

CPCIF

中国石油和化学工业联合会团体标准

T/CPCIF 00XX—20XX

超高压管式反应器

Ultra-high pressure tubular reactor

(送审稿)

20XX-XX-XX 发布

中国石油和化学工业联合会发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语、定义 2

4 通用要求 3

5 材料 3

6 结构 8

7 设计 11

8 制造、检验和验收 30

9 反应器出厂要求 35

附录 A （资料性附录） 管式反应器螺纹结构 37

附录 B （规范性附录） 应力应变曲线 46

附录 C （规范性附录） 本标准所列内管用锻件的设计疲劳曲线、弹性模量和平均线膨胀系数 49

附录 D （资料性附录） 应力强度因子和疲劳裂纹扩展速率计算 51

附录 E （资料性附录） 外管夹套热套环的相关设计计算 61

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》的规则起草。

本文件由中国石油和化学工业联合会提出。

本文件由中国石油和化学工业联合会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：华东理工大学、中石化南京化工机械有限公司、内蒙古北方重工业集团有限公司、中国石化工程建设有限公司、中国石化上海石油化工股份有限公司、中国石化扬子石油化工有限公司、江苏龙山管件有限公司、无锡市亚迪流体控制技术有限公司。

本文件主要起草人：王学生、朱小明、许锐冰、魏志强、陈琴珠、韩冰、元少昀、罗永欣、张朝、侯莲香、谭金龙、马荣青、徐辉、蒋良雄、刘叶佳、朱荣挺、胡雄新。

征求意见稿

超高压管式反应器

1 范围

本文件规定了超高压管式反应器（以下简称管式反应器）材料、结构、设计、制造、检验、验收和出厂要求等方面的要求。

本文件适用于内管设计压力 $\geq 100\text{MPa}$ ，内管设计温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的管式反应器。

本文件适用范围是化工行业高压聚乙烯装置或其它超高压管式反应器的场合。

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 150 压力容器
- GB/T 222 钢的成品化学成分允许偏差
- GB/T 223 钢铁及合金化学分析方法
- GB/T 226 钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法
- 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 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 231.1 金属材料 布氏硬度试验第1部分：试验方法
- GB/T 713 承压设备用钢板及钢带
- GB/T 1804 一般公差未注公差的线性和角度尺寸的公差
- GB/T 1979 结构钢低倍组织缺陷评级图
- GB/T 2102 钢管的验收、包装、标志和质量证明书
- GB/T 4336 碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法
- GB/T 4338 金属材料高温拉伸试验方法
- GB/T 4732 压力容器分析设计
- GB/T 5371 极限与配合过盈配合的计算和选用
- GB/T 6060.2 表面粗糙度比较样块磨、车、镗、铁插及刨加工表面
- GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法

GB/T 6479 高压化肥设备无缝钢管

GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB/T 9948 石油裂化用无缝钢管

GB/T 10561 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法

GB/T 12459 钢制对焊无缝管件

GB/T 12777 金属波纹管膨胀节通用技术条件

GB/T 13298 金属显微组织检验方法

GB/T 13401 钢制对焊管件

GB/T 20066 钢和铁化学成分测定用试样的取样和制样方法

GB/T 20123 钢铁

GB/T 21143 金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法

GB/T 26929 压力容器术语

GB/T 34019 超高压容器

NB/T 10558 压力容器的涂敷与运输包装

NB/T 47008 承压设备用碳素钢和低合金钢锻件

NB/T 47009 低温承压设备用合金钢锻件

NB/T 47013 承压设备无损检测

NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

NB/T 47015 压力容器焊接规程

HG/T 20592-20615 钢制管法兰、垫片、紧固件

HG/T 20580 钢制化工容器设计基础规定

HG/T 20581 钢制化工容器材料选用规定

HG/T 20582 钢制化工容器强度计算规定

HG/T 20583 钢制化工容器结构设计规定

HG/T 20584 钢制化工容器制造技术要求

TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程

3 术语、定义

3.1 术语和定义

GB/T 150、GB/T 34019、GB/T 26929和GB/T 4732界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

管式反应器 tubular reactor

管状，内管和夹套管通过热套环连接而成的套管式反应器或无套管式反应器。

3.1.2

内管 inner tube

内部承受超高压的管道元件。

3.1.3

夹套 jacket

布置在内管外部，与内管实现热交换且其内部承受中低压的管道元件。

3.1.4

热套环 shrink ring

通过热套制造工艺连接内管和夹套端部的元件。

4 通用要求

4.1 本文件适用范围内反应器的材料、结构、设计、制造、检验和验收除应符合本文件规定外，还必须遵守国家颁布的相关法律、法规和安全技术规范。

4.2 制造单位应持有相应的特种设备制造许可证。

4.3 风险评估报告按 TSG 21，GB/T 34019 和 GB/T 150 的有关规定执行。

5 材料

5.1 总则

本文件对超高压反应器所使用的材料做出了规定，包括反应器内管、夹套、连接件以及密封件等。

5.2 内管材料要求

5.2.1 管式反应器内管选材时应考虑设备的使用条件（如设计压力、设计温度、介质特性和操作特点等）、材料性能（物理性能，工艺性能及与介质的相容性）以及经济合理性。

5.2.2 使用本文件或 GB/T 34019 以外钢材制造管式反应器内管，应按照 TSG 21 的规定通过技术评审。

5.2.3 内管用材料的技术要求、试验方法和检验规则应符合相应的国家标准、NB/T 47008 及设计文件的规定，同时应满足本标准的要求。

5.2.4 内管用材料应附有材料质量证明文件原件，材料质量证明书应由材料生产单位提供，并在指定部位或其他明显部位做出清晰、牢固的标志，反应器制造单位应按内管质量证明书和技术要求对材料进行验收。

5.2.5 内管复验要求

对于外购的钢管锻件材料应按本标准要求逐件进行复验，也可用现场见证方式代替回厂复验。复验项目包括：

- a) 化学成分;
- b) 常规力学性能;
- c) 金相组织和晶粒度;
- d) 按本文件第 8 部分和附录 D 要求的无损检测;
- e) 其余复验要求应在设计文件中注明

5.2.6 冶炼方法和化学成分

5.2.6.1 冶炼方法

内管用钢应采用电炉冶炼的镇静钢，并应经炉外精炼(含真空处理)和电渣重熔。

5.2.6.2 化学成分

内管化学成分(熔炼分析)应符合表 1 的规定。成品钢材的化学成分允许偏差应符合 GB/T 222 的规定,其中 P+0.003%, S+0.002%。

表 1 化学成分

牌号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu
35CrNi3MoV	0.30~0.40	0.10~0.35	0.20~0.80	≤0.005	≤0.012	0.50~1.20	2.50~3.30	0.40~0.70	0.10~0.25	≤0.20

其中，钢中的气体(如氢、氧、氮等)成分分析由工艺控制，有害痕量元素砷、锡、锑、铅、铋总量≤0.025%。

5.2.7 锻造

5.2.7.1 锻件锻造比应不小于 3。

5.2.7.2 锻件表面缺陷允许打磨，其打磨深度不得超过精加工余量 1/3，打磨后，其表面不允许有肉眼可见的夹杂和裂纹等缺陷。

5.2.7.3 锻件粗加工后(最终性能热处理前)应逐件按 NB/T 47013.4 的规定对外表面进行 100%磁粉检测，合格级别为 I 级。

5.2.8 热处理

5.2.8.1 内管锻件性能热处理为正火加调质，其中回火温度不应低于 540℃。

5.2.8.2 内管锻件性能热处理后按 NB/T 47013.3 的规定进行 100%的超声检测，不低于 I 级为合格。

5.2.9 力学性能

5.2.9.1 内管锻件经性能热处理后，常温力学性能应符合表 2 的规定，高温下材料的最低强度值见表 3。

表 2 力学性能

牌号	屈服强度 $R_{p0.2}$ MPa	抗拉强度 R_m MPa	断后伸长率 A %	断面收缩率 Z %	冲击吸收能量 (-40℃) KV2 J		侧膨胀值 LE* mm
					纵向	横向	
35CrNi3MoV	≥960	1070~1230	≥16	≥50	≥70	≥50	≥0.53
*允许用低温冲击试样测量侧膨胀值。							

表 3 高温力学性能，

牌号	强度指标	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃	400℃
35CrNi3MoV	R'_m /MPa	≥1060	≥1060	≥1060	≥1007	≥954	≥901	≥845
	$R'_{p0.2}$ /MPa	≥876	≥857	≥843	≥799	≥777	≥758	≥720

- 5.2.9.2 本标准所列内管用锻件的设计疲劳曲线、弹性模量和平均线膨胀系数列于附录 C。
- 5.2.9.3 断裂韧性试验按 GB/T 21143 进行，室温 K_{IC} 应不小于 $130\text{ MPa}\cdot\sqrt{m}$ 。
- 5.2.9.4 韧脆转变温度试验按 GB/T 229 进行，测试其 50%的剪切断面率所表示的韧脆转变温度（FATT50）不高于-60℃。
- 5.2.9.5 内管应由锻件生产单位提供力学性能报告，报告中力学性能试验项目、数量和方法应符合表 4 的规定。
- 5.2.9.6 规定锻件屈强比小于 0.93。
- 5.2.10 硬度
- 5.2.10.1 内管锻件性能热处理后应逐支沿轴向每 2 米取截面，但任何长度的单根内管锻件都应最少取 5 个截面，每个截面取 2 点检测表面硬度，硬度范围为 330HBW~390HBW。
- 5.2.10.2 单支内管锻件的表面硬度差应不大于 30HBW，每批内管锻件的表面硬度差值应不大于 40HBW。
- 5.2.11 低倍组织
- 内管锻件不允许存在裂纹、白点、气孔、夹渣等缺陷。一般疏松和锭型偏析按 GB/T 226 和 GB/T 1979 的规定检测，合格级别应分别不超过 1.0 级。
- 5.2.12 金相检查

5.2.12.1 锻件性能热处理后,应按 GB/T 6394 进行晶粒度检查,晶粒度应大于或等于 6.0 级。

5.2.12.2 锻件性能热处理后,应按 GB/T 10561 进行非金属夹杂物检验。其 A、B、C、D 各类夹杂物的粗系级别和细系级别应分别不大于 2.0 级,DS 类夹杂物应不大于 2.0 级; A、B、C、D 各类夹杂物的粗系级别之和应不大于 3.5 级, A、B、C、D 各类夹杂物的细系级别之和应不大于 3.5 级。

5.2.12.3 锻件主要组织为回火索氏体。

5.2.12.4 晶粒度

内管锻件性能热处理后,按 GB/T 6394 进行晶粒度检查,实际晶粒度级别应不小于 6.0 级,同一视场晶粒度级差应不超过 3 级。

5.2.12.5 非金属夹杂物

内管锻件性能热处理后,应按 GB/T 10561 中的 A 法评级进行非金属夹杂物检验,其中 A、B、C、D 各类夹杂物的粗系级别和细系级别应分别不大于 2.0 级,DS 类夹杂物应不大于 2.0 级; A、B、C、D 各类夹杂物的粗系级别之和应不大于 3.5 级, A、B、C、D 各类夹杂物的细系级别之和应不大于 3.5 级。

5.2.13 无损检测

内管应逐支进行磁粉检测、超声检测和涡流检测,检测要求应符合本文件第 8 部分和附录 D 要求的相关规定。

5.2.14 材料检验取样

5.2.14.1 化学成分试样

熔炼分析试样应取自每炉钢水或每包钢水。化学成分成品分析试样应从每个电渣锭(或重熔钢锭对应的一个锻件)进行取样分析。其中,取样方法应按 GB/T 20066 的相关规定进行。

5.2.14.2 力学性能试样

a) 室温拉伸和-40℃冲击及侧向膨胀量试样应从每支内管锻件两端分别取样,其他性能试样应取自每个锻件的冒口端。试样应优先采用横向试样,当无法制取横向试样时,允许采用纵向试样。

b) 力学性能试样取样位置和方向应符合 NB/T 47008 的相关规定。

c) 断裂韧性试验按 GB/T 21143 进行。

d) 韧脆转变温度试验按 GB/T 229 进行。

5.2.14.3 晶粒度试样

从每支内管毛坯的冒口端取样。

5.2.14.4 非金属夹杂物试样

从每支内管毛坯的冒口端取样。

5.2.14.5 低倍试样

从每支内管毛坯的冒口端取样。

5.2.15 检验方法

内管的其它检验项目、取样方法、取样数量及试验方法见表4。

表4 检验项目、取样数量、取样方法及试验方法

序号	检测项目	取样数量	试验方法
1	化学成分	每炉 1 个试样	GB/T 223.1 GB/T 4336 GB/T 20123
2	室温拉伸	每支内管两端分别取 1 个试样	GB/T 228.1
3	高温拉伸	每批抽取一支内管、每一温度下分别取 2 个试样	GB/T 228.2
4	冲击(侧向膨胀量)	每支内管两端分别取 1 组 3 个试样	GB/T 229
5	断裂韧性 K_{Ic}	同一冶炼、锻造和热处理工艺提供 1 份试验报告	GB/T 21143
6	韧脆转变温度 (FATT50)	同一冶炼、锻造和热处理工艺提供 1 份试验报告	GB/T 229
7	硬度	逐支沿轴向每 2 米取截面, 但任何长度的单根内管锻件都应最少取 5 个截面, 每个截面取 2 点	GB/T231.1
8	低倍	每支内管上取 1 个试样	GB/T226
9	晶粒度	每支内管上取 1 个试样	GB/T 6394
10	非金属夹杂物	每支钢管上取 1 个试样	GB/T 10561 A 法评级
11	磁粉检测	逐支	NB/T47013.4
12	超声检测	逐支	NB/T47013.3 GB/T 34019
13	涡流检测	逐支	NB/T47013.6

5.3 对其他元件材料的要求

5.3.1 内管连接件螺纹法兰、金属透镜垫以及螺柱、螺母用钢棒材料一般选用和内管材质相同或相近的材质, 其技术要求应符合相应的材料标准规定。

5.3.2 设计温度 $\geq -20^{\circ}\text{C}$ 时，夹套用接管采用 Q345D，符合 GB/T 6479 规定。夹套用法兰和热套环采用 16Mn 锻件，符合 NB/T 47008 规定的 II 级合格。

5.3.3 当设计温度 $\geq -40^{\circ}\text{C}$ 且 $< -20^{\circ}\text{C}$ 时，夹套用接管采用 Q345E，符合 GB/T 6479 的规定。夹套用法兰和热套环采用 16MnD 锻件，符合 NB/T 47009 规定的 II 级合格。

5.3.4 与夹套相焊接的非受压件，应选用和夹套材质相同或相近的材料。

6 结构

6.1 反应器组成件的选用及连接形式

超高压管式反应器由下列主要部件组成：反应器直管、反应器弯管、外管夹套、超高压密封结构等。

6.1.1 反应器内管与外管夹套端部宜采用热套环连接，其中间选用若干个支撑柱插入外管夹套来支撑内管。

6.1.2 外管夹套外侧两端选用高颈法兰，并焊接在外管夹套上。

6.1.3 反应器直管和反应器弯管两端选用法兰加透镜垫连接，透镜垫用于直管和弯管连接密封。

6.1.4 反应器外管夹套直管段应设置膨胀节。

6.2 反应器直管

反应器直管主要由下列元件组成：内管、夹套、热套环、螺纹法兰及紧固件等。反应器直管结构如图 1 所示。

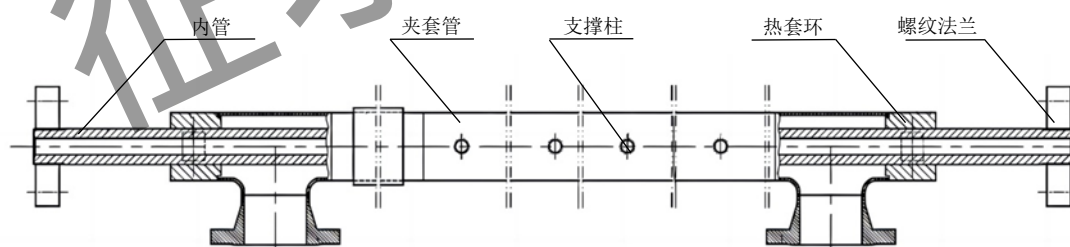


图 1 反应器直管结构

6.2 反应器弯管

反应器弯管主要由下列元件组成：内管、夹套、热套环、螺纹法兰及紧固件等。反应器弯管结构如图 2 所示。

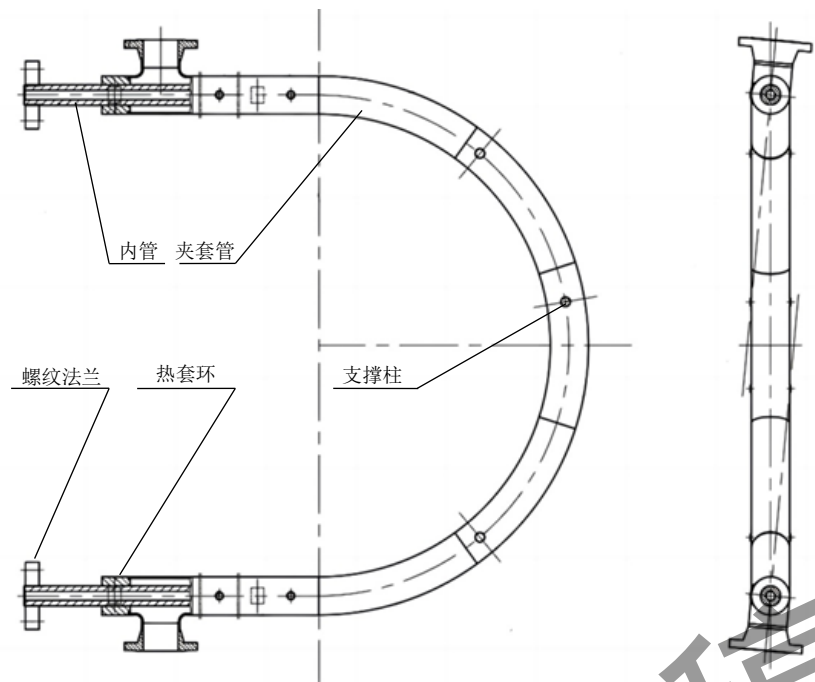


图 2 反应器弯管结构

6.3 夹套

反应器直管的夹套主要由夹套管、热套环、膨胀节、支撑柱及螺纹法兰等组成。反应器弯管的夹套主要由夹套管、热套环、支撑柱及螺纹法兰等组成。

6.3.1 支撑柱

在反应器内管与夹套之间需设置支撑柱以保证反应器内管与夹套在全长范围内的对中程度。反应器内管与夹套之间支撑如图 3 所示。

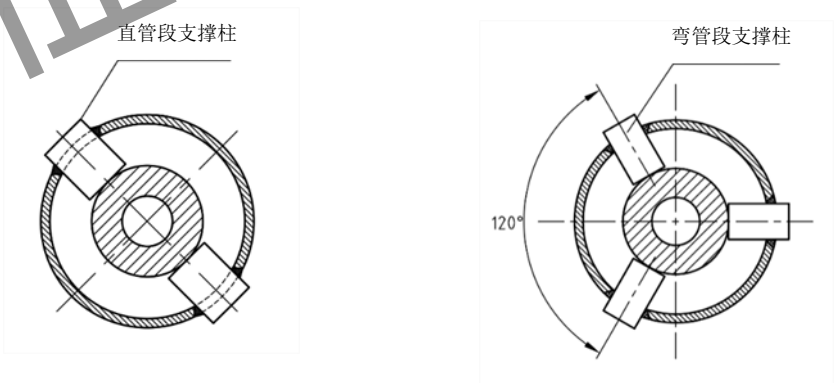


图 3 反应器内管与夹套之间支撑结构

6.3.2 反应器弯管夹套

反应器弯管夹套的弯管部分需至少分成 7 段，按弯管中心部位进行装配焊接，装配中需用定位环固定定位以减少误差。

6.3.3 热套环

夹套直管部分的端部设有热套密封结构，反应器内管与夹套端部通过热套环连接。热套环的过盈量计算依据 GB 5371 的有关要求，详见附录 E。

6.3.4 膨胀节

为抵消热膨胀量，在夹套直管上需设置热膨胀环节。膨胀节需按 GB/T 12777 进行设计计算及疲劳寿命计算。膨胀节型式推荐无约束型的单式轴向型膨胀节，波纹管宜采用带加强环的 U 型波纹管，膨胀节端部连接型式为焊接。

6.4 内管端部超高压密封

6.4.1 超高压密封结构

内管端部高压密封结构宜采用金属透镜垫密封，密封形式见图 4。该密封结构主要由内管端部密封面、内管端部螺纹、螺纹法兰、金属透镜垫、螺栓组件构成。

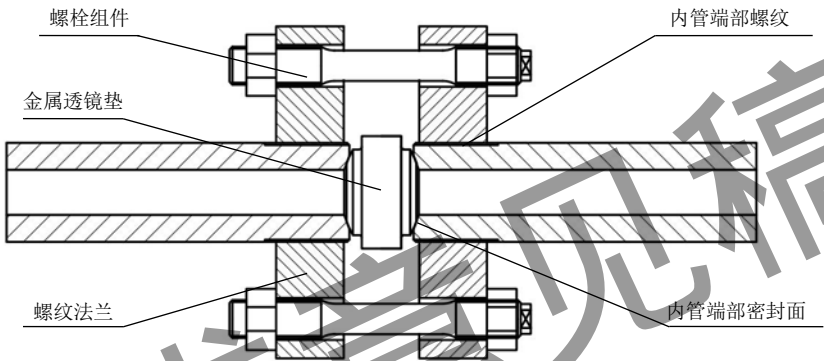


图 4 内管端部高压密封节点图

6.4.2 金属透镜垫

内管之间的密封应采用金属透镜垫形式。金属透镜垫可采用图 5 结构型式。在透镜垫侧面设置加强环，中心位置应设置安装螺纹孔。安装螺纹孔的深度不允许超过加强环的厚度的一半。

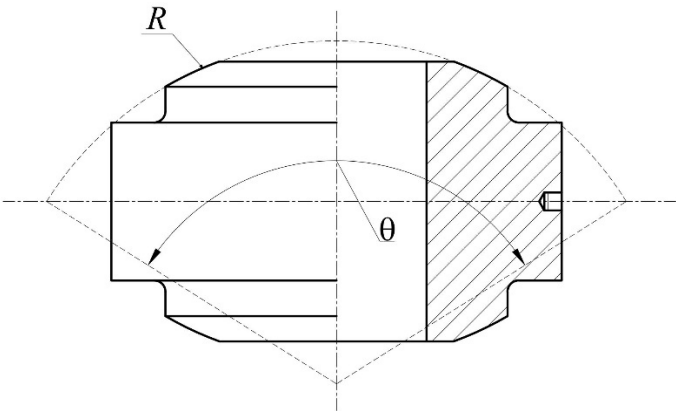


图 5 金属透镜垫推荐结构型式

7 设计

7.1 总则

本章规定了超高压管式反应器承受超高压载荷部分的设计要求,涵盖了塑性垮塌、局部过度应变、棘轮、疲劳和脆性断裂失效的评定方法;按本章设计的超高压管式反应器同时还应符合 GB/T 34019-2017 中 4.3 部分的相关要求。

7.2 设计条件

7.2.1 载荷

容器设计时,应考虑如下载荷:

- a) 在相应温度下的内压;
- b) 容器自重(包括附属设备及隔热材料等)以及正常工作条件下或耐压试验状态下内装介质的重力载荷;
- c) 由温度梯度或热膨胀量不同引起的作用力;
- d) 连接管道和其他部件的作用力;
- e) 需要考虑的其他载荷。

7.2.2 载荷放大系数

当采用弹塑性分析法时,载荷放大系数应按表 5 确定。

表 5 载荷放大系数

条件	设计工况	载荷组合
设计工况	塑性垮塌失效评定	$2.0(P+P_s+M)$
	局部过度应变失效评定	$1.42(P+P_s+M)$
耐压试验工况	塑性垮塌失效评定	$1.5 \left[\frac{R_{p0.2}}{R'_{p0.2}} (P + P_s + M) \right]$

7.3 失效评定及强度计算

7.3.1 塑性垮塌失效评定

7.3.1.1 评定方法

本节给出了超高压管式反应器塑性垮塌失效的评定方法,分别采用爆破压力法或弹塑性分析法。

7.3.1.2 符号

下列符号适用于本节:

A 、 B 、 C —用于拟合材料切应力-应变曲线所得的常数;

K —反应管外径与内径之比;

P_b —爆破压力, MPa;

R'_m —材料在设计温度下的抗拉强度 MPa;

$R'_{p0.2}$ —材料在设计温度下的屈服强度, MPa;

τ —切应力, MPa;

ν —切应变;

ν_i 、 ν_0 —反应管内、外壁的切应变。

7.3.2 爆破压力法

反应管的爆破压力应按材料拉伸试验数据或按材料扭转试验数据进行计算,安全系数取 ≥ 2.2 。

a) 按材料拉伸试验数据计算,如式 (7-1)

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(R'_m + R'_{p0.2}) \ln K \quad (7-1)$$

b) 按材料扭转试验数据计算(适用于常温):

1) 根据超高压反应管材料的切应力切应变 $\tau - \nu$ 曲线(此曲线由材料扭转试验数据获得),在塑性段取三组切应力和切应变,代入式 (7-2), 求得 3 个常数 A、B、C:

$$\tau = A\nu^{\frac{1}{2}} + B\nu^{\frac{1}{4}} + C\nu^{\frac{1}{8}} \quad (7-2)$$

2) 根据式 (7-3)、式 (7-4), 通过试差法确定直径比为 K 的反应管的内外壁切应变 ν_i 和 ν_0 :

$$e^{\nu_i} - 1 = K^2(e^{\nu_0} - 1) \quad (7-3)$$

$$\frac{A\nu_i^{\frac{1}{2}} + B\nu_i^{\frac{1}{4}} + C\nu_i^{\frac{1}{8}}}{A\nu_0^{\frac{1}{2}} + B\nu_0^{\frac{1}{4}} + C\nu_0^{\frac{1}{8}}} = e^{\nu_i - \nu_0} \quad (7-4)$$

3) 将 ν_i 和 ν_0 代入式 (7-5), 即可求得爆破压力 P_b :

$$P_b = A \left[\nu^{\frac{1}{2}} \left(2 - \frac{\nu}{3} \right) + \left(\frac{\nu^{0.25}}{30} - \frac{\nu^{4.5}}{3240} \right) \right] \bigg|_{\nu_i}^{\nu_0} + B \left[\nu^{\frac{1}{4}} \left(4 - \frac{\nu}{2.5} \right) + \left(\frac{\nu^{2.25}}{27} - \frac{\nu^{4.25}}{3060} \right) \right] \bigg|_{\nu_i}^{\nu_0} \\ + C \left[\nu^{\frac{1}{8}} \left(8 - \frac{\nu}{2.25} \right) + \left(\frac{\nu^{2.125}}{25.5} - \frac{\nu^{4.125}}{2970} \right) \right] \bigg|_{\nu_i}^{\nu_0} \quad (7-5)$$

7.3.3 弹塑性分析法

超高压反应管的塑性垮塌失效应采用如下步骤进行评定, 见图 6:

a) 创建模型

创建的数值分析模型应给出超高压反应管的几何特性、边界条件和作用载荷。

b) 确定载荷工况

载荷工况组合应按表 5 确定。

c) 弹塑性数值计算

每种载荷工况组合均应进行弹塑性数值计算。在计算中应采用材料真实应力应变模型（可参考附录 B）、Von Mises 屈服准则和相关联的流动法则，同时应考虑几何非线性。

d) 合格判定

若数值计算均得到收敛解,则评定通过;若结果不收敛，则应对模型进行调整（如改变厚度等），重新评定。

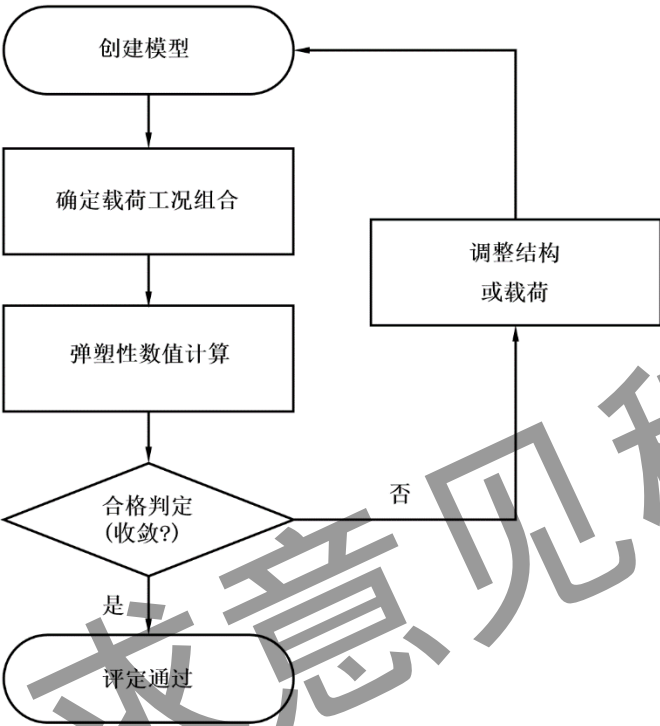


图 6 塑性垮塌失效评定步骤

7.4 局部过度应变失效评定

7.4.1 评定方法

本节给出了采用弹塑性分析超高压反应管局部过度应变失效的评定方法。

7.4.2 符号

下列符号适用于本节。

A —材料断后伸长率，%；

D_ε —累积应变损伤系数；

$D_{\varepsilon,k}$ —第 k 步载荷顺序下产生的应变损伤系数；

m_2, m_3, m_4 —材料参数，由表 6 计算得到；

R —材料在设计温度下的屈服强度与抗拉强度之比， $R_{p0.2}/R_{mt}$ ；

R'_m —材料在设计温度下的抗拉强度 MPa；

$R'_{p0.2}$ —材料在设计温度下的屈服强度，MPa；

Z —材料断面收缩率，%；

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 —主应力, MPa;

$\sigma_{1,k}$ 、 $\sigma_{2,k}$ 、 $\sigma_{3,k}$ —第 k 步加载后的主应力, MPa;

σ_{eq} —当量应力, MPa;

$\sigma_{eq,k}$ —第 k 步载荷顺序下的 Von Mises 当量应力, MPa;

ε_{peq} —当量塑性应变;

ε_L —三轴应力状态对应的应变极限;

$\varepsilon_{L,k}$ —第 k 步加载时三轴应力状态对应的应变极限;

ε_{Lu} —伸应力状态对应的应变极限,应取 m_2 、 m_3 、 m_4 中最大值;

$\Delta\varepsilon_{peq,k}$ —第 k 加载后产生的当量塑性应变增量。

7.4.3 弹塑性分析法

7.4.3.1 评定步骤

超高压反应管局部过度应变失效应采用如下步骤进行评定,见图 7。

a) 建立模型

数值分析模型应给出超高压反应管的几何特性、边界条件和作用载荷。采用部分整体模型时边界条件设置须不能影响求解结果的精确性。

b) 确定载荷工况

载荷工况组合应根据表 5 相关规定,计算局部失效时,载荷组合为 $1.42(P + P_s + M)$ 。

c) 塑性数值计算

每种载荷工况组合均应进行弹塑性数值计算。在计算中应采用材料真实应力应变模型(可参考附录 B)、VonMises 屈服准则和相关联的流动法则,同时应考虑几何非线性。

d) 确定应变极限

超高压反应管任意部位的三轴应变极限 ε_L 按式 (7-6) 计算:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{Lu} \cdot \exp\left[-\frac{2.2}{1+m_2}\left(\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3\sigma_{eq}}-\frac{1}{3}\right)\right] \quad (7-6)$$

式中,当量应力 σ_{eq} 按式 (7-7),其他参数取值见表 9:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7-7)$$

对 35CrNi3MoV 和 36CrNi3MoV 锻件制造的超高压反应管,应采用式 (7-8) 代替式 (7-6) 对三轴应变限制进行计算:

$$\varepsilon_L = 0.6 \cdot \exp[-2.28(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_{eq}} - \frac{1}{3})]$$

(7-8)

e) 合格判定

若超高压反应管任意部位的当量塑性应变 ε_{peq} 均满足式 (7-9), 则评定通过:

$$\varepsilon_{peq} \leq \varepsilon_L$$

(7-9)

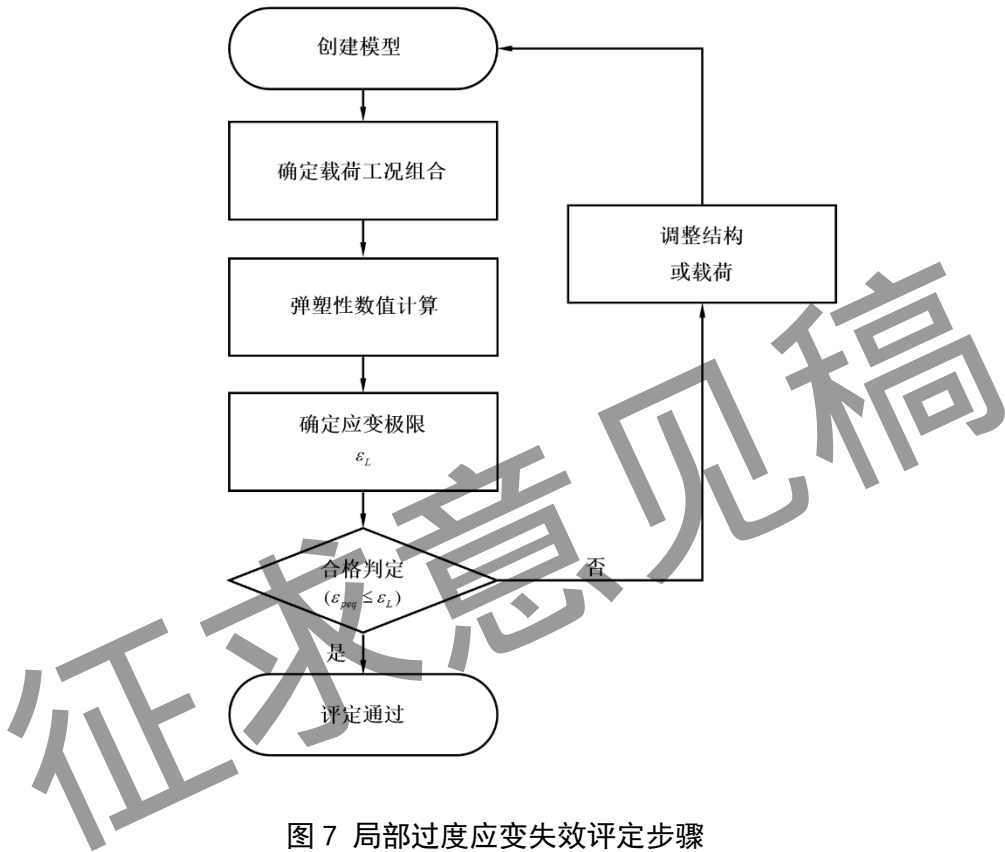


图 7 局部过度应变失效评定步骤

表 6 弹塑性分析中参数取值

材料	m_2	m_3	m_4
高强度低合金钢	$0.6(1-R)$	$2\ln(1+A/100)$	$\ln(100/(100-Z))$

7.4.3.2 累积损伤

若能够明确各种载荷工况的加载顺序,应采用如下步骤计算累积损伤效应,见图 8。

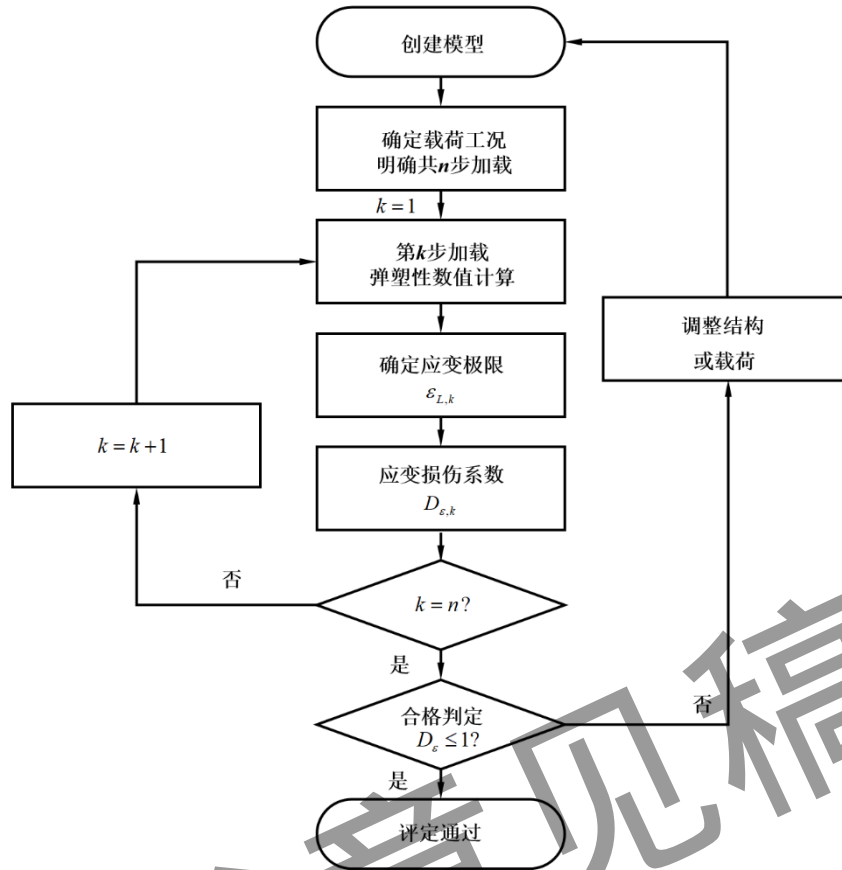


图8 局部过度应变失效累积损伤评定步骤

7.5 棘轮失效评定

超高压反应管的棘轮失效应采用如下步骤进行评定,见图9。

a) 创建模型

数值分析模型应给出超高压反应管的几何特性、边界条件和作用载荷。

b) 确定载荷工况

按表1,确定在分析中应用到的载荷工况组合,明确加载顺序,分别设为第1步,第2步,……第n步加载。

c) 弹塑性数值计算

第k步加载后,进行弹塑性数值计算。计算中应采用材料真实应力应变模型(参考附录B)、Von Mises 屈服准则和相关联的流动法则,同时考虑几何非线性。

d) 确定应变极限

计算完成后,超高压反应管中任意部位的三轴应变极限按式(7-10)计算:

$$\varepsilon_{L,k} = \varepsilon_{Lu} \cdot \exp\left[-\frac{2.2}{1+m_2} \left(\frac{\sigma_{1,k} + \sigma_{2,k} + \sigma_{3,k}}{3\sigma_{eq,k}} - \frac{1}{3}\right)\right] \quad (7-10)$$

式中,当量应力 $\sigma_{eq,k}$ 按式(7-11),其他相关参数取值见表9。

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{1,k} - \sigma_{2,k})^2 + (\sigma_{2,k} - \sigma_{3,k})^2 + (\sigma_{3,k} - \sigma_{1,k})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7-11)$$

对 35CrNi3MoV 和 36CrNi3MoV 锻件制造的超高压反应管,应采用式 (7-12) 代替式 (7-10)对三轴应变限制进行计算:

$$\varepsilon_L = 0.6 \cdot \exp[-2.28(\frac{\sigma_{1,k} + \sigma_{2,k} + \sigma_{3,k}}{3\sigma_{eq,k}} - \frac{1}{3})] \quad (7-12)$$

e) 应变损伤系数

第 k 步加载的应变损伤系数按式 (7-13) 计算:

$$D_{e,k} = \Delta\varepsilon_{peq,k} / \varepsilon_{L,k} \quad (7-13)$$

式中, $\Delta\varepsilon_{peq,k}$ 即在第 k 步加载下产生的塑性应变增量, $\varepsilon_{L,k}$ 即对应的三轴应变极限。

f) 合格判定

根据加载顺序, 依次按上述步骤计算, 得到每步加载对应的应变损伤系数 $D_{e,k}$ 。

最终按式(7-14)计算累积应变损伤系数 D_e :

$$D_e = \sum_{k=1}^n D_{e,k} \quad (7-14)$$

若超高压反应管任意部位的 D_e 均小于或等于 1, 则评定通过。

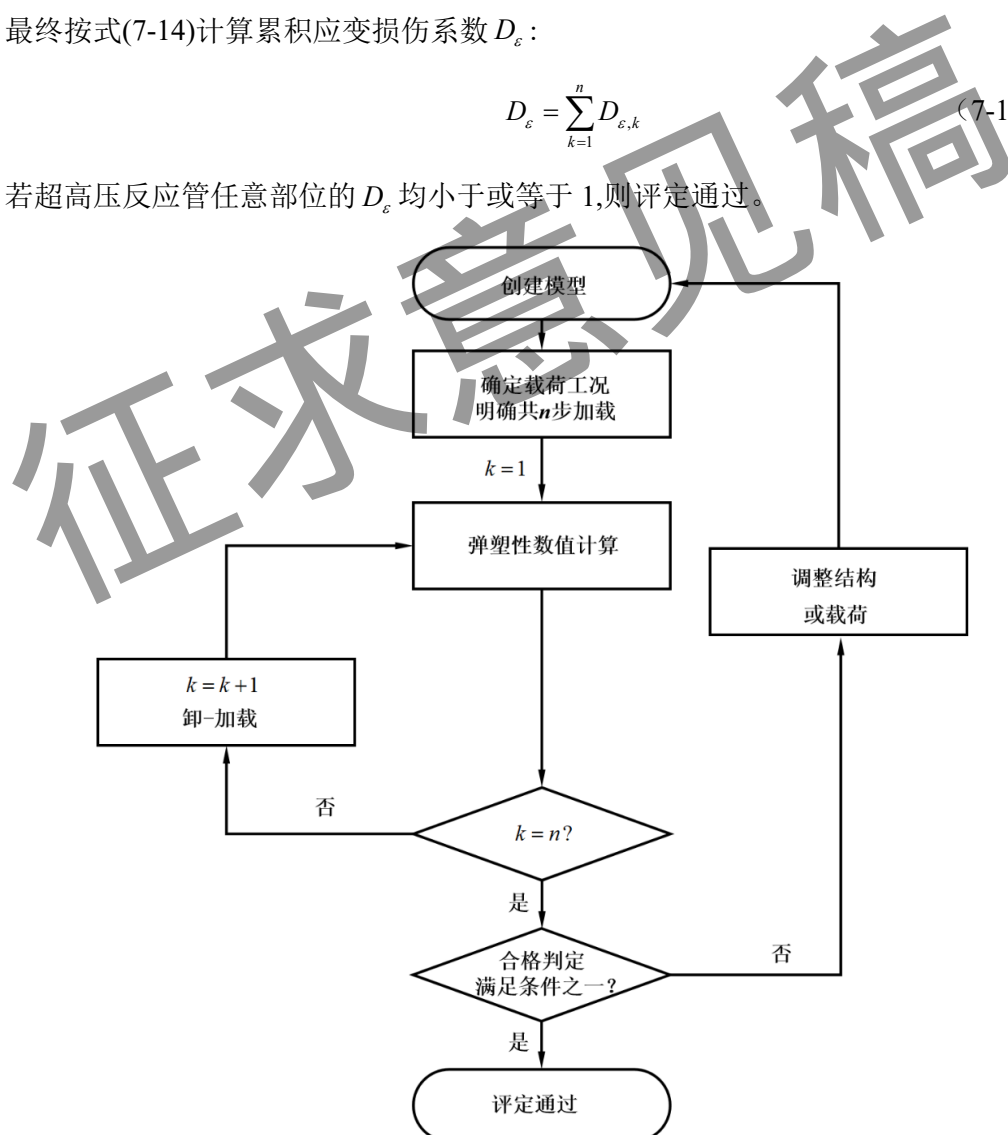


图 9 棘轮失效评定步骤

a) 创建模型

数值分析模型应给出超高压反应管的几何特性、边界条件和作用载荷。采用部分整体模型时边界条件设置须不能影响求解结果的精确性。

b) 确定载荷工况

评定棘轮失效时,模型载荷采用超高压反应管在操作情况下的工作载荷。

c) 弹塑性计算

应采用理想弹塑性模型、Von Miss 屈服准则和相关的流动法则,同时应考虑几何非线性。其中,理想弹塑性模型的屈服强度取材料在设计温度下屈服强度的 0.9 倍。

d) 合格判定

进行 n 次加-卸载弹塑性计算后(要求 $n \geq 3$),满足下列条件之一则评定通过:

- 1) 模型中只有弹性变形,无塑性应变区;
- 2) 模型中存在弹性核心区域;
- 3) 模型无永久性塑性变形。

7.6 疲劳失效评定

7.6.1 评定方法

本节给出了超高压反应管疲劳失效的评定方法。若超高压反应管能够按 7.6.3 判定为未爆先漏,按 7.6.4 的疲劳分析法或 7.6.5 的断裂力学法进行评定;若不能够判定为未爆先漏,则应按 6.6.5 的断裂力学法进行评定。

7.6.2 符号

下列符号适用于本节。

a_0 —断裂力学评定时假设的初始裂纹深度, m;

a_c —临界裂纹深度,取 $K_{I\max} = K_{IC}$ 对应的裂纹深度和 0.8 倍壁厚中的较小者, m;

Δa —裂纹扩展计算时假定的裂纹扩展深度, m;

C —裂纹扩展系数,见表 8;

da/dN —裂纹扩展速率, m/次;

H —计算裂纹扩展门槛值的系数,见表 8;

I —材料系数,见表 8;

G —材料系数,见表 8;

K_I —应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$;

K_{IC} —材料的断裂韧性, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$;

$K_{I\max}$ —除残余应力之外的所有循环载荷作用下的应力强度因子最大值, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$;

$K_{I\min}$ ——除残余应力之外的所有循环载荷作用下的应力强度因子最小值,

$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$;

ΔK_{th} —裂纹扩展门槛值, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$;

m —裂纹扩展指数,见表 8;

n —预计循环次数；

n_1 、 n_2 、 n_3 —编号为 1、2、3 等应力循环中每种循环在超高压管式反应器的寿命周期中的预计循环次数；

N —允许循环次数；

N_1 、 N_2 、 N_3 —编号为 1、2、3 等应力循环中每种循环在超高压管式反应器的寿命周期中的允许循环次数；

N_c —裂纹扩展至 $1/4a_c$ 所需的循环次数；

N_p —裂纹扩展至临界裂纹深度 a_c 所需的循环次数；

ΔN —裂纹扩展 a 所需的循环次数；

R'_m —在整个循环中最高工作温度和最低工作温度的平均值温度下材料的抗拉强度；

$R_{p0.2}$ —材料在常温下的屈服强度；

$R'_{p0.2}$ —在整个循环中最高工作温度和最低工作温度的平均值温度下材料的屈服强度；

$S_{alt\ ij}$ —整个循环中的交变应力幅，MPa；

$S'_{alt\ ij}$ —主应力方向在循环中变化时的交变应力幅，MPa；

S_{eq} —当量交变应力强度幅，MPa；

$S_{eq\ ij}$ —当量交变应力幅，MPa；

$S'_{eq\ ij}$ —主应力方向在循环中变化时的交变应力幅，MPa；

S_{ij} —整个循环中的主应力差值，MPa；

S'_{ij} —主应力方向在循环中变化时的波动主应力差值，MPa；

$S_{ij\ max}$ 、 $S_{ij\ min}$ —在整个循环中主应力差的最大值和最小值，MPa；

$S_{m\ ij}$ —平均应力，MPa；

$S'_{m\ ij}$ —主应力方向在循环中变化时的平均应力，MPa；

$S_{n\ ij}$ —主应力的和，MPa；

$S_{nij\ m}$ —主应力和的均值，MPa；

$S'_{n\ ij}$ —主应力方向在循环中变化时主应力的和，MPa；

$S'_{nij\ m}$ —主应力方向在循环中变化时主应力和的均值，MPa；

t —主壁厚，mm；

U —累计使用系数；

U_1 、 U_2 、 U_3 —编号为 1、2、3 等应力循环中每种循环在超高压管式反应器的寿命周期中的使用系数；

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 —主应力，MPa；

σ'_1 、 σ'_2 、 σ'_3 —主应力波动，MPa；

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 τ_m 、 τ_{nr} 、 τ_{rt} —整个循环中的 6 个应力分量，MPa；

σ'_1 、 σ'_2 、 σ'_3 、 τ'_m 、 τ'_{nr} 、 τ'_{rt} —应力分量波动，MPa；

σ_{ii} 、 σ_{ni} 、 σ_{ri} 、 τ_{mi} 、 τ_{ni} 、 τ_{ri} —整个循环中极端点(代数值最大或最小)所对应的时刻的各个应力分量, MPa。

7.6.3 未爆先漏判定

判定未爆先漏需要先计算超高压反应管裂纹的应力强度因子 K_I , 计算方法参照附录 C。若超高压反应管圆筒内表面的轴-径向裂纹(设初始深长比 $a/l=1/3$)同时满足如下条件, 则判定为未爆先漏:

a) 裂纹扩展至 0.8 时, $K_I < K_{IC}$;

b) $0.2t < (K_{IC} / R_{p0.2})^2$ 。

7.6.4 疲劳分析法

超高压反应管的疲劳失效应采用如下步骤进行评定, 见图 10。

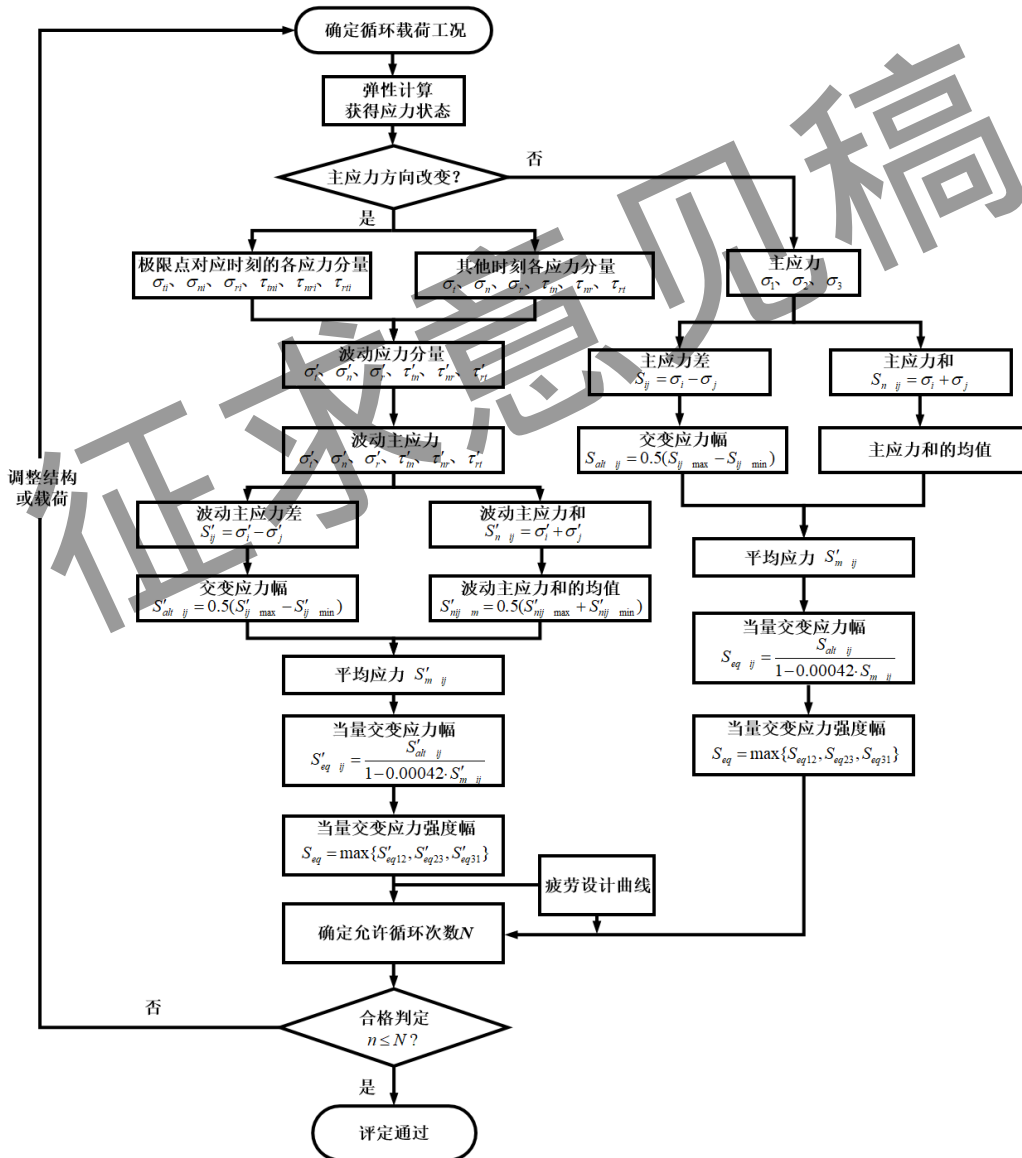


图 10 疲劳分析评定步骤

7.6.4.1 载荷工况

明确超高压反应管的循环载荷工况, 预计循环次数 n 。超高压反应管运行期间的循环载荷工况主要包括间歇操作(如开车、停车等)、压力变化与波动、周期性的温度变化、强迫振动、外载荷的变化等。

7.6.4.2 弹性分析

有限元模型与棘轮失效所用模型一致。通过弹性计算获得超高压反应管在整个周期内任意时刻的应力状态。

7.6.4.3 交变应力强度幅

7.6.4.3.1 当所考虑点的主应力方向在循环中不变时, 应按下列步骤确定交变应力强度幅。

a) 应力差

按式(7-15)计算整个循环中的主应力差 S_{ij} ,

$$\begin{cases} S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2 \\ S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3 \\ S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1 \end{cases} \quad (7-15)$$

b) 交变应力幅

按式(7-16)计算在整个循环中交变应力幅 $S_{alt\ ij}$:

$$S_{alt\ ij} = 0.5(S_{ij\ max} - S_{ij\ min}) \quad (7-16)$$

c) 主应力和

按式(7-17)计算在整个循环中的主应力和 $S_{n\ ij}$:

$$\begin{cases} S_{n12} = \sigma_1 + \sigma_2 \\ S_{n23} = \sigma_2 + \sigma_3 \\ S_{n31} = \sigma_3 + \sigma_1 \end{cases} \quad (7-17)$$

d) 主应力和的均值:

$$S_{n\ ij\ m} = 0.5(S_{n\ ij\ max} + S_{n\ ij\ min}) \quad (7-18)$$

e) 平均应力

按如下要求计算与交变应力幅 $S_{alt\ ij}$, 相关的平均应力 $S_{n\ ij\ m}$:

(1) 若 $S_{ij\ max} < R'_{p0.2}$ 且 $S_{ij\ min} > -R'_{p0.2}$:

$$S_{m\ ij} = S_{n\ ij\ m} \quad (7-19)$$

(2) 若 $S_{alt\ ij} \geq R_{tp0.2}$:

$$S_{m\ ij} = 0 \quad (7-20)$$

(3) 其他情况且 $S_{n\ ij\ m} > 0$ 时:

$$S_{m\ ij} = R'_{p0.2} - S_{alt\ ij} \quad (7-21)$$

(4) 其他情况且 $S_{n\ ij\ m} < 0$ 时:

$$S_{m\ ij} = S_{alt\ ij} - R_{p0.2}^t \quad (7-22)$$

f) 当量交变应力强度幅

按式 (24) 计算当量交变应力幅 $S_{eq\ ij}$:

$$S_{eq\ ij} = \frac{S_{alt\ ij}}{1 - 0.00042 \cdot S_{mij}} \quad (7-23)$$

按式 (25) 计算当量交变应力强度幅 S_{eq} :

$$S_{eq} = \max \{S_{eq12}, S_{eq23}, S_{eq31}\} \quad (7-24)$$

7.6.4.3.2 当所考虑元件部位的主应力方向在循环中变化时,应按下列步骤确定交变应力强度幅:

a) 波动主应力

1) 确定所考虑点在 6.5.4.2 中所述的各种载荷下确定整个循环中的 6 个应力分量, 分别以 σ_t 、 σ_n 、 σ_r 、 τ_{tn} 、 τ_{nr} 、 τ_{rt} 表示;

2) 选取循环条件的极端点(代数值最大或最小)所对应的时刻,将这一时刻的各个应力分量分别表示为: σ_{ti} 、 σ_{ni} 、 σ_{ri} 、 τ_{tni} 、 τ_{nri} 、 τ_{rti} ;

3) 在循环中的每个时刻,从每个与该时刻对应的应力分量 σ_t 、 σ_n ……等中减去 i 时刻的相应应力分量 σ_{ti} 、 σ_{ni} 等, 所得的波动应力分量记为: σ'_t 、 σ'_n 等;

4) 在循环的每个时刻, 计算由六个应力分量波动 σ'_t 、 σ'_n 、 σ'_r 、 τ'_{tn} 、 τ'_{nr} 、 τ'_{rt} 所导出的主应力波动 σ'_1 、 σ'_2 、 σ'_3 。这些波动主应力的方向虽然在循环中变化, 但其编号应保持不变。

b) 波动主应力差

按式 (7-25) 计算在整个循环中,相对于时间的波动主应力差 S'_{ij} 。

$$\begin{cases} S'_{12} = \sigma'_1 - \sigma'_2 \\ S'_{23} = \sigma'_2 - \sigma'_3 \\ S'_{31} = \sigma'_3 - \sigma'_1 \end{cases} \quad (7-25)$$

c) 交变应力幅

在整个循环中确定各主应力差的代数最大值 $S'_{ij\ max}$ 和最小值 $S'_{ij\ min}$, 交变应力幅 $S'_{alt\ ij}$ 按式 (7-26) 计算:

$$S'_{alt\ ij} = 0.5(S'_{ij\ max} - S'_{ij\ min}) \quad (7-26)$$

d) 波动主应力和

按式 (7-27) 计算在整个循环中的波动主应力的和 $S'_{n\ ij}$:

$$\begin{cases} S'_{n12} = \sigma'_1 + \sigma'_2 \\ S'_{n23} = \sigma'_2 + \sigma'_3 \\ S'_{b31} = \sigma'_3 + \sigma'_1 \end{cases} \quad (7-27)$$

e) 波动主应力和的均值:

$$S'_{nijm} = 0.5(S'_{nij\max} + S'_{nij\min}) \quad (7-28)$$

f) 平均应力

按如下要求计算与交变应力幅 $S'_{alt\ ij}$ 相关的平均应力 $S'_{m\ ij}$:

(1) 若 $S'_{ij\max} < R_{tp0.2}$, 且 $S'_{ij\min} > -R_{tp0.2}$

$$S'_{m\ ij} = S'_{n\ ij\ m} \quad (7-29)$$

(2) 若 $S'_{alt\ ij} \geq R_{tp0.2}$

$$S'_{m\ ij} = 0 \quad (7-30)$$

(3) 其他, 若 $S'_{n\ ij\ m} > 0$:

$$S'_{m\ ij} = R_{tp0.2} - S'_{alt\ ij} \quad (7-31)$$

(4) 其他, 若 $S'_{n\ ij\ m} < 0$:

$$S'_{m\ ij} = S'_{alt\ ij} - R_{tp0.2} \quad (7-32)$$

g) 当量交变应力强度

按式 (7-33) 计算当量交变应力幅 S' :

$$S'_{eqij} = \frac{S'_{altij}}{1 - 0.00042 \cdot S'_{mij}} \quad (7-33)$$

按式 (7-34) 计算当量交变应力强度幅:

$$S = \max\{S'_{eq12}, S'_{eq23}, S'_{eq31}\} \quad (7-34)$$

7.6.4.4 允许循环次数

a) 由 7.6.4.3 计算求得的当量交变应力强度幅 S_{eq} 按式 (7-35) 进行修正:

$$S_{eq}^t = \frac{E}{E^t} S_{eq} \quad (7-35)$$

b) 在设计疲劳曲线图上的纵坐标中读取该值, 过此点做水平线与设计疲劳曲线相交, 交点的横坐标值即为所对应的允许循环次数 N 。

7.6.4.5 合格判定

若超高压管式反应器的预计循环次数 n 不大于允许循环次数 N , 评定通过; 否则, 应采用改变结构尺寸、自增强处理工艺参数等措施, 重复本节中之前的操作步骤, 直到满足本条要求为止。

7.6.4.6 累积损伤

如果有两种或多种显著应力循环时,应对每种应力循环计算其交变应力强度和平均应力。应采用以下规定计算疲劳累积损伤效应:

a) 编号为 1、2、3 等应力循环中每种循环在超高压管式反应器的寿命周期中的预计循环次数,分别为: n_1 、 n_2 、 n_3 等。在确定其中任一循环的循环次数时,应计及不同循环叠加时,各应力循环的主应力差值叠加的影响;

b) 按 7.6.4.3 中规定的方法确定每种应力循环中的当量交变应力强度 S_{eq} ,相应地记为 S_{eq1} 、 S_{eq2} 、 S_{eq3} 等;

c) 按 7.6.4.4 求取 S_{eq1} 、 S_{eq2} 、 S_{eq3} 等单独作用时的允许循环次数 N_1 、 N_2 、 N_3 等;

d) 对每种应力循环,按式 (7-36) 确定各自的使用系数 U_1 、 U_2 、 U_3 等;

$$\begin{cases} U_1 = \frac{n_1}{N_1} \\ U_2 = \frac{n_2}{N_2} \\ U_3 = \frac{n_3}{N_3} \\ \vdots \end{cases} \quad (7-36)$$

e) 按式(7-37)计算累积使用系数 U ,累计使用系数 U 不得大于 1.0:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (7-31)$$

7.6.5 断裂力学法

超高压反应管的疲劳失效应采用如下步骤进行断裂力学评定,见图 11。

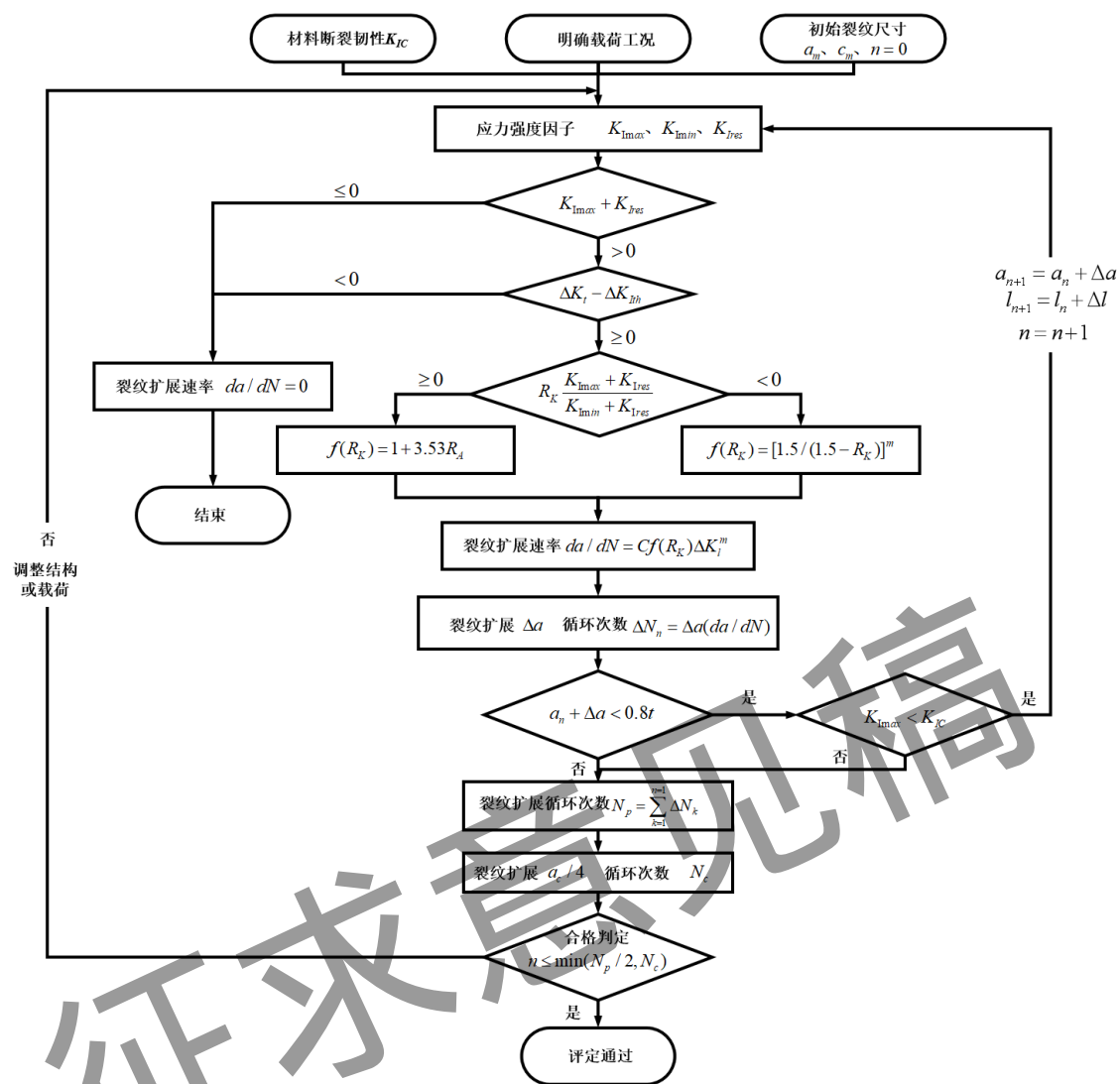


图 11 断裂力学评定步骤

7.6.5.1 初始裂纹尺寸

采用断裂力学评定时的初始裂纹深度 a_0 应按表 8 取值。

表 7 初始裂纹尺寸

壁厚 t/mm	初始裂纹深度 a_0 /m
$t \leq 16$	0.0005
$16 < t \leq 50$	0.0011
$t > 50$	0.0016

7.6.5.2 应力强度因子

在超高压反应管典型危险部位假定裂纹存在, 计算应力强度因子(可参考附录 F), 获得在整个循环周期中最大应力强度因子 $K_{I\max}$ 、最小应力强度因子 $K_{I\min}$ 以及残余应力强度因子 $K_{I\text{res}}$ (如存在), 计算时应考虑压应力、热应力、不连续应力和残余应力等在内的所有应力。

7.6.5.3 裂纹扩展速率

按式 (7-38) 计算裂纹扩展速率 da/dN , 相关的系数取值按表 8:

$$da / dN = C \cdot [f(R_K)] \cdot \Delta K_I^m \tag{7-32}$$

式中,

$$f(R_K) = \begin{cases} 1 + 3.53R_K & R_K \geq 0 \\ [1.5 / (1.5 - R_K)]^m & R_K < 0 \end{cases} \tag{7-33}$$

$$R_K = \frac{K_{I\max} + K_{I\text{res}}}{K_{I\min} + K_{I\text{res}}} \tag{7-40}$$

$$\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min} \tag{7-41}$$

表 8 裂纹扩展速率相关的系数

材料	C $m/\text{次}$	m	G $\text{MPa} \cdot \sqrt{m}$	H	I $\text{MPa} \cdot \sqrt{m}$
高强度低合金钢	3.64×10^{-12}	3.26	7	0.85	6.0

必要时, 设计人员应考虑环境对裂纹扩展速率的影响, 如腐蚀疲劳等。

若 ΔK_I 小于门槛值 ΔK_{th} 或 $K_{I\max} + K_{I\text{res}} \leq 0$, da/dN 值可设为零。其中, ΔK_{th} 按式

(7-42) 计算, 但应不小于 $2.2 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ 。

$$\Delta K_{th} = \min\{G(1 - HR_K), I\} \tag{7-42}$$

7.6.5.4 临界裂纹尺寸

按式 (7-43) 计算裂纹扩展 Δa 所需的循环次数 N , 更新裂纹尺寸, 重复上述步骤直至达到临界裂纹尺寸 ac :

$$\Delta N = \Delta a / (da / dN) \tag{7-43}$$

其中, 临界裂纹深度 ac 应取 $K_{I\max} = K_{IC}$ 对应的裂纹深度和 0.8 倍壁厚中的较小者。

7.6.5.5 裂纹扩展循环次数

获得裂纹扩展至临界裂纹深度 a_c 的总循环次数 NP 和裂纹扩展至 a_c 的总循环次数 N_c , 并应采用减少 Δa 的方法反复进行试算, 直至 N_p 和 N_c 无明显变化。

7.6.5.6 合格判定

若超高压反应管的预计循环次数 n 满足式 (7-44), 评定通过; 否则, 应采用改变操作条件、超高压反应管结构尺寸等措施, 重复本节中之前的操作步骤, 直到满足本条要求为止:

$$n \leq \min\{N_p / 2, N_c\} \quad (7-44)$$

7.7 螺纹强度校核

应根据螺纹载荷分布情况和螺纹牙的几何参数, 对螺纹牙参照附录 A 进行挤压强度、剪切强度和弯曲强度校核, 同时应进行螺纹牙的疲劳分析和断裂力学分析。

(1) 按 7.6.4.3 确定的交变载荷, 采用有限元方法对螺纹牙进行疲劳评定。

(2) 按 7.6.5 断裂力学法, 采用有限元方法对螺纹牙进行断裂力学分析。

7.8 自增强设计

7.8.1 概述

超高压管式反应器自增强处理相关设计计算, 包括确定自增强压力和自增强处理要求。本节给出的确定超高压反应管直管部分自增强后残余应力分布的方法, 可用于计算 7.6 疲劳失效评定时的残余应力。超高压反应管弯管部分与直管部分应力差距较大, 对超高压反应管弯管部分则宜采用弹塑性分析或试验方法。

7.8.2 设计条件

设计过程需要明确的设计条件主要有: 工作压力及应力交变范围及周期, 工作温度交变范围及周期, 设备尺寸, 超高压反应管材料; 涉及到弯管部分时, 还需要明确弯管的回转半径。

7.8.3 对残余应变的要求

自增强处理的管式反应器内表面的残余环向应变不得超过 2%。

7.8.4 符号

A —垂直于超高压反应管环向的横截面积, mm^2 ;

D —超高压反应管的任一直径, mm ;

D_i —超高压反应管的内径, mm ;

D_o —超高压反应管的外径, mm ;

D_p —超高压反应管自增强后弹塑性分界面的直径, mm ;

D_Z — $\sigma_{tRA} = \sigma_{rRA}$ 时的直径, mm ;

E —材料的弹性模量, MPa ;

F_b —修正系数;

F —自增强时总的环向作用力, N ;

K —超高压反应管外径与内径之比;

P_A —自增强时最大的内压, MPa;

$R_{p0.2}$ —材料在常温下的屈服强度, MPa;

ε_m —在自增强达到最大压力 P_A 时超高压反应管外表面的环向应变, 测量时取轴向 3 个测量点的最小值;

ε_p —自增强后超高压反应管内表面的环向应变, 测量时取轴向 3 个测量点的最小值;

σ_{AD} —超高压反应管内表面的环向残余应力, MPa;

σ_{CD} —超高压反应管内表面的修正环向残余应力, MPa;

σ_{rR} —修正径向残余应力, MPa;

σ_{rRA} —径向残余应力, MPa;

σ_{tR} —修正环向残余应力, MPa;

σ_{tRA} —环向残余应力, MPa;

ν —泊松比。

7.8.5 弹塑性分界面直径 D_p

7.8.5.1 若已知 ε_m , 按如下要求计算弹塑性分界面直径 D_p :

a) 若超高压反应管自增强时存在端部支撑, 按式 (7-45):

$$(D_p / D_o)^2 = [E\varepsilon_m + \nu(\frac{P_A D_i^2}{D_o^2 - D_i^2})] / (1.15R_{p0.2}) \quad (7-45)$$

b) 其他, 按式 (7-46)

$$(D_p / D_o)^2 = [E\varepsilon_m + \nu(F/A)] / (1.15R_{p0.2}) \quad (7-46)$$

7.8.5.2 若已知 ε_p , 按式 (7-47) 计算 D_p :

$$2E\varepsilon_p / (1.15R_{p0.2}) = (1-2\nu)[\ln(D_p^2 / D_i^2) - 1] + (2-\nu)(D_p^2 / D_i^2)^2 + (1-\nu)(D_p^2 / D_o^2)^2 - \frac{[\ln(D_p^2 / D_i^2) + (D_o^2 - D_p^2 / D_o^2)][1-\nu+(1+\nu)K^2]}{K^2 - 1} \quad (7-47)$$

7.8.5.3 若已知 P_A , 按式 (7-48) 计算 D_p :

$$P_A = 1.15R_{p0.2}[\ln(D_p / D_i) + (D_o^2 - D_p^2) / (2D_o^2)] \quad (7-48)$$

7.8.6 残余应力

7.8.6.1 当 $D_i \leq D \leq D_p$ 时

7.8.6.1.1 无反向屈服时, 按式 (7-49)、式 (7-50) 分别计算环向残余应力 σ_{tRA} 和径向残余应力 σ_{rRA} :

$$\frac{\sigma_{tRA}}{R_{p0.2}} = \frac{D_o^2 + D_p^2}{2D_o^2} + \ln(\frac{D}{D_p}) - \left(\frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} \right) \left[\frac{D_o^2 - D_p^2}{2D_o^2} + \ln(\frac{D_p}{D_i}) \right] (1 + \frac{D_o^2}{D^2}) \quad (7-49)$$

$$\frac{\sigma_{rRA}}{R_{p0.2}} = \frac{D_o^2 - D_p^2}{2D_o^2} + \ln\left(\frac{D}{D_p}\right) - \left(\frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2}\right) \left[\frac{D_o^2 - D_p^2}{2D_o^2} + \ln\left(\frac{D_p}{D_i}\right) \right] \left(1 - \frac{D_o^2}{D^2}\right) \quad (7-50)$$

7.8.6.1.2 若存在反向屈服,按如下方法修正:

- a) 按式(7-49)、式(7-50)迭代计算,确定 $\sigma_{tRA}=\sigma_{tRA}$ 时的直径 D_z ;
- b) 按式(7-49)计算,确定超高压反应管内表面的环向残余应力 σ_{AD} ;
- c) 分别按式(7-51)、式(7-52)计算,取最小值作为修正环向残余应力 σ_{CD} ;其中,若自增强时圆筒存在端部支撑,式(7-52)应取 $\sigma_{CD}/\sigma_{AD}=1.15$:

$$\sigma_{CD} / \sigma_{AD} = 1.6695 - 0.1651K - 1.8871M + 1.9837M^2 - 0.7296M^3 \quad (7-51)$$

$$\sigma_{CD} / \sigma_{AD} = -0.5484 + 1.814K - 0.6502K^2 + 0.0791K^3 \quad (7-52)$$

式中,

$$M = (D_p - D_i) / (D_o - D_i) \quad (7-53)$$

- d) 若 $\sigma_{CD}/R_{p0.2} < -0.7$, 取 $\sigma_{CD}/R_{p0.2} = -0.7$;
- e) 若 $D_i \leq D \leq D_z$, 按式(7-54)式(7-55)计算残余应力:

$$\sigma_{tR} / \sigma_{CD} = \frac{D_z [\ln(D/D_i) + 1] + D_i - 2D}{D_z - D_i} \quad (7-54)$$

$$\sigma_{rR} / \sigma_{CD} = \frac{D_z \ln(D/D_i) + D_i - D}{D_z - D_i} \quad (7-55)$$

- f) 若 $D_z < D < D_p$, 分别按式(7-49)、式(7-50)计算残余应力,但结果应乘以修正系数 F_b 。按如下方法确定:

- (1) 按式(7-55)计算 $D=D_z$ 处的 σ_{tR} ;
- (2) 按式(7-50)计算 $D=D_z$ 处的 σ_{tRA} ;
- (3) $F_b = \sigma_{tR}(D=D_z) / \sigma_{tRA}(D=D_z)$ 。

7.8.6.2 当 $D_p \leq D \leq D_o$ 时

按式(7-56)、式(7-57)计算残余应力:

$$\frac{\sigma_{rRA}}{R_{p0.2}} = F_b \left(1 + \frac{D_o^2}{D^2}\right) \left\{ \frac{D_p^2}{2D_o^2} + \frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} \left[\frac{D_p^2 - D_o^2}{2D_o^2} - \ln\left(\frac{D_p}{D_i}\right) \right] \right\} \quad (7-56)$$

$$\frac{\sigma_{rR}}{R_{p0.2}} = F_b \left(1 - \frac{D_o^2}{D^2}\right) \left\{ \frac{D_p^2}{2D_o^2} + \frac{D_i^2}{D_o^2 - D_i^2} \left[\frac{D_p^2 - D_o^2}{2D_o^2} - \ln\left(\frac{D_p}{D_i}\right) \right] \right\} \quad (7-57)$$

7.9 内管密封设计

7.9.1 符号

a —计算接触宽度,推荐 $D_k < 50\text{mm}$ 时取 1.3mm , $D_k > 50\text{mm}$ 时取 2.0mm ;

F_a —预紧状态下需要的最小金属透镜垫压紧力, N;

F_p —操作状态下需要的最小金属透镜垫压紧力, N;
 D_k —金属透镜垫与反应管端部锥形密封面的接触圆直径, mm;
 q_0 —预紧时最大密封比压, 推荐取值为金属透镜垫材料常温屈服强度的 1.5~2.0 倍;
 q —工作时最小密封比压, 推荐取值为金属透镜垫材料工作温度下的屈服强度;
 P_c —设计压力, MPa;
 θ —金属透镜垫下料尺寸的密封面所在圆的角度, °, 要求 $\theta \geq 115^\circ$;
 α —密封面锥角, °, $\alpha = 70^\circ$;
 ρ —摩擦角, °, $\rho = 8^\circ 30'$ 。

7.9.2 内管密封面的结构尺寸

内管密封面的结构尺寸参考 HG/T 20582 进行设计。

要求锥形密封面的粗糙度 Ra 应不大于 $0.1\mu\text{m}$ 。

7.9.3 金属透镜垫尺寸设计

金属透镜垫内孔直径应与超高压反应管内径一致, 尺寸和密封面的设计应按 HG/T 20582 相关要求设计, 但透镜垫外侧厚度按透镜垫下料尺寸的密封面所在圆的角度 θ 控制, 要求 θ 不低于 115° , 但透镜垫外侧厚度仍需满足 HG/T 20582 中的最低要求, 金属透镜垫的结构形式见图 5。

要求密封球面的粗糙度 Ra 应不大于 $0.1\mu\text{m}$, 透镜垫内孔表面粗糙度 Ra 应不大于 $0.8\mu\text{m}$ 。

7.9.4 金属透镜垫连接结构静强度计算

超高压密封结构的螺栓设计载荷、螺栓面积、螺纹法兰计算、应力校核以及垫圈宽度的校核均参考 HG/T 20582 中的有关要求以及 GB/T 150 中对松式法兰的有关要求进行。

7.9.5 金属透镜垫压紧力

垫片压紧力按下列规定计算:

a) 预紧状态下需要的最小垫片压紧力按式(7-58)计算:

$$F_a = \pi D_k a q_0 \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho} \quad (7-58)$$

b) 操作状态下需要的最小垫片压紧力按式(7-59)计算:

$$F_p = \frac{\pi}{4} D_k^2 p + \pi D_k a q \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho} \quad (7-59)$$

取 F_a 和 F_p 中较大值作为螺栓的总预紧力。推荐将计算的螺栓面积放大 1.5 倍以保证系统的可靠性。

7.9.6 必要时对法兰及螺栓按 7.6.4 疲劳分析法进行疲劳计算。

8 制造、检验和验收

8.1 总则

8.1.1 管式反应器制造、检验和验收应符合本标准和设计文件的规定，同时满足 TSG 21 的规定。

8.1.2 在管式反应器制造、检验过程中，制造单位应根据设计技术文件制定合理的工艺方案和规程。

8.1.3 制造单位对原设计的修改以及对受压元件的材料代用，应取得原设计单位的书面批准，并在竣工图上做详细记录。

8.1.4 对于采用未列入本标准的制造检验的新技术、新工艺和新方法时，应进行技术评审。

8.2 直管加工

8.2.1 直管应采用锻件经机械加工方法制造。

8.2.2 直管端面应有可追溯的标志。

8.2.3 直管的粗糙度应逐支采用粗糙度仪或按 GB/T 6060.2 规定的样块进行对比检验，内表面粗糙度值 Ra 应不大于 $0.4\mu\text{m}$ ，外表面粗糙度值 Ra 应不大于 $1.6\mu\text{m}$ 。

8.2.4 直管与热套环的过盈接触面粗糙度 Ra 应加工至不大于 $0.4\mu\text{m}$ 。

8.2.5 直管的内表面应采用内窥镜逐根进行检查，不应有裂纹、结疤、折叠、划伤、压痕、锈蚀等缺陷存在。外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查，缺陷允许清除，但清除部位应圆滑过渡，且外径和壁厚应在公差范围内。

8.2.6 直管外圆直线度每 1000mm 不大于 1mm，全长直线度不大于 15mm。

8.2.7 直管自增强处理

8.2.7.1 直管自增强处理前应当对材料的性能报告进行核查。

8.2.7.2 自增强处理设备的压力上限应当高于自增强处理压力，并应留有一定余量。

8.2.7.3 自增强处理的检测仪表应当按照规定进行定期检定，并在有效期内。

8.2.7.4 自增强处理人员应当经过培训，熟悉操作工艺规程。

8.2.7.5 制造单位应当制定书面的自增强工艺规程，其中至少包括以下内容：

- a) 自增强处理的时机和方法；
- b) 控制自增强程序的方法；
- c) 在自增强操作期间记录时间、温度和压力的方法；
- d) 测量达到自增强程度以及确定该程度在合格限度以内的方法。

8.2.7.6 自增强处理的操作步骤根据 GB/T 34019 的有关规定。

8.2.7.7 自增强处理实际压力不得超过规定值。自增强时间至少要能保证应变达到要求值所需时间。自增强处理过程中，应当采用合适的方法控制筒体内壁的残余环向应变变量。

8.2.7.8 场地、安全等要求则参照耐压试验有关规定。

8.3 弯管加工

8.3.1 弯管在弯制前需首先按本文件 8.2.1-8.2.6 部分要求加工。弯管制造可以采用冷弯或热弯加工工艺。

8.3.2 弯管制造工艺须进行工艺验证，试制合格后方可进行正式生产。

- a) 试制弯管的母管应是正式生产弯管同类型、同钢级、相同技术条件的钢管。
- b) 试制弯管应经过完整的生产过程，原材料预处理、下料、成型、热处理、无损检测、尺寸检测等。
- c) 试制弯管最终尺寸符合相应技术条件。
- d) 试制弯管成品取本体试样进行理化试验，性能应符合超高压反应器内管材料要求。

8.3.3 冷弯管制造

8.3.3.1 制造内弯管的管件应符合本标准 5.2 和 8.2 条的要求，外表面应有可追溯的标志且不得采用硬印标志。

8.3.3.2 冷弯管弯制

内弯管应采用冷弯成型，应一次弯成型，如弯曲角度不够可以修正但不得回弯。弯制前应进行试弯，弯管完成后应用全尺寸样板检查管子弯曲部分。弯管的形状公差应满足设计要求，且应满足椭圆度 $\leq 2\%$ ，壁厚减薄率 $\leq 5\%$ ，内径流通量 $\geq 95\%$ ，弯曲半径公差 $\pm 5\text{mm}$ 。弯管两直边不平行度 $\leq 1.5\%$ ，弯管成型后两端与施工图尺寸偏差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 。

8.3.3.3 冷弯管热处理

内管弯制后应进行恢复性能热处理，热处理时应做好内表面的保护，不得破坏内表面的粗糙度。必要时内管弯管应在炉内得到充分的支撑，以防止在热处理过程中发生翘曲。

8.3.3.4 内弯管检验

- a) 内弯管在消除热应力之前和之后将进行硬度检测，硬度变化 $\leq 10\text{HBW}$ 。
- b) 内弯管热处理后内表面应采用内窥镜逐根进行检查，不应有裂纹、结疤、折叠、划伤、压痕、锈蚀等缺陷存在。外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查，缺陷允许清除，但清除部位应圆滑过渡，且外径和壁厚应在公差范围内，且深度不得大于 0.15mm 。
- c) 内管弯管热处理后逐件按 NB/T 47013.4 的规定对外表面进行 100%磁粉检测，合格级别为 I 级，并逐件按 NB/T 47013.3 的规定进行 100%的超声检测，不低于 I 级为合格。

d) 内弯管热处理后内表面粗糙度值 Ra 应不大于 $0.4\mu\text{m}$, 外表面粗糙度值 Ra 应不大于 $3.2\mu\text{m}$ 。内弯管的粗糙度应逐支采用粗糙度仪或按 GB/T 6060.2 规定的样块进行对比检验。

8.3.4 热弯管制造

8.3.4.1 制造内弯管的管件应符合本标准 5.2 条的相关要求, 外表面应有可追溯的标志且不得采用硬印标志。

8.3.4.2 热弯管弯制

- a) 热弯制加热温度不得超过材料的正火热处理温度。
- b) 热弯可一次或多次成型。
- c) 热弯过程中应对内壁进行保护。

d) 弯管的形状公差应满足设计要求, 且应满足椭圆度 $\leq 2\%$, 壁厚减薄率 $\leq 5\%$, 内径流通量 $\geq 95\%$, 弯曲半径公差 $\pm 5\text{mm}$ 。弯管两直边不平行度 $\leq 1.5\%$, 弯管成型后两端与施工图尺寸偏差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 。

8.3.4.3 热弯管热处理

- a) 热弯管热处理应符合本标准 5.4 条要求。
- b) 热处理应附带随炉试样。

8.3.4.4 热弯管检验

- a) 热弯管热处理应附带试样, 试样理化性能应符合超高压反应器内管材料要求。
- b) 热弯管热处理后内表面应采用内窥镜逐根进行检查, 不应有裂纹、结疤、折叠、划伤、压痕、锈蚀等缺陷存在。外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查, 缺陷允许清除, 但清除部位应圆滑过渡, 且外径和壁厚应在公差范围内, 同时深度不得大于 0.15mm 。
- c) 热弯管热处理后逐件按 NB/T 47013.4 的规定对外表面进行 100%磁粉检测, 合格级别为 I 级, 并逐件按 NB/T 47013.3 的规定进行 100%的超声检测, 不低于 I 级为合格。

d) 内弯管热处理后内表面粗糙度值 Ra 应不大于 $0.4\mu\text{m}$, 外表面粗糙度值 Ra 应不大于 $3.2\mu\text{m}$ 。内弯管的粗糙度应逐支采用粗糙度仪或按 GB/T 6060.2 规定的样块进行对比检验。

8.3.4.5 内弯管自增强处理

- a) 内管弯管自增强处理同 8.2.7 条直管自增强要求。
- b) 自增强后的成品弯头形状公差应满足设计要求, 椭圆度应 $\leq 2\%$, 壁厚减薄率 $\leq 5\%$, 弯曲半径公差 $\pm 5\text{mm}$ 。如果在自增强后需要对弯曲尺寸进行小的调整, 则应按 8.3.4.2~8.3.4.4 相关要求进行, 并重新消除弯曲应力并重新自增强。

8.3.5 夹套弯管制造要求

8.3.5.1 制造弯管用的直管材料应符合相应标准的要求。

8.3.5.2 夹套管弯制

夹套弯管应整管弯制，管件可采用热加工成形，也可采用冷加工成形。制造工艺应保证管件在成形时其圆弧过渡部分外形圆滑。外套管弯制成型后应用全尺寸样板检查管子弯曲部分，弯管的形状公差应满足设计文件要求。

8.3.5.3 夹套管弯管检验

a) 夹套弯管成型后外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查，缺陷允许清除，但清除部位应圆滑过渡，且外径和壁厚应在公差范围内，且缺陷深度不得大于公称壁厚的 10%且不得大于 0.8mm。

b) 夹套弯管成型后逐件按 NB/T 47013.4 的规定对外表面进行 100%磁粉检测，合格级别为 I 级。

8.3.5.4 夹套管弯管加工

夹套管弯制成型后按均匀切断成不少于 7 部分，管端坡口应采用机械方法加工，焊前应清理干净。

8.3.6 内管端部加工

a) 内管端部机械加工需满足设计文件要求。

b) 螺纹加工宜采用滚制，内弯管端部应于弯制后再行加工。

c) 内管端部加工前应采用相同的材料进行试加工，试加工的螺纹经检测合格后才能正式生产，螺纹加工完成后应按设计文件逐个进行检验。内管端部螺纹尺寸需与内管端部法兰螺纹对应配做。

d) 内管端部螺纹表面粗糙度值 R_a 应不大于 $1.6\mu\text{m}$ 。精加工后的螺纹需按 NB/T 47013.4 的规定进行磁粉检测，不低于 I 级为合格。

e) 内管端部密封面粗糙度值 R_a 应不大于 $0.4\mu\text{m}$ ，同轴度不高于 0.05mm。

8.4 组装和焊接

8.4.1 组装

8.4.1.1 夹套装配应按产品图样和装配工艺规程执行。所有进行装配的元件应检验合格，外购件应具有合格证。

8.4.1.2 内直管和内弯管机械加工完成，并经过压力试验合格后再与夹套管进行组装。

8.4.1.3 首先将夹套管弯制成型后达到图纸要求，然后将成型后的外套管级数分段，切断成不低于 7 段的奇数段，且各段角度均应以轻松穿过直管为宜。将各段以弯管中心部位为基准进行装配焊接。装配时需利用定位环固定定位以减少误差，直到各段全部装焊后再组装外套直管部分。所有外管夹套组件安装完成后才可开展热套工序。

8.4.1.4 热套环的加热温度不得超过 600°C 。

8.4.1.5 夹套装配完成后应进行耐压试验。

8.4.2 焊接

8.4.2.1 焊接作业人员应按相关规定取得相应资格证书，且在有效期内方可承担与资格证书的种类和技术等级相对应的焊接工作。

8.4.2.2 产品正式施焊前应按照 NB/T 47014、NB/T 47015、设计文件和制造厂制定的工艺评定标准进行焊接工艺评定。

8.4.2.3 制造单位应根据设计文件要求及评定合格的焊接工艺制定焊接工艺规程，焊工焊接时应严格遵守焊接工艺规程，并应有施焊记录。

8.5 无损检测

管式反应器的无损检测方法包括射线检测、超声检测及磁粉、渗透和涡流等表面无损检测。无损检测人员、检测时机和技术要求应满足 GB/T 34019 的规定。

8.5.1 内管无损检测

内管母材轴向超声横波检测按 NB/T47013.3 附录 E 执行，合格级别为 I 级，周向超声应按本文件附录 F 规定执行，合格级别为 I 级；磁粉检测按 NB/T 47013.4 规定执行，合格级别为 I 级；涡流检测按 NB/T 47013.6 规定执行，合格级别为 B 级。

8.5.2 夹套无损检测

对夹套所有焊接接头进行无损检测。射线检测按 NB/T47013.2 规定执行，技术等级 AB 级，检测比例不低于 20%，合格级别不低于 III 级。超声波检测按 NB/T47013.3 附录 E 执行，检测比例不低于 20%，合格级别不低于 II 级。磁粉、渗透检测按 NB/T 47013.4 规定执行，合格级别为 I 级。

8.6 耐压试验

超高压管式反应器内管的耐压试验按 TSG 21 和 GB/T 34019 的有关规定进行；夹套的耐压试验按 TSG 21 和 GB/T 150 的有关规定进行。

耐压试验后，应对超高压管式反应器内管内部进行干燥处理。

9 反应器出厂要求

9.1 制造单位文件

9.1.1 产品质量证明文件应符合 TSG 21 及 GB/T 34019 的规定，还应符合采购技术文件的要求。

9.1.2 若项目有数字化交付要求，资料交付还需满足相应的信息数字化交付管理规定。

9.2 涂覆和运输包装

管式反应器的涂覆、运输包装应符合 NB/T 10558 的规定。

9.2.1 反应器外表面涂覆要求如下：

a) 涂覆前，应对设备外表面进行清理，清除所有的铁锈、灰尘、污垢、油脂以及其它附着物。

b) 表面清理合格后，管式反应器外表面涂覆清漆两道，漆膜总厚度不小于 50μm。

9.2.2 所有螺纹表面应采取适当措施进行防护，确保运输过程中螺纹不被损伤；设备经检验合格后，在出厂前将管式反应器充干燥氮气，充氮压力应不小于 0.05MPa，并用端塞将其封闭。

征求意见稿

附 录 A
(资料性附录)
管式反应器螺纹结构

A.1 适用范围

本附录内容适用于超高压管式反应器反应管端部螺纹的设计计算。

A.1.1 螺纹强度

A.1.1.1 符号

A —螺纹载荷作用点到齿根部的距离, mm;

D —布里奇曼密封结构中凸肩头盖外直径, mm;

D_L —螺柱载荷作用直径, mm;

K_{nb} —螺纹齿根应力集中系数;

K_f —由于螺纹载荷分配集中系数;

e —螺纹齿根宽度的一半, mm;

b —螺纹载荷作用点沿螺纹斜面到齿根部的距离, mm;

h_f —螺纹齿高, mm;

n —螺纹圈数;

p_d —设计压力, MPa;

Q —内压引起的载荷, N;

R_f —螺纹齿根部倒圆半径, mm;

α —螺纹牙承载面倾角, ($^{\circ}$);

γ — $\gamma = 90^{\circ} - \alpha$, ($^{\circ}$);

σ_{tb} —螺纹牙根部的应力强度, MPa;

σ_{mt} —螺纹牙根部的弯曲应力, MPa;

τ_t —螺纹牙根部的剪切应力, MPa;

σ_{rt} —螺纹牙根部组合应力, MPa;

$R_{p0.2}$ —材料的屈服强度, MPa。

A. 1. 1. 2 载荷

在由内压引起的轴向载荷 Q_1 与密封垫密封力的轴向载荷 Q_0 总轴向载荷 F 作用在螺纹上, 总轴向载荷计算按式 (A-1), 即:

$$F = \frac{Q_1 + Q_0}{2\pi D_L} \quad (\text{A-1})$$

A. 1. 1. 3 计算

推荐按图 A.1 确定螺纹牙结构尺寸, 并对螺纹牙齿根部进行强度校核。若采用其他螺纹形式, 则需自行确定合理的计算过程。

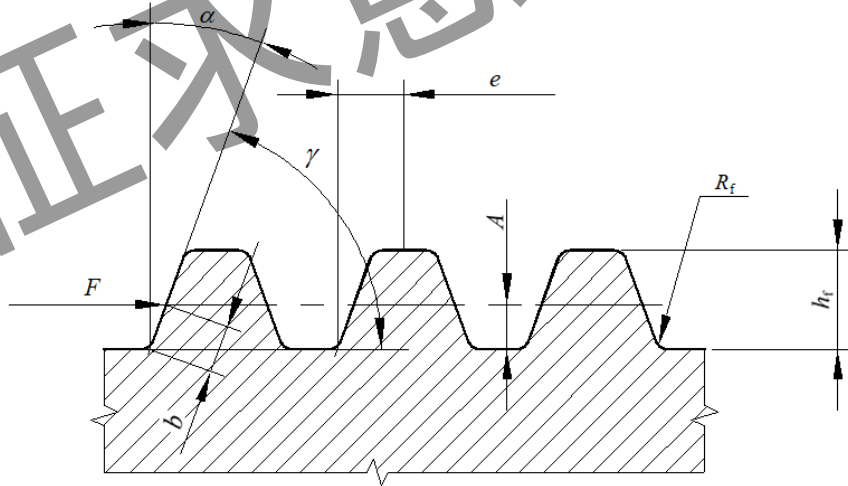


图 A. 1 梯形螺纹

在螺纹根部截面上引起的弯曲应力按式 (A-2):

$$\sigma_{tb} = \frac{F}{n} \left(\frac{1.5A}{e^2} + \frac{\cos \gamma}{2e} + \frac{0.45}{\sqrt{be}} \right) \quad (\text{A-2})$$

K_{nb} —螺纹齿根应力集中系数, 按式 (A-3):

$$K_{nb} = 1 + 0.26 \left(\frac{e}{R_f} \right)^{0.7} \quad (\text{A-3})$$

K_f —螺纹载荷分配集中系数，按式（A-4）：

$$K_f = \max \left\{ \frac{F_i}{F_{\text{sum}}} \right\} \cdot n \quad (\text{A-4})$$

F_i 、 F_{sum} 计算见第 6 章。

螺纹牙根部的弯曲应力强度按式（A-5）：

$$\sigma_{mt} = K_{nb} K_f \sigma_{tb} \quad (\text{A-5})$$

螺纹牙根部的剪切应力强度按式（A-6）：

$$\tau_t = \frac{K_f \frac{F}{n}}{3.14(D_L - 2A) \times 2e} \quad (\text{A-6})$$

螺纹牙根部的当量应力按式（A-7）校核：

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_{mt}^2 + 3\tau_t^2} \leq 2.5R_{p0.2} \quad (\text{A-7})$$

式（A-7）仅考虑螺纹根部载荷，未考虑由于其他载荷引起的在螺纹根部的应力。

当螺纹牙根部的应力强度 σ_n 考虑到与其他载荷引起的弯曲应力组合时，其总值应小于

$4R_{p0.2}$ 。

A. 1. 2 带外螺纹筒体端部

A. 1. 2. 1 符号

D_G —密封面平均直径，mm；

D_i —筒体内直径，mm；

D_n —中性面直径，mm；

D_o —筒体端部螺纹大径，mm；

d_i —筒体端部螺纹小径，mm；

F —内压引起的轴向应力，N；

F_a —密封垫密封力的轴向应力，N；

h_1 —螺纹齿高，mm；

H_1 —力臂（见图 D.11），mm；

H_2 —力臂（见图 D.11），mm；

M — $(F + F_a)$ 引起的弯矩，N·mm；

$M_{\max}$ —环向截面单位长度上最大弯矩，(N·mm)/mm；

M_1 —沿中性面单位长度上的弯矩，(N·mm)/mm；

M_2 — F_a 引起的弯矩，(N·mm)/mm；

M_5 —由 F_a 引起的作用于 $a-a$ 环向截面单位长度上的弯矩，(N·mm)/mm；

$R_{p0.2}$ —材料的屈服限，MPa；

S —厚度（见图 D.11）；

S_o —筒体端部中性面 $Y-Y$ 离直径 d_i 的距离，mm；

β —系数，mm⁻¹；

ϕ —系数；

σ_a — $a-a$ 环向截面拉应力, MPa;

σ_{ma} — $a-a$ 环向截面弯曲应力, MPa;

σ_{oa} — $a-a$ 环向截面当量应力, MPa;

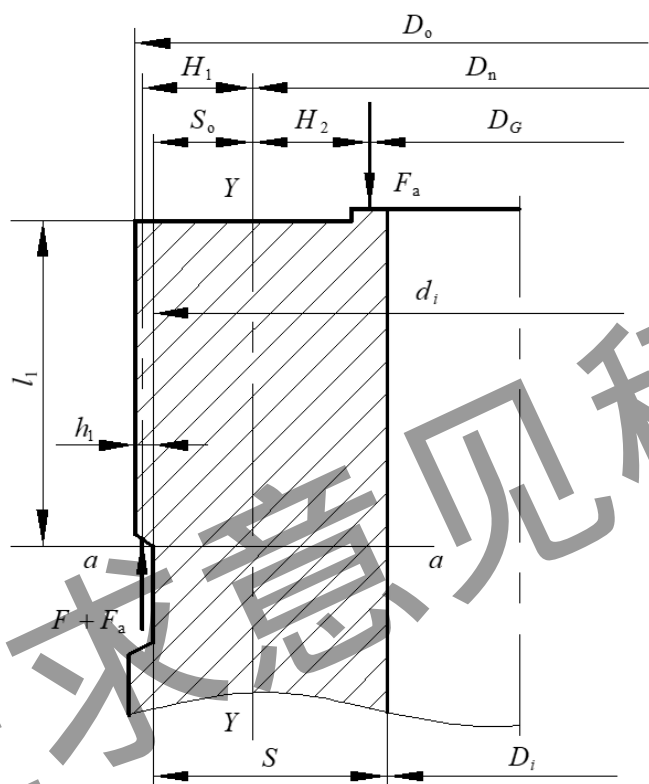


图 A.2 带外螺纹反应管端部

A.1.2.2 结构

确定筒体端部尺寸 (见图 A.2), 并对作用于 $a-a$ 截面的当量应力进行强度校核。

A.1.2.3 拉应力

拉应力按式 (A-8) 计算:

$$\sigma_a = \frac{4(F + F_a)}{3.14(d_i^2 - D_i^2)} \quad (\text{A-8})$$

A.1.2.4 弯曲应力

A.1.2.4.1 $F + F_a$ 引起的最大弯矩

由 $F + F_a$ 引起的弯矩按式 (A-9) 计算:

$$M = (F + F_a) H_3 \quad (\text{A-9})$$

力臂 H_1 按式 (A-10) 计算:

$$H_1 = S_o + 0.5h_1 \quad (\text{A-10})$$

筒体端部中性面 $Y-Y$ 距直径 D_o 的距离 S_o 按式 (A-11) 选取:

$$\begin{cases} \text{当 } \frac{D}{D_o} \leq 1.45 \text{ 时, } S_o = \frac{D - D_o}{4} \\ \text{当 } \frac{D}{D_o} \geq 1.45 \text{ 时, } S_o = \frac{D - D_o}{6} \cdot \frac{2D + D_o}{D + D_o} \end{cases} \quad (\text{A-11})$$

沿中性面单位长度上的弯矩按式 (A-12) 计算:

$$M_1 = \frac{M}{3.14D_o} \quad (\text{A-12})$$

筒体端部中性面 $Y-Y$ 直径 D_n 按式 (A-13) 计算:

$$D_n = D_o + 2S_o \quad (\text{A-13})$$

沿轴向 l_1 单位长度上的弯矩 m 按式 (A-14) 计算:

$$m = \frac{M_1}{l_1} \quad (\text{A-14})$$

式中 l_1 见图 A.3;

计算系数 β 按式 (A-15) 计算:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1-\mu^2)}{D_n^2 S^2}} \quad (\text{A-15})$$

根据 βl_1 值查图 A.4 得到 $\left(\frac{\beta}{m} M_{\max}\right)$ 值；

由 $F + F_a$ 引起的作用于截面 $a-a$ 环向截面单位长度上的最大弯矩 $M_{\max}$ 按式 (A-16) 计算：

$$M_{\max} = \left(\frac{\beta}{m} M_{\max}\right) \frac{m}{\beta} \quad (\text{A-16})$$

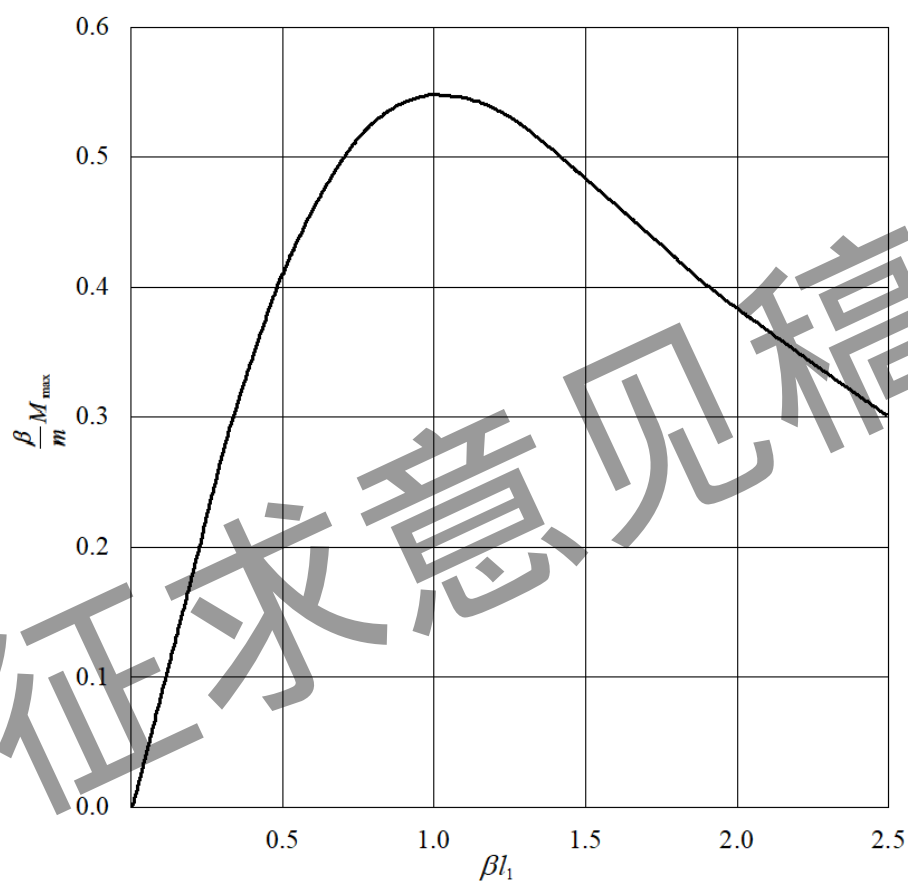


图 A. 3

A. 1. 2. 4. 2 F_a 引起的最大弯矩

F_a 引起的弯矩按式 (A-17) 计算：

$$M_2 = F_a H_2 \quad (\text{A-17})$$

式中：力臂 H_2 按式 (A-18) 计算：

$$H_2 = \frac{D_n - D_G}{2} \tag{A-18}$$

沿中性面单位长度上的弯矩按式（A-19）计算：

$$M_1 = \frac{M_2}{3.14D_n} \tag{A-19}$$

按式（A-15）计算系数 β 值。

根据 βl_1 值查图 A.4 得系数 ϕ 值。

由 F_a 引起的作用于环向截面单位长度上的弯矩 M_5 按式（A-20）计算：

$$M_5 = M_1 \phi \tag{A-20}$$

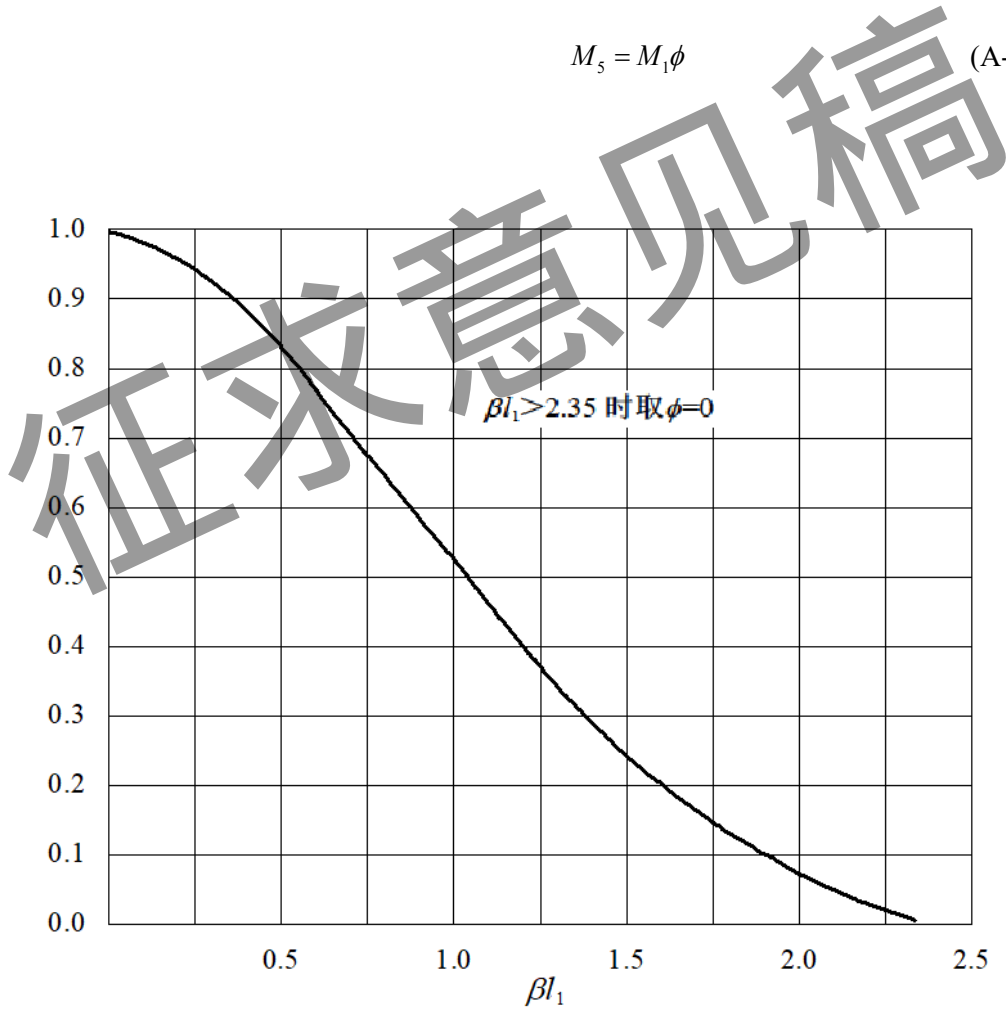


图 A. 4 ϕ 与 βl_1 曲线

A. 1. 2. 4. 3 弯曲应力

弯曲应力 σ_{ma} 按式 (A-21) 计算:

$$\sigma_{\text{ma}} = \frac{6(M_{\text{max}} + M_5)}{S^2} \quad (\text{A-21})$$

A. 1. 2. 4. 4 当量应力

$a-a$ 环向截面的当量应力按式 (A-22) 校核:

$$\sigma_{\text{oa}} = \sigma_{\text{ma}} + \sigma_{\text{a}} \leq R_{\text{p}0.2} / 1.5 \quad (\text{A-22})$$

A. 1. 2. 4. 5 螺纹强度

螺纹强度按 A.1.1 校核。

A. 1. 3 法兰与螺栓的静强度设计按 GB150 活套法兰的强度计算方法。

征求意见稿

附录 B
(规范性附录)
应力应变曲线

B.1 范围

本附录规定了弹塑性分析所使用的真实应力-应变曲线。

B.2 符号

A_1 —应力应变曲线近弹性区的拟合常数；

A_2 —应力应变曲线塑性区的拟合常数；

ε_p —拟合常数， $\varepsilon_p = 2 \times 10^{-5}$ ；

$\varepsilon_{p0.2}$ —工程塑性应变， $\varepsilon_{p0.2} = 0.2\%$ ；

ε_t —真实应变；

$R_{p0.2}^t$ —材料在设计温度下的屈服强度，MPa；

R_m^t —材料在设计温度下的抗拉强度，MPa；

ε_1 —在较小应变范围的真实塑性应变；

ε_2 —在较大应变范围的真实塑性应变；

E —材料在设计温度下的弹性模量，MPa；

γ_1 —在较小应变范围的真实应变；

γ_2 —在较大应变范围的真实应变；

H —拟合常数；

K —拟合常数；

m_1 —拟合指数；

m_2 —拟合指数， $m_2 = 0.6(1 - R)$ ；

R —材料屈服强度与抗拉强度之比；

σ_t —真实应力；

B.3 应力应变曲线

弹塑性分析中所使用的应力应变曲线采用式（B-1）的表达式：

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} + \gamma_1 + \gamma_2 \quad (\text{B-1})$$

其中，

$$\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2} [1 - \tanh(H)] \quad (\text{B-2})$$

$$\gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{2} [1 + \tanh(H)] \quad (\text{B-3})$$

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\sigma_t}{A_1} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (\text{B-4})$$

$$A_1 = \frac{R_{p0.2}^t (1 + \varepsilon_{p0.2})}{\left[\ln(1 + \varepsilon_{p0.2}) \right]^{m_1}} \quad (\text{B-5})$$

$$m_1 = \frac{\ln R + \varepsilon_p - \varepsilon_{p0.2}}{\ln \left[\frac{\ln(1 + \varepsilon_p)}{\ln(1 + \varepsilon_{p0.2})} \right]} \quad (\text{B-6})$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\sigma_t}{A_2} \right)^{\frac{1}{m_2}} \quad (\text{B-7})$$

$$A_2 = \frac{R_m^t \exp(m_2)}{m_2^{m_2}} \quad (\text{B-8})$$

$$H = \frac{2\left\{\sigma_t - \left[R_{p0.2}^t + K(R_m^t - R_{p0.2}^t)\right]\right\}}{K(R_m^t - R_{p0.2}^t)} \quad (\text{B-9})$$

$$K = 1.5R^{1.5} - 0.5R^{2.5} - R^{3.5} \quad (\text{B-10})$$

征求意见稿

附录 C
(规范性附录)

本标准所列内管用锻件的设计疲劳曲线、弹性模量和平均线膨胀系数

C.1 范围

本标准所列内管用锻件的设计疲劳曲线、弹性模量和平均线膨胀系数。

C.2 内管用锻件设计疲劳曲线

图 C.1 给出了本标准所列钢锻件的设计疲劳曲线,表 C.1 给出了用于精确内插值的设计疲劳曲线的 S_a 值。

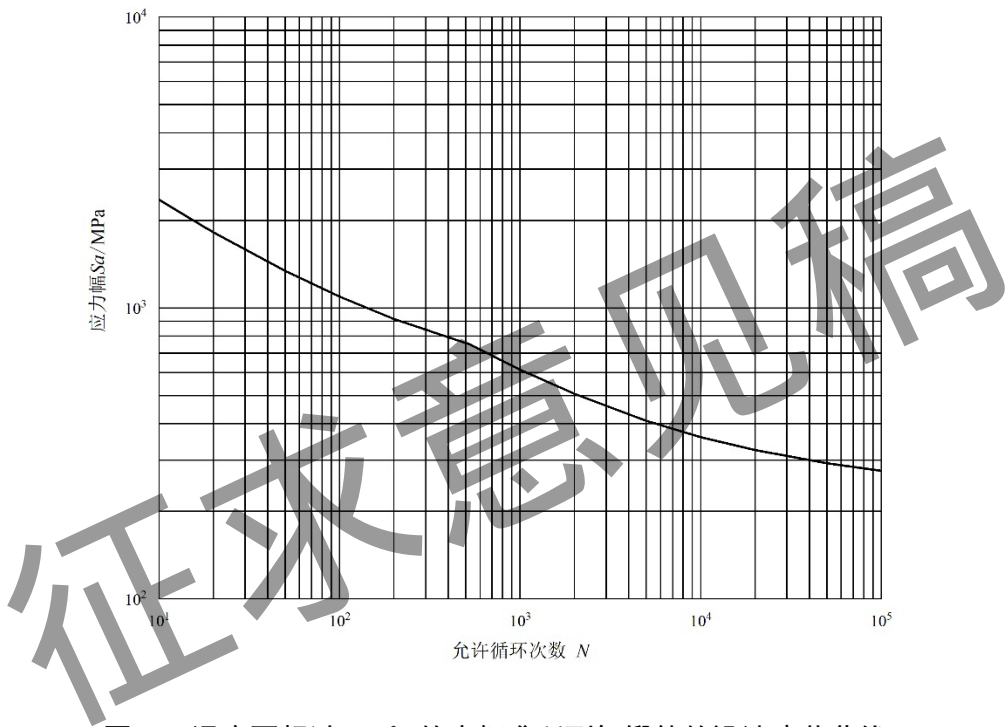


图 C.1 温度不超过 400℃的本标准所列钢锻件的设计疲劳曲线

表 C.1 设计疲劳曲线的取值

$N^{a,b}$	1E1	2E1	5E1	1E2	2E2	5E2	5.2E2	1E3	2E3	5E3	1E4	2E4	5E4	1E5
S_a /MPa	2352	1820	1340	1094	917	758	753	614	507	410	360	325	293	276

所列的循环次数应按如下方法读出：iEj=i×10j，如 5E2=5×10²或 500。

两列表间的数值可按双对数图如下公示进行插值：对 $S_i > S > S_j$

$$\frac{N}{N_i} = \left(\frac{N_j}{N_i} \right)^{\frac{\log(S_i/S)}{\log(S_i/S_j)}}$$

式中：S， S_i ， S_j 为应力幅值 S_a ；N， N_i ， N_j 为设计疲劳数据得到的相应循环数

C.3 弹性模量

表 C.2 给出了本标准所列锻件的弹性模量。

表 C.2 钢材弹性模量

钢种	在下列温度（/°C）下的弹性模量/10 ³ MPa							
	25	100	150	200	250	300	350	400
本标准所列锻件	206	203	200	198	194	190	186	180

C.4 线膨胀系数

表 C.3 给出了本标准所列锻件的平均线膨胀系数。

表 C.3 钢材平均线膨胀系数

钢种	在下列温度（/°C）与 20°C 之间的平均线膨胀系数/[10 ⁻⁶ mm/(mm·°C)]							
	0	100	150	200	250	300	350	400
本标准所列锻件	10.76	11.53	11.88	12.25	12.56	12.90	13.24	13.58

附 录 D

(资料性附录)

应力强度因子和疲劳裂纹扩展速率计算

D.1 总则

本附录提供了超高压管式反应器中典型裂纹的应力强度因子 K_I 计算方法。

D.2 符号

a —裂纹深度, mm;

a/l —裂纹的形状比值, $0 \leq a/l \leq 1$;

A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 —拟合系数;

A'_0 、 A'_1 、 A'_2 、 A'_3 —拟合系数;

A_p —如果压力作用在裂纹表面上, 取超高压管式反应器的内压力 p , MPa; 对其他裂纹, 则 $A_p = 0$;

F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 —几何放大系数;

G_0 、 G_1 、 G_2 、 G_3 …… G_i —由表 F.1 和表 F.2 查得的表面修正系数;

K —超高压反应管外径与内径之比;

K_I —应力强度因子;

l —裂纹长度, mm;

q_y —塑性修正系数;

Q —裂纹形状系数;

t —超高压反应管壁厚, mm;

x —从裂纹自由表面起所量得的距离, mm;

D.3 典型裂纹

超高压反应管典型裂纹的位置见图 D.1:

a) 内壁轴-径向裂纹

裂纹位于超高压反应管内壁轴-径向平面, 为深长比 $a/l=1/3$ 的半椭圆形, 定义为 A 型, 见图 D.1。

b) 内壁径-环向裂纹

裂纹位于螺纹第一牙根部的径-环向平面, 为环形, 定义为 C 型, 见图 D.1。

c) 外壁轴-径向裂纹

裂纹位于超高压反应管外表面的轴-径向平面, 为半椭圆形, 定义为 E 型, 见图 D.1。

d) 外壁环-径向裂纹

裂纹位于超高压反应管外表面的环-径向平面, 为半椭圆形或环状, 定义为 F 型, 见图 D.1。

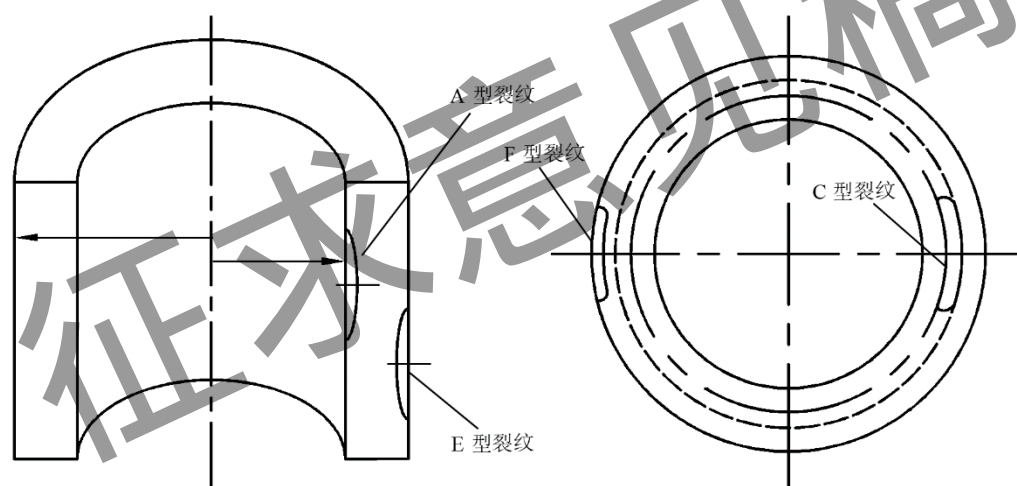


图 D.1 典型的裂纹类型

D.4 应力强度因子

D.4.1 A 型裂纹

D.4.1.1 A 型内壁径-轴向裂纹最深处和靠近自由表面处的应力强度因子, 采用 D.4.1.2 方法 1 或 D.4.1.3 方法 2 进行计算。

D.4.1.2 方法 1:

a) 按式 (D-1) 拟合垂直于裂纹所在平面的应力分布:

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad (\text{D-1})$$

b) 按式 (D-2) 计算裂纹形状系数 Q

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} - q_y \quad (D-2)$$

式中, q_y 按式 (D-3) 计算, 用于计算裂纹扩展速率时 q_y 可取为 0:

$$q_y = \left\{ \left[(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3 \right] / R_{p0.2} \right\}^2 / 6 \quad (D-3)$$

c) 按式 (D-4) 计算应力强度因子:

$$K_I = \left[(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3 \right] \sqrt{\pi a / Q} \quad (D-4)$$

式中, G_i 按表 D.1 或表 D.2 取值, 在表所给出值之间的可取插值。

D.4.1.3 方法 2:

a) 按式 (D-5) 拟合垂直于裂纹所在平面的应力分布:

$$\sigma = A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3 \quad (D-5)$$

b) 按式 (D-6) 对每一个 a/t 计算 A_i , 即可代入式 (D.4) 计算应力强度因子 K_I :

$$\begin{aligned} A_0 &= A'_0 \\ A_1 &= A'_1(a/t) \\ A_2 &= A'_2(a/t)^2 \\ A_3 &= A'_3(a/t)^3 \end{aligned} \quad (D-6)$$

c) 径比 K 在 1.2 和 3.0 之间容器圆筒, 可由式 (D-7) 计算应力强度因子所需的 A'_i :

$$\begin{aligned} A'_0 / P &= (K^2 + 1) / (K^2 - 1) \\ A'_1 / P &= 1.051 - 2.318K + 0.3036K^2 - 0.004417K^3 \\ A'_2 / P &= -1.7678 + 0.9497K + 0.9399K^2 - 0.2056K^3 \\ A'_3 / P &= -0.2798 + 1.3831K - 1.2603K^2 + 0.2138K^3 \end{aligned} \quad (D-7)$$

表 D.1 裂纹最深点处的系数 G_i

系数	a/t	裂纹深长比 a/l					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
G_0	0	1.1208	1.0969	1.0856	1.0727	1.0564	1.0366
	0.05	1.1461	1.1	1.0879	1.074	1.0575	1.0373
	0.1	1.1945	1.1152	1.0947	1.0779	1.0609	1.0396
	0.15	1.267	1.1402	1.1058	1.0842	1.0664	1.0432
	0.2	1.3654	1.1744	1.121	1.0928	1.0739	1.0482
	0.25	1.4929	1.217	1.1399	1.1035	1.0832	1.0543
	0.3	1.6539	1.267	1.1621	1.116	1.096	1.0614
	0.4	2.1068	1.384	1.2135	1.1448	1.119	1.0772
	0.5	2.8254	1.5128	1.2693	1.1757	1.1457	1.0931
	0.6	4.042	1.6372	1.3216	1.2039	1.1699	1.1058
	0.7	6.3743	1.7373	1.361	1.2237	1.1868	1.1112
	0.8	11.991	1.7899	1.3761	1.2285	1.1902	1.1045
G_1	0	0.7622	0.6635	0.6826	0.7019	0.7214	0.7411
	0.05	0.7624	0.6651	0.6833	0.7022	0.7216	0.7413
	0.1	0.7732	0.67	0.6855	0.7031	0.7221	0.7418
	0.15	0.7945	0.678	0.689	0.7046	0.723	0.7426
	0.2	0.8267	0.6891	0.6939	0.7067	0.7243	0.742
	0.25	0.8706	0.7029	0.7	0.7094	0.726	0.7451
	0.3	0.9276	0.7193	0.7073	0.7126	0.7282	0.7468
	0.4	1.0907	0.7584	0.7249	0.7209	0.7338	0.7511
	0.5	1.3501	0.8029	0.7454	0.7314	0.7417	0.7566
	0.6	1.7863	0.8488	0.7671	0.7441	0.752	0.7631
	0.7	2.6125	0.8908	0.7882	0.7588	0.7653	0.7707
	0.8	4.5727	0.9288	0.8063	0.7753	0.7822	0.7792
G_2	0	0.6009	0.5078	0.531	0.5556	0.5815	0.6084
	0.05	0.5969	0.5086	0.5313	0.5557	0.5815	0.6084
	0.1	0.5996	0.5109	0.5323	0.556	0.5815	0.6085
	0.15	0.6088	0.5148	0.534	0.5564	0.5815	0.6087

	0.2	0.6247	0.5202	0.5364	0.5571	0.5815	0.6089
	0.25	0.6475	0.5269	0.5394	0.558	0.5817	0.6093
	0.3	0.6775	0.535	0.543	0.5592	0.582	0.6099
	0.4	0.7651	0.5545	0.552	0.5627	0.5835	0.6115
	0.5	0.9048	0.5776	0.5632	0.568	0.5869	0.6144
	0.6	1.1382	0.6027	0.5762	0.576	0.5931	0.6188
	0.7	1.5757	0.6281	0.5907	0.5874	0.6037	0.6255
	0.8	2.5997	0.6513	0.6063	0.6031	0.62	0.6351
G_3	0	0.506	0.4246	0.448	0.4735	0.5006	0.529
	0.05	0.5012	0.425	0.4482	0.4736	0.5006	0.529
	0.1	0.5012	0.4264	0.4488	0.4736	0.5004	0.529
	0.15	0.5059	0.4286	0.4498	0.4737	0.5001	0.5289
	0.2	0.5152	0.4317	0.4511	0.4738	0.4998	0.5289
	0.25	0.5292	0.4357	0.4528	0.4741	0.4994	0.5289
	0.3	0.5483	0.4404	0.455	0.4746	0.4992	0.5291
	0.4	0.6045	0.4522	0.4605	0.4763	0.4993	0.5298
	0.5	0.6943	0.4665	0.4678	0.4795	0.501	0.5316
	0.6	0.8435	0.4829	0.4769	0.4853	0.5054	0.5349
	0.7	1.1207	0.5007	0.488	0.4945	0.5141	0.5407
	0.8	1.7614	0.519	0.5013	0.5085	0.5286	0.5487

表 D.2 裂纹自由表面处的系数 G_i

系数	a/l	裂纹深长比 a/l					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
G_0	0		0.545	0.7492	0.9024	1.0297	1.1406
	0.05		0.5514	0.7549	0.907	1.033	1.1427
	0.1		0.561	0.7636	0.9144	1.0391	1.1473
	0.15		0.5738	0.7756	0.9249	1.0479	1.1545
	0.2		0.59	0.7908	0.9385	1.0596	1.1641
	0.25		0.6099	0.8095	0.9551	1.074	1.1763
	0.3		0.6338	0.8318	0.975	1.0913	1.1909
	0.4		0.6949	0.8881	1.025	1.1347	1.2278
	0.5		0.7772	0.9619	1.0896	1.1902	1.2746
	0.6		0.8859	1.056	1.1701	1.2585	1.3315
	0.7		1.0283	1.174	1.2686	1.3401	1.3984
	0.8		1.2144	1.3208	1.3871	1.4361	1.4753
G_1	0		0.0725	0.1038	0.128	0.1484	0.1665
	0.05		0.0744	0.1075	0.1331	0.1548	0.174
	0.1		0.0771	0.1119	0.1387	0.1615	0.1816
	0.15		0.0807	0.1169	0.1449	0.1685	0.1893
	0.2		0.0852	0.1227	0.1515	0.1757	0.1971
	0.25		0.0907	0.1293	0.1587	0.1833	0.2049
	0.3		0.0973	0.1367	0.1664	0.1912	0.2128
	0.4		0.1141	0.1544	0.1839	0.2081	0.2289
	0.5		0.1373	0.1765	0.2042	0.2265	0.2453
	0.6		0.1689	0.2041	0.228	0.2466	0.262
	0.7		0.2121	0.2388	0.2558	0.2687	0.2791
	0.8		0.2714	0.2824	0.2887	0.2931	0.2965
G_2	0		0.0254	0.0344	0.0423	0.0495	0.0563
	0.05		0.0264	0.0367	0.0456	0.0538	0.0615
	0.1		0.0276	0.0392	0.0491	0.0582	0.0666
	0.15		0.0293	0.0419	0.0527	0.0625	0.0716

	0.2		0.0313	0.045	0.0565	0.0669	0.0764
	0.25		0.0338	0.0484	0.0605	0.0713	0.0812
	0.3		0.0368	0.0521	0.0646	0.0757	0.0858
	0.4		0.0445	0.0607	0.0735	0.0846	0.0946
	0.5		0.0552	0.0712	0.0834	0.0938	0.103
	0.6		0.07	0.0842	0.0946	0.1033	0.1109
	0.7		0.0907	0.1005	0.1075	0.1132	0.1183
	0.8		0.1197	0.1212	0.1225	0.1238	0.1252
G_3	0		0.0125	0.0158	0.0192	0.0226	0.0261
	0.05		0.0131	0.0172	0.0214	0.0256	0.0297
	0.1		0.0138	0.0188	0.0237	0.0285	0.0332
	0.15		0.0147	0.0206	0.0261	0.0314	0.0365
	0.2		0.0159	0.0225	0.0285	0.0343	0.0398
	0.25		0.0173	0.0245	0.031	0.0371	0.0429
	0.3		0.019	0.0267	0.0336	0.0399	0.0459
	0.4		0.0234	0.0318	0.039	0.0454	0.0515
	0.5		0.0295	0.0379	0.0448	0.0509	0.0565
	0.6		0.038	0.0455	0.0513	0.0564	0.0611
	0.7		0.0501	0.0549	0.0587	0.0621	0.0652
	0.8		0.0673	0.067	0.0672	0.0679	0.0687

D.4.3 C型裂纹

a) 按如下步骤计算 C 型裂纹的应力强度因子：

按弹性计算垂直作用于 C 型裂纹平面的正应力分布；

b) 按式 (D-8) 对该正应力进行拟合，获得相关系数 A_i ；

$$\sigma_1(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 \quad (D-8)$$

式中， x 为裂纹自由表面的径向距离。

c) 按式 (D-9) 计算裂纹深度 a 时对应的应力强度因子 K_I ：

$$K_I = F\sqrt{\pi a} / \sqrt{[1 - (F / R_{p0.2})^2 / 6]} \quad (D-9)$$

式中，

$$F = A_0F_1 + \frac{2aA_1F_2}{\pi} + \frac{a^2A_2F_3}{2} + \frac{4a^3A_3F_4}{3\pi} \quad (D-10)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= 1.1259 + 0.2344(a/t) + 2.2018(a/t)^2 - 0.2083(a/t)^3 \\ F_2 &= 1.0732 + 0.2677(a/t) + 0.6661(a/t)^2 + 0.6354(a/t)^3 \\ F_3 &= 1.0528 + 0.1065(a/t) + 0.4429(a/t)^2 + 0.6042(a/t)^3 \\ F_4 &= 1.0387 - 0.0939(a/t) + 0.6018(a/t)^2 + 0.3750(a/t)^3 \end{aligned} \quad (D-11)$$

注 1： $\sqrt{[1 - (F / s_y)^2 / 6]}$ 是塑性区修正，在用于疲劳裂纹扩展计算时，可取为 1.0。

注 2：若按式 (D-8) 依然无法拟合正应力分布，则允许把应力分布沿 x 划分几个区间，对每个区间的应力分布分别按式 (D-8) 拟合，再按式 (D-9) 计算本区间内的 K_I 值（参考图 D.2）。

注 3：区间不连续修正值：

按式 (D-12) 计算两个相邻区间不连续导致的 $K_{I\text{corr}}$ ，见图 D.3。

$$K_{I\text{corr}} = F\sqrt{\pi a} / \sqrt{[1 - (F / R_{p0.2})^2 / 6]} + \sum \Delta K_I \quad (D-12)$$

式中：

ΔK_I —在区间连续处获得不同 K_I 的差值；

$\sum \Delta K_I$ —对前各个区间所有的 ΔK 值的总和，第一个区间（在自由表面处） ΔK 值取 0。

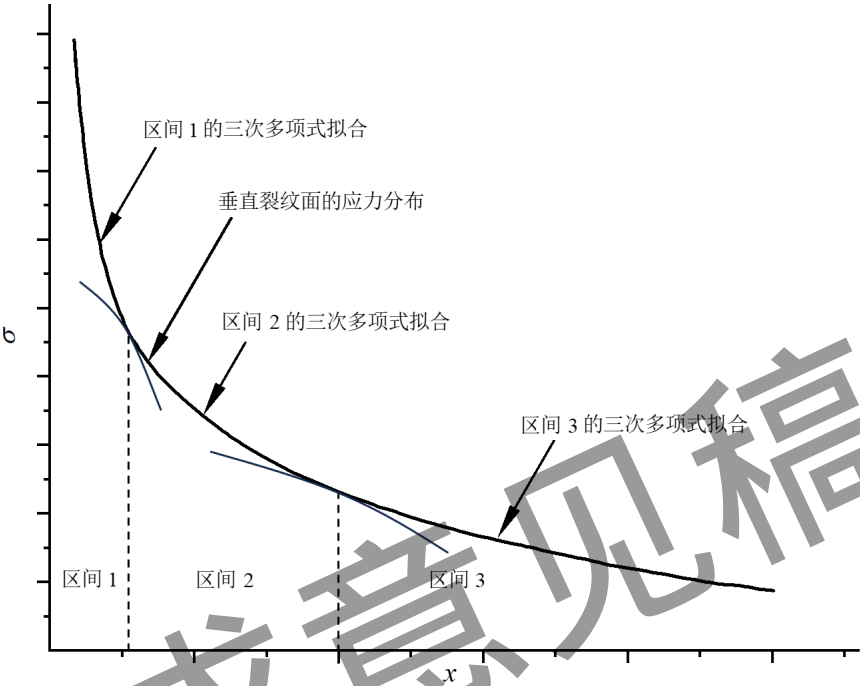


图 D.2 分区间拟合应力分布的示意图

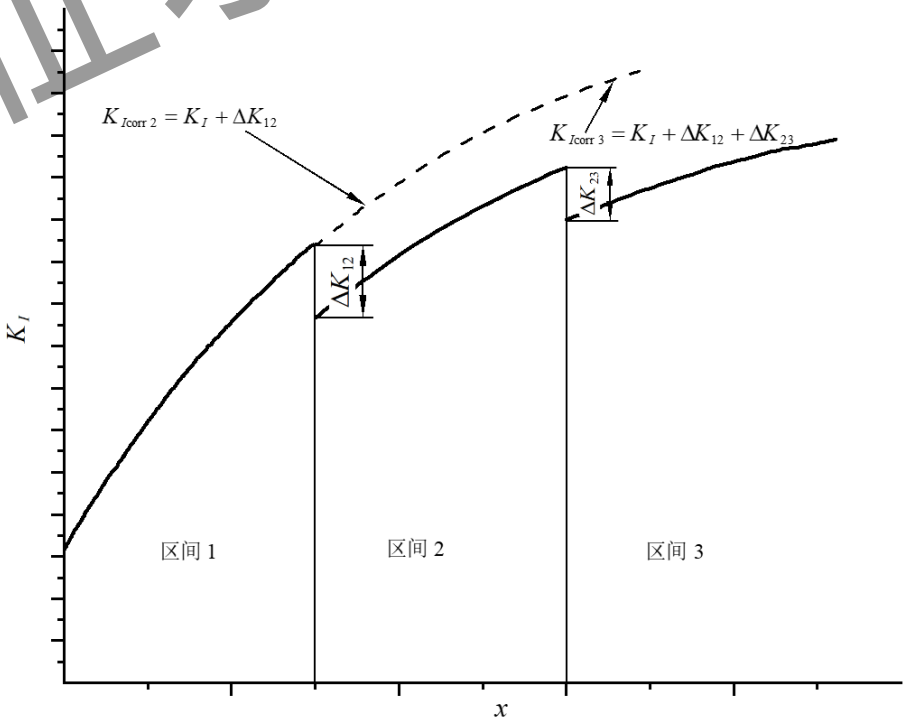


图 D.3 区间不连续修正的示意图

D.4.4 E型和F型裂纹

- a) 可采用 D.4.1 中所给出的方法计算 E 型和 F 型裂纹的应力强度因子；
- b) 对 E 型裂纹，垂直于裂纹表面的应力分布可采用厚壁圆筒的应力计算式（即环向切应力）；对 F 型裂纹，垂直于裂纹表面的应力分布可采用有限元分析的方法予以确定。

征求意见稿

附录 E (资料性附录)

外管夹套热套环的相关设计计算

E.1 范围

本附录规定了外管夹套热套环的过盈量计算和密封计算。

E.2 符号

C_a —计算系数, $C_a = \frac{1+q_a^2}{1-q_a^2} + \mu_a$;

C_i —计算系数, $C_i = \frac{1+q_i^2}{1-q_i^2} - \mu_i$;

d_a —热套环外直径, mm;

d_f —过盈配合结合面直径, mm;

d_i —内管内直径, mm;

$e_{a\max}$ —外管夹套不产生塑性变形所允许的最大直径变化量, mm;

$e_{i\max}$ —高压内管不产生塑性变形所允许的最大直径变化量, mm;

E_a —夹套材料弹性模量, MPa;

E_i —内管件材料弹性模量, MPa;

$e_{a\min}$ —外管夹套传递负荷所需的最小直径变化量, mm;

$e_{i\min}$ —高压内管传递负荷所需的最小直径变化量, mm;

F_t —轴向摩擦力, N;

l_f —夹套与(内管)接触长度, mm;

p —夹套设计压力, MPa;

$p_{f,\max}$ —结合面允许最大接触压力, MPa;

$p_{f,\min}$ —结合面允许最小接触压力, MPa;

$p_{fa\max}$ —外管夹套不产生塑性变形所允许的最大结合压力, MPa;

$p_{fi\max}$ —高压内管不产生塑性变形所允许的最大结合压力, MPa;

q_a —包容件形状系数, $q_a = \frac{d_f}{d_a}$;

q_i —被包容件形状系数, $q_i = \frac{d_i}{d_f}$;

S —内外套管接触面面积, mm^2 ;

S_a —包容件内表面不平度, mm ;

S_i —被包容件内表面不平度, mm ;

α_a —包容件材料线膨胀系数, $10^{-6}\text{mm/mm}\cdot^\circ\text{C}$;

α_i —被包容件材料线膨胀系数, $10^{-6}\text{mm/mm}\cdot^\circ\text{C}$;

$\delta_{\max}$ —最大过盈量, mm ;

$\delta'_{\max}$ —实际所需最大过盈量, mm ;

$\delta_{\min}$ —最小过盈量, mm ;

Δt_i —内反应管工作温度与装配温度之差, $^\circ\text{C}$;

Δt_a —外套管工作温度与装配温度之差, $^\circ\text{C}$;

μ —材料泊松比;

μ_a —包容件材料泊松比;

μ_i —被包容件材料泊松比;

σ_{sa} —包容件材料屈服极限, MPa ;

σ_{si} —被包容件材料屈服极限, MPa ;

E.3 热套环过盈量计算

E.3.1 热套环最小过盈量计算

热套承受的轴向力为:

$$F_t = pS \quad (\text{E-1})$$

则最小结合压力为:

$$p_{f\min} = \frac{F_t}{\pi \cdot d_f \cdot l_f \cdot \mu} + 2np \quad (\text{E-2})$$

其中, n 为垫片系数取 $n=6$ 。

高压内管传递负荷所需的最小直径变化量为:

$$e_{i \min} = p_{f \min} \frac{d_f}{E_i} \cdot C_i \quad (\text{E-3})$$

外管夹套传递负荷所需的最小直径变化量为:

$$e_{a \min} = p_{f \min} \frac{d_f}{E_a} \cdot C_a \quad (\text{E-4})$$

考虑压平量的过盈量为:

$$\delta_y = 2(S_a + S_i) \quad (\text{E-5})$$

最小过盈量为:

$$\delta_{\min} = \delta_y + e_{i \min} + e_{a \min} \quad (\text{E-6})$$

E.3.2 热套环最小过盈量计算

外管夹套不产生塑性变形所允许的最大结合压力为:

$$p_{fa \max} = a \sigma_s \quad (\text{E-7})$$

其中系数 a 计算方法如下:

$$a = \frac{1 - q_a^2}{\sqrt{3 + q_a^4}} \quad (\text{E-8})$$

高压内管不产生塑性变形所允许的最大结合压力为:

$$p_{fi \max} = c \sigma_{si} \quad (\text{E-9})$$

其中系数 c 计算方法如下:

$$c = \frac{1 - q_i^2}{2} \quad (\text{E-10})$$

其中 q_i 为形状系数, 取 0.454545。

联结件不产生塑性变形的最大结合压力取 $p_{fi \max}$ 和 $p_{fa \max}$ 的较小值。

外管夹套不产生塑性变形所允许的最大直径变化量为:

$$e_{a \max} = p_{f \max} \frac{d_f}{E_a} \cdot C_a \quad (\text{E-11})$$

高压内管不产生塑性变形所允许的最大直径变化量为：

$$e_{i \max} = p_{f \max} \frac{d_f}{E_i} \cdot C_i \quad (\text{E-12})$$

热套环不产生塑性变形所允许的最大有效过盈量为：

$$\delta_{\max} = e_{i \max} + e_{a \max} \quad (\text{E-13})$$

需要注意的是，本反应管工作时温度较高，联结件会有较大的热膨胀量。为了保证联结件工作时不发生塑性变形，需要额外计算工作时的热膨胀量。

$$\delta_t = d_f (a_i \Delta t_i - a_a \Delta t_a) \quad (\text{E-14})$$

则实际所需最大过盈量为：

$$\delta'_{\max} = \delta_{\max} - \delta_t \quad (\text{E-15})$$

E.4 热套结构密封校核

热套结构配套的最小结合压力：

$$p_{f \min} = \frac{\delta_{\min} - 2(S_a + S_i)}{d_f \left(\frac{C_a}{E_a} + \frac{C_i}{E_i} \right)} \quad (\text{E-16})$$

根据 GB/T 150 中的相关要求，在标准操作状态下密封比压力应大于 $2mp$ ，其中 m 为垫片系数，根据标准垫片系数 m 取 6，即：

$$p_{f \min} \geq 2mp \quad (\text{E-17})$$

附录 F
(规范性附录)
超声检测方法

F.1 范围

超高压反应管外径内径之比 K 一般大于 1.8。本附录适用于超高压反应管周向超声检测斜入射方法。超高压反应管直探头纵波检测、轴向超声横波检测方法按 NB/T 47013.3 执行。

F.2 检测方法

超高压反应管宜采用纵波斜射法或变形横波检测方法。变形横波检测方法利用工件中产生的折射纵波传播至外壁通过波型转换产生变形横波，以一定角度（通常为 45° 左右）对内壁缺陷入射，反射声波沿原路返回，从而达到检测缺陷的目的。检测原理如图 F.1 所示。

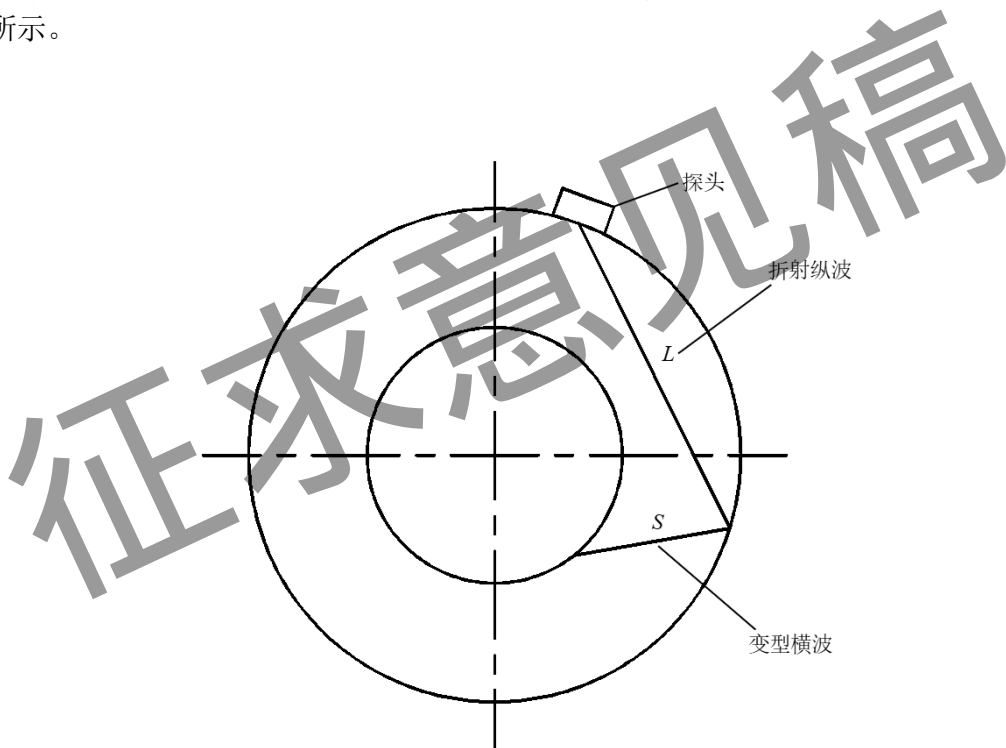


图 F.1 变形横波检测方法

为重点检测内表面径向裂纹，在检测声程小于探头近场区长度时，推荐采用接触法线聚焦技术。

F.3 探头

检测使用与超高压反应管外表面吻合良好的斜探头或聚焦斜探头，应按照修磨后的实际曲率测定探头的实际折射角度和前沿长度。探头的公称频率主要为 2.5MHz，探头晶片面积为 $140\text{mm}^2 \sim 400\text{mm}^2$ ，单个探头压电晶片长度或直径应小于或等于 25mm。

应根据产品规格选取探头类型和所需的折射角度，折射角选取首先要保证检测用波型的声束中心线扫查到超高压反应管内壁，并应考虑到超声波对内表面缺陷的检测灵敏度。推荐使用纵波折射角为 $\arcsin(d/D)$ 的斜探头，或变型横波折射角为 $\arcsin(\sqrt{2}d/2D)$ 的斜探头。

F.4 对比试块

F.4.1 对比试块应选取与被检工件规格相同，材质、热处理工艺和表面状况相同或相似的筒形件制备。对比试块不得有大于或等于 $\phi 2\text{mm}$ 当量的自然缺陷。试块宽度为 40mm 。

F.4.2 对厚度不小于 50mm 的筒形件对比试块，在内外表面，分别沿轴向加工平行的角度为 60° 的 V 型槽作为标准槽，沟槽长度为 25mm 。内表面沟槽深度为筒形件壁厚 T 的 1% ，最小为 0.2mm ，最大不超过 2mm ；外表面沟槽深度为筒形件壁厚 T 的 2% ，最小为 0.4mm ，最大不超过 4mm 。也可采用其他等效的反射体（如宽度不大于 0.5mm 的线切割槽等）。

F.4.3 对厚度大于或等于 50mm 的筒形件对比试块，应按 F.4.2 要求在对比试块内外表面加工标准槽。另外，应在试块上离外表面一定深度位置（ $20\%T$ 、 $40\%T$ 、 $60\%T$ 、 $80\%T$ ）加工 $\phi 2 \times 40$ 长横孔，对比试块的尺寸、人工缺陷的位置应符合图 G.2 的规定。

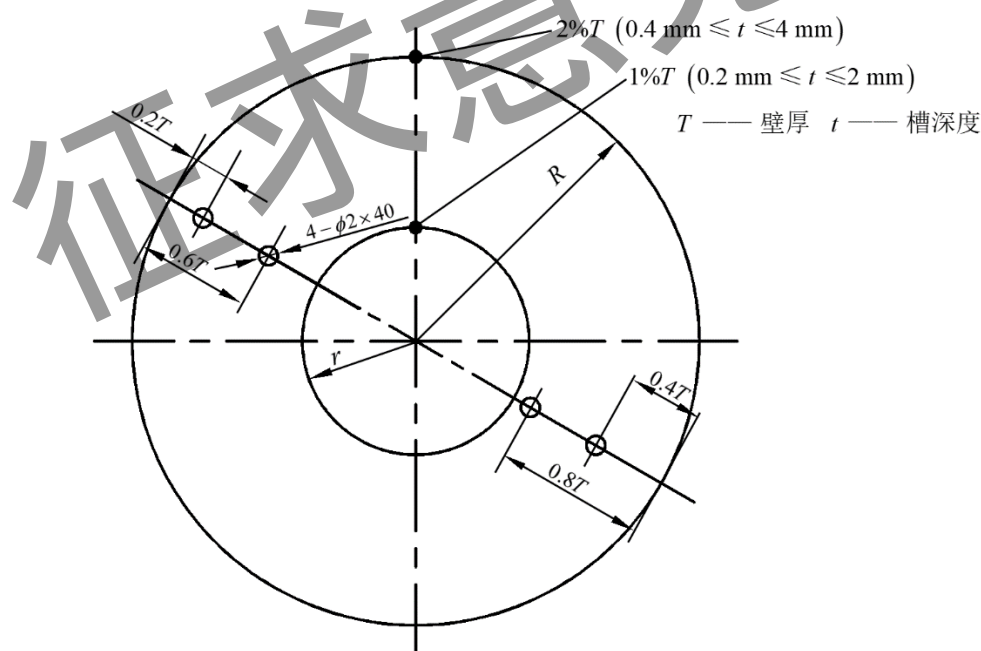


图 F.2 筒形件对比试块（试块宽度为 40mm ）

F.5 检测灵敏度校准

F.5.1 对厚度小于 50mm 的筒形件，从外圆面将探头对准内圆面的标准槽，调整增益，使检测用波型最大反射高度为满刻度的 80% ，将该值标在面板上，以其为基准灵敏度；

不改变仪器的调整状态，再移动探头测定外圆面的标准槽，并将最大的反射高度也标在面板上，将上述两点用直线连接并延长，绘出距离-波幅曲线（判废线）作为缺陷验收的判废线，并使之包括全部检测范围。检测时，将判废线提高 6dB 作为检测基准灵敏度。也可采用数字超声波检测仪的 DAC 功能按上述要求绘出距离-波幅曲线。

F.5.2 对厚度大于或等于 50mm 的筒形件，应使用对比试块的长横孔及内外表面的标准槽调整检测灵敏度。使用相应的检测用波型，先从外圆面将探头用直射法分别对准试块上离外表面深度位置为 20% T 、40% T 、60% T 、80% T 的 $\phi 2 \times 40$ 长横孔和内表面标准

槽，再从外圆面将探头用一次反射法对准试块上各 $\phi 2 \times 40$ 长横孔和外表面标准槽，记录每个反射体的波幅值，将上述各点连接，绘出距离-波幅曲线（判废线）作为缺陷验收的判废线。检测时，将判废线提高 6dB 作为检测基准灵敏度。也可采用数字超声波检测仪的 DAC 功能按上述要求绘出距离-波幅曲线。

F.6 扫查方法

F.6.1 应从圆周面顺时针和逆时针两个方向进行扫查，见图 F.3 所示，扫查覆盖率应为探头宽度的 15% 以上。



图 F.3 检测扫查方向

F.6.2 应根据产品对比试块的校准结果确定缺陷的深度位置。如采用数字式超声检测仪带有曲面定位功能，将曲率半径和实测的折射角度输入仪器中，再屏幕上会直接显示缺陷声程、深度、跨距值。应从圆周面顺时针和逆时针两个方向进行扫查分别确定缺陷的弧长值，采用对称定位的方法，以确定缺陷的具体位置。

F.7 缺陷记录

记录波幅幅度大于距离-波幅曲线（判废线）高度 50%的缺陷反射波和缺陷位置。缺陷指示长度按 6dB 法和端点 6dB 法测定。当相邻两个缺陷间距小于或等于 25mm 时，按单个缺陷处理（中间间距不计）。

F.8 质量评级

F.8.1 缺陷波幅大于距离-波幅曲线（判废线）的质量等级定为Ⅲ级。

F.8.2 波幅在距离-波幅曲线（判废线）50%~100%的缺陷按表 F.2 分级。

表 F.2 缺陷质量等级

质量等级	单个缺陷指示长度
I	$\leq 1/3$ 壁厚, 且 ≤ 100 mm
II	$\leq 2/3$ 壁厚, 且 ≤ 150 mm
III	大于II级者