

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

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

Storage and transportation systems for gaseous hydrogen
Part 2: Test methods for evaluating metallic material compatibility in compressed
hydrogen atmosphere

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

（征求意见稿）

（本稿完成日期：）

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 2

5 通用要求 2

6 试验方法 5

附录 A（资料性附录） 试验设备主体的基本结构 8

前 言

本标准GB/T XXXX《氢气储存输送系统》分为以下部分：

- 第1部分：通用要求；
- 第2部分：金属材料与氢环境相容性试验方法；
- 第3部分：金属材料氢脆敏感度试验方法；
- 第4部分：氢气储存系统技术要求；
- 第5部分：氢气输送系统技术要求；
- 第6部分：氢气压缩系统技术要求；
- 第7部分：氢气充装系统技术要求；
- 第8部分：防火防爆技术要求。

本部分为GB/T XXXX的第2部分。本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分由全国氢能标准化技术委员会（SAC/TC 309）提出并归口。

本部分起草单位：XXXX、XXXX、XXXX、XXXX。

本部分主要起草人：XXX、XXX、XXX、XXX。

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

1 范围

本标准规定了金属材料与氢环境相容性试验的通用要求、试验方法等。
本标准适用于金属材料在氢环境中的拉伸性能、疲劳性能以及断裂力学性能的测定。

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，仅所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 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 3634.2 氢气 第2部分：纯氢、高纯氢和超纯氢

GB 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求

GB 4962 氢气使用安全技术规程

GB/T 6398 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 15248 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法

GB/T 21143 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法

GB/T 29729 氢系统安全的基本要求

GB 50516 加氢站技术规范

TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程

3 术语和定义

GB/T 10623 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

环境箱 test chamber

为材料在高压气体环境下测试提供的密闭装置。

3.2

内部测量装置 internal load cell

安装于环境箱的内部，用于测量加载杆轴向力、试样变形等的装置，其主要部件通常与氢气直接接触。

3.3

外部测量装置 external load cell

安装于环境箱的外部，用于测量加载杆轴向力、横梁位移等的装置。

3.4

排放管 vent pipe

试验设备中用于直接向大气中排放气体的管道。

3.5

对比环境试验 reference environment test

为了对比评价氢气对材料性能的劣化程度而在大气环境或惰性气体环境下开展的材料性能试验。

4 符号

下列符号适用于本文件。

P ——试验压力，MPa。

R ——力值比，最小力与最大力之比。

T ——试验温度，℃。

da/dN ——疲劳裂纹扩展速率，力循环一次的疲劳裂纹扩展量，mm/cycle。

ΔK ——应力强度因子范围，最大与最小应力强度因子值之差， $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

5 通用要求

5.1 一般要求

5.1.1 金属材料与高压氢环境相容性试验设备主体的基本结构参见附录 A。

5.1.2 如试验设备连续 15 天以上未使用，再次使用时，应先采用惰性气体对环境箱增压至试验压力并保压 10 min 以上，检查无明显泄漏后，方可进行试验。

5.1.3 应尽量减少对试样的标距段进行冷加工。

5.1.4 应采用适当的方法清洗试样表面的油污和杂质，试样清洗后应妥善保存，不得用手直接接触试样表面。

5.2 试验设备

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 试验设备应满足 GB/T 29729 的相关规定。

5.2.1.2 在试验压力和试验温度范围内，试验设备中与氢直接接触部件所选用的材料应经验证与氢具有良好的相容性。

5.2.1.3 试验设备宜具备温度调节系统，并可在一定的范围内调节环境箱内的温度。

5.2.1.4 试验设备中所使用的电气设备应设置防静电接地装置，并符合 GB 3836.1 的相关规定。

5.2.1.5 宜采用适当的装置平衡作用在加载杆上因环境箱内部压力所产生的轴向力。

5.2.1.6 试验设备还应满足以下要求：

- a) 设置超压泄放装置、阻火器等安全附件；
- b) 能远程实时监测系统的安全状态及压力、温度等参数；

c) 当系统出现异常、故障或失灵时，应能自动启动急停装置，报警装置应能及时报警。

5.2.1.7 试验设备的气体排放系统应设置流量控制装置，并满足 GB 4962 的有关规定。

5.2.1.8 试验设备排放管的设置应符合 GB 50516 中的相关规定。

5.2.2 环境箱

5.2.2.1 环境箱的材料、设计、制造、使用管理、定期检验等应符合 TSG 21 的相关规定。

5.2.2.2 环境箱的设计应考虑疲劳载荷及氢气对材料性能劣化的影响。

5.2.2.3 环境箱的设计寿命（循环次数）不得低于预期使用年限内的压力循环次数。

5.2.2.4 试验结束后，环境箱内应充装适量的惰性气体进行保护。

5.2.3 测量装置

5.2.3.1 内部测量装置

5.2.3.1.1 内部测量装置应能承受环境箱内部的压力载荷，并具备试验所需的精度和分辨率。

5.2.3.1.2 内部测量装置的电子元件在高压(试验设备的设计压力)氢气环境中应具有良好的稳定性。

5.2.3.1.3 应根据内部测量装置在高压氢气环境中输出信号随时间的漂移特性，选择合适的时间区间开展试验，并对漂移特性作详细的记录。

5.2.3.2 外部测量装置

5.2.3.2.1 当采用外部载荷测量装置对试样所受的轴向力进行测量时，应对该测量值做出修正，详细记录修正方法，并提供文件说明。修正至少应考虑以下因素：

- a) 加载杆上因环境箱内部压力引起的载荷；
- b) 加载杆与环境箱之间动密封处的摩擦力，如果该摩擦力随着环境箱内的氢气压力变化而变化，则应逐个记录相应试验压力下的摩擦力大小及变化规律。

5.2.3.2.2 当采用外部位移测量装置时，应考虑试验机弹性变形对测量结果的影响，并应记录消除该影响的方法。

5.2.3.2.3 疲劳试验中不宜采用外部载荷测量装置测量试样所受的轴向力。

5.3 试验气体

5.3.1 气源的纯度

5.3.1.1 充入环境箱的氢气纯度应大于或等于 99.999%，其中杂质的含量应满足表 1 的要求。

表1 氢气中杂质的含量

杂质种类	CO ₂ +CO	N ₂	O ₂	碳氢化合物	H ₂ O
含量(体积分数)/10 ⁻⁶	≤2	≤2	≤1	≤1	≤3.5

5.3.1.2 当选用惰性气体进行对比环境试验时，惰性气体的纯度应大于或者等于 99.999%。

5.3.1.3 当评价金属材料与含氢混合气体的相容性时，试验用气体的成分应满足该材料服役环境下气体成分的规格要求，此外混合气体中氧气和水分的含量应不高于其规定范围的下限值。如果混合气体中氧气的含量未明确规定，则其值不应超过 2×10^{-6} （体积分数）。

5.3.2 置换

- 5.3.2.1 试验开始前，应对环境箱及供氢管路系统中的气体进行置换。置换过程应使得试验时氢气纯度能够满足 5.3.3 的规定。
- 5.3.2.2 当系统中设置采样容器时，采样容器及其与环境箱间的连接管路应与环境箱同时进行置换。
- 5.3.2.3 置换过程应满足以下规定：
- a) 应采用惰性气体进行初次置换，之后再使用氢气进行置换；
 - b) 应根据试验系统的情况确定置换过程，置换时气体压力不应超过之后的试验压力。
- 5.3.2.4 置换过程中宜使用真空泵对环境箱及管路抽真空。
- 5.3.2.5 通入氢气之前，环境箱内氧气的浓度宜低于 5%；通入空气之前，环境箱内氢气的浓度宜低于 4%。

5.3.3 环境箱内气体的纯度

- 5.3.3.1 试样加载前以及试验结束时，均应依据 GB/T 3634.2 中的有关规定对环境箱内的氢气纯度进行检测，氢气中氧气和水的体积分数应分别小于或等于 2×10^{-6} 和 10×10^{-6} 。
- 5.3.3.2 当同时满足以下条件时，在检测后 6 个月内可免除环境箱内氢气纯度的检测：
- a) 连续 3 次对环境箱内的氧气和水分含量的测定结果均符合 5.3.3.1 的规定；
 - b) 气源（氢气和置换用气体）纯度未发生变化；
 - c) 置换的程序和参数未发生变化。
- 5.3.3.3 应记录并保存置换用气体的纯度、氢气源的纯度、环境箱内试验氢气含氧量和含水量的检测结果。
- 5.3.3.4 当选用惰性气体进行对比环境试验时，应在试验结束时对环境箱内的气体成分进行检测，其纯度应满足 5.3.1.2 的要求。

5.4 试验温度

- 5.4.1 试验温度应取材料在预期工作温度范围内性能受氢气劣化作用最严重时的温度值。
- 5.4.2 试验过程中应监测并详细记录环境箱内的温度变化。
- 5.4.3 试验过程中环境箱内的温度应在 $(T \pm 5)^\circ\text{C}$ 的范围内。
- 5.4.4 几类常用金属材料的推荐试验温度参见表 2。

表2 几类常用金属材料的推荐试验温度

合金种类	300 系列不锈钢	镍基合金	碳钢和低合金钢	铝合金
推荐试验温度	-53℃	室温	室温	室温

5.4.5 当采用惰性气体或空气进行对比环境试验时，试验温度应与相应的高压氢环境相容性试验温度相同，且试验过程中环境箱内的温度应满足 5.4.3 的规定。

5.5 试验压力

- 5.5.1 材料的试验压力 P 应大于或等于由该材料制造的承载件的最高允许工作压力。
- 5.5.2 当环境箱内氢气加压至试验压力后，应保压至少 10 min，然后再进行试验。

- 5.5.3 试验过程中应监测并记录环境箱内的压力变化。
- 5.5.4 试验过程中环境箱内的压力应保持在 $(1 \pm 0.05) P$ 的范围内。
- 5.5.5 试验过程中可启动增压装置对环境箱内氢气进行补压。
- 5.5.6 当采用惰性气体进行对比环境试验时，试验压力应与相应的高压氢环境相容性试验压力相同，且试验过程中环境箱内的压力应满足 5.5.4 的规定。

6 试验方法

6.1 慢应变速率拉伸试验

6.1.1 一般要求

- 6.1.1.1 慢应变速率拉伸试验应满足 5 中的相关规定。
- 6.1.1.2 试验设备应满足 GB/T 228.1 的相关要求。
- 6.1.1.3 慢应变速率拉伸试验可采用光滑圆棒试样或带缺口试样；光滑圆棒试样的结构尺寸以及制备应符合 GB/T 228.1 的相关规定；带缺口圆棒试样应采用标准带缺口试样（见图 1），或采用缺口应力集中系数大于 3 的带缺口试样。

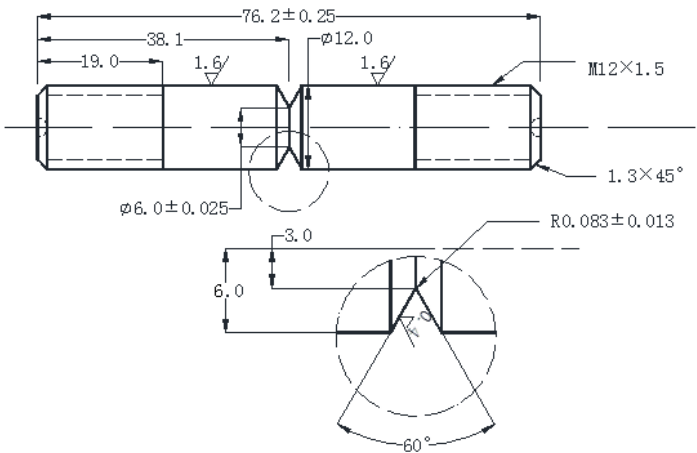


图1 标准带缺口试样

- 6.1.1.4 慢应变速率拉伸试验宜采用引伸计对试样标距段的应变进行测量。
- 6.1.2 试验程序
 - 6.1.2.1 试验的基本程序应符合 GB/T 228.1 的相关规定。
 - 6.1.2.2 装夹好试样并将环境箱密闭固定后，应采用 5.3.2 中规定的方法对环境箱内气体进行置换。
 - 6.1.2.3 试验应以恒位移速率进行。对于光滑圆棒试样，其标距段的应变速率应不超过 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ；对于带缺口试样，其以缺口为中心的长为 25mm 试样段的平均应变速率应不超过 $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。
 - 6.1.2.4 试验结束后，应对试样进行测量和断口检测。
- 6.1.3 试验报告

试验报告应包含以下内容：

- a) 试验材料的牌号、化学成分、热处理工艺、产品规格、取样位置及方位、试样的结构尺寸；

- b) 试验压力、气体纯度及杂质含量、试验温度；
- c) 试验过程中试样的应变速率；
- d) 试验过程中的应力-应变曲线；
- e) 依据 GB/T 228.1 确定的试样的屈服强度、屈服点的判定方法、抗拉强度、伸长率、断面收缩率；
- f) 其它试验结果。

6.2 疲劳寿命试验

6.2.1 一般要求

6.2.1.1 疲劳寿命试验应满足 5 中的相关规定。

6.2.1.2 疲劳寿命试验可采用力控制或应变控制。当采用力控制时，试验设备应满足 GB/T 3075 的相关规定；当采用应变控制时，试验设备应满足 GB/T 15248 的相关规定。

6.2.1.3 疲劳寿命试验可采用光滑圆棒试样或带缺口试样。采用力控制时，光滑圆棒试样的结构尺寸应符合 GB/T 3075 的相关规定；采用应变控制时，光滑圆棒试样的结构尺寸应符合 GB/T 15248 的相关规定。带缺口圆棒试样应采用标准带缺口试样（见图 1），或采用缺口应力集中系数大于或等于 3 的带缺口试样。

6.2.2 试验程序

6.2.2.1 采用力控制时，试验的基本程序应符合 GB/T 3075 的相关规定；采用应变控制时，试验的基本程序应符合 GB/T 15248 的相关规定。

6.2.2.2 装夹好试样并将环境箱密闭固定后，应采用 5.3.2 中规定的方法对环境箱内气体进行置换。

6.2.2.3 采用力控制时，试验过程中试样的应力幅应保持恒定；带缺口试样的 R 值取 0.1，光滑圆棒试样的 R 值取 0.1 或 -1。

6.2.2.4 采用应变控制时，试验过程中试样的总轴向应变幅或塑性轴向应变幅应保持恒定。

6.2.2.5 试验过程中，力或应变应以三角波或正弦波的形式施加。

6.2.2.6 对于低周疲劳，试验频率不应超过 1 Hz；对于高周疲劳，试验频率不应超过 20Hz。

6.2.3 试验报告

试验报告应包含以下内容：

- a) 试验材料的牌号、化学成分、热处理工艺、产品规格、取样位置及方位、试样的结构尺寸、试样的表面状态；
- b) 试验压力、气体纯度及杂质含量、试验温度；
- c) 试验采用的波形，频率，力值比 R ；
- d) 应力寿命曲线或应变寿命曲线。

6.3 断裂韧性试验

6.3.1 一般要求

6.3.1.1 断裂韧性试验应满足 5 中的相关要求。

6.3.1.2 试验设备应满足 GB/T 21143 的相关要求。

6.3.1.3 试验用试样的结构尺寸应满足 GB/T 21143 的相关要求。

6.3.1.4 应在氢气环境中进行试样疲劳裂纹的预制，预制过程应满足 GB/T 21143 的相关要求。疲劳裂纹预制前应去除试样上的油污，并应保证预制裂纹过程中，试样表面不被杂质污染。

6.3.2 试验程序

6.3.2.1 试验的基本程序应符合 GB/T 21143 的相关规定。

6.3.2.2 装夹好试样并将环境箱密闭固定后，应采用 5.3.2 中规定的方法对环境箱内气体进行置换。

6.3.2.3 试验结束后，应对试样进行观察和测量。

6.3.3 试验报告

试验报告的内容应满足 GB/T 21143 的要求，且应包含试验压力、气体纯度及杂质含量等。

6.4 疲劳裂纹扩展速率试验

6.4.1 一般要求

6.4.1.1 疲劳裂纹扩展速率试验应满足 5 中的相关规定。

6.4.1.2 试验设备应满足 GB/T 6398 的相关要求。

6.4.1.3 试样的结构尺寸、取样、制备应符合 GB/T 6398 的相关规定。

6.4.1.4 应在试样的最终热处理状态下对其进行裂纹的预制，预制过程应符合 GB/T 6398 的相关规定。裂纹的预制可在空气中进行，预制时所采用的波形和频率可与疲劳裂纹扩展速率测试时所采用的波形和频率不同。

6.4.2 试验程序

6.4.2.1 试验的基本程序应符合 GB/T 6398 的相关规定。

6.4.2.2 装夹好试样并将环境箱密闭固定后，应采用 5.3.2 中规定的方法对环境箱内气体进行置换。

6.4.2.3 试验中 R 值应为 0.1 ± 0.01 ，试验频率应为 1 Hz，加载波形应采用三角波或正弦波。

6.4.2.4 试验中应力强度因子的范围宜为 $8 \sim 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

6.4.3 试验报告

试验报告应包含以下内容：

- 试验材料的牌号、化学成分、热处理工艺、产品规格、取样位置及缺口方位、试样的结构尺寸；
- 试验压力、气体纯度及杂质含量、试验温度；
- 裂纹长度的测量方法、测量精度，如果对裂纹长度的测量值进行了修正，应记录所采用的修正方法；
- 疲劳裂纹预制过程结束时的应力强度因子范围 ΔK 、力值比 R 以及裂纹长度；
- 疲劳裂纹扩展试验所采用的载荷幅值、力值比 R 、频率、波形以及用于计算裂纹长度的数据；
- 数据分析方法，包括 da/dN 的计算方法和裂纹尺寸的修正方法；
- da/dN 与 ΔK 的关系曲线。

附 录 A
(资料性附录)
试验设备主体的基本结构

金属材料与高压氢环境相容性试验设备主体的结构示意图见图 A.1 所示。

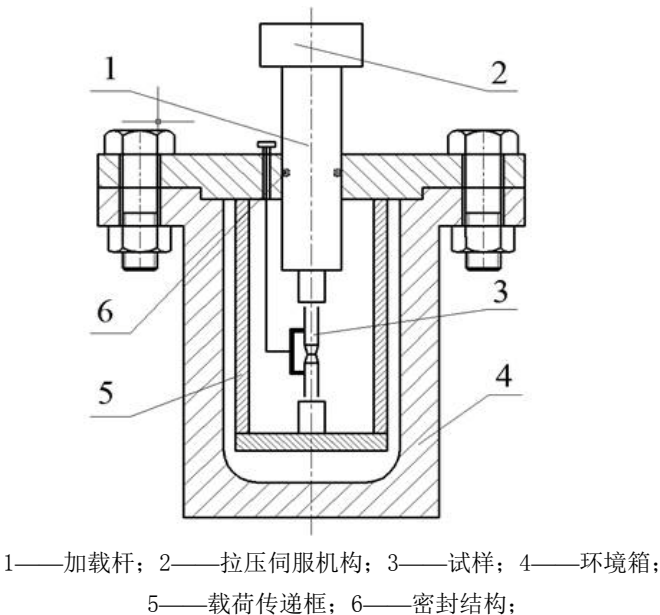
环境箱的主要作用是给试样提供高压氢气环境。

拉压伺服机构为试样提供轴向力。

加载杆与拉压伺服机构连接，为试样提供轴向力。由于加载杆一端贯穿环境箱并深入其内部，所以加载杆受到环境箱内部高压气体引起的轴向力作用。

密封结构用于阻隔环境箱内高压气体的泄漏。

载荷传递框用于试样一端的固定。



图A.1 试验设备主体结构示意图