
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
(征求意见稿)
国家标准编制说明

标准起草组

二〇一七年八月十二日

1. 工作简况

1.1 编写目的及任务来源

氢能具有来源多样、洁净环保、储运便捷、利用高效等优点，其开发和利用备受关注。日本、美国、德国等发达国家纷纷加大氢能技术研发的科技力量和资金投入，并将发展氢能作为国家能源战略。我国也十分重视氢能技术的开发和利用，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》、《中国制造2025（2015-2025）》、《能源技术革命创新行动计划（2016-2030）》、《“十三五”国家科技创新规划（2016-2020）》等均对氢能发展作了部署。我国要重点研究高效低成本的化石能源和可再生能源制氢技术，经济高效氢储存和输配技术，燃料电池基础关键部件制备和电堆集成技术，燃料电池发电及车用动力系统集成技术，形成氢能和氢燃料电池技术规范与标准。大力发展氢能，是我国转变能源消费结构、保障能源安全、缓解雾霾、促进温室气体减排、使经济保持可持续发展的重要举措。

近年来，氢能在客车、轿车、物流车、邮政车、备用电源、分布式发电、热电联供等领域的应用中初见端倪。然而，氢气易泄漏扩散、可燃范围宽、燃烧热值高、爆炸能量大并对材料具有劣化作用，加上氢气储存输送系统往往结构复杂且操作条件多样，使用风险高，现有规范标准的制定不能满足实际需要已成为氢能大规模推广应用的障碍之一。

氢气储存输送系统包括氢气储存系统、氢气压缩系统、氢气输送系统、氢气灌装系统及其组合系统，其工艺设计、材料选择、防火防爆等方面必须考虑氢气的特性。它既有共性技术，如抗氢材料筛选、氢气环境材料力学性能，以及防氢气泄漏、防氢气积聚、防氢气起火、降低氢气爆炸危害等方面的安全要求，又在氢气压缩、储存、灌注和输送方面有特殊技术要求。为规范氢气储存和运输，保障安全，有必要制订标准《氢气储存输送系统》。

标准《氢气储存输送系统》分为8个部分。《第1部分：通用要求》主要规定氢气储存输送系统总体设计、安全附件和仪表、安装调试、运行管理和风险评估的通用要求；《第2部分：金属材料与氢环境相容性试验方法》提供金属材料在氢气环境下的力学性能测量方法（慢应变速率拉伸试验、疲劳寿命试验、断裂韧度试验、疲劳裂纹扩展速率试验），主要规定试验的通用要求（包括试验设备、

试验气体等)、试样要求、试验程序和试验报告;《第3部分:金属材料氢脆敏感度试验方法》提供抗氢脆材料快速筛选方法,主要规定金属材料氢脆敏感度试验的一般要求、试验设备、试样要求、试验程序和试验报告;《第4部分:氢气储存系统技术要求》主要规定固定式氢气储存系统、移动式氢气储存系统的技术要求;《第5部分:氢气输送系统技术要求》主要规定氢气管道输送系统、氢气长管拖车输送系统的技术要求;《第6部分:氢气压缩系统技术要求》主要规定隔膜式压缩机、活塞式压缩机、离心式压缩机和气体增压器的技术要求;《第7部分:氢气灌装系统技术要求》主要规定工业气瓶灌装系统和车用气瓶充装系统的技术要求;《第8部分:防火防爆技术要求》主要规定系统的报警、泄爆和阻火技术要求。

本标准制订项目由国家标准化委员会下达,项目编号为20140621-T-469,项目名称为《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》。

根据全国氢能标准化技术委员会下达的任务,本标准由浙江大学牵头,其他多家单位共同承担本标准的制定任务。

1.2 简要工作过程

(1) 准备和启动阶段

本标准《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》由全国氢能标准化技术委员会提出,于2014年获国家标准化委员会批复立项,属于首次编写的推荐性国家标准。

(2) 起草阶段

根据全国氢能标准化技术委员会下达的任务,浙江大学、中国标准化研究院、中国电子工程设计院、浙江工业大学、同济大学等单位承担本标准的制订任务。在充分分析研究相关国际标准、国家标准、国内外资料的基础上,工作组展开多轮研讨论证,于2014年12月形成了本标准讨论稿。

2015年9月,全国氢能标准化技术委员会在杭州组织召开本标准研讨会,重点研究了标准编排结构、总体内容和具体参数规定,并修改完善了本标准讨论稿。

2016年4月,全国氢能标准化技术委员会在杭州组织召开了本标准第2次

研讨会。会议听取了标准编制工作进展情况汇报，对本标准讨论稿进行了逐条讨论，并形成了修改意见。会后，起草组多次召开讨论会，对本标准讨论稿进一步修改和完善。

2. 国家标准编制依据及标准主要内容说明

2.1 国家标准编制依据

本标准编制过程中，参考的国内外标准主要有：

- (1) GB/T 29729 《氢系统安全的基本要求》；
- (2) TSG 21 《固定式压力容器安全技术监察规程》；
- (3) ISO 11114-4: 2005 《移动气瓶、气瓶和瓶阀材料与盛装气体的相容性 第 4 部分：耐氢脆金属材料筛选的试验方法 (Transportable gas cylinders-Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents -Part 4:Test methods for selecting metallic materials resistant to hydrogen embrittlement) 》

(4) ASTM F1459-2006(2012) 《测定金属材料对气态氢氢脆敏感度的试验方法 (Standard Test Method for Determination of the Susceptibility of Metallic Materials to Hydrogen Gas Embrittlement (HGE)) 》

2.2 标准主要内容说明

本标准主要包括：

- (1) 范围
- (2) 规范性引用文件
- (3) 术语、定义和符号
- (4) 试验原理
- (5) 一般要求
- (6) 试验设备
- (7) 圆盘试样
- (8) 试验程序
- (9) 氢脆敏感度评价
- (10) 试验报告

附录 A (资料性附录) 试验设备主体的基本结构

2.2.1 适用范围

本标准适用于金属材料氢脆敏感度的分类判定。

2.2.2 规范性引用文件

列出了该标准的规范性引用文件。

2.2.3 术语和定义

收录了本标准中涉及的 3 条术语和定义（分别为：对比环境试验、平面度和试验温度）以及标准中涉及到的符号说明。

2.2.4 试验原理

描述了金属材料氢脆敏感度试验（具体为圆盘试验）的基本试验过程：圆盘试验法通过将试样加工成圆盘片，并将其安装于试验设备夹持腔内，分别通入氢气和氦气（对比环境试验气体）并以恒定速率加压，直至试样爆破或开裂，通过比较氢气环境和氦气环境下的爆破压力，评价材料的氢脆敏感度。

圆盘试验方法可模拟容器的两向或三向应力状态，该法灵敏度高、方便高效、成本低，适用于金属材料氢脆敏感度的测定和抗氢脆材料快速筛选。

2.2.5 一般要求

提出了金属材料氢脆敏感度试验的一般要求，对试验气体、试验温度以及升压方式做出相应规定。

1) 试验气体：圆盘爆破压力试验气体中杂质的存在会影响圆盘爆破压力（例如：氢气中的水分和 O₂ 会在一定程度上抑制氢脆效应），从而影响金属材料的氢脆敏感度评定。因此须对试验用气体的纯度和杂质含量提出相应的要求。结合我国氢气和氦气的技术要求，同时考虑到试验准确性和工业生产成本，本节规定试验用氢气和氦气的纯度均应大于或等于 99.999%，即采用高纯氢和高纯氦进行试验。

2) 试验温度：圆盘试验应在室温下进行，在试验过程中，应控制试验温度值无较大波动，以避免温度改变对试验结果产生影响。故 5.3 条规定：对于同一材料的一组氢脆敏感度试验，所有试验温度值最大相差不应大于 5℃。

3) 升压方式：每个试验应全程尽可能保持恒定的升压速率，其中 6 个氢气环境试验或 6 个氦气对比环境试验选取的试验升压速率应在 0.01~100MPa/min 之间分布均匀，其余 3 个氢气环境下的试验升压速率应等于或接近上述氢气环境中产生最低爆破压力的升压速率。为了更好的表现平均升压速率和氦气环境下圆盘爆破压力的线性关系，本节推荐的 6 个升压速率分别为：0.01MPa/min、

0.1MPa/min、1MPa/min、10MPa/min、50MPa/min、100MPa/min。

2.2.6 试验设备

提出了对圆盘试验设备的具体要求。

需要注意的是，在圆盘试样上方应设置高强钢压环，钢压环强度须大于圆盘试样材料的强度。氢脆敏感性随钢铁材料强度的提高急剧增加，在制造临氢设备时，为避免氢脆效应的影响，需要限制材料的最大抗拉强度。根据标准 EN ISO11114-1，对于调质合金钢，材料最大抗拉强度值限制在 950MPa 以下；另参考标准 ISO 9809-1，铬钼钢最大抗拉强度值为 1100MPa，碳钢的最大抗拉强度值则不超过 1030MPa。为保证高强钢环强度高于圆盘试样，规定压环材料的抗拉强度大于 1100MPa。

2.2.7 圆盘试样

本节对圆盘试样的热处理状态、试样尺寸、表面粗糙度、试样保存方法等做出具体规定。需要注意的是，在试样加工过程中不应改变材料原有的性能。

2.2.7 试验程序

对圆盘试验程序做出具体规定。其中，在试验前应对试验腔体及管路系统中的气体进行置换，使试验腔体内的气体纯度满足本标准第 5 节的相关规定，方可进行下一步试验。

2.2.8 氢脆敏感度评价

提出了修正爆破压力和平均升压速率的具体计算公式，并提出氢脆敏感度的具体评价方法。

1) 修正爆破压力

由于加工水平的限制，在实际试样加工过程中，同一圆盘试样的实际平均厚度和圆盘设计厚度 0.75mm 可能产生偏离，另外不同圆盘试样的平均圆盘厚度也可能有所差异。考虑到圆盘厚度会影响最终的圆盘爆破压力，因此须根据实际厚度对实际圆盘爆破压力进行修正。爆破压力修正公式如下：

$$P_r' = \frac{0.75P_r}{e_m} \dots\dots\dots (1)$$

其中：

e_m ——圆盘试样平均厚度（试样上相隔 90° 的四个点厚度的平均值），mm；

P_r ——爆破压力，MPa；

P_r' ——修正爆破压力, MPa;

2) 平均升压速率

试验加压过程中, 应记录圆盘试样的爆破压力 P_r 和试验时间 t , 由二者的比值得到平均升压速率 U , 计算公式如下:

$$U = \frac{P_r}{t} \dots\dots\dots (2)$$

3) 氢脆敏感度

通过氦气对比环境试验结果, 得到氦气修正爆破压力 P_{rHe}' 和平均升压速率的对数函数值 $\lg U_{He}$ 的线性关系公式, 以此为基础可计算得到与平均氢气升压速率对应的 P_{rHe}' , 然后分别计算氦气修正爆破压力 P_{rHe}' 与和其对应的氢气修正爆破压力 P_{rH_2}' 的比值 P_{rHe}' / P_{rH_2}' , 得到 9 个结果。

取 P_{rHe}' / P_{rH_2}' 比值中的最大值, 作为氢脆系数。若该值等于 1, 则说明与氦气相比氢气对材料的影响较小, 材料氢脆不敏感; 如果该值大于或等于 2, 则说明与氦气相比氢气对材料的影响较大, 材料氢脆敏感, 不得用于制造临氢零部件; 如果该值在 1~2 之间, 则制造临氢的承载件时, 应按照相关标准的规定, 进一步定量确定设计所需的材料在氢气环境下的性能。

由于试验升压速率在 0.1MPa 与 100MPa 之间均匀分布, 并在爆破压力最低的升压速率 (材料氢脆最敏感段) 附近又密集取点, 因此最终得到的 P_{rHe}' / P_{rH_2}' 最大值可代表材料的氢脆敏感度。

2.2.10 试验报告

规定了金属材料氢脆敏感度试验报告应包含的主要内容。

3. 采用国际标准和国外先进标准的程度, 以及与国际、国外同类标准水平的对比情况

本标准是在理论和试验研究的基础上, 结合 ISO 11114-4: 2005 《Transportable gas cylinders-Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents -Part 4: Test methods for selecting metallic materials resistant to hydrogen embrittlement》、ASTM F1459-2006 (2012) 《Standard Test Method for Determination of the Susceptibility of Metallic Materials to Hydrogen Gas Embrittlement (HGE)》等标准制定的,

技术指标与国际先进标准相当，处于国际先进水平。

4. 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准与《特种设备安全法》、TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》等法律、法规及相关标准协调一致。

5. 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准的制定无重大分歧意见。

6. 国家标准作为强制性国家标准或推荐性国家标准的建议

建议将本标准作为推荐性国家标准。

7. 知识产权状况声明

截止本标准征求意见，本标准未接到任何涉及相关专利或知识产权争议的信息、文件。

8. 贯彻国家标准的要求和措施建议