

# 目 次

1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义、符号.....	2
4 通用要求.....	4
5 材料.....	6
6 设计.....	9
7 制造、检验和验收.....	15
附录 A（规范性）多层整体包扎式储氢容器附加要求.....	26
附录 B（规范性）旋压无缝储氢容器端部及内螺纹设计要求.....	31

# 加氢站用储氢压力容器

## 1 范围

本文件规定了加氢站用储氢压力容器（以下简称储氢容器）材料、设计、制造、检验和验收等方面的要求。

本标准适用于同时满足以下条件的储氢容器：

- (a) 设计温度不低于-40℃且不高于85℃；
- (b) 设计压力大于41 MPa但低于100MPa的旋压无缝储氢容器；设计压力大于17MPa但低于100MPa的奥氏体不锈钢衬里储氢容器。

## 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 150	压力容器
GB/T 150.1	压力容器 第1部分：通用要求
GB/T 150.4	压力容器 第4部分：制造检验和验收
GB/T 196	普通螺纹 基本尺寸
GB/T 197	普通螺纹 公差
GB/T 222	钢的成品化学成分允许偏差
GB/T 223(适用部分)	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 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 1954	铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法
GB/T 1979	结构钢低倍组织缺陷评级图
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(常规法)
GB/T 5777	无缝和焊接（埋弧焊除外）钢管纵向和/或横向缺欠的全圆周自动超声检测
GB/T 6394	金属平均晶粒度测定法
GB/T 7307	55° 非密封管螺纹
GB/T 8335	气瓶专用螺纹
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 12241	安全阀 一般要求
GB/T 12243	弹簧直接载荷式安全阀
GB/T 13298	金属显微组织检验方法

GB/T 13299	钢的游离渗碳体、珠光体和魏氏组织的评定方法
GB/T 18248	气瓶用无缝钢管
GB/T 713.7	承压设备用钢板和钢带 第7部分：不锈钢和耐热钢
GB/T 25198	压力容器封头
GB/T 26466	固定式高压储氢用钢带错绕式储氢容器
GB/T 28884	大容积气瓶用无缝钢管
GB/T 33145	大容积钢质无缝气瓶
GB/T 33362	金属材料 硬度值的换算
GB/T 34019	超高压容器
GB/T 34542	氢气储存输送系统
GB/T 34542.1	氢气储存输送系统 第1部分：通用要求
GB/T 34542.2	氢气储存输送系统 第2部分：金属材料与氢环境相容性试验方法
GB/T 34542.3	氢气储存输送系统 第3部分：金属材料氢脆敏感度试验方法
GB/T 37244	质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气
GB/T XXXX.2	压力容器分析设计 第2部分：材料
GB/T XXXX.4	压力容器分析设计 第4部分：应力分类法
GB/T XXXX.5	压力容器分析设计 第5部分：弹塑性分析法
GB/T XXXX.6	压力容器分析设计 第6部分：制造、检验和验收
NB/T 10558	压力容器涂敷与运输包装
NB/T 47002	压力容器用复合板
NB/T 47008	承压设备用碳素钢和合金钢锻件
NB/T 47010	承压设备用不锈钢和耐热钢锻件
NB/T 47013.2	承压设备无损检测 第2部分：射线检测
NB/T 47013.3	承压设备无损检测 第3部分：超声检测
NB/T 47013.4	承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测
NB/T 47013.5	承压设备无损检测 第5部分：渗透检测
NB/T 47013.7	承压设备无损检测 第7部分：目视检测
NB/T 47013.8	承压设备无损检测 第8部分：泄漏检测
NB/T 47013.10	承压设备无损检测 第10部分：衍射时差法超声检测
NB/T 47013.15	承压设备无损检测 第15部分：相控阵超声检测
NB/T 47014	承压设备焊接工艺评定
YB/T 4149-2018	连铸圆管坯

### 3 术语和定义、符号

#### 3.1 术语和定义

GB/T 150、GB/T 26466、GB/T 34019、GB/T 34542界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

##### 3.1.1

**临氢金属材料** **metal material in direct contact with gaseous hydrogen**

储氢容器正常工作时，与氢气接触的金属材料。

##### 3.1.2

**临氢受压元件** **pressure component in direct contact with gaseous hydrogen**

筒体、封头、螺塞等承受压力载荷作用且与氢气接触的元件。

### 3.1.3

#### **旋压无缝储氢容器 spinning seamless hydrogen storage vessel**

由无缝钢管经热旋压后形成近似半球形的端部，且两端开口的单层储氢高压容器。

### 3.1.4

#### **奥氏体不锈钢衬里储氢容器 hydrogen storage vessel lined with austenitic stainless steel**

临氢衬里金属材料为奥氏体不锈钢的储氢容器，包括钢带错绕式储氢容器和多层整体包扎式储氢容器。

### 3.1.5

#### **钢带错绕式储氢容器 multilayered weld-shrunk hydrogen storage vessel**

在较薄的内筒外面倾角错绕多层扁平钢带(层数为偶数)，钢带与筒体环向成一定倾角，相邻层钢带绕向相反，且仅将每层钢带两端与半球形封头和加强箍相焊接所构成的储氢高压容器。

### 3.1.6

#### **多层整体包扎式储氢容器 multilayered weld-shrunk hydrogen storage vessel**

由基层金属制内筒和多层金属制薄板外筒套合包扎组成的储氢高压容器。

## 3.2 符号

下列符号适用于本文件。

$A$  ——断后伸长率，%；

$a$  ——裂纹深度，mm；

$a_0$  ——疲劳裂纹扩展分析法评定时假设的初始裂纹深度，mm；

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

$C$  ——碳元素质量分数；

$Cr$  ——铬元素质量分数；

$c$  ——氢环境下的疲劳裂纹扩展系数，通过氢环境下的疲劳裂纹扩展试验测得；

$da/dN$  ——疲劳裂纹扩展速率，mm/次；

$K_I$  ——裂纹尖端应力强度因子， $MPa\ m^{1/2}$ ；

$K_{IH}$  ——氢气中的平面应变断裂韧度， $MPa\ m^{1/2}$ ；

$K_{I\max}$  ——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， $MPa\ m^{1/2}$ ；

$K_{I\min}$  ——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， $MPa\ m^{1/2}$ ；

$K_{I\text{res}}$  ——由自增强所引起的残余应力得到的应力强度因子， $MPa\ m^{1/2}$ ；

$KV_2$  ——冲击吸收能量平均值，J；

$LE$  ——侧膨胀值，mm；

$l$  ——裂纹长度，mm；

$Mn$  ——锰元素质量分数；

$Mo$  ——钼元素质量分数；

$m$  —— 氢环境下的疲劳裂纹扩展指数，通过氢环境下的疲劳裂纹扩展试验测得；

$N$  —— 允许循环次数；

$N_c$  —— 裂纹扩展至允许裂纹尺寸所需的循环次数；

$N_i$  —— 镍元素质量分数；

$N_{ieq}$  —— 镍当量，%；

$N_p$  —— 裂纹扩展至临界裂纹深度所需的循环次数；

$n$  —— 预计循环次数；

$R_{eL}$  ( $R_{p0.2}$ ) —— 试验温度下材料的屈服强度（0.2%非比例延伸强度），MPa；

$R_k$  —— 应力强度因子之比；

$R_m$  —— 试验温度下材料的抗拉强度，MPa；

$S_{eq}$  —— 最大等效应力幅，MPa；

$S_{eq2}$  —— 采用疲劳试验法时加载在试样上的等效应力幅，MPa；

$Si$  —— 硅元素质量分数；

$t$  —— 壁厚，mm；

$\Delta a$  —— 裂纹扩展计算时假定的裂纹扩展深度，mm；

$\Delta K_I$  —— 应力强度因子范围，MPa  $m^{1/2}$ ；

$\Delta K_{th}$  —— 氢环境下的疲劳裂纹扩展门槛值，MPa  $m^{1/2}$ ；

$\Delta N$  —— 裂纹扩展 $\Delta a$ 所需的循环次数；

## 4 通用要求

### 4.1 通则

- 4.1.1 本文件适用范围内储氢容器的材料、设计、制造、检验和验收除应符合本标准规定外，还应遵守国家颁布的有关法律、法规和安全技术规范。
- 4.1.2 储氢容器的设计和制造单位应建立健全的安全质量体系并有效运行。
- 4.1.3 旋压无缝储氢容器应采用铬钼钢制造，且单台容器长度应不大于 12500mm，水容积应不小于 150L 且不大于 3000L。
- 4.1.4 旋压无缝储氢容器应按批组织生产，每批数量应不多于 50 台。同批容器应选用炉号、设计、制造工艺均相同的材料，且应按相同的设计条件设计、相同的热旋压收口工艺和热处理工艺制造、相同的无损检测工艺检测，并应连续生产。
- 4.1.5 钢带错绕式储氢容器除应符合本文件规定外，还应符合 GB/T 26466 的相关规定。
- 4.1.6 多层整体包扎式储氢容器的附加建造要求应符合附录 A 的规定。
- 4.1.7 储氢容器的氢气介质应符合 GB/T 37244 的相关规定。

### 4.2 资质与职责

#### 4.2.1 资质

TSG 21《固定式压力容器安全技术监察规程》管辖范围内储氢容器设计制造单位应具有相应的特种设备许可资质证书。

## 4.2.2 职责

### 4.2.2.1 用户或设计委托方的职责

4.2.2.1.1 储氢容器的用户或设计委托方应当以正式书面形式向设计单位提出储氢容器设计条件，其中至少包含以下内容：

- a) 储氢容器设计所依据的主要标准和规范；
- b) 操作参数（包括工作压力、工作温度范围、接管载荷等）；
- c) 储氢容器使用地及其自然条件（包括月平均最低气温、抗震设防烈度等）；
- d) 预期使用年限、预计（设计）压力波动范围及对应的波动次数；
- e) 几何参数；
- f) 氢气泄漏检测方法和合格指标；
- g) 设计需要的其它必要条件。

4.2.2.1.2 用户改变储氢容器使用条件，应取得原制造单位同意改变的书面证明文件，并对改变作详细记载。

### 4.2.2.2 设计单位的职责

4.2.2.2.1 设计单位应对设计文件的正确性和完整性负责。

4.2.2.2.2 设计单位应根据风险评估报告确定设计的输入条件及制造要求，向用户出具的风险评估报告应符合 GB/T 150 的要求。

4.2.2.2.3 储氢容器的设计文件至少应包括风险评估报告、应力分析报告、设计图样、制造技术要求、安装与使用维修说明。

4.2.2.2.4 设计单位应在储氢容器设计使用年限内保存全部设计文件。

### 4.2.2.3 制造单位的职责

4.2.2.3.1 制造单位应按照设计文件的要求进行制造，如需要对原设计进行修改，应当取得原设计单位同意修改的书面文件，并且对改动部位做出详细记载。

4.2.2.3.2 制造单位应根据用户和设计文件的要求，在储氢容器制造前制定完善的质量计划，其内容至少应包括容器或元件的制造工艺控制点、检验项目和合格指标。

4.2.2.3.3 制造单位的检查部门在储氢容器制造过程中和完工后，应按本标准、图样规定和质量计划的规定对容器进行各项检查和试验，出具相应报告，并对报告的正确性和完整性负责。

4.2.2.3.4 制造单位在检查合格后，出具产品质量合格证明。

4.2.2.3.5 制造单位对其制造的储氢容器产品应在储氢容器设计使用年限或设计循环使用次数内至少保存下列技术文件备查：

- a) 质量计划；
- b) 制造工艺图或制造工艺卡；
- c) 产品质量证明文件；

- d) 储氢容器的热处理工艺文件及热处理记录（时间-温度关系曲线）；
- e) 标准中允许制造单位选择的检验、试验项目记录；
- f) 储氢容器制造过程中及完工后的检查、检验、试验记录；
- g) 储氢容器的原设计图和竣工图。

4.2.2.3.6 制造单位对特殊制造工艺应进行工艺验证并保留工艺验证记录，如热处理、自增强处理、厚壁圆筒无损检测等。

#### 4.2.2.4 检验机构的职责

对TSG 21《固定式压力容器安全技术监察规程》管辖范围内的储氢容器实施监督检查的机构及其监检员，在监检工作中应当按照该规程的规定履行相应的工作职责；对出具的检验报告的完整性和正确性负责。

## 5 材料

### 5.1 总则

5.1.1 储氢容器临氢金属材料应满足本文件的要求，其它金属材料应符合 GB/T XXXX.2 的规定。

5.1.2 储氢容器临氢金属材料在氢气中的力学性能试验应满足 GB/T 34542.2 等标准的要求，氢脆敏感度试验应满足 GB/T 34542.3 的要求。

5.1.3 储氢容器临氢受压元件的选材应综合考虑材料（化学成分、力学性能、微观组织等）、使用条件（压力、温度、氢气品质等）、应力（最大值、波动范围等）和制造工艺（旋压、热处理、焊接等）对氢脆的影响。

5.1.4 储氢容器临氢受压元件用材料应与高压氢气具有良好的氢相容性，铬钼钢宜选用 4130X、30CrMo 或 30CrMoE，奥氏体不锈钢宜选用 S31603。

5.1.5 储氢容器临氢筒体、封头（含平盖）用无缝钢管、锻件和钢板等材料，其材料或容器制造单位应提供材料在最终热处理状态下的常温力学性能试验数据，至少应包括：3 个批次的材料在空气和压力不低于容器设计压力的氢气中的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、最大力总延伸率、断面收缩率等拉伸性能数据，以及材料在氢气中的平面应变断裂韧度  $K_{IH}$ 、疲劳裂纹扩展速率等，必要时还应提供氢气中的疲劳设计曲线。

5.1.6 储氢容器用材料应附有材料质量证明书原件，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，容器制造单位应按质量证明书对材料进行验收。

### 5.2 临氢铬钼钢

#### 5.2.1 无缝钢管

##### 5.2.1.1 冶炼方法

铬钼钢无缝钢管应采用电炉或氧气转炉冶炼，加炉外精炼并且经过真空处理。

##### 5.2.1.2 化学成分

5.2.1.2.1 铬钼钢无缝钢管应符合 GB/T 18248 或 GB/T 28884 的要求，材料牌号和化学成分（熔炼分析）应符合表 1 的规定。

表1 铬钼钢无缝钢管的牌号和化学成分

牌号	执行标准	化学成分, %									
		C	Mn	Si	S	P	P+S	Cr	Mo	Ni	Cu
30CrMo	GB/T 18248	0.26~	0.40~	0.17~	≤0.008	≤0.015	≤0.020	0.80~	0.15~	≤0.30	≤0.20
		0.33	0.70	0.37				1.10	0.25		
30CrMoE	GB/T 28884	0.26~	0.40~	0.17~	≤0.008	≤0.015	≤0.020	0.80~	0.15~	≤0.30	≤0.20
		0.34	0.70	0.37				1.10	0.25		
4130X	GB/T 18248	0.25~	0.40~	0.15~	≤0.008	≤0.015	≤0.020	0.80~	0.15~	≤0.30	≤0.20
		0.35	0.90	0.35				1.10	0.25		

5.2.1.2.2 无缝钢管材料的化学成分成品允许偏差: P: +0.003%, S: +0.002%, 其它元素应符合 GB/T 222 的规定。V、Nb、Ti、B 和 Zr 等非有意加入的合金元素的总质量分数不应超过 0.15%。

### 5.2.1.3 钢坯

5.2.1.3.1 宜采用连铸连轧钢坯或锻制钢坯。

5.2.1.3.2 表面不允许存在目视可见的结疤、气孔、针孔、重皮及深度超过 0.5mm 的裂纹。

5.2.1.3.3 低倍组织: 横截面酸浸试片上不得有目视可见的白点、分层、气泡、夹杂和折叠等缺陷存在, 并按 YB/T 4149-2018 附录 A 评级图进行评定, 中心疏松、缩孔、中心裂纹、中间裂纹、皮下裂纹、皮下气泡合格级别均不大于 1 级。

5.2.1.3.4 有害元素的质量分数: As≤0.010%, Sn≤0.010%, Sb≤0.010%, Pb≤0.010%, Bi≤0.010%, 且其总和:  $\Sigma(\text{As}+\text{Sn}+\text{Sb}+\text{Pb}+\text{Bi})\leq 0.025\%$ 。

5.2.1.3.5 熔炼分析气体的质量分数: H≤ $2\times 10^{-6}$ 、O≤ $25\times 10^{-6}$ 、N≤ $70\times 10^{-6}$ 。

5.2.1.3.6 非金属夹杂物按 GB/T 10561 的 A 法进行评级, 应满足表 2 要求。

表2 非金属夹杂物合格级别

非金属夹杂物类型		A	B	C	D	DS	A+B+C+D+DS
合格级别/ 级	细系	≤1.5	≤1.0	≤0.5	≤1.5	≤1.5	≤4.5
	粗系	≤1.0	≤1.0	≤0.5	≤1.5		

### 5.2.1.4 尺寸公差

5.2.1.4.1 无缝钢管应逐只进行厚度检测, 任一点厚度不得小于规定的最小厚度。

5.2.1.4.2 厚度正偏差应不超过最小厚度的 20%, 负偏差为零。

5.2.1.4.3 外径偏差不应超过公称外径的 ±1%。

5.2.1.4.4 直线度不应超过总长的 0.15%。

5.2.1.4.5 椭圆度 (即在同一截面上测量最大外径与最小外径之差) 不应超过该截面平均外径的 1%。

### 5.2.1.5 缺陷检测

5.2.1.5.1 内、外表面不得有裂纹、折叠、轧折、离层和结疤等缺陷，若有缺陷应完全清除，清除处应光滑过渡，清除后的实际壁厚不得小于规定壁厚的最小值。

5.2.1.5.2 应逐只按 GB/T 5777 或 NB/T 47013.3 进行纵、横向的超声检测，超声检测对比试样的刻槽深度不得大于钢管设计壁厚的 5%，且不大于 1.0mm，合格级别不应低于 GB/T 5777 规定的 U2 级或 NB/T 47013.3 规定的 I 级，且应满足设计文件要求。

#### 5.2.1.6 交货状态

应以热轧（扩）状态、冷拔状态或冷拔后热处理状态交货。

#### 5.2.1.7 力学性能

5.2.1.7.1 铬钼钢无缝钢管经热处理后在空气中的力学性能应符合表 3 的规定。

5.2.1.7.2 铬钼钢无缝钢管经热处理后在氢气和空气中的抗拉强度之比、最大力总延伸率之比均不小于 0.9。

5.2.1.7.3 铬钼钢无缝钢管经热处理后在氢气中的平面应变断裂韧度  $K_{IH}$  应不小于  $50 \text{ MPa m}^{1/2}$ 。

表3 铬钼钢无缝钢管在空气中的力学性能限定

抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	屈服强度 $R_{eL}(R_{p0.2})/\text{MPa}$	屈强比	断后伸长率 $A/\%$	冲击吸收能 (-40℃) $KV_2/\text{J}$	侧向膨胀量 $LE/\text{mm}$
800~880	≥520	≤0.86	≥20	≥47	≥0.53
注：表中冲击吸收能为-40℃下3个试样冲击吸收能量平均值，允许1个试样冲击吸收能量小于47J，但不小于38J。					

#### 5.2.2 锻件

5.2.2.1.1 铬钼钢锻件应符合 NB/T 47008 的规定，同时应满足本标准的规定。

5.2.2.1.2 铬钼钢锻件级别应不低于III级。

5.2.2.1.3 铬钼钢锻件的化学成分应满足表 1 的规定。

5.2.2.1.4 铬钼钢锻件应经调质热处理，热处理后的力学性能应符合表 3 的规定。

#### 5.3 临氢奥氏体不锈钢

##### 5.3.1 钢板

###### 5.3.1.1 基本要求

奥氏体不锈钢钢板应符合GB/T 713.7的规定，同时应满足本文件的规定。

###### 5.3.1.2 化学成分

奥氏体不锈钢钢板的镍含量应大于12%，镍当量应不小于28.5%。镍当量按式（1）计算：

$$Ni_{eq} = 12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + Ni + 0.65Cr + 0.98Mo \dots\dots\dots (1)$$

###### 5.3.1.3 力学性能

奥氏体不锈钢钢板在空气中的断面收缩率应不小于70%，在氢气和空气中的断面收缩率之比应不小于0.9。

### 5.3.2 锻件

5.3.2.1.1 奥氏体不锈钢锻件应符合 NB/T 47010 的规定，同时应满足本标准规定。

5.3.2.1.2 奥氏体不锈钢锻件级别应不低于III级。

5.3.2.1.3 奥氏体不锈钢锻件的化学成分应满足 5.3.1.2 的规定。

5.3.2.1.4 奥氏体不锈钢锻件的力学性能应满足 5.3.1.3 的规定。

## 6 设计

### 6.1 一般要求

#### 6.1.1 通则

6.1.1.1 储氢容器设计单位（设计人员）应严格依据用户或设计委托方所提供的储氢容器设计条件制定风险评估报告并进行设计。

6.1.1.2 本章规定了储氢容器的塑性垮塌、局部过度应变、脆性断裂、疲劳、泄漏失效评定方法。

6.1.1.3 储氢容器设计时应采用材料在压力不低于储氢容器设计压力的氢气环境下的力学性能数据。

6.1.1.4 旋压无缝储氢容器端部及内螺纹设计应满足附录 B 的规定。

#### 6.1.2 载荷

储氢容器设计时，应考虑如下载荷：

a) 内压；

b) 交变载荷；

需要时，还应考虑下列载荷：

a) 容器自重，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；

b) 风载荷、地震载荷、雪载荷；

c) 支撑和固定装置的反作用力；

d) 运输或吊装时的作用力。

#### 6.1.3 失效模式

##### 6.1.3.1 文件涵盖的失效模式

本文件针对储氢容器的下列失效模式提出了相关的设计要求：

a) 塑性垮塌失效—按照6.2的规定对塑性垮塌失效进行评定；

b) 局部过度应变失效—按照6.3的规定对局部过度应变失效进行评定；

c) 脆性断裂失效—按照6.4的规定对脆性断裂失效进行评定；

d) 疲劳失效—按照6.5的规定对疲劳失效进行评定；

e) 泄漏失效—按照6.6的规定对泄漏失效进行评定；

##### 6.1.3.2 工程上应考虑的失效模式

除本标准所涵盖的失效模式外，设计人员在设计时还应依据储氢容器在运行过程中可能出现的其它失效模式进行校核。

#### 6.1.4 许用应力

6.1.4.1 确定钢材许用应力的抗拉强度安全系数应不小于 2.4、屈服强度安全系数应不小于 1.5。

6.1.4.2 确定铬钼钢许用应力的抗拉强度和屈服强度应分别为表 3 中材料热处理后抗拉强度和屈服强度保证值的下限值。

6.1.4.3 当采用疲劳设计曲线法进行疲劳失效评定时，交变应力幅和循环次数的安全系数分别取 2 和 15。

#### 6.1.5 设计总图

储氢容器的设计总图除应满足 TSG 21—2016 的 3.1.4.4 条的要求外，还需注明：

- a) 材料要求，包括化学成分、力学性能、晶粒度、非金属夹杂物、无损检测方法和合格指标等，奥氏体不锈钢还应规定铁素体显示含量要求；
- b) 制造要求，包括容器成形精度、热处理参数、内壁表面粗糙度要求以及内表面无损检测方法和合格指标等；
- c) 容器产品在运输中的气体保护要求。

#### 6.2 塑性垮塌失效评定

塑性垮塌失效应按 GB/T XXXX.4-2024 中 6.2 条的应力分类法或按 GB/T XXXX.5-2024 中第 5 章的弹塑性分析法进行评定。

#### 6.3 局部过度应变失效评定

局部过度应变失效应按 GB/T XXXX.4-2024 中 6.3 条的应力分类法或按 GB/T XXXX.5-2024 中第 5 章的弹塑性分析法进行评定。

#### 6.4 脆性断裂失效评定

按第 5 章选材并按 6.5.4 中疲劳裂纹扩展分析法对脆性断裂失效进行评定。

#### 6.5 疲劳失效评定

##### 6.5.1 评定方法

储氢容器的疲劳评定应采用疲劳设计曲线法、疲劳裂纹扩展分析法或疲劳试验法。对于旋压无缝储氢容器，若满足 6.5.2 的未爆先漏判定，按疲劳设计曲线法、疲劳裂纹扩展分析法或疲劳试验法进行评定；若不满足未爆先漏判定，按疲劳裂纹扩展分析法或疲劳试验法进行评定。对于奥氏体不锈钢衬里储氢容器，按疲劳设计曲线法或疲劳裂纹扩展分析法进行评定。

##### 6.5.2 未爆先漏判定

若容器筒体内表面的轴-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 $0.8t$ 时， $K_I < K_{IH}$ ；
- b)  $0.2t < (K_{IH}/R_{p0.2})^2$ 。

##### 6.5.3 疲劳设计曲线法

采用疲劳设计曲线法时，应按 GB/T XXXX.4-2024 中 6.6 条进行评定。

#### 6.5.4 疲劳裂纹扩展分析法

##### 6.5.4.1 一般要求

疲劳裂纹扩展分析法的评定步骤如图 1 所示。

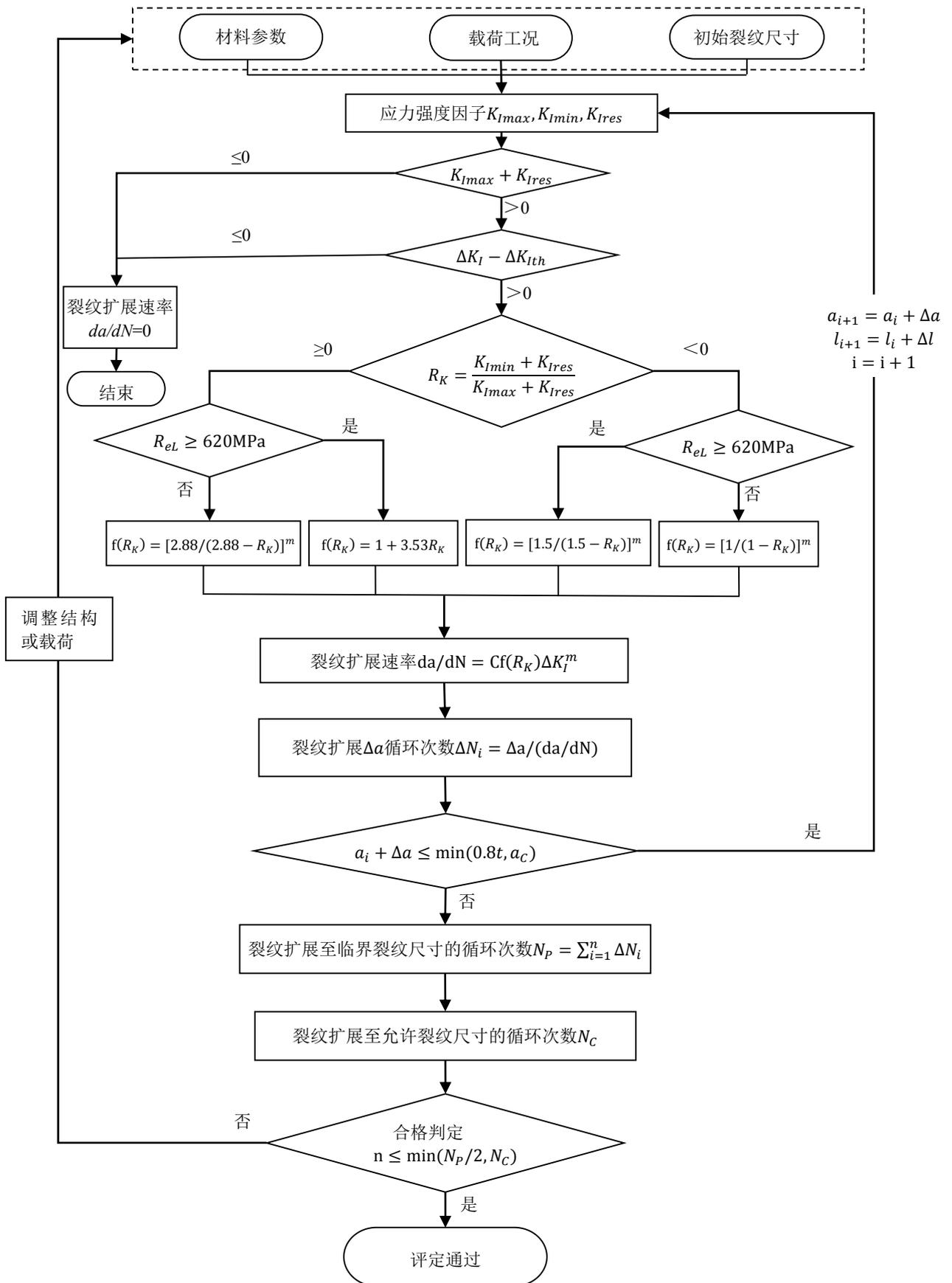


图 1 疲劳裂纹扩展分析评定步骤

#### 6.5.4.2 初始裂纹尺寸

采用疲劳裂纹扩展分析法评定时，初始裂纹深度 $a_0$ 应取经试验验证过的无损检测无法检测到的裂纹最大尺寸，但不应小于0.5mm，或者按表4取值。

表4 初始裂纹尺寸

壁厚 $t$ /mm	初始裂纹深度 $a_0$ /mm
$t \leq 16$	0.5
$16 < t \leq 50$	1.1
$t > 50$	1.6

#### 6.5.4.3 应力强度因子

在容器典型危险部位假定裂纹存在，计算应力强度因子，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、不连续应力和残余应力等在内的所有应力。无缝旋压储氢容器的应力强度因子可按GB/T 34019-2017附录F的规定计算。

#### 6.5.4.4 裂纹扩展速率

按式（2）计算裂纹扩展速率 $da/dN$ ：

$$da / dN = c[f(R_K)]\Delta K_I^m \dots\dots\dots (2)$$

式中，

$$f(R_K) = \begin{cases} 1 + 3.53R_K & R_K \geq 0 \text{ 且 } R_{el} > 620\text{MPa} \\ [2.88/(2.88 - R_K)]^m & R_K \geq 0 \text{ 且 } R_{el} \leq 620\text{MPa} \\ [1/(1 - R_K)]^m & R_K < 0 \text{ 且 } R_{el} \leq 620\text{MPa} \\ [1.5/(1.5 - R_K)]^m & R_K < 0 \text{ 且 } R_{el} > 620\text{MPa} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_K = \frac{K_{I \min} + K_{I \text{res}}}{K_{I \max} + K_{I \text{res}}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta K_I = K_{I \max} - K_{I \min} \dots\dots\dots (5)$$

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

#### 6.5.4.5 临界裂纹尺寸

按式（6）计算裂纹扩展 $\Delta a$ 所需的循环次数 $\Delta N$ ，更新裂纹尺寸，重复上述步骤直至达到临界裂纹尺寸 $a_c$ ：

$$\Delta N = \Delta a / (da / dN) \dots\dots\dots (6)$$

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

#### 6.5.4.6 允许裂纹尺寸

允许裂纹深度取 $0.25t$ 与 $(3/4a_0 + 1/4a_c)$ 之间的较小值。

#### 6.5.4.7 裂纹扩展循环次数

获得裂纹扩展至临界裂纹深度的总循环次数 $N_p$ 和裂纹扩展至允许裂纹深度所需的循环次数 $N_c$ ，并应采用减少 $\Delta a$ 的方法反复进行试算，直至 $N_p$ 和 $N_c$ 无明显变化。

#### 6.5.4.8 合格判定

若容器的预计循环次数 $n$ 满足式(7)，评定通过；否则，应采用改变操作条件、容器结构尺寸等措施，重复本节中之前的操作步骤，直到满足本条要求为止：

$$n \leq \min\{N_p / 2, N_c\} \dots\dots\dots (7)$$

#### 6.5.5 疲劳试验法

##### 6.5.5.1 一般要求

疲劳试验法的评定步骤如图2所示。

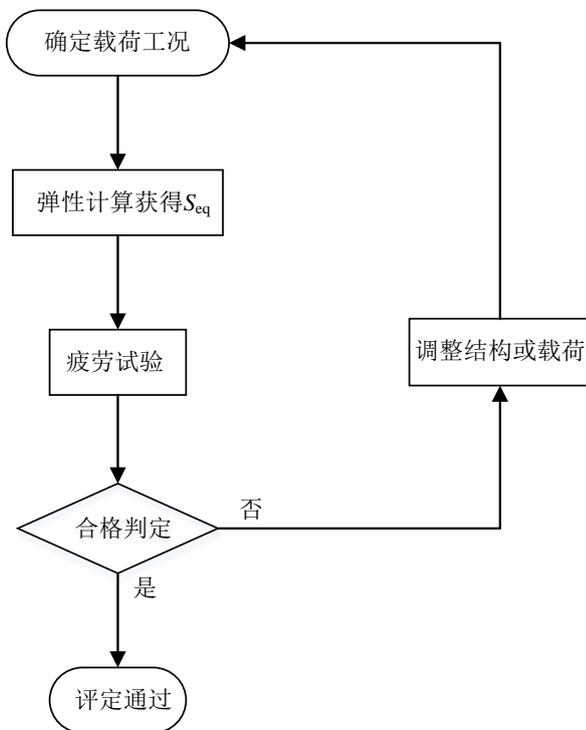


图2 疲劳试验法评定步骤

##### 6.5.5.2 弹性计算

在确定载荷工况后，应先用有限单元法对储氢容器进行弹性应力分析，计算容器的最大等效应力幅 $S_{eq}$ 。

##### 6.5.5.3 疲劳试验

在热处理后的试验用储氢容器或试环近内表面（双面淬火时，在1/2厚度处）环向取疲劳试样，以高纯氢气为介质，在设计压力下，按应力幅 $S_{eq2}$ （ $S_{eq2}$ 应大于等于 $2S_{eq}$ 且小于等于材料在空气中的疲劳极限）进行疲劳试验。

##### 6.5.5.4 合格判定

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/008137037110006066>