

DB32

江苏省地方标准

DB32/T 5260—2025

承压设备系统长期服役安全状况评定
技术规范

Technical specifications for safety status assessment of aged pressure
equipment systems

2025-10-30 发布

2025-11-30 实施

江苏省市场监督管理局 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言Ⅲ

1 范围1

2 规范性引用文件1

3 术语与定义2

4 总体要求2

5 工作流程2

6 装置普查和设备筛选3

 6.1 普查内容3

 6.2 普查方法3

 6.3 设备筛选4

7 损伤模式分析5

 7.1 装置损伤模式分布分析5

 7.2 设备损伤模式分析7

8 损伤模式检验7

 8.1 一般要求7

 8.2 检验类型8

 8.3 检验方法8

9 检验结果处理.....12

 9.1 一般要求12

 9.2 工程简化筛选评价12

 9.3 合于使用评价17

10 安全状况评定结论和报告19

参考文献21

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省特种设备安全检验与节能标准化技术委员会提出并归口。

本文件起草单位：南京工业大学、江苏省特种设备安全监督检验研究院、南京市锅炉压力容器检验研究院、江苏省化工本质安全研究院、中国石化金陵石化公司。

本文件主要起草人：刘学军、宋高峰、浦江、梁斌、张军强、李斌、武晓光、刘波、蒋莉莉、周俊、谢毅、张剑、葛志强、马晶晶、王郁林。

承压设备系统长期服役安全状况评定 技术规范

1 范围

本文件规定了承压设备系统长期服役安全状况评定的总体要求、工作流程、装置普查和设备筛选、损伤模式分析、损伤模式检验、检验结果处理、安全状况评定结论和报告编制的要求。

本文件适用于 TSG 21—2016 中第 1.3 条规定的压力容器和 TSG D0001—2009 中第二条规定的工业管道,达到或超设计使用年限的金属制压力容器和压力管道的安全状况评定。

2 规范性引用文件

下列文件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 223.26 钢铁及合金 钼含量的测定 硫氰酸盐分光光度法
GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法
GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第 2 部分:高温试验方法
GB/T 229 金属夏比缺口冲击试验方法
GB/T 2039 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法
GB/T 6803 铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法
GB/T 13298 金属显微组织检验方法
GB/T 15970.6 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 6 部分:恒载荷或恒位移下的预裂纹试样的制备和应用
GB/T 19624—2019 在用含缺陷压力容器安全评定
GB/T 26610.2 承压设备系统基于风险的检验实施导则 第 2 部分:基于风险的检验策略
GB/T 26610.4 承压设备系统基于风险的检验实施导则 第 4 部分:风险可能性定量分析方法
GB/T 29459.2 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法 第 2 部分:室温下拉伸性能的试验方法
GB/T 30579 承压设备损伤模式识别
GB/T 35013—2018 承压设备合于使用评价
DL/T 438 火力发电厂金属技术监督规程
DL/T 441 火力发电厂高温高压蒸汽管道蠕变监督规程
DL/T 654 火电机组寿命评估技术导则
DL/T 674 火电厂用 20 钢珠光体球化评级标准
DL/T 773 火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准
DL/T 786 碳钢石墨化检验及评级标准
DL/T 787 火电厂用 15CrMo 钢球化评级标准
DL/T 884 火电厂金相检验与评定技术导则
DL/T 999 电站用 2.25Cr-1Mo 钢球化评级标准

NB/T 10617 制氢转化炉炉管寿命评估及更换导则
NB/T 10618 在役乙烯裂解炉辐射段炉管检验、评估与维护导则
NB/T 47013 承压设备无损检测
SH/T 3074 石油化工钢制压力容器
TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程
TSG D7005—2018 压力管道监督检验规则

3 术语与定义

GB/T 19624、GB/T 229、GB/T 30579、GB/T 35013、GB/T 6803 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

设计使用年限 design service life

压力容器和压力管道在预定的腐蚀裕量下,设备预期达到的使用年限。

3.2

长期服役 long-term service

设备服役年限达到或超过设计寿命。

3.3

腐蚀回路 corrosion circuits

在一个承压设备系统中,具有相同材料类别、相似操作条件和相同损伤机理的一组设备回路。

3.4

合于使用评价 fitness for service

利用有关标准规定的安全评定方法,对带超标缺陷的压力容器和压力管道根据相应的失效准则,进行符合使用条件的安全性评定。

3.5

安全状况评定 safety status assessment

对评定对象的状况调查(历史、工况、环境等)、损伤模式识别、缺陷和损伤检测及缺陷成因分析、材料性能获取、必要的实验与计算,并根据本文件的规定对评定对象的安全性进行综合分析和评价。

4 总体要求

4.1 在实施安全状况评定时,应建立质量控制程序。

4.2 进行安全状况评定的人员应具有必要的力学、材料、工艺、腐蚀、检验、焊接等知识背景和实践经验,并经过合于使用评价培训。

4.3 基于损伤模式的检验应由具有压力容器和压力管道定期检验资质的人员进行。

4.4 承压设备系统长期服役安全状况评定工作除符合本文件的规定外,还应符合 TSG 21—2016 第 8.5、8.6 条和 TSG D7005—2018 第 3 章等安全技术规范的有关规定。

5 工作流程

承压设备系统长期服役安全状况评定工作流程包括:装置普查和设备筛选、损伤模式分析、损伤模式检验、检验结果处理、安全状况等级评定和检验周期确定、安全状况评定结论和报告编制,具体工作流程见图 1。

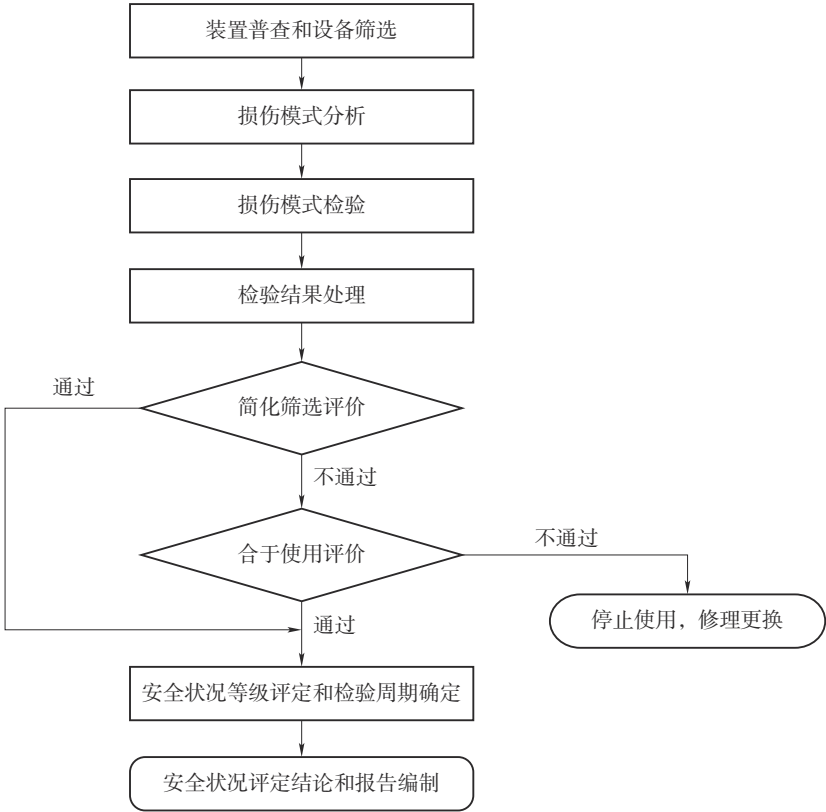


图1 安全状况评定流程

6 装置普查和设备筛选

6.1 普查内容

6.1.1 严重事故隐患排查

排查是否存在以下情形的严重事故隐患。如果存在,按照《特种设备安全监督检查办法》(总局 57 号令)处理,按其规定执行:

- a) 特种设备未取得许可生产、国家明令淘汰、已经报废或者达到报废条件,继续使用的;
- b) 特种设备未经监督检验或者经检验、检测不合格,继续使用的;
- c) 特种设备安全附件、安全保护装置缺失或者失灵,继续使用的;
- d) 特种设备发生过事故或者有明显故障,未对其进行全面检查、消除事故隐患,继续使用的;
- e) 特种设备超过规定参数、使用范围使用的。

6.1.2 运行工况调查

应调查历史工况、当前工况、异常工况三种不同工况所对应的操作压力和操作温度,以及持续时间间隔。运行工况调查时应包括一些特定工况如焦炭塔的清焦和触媒反应器的再生工况等。

6.2 普查方法

6.2.1 资料审查

审查设备台账、监督检验证书、检验报告、安全附件校验报告和安全保护装置功能测试记录、爆破片更换记录、修理改造记录(含移装利旧)、失效分析报告、腐蚀管理文件等资料,并对设计数据、腐蚀速率、

腐蚀机理、缺陷或损伤等关键信息相互比对验证,确认其一致性和真实性。必要时,可审查压力容器产品合格证和产品质量证明文件,管道元件产品质量证明、管道安装质量证明、安装技术文件和资料等。

6.2.2 现场检查

6.2.2.1 设备台账与现场设备一致性检查。设备台账与现场设备不一致的,应对现场设备采用测绘、材质鉴定如光谱检测等方法,补充完善设备台账。

6.2.2.2 采用目视检查方法检查内容如下:

- 受压元件结构不合理、发生表面裂缝、异常变形、泄漏、衬里层失效、保温层状况;
- 垫片、紧固件损坏;
- 真空绝热压力容器外壁局部是否存在严重结冰、结霜或结露,或工作压力明显上升的等严重故障情况;
- 安全附件和安全保护装置是否缺失;设备附属的装卸附件、测量调控装置、附属仪器仪表完好性、有效性。

6.2.3 工艺分析

按工艺流程确定介质、腐蚀流分布、操作温度和操作压力。工艺分析时应包括各种可能存在的工况,包括工艺上的操作和再生、清焦、蒸煮吹扫置换和时间维度的历史工况、当前工况和异常工况。

6.3 设备筛选

按装置进行,根据设备已使用年限和设计寿命规定,统计出处于长期服役的设备并纳入后续安全评定工作范围。有设计寿命规定的,优先采用设计文件中的规定寿命;无设计寿命规定的,按 TSG 21 规定,或按表 1 确定,可优先选择国内工程常用设计寿命或 SH/T 3074 设计寿命参考数据。

表 1 设计寿命参考数据表

设备或管道类型	国外工程常用设计寿命 a	国内工程常用设计寿命 a	SH/T 3074 设计寿命 a
再生器	—	15~20	>15
塔(直径>4 m)	25	20	>20
塔(直径≤4 m)	25	15~20	>15
罐	10~25	15~20	>15
球罐	25	20~25	>20
铬钼钢或高合金钢制厚壁加氢反应器(名义壁厚≥50 mm)	—	30	>30
其他厚壁加氢反应器(名义壁厚≥50 mm)	—	30	>20
其他材料的反应器、干燥器	25	20	>20
一般换热器壳体、管箱	15	15~20	>15
高压换热器壳体、管箱	15	20	>20
合金钢换热器管束	—	10~20	—
碳钢低合金钢换热器管束	—	4年且不小于一个操作周期	—
涂覆各种涂料的换热器碳钢管束	—	按涂料使用寿命	—
空冷器	15	10(碳钢)	—
管道(公称直径≥100 mm)	15	15	—

7 损伤模式分析

7.1 装置损伤模式分布分析

基于装置普查和工艺分析结果,按照 GB/T 30579 和 GB/T 26610.4 进行基于工艺流程的损伤模式分布分析,建立基于工艺流程图的腐蚀回路图。损伤模式分析时所需的材料组和物流组见表 2 和表 3,材质劣化损伤温度阈值和蠕变损伤温度阈值见表 4 和表 5。高温氢腐蚀损伤温度及氢分压组合操作极限曲线见图 2。

表 2 腐蚀回路常用材料组

序号	材料组	序号	材料组
1	碳钢	7	Cr-Mo-V 低合金钢
2	C-0.5Mo 钢	8	奥氏体不锈钢
3	1.25Cr-0.5Mo 钢	9	铁素体不锈钢
4	2.25Cr-0.5Mo 钢	10	双相不锈钢
5	3Cr-1Mo 钢	11	镍基合金
6	5Cr-1Mo 钢	12	铁镍铬合金

表 3 腐蚀回路用物流组(腐蚀性组分)

序号	物流组(腐蚀性组分)	序号	物流组(腐蚀性组分)
1	水+氨(含水小于 0.2%)	15	硫
2	水+氨+硫化氢	16	硫化氢
3	水+氨+氯化氢	17	硫化氢+氢气
4	水+胺	18	水+硫化氢
5	水+胺+硫化氢	19	水+硫酸
6	水+苯酚	20	烟气+水+硫/或氮/或氯
7	氮	21	水+硫化氢和/或二氧化碳
8	水+二氧化碳	22	水+硫+氧
9	水+二氧化碳/或碳酸根	23	水+氯
10	水+氟化氢	24	水+氯化氢
11	环烷酸	25	燃料油或燃料煤
12	氢氧化钠或氢氧化钾(质量浓度 3% 以上)	26	烃/焦炭/CO/CO ₂ /甲烷/乙烷(其中之一)
13	氢氧化钠或氢氧化钾(质量浓度 5% 以上)	27	水+硝酸根
14	水+磷酸	28	水+/氧

表 4 材质劣化损伤温度阈值

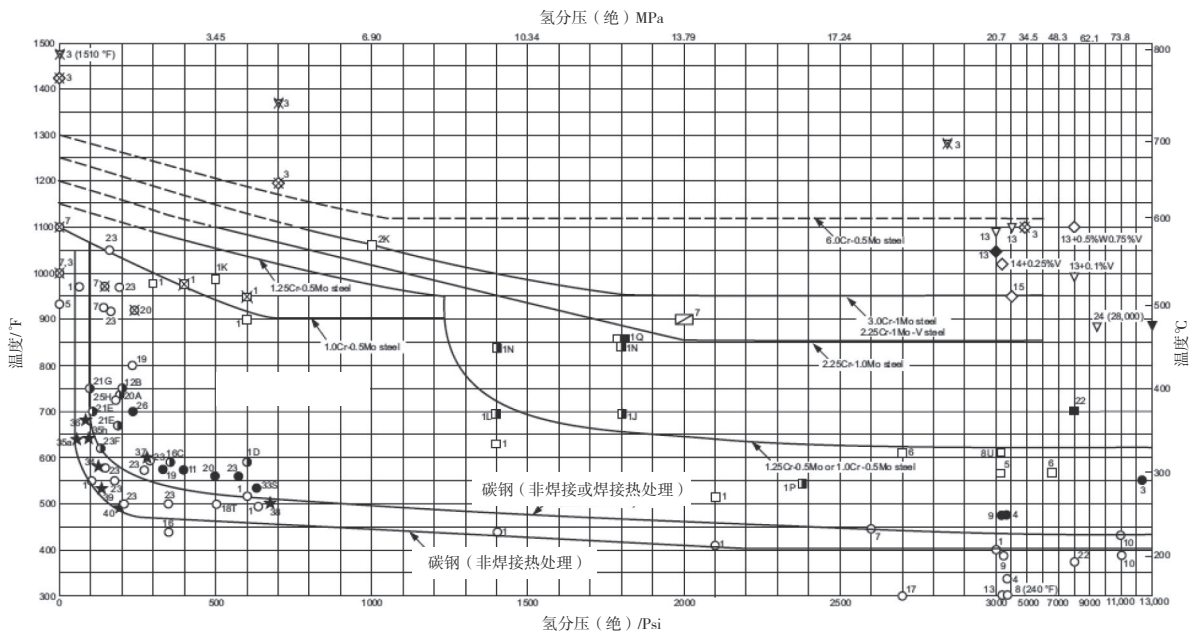
损伤模式	温度阈值 ℃
球化	454
石墨化	427
渗碳	593
σ相脆化	538
回火脆	343
敏化	427

表 5 蠕变损伤温度阈值

材料类型	温度阈值 ℃
碳钢(抗拉强度≤414 MPa)	343
碳钢(抗拉强度>414 MPa)	371
C-0.5Mo	399
1.25Cr-1/2Mo(正火+回火)	427
1.25Cr-1/2Mo(退火)	427
2.25Cr-1Mo(正火+回火)	427
2.25Cr-1Mo(退火)	427
2.25Cr-1Mo(调质)	427
2.25Cr-1Mo-V	441
3Cr-1Mo-V	441
5Cr-1/2Mo	427
7Cr-1/2Mo	427
9Cr-1Mo	427
9Cr-1Mo-V	454
12Cr	482
AISI Type 304 &. 304H	510
AISI Type 316 &. 316H	538
AISI Type 321	538
AISI Type 321H	538
AISI Type 347	538
AISI Type 347H	538
Alloy 800	565

表 5 蠕变损伤温度阈值（续）

材料类型	温度阈值 ℃
Alloy 800H	565
Alloy 800HT	565
HK-40	649



注：1 psi=6.895 kPa

图 2 临氢环境钢材高温氢腐蚀的操作极限曲线

7.2 设备损伤模式分析

根据腐蚀回路图,按安全评定工作范围内设备所处工艺流程位置,以及设计制造技术要求如焊后热处理要求等,综合判定其损伤模式和发生部位。基于 6.2.1 资料审查中失效分析报告的审查结果,若判断为在役新生缺陷或损伤,则应对与失效案例处于同一腐蚀回路的安全评定工作范围内设备的损伤模式分析结果进行增补修正。

8 损伤模式检验

8.1 一般要求

8.1.1 使用单位应当根据本文件的检验策略,制定检验计划。检验机构应当根据本文件的检验策略和检验计划,结合现场条件,并征求使用单位的意见,制定具体的检验方案并实施检验。

8.1.2 安全评定范围内压力容器和压力管道应根据损伤模式分析结果,应按照 TSG 21 和 TSG D0001、TSG D7005 以及第 8 章要求,制定检验方案,实施检验,并出具检验报告。

8.1.3 对于无明确损伤模式、或者存在相关损伤模式但历次检验采用有效检测方法均未发现损伤现象的安全评定范围内压力容器和压力管道,可对检验方法和比例进行适当调整,但应符合 TSG 21、TSG D0001

和 TSG D7005 的最低要求。

8.1.4 对历史检验发现已有损伤或缺陷的,在本次检验中进行复查,分别进行检验不合格项、各种故障类型(裂纹、异常变形、衬里层失效等)的复检,查明缺陷或损伤成因;名义壁厚不明的,则应采用点测或危险壁厚截面法进行详细壁厚测定。

8.1.5 腐蚀检查过程中对于典型的腐蚀形貌可进行拍照记录,观察到明显腐蚀产物且生成机理不清的,可收集腐蚀产物并对其进行取样分析,确定腐蚀原因。

8.2 检验类型

检验类型包括停机内部检验、停机外部检验和在线检验。检验类型选择、隔热层和衬里拆除原则按 GB/T 26610.2 执行。

8.3 检验方法

8.3.1 方法选择

8.3.1.1 根据安全状况评定范围内压力容器和压力管道潜在的损伤模式确定检验方法,检验部位应选择损伤发生可能性最高的区域。如果实施在线检验,选择检验方法时还应确定从设备外部检验内部缺陷的能力和温度等操作条件对检验有效性的影响。当存在多种损伤形态时,应分别选用与损伤形态相对应的方法进行检验。损伤模式与对应损伤形态对照表见表 6。

8.3.1.2 按 TSG 21—2016 附件 A 规定的第一组介质,应采用中高度有效及以上级别的检验方法;第二组介质,应采用中度有效及以上级别的检验方法。各种检验方法对应的检验有效性级别分别见表 7 和表 8。检验方法的检验比例按 GB/T 26610.4 执行。表 6~表 8 的检验方法按 NB/T 47013 的规定执行;材料微观组织检查按 GB/T 13298 的规定执行,其中金相分析按 DL/T 884 的规定执行。

8.3.1.3 出现材质劣化、蠕变等需要取样(包括微试样)进行材料力学性能测试时,材料的室温和高温拉伸性能测试分别按 GB/T 228.1 和 GB/T 228.2 的规定执行,材料的持久、蠕变性能测试按 GB/T 2039 规定执行。夏比冲击试验按 GB/T 229 规定执行;微试样取样和试验按照 GB/T 29459.2 的小冲杆试验方法进行。

8.3.1.4 对于有衬里或复合层的压力容器,当衬里和复合层检验发现缺陷时,宜移除部分衬里检查损伤范围、程度以及设备基材表面损伤情况,也可采用无损检测方法检查衬里下的损伤。

8.3.2 腐蚀减薄损伤检验

8.3.2.1 对于均匀腐蚀的压力容器和压力管道,应对选定的受压元件腐蚀减薄部位进行不少于 15 个点的均布壁厚测定。

8.3.2.2 对于局部腐蚀的压力容器和压力管道,应进行危险壁厚截面法测厚,测厚点参照 GB/T 35013—2018 图 5 所示选取,每条网格线上测点不少于 5 个,网格间距不超过 2 倍名义壁厚。

8.3.2.3 对于点蚀的压力容器和压力管道,框定 150 mm×150 mm 最严重区域,拓印或拍照,作为评价区域。必要时选择至少 10 组点蚀对,并测量每组点蚀对的直径、间距和深度。

8.3.3 环境开裂损伤检验

补充检测如下数据:

- 氢鼓包的直径、高度与结构不连续区及焊缝的距离;
- 氢致开裂距壁厚表面的距离、自身高度、间距,或者打磨后的凹坑深度、长轴和短轴尺寸;
- 应力导向氢致开裂或应力腐蚀开裂裂纹的长度、深度,或者裂纹打磨后的凹坑深度、长轴和短轴尺寸。

对于应力腐蚀开裂,必要时还应按照 GB/T 15970.6 补充测定材料在使用环境下的应力腐蚀开裂的界限应力强度因子 K_{ISCC} 和应力腐蚀裂纹的扩展速率 da/dt 。

8.3.4 材质劣化损伤检验

8.3.4.1 球化损伤检验

选取可能的最高温度部位或硬度检测异常位置进行现场金相检测,按 DL/T 674、DL/T 773、DL/T 787、DL/T 999 等标准进行球化损伤评级,发现球化 4 级的,必要时可取样(包括微试样)进行材料力学性能测试。存在变形和鼓包时,应测量变形和鼓包尺寸。

8.3.4.2 石墨化损伤检验

选取可能的最高温度部位或硬度检测异常位置进行现场金相检测,按 DL/T 786 等标准,发现石墨化 3 级的,必要时应取样(包括微试样)进行材料力学性能测试。

8.3.4.3 渗碳损伤检验

选取可能的最高温度部位或硬度检测异常位置进行现场金相检验。发现渗碳损伤的,对于顺磁性的合金(如奥氏体合金),可用磁性分析仪测量渗碳层厚度,必要时取样进行实验室截面金相检验获取渗碳层厚度。

8.3.4.4 σ 相脆化损伤检验

奥氏体不锈钢材料金相检验出现 σ 相含量超过 10% 时,应取样(包括微试样)进行材料力学性能测试。

8.3.4.5 回火脆损伤检验

服役温度在 343 °C~577 °C 区间的 1Cr-0.5Mo、1.25Cr-0.5Mo、2.25Cr-1Mo、2.25Cr-1Mo-0.25V、3Cr-1Mo、3Cr-1Mo-0.25V 铬钼低合金钢材料,且运行 15 年以上的,应取挂片(若有)进行夏比 V 型缺口冲击试验。

8.3.4.6 敏化损伤检验

针对奥氏体钢敏化过程中贫铬区电磁性能的变化,可利用涡流、矫顽力等电磁方法进行快速筛查,然后在选定区域进行金相检测。

8.3.4.7 再热裂纹损伤检验

出现再热裂纹时,测量再热裂纹的长度、深度,或者裂纹打磨后的凹坑深度、长轴和短轴尺寸。

8.3.4.8 碳化物检验

高温服役环境下,铬钼低合金钢部件可以取样(包括微试样)按 GB/T 13298 进行截面金相检查碳化物成分、结构、尺寸和分布,可采用 X 射线衍射(XRD)技术确认其中碳化物结构,成分可以用扫描电镜进行初步分析,或者按照 GB/T 223.26 检测碳化物的含钼量占钼总含量的比值,12CrMo、15CrMo 钢应不超过 85%,12Cr1MoV 钢应不超过 75%。

8.3.5 蠕变损伤检验

蠕胀测量按照 DL/T 441 和 DL/T 438 规定进行,测量钢管外径蠕变变形,或者测量蠕变相对变形

量。必要时取样(包括微试样)按 GB/T 13298 和 GB/T 2039 分别进行实验室截面金相和材料力学性能测试。测量壁厚,查阅或推算历史工况和未来工况对应时间间隔节点的壁厚。可联合进行金相检测和硬度检测。

8.3.6 机械疲劳和/或热疲劳损伤检验

发现疲劳裂纹时,应测量裂纹长度和深度尺寸,或者打磨后的凹坑深度、长轴和短轴尺寸。必要时,还可采用应变传感器、压力传感器、温度传感器等对振动、交变压力和温度等周期性载荷进行监测得到实际载荷谱。

8.3.7 高温氢腐蚀损伤检验

发现高温氢腐蚀引起的表面脱碳时,可打磨后估算表面脱碳层深度;发现高温氢腐蚀引起的鼓包时,测量鼓包的直径、高度和到结构不连续区和焊缝的距离;发现高温氢腐蚀引起的内部脱碳或沿晶微裂纹时,应取样(包括微试样)进行材料力学性能试验。

表 6 损伤模式与损伤形态对照表

损伤模式	损伤形态								
	局部 减薄	均匀 减薄	点蚀/ 孔蚀	表面 裂纹	近表面 裂纹	埋藏 裂纹	金相组 织变化	尺寸 变化	氢鼓包或高温氢 腐蚀造成的鼓泡
局部减薄	X	—	—	—	—	—	—	—	—
均匀减薄	—	X	—	—	—	—	—	—	—
点蚀	—	—	X	—	—	—	—	—	—
应力腐蚀开裂	—	—	—	X	X	—	—	—	—
氢鼓包	—	—	—	—	—	—	—	—	X
氢致开裂、应力导向氢致开裂	—	—	—	X	X	—	—	—	—
球化	—	—	—	—	—	—	X	—	—
石墨化	—	—	—	—	—	—	X	—	—
渗碳	—	—	—	X	X	X	X	—	—
σ 相脆化	—	—	—	—	—	—	X	—	—
敏化	—	—	—	X	X	—	X	—	—
再热裂纹	—	—	—	X	X	X	—	—	—
蠕变	—	—	—	—	—	—	X	X	—
机械疲劳	—	—	—	X	—	—	—	—	—
热疲劳	—	—	—	X	—	—	—	X	—
高温氢腐蚀	—	—	—	X	X	X	X	—	X
注:回火脆损伤模式无表中对应损伤形态。									

表 7 停机检验方法及检验有效性

检验方法	损伤形态									
	局部 减薄	均匀 减薄	点蚀/ 孔蚀	表面 裂纹	近表面 裂纹	埋藏 裂纹	金相组 织变化	尺寸 变化	隔热衬 里脱落	氢鼓包或高 温氢腐蚀造 成的鼓泡
目视检测	1,2,3	3,X	1,2,3	3,X	X	X	X	1,2,3	1,2,3	2,3
纵波超声检测	1,2,3	1,2,3	3,X	X	X	3,X	X	X	X	1,2
横波超声检测	X	X	X	2,3 ^a	1,2,3 ^a	2,3 ^a	X	X	X	X
衍射时差法超声检测	X	X	2,3 ^a	2,3 ^a	2,3 ^a	2,3 ^a	X	X	X	1,2 ^a
电磁超声检测	2,3	1,2,3	X	X	X	X	X	X	X	X
相控阵检测	X	X	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	X	X	X	1,2
射线检测	1,2,3	1,2,3	1,2,3	3,X	3,X	3,X	X	X	X	X
磁粉检测	X	X	X	1,2	3,X	X	X	X	X	X
渗透检测	X	X	X	1,2,3	X	X	X	X	X	X
声发射检测	3,X	X	X	2,3 ^b	2,3 ^b	2,3 ^b	X	X	X	3,X ^b
涡流检测	2,3	2,3	1,2	1,2,3	2,3	X	X	X	X	X
漏磁检测	1,2	1,2	1,2	2,3,X	3,X	X	X	X	X	X
尺寸测量	1,2,3	1,2,3	3,X	X	X	X	X	1,2	X	X
金相分析	X	X	X	2,3	X	X	1,2	X	X	2,3 ^c
硬度检测	X	X	X	X	X	X	3, X	X	X	X
超声导波检测	1,2,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X
注:1为高度有效;2为中高度有效;3为中度有效;X为低度有效或无效。										
^a 应用时应注意扫查盲区的大小和方位。										
^b 仅对活动性缺陷。										
^c 仅对高温氢腐蚀造成的鼓泡。										

表 8 在线检验方法及检验有效性^a

检验方法	损伤形态							
	局部减薄	均匀减薄	点蚀/孔 蚀	表面裂纹	近表面 裂纹	埋藏裂 纹	尺寸 变化	氢鼓包或高温氢 腐蚀造成的鼓泡
目视检测	3,X	X	3,X	3,X	X	X	2,3	X
脉冲涡流检测	2,3	1,2,3	3,X	X	X	X	X	X
高温纵波超声检测	1,2,3	1,2,3	3,X	X	X	X	X	1,2
高温横波超声检测	X	X	X	2,3 ^b	1,2,3 ^b	2,3 ^b	X	X
高温磁粉检测	X	X	X	2,3	3,X	X	X	X
高温渗透检测	X	X	X	1,2,3	X	X	X	X

表 8 在线检验方法及检验有效性 a（续）

检验方法	损伤形态							
	局部减薄	均匀减薄	点蚀/孔蚀	表面裂纹	近表面裂纹	埋藏裂纹	尺寸变化	氢鼓包或高温氢腐蚀造成的鼓泡
声发射检测	3,X	X	X	2,3 ^c	2,3 ^c	2,3 ^c	X	3,X ^c
X射线数字成像检测	1,2,3	1,2,3	1,2,3	3,X	3,X	3,X	X	X
电磁超声检测	2,3	1,2,3	X	X	X	X	X	X
超声导波检测	1,2,3	X	X	X	X	X	X	X
注:1为高度有效;2为中高度有效;3为中度有效;X为低度有效或无效。								
a 操作温度在10℃~60℃的设备可以选用表2中的检测方法进行在线检测,但应确定设备内介质对检验有效性的影响。								
b 应用时应注意扫查盲区的大小和方位。								
c 针对活性裂纹。								

9 检验结果处理

9.1 一般要求

按 TSG 21、TSG D0001 和 TSG D7005 处理检验结果,评定安全状况等级,确定下次检验日期。无法按 TSG 21 和 TSG D7005 直接处理时,可以进行简化筛选评价,简化筛选评价不通过的可进行合于使用评价。负责承压设备定期检验的检验机构根据简化筛选评价和合于使用评价报告的结论和其他检验项目的检验结果出具检验报告,确定承压设备的安全状况等级,做出立即整改维修或给出允许运行参数和下次检验日期的结论。对名义壁厚不明的,应根据测厚结果按均匀减薄或局部减薄进行合于使用评价。但所有分析结果不得作为超过设计规定参数使用的依据。

9.2 工程简化筛选评价

9.2.1 腐蚀减薄损伤筛选评价

腐蚀减薄损伤筛选评价和推荐检查周期见表 10。多因素的,以评级最严重为准。

表 10 腐蚀减薄损伤筛选评价和推荐检查周期

腐蚀程度	腐蚀级别	均匀减薄量	实测最薄处剩余壁厚/mm		推荐检查周期
			容器	管道	
轻微腐蚀	1	≤10% 名义壁厚	≥3	≥2	5a~6a
轻度腐蚀	2	>10%~20% 名义壁厚	≥3	≥2	3a~4a,或合于使用评价
中度腐蚀	3	>20%~30% 名义壁厚	≥3	≥2	1a~2a,或合于使用评价
严重腐蚀	4	≥30% 名义壁厚	≥3	≥2	停止使用,更换,或合于使用评价
计算减薄量时应加上未来服役时间的腐蚀量,且实测壁厚不少于 15 点					

9.2.2 环境开裂损伤筛选评价

应力腐蚀开裂、表面氢致开裂和应力导向氢致开裂损伤筛选评价和推荐检查周期见表 11。

表 11 应力腐蚀开裂、表面氢致开裂和应力导向氢致开裂损伤筛选评价和推荐检查周期

程度	级别	裂纹深度 C mm	裂纹长度 $A \times$ 裂纹深度 C mm	裂纹处实测最小 剩余壁厚 $t_c - C$ mm	推荐检查周期
轻度	1	$\leq 10\%t_c$ 且 < 12	$< 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$	≥ 3	2a~3a,或修理或合于使用评价
中度	2	$10\% \sim 30\%t_c$ 且 < 12	$< 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$	≥ 3	1a~2a,或修理或合于使用评价
严重	3	$> 30\%t_c$ 或 ≥ 12	$\geq 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$	< 3	停止使用,修理或更换
<p>注 1:评价计算壁厚 $t_c = \text{trd} - \text{FCA}$,即非缺陷处实测壁厚减去未来服役时间的腐蚀量。</p> <p>注 2:R 为部件评价半径 mm。</p> <p>注 3:对于裂纹深度 $C < 30\%t_c$ 且 < 12 mm,同时裂纹处实测最小剩余壁厚 ≥ 3 mm,裂纹长度 $A(\text{mm}) \times$ 裂纹深度 $C(\text{mm}) \geq 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$ 的情形,可以进行更高等级的合于使用评价。</p>					

9.2.3 材质劣化损伤筛选评价

9.2.3.1 球化损伤筛选评价

按 DL/T 674、DL/T 773、DL/T 787、DL/T 999 评级图进行球化评级,筛选评价方法见表 12。

表 12 球化损伤筛选评价和推荐检查周期

球化程度	球化级别	组织特征	推荐检查周期
未球化 (原始态)	1	20 号钢:珠光体区域中的碳化物呈片状	不影响定级
		15CrMo:珠光体区域明显,珠光体中的碳化物呈层片	
		12Cr1MoV:聚集形态的珠光体(贝氏体)、珠光体(贝氏体)中的碳化物并非全部为片层状,有灰色块状区域存在。	
		2.25Cr-1Mo:聚集形态的贝氏体、贝氏体中的碳化物呈粒状	
轻微球化	2	20 号钢:珠光体区域中的碳化物开始分散,珠光体形态明显	4a~5a
		15CrMo:珠光体区域完整,层片状碳化物开始分散,趋于球状化,晶界有少量碳化	
		12Cr1MoV:聚集形态的珠光体(贝氏体)区域已开始分散,其组成仍然较为致密,珠光体(贝氏体)保持原有的区域形态。	
		2.25Cr-1Mo:聚集形态的贝氏体区域已分散,部分碳化物分布于铁素体晶界上,贝氏体尚保留其形态	
轻度球化	3	20 号钢:珠光体区域中的碳化物已分散,并逐渐向晶界扩展,珠光体形态尚明显	3a~4a 或合于 使用评价确定
		15CrMo:珠光体区域较完整,部分碳化物呈粒状,晶界碳化物的数量增加	
		12Cr1MoV:珠光体(贝氏体)区域内的碳化物已显著分散,碳化物已全部成小球状,但仍保持原有的区域形态	

表 12 球化损伤筛选评价和推荐检查周期（续）

球化程度	球化级别	组织特征	推荐检查周期
轻度球化	3	2.25Cr-1Mo: 贝氏体区域内碳化物明显分散,碳化物呈球状分布于铁素体晶界上,贝氏体形态基本消失	3a~4a或合于使用评价确定
中度球化	4	20号钢:珠光体区域中的碳化物已明显分散,并向晶界聚集,珠光体形态尚保留	2a~3a或合于使用评价确定
		15CrMo:珠光体区域尚保留其形态,珠光体中的碳化物多数呈粒状,密度减小,晶界碳化物出现链状	
		12Cr1MoV:大部分碳化物已分布在铁素体晶界上,仅有极少量的珠光体(贝氏体)区域的痕迹	
		2.25Cr-1Mo:大部分碳化物分布在铁素体晶界上,部分呈链状	
严重球化	5	20号钢:珠光体形态消失,晶界及铁素体基体上的碳化物已逐渐长大	0.5a~1a,或停用修理更换,或合于使用评价
		15CrMo:珠光体区域形态特征消失,只留有少量粒状碳化物,晶界碳化物聚集,粒度明显增大	
		12Cr1MoV:珠光体(贝氏体)区域形态已完全消失,碳化物粒子在铁素体晶界上分布,出现双晶界现象	
		2.25Cr-1Mo:晶界碳化物呈链状并长大	
注:球化损伤筛选评价限制条件是无伴随变形、鼓包或开裂。			

9.2.3.2 石墨化损伤筛选评价

按 DL/T 786 评级图进行石墨化评级,筛选评价见表 13。

表 13 石墨化损伤筛选评价和推荐检查周期

石墨化程度	石墨化级别	组织特征	推荐检查周期
轻度石墨化	1	石墨球小,间距大,无石墨链	3a~4a
中度石墨化	2	石墨球较大,比较分散,石墨链短	1a~2a或合于使用评价
高度石墨化	3	石墨球呈链状,石墨链较长,或石墨聚集呈块状,石墨块较大,具有连续性	0.5a~1a,或合于使用评价
严重石墨化	4	石墨化呈聚集链状或块状,石墨链长,具有连续性	停止使用,更换
注:石墨化损伤筛选评价限制条件是无石墨化引起的伴随裂纹。			

9.2.3.3 再热裂纹损伤筛选评价

再热裂纹损伤筛选评价和推荐检查周期见表 14。

表 14 再热裂纹损伤筛选评价和推荐检查周期

程度	级别	裂纹深度 C mm	裂纹长度 A× 裂纹深度 C mm	裂纹处实测最小 剩余壁厚 $t_c - C$ mm	推荐检查周期
轻度	1	$\leq 10\%t_c$ 且 < 12	$< 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$	≥ 3	2a~3a,或修理或合于使用评价
中度	2	$10\% \sim 30\%t_c$ 且 < 12	$< 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$	≥ 3	1a~2a,或修理或合于使用评价
严重	3	$> 30\%t_c$ 或 ≥ 12	$\geq 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$	< 3	停止使用,修理或更换
<p>注 1:评价计算壁厚 $t_c = t_{rd} - FCA$,即非缺陷处实测壁厚减去未来服役时间的腐蚀量。 注 2:R 为部件评价半径。 注 3:对于裂纹深度 $C < 30\%t_c$ 且 < 12,同时裂纹处实测最小剩余壁厚 ≥ 3,而只是裂纹长度 $A \times$ 裂纹深度 $C \geq 0.1t_c\sqrt{Rt_c}$ 的情形,可以进行更高等级的合于使用评价。</p>					

9.2.4 蠕变损伤筛选评价

9.2.4.1 金相判据

按 DL 438 和 DL/T 654 等规定,蠕变损伤筛选评价和推荐检查周期见表 15。

表 15 蠕变损伤筛选评价和推荐检查周期

程度	评级	金相组织	推荐检查周期
轻微	1	在正常工作压力和温度下,一般的组织变化或碳化物开始析出,但无孔洞	5a~6a
轻度	2	在持久应力下发生的: a)链状的、具有方向性的、在晶界上的碳化物析出; b)单个微孔 ^a ,无规则分布; c)少量微孔,无规则分布;	4a~5a,或合于使用评价
中度	3	开始持久损伤: a)垂直于主应力方向的微孔; b)晶界分离 ^b ;	1a~3a,或合于使用评价
重度	4	出现微裂纹 ^c	修理更换或合于使用评价
严重	5	宏观裂纹 ^d	停止使用,更换,或合于使用评价
<p>注:蠕变筛选评价限制条件是炉管蠕胀量超过外径的 5%或周长增加超过 3%;合金钢管外径蠕变变形小于 2.5%,碳钢管外径蠕变变形小于 3.5%;12CrMo、15CrMo、12Cr1MoV 钢蠕变应变(相对变形量)小于 0.75%或蠕变速率小于 0.35E-5%/h,2.25Cr-1Mo 钢蠕变应变(相对变形量)小于 0.5%,其他合金钢蠕变应变(相对变形量)小于 1%或蠕变速率小于 10⁻⁵%/h。</p>			
<p>^a 晶界上的蠕变孔洞。 ^b 一个晶粒长度。 ^c 多个晶粒长度。 ^d 毫米级。</p>			

9.2.4.2 硬度判据

按 API 579—2021 规定,满足表 15 注释中的蠕变损伤限制条件下,硬度值降低但不低于表 16,且温度不高于表 16,则蠕变损伤可接受;或硬度值无变化,且温度不高于表 17,则蠕变损伤可接受。否则不可接受,可采用金相判据进行筛选评价或进行合于使用评价。

表 16 硬度和温度参考准则

材料	硬度/HB	温度/℃
2.25Cr-Mo, 淬火+回火	190	440
2.25Cr-1Mo-V, 淬火+回火	200	470
3Cr-1Mo-V, 淬火+回火	200	455
9Cr-1Mo-V	200	580
12Cr-2Mo-V	200	595

表 17 硬度无变化的温度参考准则

材料	温度/℃
1.25Cr-0.5Mo, 淬火+回火或正火+回火	455
2.25Cr-1Mo, 淬火+回火或正火+回火	480
3Cr-1Mo, 淬火+回火或正火+回火	480
9Cr-1Mo-V	565

9.2.5 机械疲劳和/或热疲劳损伤筛选评价

按 GB/T 4732.4 和 API 579—2021 规定的免评准则,机械疲劳和/或热疲劳损伤筛选评价和推荐检查周期见表 18、表 19、表 20。

表 18 疲劳损伤免评准则

结构类型	描述	免评准则
整体结构	成型封头过渡区的连接件和接管	$N_{\Delta FP} + N_{\Delta PO} + N_{\Delta TE} + N_{\Delta Ta} \leq 350$
	其他部件	$N_{\Delta FP} + N_{\Delta PO} + N_{\Delta TE} + N_{\Delta Ta} \leq 1\,000$
非整体结构	成型封头过渡区的连接件和接管	$N_{\Delta FP} + N_{\Delta PO} + N_{\Delta TE} + N_{\Delta Ta} \leq 60$
	其他部件	$N_{\Delta FP} + N_{\Delta PO} + N_{\Delta TE} + N_{\Delta Ta} \leq 400$
<p>注 1: $N_{\Delta FP}$ 包括启动和停车在内的全范围压力循环的预计次数。</p> <p>注 2: $N_{\Delta PO}$ 为压力波动范围超过设计压力 20% (循环次数不大于 10^5 的整体结构) 或 12.5% (循环次数大于 10^5 且不大于 10^6 的整体结构); 或大于设计压力 15% (循环次数不大于 10^5 的非整体结构) 或 9% (循环次数大于 10^5 且不大于 10^6 的非整体结构) 的工作压力循环的预计次数。</p> <p>注 3: $N_{\Delta TE}$ 为包括接管在内的任意相邻两点之间的金属温差波动 ΔTE 的有效次数。ΔTE 为任意相邻两点之间的金属温差波动, $^{\circ}\text{C}$。此有效次数是将金属温差的波动循环次数乘以表 19 中所列的相应系数, 再将所得次数相加而得到的总次数。</p> <p>注 4: $N_{\Delta Ta}$ 为热膨胀系数不同的材料组成的部件 (包括焊缝), 当 $(\alpha_1 - \alpha_2) \times \Delta T > 0.000\,34$ 时的温差波动循环次数, 其中, α_1, α_2 为两种材料在循环平均温度下的线膨胀系数, 单位为 $\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ΔT 为工作温差的波动范围, 单位为 $^{\circ}\text{C}$。</p>		

表 19 金属温差的波动次数

金属温差/℃	波动系数
≤25	0
26~50	1
51~100	2
101~150	4
151~200	8
200~250	12
>250	20

表 20 机械疲劳和/或热疲劳损伤筛选评价和推荐检查周期

级别	疲劳评价指标	推荐检查周期
1级	实际循环次数满足表18,且无疲劳裂纹	3a~4a
2级	实际循环次数大于表18或设计疲劳次数,且无疲劳裂纹	1a~2a,或合于使用评价
3级	实际循环次数大于表18或设计疲劳次数,且出现疲劳裂纹	修理更换,或合于使用评价
注:实际循环次数应包括未来服役时间的预期循环次数。		

9.3 合于使用评价

9.3.1 通用要求

9.3.1.1 启动条件

工程简化筛选评价不通过或必要时,按照 TSG 21、TSG D 0001 和 TSG D 7005 等相应条款的要求,以及 GB/T 35013 和 GB/T 19624 等规定进行合于使用评价。

9.3.1.2 运行工况分析

进行合于使用评价时应包括各种可能存在的工况,介质中腐蚀性组分的含量变化,工艺上的操作和再生、清焦等。

9.3.1.3 数据类型及获取

各类数据的获取可按以下方式进行。

- a) 缺陷和损伤尺寸数据,通过可靠的检测手段获得。
- b) 材料性能数据,按相关设计制造和材料标准选取,应考虑材料劣化的影响。
- c) 应力水平数据,可按照相应设计标准计算应力,必要时进行应力分析。应力分析应采用成熟、可靠的方法,并包括各种可能的载荷及其组合。弯矩载荷未知时,可按照相关设计标准的设计准则,反推附加载荷如风载荷、地震载荷、雪载荷、自重等引起的弯矩,或者采用有限元分析方法直接进行载荷组合评价。

9.3.1.4 评价方法选择

在役新生损伤或缺陷评价时,应根据缺陷类型或损伤模式和部件类型,按照 GB/T 35013 和 GB/T 19624 等规定进行评价。

9.3.1.5 附加限定要求

附加限定条件应符合以下要求。

- a) 高温服役环境下,钢中碳化物内含钼量占钢中总含量的比值,12CrMo、15CrMo 钢应不超过 85%,12Cr1MoV 钢应不超过 75%。
- b) 高温服役环境下,合金钢管外径蠕变变形应小于 2.5%,碳钢钢管外径蠕变变形应小于 3.5%;12CrMo、15CrMo、12Cr1MoV 钢蠕变应变(相对变形量)应小于 0.75%或蠕变速率小于 $0.35E-5\%/h$,2.25Cr-1Mo 钢蠕变应变(相对变形量)应小于 0.5%,其他合金钢蠕变应变(相对变形量)应小于 1%或蠕变速率小于 $10^{-5}\%/h$ 。
- c) 换热器管束的检测和维修更换策略按 GB/T 26610.2 进行。

9.3.2 腐蚀减薄损伤合于使用评价

9.3.2.1 均匀减薄损伤评价时,压力容器的圆筒、球壳、椭圆封头、半球形封头、开孔接管等典型承压设备结构应按 GB/T 35013 计算极限内压载荷,压力管道的直管、弯头、三通等典型承压设备结构按 GB/T 19624 附录 H 和附录 I 计算极限内压载荷和极限弯矩载荷。

9.3.2.2 局部减薄损伤评价时,如果满足 GB/T 19624 中“凹坑缺陷的安全评定”的使用范围,首先推荐使用 GB/T 19624 中的方法进行评价;否则可按 GB/T 35013 给出的评定方法进行评价。

9.3.2.3 点蚀和局部腐蚀损伤同时存在时,也可偏保守框定局部点蚀(或点蚀和局部减薄组合)损伤区域的物理边界,作为等效局部减薄区,按局部减薄进行评价。

9.3.3 环境开裂损伤合于使用评价

9.3.3.1 氢鼓包和表征为埋藏氢致开裂的损伤,按 GB/T 35013 进行评价;对于密集氢鼓包,将其表征为点蚀群,按点蚀进行评价。

9.3.3.2 含冠顶裂纹或边缘裂纹的氢鼓包、表面氢致开裂以及应力导向氢致开裂按照 GB/T 19624 进行平面缺陷的断裂和塑性失效评价,同时若将裂纹打磨消除变成圆滑凹坑,则需按照 GB/T 19624 补充凹坑评价。

9.3.3.3 应力腐蚀开裂按照 GB/T 19624 进行平面缺陷的断裂和塑性失效评价,同时若将裂纹打磨消除变成圆滑凹坑,则需按照 GB/T 19624 补充凹坑评价。

9.3.4 材质劣化损伤合于使用评价

9.3.4.1 球化损伤

球化损伤 3 级及以上时,应根据硬度与强度换算关系确定屈服强度和抗拉强度,采用换算数据或试验数据按原设计规范或标准进行强度校核或进行其他损伤评价;球化损伤且伴随变形、鼓包时,可直接判定评价不通过,或根据变形和鼓包尺寸,结合球化等级进行有限元评价计算;因球化损伤导致开裂的,直接判定评价不通过。

9.3.4.2 石墨化损伤

石墨化损伤为 2 级和 3 级的,应采用试验数据和对应石墨化碳钢的 Omega 蠕变数据按 GB/T 35013

进行蠕变损伤评价,同时按照 GB/T 35013—2018 附录 B 进行脆断评价。石墨化损伤为 4 级的,或因石墨化损伤导致开裂的,直接判定评价不通过。

9.3.4.3 回火脆损伤

回火脆损伤应按照 GB/T 35013—2018 附录 B 进行脆断评价。其中,选取部件最低允许工作温度的补充内容如下:

- a) 部件最低允许工作温度应优先取韧脆转变温度实测值。
- b) 如果无法获得最低允许工作温度实测值,对于按照国内标准设计建造的部件,最低允许工作温度初始值可取设计规范或标准中材料的使用温度下限;对于按照 ASME 规范设计建造的部件,可根据部件控制厚度和材料冲击试验免除曲线,确定部件最低允许工作温度初始值。确定最低允许工作温度修正值时,除了按 GB/T 35013 附录 B 要求外,还应确定长期服役引起的断口形貌转变温度增量 $\Delta FATT$,按最低允许工作温度=最低允许工作温度初始值+ $\Delta FATT$ 计算。

9.3.4.4 敏化损伤

敏化—晶间腐蚀开裂按照 GB/T 19624 进行平面缺陷的断裂和塑性失效评价,同时若将裂纹打磨消除变成圆滑凹坑,则需按照 GB/T 19624 补充凹坑评价。

9.3.4.5 再热裂纹损伤

再热裂纹按照 GB/T 19624 进行平面缺陷的断裂和塑性失效评价,同时若将裂纹打磨消除变成圆滑凹坑,则需按照 GB/T 19624 补充凹坑评价。

9.3.5 蠕变损伤

蠕变损伤 2 级到 4 级的,按 GB/T 35013 进行无裂纹蠕变 2 级评价。蠕变损伤 5 级的,按 GB/T 19624 进行含裂纹蠕变 3 级评价程序,进行含裂纹部件的塑性失效和断裂评价。

9.3.6 机械疲劳和/或热疲劳损伤

无初始面型(裂纹类)缺陷的疲劳损伤,应按实际载荷谱,即操作压力、操作温度或其他外载荷波动产生的应力变化范围,及其组合效应,采用 GB/T 4732、API579 等标准进行疲劳评价。存在疲劳裂纹时,按实际载荷谱,采用 GB/T 19624 等标准直接进行疲劳评价。

9.3.7 蠕变+渗碳交互作用评价

按照 GB/T 35013、NB/T 10617、NB/T 10618 规定,评价计算壁厚应减去渗碳层厚度,采用拉森-米勒 Larson-Miller 参数法或 Manson-Haferd 参数法,或通过对比选取两种方法中较保守的评价方法。

9.3.8 高温氢腐蚀损伤

出现高温氢腐蚀损伤引起表面脱碳的,应减去表面脱碳层深度,按减薄损伤进行合于使用评价;出现高温氢腐蚀损伤引起的鼓包时,可按环境开裂中的氢鼓包采用 GB/T 35013 进行评价;出现高温氢腐蚀损伤引起的内部脱碳和微裂纹时,应采用试验数据按照 GB/T 35013—2018 附录 B 进行脆断评价。

10 安全状况评定结论和报告

10.1 按照 TSG 21 和 TSG D0001、TSG D7005 以及本文件评价方法,根据简化筛选评价和合于使用评

价结论,综合确定安全状况等级和检验周期。

10.2 合于使用评价应给出结论限制条件,比如结论适用于评价的损伤类型、以及允许运行参数、腐蚀性组分含量限定等,并提出日常运行监控措施。

10.3 合于使用评价报告可作为定期检验报告的技术附件。

参 考 文 献

- [1] TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程
 - [2] TSG D 0001 压力管道安全技术监察规程——工业管道
 - [3] TSG D 7005 压力管道定期检验规则——工业管道
 - [4] 特种设备安全监督检查办法(总局 57 号令)
 - [5] API 579-1/ASME FFS-1—2021 Fitness-For-Service
 - [6] API RP 941 EIGHTH EDITION, FEBRUARY 2016 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants)
-