中，约束参数  $\rho$  是无量纲参数， $\rho > 20$  表示约束凹陷， $\rho < 20$  表示未约束凹陷，接近或等于 20 时，可被评估为约束或非约束凹陷。该方法适用于判断在产生 10%至 100%SMYS 环向应力的压力下，各种几何形状的单峰对称、不对称管体凹陷。

8.2.5 可通过计算凹陷处的应力集中系数（SCF）来评估约束条件。如果  $\frac{MOP}{P_{SMYS}} \times SCF < 2.5$ ，则凹陷可能为非约束；如果  $\frac{MOP}{P_{SMYS}} \times SCF > 2.5$ ，为约束凹陷的可能性增大。

8.2.6 开挖检查过程中压头的移除会改变了凹陷的约束条件和形状。凹陷形状的变化，以及在压力波动下凹陷变形响应，可能导致管体产生裂纹，应进行识别评估。

8.2.7 通过历史检验数据分析并识别凹陷约束条件时，应审查开挖检验记录，是否存在凹陷约束移除记录，并结合历史压力载荷谱，对比分析约束和非约束条件下凹陷几何形状特征变化。

### 8.3 重合特征识别

8.3.1 凹陷可能与管道焊缝、腐蚀、机械划伤、裂纹等其他特征发生几何重合，并相互作用影响，即重合特征。重合特征关系到凹陷的适用性，需评估凹陷与其他重合特征的交互作用，应进行识别。

8.3.2 凹陷的重合特征可通过 ILI 检测数据和开挖检验进行识别。

8.3.3 凹陷与焊缝的重合特征应识别焊缝方向（环向、轴向、螺旋焊缝）、焊缝类型（DSAW、SMAW、ERW）、与凹陷的相对位置关系、焊缝质量（是否存在余高不足、错边、咬边、未熔合等缺陷）等信息。

8.3.4 凹陷与管道焊缝满足重合特征时，会相互作用影响。凹陷与环焊缝、纵焊缝、螺旋焊缝的重合特征可通过凹陷最深点与焊缝的间距进行识别判断，相关准则见附录 B.6。

8.3.5 凹陷与腐蚀重合特征应识别腐蚀形貌（如沟槽、一般腐蚀、点蚀等）、最大深度（壁厚百分比）、腐蚀影响区域、与凹陷的相对位置关系、以及其他重合特征等信息。

8.3.6 凹陷与腐蚀满足重合特征时，会相互作用影响。可通过分析凹陷表面应力集中情况、光洁度效应和局部壁厚减薄效应，来评估判断是否存在相互作用，以及影响程度，相关准则见附录 B.7。

8.3.7 凹陷与裂纹重合特征应识别裂纹深度和长度、裂纹方向（如纵向、环向）、裂纹萌生面（即内表面或外表面）、与凹陷的相对位置关系、以及其他重合特征等信息。

8.3.8 凹陷与裂纹的重合都是相互作用的。凹陷与裂纹重合特征的识别应作为修复或更换的依据。修复计划的紧迫性可采用有限元建模和断裂力学方法来评估其严重程度。

8.3.9 凹陷与分层的重合特征应识别分层距管道表面距离、与凹陷相对位置关系、以及其他重合特征等信息。凹陷与分层的交互作用影响仍缺少相关评判方法。一般经验认为，位于管道厚度方向中间 1/3 区域、平行于管壁表面的分层，不影响凹陷的适用性评价。

8.3.10 多凹陷的识别特征可通过凹陷之间的距离进行识别判断。凹陷之间纵向距离超过 1 倍管道外径时，之间相互作用影响可忽略。如果纵向距离小于 1 倍管道外径，无论时钟位置如何，如图 4 所示，凹陷相互作用，从而影响其疲劳寿命。

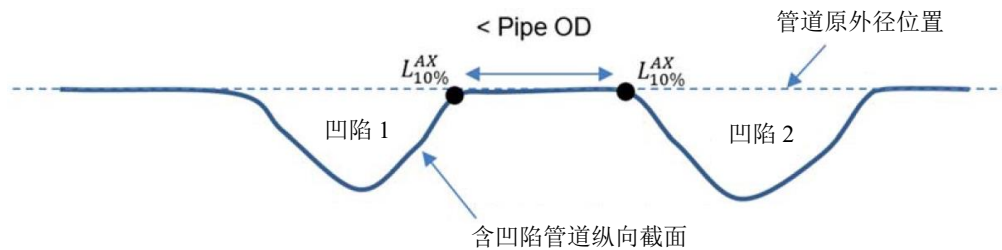


图 4 多凹陷相互作用评判标准

#### 8.4 运行条件严重性识别

8.4.1 管道凹陷处运行条件严重性应根据凹陷形成后历史运行压力谱和未来最大运行压力等数据来识别表征。历史运行压力谱用于分析压力增量和最大压力对凹陷变形的影响，可评估凹陷的损伤极限，为未来最大工作压力的确定提供依据。

8.4.2 历史最大工作压力识别。凹陷处历史最大工作压力影响凹陷疲劳响应和凹陷开裂可能性。如果凹陷约束条件保持不变，且压力始终低于历史最大压力，凹陷变形过程将重复进行，不会新增永久变形，凹陷的重复变形过程即为疲劳损伤累积过程。

8.4.3 压力谱数据采集及频率识别。应识别历史和未来可能的压力-时间载荷谱，收集的运行压力数据应能代表含凹陷特征管段过去和未来运行的数据，采集频率应能最大程度捕获压力变化历程。对于最小采样时间间隔内的单个压力值数据，应取该时间内的最大值，不宜取平均值，当无凹陷处压力谱数据时，可用距离凹陷最近位置的加压站出站压力谱代替。

8.4.4 压力循环特征识别。应通过雨流计数法识别压力-时间谱中的不同压力赋值的循环次数，用于评估循环压力的严重性。处理过程中应对数据审查，消除非实际操作引起的异常压力值。

- a) 雨流计数法是一种通过将加载历史减少为一系列峰谷值来分析压力数据的算法，如图 5 所示。
- b) 压力循环幅值在各站之间可能显著差异，在确定两站之间指定距离的凹陷压力循环值时，首先应通过数据处理，消除上游和下游站内 SCADA 数据的时间差，利用插值方法得到指定点凹陷的压力循环。
- c) 为了充分考虑凹陷疲劳损伤累积过程的非线性，雨流计数过程应同时考虑各加载循环的压力范围和平均压力。为了便于后续筛选，可以通过图 6 表征不同压力范围的循环压力严重性。

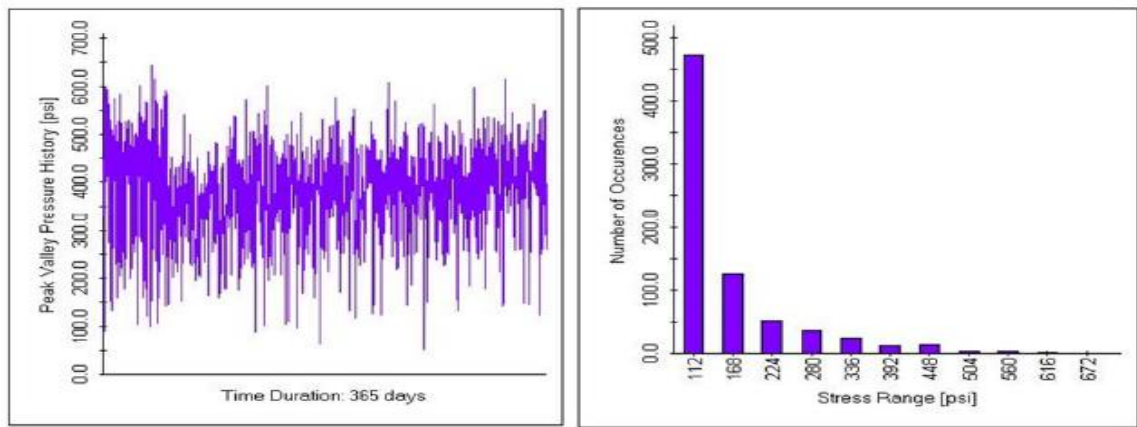


图 5 来自 SCADA 系统的操作样本压力-时间历程和压力范围直方图

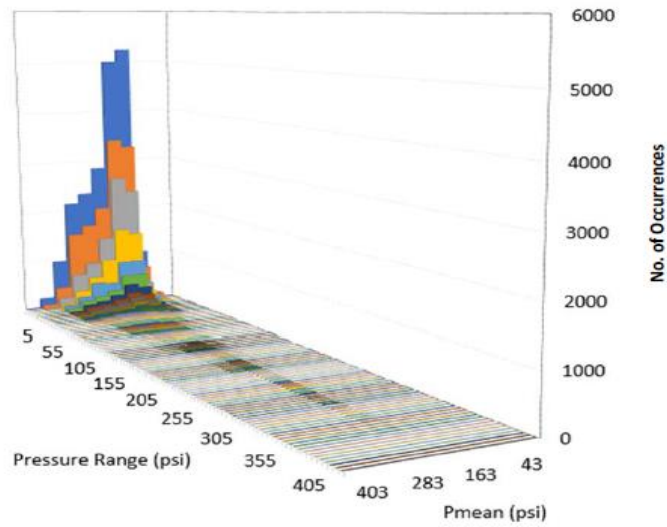


图 6 不同压力范围平均运行压力直方图严重性表征

8.4.5 压力谱严重性指数 (SSI) 识别。SSI 是特征应力 (或压力范围) 的循环次数, 其导致的疲劳损伤 (即裂纹扩展) 与实际压力时间历程相同, 如同 7 所示, SSI 用于量化与压力-时间历程相关的循环疲劳严重度, 标准中 SSI 定义基于 90MPa 的环向应力范围。对于持续时间短于或长于一年的时间历程, 在整个时间历程中累积的损伤被缩放以表示一年的操作。疲劳寿命与 SSI 呈负线性关系, 如果给定管道运行的 SSI 减少两倍, 则管道估计疲劳寿命增加两倍。

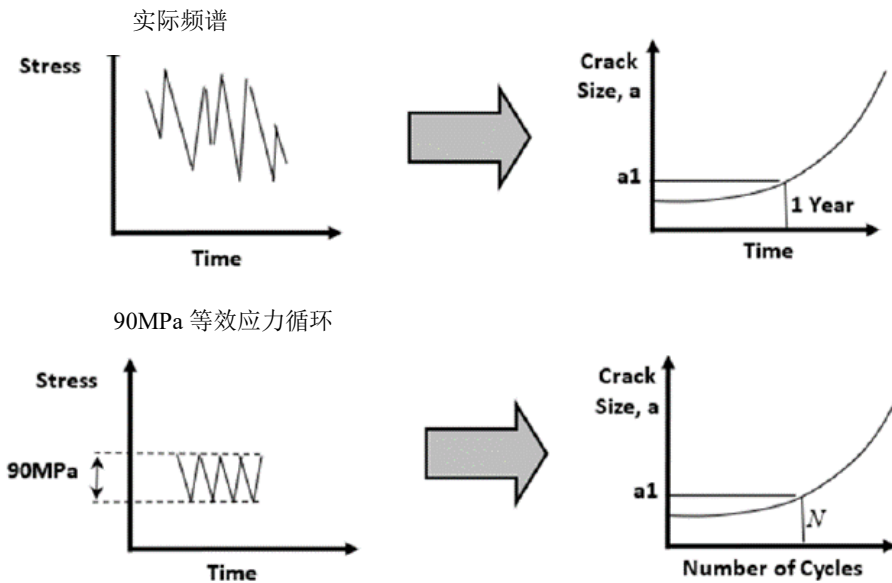


图7 频谱严重性指标说明

## 9 凹陷筛选

### 9.1 一般要求

9.1.1 并非所有凹陷均损害管道完整性。应根据含凹陷管道失效压力、裂纹形成可能性和管道疲劳寿命等因素，采用保守或简化方法对凹陷进行筛选，以确定是否合于使用。

9.1.2 凹陷筛选过程中应考虑可能存在影响管道企业正常清管和内检测的凹陷，此类凹陷可直接维修更换，免于筛查评估。

9.1.3 经过筛选认为不影响管道安全运行的凹陷可不进行第10章的适用性评价。

### 9.2 基于风险的筛选

9.2.1 基于半定量风险的凹陷筛选过程是完整性管理中工程定性判断含缺陷管道是否可用的重要方法之一。将管道运行压力严重性、凹陷形状、重合特征、凹陷开裂可能性、失效压力和疲劳寿命等特征作为风险因素，采用风险排序的方式评估凹陷失效的可能性，进而筛选排除非损伤类的低风险凹陷，以免于适用性评价。

9.2.2 附录C.1提供了基于半定量风险的管道凹陷及严重性筛选流程。

### 9.3 凹陷形状的筛选

9.3.1 通过凹陷的形状轮廓拟合可判断凹陷的应变情况，初步推断凹陷裂纹形成可能性。

9.3.2 利用凹陷ILI、激光扫描等得到凹陷轮廓数据，通过插值拟合得到凹陷表面曲率半径，利用公式快速初步得到凹陷的应变值，基于凹陷应变准则判断是否免于评估。

9.3.3 管道凹陷满足下列条件时，无需进行适用性评价。

- a) 属于平滑凹陷，深度小于2%OD且应变小于6%；
- b) 不与管道焊缝、腐蚀、机械划伤、裂纹等有重合特征；

- c) 材料韧性良好，并且未出现材料性能劣化及劣化趋向；
- d) 不承受疲劳载荷、动态冲击载荷。

#### 9.4 凹陷疲劳的筛选

9.4.1 凹陷疲劳筛选的目的是通过识别凹陷特征、压力-时间载荷谱和管道几何结构等因素，排查出设计年限内不影响管道疲劳寿命的凹陷。

9.4.2 分析含凹陷管段的压力谱严重性指数（SSI），按照附录 C.2 初步判断不同凹陷深度的下限疲劳寿命，超过设计年限或预期使用年限的凹陷，无需进行适用性评价。

### 10 适用性评价

#### 10.1 一般要求

10.1.1 凹陷适用性评价用于评估凹陷形成过程中产生裂纹的可能性、达到凹陷失效压力的可能性和疲劳损伤累积，应在适用性评价过程中评估凹陷重合特征的影响。

10.1.2 凹陷的适用性评价包括剩余强度评价、应变和疲劳寿命评价。经过筛选后，需要进行适用性评价的凹陷应针对性开展适用性评价工作。

10.1.3 需要进行适用性评价的凹陷，应根据凹陷主要损伤特征和评价方法要求，开展评价工作。

10.1.4 当凹陷剩余强度、应变和疲劳寿命中有一项评估结果无法通过时，应及时采取降压运行、监控等风险减缓或控制措施。可根据凹陷的损伤严重程度，安排修复计划，采用有效的修复方法进行修复，或者直接更换。

10.1.5 管道企业应定期进行凹陷再评价，再评价间隔时间可根据含凹陷管段最高工作压力和预期疲劳寿命计算结果获得的裕量进行确定。再评价应结合定期检验工作开展，评价内容还应考虑含凹陷管段的失效后果、重合特征增长率、工作压力谱稳定性、凹陷形状和重合特征尺寸精度等内容。

#### 10.2 凹陷应变评价

10.2.1 基于凹陷轮廓几何形状的应变评价，可评估凹陷的最大变形、萌生裂纹的可能性。凹陷应变可采用基于凹陷轮廓曲率的计算应变、管体韧性损伤失效指标（DFDI，计算方法见附录 D.2）、以及利用有限元模拟凹陷形成过程的应变极限进行评价。

10.2.2 管道凹陷处内外壁的最大应变大于以下值时，凹陷容易形成裂纹，应进行适用性评价：

- a) 平均延伸率的 40%；
- b) 管道规范或出厂测试报告中规定的材料最小延伸率（*EL*）的 50%；
- c) 当无工厂测试报告或管道规格未知时，采用 6%应变。
- d) 延性损伤失效指标  $DFDI=0.6$ 。

10.2.3 基于凹陷形状轮廓的应变评估方法见附录 D.1。

10.2.4 凹陷处管体的延性损伤失效指标（DFDI）可反映凹陷塑性变形的程度，当  $DFDI>0.6$ ，发生开裂的可能性较大。

10.2.5 管道焊缝与凹陷重合，且相互作用时，当应变大于 6%，应修复；当应变值介于 4%~6%之间，应根据凹陷与焊缝相对位置，利用 DFDI 和有限元方法进行精细评价，并根据凹陷的几何特征、约束条件和运行条件，进行剩余强度或疲劳寿命评价（注 10-1）。

注 10-1：当凹陷与焊缝重合时，推荐凹陷可接受的极限应变为 4%。



### 10.3 凹陷剩余强度评价

10.3.1 凹陷失效压力可采用经验、失效评估图（FAD）、以及有限元模拟方法进行评价，包括潜在的断裂和塑性破坏。其中，采用经验和失效评估图（FAD）为1级评价，采用更为精确和细化的有限元模拟方法分析凹陷处的极限载荷为2级评价。未能通过1级评价的凹陷，可进行2级评价，2级无法通过的凹陷应进行维修。

10.3.2 当凹陷与焊缝、裂纹、腐蚀等特征重合，且相互作用时，无经验和FAD方法可选或计算结果存在质疑情况下，推荐采用有限元模拟方法进行评估。

10.3.3 当满足下列条件之一时，应进行凹陷剩余强度评价。

- a) 普通平滑凹陷的最大深度超过6%OD的（注10-2）；
- b) 基于凹陷轮廓曲线计算得到的最大应变超过6%的；
- c) 凹陷与管道焊缝、腐蚀、机械划伤、裂纹等有重合特征，其相互作用的；
- d) 怀疑管材性能出现劣化或劣化趋势的；
- e) 其他评估人员认为必要的。

注10-2：最大深度超过6%OD的凹陷应进行剩余强度评价，但并非深度超过6%OD的凹陷不满足承压条件。试验表明，深度高达10%OD的平滑凹陷，且不与金属损失、焊缝或裂纹特征重合时，无论形状如何，具有与完好管道相同的失效压力。

10.3.4 需要进行剩余强度评价的凹陷，根据管道计算壁厚 $t_c = t_{rd} - FCA$ ，计算凹陷处的最大允许运行压力 $P_{max}$ ，如果当前运行压力超过管道 $P_{max}$ ，则不能通过1级评价。其中， $t_{rd}$ 为远离损伤区域的实测壁厚，单位为mm，FCA为未来计划运行时间内的腐蚀量，单位为mm。

10.3.5 沟槽或腐蚀与凹陷重合，且满足下列条件时，应进行剩余强度评价，评价方法见附录D.3。

- a) 管材的韧性大于40J；
- b) 除沟槽或腐蚀与凹陷重合外，无其他焊缝、裂纹等特征重合，沟槽或腐蚀应进行修整，去除加工硬化层，得到光滑凹陷轮廓；
- c) 沟槽深度小于等于凹陷周围管道壁厚的66%。

### 10.4 凹陷疲劳寿命评价

10.4.1 凹陷的疲劳寿命采用三级评价，从1级到3级难易程度和准确性由低到高，每种评价方法侧重点不同，其特点如下：

- a) 1级评价：凹陷几何严重性等级。利用凹陷几何形状特征参数评价单峰凹陷的相对严重性。辅助管道企业有效地安排修复计划，采取减缓措施降低循环内压对含凹陷管段疲劳寿命的影响。
- b) 2级评价：凹陷几何形状和载荷严重性等级。利用详细的管道凹陷压力谱和几何特征数据，更为详细评价单个凹陷的疲劳寿命，评价约束和非约束单峰凹陷的疲劳严重程度。
- c) 3级评价：基于有限元仿真（FEA）的凹陷疲劳寿命评价。在1级和2级评价基础上，3级评价利用更为精细和实际相符的有限元模型，评价凹陷的适用性、重合特征对凹陷疲劳严重程度或寿命的影响。

10.4.2 1级和2级评价A仅适用于单峰平滑凹陷，且无裂纹等其他重合特征。当凹陷与腐蚀、裂纹、焊缝、沟槽等具有重合特征，且交互作用时，应采用2级评价B或3级评价方法进行疲劳寿命评价，重合特征也可采用折减系数进行代替。

10.4.3 凹陷的疲劳寿命3级评价详细流程见附录D.4。

### 10.5 安全系数



10.5.1 针对凹陷评价过程中数据的不确定性、评估人员的经验水平、以及评价失准的可能后果等因素，凹陷适用性评价计算结果应考虑安全系数。

10.5.2 不同类型的适用性评价，其安全系数选择规定如下：

- a) 利用 D.1 方法评价凹陷应变时，安全系数宜取 2~2.5；当使用 D.2 的 DFDI 方法宜选 1.67 的安全系数；
- b) 凹陷剩余强度评价方法安全系数宜选 1~1.5；
- c) 凹陷疲劳寿命评价安全系数宜选 2~5 的安全系数。

10.5.3 安全系数仅适用于凹陷的适用性评价，不适用于凹陷筛选。

## 11 现场开挖

### 11.1 开挖作业

11.1.1 管道企业应制定凹陷开挖计划，尤其评价为高风险的凹陷，应做好应急工作，避免开挖过程中引起管道失效事故。

11.1.2 依据开挖方案，对管道凹陷进行修复时，应将管道降至安全工作压力后，再实施开挖工作。

11.1.3 含凹陷管段开挖前，检测和评价等相关人员应了解不同类型凹陷的特征，确定压力降低的幅度。不同类型凹陷关键特征如下：

- a) 含平滑凹陷管道的失效压力与无凹陷管道相同；
- b) 管道开挖、剥离防腐层作业，以及回填土至管道直径一半过程中，不会引起管道应变状态的显著变化；
- c) 约束凹陷移除压头时，在凹陷回弹或回圆过程中，可能会导致管壁产生较大的应变变化。
- d) 管道降压会导致约束凹陷的深度和形状永久性变化（塑性变形）。管道降压不会导致非约束凹陷的深度和形状发生永久性变化。

11.1.4 评价人员应根据表 3，对管道凹陷进行评估，确定降压幅度。

表 3 含凹陷管段开挖降压评估表

管道凹陷特征	建议降压幅度
a. 无焊接相互作用 b. 无裂纹或凹陷诱发裂纹的可能性 c. 无沟槽 d. 管壁腐蚀小于 20% <i>t</i>	不减压
a. 管壁金属损失大于 20% <i>t</i> b. 凹陷处开裂的风险增加 c. 韧性好的管材 d. 受影响的高质量焊缝	将压力降低到最近（60 天）最大压力的 80%
a. 已知裂纹的凹陷 b. 管道韧性低或未知 c. 受影响或质量低下的焊缝	将压力降低至小于 30%的 SMYS 环应力或最近（60 天）最大压力的 80%

11.1.5 管道凹陷会降低管道的抗压和抗弯能力，同时，降压也会降低含凹陷管段的抗弯能力。针

对特定区域管道或特定工况管道，降压或开挖会引起管道凹陷处弯折或挤压失效，应再开挖前进行针对性评价。

## 11.2 在线检测和监测

11.2.1 存在下列情况时，管道凹陷应进行在线监测。

- a) 管道凹陷处存在异常腐蚀环境，无法估算未来的腐蚀余量；
- b) 含凹陷管段存在周期性升降压操作，但无压力波动谱记录。

11.2.2 存在下列情况时，管道凹陷应进行在线监测。如果管道凹陷执行在线监测，应定期对其变形进行目视、无损和现场检查或检测。检测类型和内容根据凹陷特征确定。

- a) 应选择适当的无损检测方法，检测含有裂纹重合特征或可能诱发裂纹的凹陷。裂纹的起裂面、位置、方向和形式见附录 B.5，便于裂纹的识别和表征；
- b) 应使用手动测量或表面扫描工具，完整识别和表征凹陷几何形状特征。由于管道内压变化、压头的移除等，可能导致不同时期测得的凹陷形状特征不同，应进行对比分析。

11.2.3 如果采用手动测量方法来识别，并表征凹陷的形状特征，应采用网格式的管壁挠度测量方法获取凹陷的形状特征，测量过程应考虑以下因素：

- a) 网格式测量凹陷形状，测量点应能很好地代表凹陷的形状。例如平滑凹陷在轮廓变化平缓位置可采用 2cm 间距，在轮廓变化较大区域采用 0.5cm 间距的加密测量方法；
- b) 测量点应包含通过凹陷最深点的轴向剖面；
- c) 凹陷形状测量应参考一根长直杆，以捕捉凹陷的形状。应从直杆和管壁开始，以凹陷最深点为中心，测量偏移距离（见图 8）。凹陷的环向轮廓可通过设置不同时钟位置的纵向轮廓线测量来获取。不同位置的直杆应纵向位置对齐。

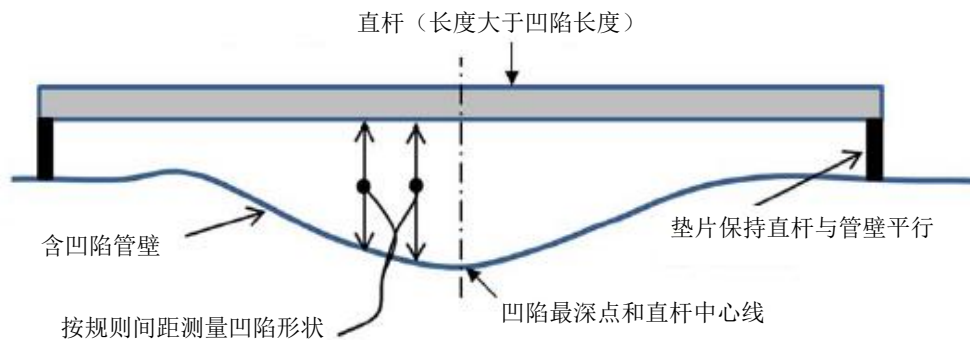


图 8 凹陷手动测量方法

11.2.4 如果采用激光等表面扫描技术来识别表征凹陷形状特征，应将含凹陷管段的整个圆周都进行扫描，并包含整个凹陷特征。扫描管道的轴向长度取决于凹陷的轴向范围，应尽可能长，直至管道原直径位置。

## 11.3 开挖记录

11.3.1 附录 E 列出了现场开挖进行凹陷特征识别时，需要记录的信息。包括：

- a) 开挖信息
  - 现场环境

- 开挖期间信息
- 开挖后信息
- b) 管道状况说明：
  - 管道外防腐层和涂层情况
  - 涂层去除后的管道表面
  - 凹陷约束条件、时钟位置和环焊缝位置
  - 涂层脱粘率
  - 管道表面的阴极保护电位
  - 移除压头前后凹陷特征照片
  - 管道涂层去除前/后的照片
  - 重合特征的存在及其相对于凹陷的位置
  - 管道凹陷表面无损检测结果
- c) 凹陷及重合特征信息
  - 凹陷
  - 腐蚀
  - 开裂
  - 焊接
  - 沟槽

11.3.2 记录信息应纳入完整性管理系统中，用于 ILI 和凹陷评价验证、以及凹陷的长效管理。

#### 11.4 凹陷切割移除

11.4.1 管道切割和记录。含凹陷管段的切割和移除，应采用以下步骤采集管道凹陷样本：

- a) 在管道上标记管道顶部（12 点钟）；
- b) 参照 ILI 标记管道的相关信息，包括上下游环焊缝的编号等信息，以确保 ILI 数据与现场开挖、实验测试等数据保持一致；
- c) 标记管道介质流向；
- d) 如果切割管道不止一段，应标记每段编号和上下游段，以便切割后管段复原；
- e) 在管道轴向未变形的的位置开始切割；
- f) 在切割后的管道上制作永久性标记，并记录；
- g) 在移除压头之前和之后拍摄凹陷特征和压头形状；
- h) 在切断过程中，监测并记录管道在地面上运动变形情况，包括移动方向和位移量；
- i) 存在裂纹时，在其表面喷一层薄薄的润滑剂或凡士林，保护裂纹表面形貌特征；
- j) 对于凹陷和褶皱特征，应在切割之前，测量几何形状特征，绘制表面轮廓，记录相关特征位置信息；在切断后，记录切割部位管道端部的椭圆度等信息。

11.4.2 运输准备。一旦切下并从管沟中移出，应做好运输准备工作，包括：

- a) 做好表面防护，防止运输图中管段变形或表面形成沟槽；
- b) 所有管段均做好标记并附带参照图片；
- c) 去除涂层；
- d) 清洁管道中的残留介质；

e) 在裸露的裂缝表面涂抹油脂。

11.4.3 将管道切割过程中的详细信息形成记录文件，纳入完整性管理系统中。

## 12 减缓与修复

### 12.1 减缓措施

12.1.1 管道企业应充分考虑待修复的含凹陷管道继续运行的可能风险，并确定在凹陷修复之前是否需要长期降压运行。根据适用性评价结果，对管道凹陷采取减缓或修复措施来保持管道完整性。

12.1.2 具有高应变或短疲劳寿命的凹陷应通过改变运行条件来保障管道运行安全，包括降压、控制压力、监控等措施。

12.1.3 如果缓解措施涉及移除压头，应考虑压头改变凹陷形状和约束条件，分析压头移除过程的安全性。如果无法永久性地修复凹陷，则应定期评价凹陷的剩余疲劳寿命。

### 12.2 降压

12.2.1 管道降压应作为适用性评价未通过的凹陷，在修复之前的防止失效的减缓措施。

12.2.2 管道降压可用于缓解应变水平不可接受的凹陷。

12.2.3 在进行现场开挖和移除凹陷约束时，应考虑降压，关于降压幅度、降压过程中需要考虑的因素等信息见 11.1 节开挖作业具体要求。

### 12.3 压力循环波动管理

12.3.1 应当定期重新评估用于凹陷疲劳寿命计算的应力谱数据，以确定运行条件严重性未发生明显变化。频谱严重性指标（SSI）升高应进行进一步的评估，防止凹陷疲劳寿命缩短。

11.3.2 针对凹陷管段，可采取适当措施，减少压力波动幅度和次数，有助于降低 SSI 或疲劳损伤累积率。相关措施如下：

- a) 减少停机次数；
- b) 保持背压；
- c) 使用减阻添加剂；
- d) 修改油气产品分批交付及接收计划；
- e) 尽量减少泵的启停；
- f) 控制泵启停过程中压力变化时间和幅值。

### 12.4 凹陷与重合特征交互作用管理

12.4.1 针对与腐蚀、焊缝、沟槽等特征重合的凹陷，在未修复前，应采取缓解或监控措施来减小其失效风险。

12.4.2 针对采取监控措施的具有重合特征凹陷，应基于 ILI 数据，定期对凹陷进行严重性检查和评估，从而减少凹陷对管道完整性影响的不确定性。

12.4.3 凹陷与腐蚀重合特征的减缓措施如下：

- a) 通过打磨方式消除凹陷处的腐蚀缺陷，保证管道表面光滑，按打磨后的管道壁厚和凹陷特征进行剩余强度和疲劳寿命评估；

b) 确保受影响的管段凹陷阴极保护有效。

#### 12.4.4 凹陷与裂纹重合特征的减缓措施如下:

- a) 通过打磨方式消除凹陷处的裂纹缺陷, 保证管道表面光滑, 按打磨后的管道壁厚和凹陷特征进行剩余强度和疲劳寿命评估;
- b) 如果怀疑裂纹是环境因素造成的, 确保提供足够的阴极保护。

#### 12.4.5 凹陷与焊缝重合特征的减缓措施如下:

- a) 针对与凹陷重合的焊缝, 应审查建设期的焊接工艺评定和检验记录, 采用无损检测方法检验当前凹陷处焊缝质量, 减小焊接质量或材料性能不确定性对凹陷危险性的影响;
- b) 宜采用打磨方式消除凹陷处焊缝余高引起的几何不连续, 可降低应力集中, 提高凹陷特征的疲劳起始寿命。打磨过程中应逐渐去除材料, 避免焊件和管道材料过热。对于承受较高轴向载荷的环焊缝, 不建议打磨焊缝余高, 以防降低管道抗拉性能。

#### 12.4.6 凹陷与沟槽重合特征的减缓措施如下:

- a) 轻轻打磨掉沟槽特征硬化区和根部裂纹, 保证管道表面光滑, 按打磨后的管道壁厚和凹陷特征进行剩余强度和疲劳寿命评估;
- b) 防腐层和套筒修复;
- c) 确保受影响的管段凹陷阴极保护有效。

### 12.5 修复

11.5.1 根据适用性评价结果, 发现对管道完整性有害的凹陷, 应按照合格的书面程序, 采用可接受的修复方法进行修复, GB/T 36701 标准中描述了各种缺陷的可接受维修方法。

11.5.2 管道凹陷的可接受修复方法由以下几个因素决定: 凹陷以前是否受到约束, 凹陷是否存在额外的应力集中情况, 如金属损失、刮伤、冶金改变(如冷加工)材料、裂纹等。可接受的修复策略见 GB/T 36701。

11.5.3 在选择管道凹陷修复方法时, 除了考虑凹陷本身、修复方法可接受性外, 还应考虑修复措施的耐久性 or 寿命以及修复设计寿命。

12.5.4 修复方法包括换管、打磨、全包套、A 型套筒、B 型套筒、复合材料套管、压缩套管、机械螺栓紧固夹具、带压开孔、以及其他可接受的修理技术, 修复方法的适用性和可接受性见附录 F。

#### a) 换管

如果选择换管作为修复方法, 则更换管道应符合管道的设计标准, 更换部分的长度应不小于管径的一半, 并应在试运行之前进行压力试验, 试验压力水平至少为 MOP/MAOP 的 1.25 倍, 且焊接接头应进行射线和超声无损检测。

#### b) 打磨/抛光

可以通过轻微打磨或抛光去除凹陷内的应力集中。如果使用打磨作为唯一的修复方法, 则应进行疲劳评价。如果凹陷与纵焊缝或环缝焊缝重合, 且凹陷深度大于 4%OD, 打磨不应作为唯一的修复方法。

用手锉或动力盘抛光打磨被广泛用于修复表层和一些更严重的缺陷。如果打磨修复长度不超过允许长度, 则允许打磨深度为公称壁厚的 40%, 打磨应使管壁产生光滑的轮廓。打磨后, 应进行磁粉探伤或其他无损检测技术检验, 以验证不存在裂纹, 通过超声波检测剩余壁厚。在电弧烧伤的情况下, 表面也应该用蚀刻剂检测, 以确保完全去除受影响的微观结构。如果缺陷仍然存在, 则应通过其他方法修复。

#### c) 全包围套筒

可以通过以下方式安装全包围焊接套筒来进行维修。

- A 型套筒由两个半套筒组成，两个半套筒通过两侧的轴向缝焊连接在一起，套筒的末端没有焊接到管道上，A 型套筒不可用于修复泄漏。与凹陷相互作用的应力集中型缺陷，例如裂纹，刮痕，沟槽等，应去除。该类型套筒起到加固含缺陷管道的作用，并且不需要承受很大的环向应力即可有效。必须保证套筒在缺陷区域与管道紧密接触，以防止其弯曲，并且在维修过程中由于内部压力波动而可能失效。套筒与管道之间存在的任何间隙应用足够抗压强度的硬化材料填充，如环氧材料。A 型套筒不能承受任何轴向载荷，因此不适用于修复与环焊缝重合凹陷。
- B 型套筒由两个半套管组成，两个半套管通过两侧的轴向缝焊连接在一起。套管的末端被角焊到管道上，以使套筒能够在缺陷泄漏的情况下承受压力。该套筒的设计应能够承载管道的全部 MOP/MAOP，侧缝应为全熔透对接焊缝。凹陷位置存在的任何缝隙应填充有适当抗压强度的可硬化填料，例如环氧树脂材料。

A 型和 B 型套筒的尺寸均应使其至少超过要修复的缺陷末端至少 50 毫米。如果要在带有凸形焊缝余高的环向焊缝上安装 A 型或 B 型套筒，则应去除过多的余高材料，或者在套管上开槽，以防止在焊缝处应力集中。在打磨焊之前，应通过无损检测检验是否对管道完整性造成损伤。在确定套筒中的最大应力时，应考虑开槽导致的套筒壁厚减薄。

#### d) 复合材料套筒

复合材料套筒由纤维增强基体组成，有多种形式、多种材料组成，均为生产商提供的专利设备。广泛应用的有纤维有碳纤维和玻璃纤维，基体材料通常是聚酯材料或环氧材料。一种是使用预成型的复合材料套筒，复合材料层依次缠绕在管道上，每层涂有粘合剂，固化后形成坚实的复合材料套管。另一种是将复合材料包裹或放置在“湿”基质中，固化后成为固体复合材料。

复合材料套筒具有与 A 型钢套筒相同的加固方式修复管道缺陷，应使用可硬化材料填充缺陷处，实现几何连续。除非应力集中已通过打磨去除，否则复合材料套筒不能用于修复与凹陷相互作用、应力集中型缺陷，如刮痕、沟槽、裂纹等。某些复合材料可能与环境不兼容，安装前应详细调查。

#### e) 压缩套筒

压缩套筒是钢制全包围套筒的一种应用，在设计和安装套筒时，应将所有环向应力从承载管传递到套筒。凹陷引起管道的不圆，可能会影响压缩套筒的正确装配，使用前应进行评估。套筒在加热时安装，冷却至环境温度时，钢套筒由于热收缩，在管道上产生净压缩状态。修复后管道轴向焊缝中的环向应力不应超过套筒材料的最大设计应力。

由于通过安装压缩套筒可以减轻管道中的环向应力，因此无需在维修之前通过打磨去除管道上的应力集中。类似 A 型套筒，压缩套筒通常也不承受任何轴向载荷，因此不适用于修复与环焊缝重合凹陷，凹陷处存在的任何间隙应使用硬化填料填充，如环氧材料。

#### f) 机械螺栓固定夹具

机械螺栓固定式夹具由两个半周长的钢锻件组成，通过两侧的轴向法兰螺栓固定在一起，在侧面和两端均配有弹性密封件，在拧紧螺栓后，可密封管道和夹钳之间的内部环形空间。夹具可以承载管道的全部 MOP/MAOP，应对照输送介质，检查密封材料兼容性，防止泄漏后失效。

#### g) 带压开孔

可以通过带压开孔去除凹陷，凹陷应全部包含在待拆除的管段，该修复技术已用于修复严重影响定期检测和清管的凹陷。

12.5.5 使用选定的方法进行修复后，修复区域应重新防腐层修复，以持续缓解腐蚀和环境威胁。

**附录 A**  
(资料性)  
**凹陷类型和形成过程**

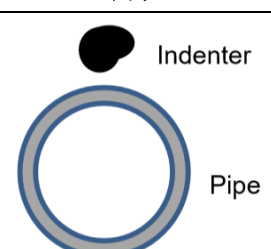
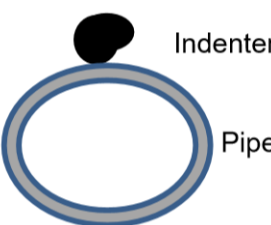
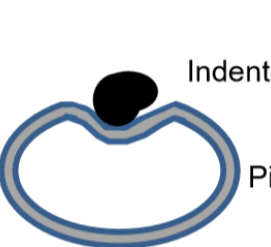
**A.1 凹陷类型**

凹陷按其特征分类如下：

- a) 平滑凹陷是曲线轮廓平滑、且未与其他腐蚀、焊缝、凹槽等几何特征重合的凹陷。
- b) 具有重合特征的凹陷是几何上与腐蚀、凿槽、焊接等其他特征重叠的凹陷。
- c) 单峰凹陷是指管壁变形只有一个顶点的凹陷。
- d) 多峰凹陷将有多个顶点，这种管壁变形可称为马鞍形。
- e) 约束凹陷，即使压头在管壁的凹陷部位与管道保持接触，以减少或限制接触点由于内部压力波动而产生的运动。
- f) 非约束凹陷，压头与管壁不接触，凹陷不会因为内部压力波动而受到限制。

**A.2 凹陷形成过程**

在管道的外表面上施加外部集中力就会形成凹陷。凹陷形成过程如下图 A.1 所示。

凹陷形成过程	图示
阶段 1：圆管-与压头接触前	 <p style="text-align: right;">Indenter Pipe</p>
阶段 2：弹性椭圆化。压头接触管道并使管道横截面变形而不引起塑性变形。如果移除压头，管道将恢复为其圆形-阶段 1 的形状。弹性椭圆化的程度取决于管道是在地上还是在地下；如果在地下，土壤性质可能会产生影响。	 <p style="text-align: right;">Indenter Pipe</p>
阶段 3：凹陷成型。压头力使管道横截面变形，使管壁发生塑性变形，管道不圆度增加，凹陷达到最大深度（达到最小内径）。如果在此阶段对管道加压，管道截面椭圆度会减小，并且管壁将更接近压头形状。该凹陷具有如下两个特征： <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 此时处于约束凹陷状态。</li> <li>b. 凹陷形状主要由压头形状、凹陷深度、管径和壁厚、管材和内压确定。</li> </ul>	 <p style="text-align: right;">Indenter Pipe</p>

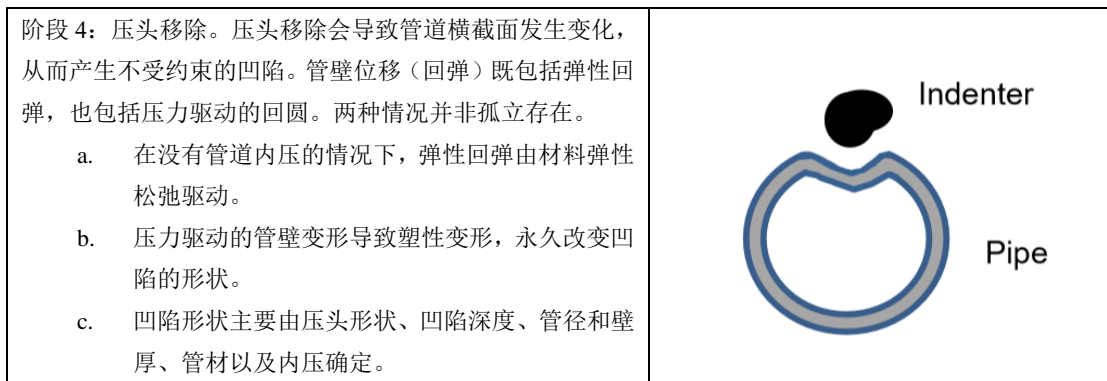


图 A.1 凹陷形成过程

### A.3 几何重合特征

凹陷形成过程可促进或导致其他特征与凹陷的几何重合, 评估人员应在完整性评估和管理中考虑与凹陷几何重合特征的影响。重合特征及其演变的例子包括:

- 导致管道变形的硬物可能使管壁减薄, 例如挖掘机挖掘过程铲齿导致沟槽缺陷的形成。
- 凹陷形成过程可能导致管道涂层失效, 进而发生管道外壁腐蚀。
- 凹陷形成过程可能促进管壁形成裂纹。
- 管道凹陷可能加剧管道内介质留存, 引起内壁腐蚀。
- 凹陷可以在管道纵焊缝或环焊缝上或其附近形成。
- 在形成凹陷的位置可能存在生产或制造特征。
- 管道上可能存在多个距离较近的孤立凹陷, 相互作用影响管道安全。

适用性评价应考虑几何重合特征是否影响管道的失效压力或疲劳寿命, 从而考虑重叠特征与凹陷的相互作用。适用性评价流程应考虑几何重合特征的应力集中效应、材料不均匀性、凹陷形状的变化以及重合特征随时间或载荷增长的可能性。

凹陷的维护决策和修复策略中应考虑几何重合特征对凹陷的影响, 考虑维修维护方案的选择和长期有效性。

### A.4 凹陷的失效

凹陷的失效可在其生命周期的两个阶段发生:

- 形成阶段引起的失效: 包括与压头相关的管壁变形和损伤, 与压头的接触可能会导致立即或短期失效, 可将其识别为与形成相关的事件。
- 运行引起的失效: 包括凹陷管道对内部压力的响应。失效模式可能与循环载荷或达到凹陷失效压力相关的疲劳损伤累积有关。

如果凹陷在其生命周期的形成阶段产生, 则凹陷完整性评估应评估凹陷形成开裂、疲劳损伤累积及其压力导致失效的可能性。这些极限状态的评估将取决于凹陷的特征和相关的管道运行状况。

在评估凹陷的疲劳损伤累积或失效压力时, 凹陷中存在裂纹可显著降低管道的寿命或承压能力。同时, 也应评估凹陷形成期间开裂的可能性, 尤其在凹陷的筛选和评估过程中。



## 附录 B

(规范性)

### 凹陷几何特征识别和表征方法

#### B.1 基于 ILI 的凹陷特征识别

本附录概述了 ILI 检测技术，该计算可以检测和表征具有一致特征的凹陷。用一般术语描述了 ILI 系统，所提供的信息集中于检测和表征凹陷以及可能与凹陷重合或与凹陷相互作用的其他特征。在凹陷评价和完整性管理过程中，检测、正确识别和确定某些重合特征是一个关键部分。

管道行业继续开展研究，并通过行业组织，支持新技术的开发。如果在了解 ILI 系统性能和开发新技术方面有任何重大改进，以提高管道企业检测和表征凹陷以及辨别和确定一致特征尺寸的能力。ILI 系统技术开发人员和服务提供商进行了大量的内部资助研究，以提高其商业系统在特征检测和识别以及改进特征大小方面的能力。

##### B.1.1 普通凹陷识别

###### B.1.1.1 几何工具

用于估计凹陷几何的 ILI 工具使用各种技术来测量管壁相对于工具的位置。示例包括：

- a) 机械卡尺臂，可直接与管壁接触，也可置于支撑杯表面后
- b) 涡流传感器
- c) 超声波传感器

一些实现使用这些技术的组合。一般情况下，几何工具在沿管道轴向移动时收集了一系列截面，这些截面在一起可以创建内管表面的 3D 表示，提供了大型凹陷形状和其他几何特征的详细视图。

几何工具的能力具有阈值，以识别管壁已返回到公称直径位置的点。这些阈值的范围将取决于传感器的灵敏度、工具动力学和管道条件。大直径的管道由于在其自身重量下的载荷而常常在管道安装过程中经常采用椭圆度，这一事实使情况进一步复杂化。

###### B.1.1.2 高场漏磁工具

漏磁(MFL)是利用管线钢的铁磁性来进行检测的。利用两对磁铁将磁场引入管道的钢壁，一组磁铁的北极靠近管道表面，另一组磁铁的南极靠近管道表面。这些磁体通常是永磁体，但也使用电磁铁。永磁体的优点是具有已知的磁化力，可随壁厚和管道材料的不同而变化，而不需要功率。电磁铁需要电流，通过改变电流可以调整磁场强度。为了将磁通量引入管道，一些结构使用可渗透的钢刷材料来促进磁感应进入管道，而另一些结构则留下一个气隙，但将磁铁放置在靠近表面的地方。

一旦磁通量进入管道，管道磁导率的变化将导致磁通量振幅的变化。对于金属损耗（如腐蚀），丢失的钢块的渗透性要低得多，并且不能承受与钢块一样大的通量，因此，它从内部和外部“泄漏”到管道外部的空间中，从而可以进行检测管道两侧的异常尺寸。MFL 工具将传感器放置在该区域，通常是霍尔传感器，该传感器使用霍尔效应来测量传感器处的磁场强度。已经使用了线圈传感器，该线圈传感器不需要电源，但是确实需要在磁场中移动以在线圈区域上感应出电压。

当异常的垂直边缘具有较大的范围和深度时，磁化方向非常重要，因为漏磁信号最大。磁化有两大类：轴向和环向（圆周或螺旋）。

#### a) 轴向漏磁

当 ILI 工具的磁铁以环状结构放置在工具的正面和背面时，就会产生轴向磁化强度；每个环具有彼此相反的极化。在两个磁极之间，将传感器放置在磁化方向完全或大部分沿轴向对齐的位置。具有周向范围和可观深度的金属损失将破坏产生由传感器测量的 MFL 的磁通量。

在凹陷检测中，轴向磁化用于检测和测量非轴向倾斜的金属损耗。它还可以检测不同轴的沟槽。对于相互作用的威胁，轴向场很容易检测到环焊缝。根据焊缝的几何形状和磁性能，焊缝通常是检测不到的。对于较深的凹陷，传感器臂将被移动，根据工具的磁性性能，它将测量靠近工具体位置，并在施加的轴向磁场中旋转，测量靠近管壁的施加磁场的减少量。

#### b) 环向(圆周或螺旋)漏磁

ILI 工具可设计为在管道的横向方向上感应磁化。通过使磁场位于该方向，该工具可以检测轴向异常并确定其大小，而周向异常不太可能被检测到并确定其大小。有几种设计可以做到这一点，但基本原理是横向（圆周或螺旋）定位相对的磁极。磁极的数量可以变化，但它们必须始终是两个的倍数，以便每个磁极的两侧都有一个相对的磁极，这样磁通线将横向移动到相对的磁极。

在凹陷检查中，横向磁化器可以检测凹陷中的轴向金属损失并确定其大小以及轴向定向的气刨。横向充磁机可以检测接缝焊缝并确定其是否与凹陷相互作用。

### B. 1. 1. 3 残余和低场漏磁

残余磁场（RES）和低场漏磁（LFM）也利用管线钢的铁磁性进行检测，类似于高场漏磁。不同的是磁化强度。如果高磁场漏磁提供了一个磁场水平，使管壁材料磁饱和，则 RES 和 LFM 技术要么依赖于高磁场漏磁（RES）的残余磁场，要么提供较低的饱和场强（LFM）来检测管道材料的性能变化。这些技术可用于检测和表征重合特征，例如导致局部残余应力的凹陷中的硬点和刨削。凹陷可以通过压缩和拉伸应变的变化来确定，这些应变可以通过低场磁化来检测。

### B. 1. 1. 4 超声波工具

大多数超声(UT)技术的 ILI 工具侧重于检测和识别金属损失(UTWM)或裂纹异常(UTCD)，这将完全取决于超声传感器的布置。传感器布置位置经过优化，使超声波传感器更靠近管道内壁，从而减小间距，提高了运行时间。当超声换能器通过变形时，超声数据将显示发射，信号被解释为变形。

采用了不同的传感器载体布置并进行了优化，从而能够准确地检测和测量变形。该传感器载体将超声换能器固定在距离管壁较远的位置，因此升力效应不影响测量。当超声换能器通过有变形的管道截面时，隔距减小量被记录下来，因此，准确的凹陷形状和完整的管道截面都能被记录。

### B. 1. 1. 5 多个数据集

ILI 供应商越来越多地在一个工具底盘上提供具有多种检测技术的 ILI 工具。这些工具提供了降低的检查成本和完全集成在平台技术之间的数据。这种能力在识别一致的特征和相互作用的缺陷（如机械损伤）方面特别有用。一些供应商提供了一种模块化的工具设计方法，允许操作人员灵活地选择想要使用的检测技术。多种检测技术的组合可以导致 ILI 供应商能够提供额外的检测、分类和分级。

## B. 1. 2 重合特征和相互作用缺陷识别

### B. 1. 2. 1 金属损失特征

使用几何工具和漏磁工具可以识别金属损失的凹陷。几何形状将测量凹陷的内表面轮廓，磁性将跟随变形管道的轮廓而不发生泄漏，直到被渗透性变化（即金属损失）打断。无论是在管道的内表面还是外表面，金属损失引起的漏磁都是可以测量的。

**B. 1. 2. 2 凿槽特征**

为了将腐蚀金属损失从气刨中分离出来，最好使用额外的方式，如横向磁化和 LFM。横向磁场可以检测出刨削的锐边特征，如果刨削是轴向对齐的，则轴向磁化可能会遗漏这些特征。LFM 对钢在气刨过程中硬化时发生的渗透性变化非常敏感。MFL 中观察到的金属损失和 LFM 中的显著渗透率变化的组合可以表明异常更可能是凿槽与腐蚀。

**B. 1. 2. 3 裂纹特征**

凹陷内的裂纹可通过裂纹检测技术进行检测并确定尺寸。根据工具设计，裂纹工具可能会沿着变形管壁的轮廓，寻找与裂纹面相关的反射信号。

有两种常见的 ILI 裂纹检测技术：液体耦合角束超声法(UTCD)和电磁声传感器(EMAT)。在凹陷检测中，这些技术可以检测和测量相互作用的裂纹缺陷。

a) 液体耦合角束超声法。液体耦合超声工具（UT）在传感器载体上布置的一系列 UT 传感器中产生超声波脉冲，利用液体耦合剂将脉冲传输到管壁。超声波脉冲穿过管道材料，直到遇到裂纹面，此时一部分超声波脉冲将反射到超声波传感器。

b) 电磁辐射。EMAT 利用与磁学有关的物理原理，在不需要液体耦合装置的情况下，将声波导入管壁。声波通过管壁传播，当遇到裂纹面时，声波的一部分会反射到接收传感器上。

**B. 2 凹陷几何轮廓拟合方法**

凹陷的几何特征识别，需要拟合管道凹陷区域的环向和轴向截面轮廓曲线，通过轮廓曲线可识别凹陷各位置的深度、曲率、特征长度和宽度、轮廓面积等几何形状特征参数，为凹陷筛选、应变评价提供条件。凹陷的轮廓曲线可采用 B 样条曲线和三次样条曲线插值得到。

**B. 2. 1 B 样条插值**

B 样条曲线以贝塞尔曲线为基础，贝塞尔曲线是采用伯恩斯坦多项式为基函数的参数曲线，对于  $0 \leq t \leq 1$ ，伯恩斯坦基函数定义如下：

$$b_i^n(t) = \begin{cases} C_n^i t^i (1-t)^{n-i}, & i=0,1,\dots,n, \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \dots\dots\dots (B.1)$$

根据定义可知，伯恩斯坦基函数具有函数递推性，即  $n$  次伯恩斯坦基函数可分别递推表示成两个  $n-1$  次或  $n+1$  次的伯恩斯坦基函数的线性组合，即：

$$b_i^n(t) = (1-t)B_i^{n-1}(t) + tB_{i-1}^{n-1}(t) \dots\dots\dots (B.2)$$

$$b_i^n(t) = \frac{i+1}{n+1} B_{i+1}^{n+1}(t) + \left(1 - \frac{i}{n+1}\right) B_i^{n+1}(t)$$

由伯恩斯坦基函数的性质可知高阶贝塞尔曲线可由低阶贝塞尔曲线表示，如果凹陷轮廓采用三次贝塞尔曲线描述，则该曲线可由如下过程推出：

线性贝塞尔曲线表达式如下：

$$B(t) = P_0 + (P_1 - P_0)t = (1-t)P_0 + tP_1, t \in [0,1] \dots\dots\dots (B.3)$$

如图 B.1 a) 所示, 线性贝塞尔曲线只是两数据点之间的直线段, 而两数据点之间的值则按线性分布, 即如式 (B.3) 所示。

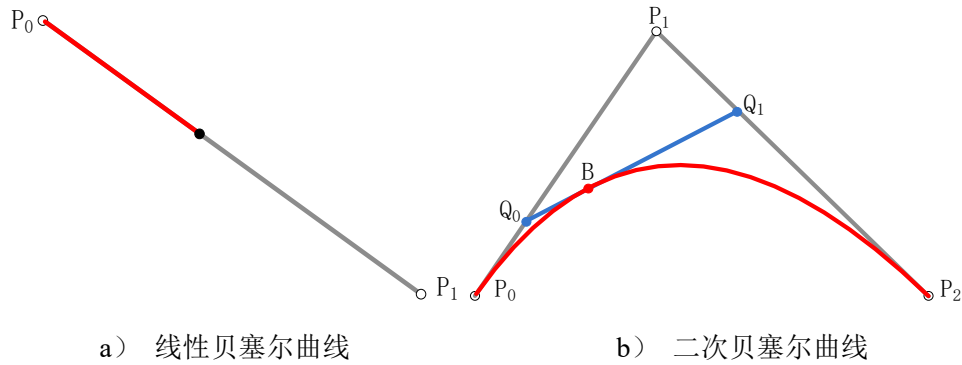


图 B.1 贝塞尔曲线示意图

二次贝塞尔曲线由两条线性贝塞尔曲线的线性组合而成, 如图 B.1 b) 所示, 对于点  $P_0$ 、 $P_1$  和  $P_2$  定义的二次贝塞尔曲线数学定义如下:

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t) P_1 + t^2 P_2, t \in [0,1] \dots\dots\dots (B.4)$$

同理, 三次贝塞尔曲线由二条二次贝塞尔曲线组合, 而每条二次贝塞尔曲线又可由线性贝塞尔曲线组合, 如图 B.2 所示。

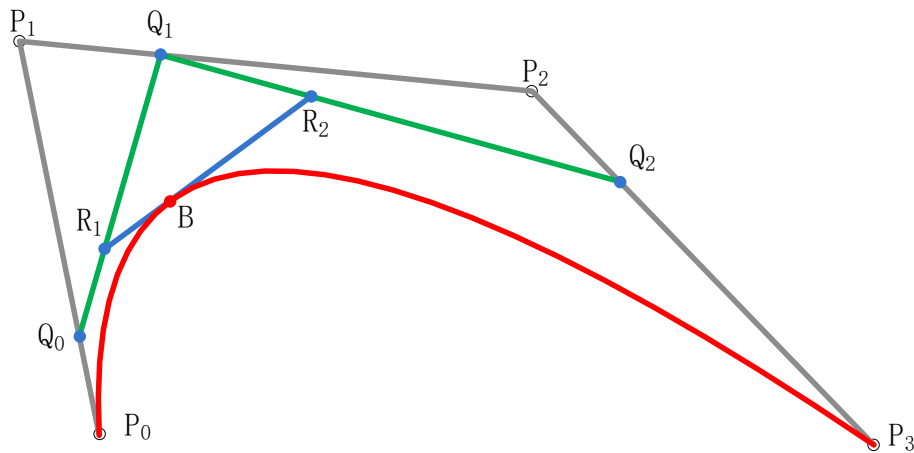


图 B.2 三次贝塞尔曲线示意图

三次贝塞尔曲线的数学定义如下:

$$B(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3, t \in [0,1] \dots\dots\dots (B.5)$$

该式也可表示为:

$$\begin{aligned}
 B(t) &= \begin{bmatrix} (1-t)^3 & 3t(1-t)^2 & 3t^2(1-t) & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B.6) \\
 &= \begin{bmatrix} b_0^3 & b_1^3 & b_2^3 & b_3^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \\
 &= \sum_{i=0}^3 b_i^3 P_i(t), t \in [0,1]
 \end{aligned}$$

$b_i^n$  即伯恩斯坦基多项式，定义如式 (B.1) 所示。

为描述凹陷的轮廓，则需要根据变径检测数据点将其轮廓曲线分割为若干段贝塞尔曲线，各段曲线的定义如下所示，假设数据点为  $n+1$  个。

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) = \sum_{i=0}^n b_i^3 P_i^0(x) & x \in [x_0, x_1) \\ S_1(x) = \sum_{i=0}^n b_i^3 P_i^1(x-x_1) & x \in [x_1, x_2) \dots\dots\dots (B.7) \\ \vdots & \vdots \\ S_n(x) = \sum_{i=0}^n b_i^3 P_i^n(x-x_n) & x \in [x_n, x_{n-1}] \end{cases}$$

B 样条曲线的表示方法与贝塞尔曲线类似，即保留了贝塞尔方法的优点，又克服了其由于整体表示带来的不具有局部性质的缺点，本质上是由若干段贝塞尔曲线构成的，但又与普通的分段贝塞尔曲线简单拼接不同，可以保证在各曲线段拼接处的二阶导数连续。三次 B 样条曲线的数学表达式为：

$$\begin{aligned}
 P_i(t) &= \sum_{j=0}^3 B_{j,3}(t) P_{i+j} \\
 &= \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \\ P_{i+3} \end{bmatrix}, i = 0, 1, \dots, n-3 \dots\dots\dots (B.8)
 \end{aligned}$$

其中的基函数亦可以表示为：

$$\begin{cases} B_{i,0}(t) = \begin{cases} 1, t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \\ B_{i,k}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+k}-t_i} B_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k+1}-t}{t_{i+k+1}-t_{i+1}} B_{i+1,k-1}, 3 \geq k \geq 1 \dots\dots\dots (B.9) \\ \text{假定: } \frac{0}{0} = 1 \end{cases}$$

以上三次 B 样条曲线并不能保证所得曲线经过每个检测数据点，还需要通过反求控制点的方法保证曲线的插值。

### B.2.2 三次样条插值

三次样条具有连续的一、二阶导数，因此应用较为广泛，虽然三次样条的三阶导数和高阶导数可能是不连续的，但其在直观上并不能觉察到，影响较小，所以可以满足凹陷轮廓插值要求。

假设检测数据点沿轮廓曲线分布个数为  $n+1$  个，曲线则被分为  $n$  段，每相邻两个数据点之间的曲线段可由三次样条插值函数  $s(x) = ax_i^3 + bx_i^2 + cx_i + d$  表示，每个多项式含有 4 个待定系数，所以整个插值区间上有  $4n$  个系数，则需要建立  $4n$  个方程联立求解。

根据变径数据，每个曲线段的两个端点已知，即得到  $2n$  个方程，另外由于凹陷轮廓的连续性，相邻 2 个曲线段在相邻端点处应该一阶和二阶导数连续，由此可根据  $n-1$  个相邻端点确定  $2n-2$  个方程，结合检测数据点，已得到  $4n-2$  个方程，如公式 (B.10) 所示。

$$\begin{cases} s(x_i - 0) = s(x_i + 0) = s(x_i) \\ s'(x_i - 0) = s'(x_i + 0) \\ s''(x_i - 0) = s''(x_i + 0) & i=1,2,\dots,n \quad \dots\dots\dots (B.10) \\ s(x_0 + 0) = s(x_0) \\ s(x_{n+1} - 0) = s(x_{n+1}) \end{cases}$$

另外 2 个约束方程可以由轮廓曲线两端的边界条件给出，当曲线两端的径向位移值给定之后，曲线两端的边界条件有如下 3 类：

(1) 固支梁边界条件，即两 endpoint 的一阶导数为定值：

$$s'(x_0 + 0) = m_0, s'(x_{n+1} - 0) = m_{n+1} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

(2) 弯矩边界条件，即两 endpoint 的二阶导数为定值：

$$s''(x_0 + 0) = M_0, s''(x_{n+1} - 0) = M_{n+1} \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

特别地，当两端的二阶导数为零时，即  $s''(x_0 + 0) = 0, s''(x_{n+1} - 0) = 0$ ，则称为自然边界条件。

(3) 周期性边界条件，即两 endpoint 相互连接，具有共同的一阶和二阶导数：

$$\begin{cases} s'(x_0 + 0) = s'(x_{n+1} - 0) \\ s''(x_0 + 0) = s''(x_{n+1} - 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

此时一般有  $s(x_0) = s(x_{n+1})$ 。

### B.3 凹陷几何特征表征

对于单峰凹陷评价，可绘制凹陷最深点处的二维纵向和横向轮廓，通过轮廓曲线或等效面积来表征其几何特征。

凹陷二维轮廓表征时，可根据变形缺陷内检测信号数据中存在的噪声水平对凹陷轮廓进行平滑或近似处理。信号处理原则为保留轮廓形状，保留凹陷深度，从测量（信号）数据中去除噪声，产生单调凹陷轮廓，用于评估单峰凹陷的特征长度和面积。

凹陷轮廓数据应去除由噪声或性能不佳传感器引起的无效数据，但不应去除凹陷椭圆度信息，

表征凹陷几何特征时应包含凹陷处管道的椭圆度。

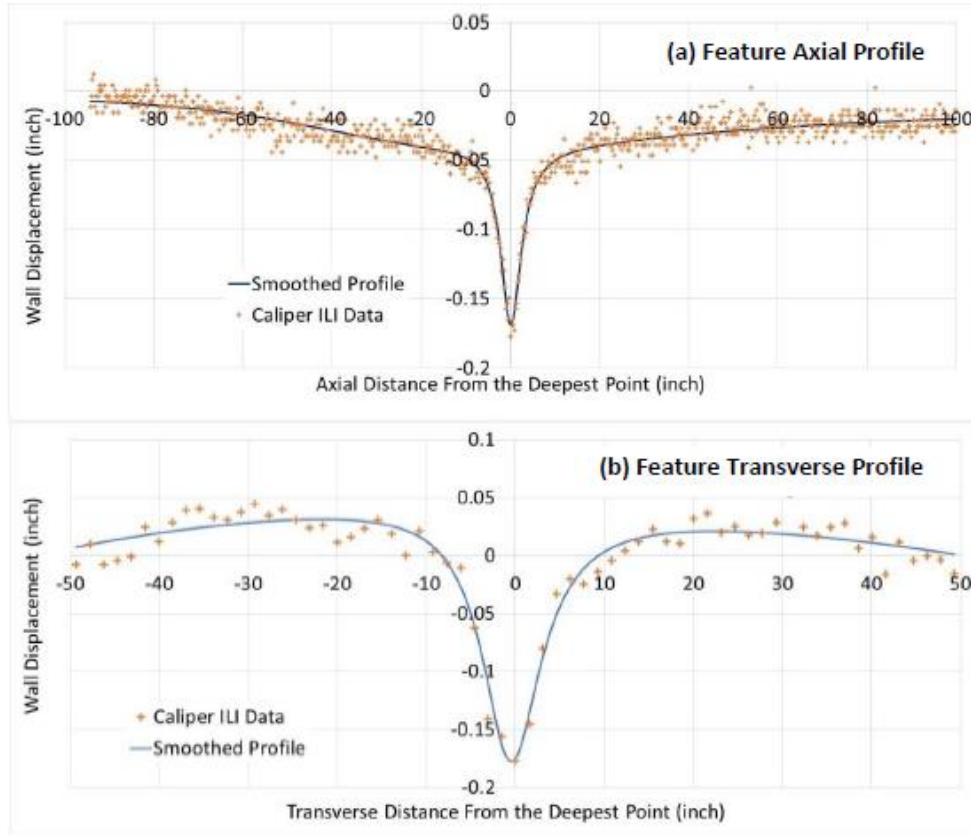


图 B.3 平滑凹陷轮廓图 (a) 轴向轮廓, (b) 横向轮廓

可用于定义凹陷轮廓的数据点数量取决于 ILI 工具的分辨率（轴向间距和管道周长周围的工具传感器数量）或沟渠中测量的数量以及随后用于平滑信号数据的平滑算法。每个操作员应根据其需要、管道直径和信息用途确定数据点的数量。应使用足够的数据点在凹陷横向轮廓（顺时针和逆时针）的每个肩部（侧面）上形成平滑轮廓。

表 B.1 包括用于计算凹陷约束参数和凹陷形状参数的几何参数。这些参数可以从 ILI 得到的凹陷轮廓或单峰凹陷的现场测量数据中提取。

表 B.1 中列出了计算约束和形状参数时不需要的附加参数。附加参数在表 B.1 中以灰色阴影文本突出显示并列，以便根据轴向和横向轮廓直接从特征长度生成凹陷轮廓，并支持凹陷评价技术的未来发展。表 B.1 中列出的参数定义如图 B.4 和图 B.5 所示。可以通过凹陷最深点检查整个纵向或横向轮廓，并确定特征长度和面积。

特征轴向和横向长度和面积应在上下游方向以及从凹陷最深点开始的顺时针和逆时针方向确定。这些特征长度可能支持不对称单峰凹陷的评估。计算不对称凹陷的单个上游和下游（或顺时针和逆时针）特征长度，以计算单个形状参数。

当具有多个管接头的均匀椭圆形管段包含凹陷时，应根据管壁恢复为椭圆形形状来评估特征长度。

表 B.1 在凹陷峰值捕获凹陷形状所需的单峰凹陷几何参数、约束参数和形状参数计算

轴向长度	环向范围或宽度	轴向区域	环向区域
------	---------	------	------

$L_{95\%}^{AX}$	$L_{90\%}^{TR}$	$A_{85\%}^{AX}$	$A_{85\%}^{TR}$
$L_{90\%}^{AX}$	$L_{85\%}^{TR}$	$A_{75\%}^{AX}$	$A_{75\%}^{TR}$
$L_{85\%}^{AX}$	$L_{80\%}^{TR}$	$A_{60\%}^{AX}$	$A_{60\%}^{TR}$
$L_{75\%}^{AX}$	$L_{75\%}^{TR}$	$A_{50\%}^{AX}$	$A_{50\%}^{TR}$
$L_{60\%}^{AX}$	$L_{70\%}^{TR}$	$A_{40\%}^{AX}$	$A_{40\%}^{TR}$
$L_{50\%}^{AX}$	$L_{60\%}^{TR}$	$A_{30\%}^{AX}$	$A_{30\%}^{TR}$
$L_{40\%}^{AX}$	$L_{50\%}^{TR}$	$A_{20\%}^{AX}$	$A_{20\%}^{TR}$
$L_{30\%}^{AX}$	$L_{40\%}^{TR}$	$A_{15\%}^{AX}$	$A_{15\%}^{TR}$
$L_{20\%}^{AX}$	$L_{30\%}^{TR}$	$A_{10\%}^{AX}$	$A_{10\%}^{TR}$
$L_{15\%}^{AX}$	$L_{20\%}^{TR}$	-	-
$L_{10\%}^{AX}$	$L_{15\%}^{TR}$	-	-
$L_{5\%}^{AX}$	$L_{10\%}^{TR}$	-	-

注 1：表中所有列出的数据（包括轴向和环向）都应根据轴向剖面所确定的最大凹陷总变形深度计算，这表明从轴向凹陷剖面所测得的总凹陷变形深度可能与从周向凹陷剖面所推断的总凹陷变形深度不同。报告中基于上述参数计算的最大凹陷总变形深度。

注 2：在测量凹陷形状的时，管道的内压应该作为特征描述的一部分被收集、记录和使用。

在表 B.1 中，上标“TR”和“AX”分别表示凹陷通过凹陷峰值的环向和轴向轮廓。长度和面积参数中显示为下标的百分比是指凹陷深度已达到规定百分比深度值的位置。例如， $L_{10\%}^{AX}$  是指轴向凹陷长度，其定义为从凹陷峰值深度到凹陷深度达到凹陷最大深度值 10% 的轴向轮廓上的位置所测量的长度。图 B.4 展示了一些轴向长度定义。

如果凹陷长度（轴向方向）对应于不同的凹陷轮廓深度，则给定凹陷的总凹陷变形深度（即凹陷顶点）始终相同，并由轴向轮廓确定。轴向剖面沿着穿过凹陷最深点的管道纵轴，横向剖面沿着与轴向剖面相交并穿过轴向剖面中定义的凹陷最深点的圆周方向。

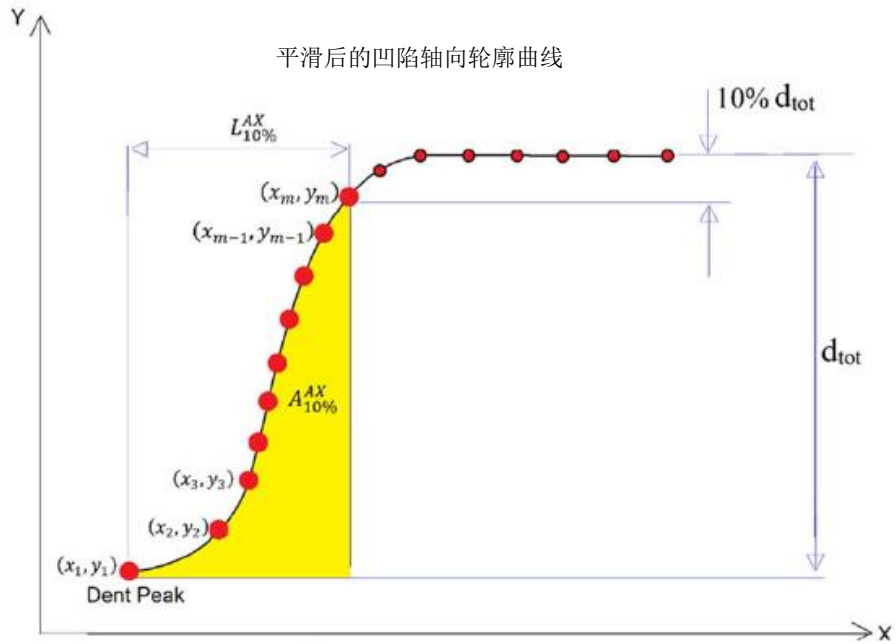
一旦确定了几何轴向长度和横向长度，基于梯形规则的方程式 (B.14) 可用作平滑凹陷轮廓下面积 (A) 的近似值。

$$A = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m (x_k - x_{k-1}) |(y_k - y_1) + (y_{k-1} - y_1)| \quad (\text{B.14})$$

其中， $m$  是平滑凹陷轮廓上的数据点数量， $(x_k, y_k)$  是轮廓上  $k^{\text{th}}$  点的坐标， $(x_1, y_1)$  是最深点（凹陷峰）的坐标，如图 B.4 所示。

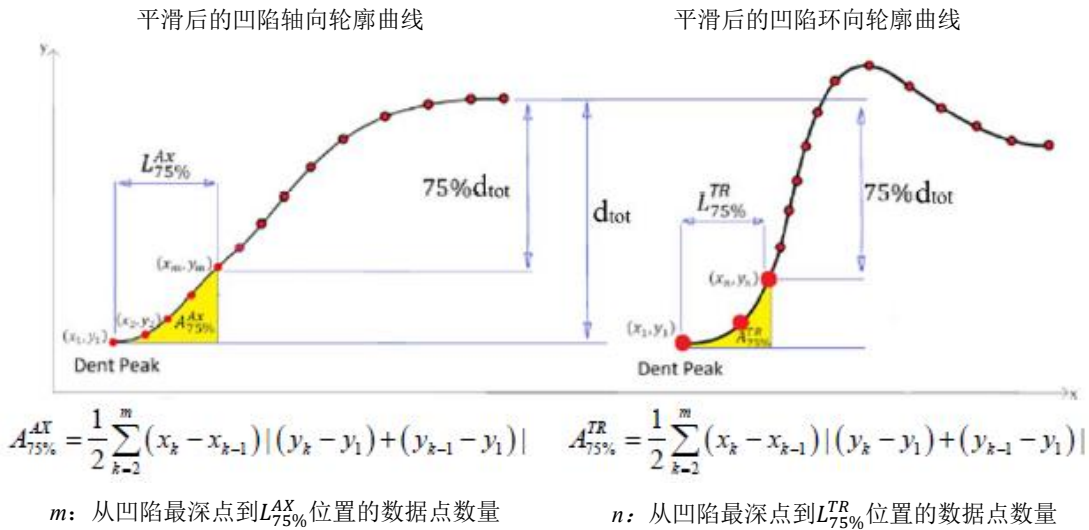
同样的定义也适用于环向轮廓的面积和长度计算。总凹陷变形深度  $d_{\text{tot}}$  位置（如纵断面中所定义）用作在轴向和环向断面中测量的特征长度的参考位置。





$$A_{0\%}^{AX} = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m (x_k - x_{k-1}) |(y_k - y_1) + (y_{k-1} - y_1)| \quad (B.15)$$

在公式 (B.15) 中  $m$ : 从凹陷最深点到  $L_{10\%}^{AX}$  位置的数据点数量。



$$A_{75\%}^{AX} = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m (x_k - x_{k-1}) |(y_k - y_1) + (y_{k-1} - y_1)| \quad A_{75\%}^{TR} = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^n (x_k - x_{k-1}) |(y_k - y_1) + (y_{k-1} - y_1)|$$

$m$ : 从凹陷最深点到  $L_{75\%}^{AX}$  位置的数据点数量

$n$ : 从凹陷最深点到  $L_{75\%}^{TR}$  位置的数据点数量

图 B.4 10%轴向长度和面积（顶部）和 75%轴向和横向长度和面积（底部）的示意图

如果指定深度值的 ILI 或现场数据中没有可用的数据点，则可以使用插值技术（如线性插值或样条插值）来查找指定长度的位置。图 B.5 示意性地显示了这一点。在高曲率区域，当可用数据点较少时，需要高阶插值。

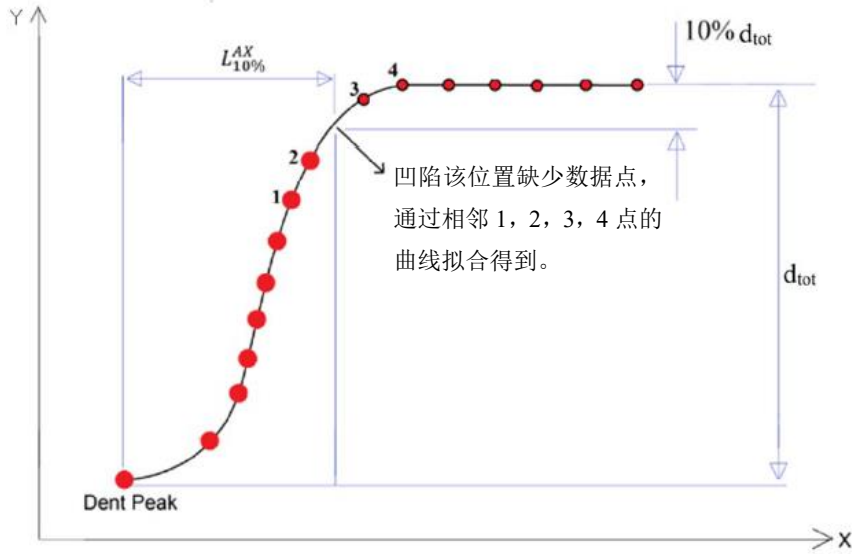


图 B.5 凹陷中指定管壁变形位置缺少数据情况下的样条插值示例

#### B.4 凹陷与沟槽重合特征识别与表征

##### B.4.1 凹陷与沟槽几何特征参量识别

可通过在线 ILI 设备或开挖无损检测来识别凹陷处是否存在沟槽。沟槽会降低管道凹陷适用性，沟槽特征包括深度和长度、方向、与凹陷位置、根部有无裂纹、以及其他重合特征。

如果沟槽不存在裂纹和局部硬化区，或者可通过打磨去除，则可以采用凹陷与腐蚀重合疲劳寿命评估方法进行处理。如果无法确定沟槽处裂纹和局部硬化区情况，则可将沟槽视为与凹陷相互作用的裂纹状特征，用沟槽长度代表裂纹长度，深度 0.5mm 进行疲劳寿命评估。

沟槽在表征前应圆滑过渡，表征方法如图 B.7 所示。当沟槽的长度方向与壳体轴线不平行时，应按式 (B.16)、式 (B.17)，将缺陷投影至轴向、环向平面，并分别确定缺陷的环向和轴向尺寸，如图 B.6 所示。

$$s = g_1 \cos \beta + g_w \sin \beta \quad (\beta < 90^\circ) \quad (\text{B.16})$$

$$c = g_1 \sin \beta + g_w \cos \beta \quad (\beta < 90^\circ) \quad (\text{B.17})$$

式中：

$s$ ——沟槽投影后的轴向长度，单位为 mm；

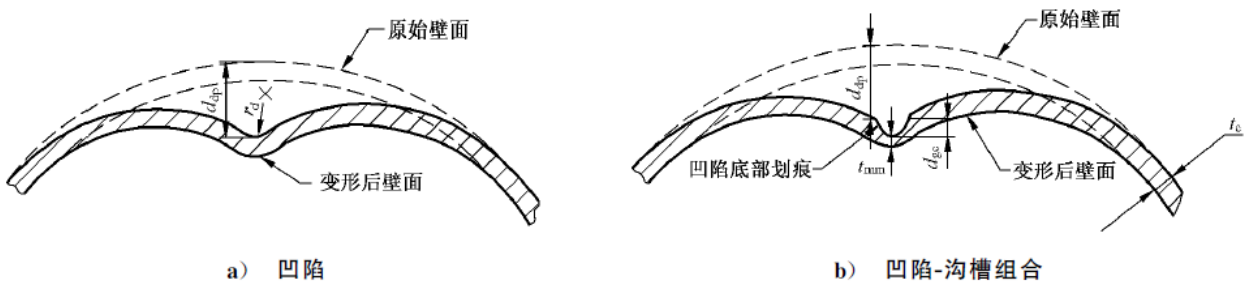


图 B.6 凹陷与沟槽重合特征表征示意图

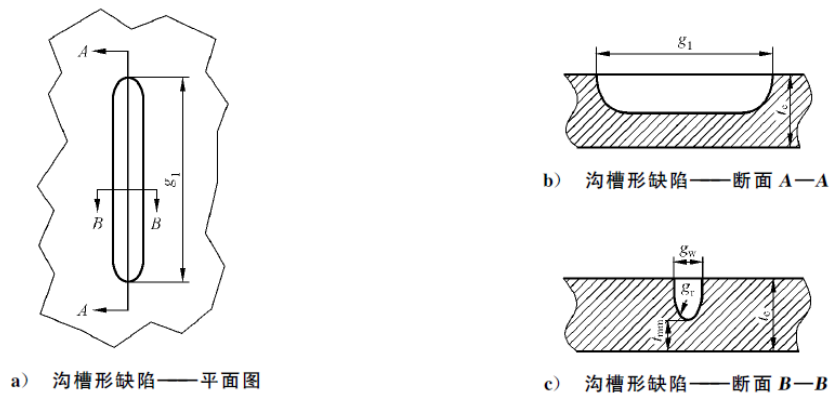


图 B.7 沟槽尺寸表征示意图

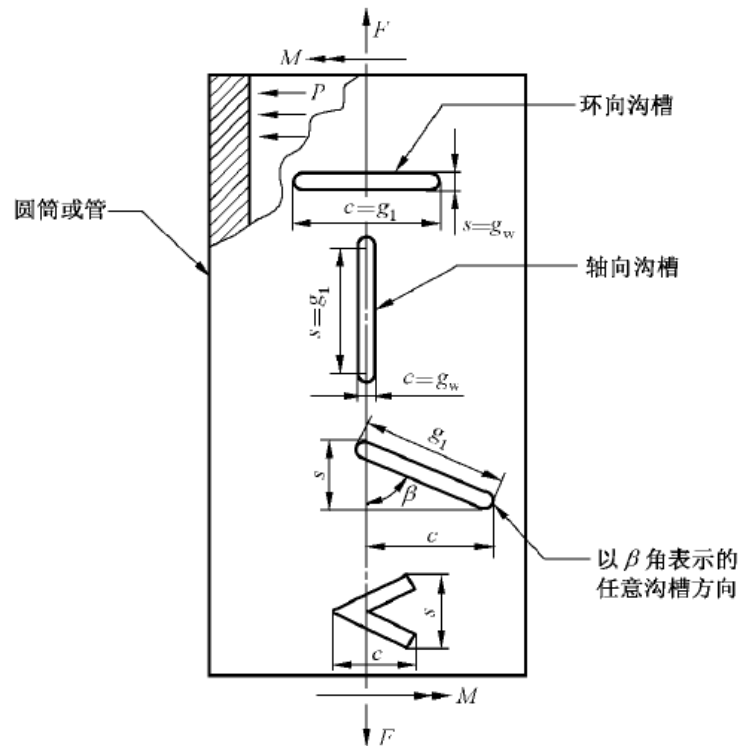


图 B.7 长度方向与壳体轴线不平行的沟槽尺寸表征示意图

#### B.4.2 凹陷几何特征筛选

按式 (B.18) 确定凹陷处计算壁厚  $t_c$ ，根据式 (B.19)、式 (B.20) 和式 (B.21) 进行筛选，不满足的凹陷，应进行剩余强度评价。

$$t_c = t_{rd} - FCA \quad (B.18)$$

$$L_{msd} \geq 1.8\sqrt{Dt_c} \quad (B.19)$$

$$L_w \geq \max \{2t_c, 25\text{mm}\} \quad (\text{B.20})$$

$$d_{dp} \leq 6\% \text{ OD} \quad (\text{B.21})$$

式中:

$t_c$ ——评价用计算壁厚, 单位为 mm;

$t_{rd}$ ——远离损伤区域的实测壁厚, 单位为 mm;

FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量, 单位为 mm;

$d_{dp}$ ——承压状态下实测凹陷深度, 单位为 mm;

$L_{msd}$ ——凹陷、沟槽或凹陷-沟槽组合到最近总体结构不连续处的距离, 单位为 mm;

$L_w$ ——凹陷、沟槽或凹陷-沟槽组合到最近焊缝的距离, 单位为 mm;

#### B. 4. 3 沟槽几何特征筛选

确定沟槽处最小实测壁厚  $t_{mm}$  和远离金属减薄区的实测壁厚  $t_{rd}$ , 不满足式 (B.22) 的沟槽, 应根据 GB/T 35013, 假定沟槽为面型缺陷进行剩余强度评价。

$$g_r \geq t_{rd} - t_{mm} \quad (\text{B.22})$$

式中:

$t_{mm}$ ——最小实测壁厚, 单位为 mm;

$t_{rd}$ ——远离损伤区域的实测壁厚, 单位为 mm;

$g_r$ ——沟槽缺陷的半径, 单位为 mm;

#### B. 4. 4 沟槽与凹陷几何特征重合筛选

按式 (B.23) 确定腐蚀后的沟槽深度  $d_{gc}$ , 根据式 (B.19)、式 (B.20) 和式 (B.21) 进行筛选, 不满足的凹陷, 应进行剩余强度评价。

$$d_{gc} = d_g + \text{FCA} \quad (\text{B.23})$$

式中:

FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量, 单位为 mm;

$d_g$ ——沟槽最大深度, 单位为 mm;

$d_{gc}$ ——腐蚀后的沟槽深度, 单位为 mm;

确定凹陷处计算壁厚  $t_c$ , 根据式 (B.18) ~ (B.20)、式 (B.24) ~ 式 (B.25) 进行筛选, 不满足的凹陷, 应进行剩余强度评价。

$$t_{mm} - \text{FCA} \geq 1.3\text{mm} \quad (\text{B.24})$$

$$d_{gc} \leq 0.66t_c \quad (\text{B.25})$$

式中:

$t_{mm}$ ——最小实测壁厚, 单位为 mm;

FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量, 单位为 mm;

$d_{gc}$ ——腐蚀后的沟槽深度，单位为 mm；

### B.5 凹陷与裂纹重合特征识别与表征

凹陷处的裂纹可通过在线 ILI 设备或开挖无损检测来识别，裂纹可能位于管道的内径或外径表面。由 ILI 检测发现的裂纹需开挖无损检测验证。所有与凹陷重合的裂纹都是相互作用的，会降低凹陷的适用性。裂纹特征识别应包括深度和长度、裂纹方向（如纵向、环向）、裂纹萌生面（即 ID 或 OD）、与凹陷位置关系、以及其他重合特征。

图 B.8 给出了凹陷与裂纹重合的案例。经过现场观察，全面测试和数值模拟，得到了凹陷特征中疲劳裂纹的位置、起始表面、方向和形式的发展趋势。该信息识别有助于管道凹陷疲劳裂纹识别，有助于分析 ILI 和现场开挖无损检测（NDT）裂纹识别。

图 B.8 中，浅凹陷指：凹陷深度  $d < 4\%OD$ （管道外径  $OD \leq 324\text{mm}$ ）和凹陷深度  $d < 2.5\%OD$ （管道外径  $OD > 324\text{mm}$ ），其他均为深凹陷。

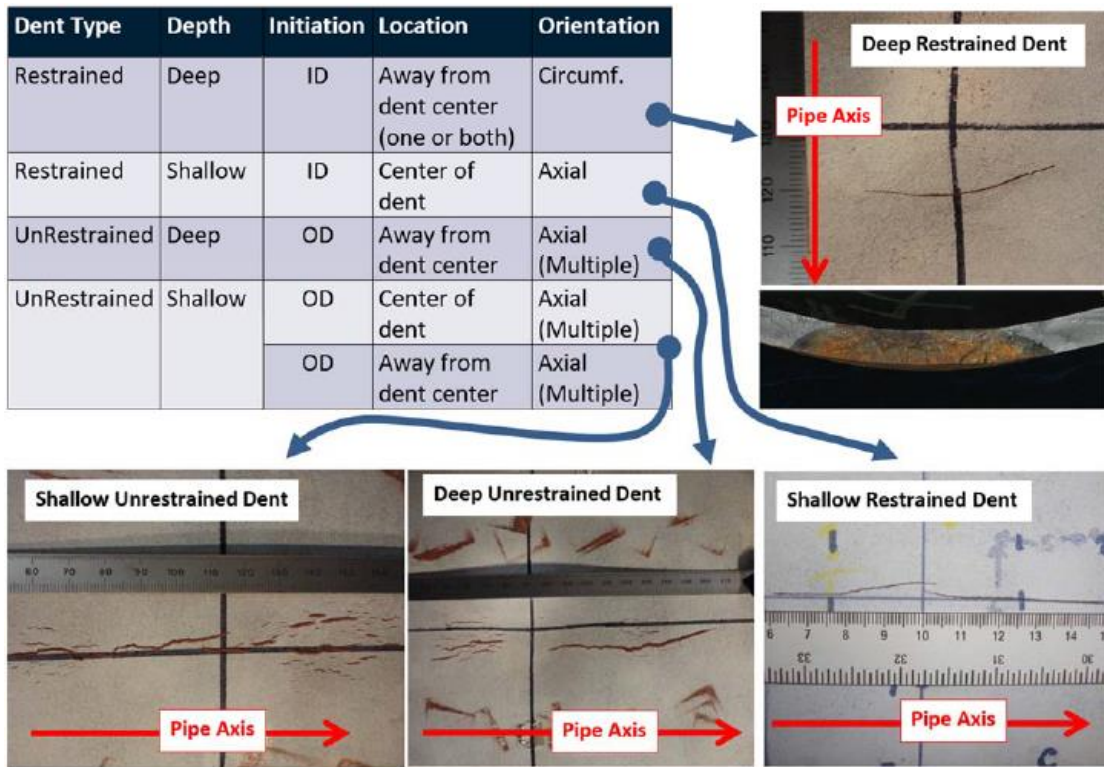


图 B.8 凹陷疲劳裂纹特征识别示意图，资料为含凹陷管道全尺寸疲劳试验中产生裂纹。

### B.6 凹陷与焊缝重合特征识别与表征

与凹陷重合的管道环焊缝、纵焊缝或螺旋焊缝可能会降低凹陷的适用性，应考虑凹陷与焊缝之间的相互作用影响。焊缝特征包括：焊缝方向、与凹陷最深点的相对轴向或周向位置，焊接类型（如 DSAW、SMAW、ERW）、焊缝无缺陷且质量良好（如果不能确定，可通过无损检测和焊缝适用性评估确定）。

判断凹陷与焊缝存在相互作用时，凹陷疲劳寿命折减至少 10 倍。

#### B.6.1 凹陷与环焊缝疲劳相互作用

公式 (B.26) 为凹陷与环焊缝可能相互作用影响管道疲劳寿命的判断标准。

$$d_c = a \times OD + b \quad (\text{B.26})$$

式中：

$d_c$ ——距离凹陷中最深点的轴向距离，单位为 mm。

如果焊缝与凹陷最深点的距离小于  $d_c$ ，则应将其视为相互作用。表 3 列出了约束凹陷和非约束凹陷的系数  $a$  和  $b$ 。

表 B.2 凹陷-环焊缝相互作用系数

约束条件	环焊缝相互作用常数外径 (mm)	
	$a$	$b$
约束凹陷	0.418	94.6
非约束凹陷	0.129	109.6

### B.6.2 凹陷与纵焊缝疲劳相互作用

凹陷与纵向焊缝的相互作用是指凹陷最深点两侧角扇形区域内的焊缝，可能影响凹陷的疲劳寿命。表 B.3 规定了凹陷与焊缝相互作用判断标准，对于约束凹陷和非约束凹陷，定义了不同的扇形区域。当

表 B.3 凹陷纵向焊缝相互作用参数

约束条件	纵焊缝相互作用扇形凹陷最深处的角度 ( $\theta$ )		
	度	时钟位置	
约束凹陷	40	1.333	
非约束凹陷	30	1	

### B.6.3 凹陷与螺旋焊缝疲劳相互作用

凹陷与环/纵焊缝的相互作用判断标准适用于螺旋焊缝。由于螺旋焊缝未与管道轴线对齐，应将螺旋焊缝在凹陷区域进行轴向和环向截面投影，如图 B.9 所示。相互作用区的长度  $2d_c$  和宽度  $2\theta$  应符合 B.6.1 和 B.6.2 节的规定。

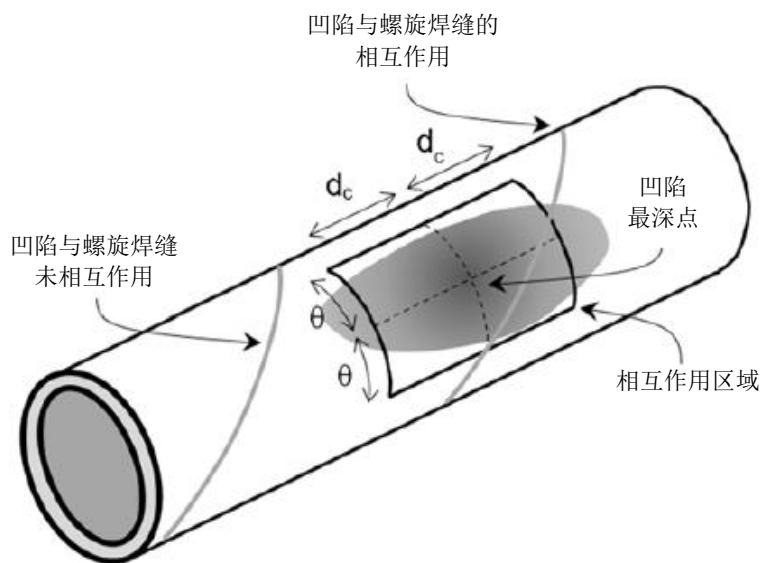


图 B.9 螺旋焊缝的交互区定义

### B.7 凹陷与腐蚀重合特征识别与表征

可通过在线 ILI 设备或开挖无损检测来识别凹陷处是否存在腐蚀。腐蚀会降低管道壁厚和表面光洁度，减少疲劳裂纹扩展的剩余韧带，增加管道表面的应力集中程度，可通过评估凹陷处表面光洁度和局部壁厚减薄效应来评估腐蚀对凹陷疲劳寿命的影响。

腐蚀特征识别应包括腐蚀最大深度（壁厚百分比）、腐蚀影响区域、受腐蚀影响的表面（即内径、外径）、与凹陷最深点的相对轴向或环向位置、腐蚀几何结构（如沟槽、一般腐蚀、点蚀等）、其他特征。

目前仍无凹陷与腐蚀位置相互作用判断标准，可采用 B.6 节凹陷与焊缝的相互作用判断标准（见图 B.9）。如果腐蚀特征的任何部分在相互作用区内，则腐蚀与凹陷相互作用，凹陷疲劳寿命会降低。

深度小于管道壁厚 30% 的腐蚀与凹陷相互作用对疲劳寿命影响可使用公式 (B.27) 进行评估判断。深度超过管道壁厚 30% 的腐蚀与凹陷相互作用对疲劳寿命影响可采用有限元仿真模拟和断裂力学相结合的方式进行评估。

$$RF_{LTA} = RF_{WT} \times RF_{sf} = (K_{sf} \times t_{nom} / t_{LTA})^3 \quad (\text{B.27})$$

式中：

$RF_{LTA}$  —— 疲劳寿命折减系数；

$RF_{WT}$  —— 管道凹陷处局部壁厚减薄效应；

$RF_{sf}$  —— 管道凹陷处表面光洁度效应；

$K_{sf}$  —— 疲劳强度折减系数，一般可取 1.24；

$t_{nom}$  —— 未腐蚀区域管道壁厚，单位为 mm；

$t_{LTA}$  —— 腐蚀区域管道减薄最小壁厚，单位为 mm。

## 附录 C

### (规范性)

### 凹陷筛选

#### C.1 基于风险的管道凹陷及严重性筛选流程

液体和气体管道凹陷筛选准则如图 C.1 和图 C.2 所示。将凹坑修复等级分为立即修复、1 年内修复优先顺序 1、1 年内修复优先顺序 2 和不需要修复四个等级，考虑了凹坑深度、凹坑处应变水平以及管道实际运行应力水平等因素。

与气体管道相比，液体管道在管段间的压力变化范围更大，最大正常工作压力更低，压力循环次数更多，因此，液体管道通常比气体管道更易受到疲劳损伤。

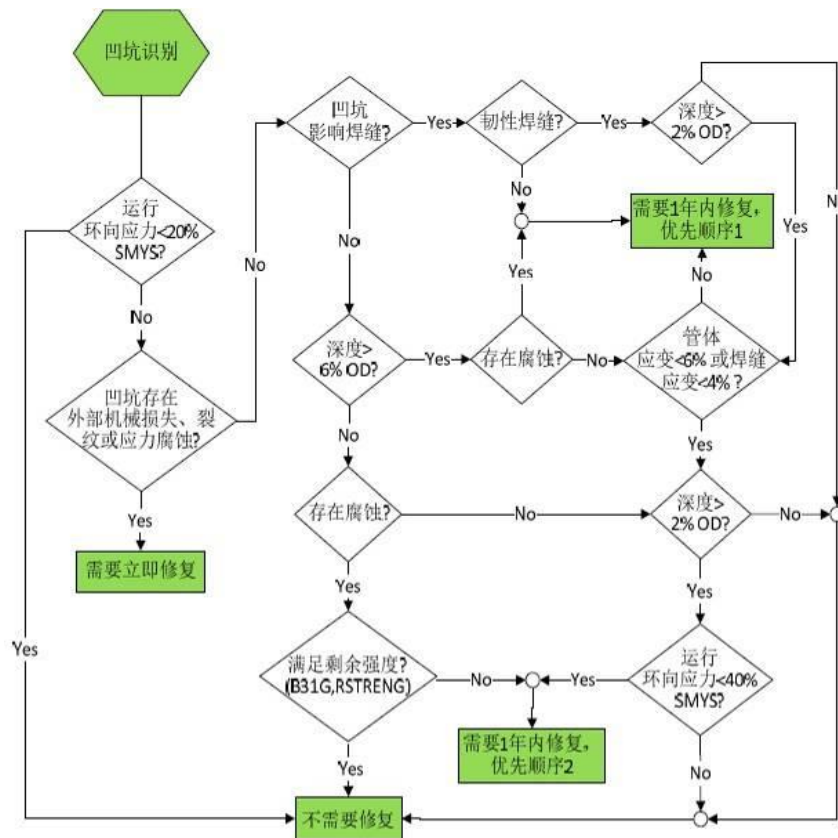


图 C.1 气体管道凹陷筛选流程



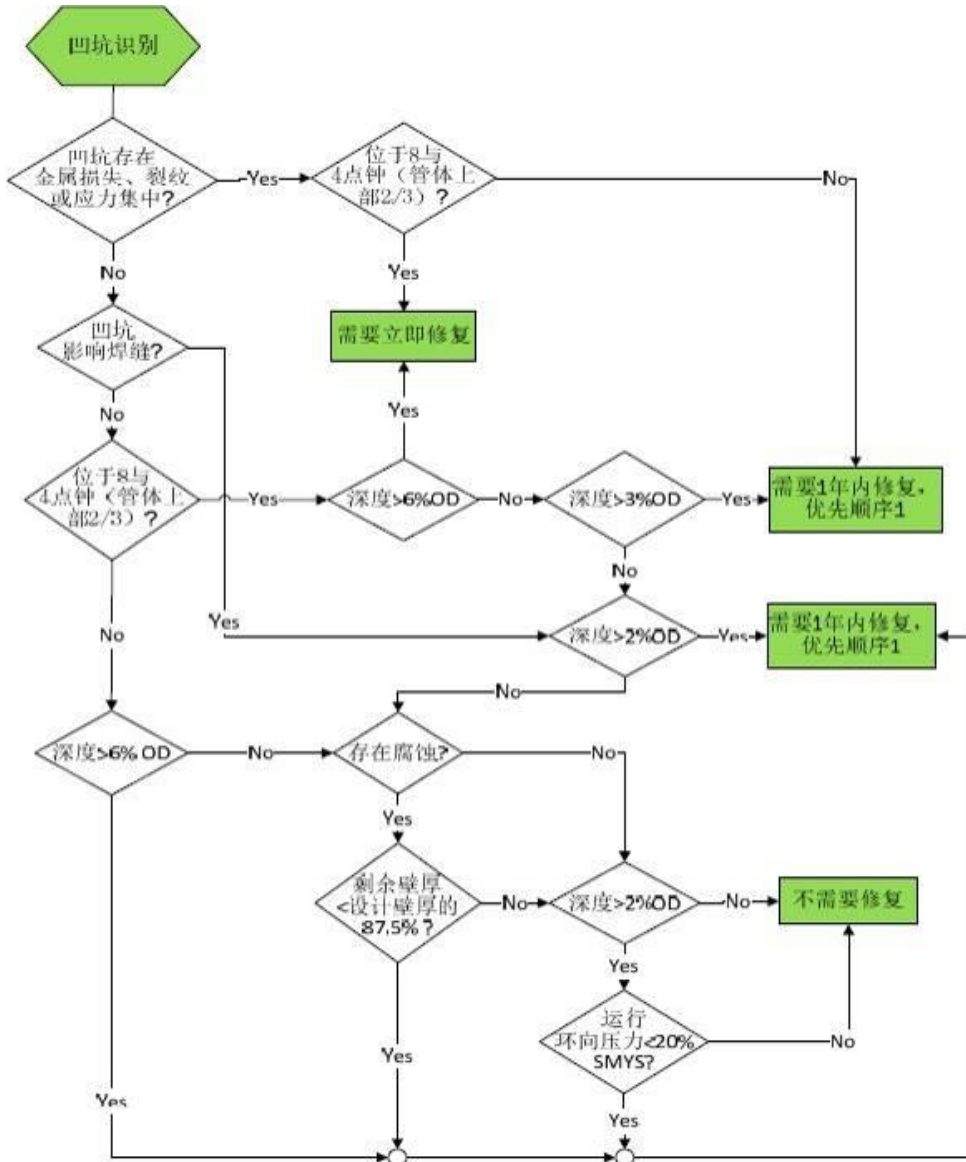


图 C.2 液体管道凹陷修复准则

本附录提供的筛选流程适用于平滑凹陷和含金属损失凹陷，主流程见图 C.1。如果凹陷包含金属损失，图 C.2 的流程评估腐蚀和沟槽类金属损失。如果凹陷是平滑的，可按图 C.3 流程评估凹陷的严重性。图 C.1 至 C.3 可同时适用于天然气和液体管道。如果凹陷中的金属损失评估为沟槽，可使用图 C.4 中更复杂的流程来评估响应时间，该评估流程是基于天然气管道的保守简化疲劳分析得出的，仅适用于天然气管道， $N_{eq}$  是给定天然气管道每年的等效 MAOP 循环次数，“年龄”是计算  $T_R$  得到的假定损坏年龄。如果无法说明损坏的年龄，则应考虑从施工时或管道寿命早期开始计算。

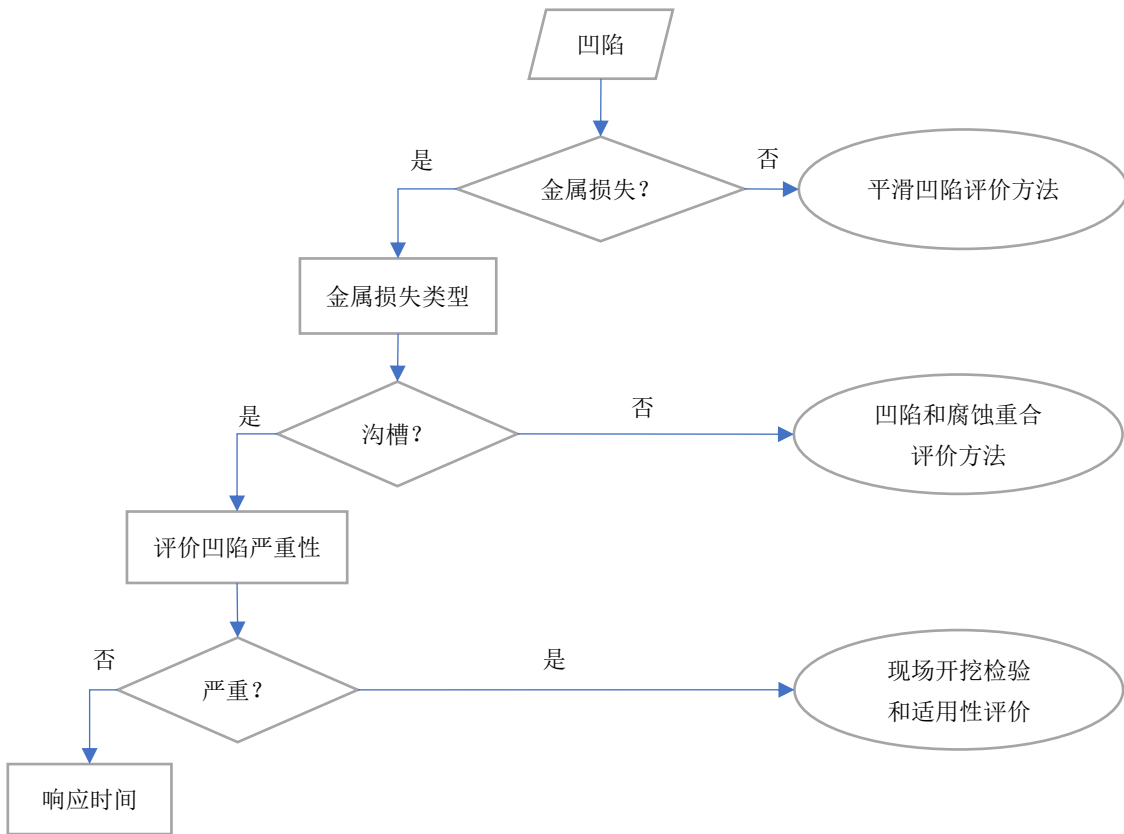


图 C.1 凹陷筛选总流程

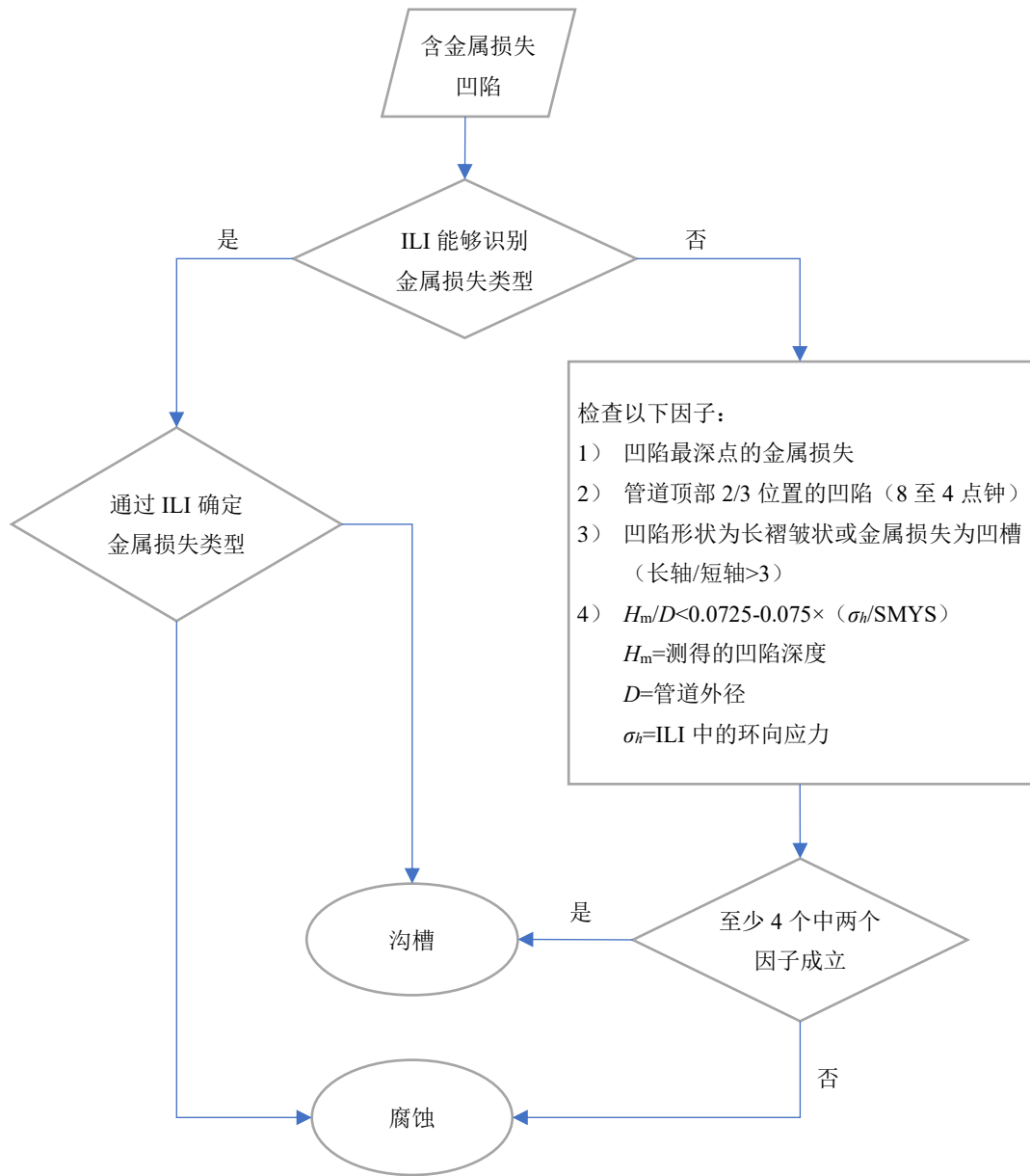


图 C.2 含金属损失（沟槽或腐蚀）凹陷的筛选子流程

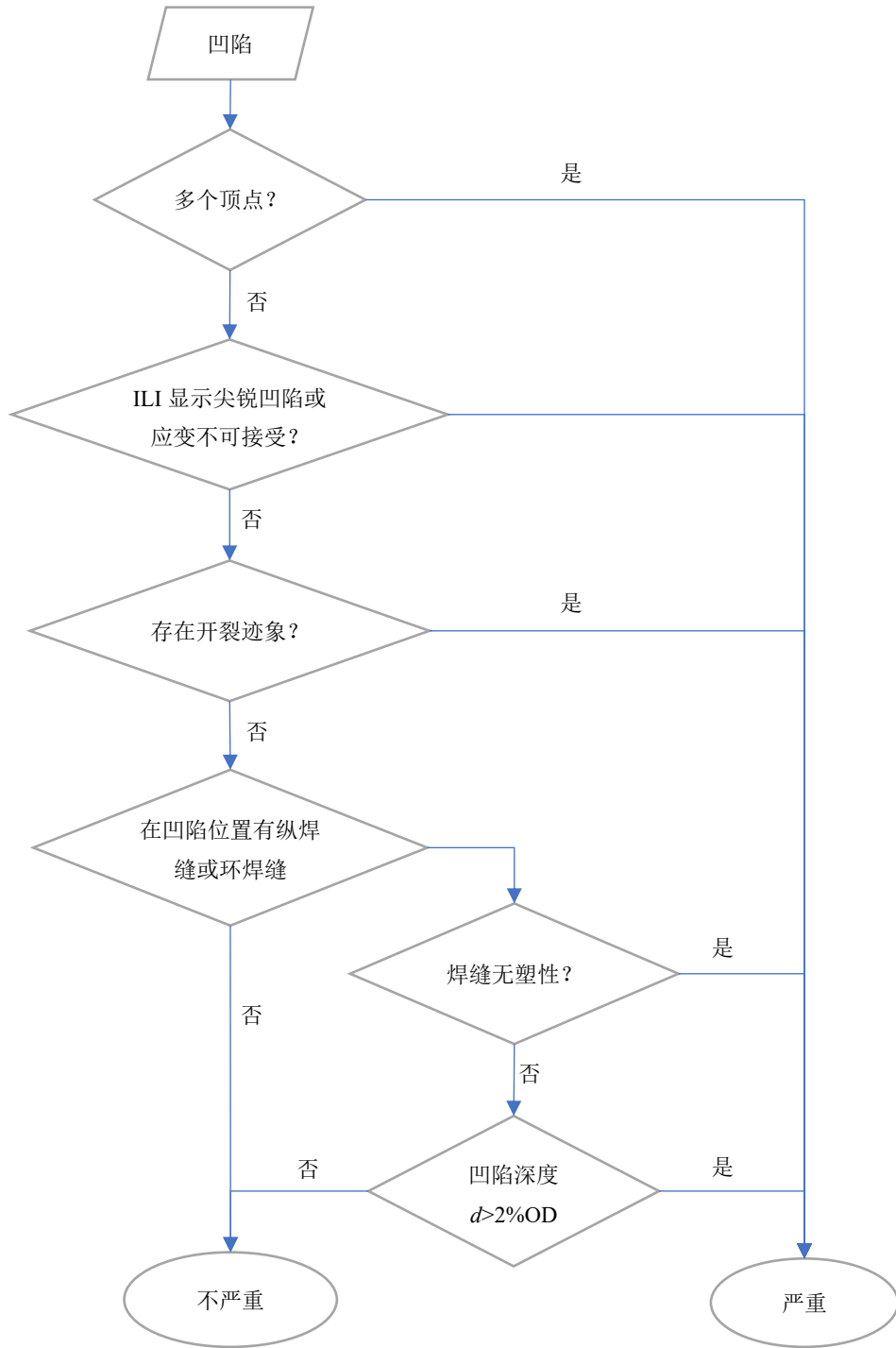


图 C.3 平滑凹陷严重程度筛选子流程

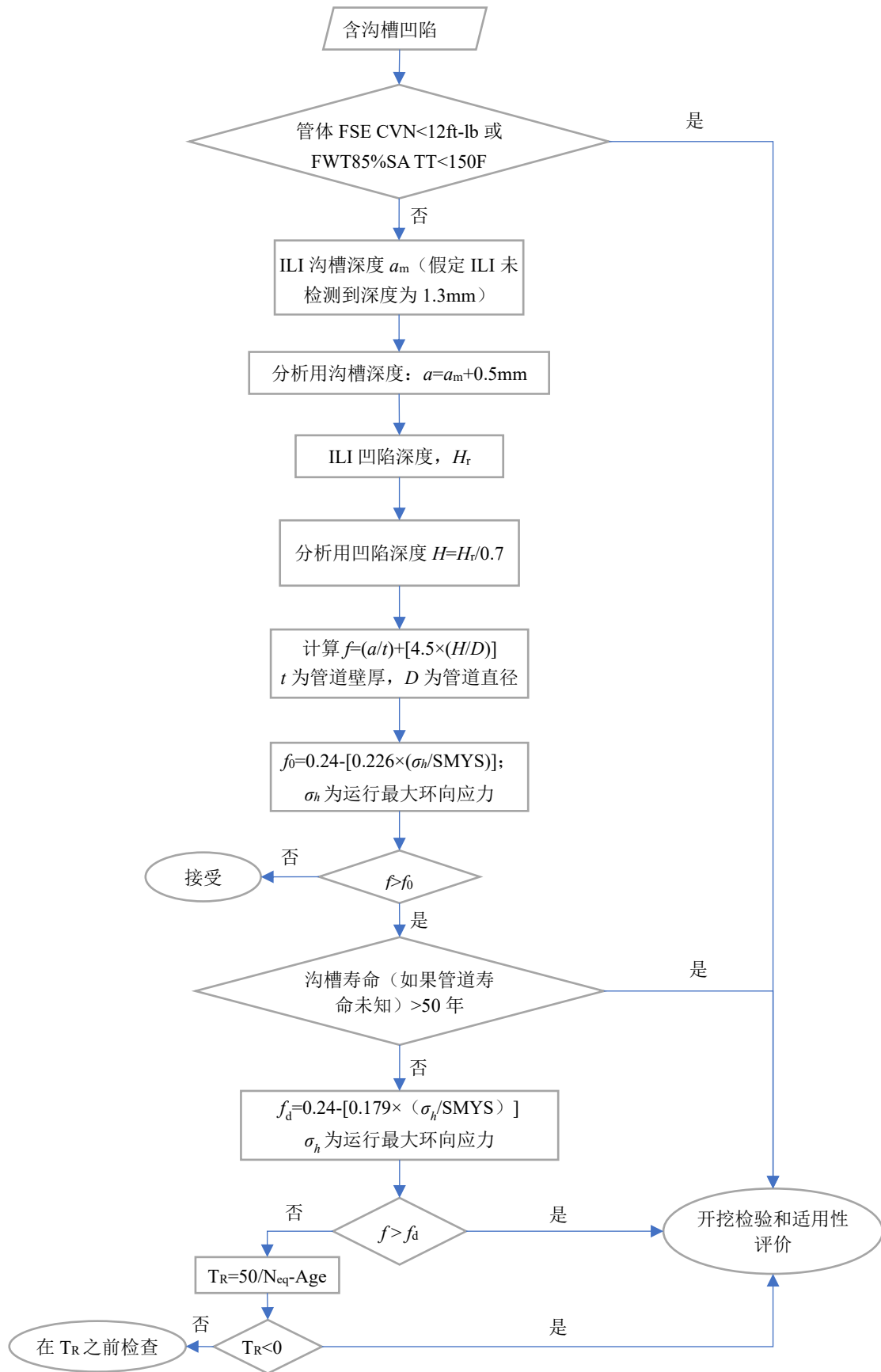


图 C.4 天然气管道含沟槽凹陷的响应时间筛选 (待核实)

## C.2 管道凹陷疲劳筛选

### C.2.1 基于 SSI 的管道凹陷疲劳筛选

分析含凹陷管段的时间-压力载荷谱，得到压力谱严重性指数（SSI），利用表 C.2 判断不同深度凹陷的下限疲劳寿命，未超过设计年限或预期使用年限的凹陷，应进行适用性评价。

表 C.2 适用于所有约束和非约束凹陷的疲劳寿命筛选。如果正在评估的凹陷 SSI 超过 2000，可通过外推进行评估。存在与焊缝或腐蚀等减薄缺陷重合的凹陷，可考虑疲劳折减系数后进行筛选。

表 C.1 凹陷疲劳寿命谱严重性筛选标准

SSI（每年以 90MPa 环向应力循环波动 的次数）	凹陷深度 $d_{tot}/OD \times 100$ （%）						
	d < 1.0	d < 1.5	d < 2.0	d < 3.0	d < 4.0	d < 5.0	d < 7.0
	疲劳寿命（年）						
10	5,692	5,276	4,899	3,964	3,705	3,252	3,053
30	1,897	1,759	1,633	1,321	1,235	1,084	1,018
50	1,138	1,055	980	793	741	650	611
70	813	754	700	566	529	465	436
90	632	586	544	440	412	361	339
110	517	480	445	360	337	296	278
130	438	406	377	305	285	250	235
150	379	352	327	264	247	217	204
200	285	264	245	198	185	163	153
300	190	176	163	132	124	108	102
400	142	132	122	99	93	81	76
500	114	106	98	79	74	65	61
750	76	70	65	53	49	43	41
1000	57	53	49	40	37	33	31
1250	46	42	39	32	30	26	24
1500	38	35	33	26	25	22	20
1750	33	30	28	23	21	19	17
2000	28	26	24	20	19	16	15

根据凹陷的相对深度划分为“浅凹陷”或“深凹陷”。“浅凹陷”定义为：

- a) 管道外径  $OD \leq 324\text{mm}$ ，凹陷深度  $d < 4\%OD$ ；
- b) 管道外径  $OD > 324\text{mm}$ ，凹陷深度  $d < 2.5\%OD$ ；

所有其他情况，被确定为“深凹陷”。

对于浅凹陷和所有无约束凹陷，可使用公式（C.1）计算以年为单位的下限疲劳寿命：

$$\text{Fatigue Life} > \frac{10^{\text{Log}_{10}(\sigma_{ref} K_M^{\text{Max}})}}{SSI} \quad (\text{C.1})$$

式中：

T/CASEI ×××××—××××

SSI——压力谱严重性指数；

$\text{Log}_{10}C$ ——S-N 曲线截距（ $\sigma_{ref}$  以 MPa 为单位， $\text{Log}_{10}C=12.6007$ ）；

$M$ ——S-N 曲线斜率；

$\sigma_{ref}$ ——参考环向应力范围（ $\sigma_{ref}=90\text{MPa}$ ）；

$K_M^{Max}$ ——凹陷特征的最大应力放大系数。对于非约束凹陷，压力 $>20\%P_{SMYS}$ 时， $K_M^{Max}=7.5[1-\exp(-0.065OD/t)]$ ，压力 $\leq 20\%P_{SMYS}$ 时， $K_M^{Max}=9.4[1-\exp(-0.045OD/t)]$ ；对于约束凹陷， $K_M^{Max}=0.1183(OD/t)-1.146$ 。

公式(C.1)适用于  $OD/t$  为 20-130 的各种规格管道。目前，还未开发出深凹陷的类似筛选方法。

### C. 2. 2 有限元建模筛选

在某些情况下，可通过创建凹陷管道形状的有限元模型来完成快速评估，但忽略了凹陷形成过程中产生的残余应力和凹陷的非线性行为。凹陷应力集中系数（SCF，注 C-1）方法利用 ILI 工具或现场测量（如激光扫描）获得的三维凹陷形状，并建立弹性有限元模型，以计算凹陷中的最大主应力，然后可用于计算每个凹陷的弹性应力集中系数（SCFs）。

SCF 分析可结合压力-时间载荷谱和 S-N 曲线，对凹陷的剩余疲劳寿命进行排序，适用于经历过振动到弹性作用的非约束凹陷。凹陷形成时，材料必然经过塑性应变形成永久变形。如果非约束凹陷受到低循环方式范围的影响，则不会产生额外的塑性应变，管材的疲劳以弹性方式表现。SCF 方法也可扩展到约束凹陷，但评估结果的保守性不确定。

注 10-1：SCF 定义为模型中的峰值应力与标称环向应力之比。应用于凹陷的标称压力应选择在凹陷的预期工作压力范围内。

**附录 D**  
(规范性)  
凹陷适用性评价方法

### D.1 基于凹陷形状轮廓的应变评估方法

#### D.1.1 管道凹陷应变计算流程

基于应变准则的含凹陷管道计算流程见图 D.1。

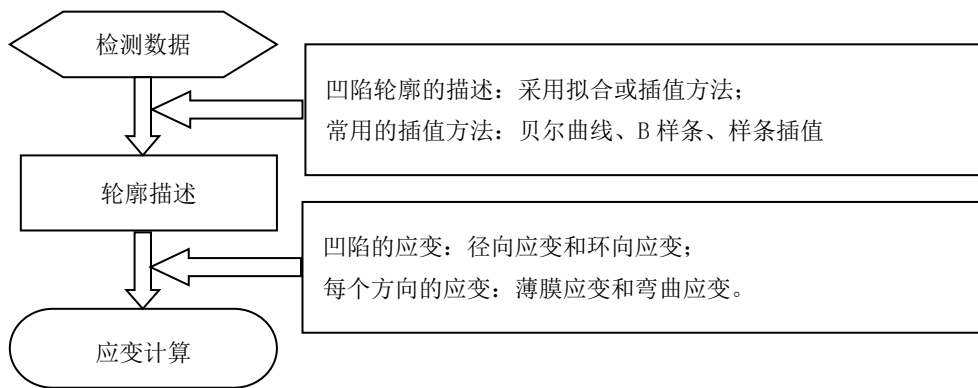


图 D.1 基于应变准则的含凹陷管道计算流程

#### D.1.2 管道凹陷应变计算

凹陷的应变分为环向应变和轴向应变，每个方向应变又由薄膜应变和弯曲应变组成，如图 D.2 所示。

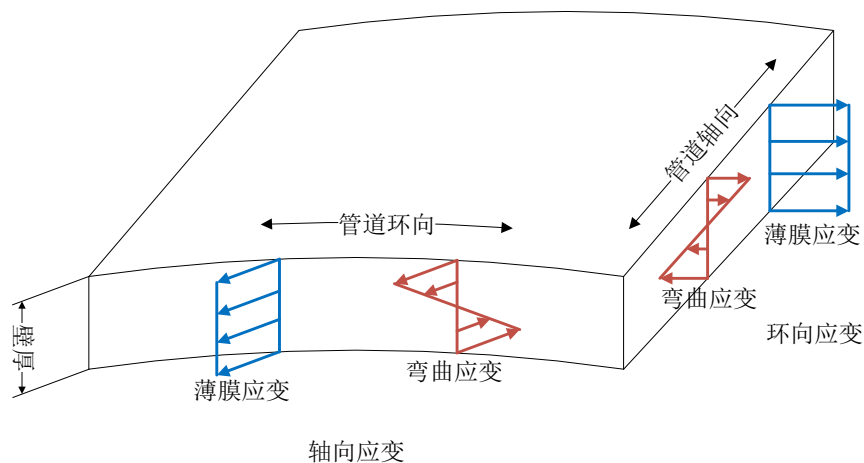


图 D.2 凹陷区域的应变组成

凹陷环向弯曲应变、轴向弯曲应变以及轴向薄膜应变计算见式 (D.1)：



$$\varepsilon_1 = \frac{t}{2} \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right), \quad \varepsilon_2 = -\frac{t}{2} \frac{1}{R_2}, \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{d}{L} \right)^2 \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- $\varepsilon_1$ ——环向弯曲应变;
- $\varepsilon_2$ ——轴向弯曲应变;
- $\varepsilon_3$ ——轴向薄膜应变;
- $t$ ——管道壁厚, mm;
- $R_0$ ——管道内半径, mm;
- $R_1$ ——管道横截面曲率半径, mm;
- $R_2$ ——管道轴向面曲率半径, mm;
- $L$ ——凹陷长度, mm;
- $d$ ——凹陷深度, mm。

两个曲率半径的定义如图 D.3 所示, 对于环向曲率半径, 当曲率圆圆心在管道轴线一侧时取正值, 否则取负值; 而对于轴向曲率半径, 一般均为内凹, 取为正值。

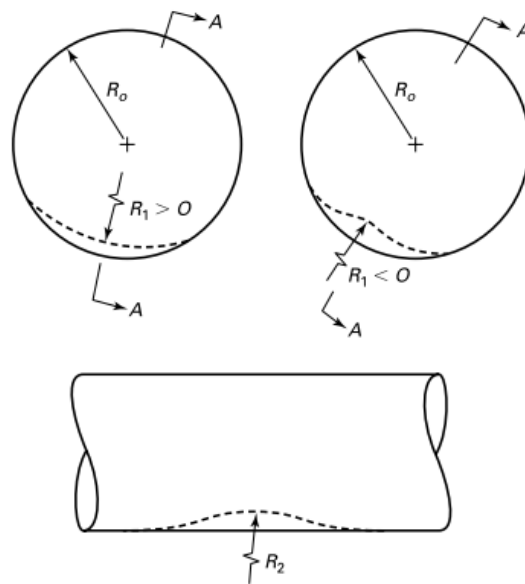


图 D.3 曲率半径的定义

凹陷处的总等效应变表达式为:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\varepsilon_x^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y^2} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

- $\varepsilon_{eq}$ ——凹陷处总等效应变;
- $\varepsilon_x$ ——管道轴向总应变,  $\varepsilon_x = \pm \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ ;
- $\varepsilon_y$ ——管道环向总应变,  $\varepsilon_y = \pm \varepsilon_1$ , “±”分别表示所求轴向应变和环向应变为管道内表面或者外表面应变。

将式 (D.1) 中各应变值代入式 (D.2) 得到管道内、外表面的等效应变:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{in}} &= \left[ \varepsilon_1^2 - \varepsilon_1 (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \varepsilon_{\text{out}} &= \left[ \varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 (-\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (-\varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

$\varepsilon_{\text{in}}$  ——管道内表面等效应变;

$\varepsilon_{\text{out}}$  ——管道外表面等效应变。

评价凹陷时, 取内、外表面应变值中的较大值:

$$\varepsilon_{\text{max}} = \max\{\varepsilon_{\text{in}}, \varepsilon_{\text{out}}\} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

$\varepsilon_{\text{max}}$  ——管道内外表面最大应变值。

### D. 1. 3 凹陷轮廓曲线的曲率

#### D. 1. 3. 1 极坐标系下环向曲率半径 $R_1$ :

$$R_1 = \frac{(\rho(\theta)^2 + \rho'(\theta)^2)^{3/2}}{\rho(\theta)^2 + 2\rho'(\theta)^2 - \rho(\theta)\rho''(\theta)} \Big|_{\theta=\theta_0} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

$\theta$  ——极坐标系中的极角,  $\theta = 3.14x/180$ ,  $x$  为直角坐标系中的横轴;

$\rho(\theta)$  ——插值得到的二维轮廓曲线在极坐标系下的表达式;

$\theta_0$  ——凹陷顶点处环向角度值, 应根据环向检测数据点的定位方法确定取值。

#### D. 1. 3. 2 直角坐标系下轴向曲率半径 $R_2$ :

$$R_2 = \frac{(1 + s(x)^2)^{\frac{3}{2}}}{|s(x)''|} \Big|_{x=x_0} \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

式中:

$s(x)$  ——插值得到的二维轮廓曲线表达式;

$x_0$  ——凹陷顶点处的轴向坐标, 应根据轴向检测数据范围确定取值。

利用插值法计算轮廓曲线的方法可以参照下面方法进行。

## D. 2 凹陷延性损伤失效指标 (DFDI) 计算

延性损伤失效是由材料微观尺度上孔洞的萌生、生长和合并以及大塑性变形期间裂纹的形成造成的。总延性损伤失效 DFDI 用于评估所经历的总损伤, 可通过公式 (D.7) 计算:

$$DFDI = \frac{\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_f} \quad (D.7)$$

当  $DFDI \geq 1$  时, 将发生韧性破坏或凹陷 (裂纹) 破坏。为了计算 DFDI, 需要进行有限元分析, 提取凹陷变形各节点的三个主应力和等效塑性应变。其目的是准确反映凹陷区域的应力状态。假设

未考虑其他因素，则可使用适当的安全系数与 DFDI。DFDI ≤ 0.6 作凹陷裂纹萌生安全性的保守指标。

根据管道承载特征，将上式简化，以确定 DFDI 参数的上限和下限值。假设双轴向载荷 ( $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 = \sigma_1$ ,  $\sigma_3 = 0$ ) 给出了 DFDI 的上限值，或假设单轴向载荷条件 ( $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = 0$ ) 给出了 DFDI 的下限值。简化后的公式 (D.8) 和 (D.9) 可用于评估承受内压的薄壁管道凹陷形状的塑性损伤程度，且不需要详细的有限元模型。

$$DFDI_{upper} = \frac{\varepsilon_{eq}}{\left(\frac{\varepsilon_0}{1.65}\right)} \quad (D.8)$$

$$DFDI_{lower} = \frac{\varepsilon_{eq}}{(\varepsilon_0)} \quad (D.9)$$

式中：

$\varepsilon_0$  ——材料早期开裂的临界应变，通常在典型管线钢的 0.3~0.6 范围内。

$\varepsilon_{eq}$  ——凹陷处总等效应变；

使用三维凹陷轮廓数据和基于曲率的应变方法，利用凹陷的最大等效应变和材料的临界应变，计算出上下限 DFDI 值。

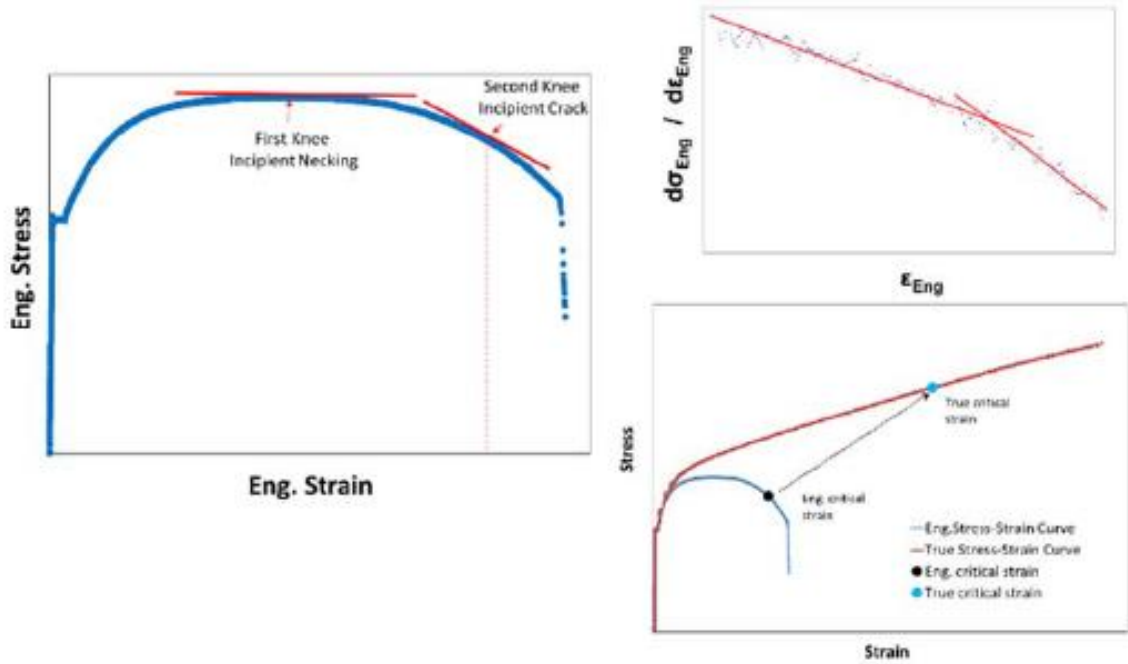
管道材料的临界应变是使用专用拉伸试验机测量的真实应变。可利用材料在颈缩前后的真实应力-应变行为来确定临界应变，代表了在微孔合并后裂纹萌生的开始。为了测量非均匀拉伸（颈缩）区域的真实应变，可采用数字图像相关法（DIC），在位移的基础上记录一系列图像。采用同步系统测量载荷位移数据和这里需要的试件图像。通过图像对比分析试样径向半径  $r$  的变化，如图 D.4。真实应变计算见公式 (D.10)

$$\varepsilon_0 = 2 \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) \quad (D.10)$$



图 D.4 拉伸试样初始径向半径  $r_0$  和颈缩半径  $r$

真实应力-应变曲线也可通过工程应力-应变数据近似转化得到，如图 D.5。单调拉伸应力-应变曲线中的第一个拐点是颈缩的开始，第二个拐点是代表启裂开始，可通过斜率的变化确定。如果数据有噪声，可以使用其他非线性曲线拟合方法来识别斜率变化。

图 D.5 基于工程应力-应变曲线确定  $\varepsilon_0$ 

凹陷应变评价，无论是基于几何还是基于有限元分析，都是以真实应变为基础的。在使用损伤分析方法时，应适用真实应力-真实应变材料特性，如果工程应力-应变数据与 DFDI 方法一起使用，结果偏于保守。

### D.3 凹陷与沟槽重合时的剩余强度评价

#### D.3.1 适用条件

该方法简化了几何模型，忽略了凹陷和划伤的长度，但考虑了凹陷底部的薄膜应变和弯曲应变，适用条件如下：

- 凹陷是连续的且宽度恒定；
- 划伤位于凹陷的底部且沿管道轴向；
- 划伤沿轴向方向深度恒定。

#### D.3.2 失效力计算

管道凹陷与沟槽具有重合特征时的失效力表达式如下：

$$\text{RSF} = \frac{2}{\pi} \arccos \left( \exp \left[ \frac{-C_1 \cdot C_3}{C_2^2} \right] \right) \cdot \left( 1 - \frac{d_{gc}}{t_c} \right) \quad (\text{D.11})$$

式中：

$$C_1 = \frac{1.5\pi EU_1}{\bar{\sigma}^2 A_{CVN} d_{gc}} \quad (\text{D.12})$$

$$C_2 = Y_1 \left( 1 - \frac{1.8d_{d0}}{D} \right) + Y_2 \left( \frac{10.2d_{d0}}{2t_c} \right) \quad (\text{D.13})$$

$$C_3 = \exp \left[ \frac{\ln(U_2 \cdot CVN) - 1.9}{0.57} \right] \quad (\text{D.14})$$

$$\bar{\sigma} = 1.15 \cdot \sigma_{ys} \left( 1 - \frac{d_{gc}}{t_c} \right) \quad (\text{D.15})$$

$$Y_1 = 1.12 - 0.23 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right) + 10.6 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right)^2 - 21.7 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right)^3 + 30.4 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right)^4 \dots \dots \dots (\text{D.16})$$

$$Y_2 = 1.12 - 1.39 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right) + 7.32 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right)^2 - 13.1 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right)^3 + 14.0 \left( \frac{d_{gc}}{t_c} \right)^4 \dots \dots \dots (\text{D.17})$$

式中：

$A_{CVN}$ ——2/3 夏比冲击试样的断口面积， $A_{CVN}=53.33\text{mm}^2$ ；

$CVN$ ——2/3 夏比冲击试样冲击功，单位为 J；

$U_1, U_2$ ——转换系数， $U_1=113, U_2=0.738$ ；

$Y_1, Y_2$ ——计算凹陷-沟槽组合的 RSF 时所用参数；

$\bar{\sigma}$  ——凹陷-沟槽组合中计算剩余强度的中间参量，单位为 MPa；

$\sigma_{ys}$ ——管材屈服强度，单位为 MPa；

$E$ ——管材弹性模量，MPa；

$D$ ——管道内直径，mm；

$t$ ——管道壁厚，mm；

$t_c$ ——评价用计算壁厚， $t_c = t_{rd} - \text{FCA}$ ，单位为 mm；

$t_{rd}$ ——远离损伤区域的实测壁厚，单位为 mm；

FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量，单位为 mm；

$d_{d0}$ ——无内压时的凹陷深度，一般为有内压时深度的 1.43 倍，单位为 mm；

$d_{gc}$ ——腐蚀后的沟槽深度，单位为 mm。

### D. 3. 3 评价准则

如果  $\text{RSF} \geq \text{RSF}_a$  ( $\text{RSF}_a$  一般为 0.9)，且  $P_r^{\max}$  可接受，则评价通过。如果  $\text{RSF} < \text{RSF}_a$ ，则按式 (D.18) 计算  $P_r^{\max}$ 。如果管道的运行压力不大于  $P_r^{\max}$ ，则评价通过。

$$P_r^{\max} = P^{\max} \left( \frac{\text{RSF}}{\text{RSF}_a} \right) \quad (\text{D.18})$$

## D. 4 凹陷疲劳寿命评价

### D. 4. 1 1 级评价

**D.4.1.1 适用条件。**1级评价仅适用于单峰平滑凹陷，不适用于：

- a) 多峰值凹陷特征；
- b) 凹陷长度方向与管道中心轴夹角大于  $30^\circ$  的凹陷，凹陷长度方向为最远两点相连直线方向，如 D.6 所示；
- c) 凹陷与凿痕、裂纹等特征重合，且相互作用。

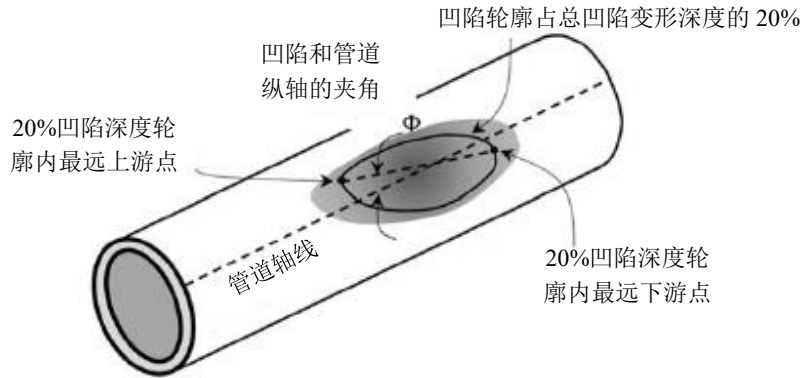


图 D.6 凹陷长度方向与管道中心轴夹角示意图

**D.4.1.2 评价步骤。**

- a) 确定凹陷类型，判断凹陷的约束状况和深度特征。

凹陷形成过程。首先在压头接触点处压扁管道，然后随着凹陷形成的继续，管壁曲率反向。凹陷对内压波动的响应在管壁曲率变化的上下深度不同。通过将凹陷特征的相对深度定义为“浅”或“深”来识别响应的变化，见图 D.3。

浅凹陷定义为：

- 1) 管道外径  $OD \leq 324\text{mm}$ ，凹陷深度  $d < 4\%OD$ ；
- 2) 管道外径  $OD > 324\text{mm}$ ，凹陷深度  $d < 2.5\%OD$ ；

所有其他情况，凹陷被确定为深凹陷。

- b) 确定凹陷特征长度和面积、约束参数、形状参数；
- c) 采用雨流计数法计算得到管道压力范围直方图；
- d) 确定管道最为频繁和代表性的压力范围，得到最大、最小和平均压力值，利用 D.4.3 节公式 (D.19) 计算凹陷疲劳寿命；
- e) 根据疲劳寿命结果，确定减缓和修复措施优先级。疲劳寿命越低，措施优先级越高。

**D.4.2 2级评价 A**

**D.4.2.1 适用条件。**2级评价 A 适用于单峰平滑凹陷。当凹陷与沟槽、裂纹等特征重合，且相互作用时，可用疲劳寿命折减系数加以考虑。不适用于：

- a) 多峰值凹陷特征；
- b) 凹陷长度方向与管道中心轴夹角大于  $30^\circ$  的凹陷，凹陷长度方向为最远两点相连直线方向，如图 D.6 所示。

**D.4.2.2 评价步骤。**

## T/CASE1 ×××××—××××

- a) 步骤同 D.4.1.2 中的 a) -c) ;
- b) 确定每个压力范围的最大和最小压力, 计算平均压力;
- c) 利用 D.4.3 中公式 (D.19) 计算所有压力范围的凹陷疲劳寿命, 并求得所有压力范围组合的总疲劳损伤次数, 即凹陷可接受的疲劳寿命;
- d) 当计算得到的凹陷总疲劳损伤次数大于或等于过去和未来预期循环次数之和, 则管道凹陷可以继续运行。否则, 应采取减缓措施或修复;
- e) 根据疲劳寿命结果, 确定减缓和修复措施优先级。疲劳寿命越低, 措施优先级越高。

### D. 4. 3 1 级和 2 级评价 A 的疲劳寿命计算

凹陷形状类型、特征长度和面积、材料等级、管道尺寸、压力范围、以及基于 S-N 的疲劳寿命计算公式, 共同形成与疲劳寿命相关的凹陷形状参数 (SP) 方程。SP 方程和相关参数是基于不同压力范围和平均压力组合(范围在 10%SMYS - 80%SMYS), 通过有限元模拟分析形成。基于 10%SMYS 等效压力增长幅度, 有 28 种压力组合及其相应的形状参数系数, 凹陷 S-N 疲劳寿命通过公式(D.19) 与凹陷形状参数建立关系。

$$N = A(SP)^B \quad (D.19)$$

式中:

$N$ ——在给定的压力范围和平均压力下, 凹陷的疲劳寿命;

$SP$ ——是凹陷形状参数;

$A$  和  $B$ ——与疲劳寿命相关的形状参数系数和指数, 是压力范围的函数。

表 D.1、D.2、D.3 列出了所有 28 种压力范围组合的深约束、浅约束、以及无约束凹陷形状参数系数, 适用于从 10%SMYS 到 80%SMYS 范围的循环压力范围。对于小于 10%SMYS 的压力范围, 可以找到最接近 10%SMYS 范围的循环压力, 例如, 如果实际压力为  $P_{\min}=1\%P_{SMYS}$  到  $P_{\max}=9\%P_{SMYS}$ , 则最近的循环为 10%-20% $P_{SMYS}$  的循环。

#### D. 4. 3. 1 凹陷形状因子和形状参数计算

##### a) 形状参数 SP 计算。

根据凹陷约束条件, 形状参数 (SP) 由公式 (D.20) 和公式 (D.21) 定义:

$$SP = [R \times x_L + (1-R) \times x_H] \times G_{SF} \times \left(\frac{D}{t}\right)^{1/4} \quad (\text{约束凹陷}) \quad (D.20)$$

$$SP = [R \times x_L + (1-R) \times x_H] \times G_{SF} \quad (\text{非约束凹陷}) \quad (D.21)$$

式中:

$G_{SF}$ ——无量纲比例因子, 用于说明管道材料等级的影响,  $G_{SF} = \left(\frac{\sigma_{SMYS}}{358}\right)^m$ , 其中, 约束凹陷  $m=4$ ,

非约束凹陷  $m=8$ ;

$R$ ——无量纲拟合参数, 用于说明压力范围和平均压力,  $R$  与压力系数  $PF$  呈线性相关, 如等式 (D.22) 所示。

$$R = -2.3053 \times (PF) + 1.5685 \quad (\text{D.22})$$

压力系数  $PF$  是循环压力的平均压力和压力范围的函数，疲劳寿命由公式 (D.23) 计算：

$$PF = \left( P_{mean} \times \frac{\Delta P}{P_{SMYS}^2} \right)^{1/3} = \left( \frac{P_{max}^2 - P_{min}^2}{2P_{SMYS}^2} \right)^{1/3}$$

$$P_{SMYS} = \frac{2t\sigma_{SMYS}}{D} \quad (\text{D.23})$$

$$P_{mean} = \frac{(P_{max} - P_{min})}{2}$$

$$\Delta P = P_{max} - P_{min}$$

式中：

$P_{max}$  和  $P_{min}$ ——给定压力循环的最大和最小压力值，MPa；

$t$ ——管道壁厚，mm；

$OD$ ——管道外径，mm；

$\sigma_{SMYS}$ ——为管道钢种的规定最小屈服强度，MPa。

#### b) 形状因子 $X_H$ 和 $X_L$ 计算。

形状因子  $X_H$  和  $X_L$  根据形状参数与最高压力范围（即 10%至 80% $P_{SMYS}$ ）和最低压力范围（即 10%至 20% $P_{SMYS}$ ）的疲劳寿命之间的最佳拟合确定。形状因子取决于凹陷类型和约束条件。

对于“深约束凹陷”，形状因子由方程式 (D.24) 计算。

$$x_L = \left( \frac{\sqrt{A_{30\%}^{AX} \times A_{75\%}^{AX}}}{t \times L_{75\%}^{AX}} \right)^{3/2} \times \left( \frac{L_{75\%}^{AX}}{L_{75\%}^{TR}} \right)^{1/2} \quad (\text{D.24})$$

$$x_H = \left( \frac{A_{10\%}^{AX}}{L_{10\%}^{AX} \times L_{75\%}^{AX}} \right)^{3/4} \times \left( \frac{L_{75\%}^{TR}}{L_{75\%}^{AX}} \right)$$

对于“浅约束凹陷”，形状因子由方程式 (D.25) 计算。

$$x_L = \left( \frac{\sqrt{A_{30\%}^{AX} \times A_{75\%}^{AX}}}{t \times L_{75\%}^{AX}} \right)^{3/2} \times \left( \frac{L_{75\%}^{AX}}{L_{75\%}^{TR}} \right)^{1/2} \quad (\text{D.25})$$

$$x_H = 10 \times \left( \frac{L_{15\%}^{TR}}{L_{15\%}^{AX}} \right)^{1/2}$$

对于“非约束凹陷”，形状因子由公式 (D.26) 计算。

$$x_L = 10^4 \times \lambda_L \times \left( \frac{A_{85\%}^{AX} \times A_{75\%}^{AX}}{t^2 \times D \times L_{75\%}^{AX}} \right)^{1.2} \times \left( \frac{L_{85\%}^{AX}}{L_{85\%}^{TR}} \right)^{3/2} \quad (\text{D.26})$$

$$x_H = 10^4 \times \lambda_H \times \left( \frac{A_{75\%}^{AX} \times A_{75\%}^{TR}}{t \times D \times L_{75\%}^{AX} \times L_{75\%}^{TR}} \right)^{1.2} \times \left( \frac{L_{75\%}^{AX}}{L_{75\%}^{TR}} \right)^{3/2}$$

式 (D.24)~式 (D.26) 是无量纲的，单位应与输入参数一致。凹陷轴向和环向特征长度和面积由附录 B 的表 B.1 确定。



对于“非约束凹陷”，式（D.26）中  $\lambda_L$  和  $\lambda_H$  是考虑无约束凹陷轮廓随管道内压变化的标度因子，与对应凹陷轮廓的压力和疲劳寿命计算循环压力中的平均压力相关。D.4.3.2 节提供了标度因数  $\lambda_L$  和  $\lambda_H$  的列表数据。

由于凹陷的几何长度和面积是通过凹陷的最深点从轴向和横向剖面中提取的，因此上述方程不适用于与管道纵轴成一定角度的凹陷。

表 D.1 深约束凹陷的形状参数系数

压力范围 (%SMYS)	$P_{\min}$ (%SMYS)	$P_{\max}$ (%SMYS)	$\text{Log}_{10}(A)$	$B$
10-20	10	20	6.087286	-0.77295
10-30	10	30	5.284836	-0.66188
10-40	10	40	4.86638	-0.58546
10-50	10	50	4.577582	-0.54968
10-60	10	60	4.338077	-0.54343
10-70	10	70	4.105337	-0.56648
10-80	10	80	3.82946	-0.61641
20-30	20	30	6.180877	-0.72782
20-40	20	40	5.357296	-0.65343
20-50	20	50	4.892771	-0.60479
20-60	20	60	4.540423	-0.58269
20-70	20	70	4.245734	-0.6
20-80	20	80	3.941286	-0.65073
30-40	30	40	6.249759	-0.67577
30-50	30	50	5.376493	-0.63269
30-60	30	60	4.859268	-0.60247
30-70	30	70	4.475213	-0.62255
30-80	30	80	4.134066	-0.67052
40-50	40	50	6.283445	-0.63181
40-60	40	60	5.371298	-0.61886
40-70	40	70	4.839027	-0.63132
40-80	40	80	4.423944	-0.67102
50-60	50	60	6.309135	-0.61952
50-70	50	70	5.392675	-0.63811
50-80	50	80	4.833223	-0.66914
60-70	60	70	6.35062	-0.62842
60-80	60	80	5.413163	-0.65909
70-80	70	80	6.376762	-0.63151

表 D.2 浅约束凹陷的形状参数系数

压力范围 (%SMYS)	$P_{\min}$ (%SMYS)	$P_{\max}$ (%SMYS)	$\text{Log}_{10}(A)$	$B$
10-20	10	20	6.342043	-0.82187
10-30	10	30	6.149283	-1.17098
10-40	10	40	5.914356	-1.14208
10-50	10	50	5.708447	-1.08995
10-60	10	60	5.512077	-1.04261
10-70	10	70	5.32531	-0.98146
10-80	10	80	5.146662	-0.92982
20-30	20	30	6.737873	-0.96542
20-40	20	40	6.248888	-1.01345
20-50	20	50	5.901884	-0.98023
20-60	20	60	5.633344	-0.93436
20-70	20	70	5.408481	-0.90228
20-80	20	80	5.216608	-0.86531
30-40	30	40	6.86232	-0.86968
30-50	30	50	6.239655	-0.8683
30-60	30	60	5.831431	-0.83388
30-70	30	70	5.535724	-0.80721
30-80	30	80	5.302897	-0.78588
40-50	40	50	6.901113	-0.74996
40-60	40	60	6.199851	-0.73518
40-70	40	70	5.778151	-0.73508
40-80	40	80	5.491595	-0.72615
50-60	50	60	6.964654	-0.71367
50-70	50	70	6.250652	-0.73319
50-80	50	80	5.839225	-0.73746
60-70	60	70	7.033692	-0.7427
60-80	60	80	6.328691	-0.74903
70-80	70	80	7.113349	-0.79059

表 D.3 无约束凹陷的形状参数系数

压力范围 (%SMYS)	$P_{\min}$ (%SMYS)	$P_{\max}$ (%SMYS)	$\text{Log}_{10}(A)$	$B$
10-20	10	20	6.06056	-0.42298
10-30	10	30	5.185339	-0.4034

T/CASEI ×××××—××××

10-40	10	40	4.710772	-0.38507
10-50	10	50	4.350554	-0.37482
10-60	10	60	4.081167	-0.37004
10-70	10	70	3.828039	-0.37077
10-80	10	80	3.609095	-0.37555
20-30	20	30	6.122761	-0.36971
20-40	20	40	5.235399	-0.35799
20-50	20	50	4.744808	-0.3502
20-60	20	60	4.367731	-0.35287
20-70	20	70	4.076046	-0.36202
20-80	20	80	3.805938	-0.37167
30-40	30	40	6.189955	-0.34065
30-50	30	50	5.302041	-0.33377
30-60	30	60	4.785542	-0.33876
30-70	30	70	4.391269	-0.35152
30-80	30	80	4.078931	-0.36623
40-50	40	50	6.24797	-0.32808
40-60	40	60	5.343139	-0.33294
40-70	40	70	4.807008	-0.34685
40-80	40	80	4.395436	-0.3628
50-60	50	60	6.278721	-0.32954
50-70	50	70	5.364313	-0.34184
50-80	50	80	4.803239	-0.36315
60-70	60	70	6.299545	-0.33787
60-80	60	80	5.360145	-0.36003
70-80	70	80	6.288769	-0.356

#### D. 4. 3. 2 非约束凹陷形状因子的比例因子 $\lambda_L$ 和 $\lambda_H$ 确定

非约束凹陷疲劳寿命计算中，应用 ILI 测量时对应凹陷形状的压力值和压力循环，使用不同的比例因子来计算非约束凹陷的形状因子。

使用公式 (D.27) ~ (D.29) 求压力循环截断后的平均压力 (TMP) 和四舍五入 ILI 压力 (RILIP)：

$$P_{mean}^{\% P_{SMYS}} = \left( \frac{P_{max} + P_{min}}{2 \times P_{SMYS}} \right) \times 100 \quad (D.27)$$

$$TMP = turnc \left( P_{mean}^{\% P_{SMYS}}, 10 \right) = int \left( P_{mean}^{\% P_{SMYS}} / 10 \right) \times 10 \quad (D.28)$$

$$RILIP = Round \left( P_{ILI}^{\% P_{SMYS}}, 10 \right) = Round \left( P_{ILI}^{\% P_{SMYS}} / 10 \right) \times 10 \quad (D.29)$$

注：

“*int*”表示实数的整数部分，例如， $int(4.75) = 4$

“*round*”表示与给定数字最接近的整数，例如， $round(4.6) = 5$ 。

例如，对于最大压力为  $37\%P_{SMYS}$ ，最小压力为  $22\%P_{SMYS}$  的给定循环压力，该压力循环的 TMP 值为：

$$P_{mean}^{\%P_{SMYS}} = \left( \frac{0.37 \times P_{SMYS} + 0.22 \times P_{SMYS}}{2 \times P_{SMYS}} \right) \times 100 = 29.5 \quad (D.30)$$

$$TMP = turnc(P_{mean}^{\%P_{SMYS}}, 10) = int\left(\frac{29.5}{10}\right) \times 10 = 2 \times 10 = 20 \quad (D.31)$$

类似地，如果测量凹陷轮廓的 ILI 压力为  $54.5\%P_{SMYS}$ ，则圆形的 ILI 压力 RILIP 为：

$$RILIP = Round(P_{ILI}^{\%P_{SMYS}}, 10) = 10 \times Round\left(\frac{54.5}{10}\right) = 10 \times 5 = 50 \quad (D.32)$$

一旦找到了给定压力循环和 ILI 压力的 TMP 和 RILIP，就可以使用表 D.4 至表 D.10 查找相应的比例因子。

表 D.4 截断平均压力 (TMP) =10 的比例因子

	圆形的 ILI 压力 (RILIP)						
	10	20	30	40	50	60	70
$\lambda_H$	1.0000	1.0855	1.1505	1.2063	1.2774	1.3005	1.3853
$\lambda_L$	1.0000	1.1294	1.2640	1.3498	1.4450	1.5449	1.5860

表 D.5 截断平均压力 (TMP) =20 的比例因子

	圆形的 ILI 压力 (RILIP)						
	10	20	30	40	50	60	70
$\lambda_H$	0.9208	1.0000	1.0611	1.1062	1.1767	1.2173	1.2447
$\lambda_L$	0.8836	1.0000	1.0926	1.1765	1.2476	1.3023	1.3744

表 D.6 截断平均压力 (TMP) =30 的比例因子

	圆形的 ILI 压力 (RILIP)						
	10	20	30	40	50	60	70
$\lambda_H$	0.8690	0.9408	1.0000	1.0427	1.0836	1.1334	1.1537
$\lambda_L$	0.8205	0.9239	1.0000	1.0719	1.1343	1.1836	1.2515

表 D.7 截断平均压力 (TMP) =40 的比例因子

	圆形的 ILI 压力 (RILIP)						
	10	20	30	40	50	60	70
$\lambda_H$	0.8279	0.8937	0.9537	1.0000	1.0361	1.0794	1.1009
$\lambda_L$	0.7766	0.8712	0.9382	1.0000	1.0577	1.1097	1.1548

表 D.8 截断平均压力 (TMP) =50 的比例因子

	圆形的 ILI 压力 (RILIP)						
	10	20	30	40	50	60	70
$\lambda_H$	0.7924	0.8556	0.9282	0.9624	1.0000	1.0453	1.0719
$\lambda_L$	0.7216	0.8290	0.8870	0.9483	1.0000	1.0517	1.0953

表 D.9 截断平均压力 (TMP) =60 的比例因子

	圆形的 ILI 压力 (RILIP)						
	10	20	30	40	50	60	70
$\lambda_H$	0.7623	0.8247	0.8970	0.9367	0.9665	1.0000	1.0240
$\lambda_L$	0.6942	0.7921	0.8480	0.9053	0.9527	1.0000	1.0394

表 D.10 截断平均压力 (TMP) =70 的比例因子

	圆形的 ILI 压力 (RILIP)						
	10	20	30	40	50	60	70
$\lambda_H$	0.7375	0.7940	0.8682	0.9083	0.9397	0.9702	1.0000
$\lambda_L$	0.6678	0.7511	0.8114	0.8665	0.9125	0.9521	1.0000

### D.4.3 2级评价 B

#### D.4.2.1 适用条件。

- a) 单峰平滑凹陷；
- b) 与沟槽或腐蚀重合、且相互作用的凹陷，沟槽或腐蚀应进行修整，去除加工硬化层，得到光滑凹陷轮廓；
- c) 管材的韧性大于 40J；
- d) 沟槽深度小于等于凹陷周围管道壁厚的 66%。

#### D.4.2.2 评价步骤。

- a) 确定凹陷运行压力范围的最大  $P_{\max}$  和最小  $P_{\min}$  值，并根据公式 (33) 和 (34) 计算环向应力范围；

$$\sigma_{H,\max} = \frac{P_{\max} OD}{2t} \quad (\text{D.33})$$

$$\sigma_{H,\min} = \frac{P_{\min} OD}{2t} \quad (\text{D.34})$$

式中：

$\sigma_{H,\max}$ ， $\sigma_{H,\min}$ ——由管道运行最大和最小内压计算得到的对应环向最大应力和最小应力，MPa；

$P_{\max}$  和最小  $P_{\min}$ ——管道运行最大和最小内压，MPa；

$OD$ ——管道内直径，mm；

$t$ ——管道壁厚，mm。

- b) 确定凹陷是否与腐蚀、沟槽等重合，且相互作用，如果存在，确定沟槽或腐蚀的深度  $d_g$ ；

- c) 根据公式 (D.35)~公式 (D.39)，计算管道凹陷的可接受疲劳循环次数，即凹陷疲劳寿命；

$$N_C = 562.2 \left( \frac{\sigma_{UTS}}{2\sigma_A K_d K_g} \right)^{5.26} \quad (D.35)$$

$$\sigma_A = \sigma_a \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{Hmax} - \sigma_a}{\sigma_{UTS}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (D.36)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{Hmax} - \sigma_{Hmin}}{2} \quad (D.37)$$

$$K_d = 1 + C_s \sqrt{\frac{t_c}{D} (d_{d0} C_{ul})^{1.5}} \quad (D.38)$$

$$K_g = 1 + 9 \left( \frac{d_g}{t_c} \right) \quad (D.39)$$

式中：

$d_g$ ——最大凿槽深度，mm；

$C_{ul}$ ——换算系数，如果  $d_{d0}=1.0$ ，mm；

$C_s$ ——无量纲系数，当凹陷  $r_d \geq 5t_c$  时， $C_s=2.0$ ；当凹陷  $r_d < 5t_c$  时， $C_s=1.0$ ；

$t_c$ ——在未来的腐蚀条件下的壁厚，mm；

$d_{d0}$ ——管道未加压时测量的凹陷深度，mm；

$R_d$ ——凹陷底部半径，mm；

$\sigma_{UTS}$ ——最小规定极限抗拉强度，MPa。

d) 当凹陷可接受的循环次数大于或等于过去和未来预期循环次数之和，则管道凹陷可以继续运行。否则，应采取减缓措施或修复；

e) 根据疲劳寿命结果，确定减缓和修复措施优先级。疲劳寿命越低，措施优先级越高。

#### D.4.4 3级评价（基于有限元的凹陷疲劳寿命评价）

3级评价是利用有限元模型进行凹陷疲劳寿命评价，不受1级和2级模型的限制，可用于评估任何凹陷特征，可以在模型中明确考虑相互作用的缺陷，或在有限元模拟结果的基础上，利用折减系数评价具有重合特征的凹陷疲劳寿命。

基于评价压力直方图求解凹陷累积疲劳寿命，采用有限元模型计算非常复杂，需考虑材料和结构非线性以及压头接触和成形过程。应通过全尺寸试验数据验证模型的正确性。

如果有限元模拟结果，采用应力集中特征评价凹陷的损伤程度，应将应力集中系数作为工程近似值，并谨慎使用。因为凹陷形状变化与应力集中系数成非线性关系，涉及到凹陷的回弹和回圆特性，非单一应力集中系数可表征凹陷的损伤程度。

采用凹陷疲劳寿命的有限元模拟，应关注凹陷的形成过程，在此基础上考虑凹陷的循环内压下累积损伤。模拟凹陷变形过程，可以采用几何非线性和材料非线性分析，在管道未变形基础上，采用可变形体或刚体代替压头，利用适用的载荷压制形成凹陷。

**附 录 E**  
**(资料性)**  
**现场开挖记录**

为支持结构完整性评价，现场开挖调查应收集足够的信息。该记录中每个部分提供的信息列表代表了在评估过程中使用的理想数据集，目的是提供尽可能多的信息。在许多情况下，收集特定类型的数据可能不实际。如果认为数据是必要的，则在记录中使用灰色阴影。

### E.1 开挖信息

以下总结了挖掘作业开始前在现场收集的信息。

#### E.1.1 环境调查

- a) 记录环境情况（即温度）
- b) 建议挖掘地点上游和下游管道通行权的一般照片
- c) 一般地形
  - 1) 倾斜度
  - 2) 地形描述（如农田、森林、岩石等）
  - 3) 对当地植被状况的描述
  - 4) 附近水域
  - 5) 自由或支撑跨距
- d) 注意任何地面沉降或其他地面移动的迹象
- e) 建议的挖掘位置上游和下游弯头的接近度
- f) 开挖过程中管道内压

#### E.1.2 开挖期间的观察

挖掘应分阶段进行，其中首先应清除覆盖层，直到到达管道顶部为止。随着挖掘的进行，收集有关以下方面的信息：

- a) 在整个挖掘过程中以不同的间隔拍摄照片
- b) 请注意在挖掘过程中清除的任何杂物或岩石，特别是从管道顶部清除的杂物
- c) 土壤类型
- d) 土壤状况（湿度水平）
- e) 土壤 pH 值
- f) 描述管道旁边的土壤压实程度
- g) 描述回填材料
- h) 管道上包括岩盾式覆盖
- i) 阴极保护

#### E.1.3 开挖后观察

开挖完成且管道完全裸露后，记录下管沟：

- a) 管沟的照片
- b) 管沟形状的描述和测量（例如，长度，宽度，深度）
- c) 记录下管道顶部的覆盖深度

## E.2 管道信息

露管后，应记录管道和涂层的状况。

### E.2.1 管道涂层情况

- a) 整个暴露管道的涂层照片
- b) 涂层类型和厚度
- c) 涂层漏涂的证据
- d) 焊缝上的涂层定型
- e) 涂层修补
- f) 涂料和裸管上的制造标记。

### E.2.2 管道概况

一旦涂层被移除，记录：

- a) 记录管道表面的照片，并附有注记和流向
- b) 如果适用，请注意管道的任何修理
  - 1) 套筒
  - 2) 焊接修补
- c) 管道表面状况

### E.2.3 管道的详细情况

露管后，应记录管道的详细状况。

- a) 注意任何外部表面特征
  - 1) 特征类型(腐蚀、点蚀、凿痕等)
  - 2) 特征尺寸(长、宽、深)
  - 3) 特征照片，包括比例尺；
  - 4) 最接近环焊缝和纵焊缝的位置
- b) 进行超声波测厚测量（12:00、3:00、6:00 和 9:00）
- c) 进行磁粉检测（MPI）以识别任何 OD 表面断裂裂纹
- d) 对圆周和轴向裂纹进行超声波裂纹检测
- e) 记录任何现存的裂纹
  - 1) 尺寸（长，深）
  - 2) 时钟位置
  - 3) 环焊缝位置
  - 4) 方向（即周向、轴向或相对于纵轴的角度）
- f) 对于详细的非破坏性材料特性表征，应收集以下信息（可能需要专门的无损检测人员）：



- 5) 管道外径表面的原位硬度
- 6) 管道外径表面上的刨花（用于表征化学性质）
- 7) 微观结构的描述（副本）

### E.3 描述特定的信息

#### E.3.1 腐蚀特性

对于腐蚀特征的现场调查，应尽可能记录以下信息。

- a) 腐蚀特征照片，包括比例尺
- b) 腐蚀类型
- c) 特征尺寸（即长度，宽度，深度），如果有条件，使用激光扫描方法记录
- d) 特征位置
  - 1) 最接近环焊缝的位置
  - 2) 时钟位置
  - 3) 邻近特征(即其他腐蚀特征、周长或焊缝)
- e) 获取并保存腐蚀产品样品
- f) 从靠近管道表面的土壤中获得 pH 值样本
- g) 记录阴极保护情况

#### E.3.2 凹陷

对于凹陷特征的现场调查，应尽可能记录以下信息。

- a) 带有刻度的凹陷照片（记录所用笔直边缘的长度（首选笔直较长的边缘））
- b) 如果可能，使用激光扫描方法记录包含凹陷特征的管道表面
- c) 凹陷特征的位置
  - 1) 最接近环焊缝的位置
  - 2) 时钟位置
  - 3) 邻近相邻特征（即其他腐蚀特征，周长或缝焊缝）
- d) 对于底部凹陷
  - 1) 注意在开挖过程中是否存在任何类似岩石的压头
  - 2) 去除压头之前的管道和压头的照片
  - 3) 压头尺寸
  - 4) 尽可能识别和保存岩石（在岩石上标明接触面）
- e) 通过最深点记录凹陷的轴向剖面，并记录在最深点两边的时钟位置
  - 1) 沿管壁表面放一条长直杆（记录直边长度），使其与凹陷最深点重合
  - 2) 在最深点和 2 英寸处测量深度。沿凹陷上下游长度的间隔。
- f) 在 3 到 9 点钟位置（凹陷时钟位置）测量椭圆度
  - 1) 在凹陷中心
  - 2) 在直杆的两端，用于测量轴向轮廓

#### E.3.3 褶皱

对于褶皱的现场调查，应尽可能记录以下信息：

- a) 带有刻度的褶皱照片
- b) 如果可能，使用激光扫描方法记录包含褶皱的管道表面
- c) 褶皱的位置
  - 1) 最接近环焊缝的位置
  - 2) 时钟位置
  - 3) 邻近特征(即其他腐蚀特征、周长或焊缝)
- d) 记录每个时钟位置的褶皱轴向轮廓
  - 1) 沿管壁表面放置一条长直尺（记录直尺的长度）
  - 2) 沿管道的上下游长度以 2 英寸间隔测量深度
- e) 测量 3 点和 9 点位置的椭圆度(褶皱峰值时钟位置)
  - 1) 在褶皱的中心
  - 2) 在两端的直边上用来测量轴向的轮廓

#### E.4 现场拍照

在现场拍照时，应采用以下做法：

- a) 将局部照片与整个暴露管道的全局照片配对
- b) 每一张照片都应命名，并包含在现场调查期间拍摄的所有照片的描述性列表中
- c) 管道应在每张照片上清楚地标记
  - 1) 行号/名称
  - 2) 里程（里程碑等）
  - 3) 流动的方向
  - 4) 标记了单个特征的特征描述
  - 5) 比例尺
  - 6) 如果被切断和移除，则应包含切断管线和管段编号

## 附录 F

(规范性)

## 可接收的管道凹陷修复方法选择和流程

异常类型	1 换管	2 打磨/抛光修复	3a A 型套筒	3b B 型套筒	4 复合材料套筒	5 压缩套筒	6 机械螺栓固定 夹具	7 带压开孔 <sup>5</sup>
普通平滑凹陷								
凹陷深度>6%OD	Yes <sup>1</sup>	N/A	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	No <sup>6</sup>	Yes	Yes	Yes
凹陷深度≤6%OD	Yes <sup>1</sup>	N/A	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes	Yes	Yes
沟槽与凹陷重合								
凹陷深度≤6%OD, 打磨后沟槽 <sup>3</sup> 最大深度<40% <i>t</i>	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>3</sup>	Yes <sup>2,4</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2,4</sup>	Yes	Yes	Yes
所有其他含沟槽的凹陷	Yes <sup>1</sup>	No	Yes <sup>2,4</sup>	Yes <sup>2</sup>	No	Yes	Yes	Yes
腐蚀与凹陷重合								
凹陷深度≤6%OD, 打磨修复 <sup>3</sup> 腐蚀深度<40% <i>t</i>	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>3</sup>	Yes <sup>2,4</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2,4</sup>	Yes	Yes	Yes
所有其他含腐蚀的凹陷	Yes <sup>1</sup>	No	Yes <sup>2,4</sup>	Yes <sup>2</sup>	No <sup>6</sup>	Yes	Yes	Yes
多个凹陷(双凹陷或三凹陷)								
最深凹陷深度>6%OD	Yes <sup>1</sup>	N/A	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	No <sup>6</sup>	Yes	Yes	Yes

异常类型	1 换管	2 打磨/抛光修复	3a A 型套筒	3b B 型套筒	4 复合材料套筒	5 压缩套筒	6 机械螺栓固定 夹具	7 带压开孔 <sup>5</sup>
最深凹陷深度≤6%OD	Yes <sup>1</sup>	N/A	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes	Yes	Yes
一个或多个凹陷存在应力集中	Yes <sup>1</sup>	Yes <sup>3</sup>	Yes <sup>2,4</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2,4</sup>	Yes	Yes	Yes
焊缝与凹陷重合								
凹陷深度>4%OD	Yes <sup>1</sup>	N/A	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	No <sup>6</sup>	Yes	Yes	Yes
凹陷深度≤4%OD <sup>2</sup>	Yes <sup>1</sup>	N/A	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes <sup>2</sup>	Yes	Yes	Yes
弯曲、波纹或褶皱								
无应力集中弯曲、波纹、褶皱	Yes <sup>1</sup>	N/A	No	Yes	No	No	Yes	No
含应力集中弯曲、波纹、褶皱	Yes <sup>1</sup>	N/A	No	Yes	No	No	Yes	No
注：								
<sup>1</sup> 换管的最小长度应为其直径的一半或 100 毫米，以较大的为准，并应满足或超过与输送管道相同的设计要求。 <sup>2</sup> 在缺陷处应确保套筒紧固，或硬化填充物填充管道和修复套筒之间的空隙或环形空间。 <sup>3</sup> 应力集中缺陷必须完全清除，清除应通过目测、磁粉或着色渗透检验进行验证。打磨深度为公称壁厚的 10%，长度不受限制。打磨深度最大允许至公称壁厚的 40%，前提是打磨修复的长度不超过标准《埋地钢质管道管体缺陷修复指南》（GB/T 36701）的允许长度。这 40%的限制不适用于需要额外外部维修的情况。打磨缺陷时，四周应平滑过渡。 <sup>4</sup> 任何应力集中区应在维修安装前进行打磨修复。应通过目视、磁粉或着色渗透检验确认打磨修复结果。 <sup>5</sup> 通过带压开孔修复时，凹陷应尽可能包含在带压开孔移除管段内。 <sup>6</sup> 不推荐采用复合材料套筒修复凹陷，尤其高风险凹陷，除非研究、测试和工程评估证明，特定的复合材料套筒修复技术用来修复凹陷是可接受的方法。								

**附录 G**  
(资料性)  
**管道凹陷评价案例**

### G.1 约束参数计算

约束参数 ( $\rho$ ) 是一种度量, 可用于根据可从 ILI 传感器数据获得的特征长度和面积来估计凹陷特征的约束条件。约束条件的定义见式 G.1 所示:

$$\rho = \max \left\{ \frac{18 \times |A_{15\%}^{AX} - A_{15\%}^{TR}|^{\frac{1}{2}}}{L_{70\%}^{TR}}, 8 \times \left( \frac{L_{15\%}^{AX}}{L_{30\%}^{AX}} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left( \frac{L_{30\%}^{AX} - L_{50\%}^{AX}}{L_{80\%}^{TR}} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (G.1)$$

上面定义的约束参数是无量纲参数。 $\rho$  值大于 20 的凹陷是受约束的凹陷,  $\rho$  值小于 20 的凹陷是不受约束的凹陷。对于上游(US)/下游(DS)轴向剖面与顺时针(CW)/逆时针(CCW)横向剖面(即 US/CW、US/CCW、DS/CW 和 DS/CCW 剖面的组合)的所有四种组合, 应对  $\rho$  进行评估。

#### 示例 1:

图 G.1 和图 G.2 所示为假想的凹陷的轴向和横向剖面图。凹陷特征长度和面积列于表 G.1。为了评估给定的凹陷是受约束的还是不受约束的凹陷, 对于 DS/US/CW/CCW 的所有四种组合, 应按式 (G.1) 进行评估。

表 G.1—示例凹陷的特征长度和面积

	OD (inch)	WT (inch)	总的凹陷变形深度					
			(mm)		%OD			
	32	0.312	28.5		3.51%			
轴向	5%	10%	15%	30%	50%	75%	85%	90%
DS 长度 (mm)	1262	1000	860	540	315	160	115	100
US 长度 (mm)	1290	990	840	520	260	125	80	55
DS 面积 (mm <sup>2</sup> )	23322	16771	12890	5875	2077	431	175	-
US 面积 (mm <sup>2</sup> )	24304	17009	13463	6341	1291	412	160	-
环向	15%	30%	50%	70%	75%	80%	85%	90%
CW 长度 (mm)	150	130	86	52	47	41	33	25
CWW 长度 (mm)	221	178	138	104	95	85	74	63
CW 面积 (mm <sup>2</sup> )	1735	1303	578	-	136	-	63	-
CCW 面积 (mm <sup>2</sup> )	2291	1339	657	-	201	-	85	-

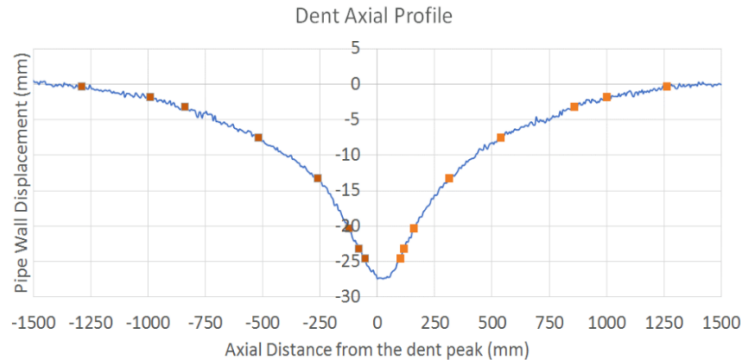


图 G.1 凹陷轴向轮廓

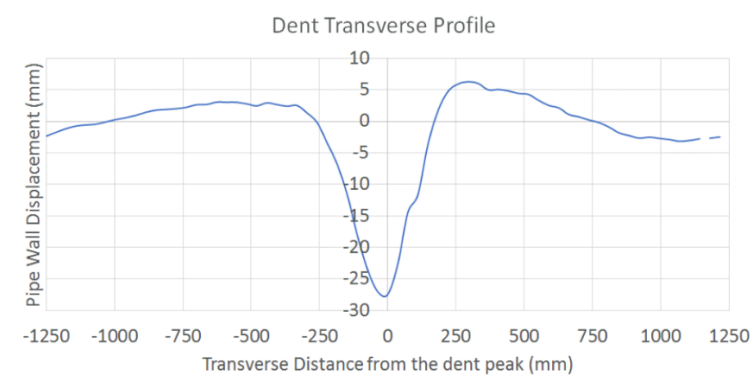


图 G.2 凹陷环向轮廓

$$\rho_{\text{CW}}^{\text{US}} = \max \left\{ \frac{18 \times |13463 - 1735|^{\frac{1}{2}}}{52}, 8 \times \left( \frac{840}{520} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left( \frac{520 - 260}{41} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = \max(37.49, 22.71) = 37.49$$

$$\rho_{\text{CW}}^{\text{US}} = \max \left\{ \frac{18 \times |13463 - 2291|^{\frac{1}{2}}}{104}, 8 \times \left( \frac{840}{520} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left( \frac{520 - 260}{85} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = \max(18.29, 15.77) = 18.29$$

$$\rho_{\text{CW}}^{\text{US}} = \max \left\{ \frac{18 \times |12890 - 1735|^{\frac{1}{2}}}{52}, 8 \times \left( \frac{860}{540} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left( \frac{540 - 315}{41} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = \max(36.56, 21.05) = 36.56$$

$$\rho_{\text{CW}}^{\text{US}} = \max \left\{ \frac{18 \times |12890 - 2291|^{\frac{1}{2}}}{104}, 8 \times \left( \frac{860}{540} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left( \frac{540 - 315}{85} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = \max(17.82, 14.62) = 17.82$$

4 种组合的  $\rho$  最大值为 37.49，大于 20。因此，所考虑的凹陷是一个约束凹陷。

浅约束凹陷准则规定:当管道外径  $OD \leq 324\text{mm}$ ，凹陷深度  $d < 4\%OD$ ；当管道外径  $OD > 324\text{mm}$ ，凹陷深度  $d < 2.5\%OD$ ；对于本例中的凹陷，管道外径大于 324mm，凹陷深度为 3.51%外径。因此，这个例子中的凹陷是一个深约束凹陷。

## G.2 浅凹陷筛选

筛选方法已经发展为用于快速识别非伤害性特征的保守方法。“合格”表示凹陷满足完整性要求，而“不合格”表示应进行下一级别的完整性评估。如果某个特征未被标识为非伤害性特征，则应提及这并不意味着该凹陷具有完整性问题，但是需要在下一级完整性评估的基础上进行进一步调查。

对于不受约束的凹陷，最大应力放大系数  $K_M^{Max}$  与管道几何形状  $OD/t$  相关。对于最大压力大于  $20\%P_{SMYS}$  压力的不受约束的凹陷，相关性由公式 G.2 给出：

$$K_M^{Max} = 7.5 \times \left[ 1 - \exp\left(-0.065 \times \frac{OD}{t}\right) \right] \quad (G.2)$$

对于未见最大压力大于  $20\%P_{SMYS}$  的无约束凹陷，其相关关系由方程 G.3 给出：

$$K_M^{Max} = 9.3 \times \left[ 1 - \exp\left(-0.045 \times \frac{OD}{t}\right) \right] \quad (G.3)$$

### 示例 2: 无约束的凹陷

考虑表 G.2 中列出的管道无约束凹陷深度为 0.36 英寸（9.144mm）。

表 G.2 管道特性举例 2

参数	评价
管道外径(OD)	24 英寸（609.6mm）
管道壁厚(t)	0.281 英寸（7.1374mm）
管道等级	X52
最小屈服强度	52000 psi (358 MPa)
凹陷深度(%OD)	1.5%
压力严重度频谱指数（SSI）	100 个周期

假设凹陷自形成并存在于管线中以来就经历了一次水压测试（ $90\%P_{SMYS}$ ）循环。该管线的压力严重度频谱指数（SSI）为 100 个循环。公式 G.2 给出了该行中不受约束的凹陷的最大值  $K_M^{Max}$ 。

$$K_M^{Max} = 7.5 \times \left[ 1 - \exp\left(-0.065 \times \frac{24}{0.281}\right) \right] = 7.47$$

根据 S-N 曲线定义的  $\log_{10}^c = 12.6007$  和  $m=3$ 。对于  $Y=100$  年的目标寿命和管路工作压力  $SSI=100$ ，按如下方法计算  $K_M^{Allowable}$ ：

$$K_M^{Allowable} = \frac{10 \times \left[ 12.6007 - \log_{10}^{(100 \times 100)} \right]}{90} = 8.18$$

凹陷  $K_M^{Max} < K_M^{Allowable}$ ；因此，根据此筛选工具，通过了给定操作压力  $SSI=100$  和目标寿命  $Y=100$  的 0 级完整性评价。

### G.3 基于疲劳寿命的凹陷筛选

#### 示例 3: 基于疲劳寿命的凹陷筛选

考虑 X52 级管道（ $\sigma_{SMYS}=358MPa$ ）的无约束凹陷， $OD/t=30"/0.25"$ 。表 G.3 中列出了该管线的详细压力数据。假设在载荷谱中只有 3 个压力范围。使用筛选工具 SN 曲线，希望评估凹陷是否满足  $Y_{t, arg}=150$  年的期望疲劳寿命。给定压力周期的 SSI 为每年 100 个等效的 13ksi 环向应力周期。

表 G.3 压力循环举例

周期 #	$P_{\min}$ (psi)	$P_{\max}$ (psi)	$P_{\min}$ (% $P_{SMYS}$ )	$P_{\max}$ (% $P_{SMYS}$ )	$\Delta p$ (% $P_{SMYS}$ )	$P_{\text{mean}}$ (% $P_{SMYS}$ )	每年循环数 ( $n$ )
1	122	244	10	20	10	15	157
2	244	488	20	40	20	30	55
3	366	731	30	60	30	45	36

基于 SSI 的筛选过程考虑凹陷的最大应力放大系数，该系数由公式 G.2 计算得到。

$$K_M^{\text{Max}} = 7.5 \times \left[ 1 - \exp\left(-0.065 \times \frac{30}{0.25}\right) \right] = 7.5$$

对于 SSI=100 且期望的疲劳寿命  $Y=150$  年，允许的应力放大系数为

$$K_M^{\text{Allowable}} = \frac{10 \times \left[ 12.6007 - \log_{10}^{(100 \times 150)} \right]}{90} = 7.14$$

由于  $K_M^{\text{Max}} > K_M^{\text{Allowable}}$ ，因此凹陷不能被定义为无损伤，“失败”的筛选方法。更高级和更少保守的筛选方法可应用于此功能。为了对该凹陷进行更复杂的疲劳寿命筛选，计算每个压力范围的最大  $K_M^{\text{Max}}$ 。

$$K_M^{\text{Max}} = a \times \Delta P^2 + b \times \Delta P + c \quad (\text{G.4})$$

当  $OD/t=30/0.25$  时，系数见表 G.4。

表 G.4 各种管道几何形状的方程式 (G.6) 的二次函数常数

OD/t	常数 (a)	常数 (b)	常数 (c)
24(4.5/0.188)	-2.2600E-05	-5.3239E-02	6.6658
35(6.625/0.188)	9.5242E-04	-1.5553E-01	8.6799
40(8.625/0.218)	2.2700E-05	-7.2248E-02	7.7703
41(12.75/0.312)	-9.2500E-05	-5.1883E-02	6.8884
57(10.75/0.188)	9.7536E-04	-1.5842E-01	8.2795
58(18/0.312)	7.3803E-04	-1.4489E-01	9.4614
71(20/0.281)	1.4251E-03	-2.0873E-01	10.7244
73(16/0.218)	5.7780E-04	-1.2481E-01	8.8566
85(24/0.281)	1.2860E-03	-1.9800E-01	10.5981
96(24/0.25)	1.2724E-03	-1.8877E-01	10.2145
100(42/0.42)	6.7473E-04	-1.4078E-01	9.4286
114(32/0.281)	7.4031E-04	-1.4688E-01	9.4987
120(30/0.25)	1.1607E-03	-1.7704E-01	9.9170
128(36/0.281)	8.0752E-04	-1.5251E-01	9.5362

对于  $\Delta P=10\% P_{SMYS}$ ：

$$K_M^{\text{Max}} = 0.0011607 \times (10)^2 - 0.17704 \times 10 + 9.9170 = 8.26$$

同样的，对于  $\Delta P=20\% P_{SMYS}$ ：

$$K_M^{\text{Max}} = 0.0011607 \times (20)^2 - 0.17704 \times 20 + 9.9170 = 6.84$$



T/CASE1 ×××××—×××××

以及对于  $\Delta P=30\% P_{SMYS}$  :

$$K_M^{Max}=0.0011607 \times (30)^2 - 0.17704 \times 30 + 9.9170 = 5.65$$

各压力循环对应的最大应力范围可由下式求得:

$$\Delta S^{Max} = K_M^{Max} \times \left( \frac{\Delta P}{P_{SMYS}} \right) \times \sigma_{SMYS}$$

已知 X52 管线的  $\sigma_{SMYS} = 358 \text{MPa}$ 。

$$\Delta P = 10\% P_{SMYS} \rightarrow \Delta S^{Max} = 8.26 \times 0.1 \times 359 = 296 (\text{MPa})$$

$$\Delta P = 20\% P_{SMYS} \rightarrow \Delta S^{Max} = 6.84 \times 0.2 \times 359 = 490 (\text{MPa})$$

$$\Delta P = 30\% P_{SMYS} \rightarrow \Delta S^{Max} = 5.65 \times 0.3 \times 359 = 607 (\text{MPa})$$

一旦计算出每个压力循环的最大应力范围, 与每个压力相关的累积损伤可计算如下:

$$D_i = n_i / N_i$$

在  $N_i = 10^{\left( \log_{10}^c - m * \log_{10} \frac{\Delta S_i^{Max}}{\Delta S_1^{Max}} \right)}$ , 对于此筛选技术中使用的 S-N 曲线,  $\log_{10}^c = 12.6007$  和  $m=3$ 。因此, 给定压力循环的 1 年累积损伤为

$$D_{total} = D_1 + D_2 + D_3 = \frac{157}{10^{(12.6007-3 \log_{10}^{296})}} + \frac{55}{10^{(12.6007-3 \log_{10}^{490})}} + \frac{36}{10^{(12.6007-3 \log_{10}^{607})}} = 0.004663$$

因此, 该凹陷的总疲劳寿命为  $Y_{total} = 1/D_{total} = 214.5$  年。由于  $Y_{total}$  大于  $Y_{targ}$  的预期 (目标) 疲劳寿命 ( $Y_{targ}=150$  年), 因此基于此筛选工具, 凹陷被认为是无害的。表 G.5 用表格格式总结了上述计算。

表 G.5 示例 3 的计算得出的 0.5 级最大应力放大系数

Sl. no	$\Delta P$ (% $P_{SMYS}$ )	每年循环数 ( $n$ )	$\Delta S_{nom}$ (MPa)	$K_M^{Max}$	$\Delta S_i$ (MPa)	$N_i$	$D_i$
1	10	157	35.9	8.26	296	153753	0.001021
2	20	56	71.7	6.84	490	33893	0.001623
3	30	36	107.63	5.65	607	17829	0.002019
$D_{total}$							0.004663
$Y_{total} = 1/D_{total}$							<b>214.45</b>

G.4 2 级 (形状参数) 凹陷疲劳寿命计算

考虑凹陷对称性, 管道的几何形状/等级和凹陷深度见表 G.6, 凹陷特征长度和区域见表 G.7。

表 G.6 2 级示例案例的管道特性

参数	评价
管道外径(OD)	24 英寸
管道壁厚( $t$ )	0.281 英寸
管道等级	X52
最小屈服强度	52000 psi (359 MPa)
凹陷深度(%OD)	1.5%
压力严重度频谱指数 (SSI)	100 个周期

表 G.7 示例凹陷特征的凹陷几何长度和面积

指定长度 (% $D_{max}$ )	轴长 (mm)	轴面积 ( $mm^2$ )	横向长度 (mm)	横向面积 ( $mm^2$ )
85	26.15	12.099	17.605	
80			21.579	
75	35.899	28.64	25.267	22.082
70			28.955	
50	70.497			
30	172.3	688.84		
15	477.17	2725.8	89.992	308.37

表 G.8 列出了该凹陷的假定年压力循环载荷。目的是使用形状参数疲劳寿命方程式，并计算给定压力周期下的凹陷总寿命。

表 G.8 假设压力循环

周期#	$P_{min}(\%P_{SMYS})$	$P_{max}(\%P_{SMYS})$	每年循环数 ( $n$ )
1	10	20	157
2	20	40	55
3	30	60	36

首先，应评估该凹陷的约束参数。因为凹坑的轴向 (US/DS) 和横向 (CW/CWW) 轮廓都是对称的，所以 US/DS 与 CW/CWW 的所有四个组合将返回相同的  $\rho$  值。

$$\begin{aligned}
 RP^{US/CW} &= RP^{US/CWW} = RP^{DS/CW} = RP^{DS/CWW} \\
 &= \max \left\{ \frac{18 \times |2725.8 - 308.37|^{1/2}}{28.955}, 8 \times \left( \frac{477.17}{172.3} \right)^{1/4} \times \left( \frac{172.3 - 70.497}{21.579} \right)^{1/2} \right\} = \max(30.57, 22.42) = 30.57
 \end{aligned}$$

因为这个凹陷的计算  $\rho$  值大于 20，所以这个凹陷是一个约束凹陷。此外，由于在 24 英寸的外径管道中，凹陷深度小于 2.5% $OD$ ，因此该凹陷被认为是浅约束凹陷。因此，应采用 PRCI 二级浅约束凹陷形状参数方程对该凹陷进行疲劳寿命评估。

浅约束凹陷的形状因子和形状参数定义为：

$$X_L = \left[ \sqrt{A_{30\%}^{AX} \times A_{30\%}^{TR}} / (t \times L_{75\%}^{AX}) \right]^{3/2} \times (L_{75\%}^{AX} / L_{75\%}^{TR})^{1/2} \quad (G.4)$$

$$x_H = 10 \times (L_{15\%}^{TR} / L_{15\%}^{AX})^{1/2} \quad (G.5)$$

$$SP = [R \times x_L + (1-R) \times x_H] \times G_{SF} \times (OD/t)^{1/4} \quad (G.6)$$

其中等级比例因子  $G_{SF}=1$ ，因为管道等级为 X52。压力参数  $R$  通过以下方式定义：

$$R = -2.3053 \times (PF) + 1.5685 \quad (G.7)$$

$$PF = \sqrt[3]{(P_{max} / P_{SMYS})^2 - (P_{min} / P_{SMYS})^2} / \sqrt[3]{2} \quad (G.8)$$

形状参数疲劳寿命方程由下式给出：

$$N = A \times (SP)^B = 10^{(\log_{10} A + B \log_{10} SP)} \quad (G.9)$$

表 G.9 和表 G.10 总结了给定凹陷的形状因数，形状参数和寿命计算，以及表 G.8 中列出的压力范围。注意，例如对于  $P_{min}=10\%P_{SMYS}$ ，比率  $P_{min}/P_{SMYS}=0.1$ 。形状参数系数  $\log_{10}A$  和 B 取自表 G.3 中相应压力循环的浅约束凹陷。

表 G.9 形状因数和形状参数系数

Cycle #	$P_{min}$ (% $P_{SMYS}$ )	$P_{max}$ (% $P_{SMYS}$ )	$\Delta P$ (% $P_{SMYS}$ )	PF	R	GSF	XL	XH	SP	$\text{Log}_{10}A$	B
1	10	20	10	0.2466	1.0	1	0.4838	4.1704	1.4711	6.3420	-0.8219
2	20	40	20	0.3915	0.6660	1	0.4838	4.1704	5.2139	6.2489	-1.0135
3	30	60	30	0.5130	0.3859	1	0.4838	4.1704	8.3533	5.8314	-0.8339

表 G.10 损伤计算

周期#	$P_{min}$ (% $P_{SMYS}$ )	$P_{max}$ (% $P_{SMYS}$ )	$\Delta P$ (% $P_{SMYS}$ )	每年循环数 (n)	$N = 10^{(\log_{10} A + B \log_{10} SP)}$	$D_i = n_i / N_i$ 损伤
1	10	20	10	157	1600521	9.81E-05
2	20	40	20	55	332717	0.000165
3	30	60	30	36	115535	0.000312

因此，年累积损伤  $\sum_{i=1}^3 D_i = 0.000575$ ，返回凹陷总寿命  $Y_{Dent} = \frac{1}{D_1 + D_2 + D_3} = 1739.2$  年。

## G.5 频谱严重度计算

### G.5.1 循环压力特性

为了更容易地使用变幅压力历史，例如 SCADA 系统在疲劳寿命评估中报告的工作压力，通常将压力历史简化为若干恒定振幅加载事件。用于减少/简化复杂变幅负载历史的过程称为循环计数。

尽管已经开发了许多形式的循环计数（平交、峰值计数），但在疲劳寿命评估中最广泛使用的一种是雨流计数技术，因为雨流计数技术在识别受循环载荷影响的材料的应力应变响应中的闭合滞回环方面具有准确性。

雨流计数分析的输出是一个压力范围直方图，它将复杂的压力时间历史表示为一系列恒定振幅的压力范围和时间历史中存在的每个范围的循环数。压力范围直方图示例如表 G.11 所示。

在疲劳寿命评估时，压力范围容器中的每个循环通常假定在该容器的最大压力范围内进行。例如，范围等于 3 psi 的压力循环将放置在 5 psi 箱中，并在疲劳寿命计算中保守地假设压力范围大小为 5 psi。

表 G.11 样品压力范围直方图

压力范围 $\Delta P$ (psi)	循环数
5	10102

10	628
15	215
25	58
30	39
35	47
...	...

### G.5.2 参数说明

有几个参数可以用来描述液体管道的运行，包括：

最大压力——表示管道承受的最大压力和应力，在进行管道失效评估时通常很重要。由于可能很少发生，最大压力在疲劳寿命评估中通常具有二级重要性。

平均压力——表示管道在一段时间内的平均压力。提供管道一般操作的指示。平均压力会对管道的疲劳寿命产生影响。在实际应用中，疲劳寿命评估通常可以保守地进行，假设基于较高平均应力（压力）的材料参数。

最大压力范围——表示压力时间历史中最大和最小压力之间的差值。还提供了一个时间历史中的最小压力指示（无论管道是否已关闭）。从疲劳寿命评估的角度来看，最大压力范围是最重要的参数。

根据这些数据可以得到一维或二维压力谱，定义了压力范围和平均压力各组合出现次数的历史曲线，得到了二维压力谱。该谱用于定义的2级和3级凹陷疲劳寿命计算。

为了这个例子的计算，一个一维的压力谱是通过组合一个压力范围出现次数的直方图来展示的，与平均压力无关。该数据用于评估频谱严重性指标（SSI），如下一节所述。

### G.5.3 频谱严重度指示器

由于工作压力时程的复杂、变幅特性，很难量化与任何给定时程相关的循环疲劳严重程度，即使在通过雨流计数建立压力范围直方图之后也是如此。频谱严重度指标（SSI）是一个参数，用于量化与给定压力-时间历史相关的循环疲劳严重度。

如图 G.3 所示，SSI 是特征应力（或压力范围）的循环次数，其导致与实际压力时间历程相同的疲劳损伤（裂纹扩展或 miner 累积损伤总和）。尽管任何特征应力范围都可以用作 SSI 的基础，但在本项目中，SSI 基于 13ksi（89.638MPa）的环向应力范围。

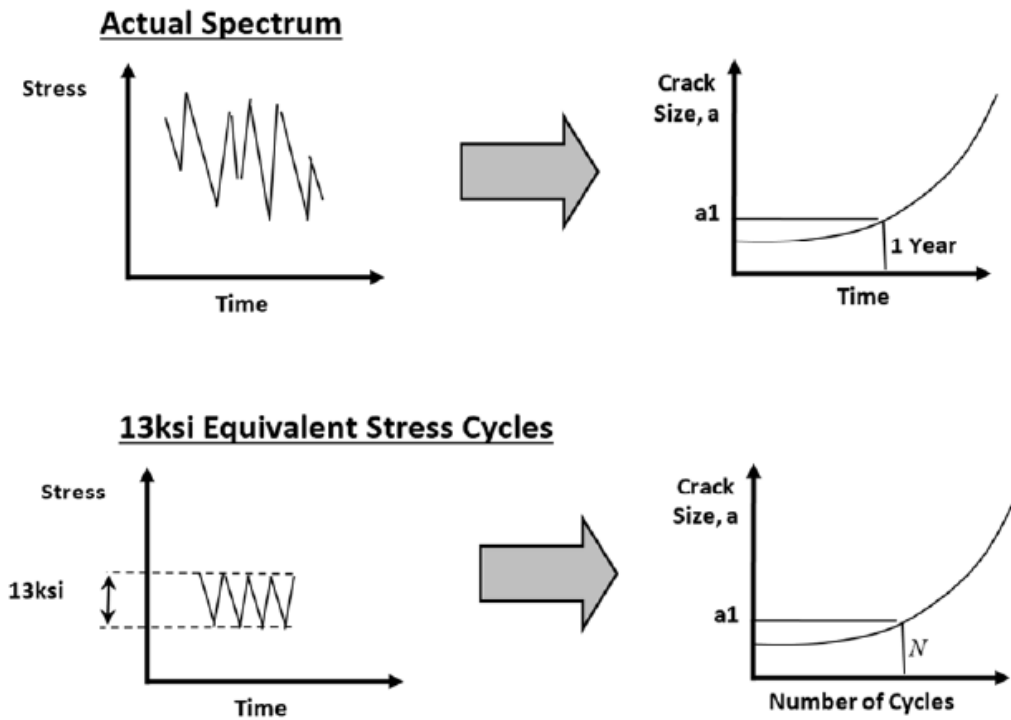


图 G. 3 频谱严重性指标描述

G. 5. 4 频谱严重性 (SSI) 指标样本应用

在此示例中，SSI 使用 S-N 疲劳损伤累积过程进行评估，SSI 也可以使用断裂力学方法进行计算。

步骤 1——压力时间历程

图 A.4 中给出了一个 1 年排放压力时间历程的样本，排放时间历程为外径为 42 英尺 (1066.8mm)、壁厚为 0.6 英寸 (15.24mm) 的 X70 级管道。

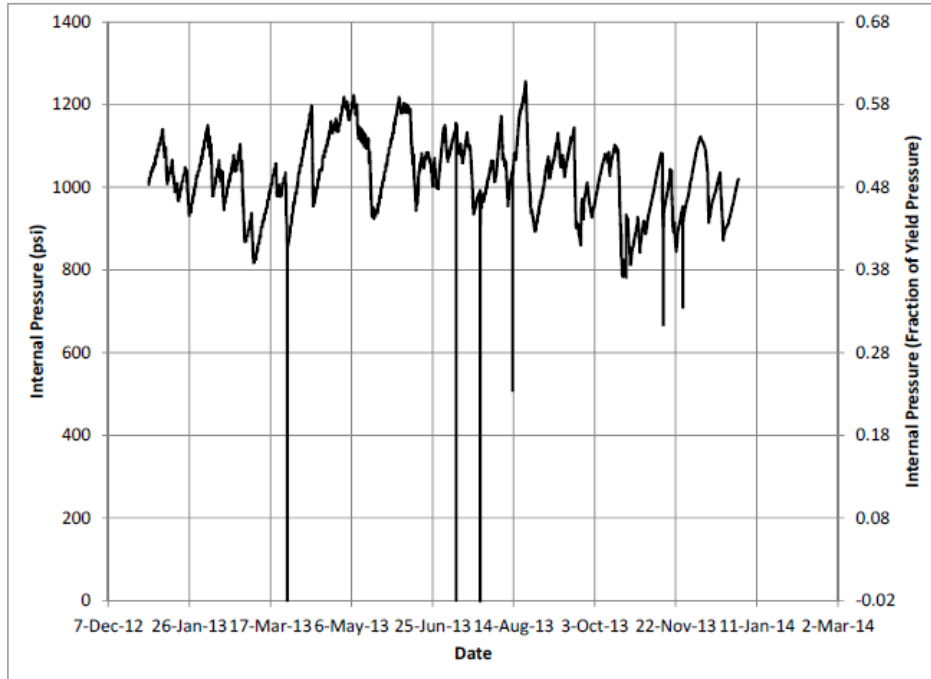


图 G.4 样本 1 年出口压力-时间谱

步骤 2——雨流计数法

将雨流计数算法应用于压力时间历史,并使用 10psi 的压力范围仓大小,可以绘制压力范围直方图,如图 G.5 所示。注意,为了显示剩余的仓,直方图中省略了第一个压力范围仓 (0-10psi)。

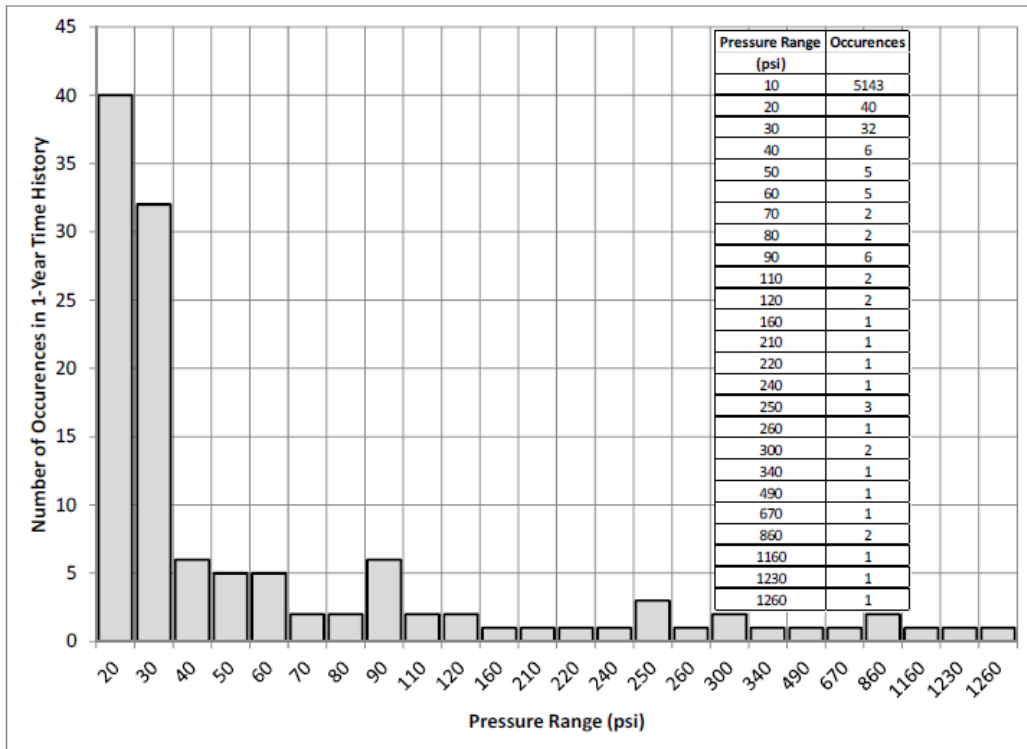


图 G.5 1 年时间历程的压力范围直方图

T/CASEI ×××××—××××

步骤 3——一年累积损害

由于简单（可在电子表格中进行计算），SSI 计算可利用 S-N 方法来估计整个压力-时间历史过程中累积的疲劳损伤。

正如将在后面一节中更详细地讨论的那样，SSI 的确定与计算中使用的 S-N 曲线无关。为便于计算，将使用 BS7608 D 级平均 S-N 曲线。该曲线由推拉 S-N 参数定义，假设应力范围为 ksi。

$$\log C = 10.0851$$

$$m = 3.0$$

通过将压力范围柱状图中每个压力范围箱累积的损伤相加，确定压力时间历史累积的损伤，使用以下公式计算每个压力范围（i）累积的损伤：

$$D_i = \frac{n^i}{N^i}$$

式中：

$n^i$  是压力范围柱状图 i 的循环次数。

$N^i$  是与压力柱状图 i 相关的环向应力范围的计算疲劳寿命。

$N^i$  的计算疲劳寿命使用以下公式计算：

$$\log N^i = \log C - m \log(\Delta \sigma^i)$$

$\Delta \sigma^i$  环向应力范围使用巴洛方程计算，如下所示：

$$\Delta \sigma^i = \frac{\Delta P^i \times OD}{2 \times t}$$

式中：

$\Delta P^i$  是压力柱状图 i 的压力范围。

表 G.12 总结了图 G.5 所示压力范围柱状图的累积损伤计算，由于时间历程为 1 年历程，假设 1 年的时间历程表明了管道的运行情况，则累积的总损伤代表了年度累积损伤。

表 G.12 1 年损伤累积计算

压力范围 $\Delta P$ (psi)	历史循环数 n (cycles)	应力范围 $\Delta \sigma$ (psi)	计算疲劳寿命 N (cycles)	损害 D
10	5143	350	2.84E+11	1.81E-08
20	40	700	3.55E+10	1.13E-09
30	32	1050	1.05E+10	3.05E-09
40	6	1400	4.43E+09	1.35E-09
50	5	1750	2.27E+09	2.20E-09
60	5	2100	1.31E+09	3.81E-09
70	2	2450	8.27E+08	2.42E-09
80	2	2800	5.54E+08	3.61E-09
90	6	3150	3.89E+08	1.54E-08
110	2	3850	2.13E+08	9.38E-09
120	2	4200	1.64E+08	1.22E-08
160	1	5600	6.93E+07	1.44E-08
210	1	7350	3.06E+07	3.26E-08

220	1	7700	2.66E+07	3.75E-08
240	1	8400	2.05E+07	4.87E-08
250	3	8750	1.82E+07	1.65E-07
260	1	9100	1.61E+07	6.19E-08
300	2	10500	1.05E+07	1.90E-07
340	1	11900	7.22E+06	1.39E-07
490	1	17150	2.41E+06	4.15E-07
670	1	23450	9.43E+05	1.06E-06
860	2	30100	4.46E+05	4.48E-06
1160	1	40600	1.82E+05	5.50E-06
1230	1	43050	1.52E+05	6.56E-06
1260	1	44100	1.42E+05	7.05E-06
			Total, $D_T$	2.58E-05

#### 第 4 步-计算 SSI

频谱严重度指标 (SSI) 表示给定应力范围  $\Delta\sigma_{\text{SSI}}$  (或压力范围) 的循环次数, 其累积的年度损伤与实际压力时间历史相同。作为 SSI 基础的应力范围可以是任何值。之所以选择  $\Delta\sigma_{\text{SSI}}=13$  ksi 的应力范围, 是因为它代表了 X52 级管线钢屈服强度的 25% 的应力范围, 其中 X52 代表了管道工业中使用的最常见的等级之一, 25% 的应力范围代表了管道在正常运行中所经历的相当常见的应力范围。

SSI 的计算方法是将实际压力时程 ( $D_T$ ) 中的年度损伤等同于等效应力范围内累积的损伤。

$$D_T = D_{\text{equivalent}}$$

$$D_{\text{equivalent}} = \frac{\text{SSI}}{N_{\text{equivalent}}}$$

公式中, SSI 是等效 SSI 应力范围内的循环次数 ( $\Delta\sigma_{\text{SSI}}$ );  $N_{\text{equivalent}}$  是等效 SSI 应力范围 ( $\Delta\sigma_{\text{SSI}}$ ) 的计算疲劳寿命。

等效应力范围下的疲劳寿命使用以下公式计算:

$$\log N_{\text{equivalent}} = \log C - m \log (\Delta\sigma_{\text{SSI}})$$

可以将前面的三个方程组合并重新排列, 从而得出以下方程, 用于计算 SSI。

$$\text{SSI} = D_T \times 10^{\lceil \log C - m \log (\Delta\sigma_{\text{SSI}}) \rceil}$$

$$\text{SSI} = (2.58 \times 10^{-5}) \times 10^{\lceil 10.0851 - 3 \log (13) \rceil} = 144$$



### 参考文献

- [1] API RP 1183 Assessment and Management of Pipeline Dents
- [2] API Standard 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service
- [3] API 1178 Integrity Data Management and Integration Guideline
- [4] API RP 1176 Recommended Practice for Assessment and Management of Cracking in Pipelines
- [5] API BULL 1178 Integrity Data Management and Integration
- [6] ASME B31.8S Managing System Integrity of Gas Pipelines
- [7] ASME B31.8G Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines
- [8] ASME PCC-2 Repair of Pressure Equipment and Piping
- [9] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division
- [10] ASTM E1049-85 (2017) Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis

T/CASEI ××××—××××

《油气管道凹陷检测评价与修复技术规范》

编制说明

标准编制工作组

2023年08月01日

# 目 录

1	工作简况.....	1
1.1	任务来源.....	1
1.2	编制单位、主要起草人员及分工.....	1
1.3	工作过程.....	1
2	编制原则和主要内容.....	1
2.1	编制原则.....	1
2.2	标准名称更改说明.....	2
2.3	标准主要内容说明.....	2
3	标准试验验证.....	3
4	预期经济效果.....	3
5	标准中涉及专利的情况.....	3
6	与国际、国外同类标准水平的对比情况.....	3
7	与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系.....	4
8	重大分歧意见的处理经过和依据.....	4
9	标准性质的建议说明.....	4
10	贯彻国家标准的要求和措施建议.....	4
11	废止现行有关标准的建议.....	4
12	其他应予说明的事项.....	4

# 《油气管道凹陷检测评价与修复技术规范》

## 编制说明

### 1 工作简况

#### 1.1 任务来源

凹陷是由于管道安装不当、硬物挤压、自然灾害等原因引起的管道塑性变形，是最为常见且容易失效的缺陷类型之一。由于运营管理企业对管道变形缺陷认识不足，缺少科学合理的检测与评价方法，导致修复计划和方法选择、以及长效安全管理上存在盲目性。目前，国内油气管道通过内检测设备识别发现管道存在凹陷时，一般通过简单的深度判断准则来确定其危险性，国标《基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价》（GB/T 30582-2014）虽然引入 ASME B31G 中的基于应变评估方法，但因为检测设备精度等原因，应变计算过程涉及凹陷轮廓拟合，过程复杂，且缺少危险变形缺陷的筛查、多缺陷的组合评价、修复等要求。由于管道凹陷类型多样，且与管道焊缝、划伤、腐蚀等其他缺陷组合时，评价和修复内容要求缺乏，尤其疲劳寿命评估，目前仍无专用标准指导运营管理企业和检测评价人员。因此，从保障管道安全的角度看，通过标准规范埋地油气管道凹陷的检测、识别表征、评价、修复、安全防护等完整性管理，具有重要的现实意义。

2021 年 8 月，中国特种设备检测研究院主编单位向中国特检协会提出起草团标《油气管道凹陷检测评价与修复技术规范》的申请，于 2021 年 11 月下达了该标准制订计划的通知，2022 年 2 月标准成立了编制工作组，开始标准的编制工作。

#### 1.2 编制单位、主要起草人员及分工

本标准起草单位主要包括：略。

本标准主要起草人包括：略。

#### 1.3 工作过程

2022 年 2 月，在接到标准起草任务后，主编单位对国内外相关法规标准进行了再梳理，结合科研成果转化情况，提出了标准的整体框架、编制原则和技术路线。2022 年 6 月，向中国特检协会汇报了调研情况、标准编写计划和主要参与单位情况。2022 年 11 月 11 日，标准编制工作组形成了标准初稿，并在北京召开了首次专家研讨会，详细讨论了标准的内容和工作计划安排。2023 年 7 月，标准形成征求意见稿，并挂网征求意见。

### 2 编制原则和主要内容

#### 2.1 编制原则

1) 该标准在借鉴美国等国际先进完整性管理和标准规范的基础上，融合多年积累的油气管道缺陷管理成果发展而成。既符合我国实际情况，又具有国际先进性。

2) 充分结合国内管道企业现行管理方式和水平、凹陷检测与评价方法，形成了《油气管道凹陷检测评价与修复技术规范》。

3) 该标准利用完整性管理科学方法, 围绕油气管道本质安全, 基于 PDCA 的管道凹陷管理模式, 通过制定管道凹陷的数据收集, 特征识别、凹陷筛选、适用性评价、现场开挖、减缓与修复等工作内容, 指导企业规范凹陷的评估与管理, 降低凹陷事故率。

4) 为管道企业提供凹陷检测评价与长期管理方法。

## 2.2 标准名称更改说明

本标准立项名称为《油气管道变形缺陷检测评价与修复技术规范》, 编写过程中, 更改名称为《油气管道凹陷检测评价与修复技术规范》。理由: 管道变形缺陷类型较多, 凹陷仅为其中一种, 本标准主要针对管体局部结构变形凹陷, 并未涉及管道轴向受压等的整体褶皱、屈曲失稳、错边等变形缺陷。因此本标准名称进一步限定, 修改后的名称更加准确。

## 2.3 标准主要内容说明

本标准适用于输送石油与天然气、城市燃气的埋地钢质管道系统, 为管道运行管理、检测和评价人员提供有关埋地钢质管道凹陷完整性管理的行业实践指南。低温、高温、氢气、CO<sub>2</sub> 等厂区架空或厂际埋地钢质管道也可参照使用。

本标准送审稿正文包括 12 个章节和 7 个附录。12 个章节分别是: 范围、规范性引用文件、术语和定义、缩略语、总则、完整性管理流程、数据收集, 特征识别、凹陷筛选、适用性评价、现场开挖、减缓与修复。7 个附录分别为附录 A 凹陷类型和形成过程、附录 B 凹陷几何特征识别和表征方法、附录 C 凹陷筛选、附录 D 凹陷适用性评价方法、附录 E 现场开挖记录、附录 F 可接收的管道凹陷修复方法选择和流程、附录 G 管道凹陷评价案例。附录 B、附录 C、附录 D、附录 F 等 4 个附录为规范性附录, 其他附录均为资料性附录。

### 1) 总则

规定了凹陷来源、管理流程、分类管理方式。

### 2) 凹陷管理流程

介绍了凹陷的评估与管理包含数据收集、凹陷识别、几何重合特征和运行分析、凹陷筛查、适用性评价、维修维护决策、管理改进等 7 个过程要素, 规定了执行过程的 4 个步骤。

### 3) 数据收集

规定了凹陷评估前的数据收集表。

### 4) 凹陷特征识别

给出了凹陷几何、约束、重合、运行条件等特征的识别, 用于对凹陷相关信息识别和凹陷分类。

### 5) 凹陷筛选

规定了凹陷筛选的原则和方法。

### 6) 适用性评价

规定了凹陷评价方法, 从应变、强度、疲劳寿命三个方面进行了介绍, 并给出了凹陷安全系数的选择原则。

### 7) 现场开挖

规定了凹陷的现场开挖作业、在线检测和监测、开挖记录以及现场切割移除等相关要求。

### 8) 减缓与修复

规定了凹陷的减缓措施、降压、压力循环波动管理、交互作用管理、修复等相关内容。

### 3 标准试验验证

主编单位联合标准编制工作组相关单位，对标准中提的各种方法进行了实际验证，确定是可行且可靠的。

### 4 预期经济效果

本标准技术内容融合了“十一五”至“十三五”期间的多项研究成果，重点关注管道凹陷的评估与管理，通过类似体检的形式，定期对管道凹陷进行质量检验，并进行科学管理。

本标准吸纳的技术成果已在国家管网、油气田、燃气公司等经营企业广泛应用，部分成果本身就是国内先进管道企业的管理经验积累。本标准融合了国际先进PDCA管理模式，与目前管道完整性管理完全结合，更加注重凹陷的数据收集、识别和筛选，适用性评价给出了从变形、强度和寿命等多方面的综合评价方法，侧重凹陷的长期运行失效管理，解决了凹陷仅基于寿命，应变评估方法缺少数据，过程繁琐的问题，同时增加了管道凹陷的长期疲劳寿命评估方法，并给出了相关计算案例，提升了标准的实用性。。本标准的实施，可提升管道凹陷的评价技术，提升管道本质安全管理水平。

### 5 标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

### 6 与国际、国外同类标准水平的对比情况

目前，国外已开展了一些变形缺陷的理论和实验研究。EPRG、AGA和PRCI对普通平滑凹陷、焊缝+凹陷、划伤+凹陷、腐蚀+凹陷、不圆、斜接等变形缺陷进行了实验和有限元模拟研究，建立了变形缺陷工程评估经验公式。BG和EPRG亦提出了划伤凹陷断裂模型。Liu J H和Francis A通过采用能量平衡理论给出了外载与凹陷深度的关系。美国ASME B31.8发布凹陷基于应变的评估方法。美国联邦法规49CFR192、195，美国机械工程师协会（ASME）均针对凹陷管道评价和修复做出了规定，且根据凹陷深度（2%、6%、15%）和应力水平（20%、40%SMYS）决定是否修复，API推出了最新的标准《管道凹陷评估与管理》（API RP 1183-2020），增加了变形缺陷的疲劳评价，此外，ASME修复标准也在不断更新适用于管道变形缺陷修复的方法，最新版为ASME PCC-2-2018，并且已进入修订计划中。

国内，中国特检院在凹陷评估准则上进行了大量研究，并吸纳最新成果和ASME B31G的内容，将变形缺陷的应变评价方法和凹陷+划伤评价纳入了国标《基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价》（GB/T 30582-2014）中，但仍然缺少其他类型的变形缺陷评价、类型识别和表征、凹陷的疲劳评价、详细修复方法及管理，另外，凹陷类型多样，执行过程复杂，缺少详细案例支撑，需要建立变形缺陷样本库和评价案例库。

结合国际管道行业相关技术的最新规范内容，通过集成创新，形成了《油气管道凹陷评估与管理》。围绕油气管道的本质安全，基于PDCA循环管理模式，提出了对凹陷识别、筛选、检测、评价、开挖验证、减缓与修复的完整性管理流程和技术要求，是对《油气管道完整性管理规范》（GB 32167）和《基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价》（GB/T 30582）的细化。目前，国内无相关凹陷识别、筛选、寿命评价等技术标准，该标准的制定，可提高管道企业对凹陷的评估与管理水平，填补了国内空白。

## 7 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

- 1.本标准遵守《中华人民共和国特种设备安全法》中关于压力管道安全监管的有关要求；
- 2.本标准遵循《油气管道完整性管理规范》（GB 32167）、《基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价》（GB/T 30582）等相关标准规定，从管道凹陷质量安全管理角度提出明确的技术要求；
- 3.本标准是《压力管道定期检验规则-长输管道》（TSG D7003）等安全技术规范的补充。

## 8 重大分歧意见的处理经过和依据

无。

## 9 标准性质的建议说明

建议本标准作为团体标准。

## 10 贯彻国家标准的要求和措施建议

- （1）标准发布后，应组织对实施标准的单位和技术人员进行宣贯培训；
- （2）主管部门对标准的实施情况进行检查，发现问题及时反馈，确保本标准的贯彻实施；
- （3）在本标准使用过程中，需要实施单位积累经验，及时向标准起草单位反馈意见，起草单位根据反馈意见和相关技术进展等情况对标准进行不断修订和完善。

## 11 废止现行有关标准的建议

无。

## 12 其他应予说明的事项

无。

《油气管道凹陷检测评价与修复技术规范》  
标准编制工作组  
2023年08月01日