



中华人民共和国国家标准

GB/T 29729—××××

代替 GB/T 29729-2013

氢系统安全的基本要求

Essential requirements for the safety of hydrogen systems

(ISO/TR 15916:2015, Basic considerations for the safety of hydrogen systems, NEQ)

(征求意见稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

国家市场监督管理总局
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 氢系统的类别 2

5 氢的基本特性 2

6 氢系统的危险因素 3

7 风险控制 4

附录 A（资料性附录） 典型制氢系统..... 15

附录 B（资料性附录） 氢的性质..... 18

附录 C（资料性附录） 氢的燃烧特性..... 22

附录 D（资料性附录） 氢环境常用金属材料和非金属材料..... 24

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

本文件代替GB/T 29729-2013《氢系统安全的基本要求》。与GB/T 29729-2013相比，主要技术变化如下：

- 第1章范围中更新了本文件的适用范围；
 - 第2章规范性引用文件中更新和补充了本文件引用的标准和规程；
 - 第3章术语和定义中更新和补充了氢系统、固定式氢气储存容器、液氢增压泵的定义；
 - 第4章氢系统的类别中更新和补充了输送系统、应用系统的规定；
 - 第5章氢的基本特性中修订了燃烧特性的相关数据；
 - 第7章风险控制第1节基本原则中补充了关于点火源、检测报警装置的基本原则；
 - 第7章风险控制第2节设计风险控制中补充修订了合理选材、氢气储存容器、液氢储存容器、固态储氢容器、泵和压缩机、安全泄放装置和阀门的相关规定；
 - 第7章风险控制第3节氢设施要求中补充修订了通风要求、放空和火炬的相关规定；
 - 第7章风险控制第4节检测要求中补充修订了氢泄漏检测的相关规定；
 - 第7章风险控制第5节火灾和爆炸风险控制中补充修订了防止氢/氧的意外混合和杜绝点火源的相关规定；
 - 附录B氢的性质中修订了表B.1常态氢和仲氢的物理和热物理性质、表B.2氢气与其它常见气体的热物理性质比较的相关数据；
 - 附录C氢的燃烧特性中补充修订了表C.1氢的燃烧特性和表C.2氢气与其它常见燃料的燃烧特性比较的相关数据；
 - 附录D氢环境常用金属材料和非金属材料中补充修订了S31603、S31608、4130X、X42、X52等金属材料的化学成分和力学性能的相关介绍，补充了氢环境密封件和塑料常用非金属材料的相关介绍。
- 本文件使用重新起草法参考ISO/TR 15916:2015《氢系统安全的基本考虑》编制，与ISO/TR 15916:2015的一致性程度为非等效。
- 本文件由全国氢能标准化技术委员会（SAC/TC 309）提出并归口。
- 本文件起草单位：
- 本文件主要起草人：
- 本文件所代替标准的历次版本发布情况为：
- GB/T 29729-2013。

氢系统安全的基本要求

1 范围

本文件规定了氢系统的类别、氢的基本特性、氢系统的危险因素及其风险控制的基本要求。
本文件适用于氢的制取、储存、输送和应用系统的设计和使用。

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 2894 安全标志及其使用导则
GB 4962—2008 氢气使用安全技术规程
GB 5099 钢质无缝气瓶
GB 12014 防静电服
GB 12358 作业场所环境气体检测报警仪 通用技术要求
GB 16808 可燃气体报警控制器
GB/T 19773 变压吸附提纯氢系统技术要求
GB/T 19774 水电解制氢系统技术要求
GB 21146 个体防护装备职业鞋
GB/T 24499 氢气、氢能与氢能系统术语
GB/T 33292 燃料电池备用电源用金属氢化物储氢系统
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 34544 小型燃料电池车用低压储氢装置安全试验方法
GB/T 35544 车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶
GB 50058 爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范
GB 50177—2005 氢气站设计规范
GB 50217 电力工程电缆设计规范
GB 50275 风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范
GB 50516—2010 加氢站技术规范
JB/T 4711 压力容器涂敷与运输包装
JB 4732—1995 钢制压力容器——分析设计标准
NB/T 10354 长管拖车
TSG R0005 移动式压力容器安全技术监察规程
TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程
TSG 23 气瓶安全技术规程

3 术语和定义

GB/T 24499界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

氢系统 hydrogen system

氢的制取、储存、输送、应用系统。

3.2

爆轰极限 limit of detonation

易燃易爆气体、蒸汽或粉尘在空气/氧气中形成可引发爆轰的爆炸气体混合物的浓度范围。

3.3

热分层 thermal stratification

重力方向上由于温度不同引起流体密度差异，导致冷流体处于下方，热流体处于上方的流体分层现象。

3.4

固态储氢 hydrogen storage in solid state

以固态物质形式与氢进行化学反应或物理吸附的储氢方式。

3.5

固定式氢气储存容器 stationary hydrogen storage container

固定安装、用于储存氢气的压力容器，配带有必要的安全装置、压力和温度检测、显示仪器等。

3.6

液氢增压泵 liquid hydrogen booster pump

对液氢进行增压的单级或多级增压泵。

3.7

限制区域 confined space

进出口受限、通风不良、具有危险的空间。

4 氢系统的类别

4.1 制氢系统

制氢系统主要包括水电解制氢系统、化石能源制氢系统和可再生能源制氢系统，其中化石能源制氢系统主要有天然气蒸汽转化制氢系统、甲醇转化制氢系统和副产氢提纯回收制氢系统，可再生能源制氢系统主要有风能和太阳能电解水制氢系统、太阳能热化学制氢系统和太阳能光解水制氢系统。典型制氢系统参见附录A。

4.2 储存系统

氢储存系统主要包括氢气储存系统、液氢和氢浆储存系统及固态氢储存系统，其中固态氢储存系统主要有金属氢化物储氢系统、络合氢化物储氢系统、化学氢化物储氢系统和物理吸附储氢系统。

4.3 输送系统

氢输送系统主要包括氢气输送系统、液氢和氢浆输送系统。氢气输送系统主要有氢气长管拖车和氢气管道系统（含掺氢天然气管道系统），液氢和氢浆输送系统主要有槽罐车和低温绝热管道系统。

4.4 应用系统

氢应用系统主要包括氢在交通运输、石油工业、化学工业、冶金工业、电力工业、化肥工业、建筑行业、食品工业、综合能源、储能等领域的应用系统。

5 氢的基本特性

5.1 物理和热物理性质

5.1.1 氢的相对原子质量为 1.008，氢气在常温常压下的密度为 0.083 76 kg/m³。常态氢和仲氢的物理和热物理性质参见附录 B 中的表 B.1，氢气与其它常见气体的热物理性质比较参见附录 B 中的表 B.2。

5.1.2 液氢在标准沸点下的密度为 70.78 kg/m³，标准沸点下常态氢转化为仲氢的转化热为 527.14 kJ/kg。液氢与其它液化气体的热物理性质比较参见附录 B 中的表 B.3。

5.2 燃烧特性

5.2.1 氢气在常温常压空气中的可燃极限为 4%~75%（体积分数）。氢的燃烧特性参见附录 C 中的表 C.1，氢气与其它常见燃料的燃烧特性比较参见附录 C 中的表 C.2。

5.2.2 氢气在常温常压空气中的爆轰极限在可燃极限范围内，爆轰速度为 1480 m/s~2150 m/s。

6 氢系统的危险因素

6.1 泄漏和渗漏

6.1.1 氢气易通过多孔材料、装配面或密封面泄漏。氢气泄漏后将迅速扩散，导致可燃、可爆区域不断扩大，且扩散过程肉眼不可见。影响氢气泄漏扩散的主要因素包括泄漏位置、环境温度、环境风速、环境风向和障碍物。

6.1.2 液氢和氢浆系统发生泄漏后，液氢和氢浆将迅速蒸发扩散，形成可见的可爆雾团，并可能导致系统形成负压而使周围空气进入系统冷凝而结冰，可能堵塞系统的管道、阀门等部件。

6.1.3 氢易渗入某些非金属材料内而引起氢渗漏。若液氢或氢浆系统发生氢渗漏，可导致氢损耗或真空绝热层破坏。

6.2 与燃烧有关的危险因素

6.2.1 氢气、液氢或氢浆被点燃，将引起氢燃烧或爆炸。氢燃烧可造成氢系统材料性能劣化，并可能导致氢系统因内部温度和压力急剧升高而超压失效。

6.2.2 氢气爆燃可导致燃烧区域的迅速扩大和密闭空间压力的迅速升高。氢气爆轰产生的高速爆轰波可对燃烧区域外的环境产生巨大冲击，并伴随有高温气体的迅速传播。

6.3 与压力有关的危险因素

6.3.1 氢气系统失效可导致高压氢气储存能量迅速释放，形成冲击波，破坏周围设施。

6.3.2 液氢和氢浆系统漏热将引起热分层和氢蒸发，导致系统内的氢体积急剧增大，若泄压装置动作不及时，可导致系统超压失效。

6.3.3 氢浆中的固体氢颗粒易积聚沉淀而堵塞氢浆系统的管道、阀门等部件。

6.4 与温度有关的危险因素

6.4.1 氢液化过程温度急剧下降，可导致材料收缩。氢系统材料收缩程度不同，可能导致系统结构变形不协调，从而造成结构中应力增大或密封面泄漏。

6.4.2 液氢和氢浆系统的低温环境可导致材料韧性下降，增加材料的裂纹敏感性。液氢和氢浆系统的温度低于材料的韧脆转变温度时，材料将由韧性状态转变为脆性状态。

6.5 与固态储氢有关的危险因素

6.5.1 金属氢化物的解吸氢压随金属氢化物温度升高呈指数函数增大，可能导致金属氢化物容器超压失效。

6.5.2 固态储氢容器在使用过程中，由于振动或氢气流推动，易造成粉体局部堆积而导致容器膨胀、破损。若含氢活性粉体随氢气流通过阀门向外逸出，可污染环境并可能引起燃烧。

6.5.3 固态储氢容器在加热解吸放氢后的冷却过程中，容器内可能形成负压而吸入空气，导致活性粉体逐渐失活。

6.5.4 固态储氢物质均有很高的表面活性，其与原料氢中含有的 CO、SO₂、Cl₂、O₂、CO₂ 等杂质接触会被污染或中毒失活。

6.6 氢腐蚀和氢脆

6.6.1 钢在高温高压氢环境中服役一定时间后，氢可与钢中的碳反应生成甲烷，造成钢脱碳和微裂纹的形成，导致钢性能不可逆地劣化。温度越高、氢分压越大，钢的氢腐蚀越严重。

6.6.2 金属吸收内部氢或外部氢后，局部氢浓度达到饱和时，将引起塑性下降、诱发裂纹或延迟断裂。温度越高、氢分压越大、应变速率越大，金属的氢脆越严重。

6.7 生理危害

6.7.1 人体皮肤直接接触低温氢气、液氢或氢浆易导致冻伤，直接接触高温且肉眼不可见的氢火焰易导致高温灼伤。

6.7.2 氢燃烧产生的大量紫外线辐射易损伤人体皮肤，氢火灾引起的次生火灾会产生浓烟或其它有害燃烧产物，危害人体健康。

7 风险控制

7.1 基本原则

氢系统应遵循以下基本原则：

- a) 在满足需求的前提下，控制储存和操作中氢的使用量；
- b) 制定相应操作程序；
- c) 减少处于危险环境中的人员数量，并缩短所处时间；
- d) 避免氢/空气（氧气）混合物在密闭空间积聚；

- e) 设置氢气和火焰等检测报警装置;
- f) 确保氢系统所有区域内无点火源;
- g) 确定氢系统的爆炸危险区域, 爆炸危险区域的等级定义应符合 GB 50058 的规定;
- h) 确保氢系统的爆炸危险区域内无其它杂物, 通道畅通。

7.2 设计风险控制

7.2.1 基本要求

氢系统设计应满足以下基本要求:

- a) 失效-安全设计:
 - 1) 设置安全泄放装置、阻火器等安全附件;
 - 2) 设置单容错或双容错。
- b) 自动安全控制:
 - 1) 远程实时监测系统的安全状态;
 - 2) 自动控制压力、流速等运行参数;
 - 3) 检测到氢泄漏时, 设备应能自动采取相应的安全措施, 包括关闭截止阀、开启通风装置、关停设备等。
- c) 氢系统出现异常、故障或失灵时, 报警装置应能及时报警。

7.2.2 合理选材

7.2.2.1 氢系统选材应考虑以下因素:

- 与氢的相容性;
- 与相邻材料的相容性;
- 与使用环境的相容性;
- 毒性;
- 失效模式;
- 可加工性;
- 经济性。

7.2.2.2 氢系统用金属材料应满足强度要求, 并具有良好的塑性、韧性和可制造性。用于低温工况时还应有良好的低温韧性, 且其脆转变温度应低于系统的工作温度。

7.2.2.3 氢系统用非金属材料应有良好的抗氢渗透性能。

7.2.2.4 温度或压力变化引起材料的形状或尺寸变化时, 相邻材料间的变形应互相协调, 以确保系统的密封性能和各部件的正常工作。

7.2.2.5 氢系统中与氢直接接触的材料, 应与氢具有良好的相容性。金属材料与氢气环境相容性试验应符合 GB/T 34542.2 等标准的规定, 氢脆敏感度试验应符合 GB/T 34542.3 的规定。

7.2.2.6 氢系统宜选用含碳量低或加入强碳化物形成元素的钢。

7.2.2.7 氢环境常用金属材料和非金属材料参见附录 D。为降低金属材料的氢脆敏感性, 应采取以下措施:

- a) 将材料硬度和强度控制在适当的水平;
- b) 降低残余应力;
- c) 避免或减少材料冷塑性变形;
- d) 避免承受交变载荷的部件发生疲劳破坏;
- e) 使用奥氏体不锈钢、铝合金等氢脆敏感性低的材料。

7.2.3 设备

7.2.3.1 氢气储存容器

7.2.3.1.1 设计氢气储存容器时，应充分考虑在正常工作状态下大气环境温度条件对容器壳体金属温度的影响，其最低设计金属温度不应高于历年来月平均最低气温的最低值。

7.2.3.1.2 氢气储存容器的支承和基础应为非燃烧体并确保牢固，容器的接地要求应符合 GB 50177—2005 中 9.0.7 的规定。

7.2.3.1.3 固定式氢气储存容器、氢气长管拖车及其零部件的涂敷与运输包装应符合 JB/T 4711 的规定和图样的技术要求。

7.2.3.1.4 固定式氢气储存容器的材料、设计、制造、使用管理等应符合 TSG 21、JB 4732 等相关规范标准的规定，对于加氢站氢气储存容器，还应符合 GB 50516 的规定。

7.2.3.1.5 固定式氢气储存容器应设有压力表、安全泄放装置、氢气泄漏报警装置、吹扫置换接口等安全附件。

7.2.3.1.6 固定式氢气储存容器顶部最高点宜设有氢气放空管，底部最低点宜设有排污口。

7.2.3.1.7 氢气长管拖车的材料、设计、制造、使用管理等应符合 TSG R0005、NB/T 10354、TSG 23 等相关规范标准的规定。

7.2.3.1.8 氢气长管拖车应按 GB 2894 的规定设置安全标志。

7.2.3.1.9 氢气长管拖车的汇流总管应设有压力表和温度表。每只钢瓶均应装配安全泄放装置。拖车上应配备灭火器材。

7.2.3.1.10 氢气瓶的设计、制造、检验与试验应符合 TSG 23、GB 5099 等相关规范标准的规定，对于车用氢气瓶，还应符合 GB/T 35544 等相关规范标准的规定。

7.2.3.1.11 氢气储气瓶组的气瓶、管路、阀门和其它附件应可靠固定，且管路、阀门和其它附件应设有防止碰撞损坏的防护设施。

7.2.3.2 液氢储存容器

7.2.3.2.1 液氢储存容器应设有绝热效果良好的绝热系统，其内容器和真空夹层均应设有安全泄放装置。

7.2.3.2.2 液氢储存容器的支承和基础应为非燃烧体并确保牢固。

7.2.3.2.3 液氢储存容器的放空管应设在容器顶部，并宜控制排放氢气的速度，以防静电引起爆炸。

7.2.3.2.4 液氢储存容器出液管应设在容器底部，并应在其液氢管路上设置切断阀。

7.2.3.2.5 固定式液氢储存容器、移动式液氢储存容器及其零部件的涂敷与运输包装应符合 JB/T 4711 的规定和图样的技术要求。

7.2.3.2.6 固定式液氢储存容器的选材、设计、制造、检验与试验、安全防护应符合 TSG 21 的规定。

7.2.3.2.7 移动式液氢储存容器的选材、设计、制造、检验与试验应符合 TSG R0005、TSG 23 等相关规范标准的规定。

7.2.3.2.8 低温绝热气瓶的设计应符合 TSG 23 等相关规范标准的规定。

7.2.3.3 氢浆储存容器

氢浆储存容器除应符合 7.2.3.2 的规定外，还应符合以下要求：

- a) 防止污染物进入容器，并及时处理容器内的固体氢颗粒积聚物；
- b) 及时补给或浓缩氢浆，确保容器中固态氢的质量分数满足要求。

7.2.3.4 固态储氢容器

7.2.3.4.1 固态储氢容器的技术要求、试验与检测、标志、包装等应满足 GB/T 34544、GB/T 33292 等相关规范标准的规定。

7.2.3.4.2 固态储氢容器除应符合 7.2.3.1.4、7.2.3.1.5 和 7.2.3.1.7 的规定外，还应符合以下要求：

- a) 防止固态填充物在使用过程中局部堆积；
- b) 单管或列管的管端均应设置过滤精度与固态储氢物质粒度相匹配的过滤器；
- c) 依储氢容量大小和固态物质储氢热效应高低，固态储氢容器宜设计为热交换器结构。

7.2.3.5 泵和压缩机

7.2.3.5.1 氢气压缩机的选型、数量，应根据进气压力、排气压力、氢气纯度和用氢量或使用特性确定。

7.2.3.5.2 氢气灌装用压缩机的型号、排气量，应根据灌装台或充装容器的规格和数量、充装时间、进气压力和排气压力确定。

7.2.3.5.3 液氢增压泵的选型、数量，应根据进液压力、排液压力和用氢量或使用特性确定。

7.2.3.5.4 输送氢气用压缩机后应设有氢气罐，并应在氢气压缩机的进气管与排气管之间设置旁通道。

7.2.3.5.5 氢气压缩机前应设有氢气缓冲罐。数台氢气压缩机并联从同一氢气管道吸气时，应采取措施确保吸气侧氢气为正压。

7.2.3.5.6 氢气压缩机和液氢增压泵的安装和验收应符合 GB 50275、设计制造标准和技术说明书的规定。

7.2.3.5.7 氢气压缩机安全保护装置的设置，应符合 GB 50516—2010 中 6.2.5 的规定。

7.2.3.5.8 液氢增压泵与液氢储存容器之间应采用柔性连接，管道内径应不小于泵进液口直径，必要时按工艺要求设有一定坡度。

7.2.4 管道

7.2.4.1 基本要求

氢气、液氢和氢浆管道应符合以下基本要求：

- a) 选用符合国家标准或行业标准规定，且满足工作压力、工作温度要求的无缝管；
- b) 管的材料应与氢有良好的相容性；
- c) 采用焊接连接或其它能有效防止泄漏的连接方式；
- d) 设置合适的安全泄放装置，与用氢设备连接的管道应设切断阀，连接至有明火的用氢设备的管道还应设阻火器；
- e) 管道上应标明介质及其流动方向；
- f) 管道宜采用架空敷设，其支架应为非燃烧体，且不应与电缆、导线路、高温管线敷设在同一支架上；
- g) 氢管道与其它管道共架敷设或分层布置时，氢管道宜布置在外侧并置于上层，且应保持一定的安全距离；
- h) 管道与建筑物、构筑物或其它管线应保持一定的安全距离，室内管道不应敷设在地沟中或直接埋地，室外地沟敷设的管道，应采取防止氢泄漏、积聚的措施。

7.2.4.2 氢气管道

7.2.4.2.1 氢气站、供氢站和车间内氢气管道的敷设，应符合 GB 50177—2005 中 12.0.10 的规定；厂区内氢气管道架空敷设、直接埋地敷设和明沟敷设时，应分别符合 GB 50177—2005 中 12.0.11、12.0.12 和 12.0.13 的规定；氢气管道与其它管道共架敷设或分层布置时，应符合 GB 4962—2008 中 4.4.6 的规定。

7.2.4.2.2 氢气管道上应设放空管、分析取样口和吹扫置换口，其位置应能满足管道内气体排放、取样、吹扫和置换要求。

7.2.4.3 液氢和氢浆管道

7.2.4.3.1 管道绝热应采用高真空多层绝热、真空粉末绝热或其它绝热效果优良的绝热方式。

7.2.4.3.2 使用波纹膨胀节时，应将其放置于真空夹套内，且管道系统应有足够的弹性以避免热胀冷缩引起管道失效或泄漏。

7.2.4.3.3 不应采用螺纹连接。

7.2.4.3.4 液氢和氢浆管道可能有液体滞留的部位应设有安全泄放装置，液体排放管道应设有坡度。

7.2.4.3.5 液氢和氢浆管道应远离沥青等易燃材料，且应保护管道周围易产生低温脆化的材料。

7.2.4.3.6 液氢和氢浆管道不宜用于长距离输送，氢浆管道应避免固态氢颗粒沉淀和流动分层。

7.2.5 附件

7.2.5.1 安全泄放装置

7.2.5.1.1 安全泄放装置（包括安全阀、爆破片和辅助泄压装置）应满足以下基本要求：

- a) 制造安全泄放装置的单位应当持有相应的特种设备制造许可证；
- b) 安全泄放装置应能保证系统的压力始终不高于系统的最大允许工作压力，其尺寸应适应压力源的最大流量，且在极端条件下仍应有足够的泄放能力；
- c) 若低压氢系统通过压力调节器与高压氢源相连，且低压氢系统的承压上限低于高压氢源的压力，则低压氢系统应设置安全泄放装置以防超压；
- d) 安全泄放装置的材料应能适应氢系统的工作温度，且与氢有良好的相容性；
- e) 液氢或氢浆管道上安装多个安全泄放装置时，应确保各个安全泄放装置不影响管道流速，且运行时不影响其它安全泄放装置的开启压力；
- f) 安全泄放装置和被保护的容器或管道之间不应安装截止阀。

7.2.5.1.2 安全阀还应满足以下要求：

- a) 安全阀的最大泄放量及开启压力应符合 JB 4732—1995 附录 E 中 E6 的规定；
- b) 安全阀的可动部分在不均匀加热或冷却时应灵活可动，且不应使用可能妨碍安全阀正常工作的填料；
- c) 应选用全封闭式安全阀，并应有产品合格证或质量合格证明书，经校准合格铅封后，方可安装；
- d) 安全阀应铅直安装在便于观察和检修的排放管路上且靠近被保护容器的位置；

7.2.5.1.3 爆破片还应满足以下要求：

- a) 爆破片的标定爆破压力应大于系统的工作压力，爆破片与安全阀的并联装置应符合 JB 4732—1995 附录 E 中 E8 的规定；
- b) 爆破片爆破时不应产生火花和金属碎片；
- c) 应根据爆破片的使用寿命，进行定期更换；
- d) 爆破片应设有安全保护盖。

7.2.5.1.4 在设计、安装辅助泄压装置时，应考虑液击、空化等引起的瞬变压力。

7.2.5.2 阀门

7.2.5.2.1 氢气节流阀应采用自启动装置，当流速达到预先设定的最大值时，节流阀应自动关闭。

7.2.5.2.2 氢气管道的切断阀宜采用球阀或截止阀。

7.2.5.2.3 应根据工作压力、工作温度及与氢的相容性等选用阀门材料和密封填料。

7.2.5.2.4 截止阀应安装于液氢回流管线并尽可能靠近容器的位置，在截止阀与容器之间的管道中不应有其它附件。

7.2.5.3 密封件

7.2.5.3.1 应根据氢系统的工作压力、工作温度、与氢的相容性等因素选择密封件。

7.2.5.3.2 使用非金属材料密封件时，应避免氢在非金属材料中的高渗透性导致密封件失效或氢渗漏。

7.2.5.4 过滤器

7.2.5.4.1 应定期或当过滤器的压力降超过规定值时，对过滤器进行清洗或更换。

7.2.5.4.2 过滤器应易于拆卸和清洗，不应通过系统反冲进行清洗。

7.2.5.4.3 应防止氢浆系统中的过滤器被固体氢颗粒堵塞。

7.2.5.4.4 应确定过滤器的数量和安装位置，以降低系统内的杂质含量。过滤器宜安装于加注管路或补给管路。

7.2.5.5 仪表和控制器

7.2.5.5.1 氢系统应装配有必要的仪表和控制器，以监控系统的运行状况；若使用的仪表或控制器为电气设备，还应符合 7.3.5 的规定。

7.2.5.5.2 仪表的精度等级和量程应满足使用要求，并应有产品合格证和检定日期，经校核合格铅封后方可安装，其安装位置应便于作业人员观察和检修。

7.2.5.5.3 应定期校核仪表和控制器，以确保其工作正常。

7.2.5.5.4 用于液氢和氢浆系统的液面计的液位指示应直观，当采用刻度转换式液面计时，应在明显位置标示充装量和刻度换算表。

7.3 氢设施要求

7.3.1 平面布置

7.3.1.1 氢气站、供氢站、氢气罐，与建筑物、构筑物的防火间距应符合 GB 50177—2005 中 3.0.2 的规定，与铁路、道路的防火间距应符合 GB 50177—2005 中 3.0.3 的规定；氢气罐或罐区之间的防火间距应符合 GB 50177—2005 中 3.0.4 的规定；氢气站工艺装置内的设备、建筑物平面布置的防火间距应符合 GB 50177—2005 中 6.0.2 的规定。

7.3.1.2 氢气加氢站、加氢加气合建站、加氢加油合建站内设施之间的防火间距应符合 GB 50516—2010 中 5.0.1 的规定。

7.3.1.3 氢气灌瓶间、氢气汇流排间、空瓶和实瓶的布置应符合 GB 4962—2008 中 4.1.15 的规定。

7.3.1.4 制氢车间的主要通道、设备之间的距离，应符合 GB 50177—2005 中 6.0.11 的规定。

7.3.1.5 氢气压缩机车间的主要通道、压缩机之间的距离，应符合 GB 50177—2005 中 6.0.12 的规定。

7.3.1.6 当氢气站内同时设有氢气压缩机和氧气压缩机时，不应将其设置于同一房间内。

7.3.1.7 氢气加氢站站区内的道路设置符合 GB 50516—2010 中 5.0.4 的规定。

7.3.2 建筑物

7.3.2.1 总则

7.3.2.1.1 建筑物应满足以下基本要求：

- 采用非燃烧材料建造；
- 避免使用易导致氢积聚的结构；
- 无点火源；
- 设置氢气检测报警装置；
- 通风良好；
- 设置泄压装置。

7.3.2.1.2 有爆炸危险房间应符合 GB 50177 的相关规定。

7.3.2.2 控制室

7.3.2.2.1 控制室应远离爆炸危险区域，否则应采用防火墙等对控制室进行保护。

7.3.2.2.2 应通过观察窗或监视系统监视控制室。

7.3.2.2.3 观察窗应使用防弹玻璃，并在满足使用要求的前提下尽可能小。

7.3.2.3 遮棚

7.3.2.3.1 设置于氢气瓶装卸平台的雨棚，其宽度应大于氢气瓶装卸平台的宽度，且其支承和基础应采用非燃烧体。

7.3.2.3.2 建筑物的墙体和顶棚之间应有通风空间，且顶棚内表面应平整，避免死角。

7.3.2.3.3 加氢岛、加氢机安装场所的罩棚应符合 GB 50516—2010 中 8.0.3 的规定。

7.3.2.3.4 制氢间、氢气压缩机间、氢气纯化间、氢气灌瓶间和氢气汇流排间的屋架下弦高度应满足 GB 50177—2005 中 7.0.12 的规定。

7.3.2.4 通风要求

7.3.2.4.1 有爆炸危险的房间，事故排风机的选型应符合 GB 50058 的规定，且不应低于氢气爆炸混合物的级别和组别。

7.3.2.4.2 应避免通风系统将氢带入建筑物内。

7.3.2.4.3 建筑物内有氢储存或操作设备时，应设有通风系统。

7.3.2.4.4 通风系统进口宜设于墙体底部，出口宜设于墙体顶部或建筑物顶部且应朝向安全区域，并应设置雷电防护装置。

7.3.3 禁区

7.3.3.1 应将氢系统及其周围区域划为禁区，并设置围栏。

7.3.3.2 禁区周围应有醒目的警示标记。

7.3.3.3 作业人员进入禁区前，应按规定进行着装并做好防护措施。

7.3.3.4 应掌握禁区内人员、设备的出入情况，并限制禁区内的人员数量。

7.3.4 放空和火炬

7.3.4.1 应根据现场条件、氢气排放速率，确定氢处理方式。

7.3.4.2 现场条件允许、氢排放速率较低或排放量较小时，宜选用放空进行氢处理。放空管应符合 GB 50516—2010 中 6.5.4 的规定。

7.3.4.3 氢排放速率较高或排放量超过放空管的安全处理范围时，宜选用点火方式进行氢处理。

7.3.4.4 应根据火炬的热辐射影响范围、现场风向和风速，确定合适的安全距离。

7.3.5 电气设备

- 7.3.5.1 防爆要求应符合 GB 50058 的规定，且不应低于氢气爆炸混合物的级别和组别。
- 7.3.5.2 电气设备应有防静电接地装置，并应定期检测接地电阻。
- 7.3.5.3 电气设备工作时的表面温度应低于氢在空气中的着火温度。
- 7.3.5.4 在有爆炸危险环境区域内敷设的电缆和导线，应符合 GB 50217 的规定。敷设电缆或导线用的保护钢管，应在以下位置做隔离密封：
 - 电缆或导线引向电气设备接头部件前；
 - 相邻的不同环境之间。

7.3.6 消防设施

- 7.3.6.1 氢气站、供氢站、氢气加氢站、加氢加气合建站和加氢加油合建站应设有消防车通道和消防给水设施。
- 7.3.6.2 氢气加氢站、加氢加油合建站、加氢加气合建站灭火器材的配置，应符合 GB 50516—2010 中 7.1.2 的规定。
- 7.3.6.3 氢系统应设有火灾检测系统、灭火系统及紧急停车系统，并配备便携式灭火器，但电气设备房间不应采用水消防。

7.3.7 报警装置

- 7.3.7.1 当检测到氢系统超压、氢泄漏、氢火焰等异常情况或部件故障时，报警装置应提供声和（或）光报警。
- 7.3.7.2 用于氢气站、供氢站的报警装置应符合 GB 50177—2005 的规定，用于站内撬装式制氢系统时，还应符合 GB/T 19773 或 GB/T 19774 的规定。
- 7.3.7.3 用于氢气加氢站、加氢加油合建站、加氢加气合建站的报警装置应符合 GB 50516—2010 中 7.3 的规定。

7.4 检测要求

7.4.1 氢泄漏检测

- 7.4.1.1 氢气检测报警仪应根据精度、可靠性、交叉敏感性、可维护性、零点漂移、检测范围、响应时间等因素选用，并符合 GB 12358 和 GB 16808 的规定。
- 7.4.1.2 以下位置宜安装有固定式可燃气体检测报警仪：
 - 可能出现氢气泄漏或液氢溢出的位置；
 - 氢气可能积聚的位置；
 - 可能释放氢气的建筑物的排空口；
 - 可能吸入氢气的建筑物吸气口。
- 7.4.1.3 氢系统应配备便携式氢气检测报警仪。
- 7.4.1.4 固定式可燃气体检测报警仪和便携式可燃气体检测报警仪均应定期校验。
- 7.4.1.5 当空气中氢含量达到氢气下可燃极限的 25% 时，氢气检测报警仪应报警。

7.4.2 氢火焰检测

- 7.4.2.1 氢火焰检测报警仪应根据响应时间、检测距离、覆盖范围、灵敏度等因素选用，并符合 GB 50058 的规定。
- 7.4.2.2 氢系统应配备便携式氢火焰检测报警仪。

7.5 火灾和爆炸风险控制

7.5.1 防止氢/氧的意外混合

避免形成氢/氧混合物是防止火灾和爆炸的重要方法，具体要求如下：

- a) 定期对系统进行氢气泄漏检测；
- b) 对易导致氢积聚的密闭空间采用强制通风；
- c) 防止外部空气进入液氢和氢浆系统；
- d) 定期对液氢和氢浆储存容器进行升温 and 清洗，以及时去除杂质；
- e) 氢系统充氢前，进行泄漏检测和惰性气体充分吹扫，液氢系统应使用氢气进行吹扫；
- f) 氢系统向空气开放前，排空系统内的氢气。

7.5.2 杜绝点火源

7.5.2.1 氢系统的爆炸危险区域内，应采取以下措施，以防出现电点火源：

- a) 评估所用材料的静电放电能力；
- b) 防止管道系统中的固体颗粒引发电荷积聚而导致静电放电；
- c) 采用适当的接地方法，以防雷击、闪电放电等产生电点火源；
- d) 防止电器短路或其它电气设备故障产生表面高温、电弧和火花；
- e) 防止作业人员的着装产生静电；
- f) 避免使用便携电话、寻呼机和收音机等易产生电弧的电器。

7.5.2.2 氢系统的爆炸危险区域内，应采取以下措施，以防出现热点火源：

- a) 禁止放置烟花爆竹等易燃易爆物品；
- b) 禁止焊接、吸烟等产生明火的活动；
- c) 控制内燃机和排气烟囱等所排放废气的温度；
- d) 避免管道系统内形成周期性的激波而引起谐振点火。

7.5.2.3 氢系统的爆炸危险区域内，应防止以下现象产生机械点火源：

- 机械冲击或摩擦；
- 金属断裂；
- 机械振动。

7.5.3 防止产生富氧浓缩物

使用低温绝热管道进行液氢或氢浆输送时，应确保管道各部分充分绝热，以防因管道外的空气冷凝产生富氧浓缩物而使管道周围的材料变得易燃。

7.6 操作要求

7.6.1 操作程序

7.6.1.1 作业人员应按规定的操作程序操作。

7.6.1.2 清洗、吹扫、冷却、储存（特别是充装）、输送、泄漏检测、设备修理和改造等操作应制定操作程序。

7.6.1.3 应定期评估操作程序以确保其有效性。

7.6.2 作业人员

7.6.2.1 作业人员上岗时应穿符合 GB 12014 规定的阻燃、防静电工作服和符合 GB 21146 规定的防静电鞋，且应配戴必要的个人防护装置。

7.6.2.2 作业人员应经过岗位培训，考试合格后持证上岗。特种作业人员应经过专业培训，持有特种作业资格证，并在有效期内持证上岗。

7.6.2.3 作业人员应定期进行再培训，并定期审查培训项目以确保培训方案实时有效。

7.6.2.4 作业人员应能处理相关设备和系统的紧急情况，包括氢泄漏、火灾等突发事件发生时的人员疏散、意外伤害的预防和紧急救护等。

7.6.2.5 作业人员应无色盲或其它影响正常作业的生理缺陷或疾病，且作业前不应进行影响正常作业的活动。

7.6.3 修理和改造

7.6.3.1 在可能含氢的密闭空间内进行氢系统修理或改造前，应对密闭空间进行充分吹扫以确保作业人员的安全。

7.6.3.2 修理、改造氢系统前，应先用氮气将氢气置换到符合动火规定，并切断相应的电源、气源，且用盲板切实隔断与尚在运行中的设备、管道和容器的联系后，方可开始作业。

7.6.3.3 修理、改造后的氢系统应进行耐压、吹扫和泄漏检测，符合要求后方可投入使用。

7.6.4 污染控制

7.6.4.1 应评估清洗剂和被清洗部件材料的相容性。系统进行拆卸清洗时，易受损部件应单独清洗。

7.6.4.2 系统清洗后应通过抽真空或使用干燥氮气吹扫等方式进行干燥。

7.6.5 储存和输送操作

氢储存和输送操作应遵循以下指导原则：

- a) 不应使氢系统的任何设备超压；
- b) 氢系统在与其它系统连接前应先接地；
- c) 发生泄漏或火灾时应及时停止储存和输送操作；
- d) 应避免在闪电风暴天气进行储存和输送操作；
- e) 采取控制充氢速率、预冷等措施，防止充装时氢气瓶的壁温超过规定的允许值；
- f) 不应将液氢和氢浆储存容器盛装过满，也不应将其迅速冷却；
- g) 氢系统周围应保持干净；
- h) 应排除储存和操作区域的点火源，并使用路障、警告标志等对储存和操作区域进行管制。

7.6.6 运输

7.6.6.1 氢运输应满足国家和地方关于危险（易燃）品运输的法律法规的规定。

7.6.6.2 不应使用客用交通工具进行氢运输。使用货轮运输时，储氢容器应与住宿区隔离。

7.7 突发事件

7.7.1 突发事件处理

7.7.1.1 泄漏

7.7.1.1.1 应及时切断泄漏源，并对泄漏污染区进行通风，排除泄漏污染区可能存在的点火源。作业人员进入泄漏污染区时，应配戴个人防护装置。

7.7.1.1.2 若无法切断泄漏源，应立即疏散泄漏污染区人员，保持泄漏污染区的通风，并立即通知消防部门和报告上级部门。

7.7.1.2 火灾和爆炸

7.7.1.2.1 应及时切断氢源。若不能立即切断氢源，应使氢系统保持正压状态，以防氢系统发生回火，并用消防水雾强制冷却着火设备。

7.7.1.2.2 应采取有效措施，防止火灾扩大，并用消防水雾喷射其它引燃物质和相邻设备。

7.7.1.2.3 氢系统的容器、管道等发生超压失效或火灾导致氢系统发生爆炸时，应立即疏散危险区域人员，并立即通知消防部门和报告上级部门，迅速组织救援。

7.7.1.3 液氢溢出

7.7.1.3.1 应立即关闭上游阀门以切断溢出源，撤离液氢溢出区域，并对液氢溢出区域进行通风。

7.7.1.3.2 不应将可爆雾团的扩散范围作为氢/空气混合物的扩散范围，更不应以此作为建立安全措施的依据。

7.7.2 突发事件救援

7.7.2.1 消防

7.7.2.1.1 消防人员应采用相关部门推荐的处理方法，立即采取救援措施，并建立警戒区域，及时疏散警戒区域内的非救援人员。

7.7.2.1.2 不应在警戒区域内使用无防爆设施的电器设备、无防火装置的燃油机动车等可能导致二次事故的救援设施。

7.7.2.1.3 火灾发生时，消防人员应配戴个人防护装置进入现场，并预防外露皮肤烧伤。

7.7.2.1.4 紧急情况下，受过意外事故处理培训的现场人员，可协助消防人员进行救援工作。

7.7.2.2 紧急医疗救护

7.7.2.2.1 应及时对烧伤或在爆炸中受伤的人员进行紧急医疗处理，情况严重者应立即送医院治疗。

7.7.2.2.2 因接触低温氢气、液氢或氢浆而冻伤的部位不应暴露于温度过高的环境中，对冻伤部位简单包扎后，应由医护人员或在医护人员指导下进行医疗处理。

7.7.2.3 进入限制区域时的保护

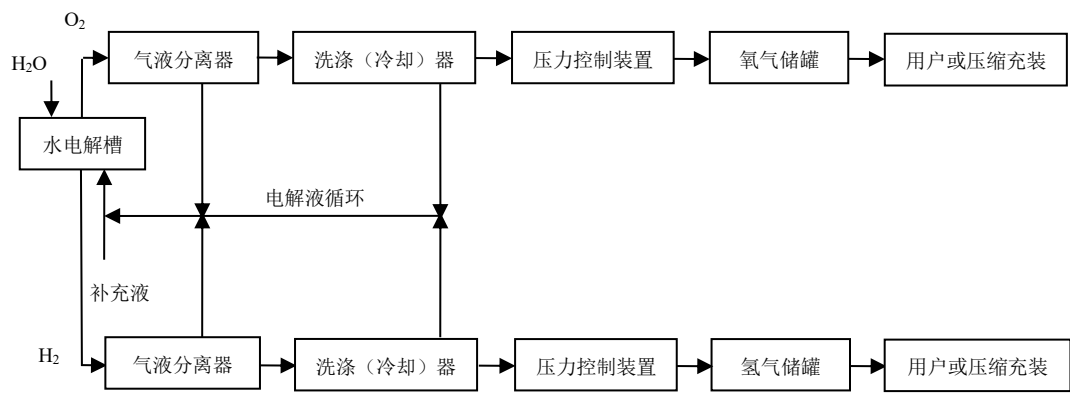
7.7.2.3.1 救援人员进入限制区域前应配戴齐全个人防护装置，并用已校准的直读仪器检测限制区域内的氧含量、氢含量和有毒物质含量。

7.7.2.3.2 应提供救生索等撤离设施供救援人员使用，救援人员应按规定的操作程序操作。

附录 A
(资料性附录)
典型制氢系统

A.1 水电解制氢系统

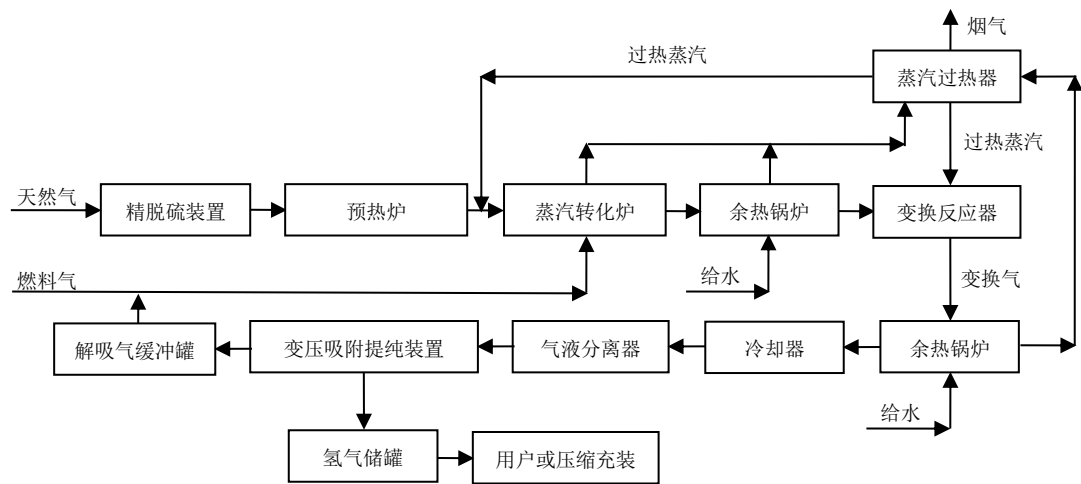
水电解制氢系统可分为常压型和压力型，其主体设备为水电解槽。水电解槽由若干个电解池组成，每个电解池由电极、隔膜和电解质溶液等构成，由此构成各种形状和规格的水电解制氢系统。水电解制氢系统结构由制氢装置的工作压力、氢（氧）气的用途、气体纯度及其允许杂质含量等因素确定。水电解制氢系统框图见图A.1。



图A.1 水电解制氢系统框图

A.2 天然气蒸汽转化制氢系统

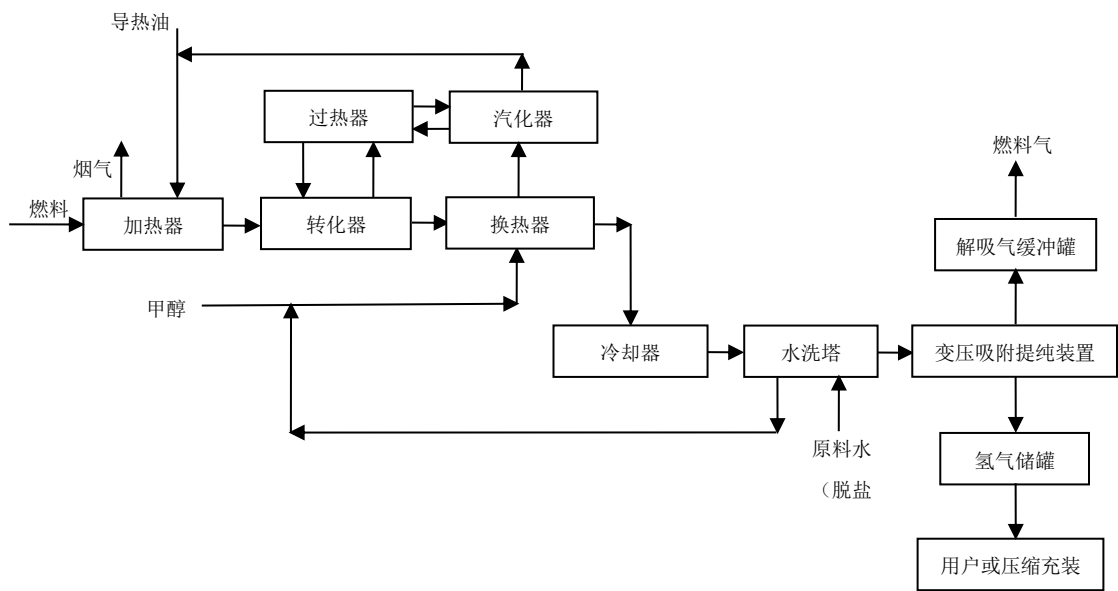
天然气蒸汽转化制氢系统主要由转化炉、变换反应器、换热设备和变压吸附提纯装置等设备组成。天然气脱硫精制后，按一定的水碳比与水蒸气混合，预热后进入转化炉。在催化剂的作用下转化反应产生出H₂、CO、CO₂等气体，经余热锅炉回收热量后进入变换器，将CO变换为CO₂得到变换气。变换气经回收热量的余热锅炉、冷却器后降至常温，再经变压吸附提纯装置提纯得到纯度较高的氢气。变压吸附提纯装置的解吸气中含有CO、CH₄等可燃组分，可作为转化炉的燃料气。天然气蒸汽转化制氢系统框图见图A.2。



图A.2 天然气蒸汽转化制氢系统框图

A.3 甲醇转化制氢系统

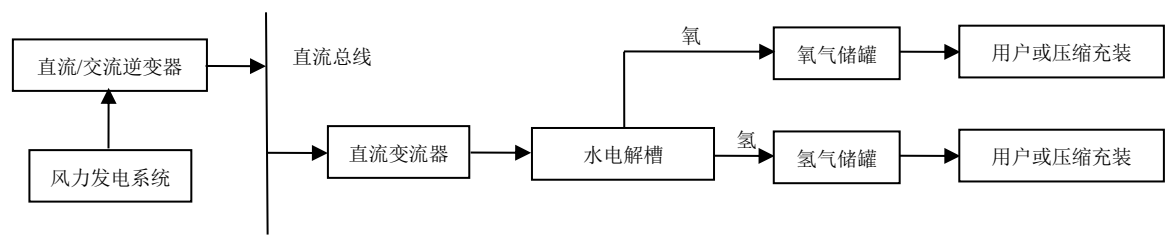
甲醇转化制氢系统主要由加热炉、转化器、过热器、汽化器、换热器和变压吸附提纯装置等设备组成。甲醇和脱盐水按一定比例混合，由换热器预热后送入汽化器，汽化后的甲醇、蒸汽再经导热油过热后进入转化器催化变换为 H_2 、 CO_2 的转化气。转化气经换热、冷却冷凝后进入脱盐水水洗塔，塔底收集未转化的甲醇和水以循环使用，水洗塔顶的转化气送变压吸附提纯装置。转化器、过热器和汽化器均由加热炉加热后的导热油提供热量。甲醇转化制氢系统框图见图A.3。



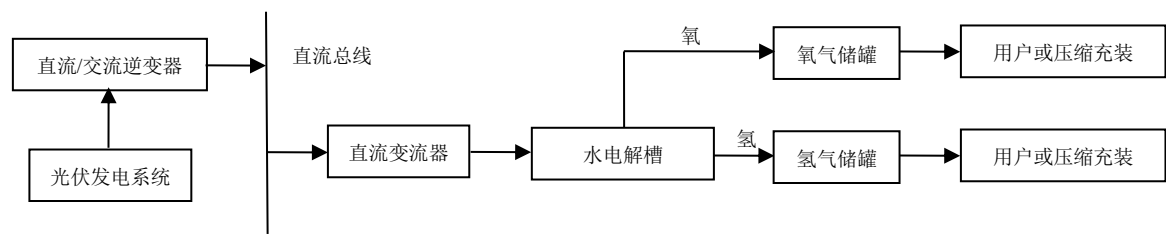
图A.3 甲醇转化制氢系统框图

A. 4 风能和太阳能电解水制氢系统

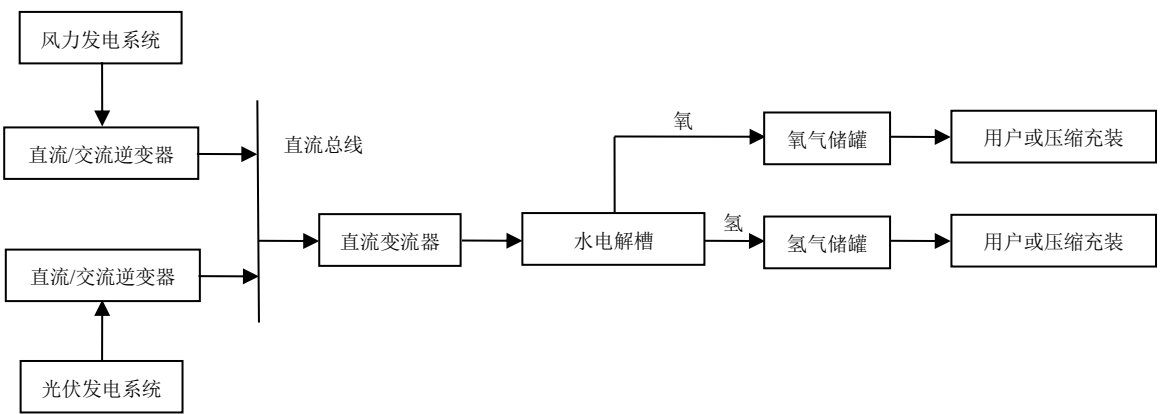
由风能和太阳能转化的电能虽可直接用于电力供应，但存在电能难以有效储存、利用率较低、电力供应不稳定等缺点。若将风能和太阳能转化的部分电能用于电解水制氢获得氢气，可起到电能储存及电力负荷的削峰填谷作用。风能电解水制氢系统、太阳能电解水制氢系统和风能太阳能联合式电解水制氢系统的系统框图分别见图A.4、图A.5和图A.6。



图A. 4 风能电解水制氢系统框图



图A. 5 太阳能电解水制氢系统框图



图A. 6 风能太阳能联合式电解水制氢系统框图

附 录 B
(资料性附录)
氢的性质

B.1 常态氢和仲氢的物理和热物理性质

常态氢和仲氢的物理和热物理性质见表B.1。

表B.1 常态氢和仲氢的物理和热物理性质

性质	常态氢	仲氢
常温常压(NTP)下的性质		
温度/K	293.15	293.15
绝对压力/kPa	101.325	101.325
密度/(kg·m ⁻³)	0.083 76	0.083 76
定压比热容 Cp/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	14.33	14.89
绝热指数 Cp/Cv	1.416	1.383
焓/(kJ·kg ⁻¹)	4 129.1	4 097.7
内能/(kJ·kg ⁻¹)	2 919.5	2 888.0
熵/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	70.251	64.437
音速/(m·s ⁻¹)	1 294	1 294
黏度/(μPa·s)	8.81	8.81
导热系数/[mW·(m·K) ⁻¹]	183.8	191.4
温度为300K时常态氢转化为仲氢的转化热/(kJ·kg ⁻¹)	27.56	
体积膨胀系数/K ⁻¹	0.003 33	0.003 33
临界点 (CP) 下的性质		
温度/K	33.19	32.976
绝对压力/kPa	1 315	1 292.8
密度/(kg·m ⁻³)	30.12	31.43
焓/(kJ·kg ⁻¹)	577.4	38.5
内能/(kJ·kg ⁻¹)	—	2.8
熵/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	27.07	17.6
音速/(m·s ⁻¹)	—	350
黏度/(μPa·s)	(3.5)	3.5
标准沸点 (NBP) 下的特性		
温度/K	20.930	20.268
绝对压力/kPa	101.325	101.325
密度/(kg·m ⁻³)	1.331 (V) 70.96 (L)	1.338 (V) 70.78 (L)
汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	446.0	445.6

表B.1 (续)

性质	常态氢	仲氢
定压比热容 $Cp/[\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	12.20 (V)	12.15 (V)
	9.772 (L)	9.688 (L)
绝热指数 Cp/Cv	1.683 (V)	1.869 (V)
	1.698 (L)	1.688 (L)
焓/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	717.98 (V)	189.3 (V)
	272.0 (L)	-256.3 (L)
内能/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	641.9 (V)	113.6 (V)
	270.7 (L)	-257.7 (L)
熵/ $[\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	39.16 (V)	29.97 (V)
	17.32 (L)	7.976 (L)
音速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	357 (V)	355 (V)
	1 101 (L)	1 093 (L)
黏度/ $(\mu\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.1 (V)	1.1 (V)
	13.2 (L)	13.2 (L)
导热系数/ $[\text{mW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	16.9 (V)	16.9 (V)
	99.0 (L)	99.0 (L)
体积膨胀系数/ K^{-1}	0.064 2 (V)	0.064 2 (V)
	0.016 4 (L)	0.016 4 (L)
常态氢转化为仲氢的转化热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	527.14	
三相点（TP）下的性质		
温度/K	13.957	13.803
绝对压力/kPa	7.205	7.042
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.129 8 (V)	0.125 6 (V)
	77.21 (L)	77.021 (L)
	86.71 (S)	86.50 (S)
定压比热容 $Cp/[\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	10.53 (V)	10.52 (V)
	6.563 (L)	6.513 (L)
	— (S)	— (S)
绝热指数 Cp/Cv	1.695 (V)	1.693 (V)
	1.388 (L)	1.382 (L)
	— (S)	— (S)
汽化潜热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	452.0	449.2
熔化潜热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	58.09	58.29
升华潜热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$		507.39
焓/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	669.67 (V)	140.3 (V)
	217.6 (L)	-308.9 (L)
	159.5 (S)	-367.2 (S)
内能/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	612.52 (V)	84.23 (V)
	215.8 (L)	-309.0 (L)
	157.7 (S)	-367.3 (S)

表B.1 （续）

性质	常态氢	仲氢
熵/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	46.4 (V)	37.52 (V)
	14.2 (L)	4.961 (L)
	10.1 (S)	0.739 (S)
音速/(m·s ⁻¹)	307 (V)	305 (V)
	1 282 (L)	1 273 (L)
	— (S)	— (S)
黏度/(μPa·s)	0.74 (V)	0.74 (V)
	26.0 (L)	26.0 (L)
导热系数/[mW·(m·K) ⁻¹]	12.4 (V)	12.4 (V)
	73.0 (L)	73.0 (L)
	900 (S)	900 (S)
体积膨胀系数/K ⁻¹	0.075 2 (V)	0.075 2 (V)
	0.010 2 (L)	0.010 2 (L)
		0.004 94 (S)
其它性质		
分子量	2.015 94	2.015 94
常温常压下的气态氢与标准沸点下的液态氢密度相同时所需压力 （固定容积，无泄漏）/MPa	172	
焦耳—汤姆逊效应的最高转化温度/K		200
在常温常压空气中的扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)		0.61
注1：（L）：液相。 注2：（S）：固相。 注3：（V）：气相。 注4：C _v ：定容比热容/[kJ·(kg·K) ⁻¹]. 注5：圆括号内的为估计值。		

B.2 氢气与其它常见气体的热物理性质比较

氢气与氦气、氮气、甲烷的热物理性质比较见表B.2。

表B.2 氢气与其它常见气体的热物理性质比较

气体	20℃，100kPa下的密度/ (kg·m ⁻³)	20℃，100kPa下的黏度/ (μPa·s)	在空气中的扩散系数/ (cm ² ·s ⁻¹)	低热值/ (mJ·kg ⁻¹)
氢气（H ₂ ）	0.082 7	8.814	0.61	119.93
氦气（He）	0.164 0	19.609	0.57	—
氮气（N ₂ ）	1.149 6	17.637	0.20	—
甲烷（CH ₄ ）	0.659 4	11.023	0.16	50.02

B.3 液氢与其它液化气体的热物理性质比较

液氢与液氦、液氮、液态甲烷的热物理性质比较见表B.3。

表B.3 液氢与其它液化气体的热物理性质比较

液化气体	沸点温度/ K	液体密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	气体密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	汽化热/ ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)
氢气 (H_2)	20.3	70.8	1.34	454.6
氦气 (He)	4.2	125.0	16.89	20.6
氮气 (N_2)	77.3	808.6	4.53	198.6
甲烷 (CH_4)	111.6	422.5	1.82	510.4

附 录 C
(资料性附录)
氢的性质

C.1 氢的燃烧特性

氢的燃烧特性见表C.1。

表C.1 氢的燃烧特性

特性	值
燃烧热/(kJ·g ⁻¹)	119.93~141.86
可燃极限（体积分数）/%	4.0~75（常温常压空气中） ^a 4.1~94（常温常压氧气中） ^a
空气中的化学计量比浓度（体积分数）/%	29.53
空气中的最小点火能量/mJ	0.017
最小点火能量对应的氢浓度（体积分数）/%	22~26
空气中的着火温度/K	858
氧气中的着火温度/K	833
空气中的火焰温度/K	2 318
常温常压空气中的燃烧速度/(m·s ⁻¹)	2.65~3.25
化学计量比氢气/空气混合物的爆燃速度/(m·s ⁻¹)	975
常温常压空气中的爆轰速度/(m·s ⁻¹)	1480~2150
常温常压空气中的最大爆轰压力/kPa	720
常温常压空气中的最大试验安全间隙/cm	0.008
常温常压空气中的灭火距离/cm	0.064
极限氧指数（体积分数）/%	5.0
^a 该值仅作参考。	

C.2 氢气与其它常见燃料的燃烧特性比较

氢气与甲醇、甲烷、丙烷、辛烷在25℃，101.3 kPa下的燃烧特性比较见表C.2。

表C.2 氢气与其它常见燃料的燃烧特性比较

燃料	下可燃极限 ^a / %	化学计量比混合物浓度 ^a / %	上可燃极限 ^a / %	最小点火能量 / mJ	自燃温度/ K	层流燃烧速度/ (cm·s ⁻¹)
氢气 (H ₂)	4.0	29.5	75.0	0.017	858	270
甲醇 (CH ₃ OH)	6.0	12.3	36.5	0.174	658	48
甲烷 (CH ₄)	5.3	9.5	17.0	0.274	810	37
丙烷 (C ₃ H ₈)	1.7	4.0	10.9	0.240	723	47
辛烷 (C ₈ H ₁₈)	1.0	1.9	6.0	0.240	488	30

附录 D
(资料性附录)
氢环境常用金属材料和非金属材料

D.1 金属材料

- D.1.1 氢环境常用的金属材料有S31603、S31608、6061、4130X、X42、X52等。
- D.1.2 压力超过41 MPa时，S31603和S31608的化学成分和经固溶处理后室温下的力学性能要求分别见表D.1和表D.2，4130X的化学成分和经热处理后室温下的力学性能要求分别见表D.3和表D.4。
- D.1.3 6061铝合金的化学成分和经时效热处理后室温下的力学性能要求分别见表D.5和表D.6。
- D.1.4 X42 (L290)、X52 (L360) 常用于工作压力不超过21 MPa的输氢管道，X42和X52的化学成分和经热处理后室温下的力学性能要求分别见表D.7和表D.8。

D.2 非金属材料

- D.2.1 氢环境密封件常用非金属材料有硅橡胶、氟硅橡胶、氟碳橡胶、三元乙丙橡胶、氢化丁腈橡胶等。
- D.2.2 氢环境常用塑料有聚乙烯（包括改性聚乙烯）、聚酰胺（包括改性聚酰胺）。

表D.1 S31603 和 S31608 的化学成分

统一数字代号	化学成分（质量分数）/%									镍当量
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	N	Ni _{eq} ^a
S31603	≤0.03	≤2.00	≤0.75	16.0~18.0	12.0~14.0	≤0.035	≤0.020	2.00~3.00	≤0.10	≥28.5%
S31608	≤0.08	≤2.00	≤0.75	16.0~18.0	12.0~14.0	≤0.035	≤0.020	2.00~3.00	≤0.10	≥28.5%
^a Ni _{eq} =12.6C+0.35Si+1.05Mn+Ni+0.65Cr+0.98Mo										

表D.2 经固溶处理的 S31603 和 S31608 室温下的力学性能

统一数字代号	力学性能							
	规定非比例延伸强度 R _{p0.2} /MPa	规定非比例延伸强度 R _{p1.0} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa	断面收缩率/% ^a	断后伸长率 A/%	硬度值		
						HBW	HRB	HV
S31603	≥180	≥260	≥490	≥70	≥40	≤217	≤95	≤220
S31608	≥205	≥260	≥520	≥70	≥40	≤217	≤95	≤220
^a 在氢气和空气中的断面收缩率之比不小于0.9。								

表D.3 4130X 的化学成分

牌号	化学成分（质量分数）/%						
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
4130X	0.25~0.35	0.40~0.90	0.15~0.35	≤0.008	≤0.015	0.80~1.10	0.15~0.25

表D.4 经热处理的 4130X 室温下的力学性能

牌号	力学性能				
	抗拉强度 R _m /MPa ^a	屈服比	断后伸长率 A/%	冲击吸收功（-40℃） KV ₂ /J	侧膨胀值（LE） /mm
4130X	≤880	≤0.86	≥20	≥47	≥0.53
^a 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。					

表D.5 6061 铝合金的化学成分

牌号	化学成分（质量分数）/%										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其它		Al
									单个	合计	
6061	0.40~0.80	≤0.70	0.15~0.40	≤0.15	0.80~1.20	0.04~0.35	≤0.25	≤0.15	≤0.05	≤0.15	余量

表D.6 经时效热处理的 6061 铝合金室温下的力学性能

牌号	力学性能		
	规定非比例延伸强度 R _{p0.2} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa	断后伸长率 A/%
6061	≥240	≥290	≥10

表D.7 X42 和 X52 的化学成分

钢级	化学成分（质量分数）/%								碳当量 CE _{IIW} ^a
	C	Mn	P	S	Si	V	Nb	Ti	
X42	≤0.22	≤1.30	≤0.025	≤0.015	≤0.45	0.05	0.05	0.04	≤0.43%
X52	≤0.22	≤1.40	≤0.025	≤0.015	≤0.45	Nb+V+Ti≤0.15			≤0.43%
^a CE _{IIW} =C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15									

表D.8 经热处理的 X42 和 X52 室温下的力学性能

钢级	力学性能			
	抗拉强度 R _m /MPa	屈服强度 R _{t0.5} /MPa	屈服比	断后伸长率 A/%
X42	415~665	290~495	≤0.93	≥A _f ^a
X52	460~760	360~530	≤0.93	≥A _f ^a
^a 规定最小断后伸长率应采用下列公式确定： $A_f = 1940 \frac{A_{xc}^{0.2}}{U^{0.9}}$ 式中：A _{xc} 为适用的拉伸试样横截面积，单位为平方毫米（mm ² ），具体如下：				

表D.8 （续）

—圆棒试样：直径12.7 mm和8.9 mm的圆棒试样为 130 mm²；直径6.4 mm的圆棒试样为65 mm²； —板状试样：取485 mm²和试样横截面积两者的较小者，其试样横截面积由规定外径和规定壁厚计算，且圆整到最邻近的10 mm²。 <i>U</i>为规定最小抗拉强度，单位为兆帕（MPa）。
