



中华人民共和国国家标准

GB/T 36676—2018

埋地钢质管道应力腐蚀开裂(SCC) 外检测方法

External inspection methodology of stress corrosion cracking(SCC) for
buried steel pipelines

2018-09-17 发布

2019-04-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 2

5 数据收集 2

6 SCC 敏感因素分析 3

7 SCC 位置预测 3

8 开挖检测 4

9 评估与处置 4

10 记录和报告 6

附录 A（资料性附录） 数据收集 8

附录 B（规范性附录） SCC 敏感性分析和评估 10

附录 C（资料性附录） 土壤环境下 SCC 敏感电位区间确定方法 15

附录 D（资料性附录） 含 SCC 管段裂纹扩展速率实验测定方法 17

附录 E（资料性附录） 交变载荷作用下含 SCC 管段裂纹扩展速率预测方法 19

参考文献 23

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本标准起草单位:中国特种设备检测研究院、北京科技大学、中国石油大学(北京)、中国石化销售有限公司、中国石油天然气股份有限公司管道分公司、中国石油化工股份有限公司天然气分公司、中石化长输油气管道检测有限公司、重庆市特种设备检测研究院、中国石化销售有限公司华南分公司、中国石油工程建设有限公司西南分公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司、深圳市燃气集团股份有限公司、福建省特种设备检验研究院、广东大鹏液化天然气有限公司、上海金艺检测技术有限公司、中石油东部管道有限公司。

本标准主要起草人:修长征、王俊强、王海涛、李晓刚、刘智勇、帅健、邵珊珊、卜文平、冯庆善、宗照峰、薛正林、吴晓阳、王卫东、姜放、陈钊、卢宏伟、李先明、周德敏、安成名、吴林军、李曙华、梁强、万欣、刘晴、李岩。

埋地钢质管道应力腐蚀开裂(SCC) 外检测方法

1 范围

本标准规定了埋地钢质管道应力腐蚀开裂(SCC)的外检测方法,包括数据收集、SCC 敏感因素分析、SCC 位置预测、开挖检测、评估与处置、记录和报告。

本标准适用于陆上长输管道、集输管道以及公用管道中的埋地钢质管道,其他埋地钢质管道可参照本标准的相关规定执行。

本标准仅适用于埋地钢质管道由外部环境引起的应力腐蚀开裂,不适用于输送介质引起的应力腐蚀开裂。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 19285 埋地管道腐蚀防护工程检验

GB/T 19624 在用含缺陷压力容器安全评定

GB/T 24196 金属和合金的腐蚀 电化学试验方法 恒电位和动电位极化测量导则

GB/T 27699 钢制管道内检测技术规范

GB/T 27921 风险管理 风险评估技术

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

NB/T 47013 承压设备无损检测

TSG D7003 压力管道定期检验规则-长输管道

TSG D7004 压力管道定期检验规则-公用管道

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

应力腐蚀开裂 stress corrosion cracking; SCC

金属材料在拉应力和腐蚀环境联合作用下引起的开裂现象。

3.2

高 pH SCC high pH stress corrosion cracking

埋地管道的一种由外部碱性电解质环境引起的应力腐蚀开裂形式。

注:裂纹表现为沿晶开裂,并有明显分叉。

3.3

近中性 pH SCC near neutral pH stress corrosion cracking

埋地管道的一种由外部近中性 pH 电解质环境引起的应力腐蚀开裂形式。

注:裂纹一般表现为穿晶开裂,分叉较少,裂纹处或管道表面有腐蚀现象。

4 总则

4.1 应力腐蚀开裂外检测工作应满足 TSG D7003、TSG D7004 等国家相关法规标准的规定。

4.2 本方法用于评估陆上埋地钢质管道由外部环境引起的应力腐蚀开裂,包括近中性 pH SCC 和高 pH SCC 两种形式。

4.3 应力腐蚀开裂外检测工作包含六个步骤:数据收集、SCC 敏感因素分析、SCC 位置预测、开挖检测、评估与处置、记录和报告,流程如图 1 所示。

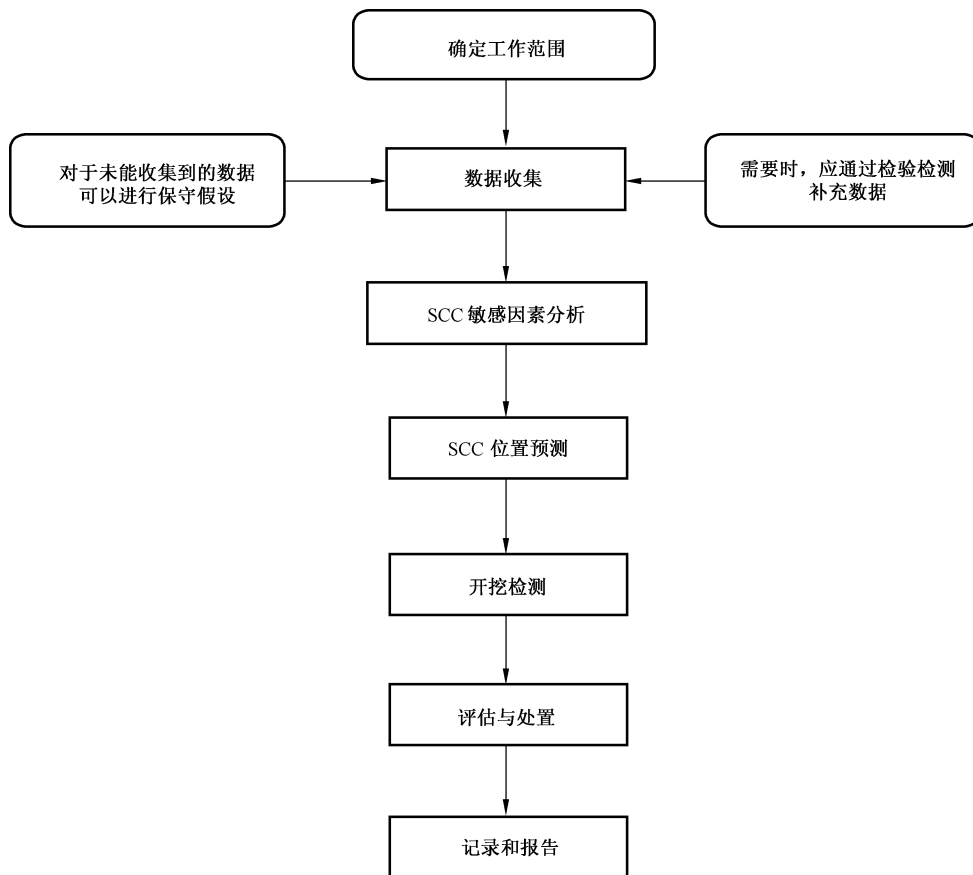


图 1 应力腐蚀开裂外检测流程图

5 数据收集

5.1 收集管道基本信息、历史和当前有效数据,至少应包括管道设计资料、安装资料、内外环境、腐蚀防护系统、运行维护资料等五类数据,参见附录 A 表 A.1。

5.2 当收集到的数据不足时,应通过检验检测补充表 A.1 所需数据,其中腐蚀防护系统检测按照 GB/T 19285 执行,内检测按照 GB/T 27699 执行。

5.3 当数据未能收集到且又无法进行补充检验检测时,评估人员可以基于类似情况的经验和信息进行保守假设,假设数据以及相应的措施应予以记录。

6 SCC 敏感因素分析

- 6.1 SCC 敏感因素分析是在数据收集的基础上,确定 SCC 的发生条件、损伤类型和形成原因,用于准确确定 SCC 检测范围。
- 6.2 SCC 的发生需要同时满足三个条件,即敏感金属材料、足够大拉应力和特定腐蚀环境。埋地钢质管道 SCC 的具体发生条件见附录 B。
- 6.3 影响 SCC 裂纹萌生和扩展的因素众多,关系复杂且具有不确定性,可按照附录 B 对影响 SCC 的因素进行敏感性分析。
- 6.4 高 pH SCC 和近中性 pH SCC 发生的腐蚀环境有所差别,其特征和敏感因素对比见表 1。

表 1 两种 SCC 类型的特定腐蚀环境

因素对比	SCC 类型	
	高 pH SCC	近中性 pH SCC
位置	防腐层破损点处,干湿交替的土壤环境	防腐层剥离或破损处
温度	>32 ℃	无影响
特定土壤腐蚀溶液	浓的 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 溶液, $\text{pH}>9.3$	稀的 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 溶液, pH 介于 5.5~7.5
管道表面电位	-600 mV~750 mV 相对饱和 Cu /CuSO ₄ 参比电极(CSE)	阴极保护被屏蔽,自然腐蚀电位
管道表面腐蚀情况	裂纹处无腐蚀	裂纹处有腐蚀,裂纹萌生与蚀坑相关

7 SCC 位置预测

7.1 SCC 敏感管段筛选

- 7.1.1 满足下列条件的管段应确定为 SCC 敏感管段：
- a) 曾发生过 SCC 的邻近管段；
 - b) 与以往发生 SCC 具有相同或相近特征的管段,特征包括地形特征、土壤类型、含水率、排水状况以及防腐层异常等；
 - c) 操作条件下,应力超过管材规定最低屈服强度的 60%、在压气站或泵站下游操作压力较大且波动频繁、局部残余应力较大或应力集中等的管段,操作温度高于 38 ℃ 的管段；
 - d) 使用年限大于 10 年的长期服役老旧管段；
 - e) 检测发现防腐层存在剥离、破损、老化等异常,尤其防腐层为非熔结环氧粉末(FBE)的管段；
 - f) 检测发现管体存在腐蚀、凹陷、裂纹等缺陷的管段；
 - g) 阴极保护不达标或异常管段,或参考附录 C 确定的 SCC 敏感电位区间处于 I 区的管段；
 - h) 检测人员认定的可能发生 SCC 的其他敏感管段,如穿越、跨越管段的出入土位置、地质灾害引起的变形管段、车辆碾压管段、投产后埋深发生变化且土壤具有腐蚀特性的管段等。
- 7.1.2 按照附录 B 对筛选出的管段进行 SCC 敏感性评估,依据评估结果对敏感管段进行开挖排序。

7.2 SCC 敏感管段开挖位置确定

- 7.2.1 开挖位置确定的原则如下：
- a) 优先开挖已发生过 SCC 的位置,或按照 GB 32167 要求开挖由内检测发现的裂纹缺陷位置；

- b) 如果已确认之前发生 SCC 的位置具有某些相同特征,应考虑在相同特征的其他地点进行开挖;
- c) 如果没有发生过 SCC,应考虑开挖防腐层异常、管体缺陷的位置;
- d) 除上述情况外,应考虑开挖应力、压力波动以及温度最高的位置。

7.2.2 对开挖位置进行现场勘察、预评估,确定是否具备开挖条件。

8 开挖检测

8.1 开挖原则

8.1.1 SCC 敏感管段的开挖可结合管道定期检验进行,开挖点数量和比例按照 TSG D7003 中开挖检测的相关要求执行。

8.1.2 优先开挖排序靠前的 SCC 敏感管段。当开挖过程中,发现存在 SCC 时,优先开挖具有同类特征的管段。

8.1.3 开挖前,应制定详细的开挖计划,做好开挖准备工作,包括土地赔偿、开挖范围、安全措施等,开挖作业遵守相关安全操作规程。

8.2 开挖检测和数据采集

8.2.1 管道开挖、检测及回填过程中,应遵守相关法规及标准,防止管道失稳。

8.2.2 开挖前,应明确数据采集的最低要求,包括历史数据的有效性、采集的数据类型及用途等,并准备好所有相关记录表格,参见表 A.2。

8.2.3 开挖后,应对管道及防腐层进行宏观检查,应采用磁粉、渗透等方法对管道外表面进行检测,应采用超声、电磁、射线等方法对管体和焊缝进行检测。无损检测工作应按照 NB/T 47013 等相关标准执行。SCC 缺陷尺寸的确定,可采用磁粉或渗透检测方法确定裂纹宏观形状和路径,结合超声检测、打磨或抛光方法确定裂纹的最大深度。打磨或抛光的深度和长度应遵守操作规程对最大允许打磨量的要求,可参照相关管道缺陷修复标准执行。

8.2.4 在开挖检测过程中应详细记录管道和防腐层的各类缺陷特征、尺寸、相对位置等,以图片和文字形式保存。

8.2.5 对开挖检测过程发现的除 SCC 之外的外腐蚀、内腐蚀、机械损伤等缺陷,应按照 GB/T 30582 选择相应的方法进行检测和评估。

8.2.6 发现的 SCC 裂纹分布范围超出开挖区域时,应对检测位置进行扩挖;检测人员认为必要时,可增加开挖位置进行验证性检测。

8.3 SCC 开裂分析

8.3.1 依据开挖检测发现的裂纹宏观形貌和尺寸,区分裂开类型,包括高 pH SCC、近中性 pH SCC 或其他类型缺陷;分析开裂形成原因,包括机械损伤、腐蚀、安装焊接缺陷等;针对裂纹群,分析裂纹之间的相互作用,确定损伤程度,包括最大长度和宽度,参见表 A.2。

8.3.2 如果宏观无法区分 SCC 类型,可采用原位金相分析方法,检验 SCC 微观形貌。

9 评估与处置

9.1 SCC 裂纹评估与处置流程

9.1.1 SCC 裂纹评估与处置包含四个方面:SCC 裂纹评估、处置与减缓控制措施、裂纹扩展速率预测和

SCC 检验周期确定,其中 SCC 裂纹评估包括 SCC 超标缺陷判定和 SCC 裂纹分级评估两个步骤。

9.1.2 SCC 裂纹评估按照图 2 所示的流程进行。

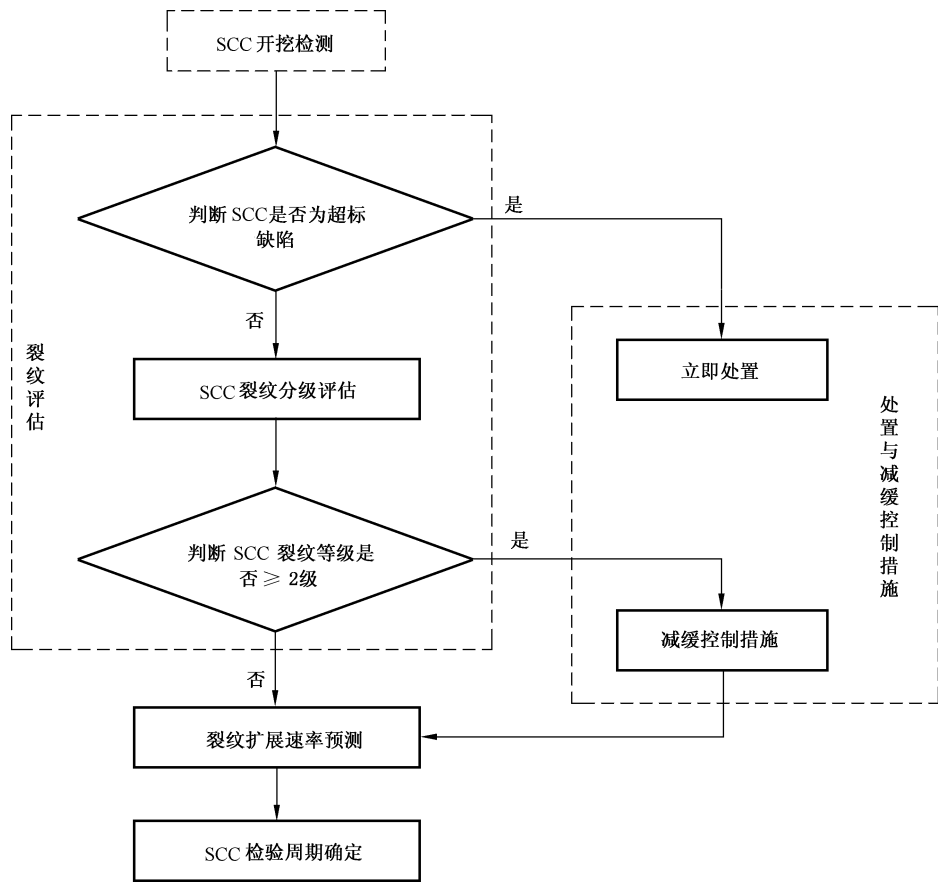


图 2 SCC 裂纹评估和处置流程图

9.2 SCC 裂纹评估

9.2.1 SCC 超标缺陷按如下准则进行判定：

如果 SCC 裂纹群中最深裂纹的深度超过了管道实测壁厚的 10%，且等效长度大于或等于临界裂纹尺寸的 75%，则认为该 SCC 为超标缺陷。其中，临界裂纹尺寸按照 GB/T 19624 进行计算(假设裂纹类型为穿透型裂纹,管道应力水平为 1.1 倍规定最低屈服强度)。

9.2.2 对未超标的 SCC 裂纹按照表 2 进行分级评估。

表 2 SCC 裂纹分级评估

SCC 裂纹分级	SCC 裂纹分级准则	剩余寿命预估
1 级	失效压力>管材规定最低屈服强度的 1.1 倍对应的压力	10 年
2 级	最大允许操作压力的 1.25 倍<失效压力≤管材规定最低屈服强度的 1.1 倍对应的压力	5 年
3 级	最大允许操作压力的 1.1 倍<失效压力≤最大允许操作压力的 1.25 倍	2 年
4 级	失效压力≤最大允许操作压力的 1.1 倍	少于 2 年
注：SCC 裂纹的失效压力按照 GB/T 30582 和 GB/T 19624 中体积型缺陷(通过打磨消除的 SCC 可采用等效体积型缺陷进行计算)或平面型缺陷的安全评定方法推算得到,也可通过有限元模拟、水压试验等得到。		

9.3 处置与减缓控制措施

9.3.1 针对少量孤立分布的 SCC 超标缺陷,应打磨去除。当打磨后管段强度不足时,应参考相关规范标准进行补强修复;当缺陷深度超过打磨修复要求时,可采用换管或其他修复方法;针对大面积分布的 SCC 超标缺陷,应立即换管。

9.3.2 减缓控制措施可根据 SCC 发生历史、检测情况、损伤原因等因素综合确定。原则如下:

- a) 本次检测未发现 SCC,且无 SCC 历史记录,管道正常运行,无需减缓控制。
- b) 本次检测未发现 SCC,但有 SCC 历史记录,仍按原 SCC 处理结果执行,检验周期不变。
- c) 本次检测发现 SCC,且为首次发现,可根据 SCC 成因,选择针对性的减缓控制措施。对于管段内压或外部交变载荷波动频繁引起的应力腐蚀疲劳断裂,可控制载荷波动减小其发生的可能性。对于由管体防腐层破损或机械损伤后引起的管体腐蚀,进而形成 SCC,可打磨消除 SCC,并进行管体和防腐层补强修复,同时,检验人员根据 SCC 的损伤程度和裂纹扩展速率预测结果,缩短下一次检验周期。
- d) 对于多次定期检测均发现 SCC 的情况,除降压运行、及时采取修复措施外,还应选用有效检测方法扩大该管段检测范围,如压力试验、内检测、100%磁粉检测等方法。

9.4 裂纹扩展速率预测

9.4.1 SCC 裂纹的扩展速率预测可选用实验方法进行测定,参见附录 D。当近中性 pH 土壤环境下含 SCC 管段存在较为频繁的压力波动或外部交变载荷时,易发生疲劳或腐蚀疲劳开裂,裂纹扩展速率预测可参照附录 E 执行。

9.4.2 SCC 裂纹扩展速率用于计算该管段的剩余寿命,最终剩余寿命评估结果取裂纹扩展速率计算值和表 2 预估年限两者中的较小值。

9.4.3 当管段同时存在 SCC 与腐蚀等其他缺陷时,需根据缺陷类型、位置和相互作用情况综合确定剩余寿命。

9.5 SCC 检测周期确定

9.5.1 应根据 SCC 分布范围和严重性、裂纹群的扩展速率、输送工艺和周围环境等综合确定下一次检测周期。

9.5.2 SCC 检验周期的确定应满足 TSG D7003 的要求。

10 记录和报告

10.1 记录

10.1.1 数据收集记录

所有数据收集过程都应进行记录,记录文档包括但不限于以下内容:

- a) 根据表 A.1 收集的数据;
- b) 假设数据以及相应的措施;
- c) 确定检验检测方法和补充数据的分析文档。

10.1.2 SCC 发生条件和损伤机理分析记录

所有 SCC 发生条件和损伤机理分析过程都应进行记录,记录文档包括但不限于以下内容:

- a) SCC 敏感因素分析和评估结果;

- b) 选择的其他分析方法和结果。

10.1.3 SCC 位置预测记录

所有 SCC 位置预测过程都应进行记录,记录文档包括但不限于以下内容:

- a) 确定应力腐蚀外检测敏感管段的分析文档;
- b) 确定开挖位置的方法和步骤。

10.1.4 开挖检测记录

所有开挖检测过程都应进行记录,记录文档包括但不限于以下内容:

- a) 开挖位置及周围环境信息;
- b) 去除防腐层前后采集的数据;
- c) SCC 裂纹类型分析结果。

10.1.5 评估与处置记录

所有的评估与处置过程都应进行记录,记录文档包括但不限于以下内容:

- a) SCC 超标缺陷的判定与处置结果;
- b) SCC 裂纹分级评估结果;
- c) 是否需要采取减缓控制措施,所选择的控制方法以及选择理由;
- d) SCC 扩展速率预测过程和下一检测周期确定结果;
- e) 其他相关工作记录。

10.2 报告

10.2.1 检测报告的内容应以记录为依据,与记录保持一致。

10.2.2 检测报告应包括但不限于以下内容:

- a) 管道基本情况;
- b) 数据收集应简要说明数据来源,并特别注明有怀疑或矛盾的数据;
- c) 确定应力腐蚀外检测敏感管段和开挖位置的选择依据及结果;
- d) 开挖检测包括检测过程、使用的仪器设备及检测数据;
- e) SCC 裂纹类型分析的过程和结果;
- f) SCC 裂纹超标缺陷判定和分级评估结果,需要采取的处置减缓措施,所选择的方法及理由;
- g) SCC 剩余寿命预测和检测周期确定的依据和结果;
- h) 需要时,对发现的严重问题提出维护建议。

附 录 A
(资料性附录)
数 据 收 集

A.1 应力腐蚀开裂外检测应按照表 A.1 进行数据收集。

表 A.1 数据收集

类 别	数据名称	需收集的数据
管道设计资料	管径、壁厚和材质	管道公称直径、壁厚以及材质
	生产厂家和年份	管道元件生产厂家和生产年份
	焊缝类型	管道元件制造过程中焊接方式,如单或双面埋弧焊、闪光焊、搭接焊等焊接方式
	表面处理	管道表面热处理等方式
	防腐层类型	管道元件出厂的外防腐层,如环氧煤沥青布、聚乙烯包覆层、环氧粉末防腐层等
管道安装资料	安装单位和年限	管道现场安装单位和安装年限
	焊接类型、表面处理和防腐层类型	管道现场焊接方式、环焊缝表面处理方式、防腐层类型和安装方式
	焊缝质量检验情况	管道现场焊接过程的无损检测情况和监督检验情况
	套管、弯头、卡箍、阀门、接头、锚固等位置	管道安装套管、弯头、卡箍、阀门、各种接头、锚固等的具体位置
	回填土情况	管道安装后的回填土类型、埋深等
管道内外环境	路由情况	管道沿线的地形、周围建(构)筑物情况、穿越公路/铁路/河流情况、土地使用等情况、周围交叉并行管道等
	场站位置	管道上下游各泵站,升压站、阀室、终端等位置
	土壤特征	土壤类型、特征、含水率、腐蚀性
	输送介质	输送介质特性分析、腐蚀性介质含量等
	其他	地下排水系统、地表变迁、车辆碾压等
管道腐蚀防护系统	阴极保护系统	阴极保护系统的类型、运行情况、安装年限等
	管地电位测试信息	管地电位测试详细记录、部分位置无阴极保护或保护不达标的情况
	防腐层系统检漏记录	防腐层破损检测情况
	其他	其他阴极保护记录,包括改造和更换等
管道运行维护资料	管道运行参数	运行压力、温度、进/出站压力、压力波动、流速等详细监控记录数据
	定期检验情况	管道内/外检测、开挖检测、压力试验等定期检验资料,包括缺陷位置、特征、修复情况,尤其是 SCC 历史记录
	维修维护	管道在使用期间进行的修复、改造、异常处理等记录

A.2 在应力腐蚀外检测的开挖检测阶段,应按照表 A.2 的要求采集相关数据。

表 A.2 开挖检测采集数据

采集时间	数据名称	用途描述	重要性等级 ^a
防腐层去除前	管道-土壤间电位	地面上管道到土壤间电位比较,用于评价管道阴极保护水平	C
	土壤电阻率	与土壤中可溶性离子浓度及土壤腐蚀性有关,用于评价土壤腐蚀性	B
	土壤样本	用于确认地域状况,土壤分析结果用于建立预测模型 ^b	B
	地下水样本	化学分析结果,用于建立预测模型	B
	防腐层类型	必要条件,通过开挖现场确认,用于建立预测模型 ^c	A
	防腐层状况	用于整体防腐层状况和防腐层剥离程度评价	B
	防腐层剥离检查	测量记录防腐层剥离区域尺寸形状、与环焊缝距离、与管道顶端距离或钟点位置,与 SCC 形成有关	B
	电解质	用于确定开裂类型,可能与地下水化学性质有关	B
	开挖点照片	用于确定地域状况、防腐层系统和防腐层状况	C
防腐层去除后	沉积物描述和照片	用于确定开裂类型	B
	腐蚀产物分析	用于确定开裂类型	B
	腐蚀缺陷的确认和测量	用于腐蚀缺陷评价,也用于确定开裂类型	A
	腐蚀缺陷照片	标明参考位置,用于腐蚀缺陷评价	C
	焊缝类型	必要内容,通过开挖现场确认	A
	磁粉检测	必要内容,确认 SCC 是否存在	A
	裂纹群的位置和尺寸	用于确定开裂位置和其他测量参数的相关性 ^d	A
	裂纹长度和深度测量	用于确认开裂性质和裂纹严重程度,并决定是否需要立即处理 ^d	A
	原位金相观察	用于分析 SCC 微观形貌(穿晶或沿晶开裂)	B
	裂纹群照片	用于确认裂纹尺寸	A
	管道壁厚测量	—	A
	管径测量	—	A
防腐层去除前、后	其他数据	—	B

- ^a 数据采集的重要性等级:
A:应采集的数据;
B:可选择采集的数据;
C:有用的背景信息或用于其他分析的信息。
- ^b 土壤分析的常见参数包括 pH 值、电导率、阳离子及阴离子浓度、氧化还原电位、总碳酸盐量、有机碳等。
- ^c 如果开挖现场不能确认防腐层类型,需采样分析,可提供其电学和物理性能(如电阻率、透气性等)。
- ^d 如果存在裂纹群,需要评估邻近裂纹之间的相互作用,方法如图 A.1 所示,以确定最大裂纹长度和宽度,为计算裂纹缺陷处管段的失效压力提供依据。

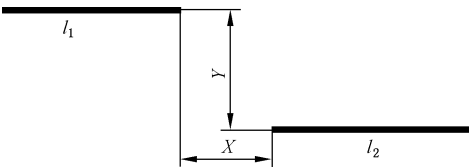


图 A.1 相邻的裂纹

如果两条裂纹轴向方向上的距离 X 满足式(A.1),或两条裂纹圆周方向上的距离 Y 满足式(A.2),则裂纹之间存在相互作用,可按一条裂纹计算,最大长度和宽度取相互作用裂纹所在区域的总长度和宽度;否则,两条裂纹视为单个裂纹,无相互作用,按单个裂纹分布进行评估。

$$X \leq 0.25 \frac{(l_1 + l_2)}{2} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$Y \leq 0.14 \frac{(l_1 + l_2)}{2} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:
 l_1 和 l_2 ——缺陷长度,单位为毫米(mm)。

附 录 B
(规范性附录)
SCC 敏感性分析和评估

B.1 埋地钢质管道 SCC 发生条件

B.1.1 SCC 的发生需要同时满足以下三个条件：

- a) 敏感金属材料：钢质管道的所有位置均可能发生 SCC，其敏感性与服役管材自身屈服强度、表面硬度、粗糙度等因素有关。
- b) 足够大拉应力：管道拉应力包括内压引起的环向应力、管道局部弯曲或轴向拉伸所产生的应力、残余应力和应力集中等。SCC 的发生要求拉应力超过某一临界值，一般为管材规定最低屈服强度的 60%。
- c) 特定腐蚀环境：SCC 多发生在管道外防腐层剥离或破损处，腐蚀环境与防腐层类型、土壤、温度、阴极保护电流等因素有关。

B.1.2 高 pH SCC 和近中性 pH SCC 两种形式有其特定发生条件、相关性和差异性。由于影响 SCC 发生条件和程度的因素众多且相互作用，使 SCC 发生位置的预测存在一定的不确定性。

B.2 SCC 敏感因素分析

B.2.1 敏感金属材料

钢质管道的管体材料(母材和焊接接头)、钢管生产厂家和服役年限均是 SCC 敏感因素。

当管道存在焊材选用不当，焊接质量差等情况时易发生 SCC。

钢管生产厂家与 SCC 的发生存在如下间接关系：

- a) 部分出厂管道存在较高的残余应力导致发生 SCC；
- b) 特定项目或特定管道生产企业使用的防腐层工艺导致发生 SCC。

如果存在上述情况，则认为生产厂家与 SCC 的发生相关，为敏感因素。

SCC 与服役年限有关。对于长期服役的老旧管道更容易发生 SCC，投用未超过 10 年的新建管道可不考虑 SCC。

B.2.2 压力等级

压力等级反映了服役管道的应力状况，是 SCC 发生的主要敏感因素之一。当压力水平高于管材规定最低屈服强度的 60%时，SCC 更易形成并扩展。当管道位于地质灾害区，土体发生滑移或挤压会导致管道轴向承受较大拉应力，管道容易发生环向 SCC。

B.2.3 应力循环

应力循环对 SCC 的裂纹扩展速率有一定的影响，可产生疲劳裂纹扩展。

在高 R 比($R = \text{最小压力} / \text{最大压力}$)和低周载荷波动条件下，大量卸载事件可以促使 SCC 裂纹启裂或加速扩展。焊缝焊趾、沟槽和机械损伤等局部应力集中点也能加速 SCC 的裂纹扩展。

当埋地管道承受汽车碾压等外部交变载荷作用时，其轴向应力可能远大于由内压引起的环向应力，易产生环向 SCC。

B.2.4 外界环境

B.2.4.1 电化学条件

近中性 pH SCC 在自由腐蚀电化学势为 $-790\text{ mV} \sim -760\text{ mV(CSE)}$ 之间时发生,该腐蚀环境与管道阴极保护不达标相关。SCC 容易发生在防腐层区域,且与防腐层类型相关,聚乙烯(PE)胶带防腐层易发生 SCC,煤焦油或沥青防腐层发生 SCC 相对较少。

高 pH SCC 在自由腐蚀电化学势为 $-750\text{ mV} \sim -600\text{ mV(CSE)}$ 之间发生,该腐蚀环境与外界干扰管道阴极保护相关。这种情况多发生在煤焦油或沥青防腐层中,有时也发生在外部环境对管段阴极保护干扰的区域,如岩石与管道接触的表面等。

B.2.4.2 剥离防腐层内化学条件

近中性 pH SCC 的防腐层剥离区腐蚀液体是稀释碳酸盐溶液,其 pH 在 5.5~7.5 的范围内,为厌氧条件。

高 pH SCC 的防腐层剥离区腐蚀液体是高浓度的碳酸盐溶液,其 pH 值高于 9.3,可能存在氯化物,为防腐层剥离区提供有氧条件。

当管道防腐层剥离区的土壤含有较高浓度的硝酸盐、氯化物、硫酸盐或氟化物时,也可能引发 SCC,需进行记录和腐蚀特征描述。

B.2.4.3 温度条件

近中性 pH SCC 与操作温度或土壤环境温度之间无特殊关联。

高 pH SCC 与操作温度或土壤环境温度之间存在一定的关联,一般认为温度高于 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会加快裂纹扩展的速度。该情况一般发生在压气站下游 30 km 内无冷却设备或流量增加导致温度上升的输气管段,以及土壤环境温度较高的输油管段中。距离泵站或压气站最近的下游管段发生 SCC 的可能性较高。

B.2.4.4 防腐层及土壤条件

防腐层类型与土壤及排水条件的共同作用,对 SCC 的影响最大。

在高、低湿度周期性交替变化、低电阻率的土壤环境中,管道更易发生 SCC,尤其是近中性 pH SCC。

对于塑料、PE 胶带和 PE 热收缩套类型的管道外防腐层,在黏性土壤中随着水分含量的变化,土体收缩或膨胀,可引起管道表面压力变化,导致防腐层起皱或脱落,且黏性土壤中水分含量较高,易渗入防腐层内引起 SCC;在石质或砂质土壤中排水性较好,水渗入防腐层下引起 SCC 的可能性较小。对于沥青和煤焦油防腐层,在黏性土壤中排水性不好但可保证防腐层湿度,在防腐层出现裂纹或失效的情况下能够为阴极保护系统传输必要的离子,不易发生 SCC;在干燥的岩石土壤中更易发生 SCC。

B.2.5 SCC 发生历史

对于发生过 SCC 的管段,其邻近管段由于具有相同的环境特征,发生 SCC 的几率较高。对于其他区域管段,可通过分析运行情况、环境参数等因素的相似性确定是否为敏感管段,如土壤一致性、防腐层类型以及发生过的 SCC 的范围和严重性。

B.2.6 腐蚀现象

高 pH SCC 的发生与管道表面腐蚀凹坑无关。

近中性 pH SCC 的发生与管道表面腐蚀凹坑有关。当管道阴极保护电流不足时,无法到达管道表面,腐蚀凹坑处更易发生近中性 pH SCC;当阴极保护电流足够大时,可到达管道表面,近中性 pH SCC 可以得到一定程度的控制。

B.3 SCC 敏感性评估

B.3.1 数据可靠性

进行敏感性评估时,应考虑是否可以获取有效数据以及其可靠性。当数据不完整或准确性存在问题时,应制定数据优化方案,通过分析 SCC 敏感因素和数据的质量,综合确定 SCC 敏感性的评分或等级。

B.3.2 数据评估

对于筛选得到的 SCC 敏感管段,详细分析各敏感管段的 SCC 敏感因素及重要性等级,按照表 B.1 制定敏感因素评分细则,对各管段进行敏感性评分,结合 TSG D7003 开挖检测的要求确定开挖管段数量,根据各管段 SCC 的发生条件或运行环境发生重要变化的时间来确定开挖先后顺序。当一段管道曾受到一个或多个重要敏感因素的影响时,可通过改善施工工艺参数和运行环境,降低该管段发生 SCC 的可能性。如果评估人员发现以往分析得出的 SCC 敏感因素重要性发生了变化,部分因素 SCC 敏感等级降低,需要重新进行 SCC 敏感性评分和开挖排序。如果在预测会发生 SCC 的区域没有发现 SCC,重新评估 SCC 敏感性评估方法的有效性以及之前的评估结果,或按照 GB/T 27921 选用合适的风险评估方法,重新建立适用性更好的 SCC 敏感性评估方法。

表 B.1 SCC 敏感性评估汇总表

数据类型		与 SCC 关联性	重要性等级 ^a
管道设计	管道等级	不确定与 SCC 的关联性	C
	管径	不确定与 SCC 的关联性	C
	壁厚	不确定与 SCC 的关联性	C
	设计使用年限	不确定与 SCC 的关联性	C
	管道生产厂家	生产厂家某种类型或某一批次的产品是否发生过严重的 SCC,是预测近中性 pH SCC 的重要因素	A
	焊缝类型	已发现近中性 pH SCC 易于在双面埋弧焊管的防腐层鼓泡区和电阻焊管的热影响区中发生。不确定与高 pH SCC 发生的关联性	B
	表面处理	喷丸或喷砂处理可以在表面产生残余压应力,抑制裂纹萌生;去除氧化皮也有利于抑制高 pH SCC 的发生	A
	防腐层类型	完好的聚乙烯防腐层管道中很少发生 SCC	A
	裸管	已发现 SCC 发生在高电阻率土壤中的裸管上	B
	硬点	已有实例显示,近中性 pH SCC 优先在硬点发生;硬点也是内腐蚀易于发生的位置	B
管道安装	安装年限	影响防腐层老化以及裂纹生长	A
	路线更改/修改	不确定与 SCC 的关联性	C
	路线图/航拍图	不确定与 SCC 的关联性	C

表 B.1 (续)

数据类型		与 SCC 关联性	重要性等级 ^a
管道安装	施工情况	在施工阶段,回填土会影响防腐层损坏的概率;管道填埋和安装阴极保护的时间间隔可能导致产生 SCC	B
	现场防腐层处理	如果钢管表面产生氧化皮,易于发生高 pH SCC	A
	现场防腐层类型	煤焦油、沥青和缠带防腐层都发现有高 pH SCC 发生;近中性 pH SCC 在缠带下最常见,但也发生在沥青防腐层下	A
	锚固位置	在锚固位置也发现有近中性 pH SCC 发生	B
	阀门、卡箍、各种接头等位置	不确定与 SCC 的关联性;仅仅应用于定位和表征位置	C
	套管的位置	在套管内更易发生阴极保护屏蔽和防腐层损坏,产生 SCC	B
	弯头位置,包括斜弯和抗皱弯	高的残余应力易于发生 SCC	B
	死口、筋口的位置	高的残余应力易于发生 SCC	B
内外环境	土壤特征/类型	不确定土壤类型和高 pH SCC 之间的关联性,高含量钠和钾在剥离防腐层下可能会促进碳酸盐/碳酸氢盐溶液的聚集;已经在一定程度上建立了近中性 pH SCC 和特定土壤类型的相关性	B
	土壤腐蚀相关参数	已经确定与高 pH SCC 和近中性 pH SCC 相关	A
	排水系统	已经确定与高 pH SCC 和近中性 pH SCC 相关	B
	地形	已经确定既与高 pH SCC 和近中性 pH SCC 相关(这可能与排水性有关),也与内介质引起的 SCC 相关	B
	土地使用情况	还未发现明显的相关性,但是化肥的使用可能会影响土壤的化学性质,因此关系到剥离防腐层下的积液	B
	输送介质腐蚀性	输送介质的腐蚀性离子含量是管道内腐蚀的决定性因素	A
	地下水	地下水的电导率影响阴极保护系统的电流分布	B
	跨河的位置	影响土壤水分/排水	B
腐蚀防护系统	阴极保护系统类型	有效的阴极保护可以防止防腐层剥离位置管道发生 SCC	B
	阴极保护评价标准	有效的阴极保护可以防止防腐层剥离位置管道发生 SCC	C
	阴极保护运行情况	有效的阴极保护可以防止防腐层剥离位置管道发生 SCC	C
	阴极保护年限	对于高 pH SCC,不施加阴极保护可能会在管道表面形成有害氧化物;对于在开路电位下或接近开路电位下发生的近中性 pH SCC,没有阴极保护情况下 SCC 会持续发展	B
	管地电位测试信息	高 pH SCC 通常发生在 $-825\text{ mV} \sim -575\text{ mV}$ (CSE) 电位范围内;由于剥离防腐层的屏蔽作用,该位置管道表面实际电位可能会比地面上测量到的电位偏正	B
	防腐层类型	防腐层破损是发生 SCC 的前提条件,防腐层对确定 SCC 敏感性和 SCC 类型很重要	A
	防腐层系统检漏记录	防腐层破损是发生 SCC 的前提条件,防腐层系统(防腐层类型,表面状况等)对确定 SCC 敏感性和 SCC 类型很重要	A

表 B.1 (续)

数据类型		与 SCC 关联性	重要性等级 ^a
运行 维护	管道工作温度	高温对高 pH SCC 有很强的促进作用;对近中性 pH SCC,温度对裂纹扩展速率的影响可能较小,但是温度升高会导致防腐层老化	A
	工作应力和波动应力情况	应力超过某一门槛值 SCC 才会发生;波动应力会明显降低门槛值	A
	SCC 导致泄漏/破裂历史	在以前发现 SCC 位置的附近可能发现更多的 SCC	A
	开挖检测和修复历史	在以前发现 SCC 位置的附近可能发现更多的 SCC	A
	压力试验历史	在以前发现 SCC 位置的附近可能发现更多的 SCC	A
	内检测裂纹检测数据	在以前发现 SCC 位置的附近可能发现更多的 SCC	A
	内检测金属损失检测数据	发生金属损失一般是因为防腐层剥离,且屏蔽了阴极保护电流,SCC (尤其是近中性 pH SCC)易于发生	B
	发现凹陷等管道变形的的位置	高应力集中位置易于发生 SCC	A
^a 数据信息的重要性等级: A:重要影响; B:有一定影响; C:较小的影响。			

附录 C

(资料性附录)

土壤环境下 SCC 敏感电位区间确定方法

C.1 一般要求

C.1.1 通常情况下埋地管道的阴极保护电位范围是 $-1\ 200\text{ mV}$ ~ -850 mV (相对饱和 Cu/CuSO_4 参比电极),可采用实验测定极化曲线的方法确定阴极保护的 SCC 敏感电位区间。

C.1.2 在实验过程中,应首先准确测定极化曲线。基于极化曲线,利用管道腐蚀过程存在的稳态和非稳态电化学信息差异进行敏感电位区间划分。

C.2 腐蚀环境溶液制备

针对土壤外腐蚀环境,首先将待测土壤在温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 2 h、研磨,用 20 目的筛子过筛后,水与土壤按照 1:1 的比例配制成土壤溶液,作为腐蚀环境溶液备用。

C.3 极化曲线测定

C.3.1 将待测管道材料用环氧树脂镶嵌作为工作电极,工作面积为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,工作电极用 200、600、800 号金相砂纸逐级打磨至光亮,用无水乙醇和丙酮进行脱脂,用蒸馏水冲洗、吹干。将工作电极浸入到上述制备得到的腐蚀环境溶液中 15 min~50 min,待电位稳定后,与辅助电极(铂片)和参比电极(饱和甘汞电极)一起装入三电极体系进行极化曲线的测量,按照 GB/T 24196 执行。

C.3.2 分别选取 0.5 mV/s 、 5 mV/s 、 10 mV/s 、 25 mV/s 、 50 mV/s 、 100 mV/s 、 150 mV/s 等 7 种不同扫描速率做出极化曲线,如图 C.1 所示。

C.4 SCC 敏感电位区间确定

C.4.1 从上述 7 条极化曲线中选取两条具有代表性的极化曲线:慢扫描速率和快速扫描速率的极化曲线各一条,如图 C.2 所示,选取了慢速扫描速率 0.5 mV/s 和快速扫描速率 100 mV/s 的两条极化曲线。根据慢速和快速扫描曲线的零电流电位将电位范围分成三个区间:慢速和快速扫描曲线的零电流电位之间的电位区间为 I 区;快速扫描的零电流电位至 $-1\ 150\text{ mV}$ 为 II 区; $-1\ 150\text{ mV}$ 以下为 III 区。

C.4.2 阴极保护电位位于 I 区,应确定为 SCC 敏感电位区间;阴极保护电位位于 II 区,可防止均匀腐蚀和局部腐蚀;阴极保护电位位于 III 区,易于造成防腐层阴极剥离和管道材料氢脆。

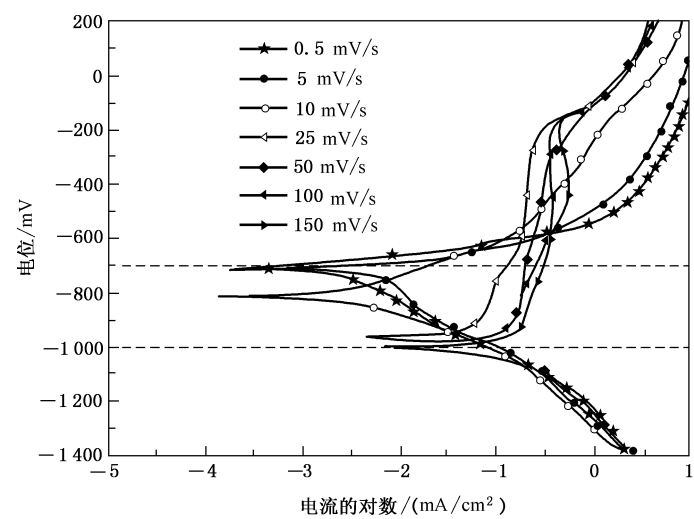


图 C.1 不同扫描速率的极化曲线示例

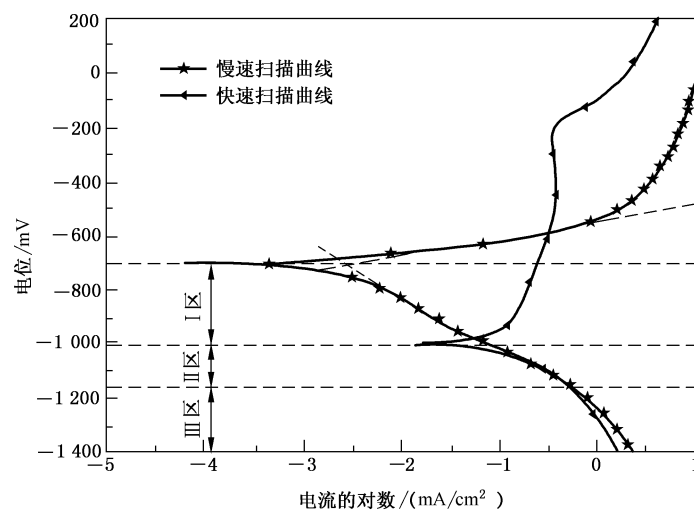


图 C.2 快、慢速扫描极化曲线所确定的特征电位区间示例

附录 D
(资料性附录)

含 SCC 管段裂纹扩展速率实验测定方法

D.1 腐蚀电流密度测定

按照 C.2 制备腐蚀环境溶液,按照 C.3 选取 0.5 mV/s、5 mV/s、10 mV/s、25 mV/s、50 mV/s、100 mV/s、150 mV/s 等 7 种不同扫描速率做出极化曲线。0.5 mV/s 扫描速率属于准平衡态,是电化学极化曲线测试中常用的稳态扫描速率,为慢速扫描曲线;50 mV/s、100 mV/s 和 150 mV/s 三条极化曲线基本一致,均具有代表性,选择 100 mV/s 的曲线作为快速扫描极化曲线,见图 D.1。通过慢速扫描极化曲线与快速扫描极化曲线的两个交点作慢速扫描极化曲线的切线,两条切线的交点对应的腐蚀电流密度为非裂尖区域的腐蚀电流密度 i_{a1} (浅裂纹阶段的腐蚀电流密度),而与之同电位的快速扫描极化曲线上的点对应的腐蚀电流密度则为裂尖的腐蚀电流密度 i_{a2} (深裂纹阶段的腐蚀电流密度)。

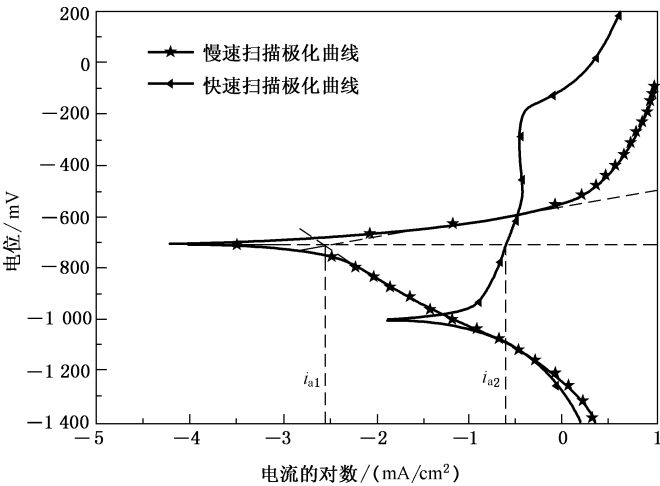


图 D.1 快速扫描极化曲线和慢速扫描极化曲线

D.2 裂纹扩展速率测定

根据 SCC 扩展模型,进行简化假设,获得 SCC 裂纹不同阶段的扩展速率与腐蚀电流密度之间的关系,其中:

浅裂纹阶段裂纹扩展速率 v_1 ,采用式(D.1)计算:

$$v_1 = \left(\frac{da}{dN} \right)_{SCC} = k_1^{-1} i_{a1} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

$$k_1^{-1} = \frac{M}{nF\rho} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

- k_1 ——腐蚀电流密度 i_{a1} 的系数项的倒数;
- i_{a1} ——浅裂纹阶段的腐蚀电流密度,单位为安培每平方米(A/m²);
- M ——Fe 的摩尔质量,单位为千克每摩尔(kg/mol);

n ——Fe 的价电子数,取 2;

F ——法拉第常数,取 9.65×10^4 C/mol;

ρ ——Fe 的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

深裂纹阶段裂纹扩展速率 v_2 ,采用式(D.3)计算:

$$v_2 = \left(\frac{da}{dN} \right)_{\text{SCC}} = k_2^{-1} i_{a2} \dots\dots\dots (\text{D.3})$$

$$k_2^{-1} = \frac{k_{\text{total}} K_{\text{I-max}} (K_{\text{I-max}} + K_{\text{I-min}})}{f} \dots\dots\dots (\text{D.4})$$

式中:

k_2 ——腐蚀电流密度 i_{a2} 的系数项的倒数;

i_{a2} ——深裂纹阶段的腐蚀电流密度,单位为安培每平方米(A/m^2);

$K_{\text{I-max}}$ ——最大应力强度因子,单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$;

$K_{\text{I-min}}$ ——最小应力强度因子,单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$;

k_{total} ——总的系数项,单位为 $\text{m}^2/(\text{A} \cdot \text{MPa}^2 \cdot \text{s}^2)$;

f ——载荷变化的频率,单位为赫兹(Hz)。

D.3 含 SCC 管段剩余寿命预测

采用式(D.5)计算含 SCC 管段剩余寿命 T :

$$T = k_1 D / i_{a1} + k_2 (L - D) / i_{a2} \dots\dots\dots (\text{D.5})$$

式中:

k_1 ——腐蚀电流密度 i_{a1} 的系数项的倒数;

k_2 ——腐蚀电流密度 i_{a2} 的系数项的倒数;

i_{a1} ——浅裂纹阶段的腐蚀电流密度,单位为安培每平方米(A/m^2);

i_{a2} ——深裂纹阶段的腐蚀电流密度,单位为安培每平方米(A/m^2);

D ——界定浅裂纹和深裂纹的临界尺寸,可以根据文献确定取值,单位为米(m);

L ——材料安全服役的临界裂纹长度,按照 GB/T 19624 计算确定,单位为米(m)。

附录 E
(资料性附录)

交变载荷作用下含 SCC 管段裂纹扩展速率预测方法

E.1 压力波动类型

在役管道运行压力波动分为三种类型：

- a) 欠载压力波动(类型 I)；
- b) 平均载荷压力波动(类型 II)；
- c) 过载压力波动(类型 III)。

类型 I——欠载压力波动:图 E.1 为典型的油气管道类型 I 压力波动图谱。该图谱是泵站或压气站下游管道常见的压力波动曲线,也是对裂纹扩展速率影响最大的波形。该类型的最大压力接近设计压力,波动范围仅允许低于设计压力,其特征是具有大量低 R 比(R =最小压力/最大压力)的压力波动次数,和少量的高 R 比的压力波动次数,也称脉动载荷。与输气管道相比,输油管道中的欠载循环 R 比较低,频次高,压力变化更快。输气管道中波纹负载循环是其主要特征,也称为小波循环。

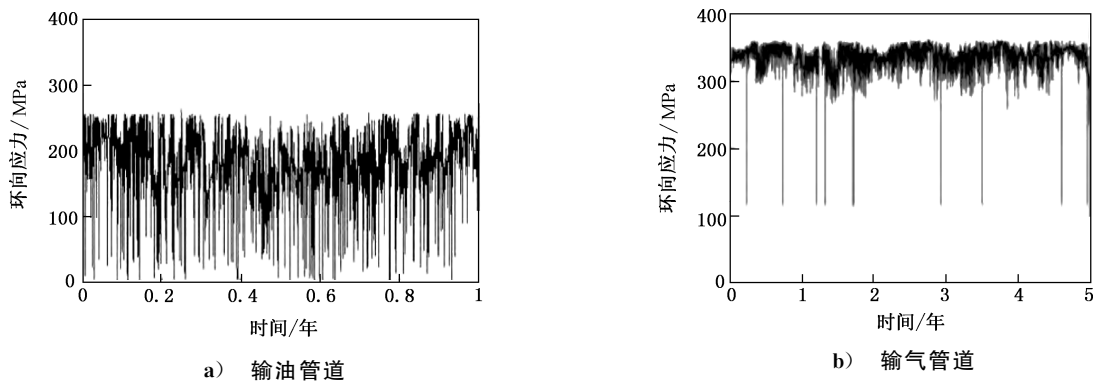


图 E.1 类型 I——欠载压力波动

类型 II——平均载荷压力波动:图 E.2 为油气管道类型 II 压力波动图谱。该图谱通常出现在远离泵站或压气站的下游位置,平均压力要低于类型 I 的平均值,压力波动峰值介于平均压力与设计压力之间,频次较高。压力波动范围较大,但未消除欠载波动。

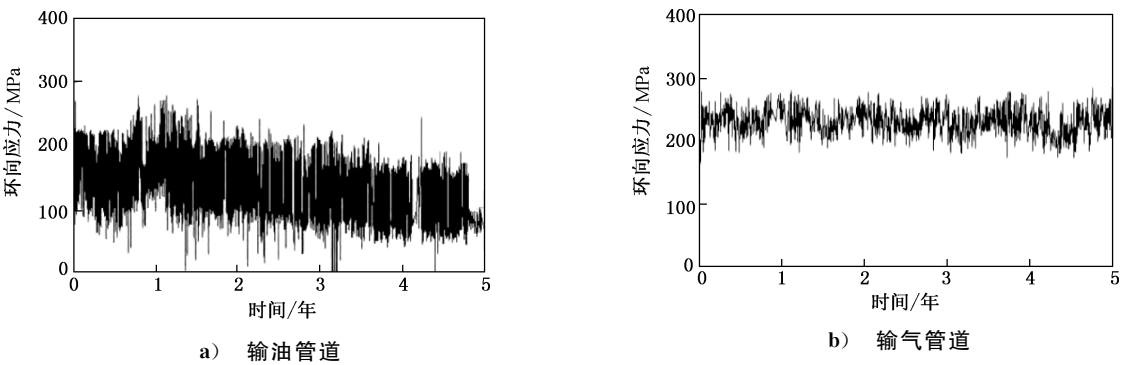


图 E.2 类型 II——平均载荷压力波动

类型Ⅲ——过载压力波动:图 E.3 为油气管道类型Ⅲ压力波动图谱。该图谱通常出现在泵口或压缩机口附近,压力波动中出现大量高于平均压力的峰值,也称为过载循环,而欠载循环达到最小。

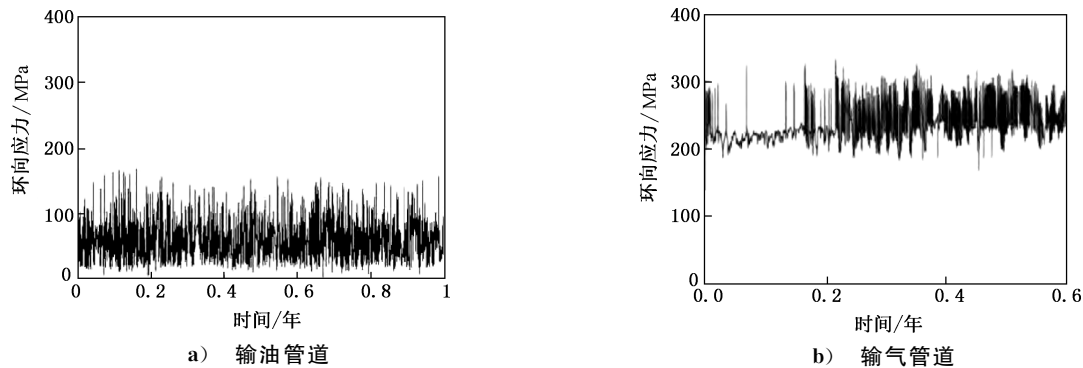


图 E.3 类型Ⅲ——过载压力波动

E.2 SCC 裂纹扩展机制

近中性 pH 环境下 SCC 裂纹不同阶段的扩展特征见图 E.4 的三阶段浴盆模型。

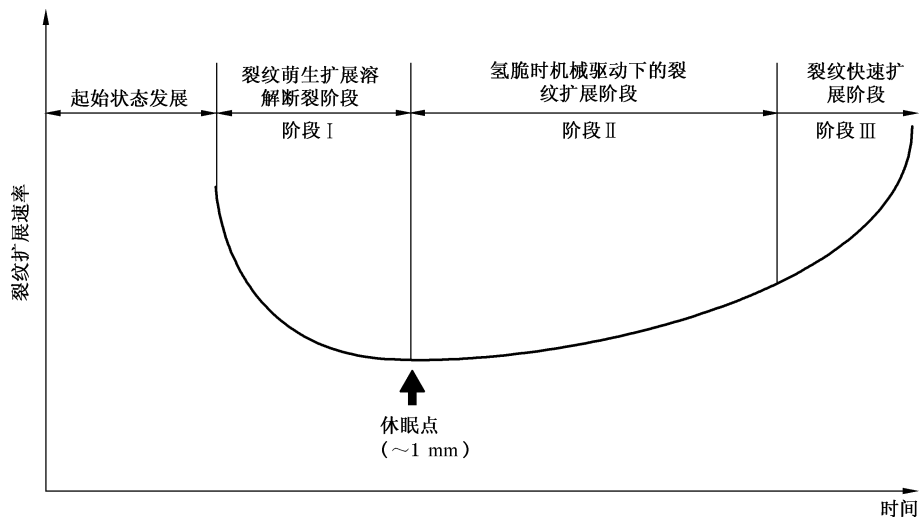


图 E.4 近中性 pH 环境下 SCC 裂纹扩展三阶段浴盆曲线

阶段Ⅰ——滑移-溶解断裂阶段:该阶段腐蚀环境已形成,如防腐层破损,管道外表面与土壤中的水接触,并且缺少阴极保护等。由于管道表面存在局部腐蚀,在类裂纹缺陷位置引发裂纹萌生。该阶段的裂纹扩展过程更多依赖于管道防腐层条件、土壤环境和管材冶金质量情况,而受压力波动等载荷驱动力的影响较小。裂纹深度增加,裂尖溶解断裂速度降低,当裂纹深度达到约 1 mm 时,多数裂纹停止扩展,裂纹进入休眠状态。阶段Ⅰ可通过有效的防腐层和阴极保护加以控制。

阶段Ⅱ——氢脆存在条件下的载荷驱动裂纹扩展阶段:该阶段加载因素(包括加载历史和加载频率)对裂纹扩展过程起着至关重要的作用。主要的加载因素包括:

- 不同应力的加载交互作用:加载过程 R 比的变化将改变裂纹扩展速率,即可能加快裂纹扩展或减缓裂纹扩展;
- 加载频率:压力波动频率变化将从时间上影响裂纹扩展程度,包括腐蚀速率、氢致开裂速率以及低温蠕变和氢致局部塑性引起的裂尖钝化等;

c) 上述两种情况的交互作用也可以改变裂纹扩展速率,如:低温蠕变影响裂尖应力状态,进而导致裂尖锐化,并且裂尖不同的应力状态也导致应力加载交互作用发生变化。

阶段Ⅲ——载荷驱动裂纹快速扩展阶段:该阶段载荷驱动力导致较大尺寸裂纹快速扩展,进而导致失效。应采取有效的完整性管理措施避免裂纹进入该阶段。

E.3 不同应力加载交互作用对裂纹扩展速率的影响

图 E.5 为不同应力加载交互作用对裂纹扩展速率的影响。欠载循环过程能造成裂尖机械损伤,并在后续的小波循环中引发或加速裂纹扩展,过载循环可以减缓后续循环内的裂纹扩展速率。

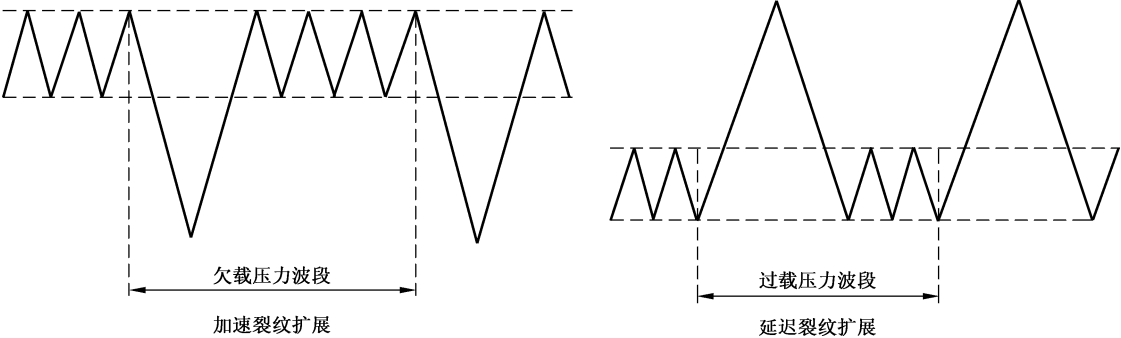


图 E.5 加载交互作用对裂纹扩展速率的影响

图 E.6 为三种不同加载情况下裂纹扩展速率的对比。Ⅰ和Ⅲ中的欠载循环 R 比为 0.5,Ⅰ中小波循环和Ⅱ中恒幅值波 R 比均为 0.9,三种加载情况的加载频率相同。

图 E.7 为两种加载情况下裂纹扩展与加载频率的关系。高频方式通常的加载频率高于 10^{-3} Hz,裂纹扩展速率随加载频率增大而下降;低频方式通常的加载频率低于 10^{-3} Hz,在变幅值加载条件下裂纹扩展速率对加载频率不敏感,在恒幅值加载条件下裂纹扩展速率随加载频率增大而升高。

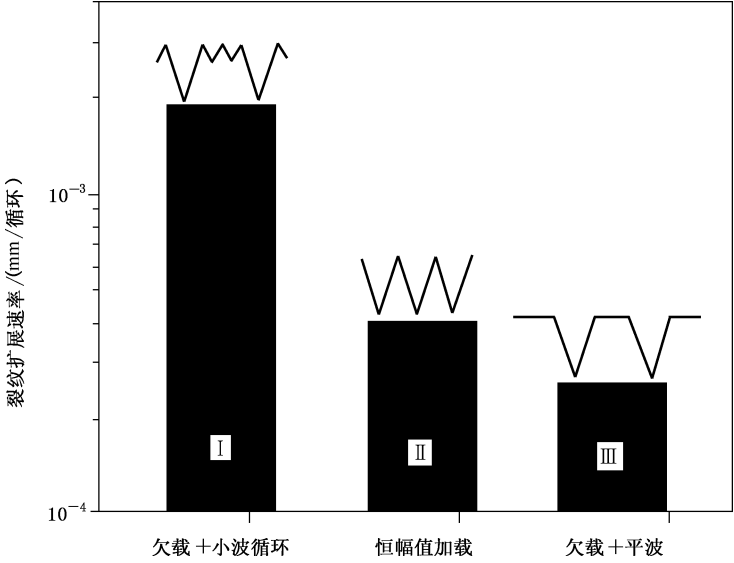


图 E.6 三种不同加载情况下管道裂纹扩展速率比较

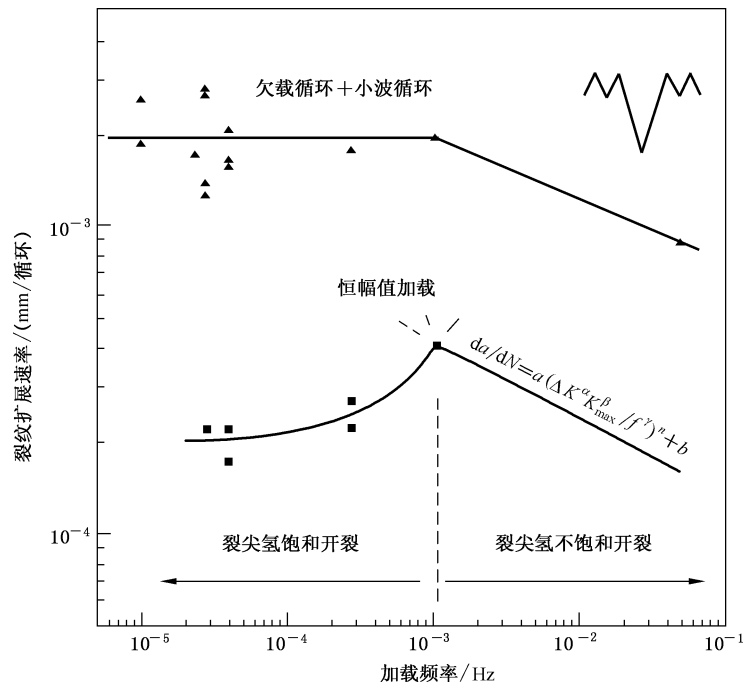


图 E.7 加载频率对裂纹扩展速率的影响

恒幅值加载条件下裂纹扩展速率可按式(E.1)计算：

$$\frac{da}{dN} = a \left(\frac{\Delta K^\alpha K_{\max}^\beta}{f^\gamma} \right)^n + b \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

α, β —— ΔK 和 K 的指数, $\alpha + \beta = 1$, $\alpha = 0.33$, $\beta = 0.67$;

n —— 裂纹扩展速率公式首项的指数, 取 2;

a —— 裂纹扩展速率公式首项的系数, 取 2;

b —— SCC 贡献因子, 可通过试验确定, 比阶段 II 中裂纹扩展的首项低一个数量级, 也可忽略不计;

$K_{\max}$ —— 裂纹尖端应力强度因子的最大值;

ΔK —— 裂纹尖端应力强度因子在应力循环过程中的波动值;

f —— 加载频率;

γ —— 加载频率 f 的指数, 约为 0.1。

上述裂纹扩展模型通过提取管道实际压力波动图谱中的常幅值载荷进行计算, 并未考虑小波循环与不同加载方式交互作用对裂纹扩展的影响, 计算得到的裂纹扩展速率可能低估了油气输送管道的裂纹扩展真实情况。

参 考 文 献

- [1] NACE SP0204;2015 Stress corrosion cracking(SCC)direct assessment methodology
 - [2] ASME B31.8S;2016 Managing system integrity of gas pipelines
 - [3] API RP 1176;2016 Recommended practice for assessment and management of cracking in pipelines
 - [4] Recommended practices for managing near-neutral pH stress corrosion cracking(CEPA 3rd edition).
-