

ICS 23.020.30

J 74

T/CATSI

团 体 标 准

T/CATSI 05XXX—20XX

固定式真空绝热液氢压力容器专项技术要求

Special technical requirements for Static Vacuum-insulated Liquid Hydrogen

Pressure Vessels

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国技术监督情报协会 发布

目 次

前言.....II

引言.....III

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语、定义和符号.....3

4 通用要求.....3

5 材料.....3

6 设计.....8

7 安全附件、仪表和装卸附件.....14

8 制造.....17

9 检验与试验.....19

附录 A（规范性） 静态日升压速率检测.....21

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》的规定起草。

本文件规定了固定式真空绝热液氢压力容器的基本安全技术要求。本文件在理论分析和试验研究基础上，根据 TSG 21 的相关要求，并参考了 GB/T 18442.1~6、美国 CGA H-3 和 ASME 的相关要求进行编制。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国技术监督情报协会危化品储运装备技术与信息化工作委员会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次制定。

引 言

随着我国氢能应用的快速发展，对氢能储运装备的需求越来越迫切。液氢是比较经济和高效的氢能储存方式，受到装备制造企业和相关企业的广泛关注。为了解决液氢装备制造行业标准缺失问题，有必要制定液氢储运容器相关标准。

本文件是由中国技术监督情报协会危化品储运装备技术与信息化工作委员会制定和归口的有关固定式真空绝热液氢压力容器的专项技术要求标准。本文件规定了固定式真空绝热液氢压力容器的材料、设计、制造、检验与试验等方面的基本安全技术要求。本文件没有必要、也不可能囊括适用范围内固定式真空绝热液氢压力容器的所有技术细节，因此，在满足法规所规定的基本安全要求的前提下，不禁止本文件中没有特别提及的技术内容。本文件不能作为具体产品建造及使用的手册，亦不能替代培训、工程经验和工程评价。因此制造单位还应制定具体的产品标准，用于指导固定式真空绝热液氢压力容器的设计和制造。

本文件规定的技术方法和技术要求不涉及任何专利。但注意本文件的工程应用可能会涉及特定专利，标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件中关于固定式真空绝热液氢压力容器的一些技术内容，为国内首次提出，还缺乏成熟的使用经验验证。若使用者在应用本文件的过程中，产生了不可预见的问题，并造成了人身安全事故和经济损失，委员会及编制单位和个人不承担任何责任。

固定式真空绝热液氢压力容器专项技术要求

1 范围

1.1 本文件规定了固定式真空绝热液氢压力容器（以下简称：液氢容器）材料、设计、制造等方面的基本专项技术要求。

1.2 本文件适用于同时满足以下条件的深冷容器：

- a) 内容器设计压力不小于 0.3MPa 且不大于 1.21MPa；
- b) 工作压力不大于 1.1MPa；
- c) 几何容积不小于 5.0m³；
- d) 绝热方式为高真空多层绝热；
- e) 储存介质为液氢。

1.3 本文件不适用于下列范围的容器：

- a) 内容器和外壳材料为有色金属或非金属的；
- b) 真空粉末绝热、堆积绝热形式的。

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（所有部分） 压力容器

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法

GB/T 228.4 金属材料 拉伸试验 第 4 部分：液氮试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 1447 纤维增强塑料拉伸性能试验方法

GB/T 1448 纤维增强塑料压缩性能试验方法

GB/T 1449 纤维增强塑料弯曲性能试验方法

GB/T 1450.1 纤维增强塑料层间剪切强度试验方法

GB/T 1451 纤维增强塑料简支梁式冲击性能试验方法

GB/T 1463 纤维增强塑料密度和相对密度试验方法

GB/T 1954 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法

GB/T 2572 纤维增强塑料平均线膨胀系数试验方法

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 3139 纤维增强塑料导热系数试验方法

GB 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备通用要求

GB/T 4208 外壳防护等级（IP 代码）

GB/T 13550 5A 分子筛及其测定方法

GB/T 14976 流体输送用不锈钢无缝钢管

GB/T 18442.1~6-2019 固定式真空绝热深冷压力容器

GB/T 18443.1~8-2010 真空绝热深冷设备性能试验方法

GB/T 20801.3-2006 压力管道规范 工业管路 第3部分：设计与计算

GB/T 24511 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带

GB/T 25774.1 焊接材料的检验 第1部分：钢、镍及镍合金熔敷金属力学性能试样的制造及检验

GB/T 26929 压力容器术语

GB/T 31480 深冷容器用高真空多层绝热材料

GB/T 31481 深冷容器用材料与气体的相容性判定导则

HG/T 2690 13X 分子筛

JB 4732-1995 钢制压力容器-分析设计标准（2005 确认）

NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件

NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

NB/T 47016 承压设备产品焊接试件的力学性能检验

YS/T 599 超细氧化钪粉

TSG 07 特种设备生产和充装单位许可规则

TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程（含第1号修改单）

ISO 11114-1 气瓶-气瓶及瓶阀材料与盛装气体的相容性 第1部分：金属材料（Gas cylinders - Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 1: Metallic materials）

ISO 11114-2 气瓶-气瓶及瓶阀材料与盛装气体的相容性 第2部分：非金属材料（Gas cylinders - Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 2: Non-metallic materials）

CGA S-1.3 压力泄放装置标准-第3部分-固定式压缩气体存储容器 (Pressure relief device standards-part3: Stationary storage containers for compressed gases)

3 术语、定义和符号

GB/T 150、GB/T 18442、GB/T 26929 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 术语和定义

3.1.1

冷态几何容积 Cold geometric volume

冷态几何容积是指内容器处于液氢沸点温度下时的实际几何容积。

3.1.2

冷充试验 Cold fill test

在液氢容器制造完成且内容器露点不高于-40℃的情况下，从顶部充装管线向容器内部充注一定量的液氮，以检测容器在低温下的总体性能。

3.2 符号

GB/T 150、GB/T 18442界定的符号适用于本文件。

4 通用要求

4.1 液氢容器除应遵守国家颁布的有关法律、规章、安全技术规范的要求，且应满足相关标准的规定。

4.2 本文件规定了液氢容器生产的专项技术要求。制造单位应制定液氢容器产品企业标准，明确适用范围以及材料、设计、制造、检验与试验、安全防护等方面的技术要求。企业标准的技术要求应不低于相关安全技术规范的规定和本文件的相关要求。

4.3 液氢容器的设计和制造单位应按 TSG 07 的规定，取得国家有关主管机构颁发的相应资格证书。

4.4 液氢容器的设计委托方应以书面形式向设计单位提出至少包括需遵循的法规标准、操作参数、使用地、容器使用年限、真空使用年限、真空绝热性能等液氢容器的设计条件。

4.5 液氢容器的设计、制造和使用单位的基本职责应符合 TSG 21 的相关要求。

5 材料

5.1 一般要求

5.1.1 材料的选择应考虑材料的力学性能、物理性能和工艺性能，以及与液氢的相容性。

- 5.1.2 罐体材料的使用应当符合 TSG 21、GB/T 150.2 以及相应标准的规定。
- 5.1.3 材料的性能、质量、规格与标志，应当符合相应材料标准的规定。
- 5.1.4 压力容器材料制造单位应向材料使用单位提供质量证明书，材料质量证明书的内容应当齐全、清晰并且印制可以追溯的信息化标识，加盖材料制造单位质量检验章；可追溯的信息包括材料制造单位名称、材料牌号、规格、炉批号、交货状态、质量证明书签发日期等内容；可追溯的信息化标识包括二维码、条码等。
- 5.1.5 可能与氧气或富氧环境接触的材料应与氧相容，相容性试验方法与试验结果判定应符合 GB/T 31481 的规定。
- 5.1.6 内容器主要受压元件和管路的材料应采用液氢容器专用不锈钢钢板、钢锻件及钢管。应按照 TSG21 的要求，材料研制单位应制定企业标准并且按照相关规定向社会公示，提供化学成分、拉伸性能等必要的材料数据。材料经过市场监管总局核准的压力容器型式试验机构的试验验证，并且出具型式试验报告，证明其各项性能指标能够满足 TSG 21、相应标准和本文件要求的，可以用于制造液氢容器。
- 5.1.7 内容器主要受压元件和管路的材料采用液氢容器专用不锈钢钢板、钢锻件及钢管时，压力容器制造单位应当对其进行化学成分（按炉号）、力学性能（按炉批号）的验证性复验，复验结果经过监督检验机构确认合格后，可以投料使用，材料复验报告应当纳入产品质量证明文件。
- 5.1.8 内容器主要受压元件材料的铁素体测量值不大于 1%^注。

注：本文件中铁素体测量值为使用铁磁性铁素体测量仪所测得的值。

5.2 钢板

5.2.1 内容器用钢板

- 5.2.1.1 内容器受压元件用钢板应选用液氢容器专用不锈钢钢板，钢板应以固溶状态交货，热轧钢板表面加工类型不低于 1D 级，冷轧钢板表面加工类型不低于 2B 级。
- 5.2.1.2 内容器受压元件用钢板材料的力学性能及化学成分应符合公布企业标准的规定，且不低于表 1、表 2 和表 3 的规定，以及 TSG 21 和相应标准要求。

表1 液氢容器专用不锈钢板、锻件、钢管化学成分

名称	材料标准/ 企业标准	数字代号/ 企业钢号	化学成分									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
钢板	GB/T24511/ QBXXXX	S31608/ TAS31608-LH	0.05~ 0.08	0.75	2.00	0.030	0.015	16.00~ 18.00	10.80~ 14.00	2.00~ 3.00	-	0.06~ 0.10
锻件	GB/T14976/ QBXXXX	S31608/ TAS31608-LH	0.05~ 0.08	0.75	2.00	0.030	0.015	16.00~ 18.00	10.80~ 14.00	2.00~ 3.00	-	0.06~ 0.10
钢管	NB/T47010/ QBXXXX	S31608/ TAS31608-LH	0.05~ 0.08	0.75	2.00	0.030	0.015	16.00~ 18.00	10.80~ 14.00	2.00~ 3.00	-	0.06~ 0.10

注：表中所列成分除标明范围或最小值外，其余均为最大值。

表2 液氢容器专用不锈钢板、锻件、钢管力学性能指标

名称	材料标准/ 企业标准	数字代号	交货状态	厚度 mm	室温强度指标 MPa		断后伸长 率 A/%
					R _{p0.2}	R _m	
钢板	GB/T24511/ QBXXXX	S31608/ TAS31608-LH	固溶处理	3~30	≥220	≥520	≥40
钢管	GB/T14976/ QBXXXX	S31608/ TAS31608-LH	固溶处理	-	≥220	≥520	≥40
锻件	NB/T47010/ QBXXXX	S31608/ TAS31608-LH	固溶处理	-	≥220	≥520	≥40

表3 液氢容器专用不锈钢板、锻件、钢管冲击性能要求

数量	试验温度 ℃	3 个标准试样冲击功平均值 K _{V2}		备注
		冲击能量 J	侧向膨胀量 mm	
1 组（3 个）	-196	≥70	≥0.76	标准试样 10*10*55
注 1：三只试样的冲击吸收功平均值需满足规定值，至多允许有一个试样的冲击吸收功低于规定值，但不得低于规定值的 70%。 注 2：宽度为 7.5mm 或 5mm 的小尺寸冲击试样的冲击功指标，分别为标准试样冲击功指标的 75%或 50%。				

5.2.2 外壳用钢板

外壳用钢板应符合 GB/T 18442.2-2019 中 5.2.2 条的规定。

5.3 钢锻件

5.3.1 钢锻件应满足 GB/T18442.2 第 5.3 条的要求。

5.3.2 受压元件用不锈钢锻件还应满足以下要求：

- a) 应选用液氢容器专用不锈钢锻件，锻件级别应不低于Ⅲ级，交货状态固溶处理；
- b) 力学性能及化学成分应符合公布企业标准的规定，且不低于表 1、表 2 和表 3 的规定，以及 TSG 21 和相应标准要求。

5.4 钢管和管件

- 5.4.1 钢管与管件应满足 GB/T18442.2 第 5.4 条的要求。
- 5.4.2 受压元件用钢管、管件的化学成分、力学性能应符合公布企业标准的规定，且不低于表 1、表 2 和表 3 的规定，以及 TSG 21 和相应标准要求。对于无法加工小试样的管子，可以免除低温冲击试验。
- 5.4.3 当管件采用钢锻件时，应符合 5.3 的规定。
- 5.4.4 钢管应经耐压试验合格，试验压力满足 GB/T14976 的相关要求。
- 5.4.5 采用冷成型时，应控制成型后的铁素体测量值不大于 8%，当超过 8%时应进行固溶处理。

5.5 焊接材料

- 5.5.1 焊接材料的选用应考虑焊接接头力学性能与罐体母材的匹配，且应符合 TSG 21 及本文件的规定。
- 5.5.2 焊接材料应按本文件及 NB/T 47014 的要求进行焊接工艺评定，评定合格后方可使用。进行内容器焊接工艺评定时，应对不同焊接方法所用内容器焊接材料的熔敷金属进行拉伸、冲击试验和铁素体含量检测，且需满足表 4 要求。

表4 熔敷金属试验要求

序号	试验项目	试样数量	试验温度℃	合格指标	试验方法
1	铁素体含量	1	室温	≤8%	GB/T 1954
2	全焊缝金属拉伸	1	-269	断后伸长率：≥30%	GB/T 228.4
3	冲击试验	1 组（3 个）	-196	冲击功：≥47J 侧向膨胀量：≥0.53mm	GB/T 229
		1 组（3 个）	-269	冲击功：≥38J 侧向膨胀量：≥0.53mm	
注：1 冲击试验标准试样为 10*10*55，宽度为 7.5mm 或 5mm 的小尺寸冲击试样的冲击功指标，分别为标准试样冲击功指标的 75%或 50%。冲击试验每个试样的冲击吸收功均不低于规定值。					

5.6 夹层支撑材料

- 5.6.1 夹层支撑材料可以采用金属材料或非金属材料。
- 5.6.2 当采用非金属材料作支撑元件时，应满足 GB/T 18442.2-2019 第 7.1 条要求。
- 5.6.3 可以使用环氧玻璃钢等非金属材料作为支撑材料。
- 5.6.4 当使用环氧玻璃钢支撑材料时：
 - a) 其出厂文件中所包含的材料力学性能指标和物理性能指标应至少满足表 5 的要求；

- b) 材料制造单位应委托具有 CMA 或 CNAS 资质且具备相应材料试验项目资质的第三方试验机构进行材料性能测试，并取得试验机构出具的材料性能试验报告，试验数值不应低于表 5 的要求；
- c) 拉伸试样和试验方法应符合 GB/T 1447 规定；
- d) 压缩试样和试验方法应符合 GB/T 1448 规定；
- e) 剪切试样和试验方法应符合 GB/T 1450.1 的规定；
- f) 弯曲试样和试验方法应符合 GB/T 1449 的规定；
- g) 冲击试样和试验方法应符合 GB/T 1451 的规定；
- h) 线膨胀系数试验及取样方法应符合 GB/T 2572 规定；
- i) 导热系数测试及取样方法应符合 GB/T 3139 规定；
- j) 密度测试及取样方法应符合 GB/T 1463 规定。

表5 低温绝热用环氧玻璃钢管材物理与力学性能指标

加载方向	温度 ℃	密度 g/cm ³	热导率 W/m·K	平均线膨胀系数 10 ⁻⁶ /℃	拉伸 强度 MPa	压缩 强度 MPa	剪切 强度 MPa	弯曲 强度 MPa	冲击 韧性 J/cm ²
平行于布层方向	室温	1.70~ 1.90	≤0.50	≤16	≥210	≥250	≥30	—	—
平行于布层方向	-196		≤0.42		≥280	≥360	≥35	—	—
垂直于布层方向	室温		≤0.43	≤40	—	≥310	≥80	≥340	≥22
垂直于布层方向	-196		≤0.35		—	≥420	≥100	≥420	≥35

5.6.5 当采用金属材料作为支撑元件时，应选用导热系数小、具有良好的低温冲击韧性的材料，且满足液氢条件下的使用要求。

5.7 绝热材料

5.7.1 高真空多层绝热材料应符合 GB/T 31480 的规定。

5.7.2 采用超细玻璃纤维制品应符合 GB/T 18442.2-2019 中 5.5.4 条的规定。

5.8 吸附剂材料

5.8.1 吸附剂材料应满足液氢条件下的使用要求。

5.8.2 5A 分子筛应符合 GB/T 13550 的规定，13X 分子筛应符合 HG/T 2690 的规定。

5.8.3 氧化钡应符合 YS/T 599 的规定。

5.8.4 采用其他吸附剂材料时，不应在富氧环境中发生危险性反应，且符合相应产品标准的规定。

5.9 外购件

- 5.9.1 外购件应符合相应的国家标准或行业标准的规定，且有质量证明文件或产品合格证。
- 5.9.2 安全附件、仪表、阀门、装卸附件、密封垫片及紧固件等必须满足液氢使用要求。
- 5.9.3 与液氢相接触的部位应采用带内外环的不锈钢金属缠绕垫片或其他适合液氢介质使用要求的垫片，且能通过按 ISO 11114-1 和 ISO 11114-2 进行的相容性测试。
- 5.9.4 夹层空间螺纹密封处应使用高真空密封剂或环氧树脂，不得使用聚四氟乙烯胶带。

5.10 支腿防火材料

- 5.10.1 支腿防火材料应具有防止或阻滞火焰蔓延的性能，以减小火灾荷载和降低火灾蔓延速度。
- 5.10.2 支腿防火涂料可选用室外特种钢结构膨胀型防火涂料，耐火性能极限不低于 2 小时。

6 设计

6.1 一般要求

- 6.1.1 液氢容器的设计除应符合本文件的要求外，还应符合 TSG 21、GB/T 150.3 的相关规定。
- 6.1.2 设计单位应严格依据用户所提供的设计条件以及 TSG21 的相关要求，综合考虑所有相关因素、损伤模式、失效模式、风险状况和安全裕量，以保证液氢容器具有足够的强度、刚度、稳定性和耐腐蚀性。同时，还应考虑液氢容器夹层支撑、支座、吊耳及其他型式支承件与压力容器受压元件与罐体的焊接接头的强度要求，确保液氢容器在设计使用年限内的安全。
- 6.1.3 设计单位应考虑确保产品的各项性能指标除满足本文件要求外，还应满足用户所提各项要求，确保产品的真空性能、真空绝热性能以及其它功能性能指标的实现。
- 6.1.4 液氢容器内容器不得采用应变强化技术。

6.2 载荷

- 6.2.1 液氢容器的载荷应符合 GB/T 18442.3-2019 第 6 章的规定。
- 6.2.2 液氢容器的内容器与支撑结构的强度设计应考虑用液氮为测试介质进行低温性能试验时的载荷，以及客户要求用液氮进行冷充试验时的载荷。试验条件下液氮介质的最大充装量应在设计图纸中加以规定。

6.3 温度

- 6.3.1 液氢容器的设计温度应满足 GB/T 18442.3-2019 第 7 章的规定。
- 6.3.2 内容器的最低设计金属温度应考虑正常工作条件下及检验、试验条件下介质最低工作温度对内容器金属温度的影响，且应不高于-253℃。

6.4 压力

6.4.1 罐体计算压力、设计压力应满足 GB/T 18442.3-2019 第 8 章的规定。

6.4.2 对于不同使用场景下的液氢容器，还应考虑在泵卸液等工况下内容器产生负压的风险，进行必要的流量和压力监控，防止形成负压。

6.4.3 内容器的工作压力应满足容器在装卸、储存及使用过程等各种工况下的要求。

6.5 焊接接头系数

6.5.1 内容器的焊接接头系数取 1.0。

6.5.2 外壳的焊接接头系数取 0.85。

6.6 许用应力

6.6.1 液氢容器的许用应力应符合 GB/T 18442.3-2019 第 10 章的规定。

6.6.2 内容器应使用 $R_{p0.2}$ 来确定材料的许用应力值。

6.7 充满率

6.7.1 液氢容器额定充满率应符合表 6 的规定。

表 6 额定充满率

冷态几何容积 V , m^3	额定充满率, %	
	立式容器	卧式容器
$V \leq 50$	90	88
$50 < V \leq 500$	90	90

6.7.2 在确定初始充满率时，应考虑液氢容器储存液氢预期所需要的维持时间（包括可能遇到的长时间没有使用液体的情况）、容器的结构形式、用户要求等因素。初始充满率应不超过额定充满率。

6.7.3 液氢容器应设置溢流口，并符合 6.7.2 的规定。不应通过直接观察溢流管线流出介质是气态还是液态的方法来判定是否充满。

6.8 真空绝热性能指标

液氢容器静态蒸发率和静态日升压速率指标应满足表 7 的要求。

表7 静态蒸发率和静态日升压速率指标

几何容积 V, m ³	静态蒸发率 (上限值), %/d		立式容器静态日升压速率 (0~0.72 MPa), (kPa/d)	卧式容器静态日升压速率 (0~0.72 MPa), (kPa/d)
	液氢	液氮	液氢	液氢
5	2.00	0.34	145	/
10	1.40	0.23	145	/
15	1.10	0.18	145	/
20	1.00	0.16	145	79
25	0.90	0.15	145	73
30	0.79	0.13	145	68
35	0.75	0.13	143	64
40	0.72	0.12	142	61
50	0.67	0.11	139	56
65	0.61	0.10	135	51
85	0.55	0.09	130	46
100	0.52	0.09	126	43
150	0.38	/	115	37
200	0.35	/	/	33
250	0.32	/	/	31
300	0.30	/	/	28
500	0.25	/	/	24
注：中间值采用内插法确定。				

6.9 夹层的真空性能

6.9.1 真空夹层的漏气速率应符合表 8 的规定。

6.9.2 真空夹层的漏放气速率应符合表 9 的规定。

6.9.3 常温下真空夹层的封结真空度应符合表 10 的规定。装载液氢后，真空夹层的冷态真空度应不大于封结真空度的 0.1 倍。

6.9.4 夹层真空性能应满足 5 年真空使用年限的要求，其低温性能 3 年内应满足本文件要求。

表8 真空夹层漏气速率

几何容积 V, m ³	漏气速率, Pa·m ³ /s
1≤V≤10	≤1×10 ⁻⁸
10≤V≤100	≤5×10 ⁻⁸
100 < V≤500	≤1×10 ⁻⁷

表9 真空夹层漏放气速率

几何容积 V, m ³	漏放气速率, Pa·m ³ /s
1≤V≤10	≤1×10 ⁻⁶
10 < V≤100	≤5×10 ⁻⁶
100 < V≤500	≤1×10 ⁻⁵

表10 封结真空度

几何容积 V, m ³	真空度, Pa
1≤V<10	≤0.01
10 < V≤50	≤0.02
50 < V≤100	≤0.03
100 < V≤500	≤0.05

6.10 真空绝热管路的绝热性能

真空绝热管路的绝热性能应满足表 11 的要求。

表11 真空绝热管路的绝热性能

项目	指标
漏气速率	≤ 1×10 ⁻¹⁰ Pa·m ³ /s
漏放气速率	≤ 1×10 ⁻⁸ Pa·m ³ /s
封结真空度	≤ 0.05 Pa

6.11 结构设计

6.11.1 罐体结构

6.11.1.1 罐体总体按 GB/T 150.3 设计时, 局部应力分析可按 JB 4732 的规定进行。

6.11.1.2 罐体进行强度计算和外压稳定性校核时, 采用规则设计的应符合 GB/T 150.3 的规定, 采用分析设计的应符合 JB 4732 的规定。

- 6.11.1.3 内容器的结构应尽量简单、避免结构形状的突然变化，以减少约束和局部应力集中。
- 6.11.1.4 应充分考虑罐体在制造、试验和正常工作过程中，因内容器、夹层管路、外壳之间的温度梯度以及其它因素而引起的载荷。夹层管路的应力分析应符合 GB/T 20801.3-2006 第 7 章的规定。
- 6.11.1.5 罐体的绝热结构设计应选择合适的容器形式、支撑结构、内部管道结构和绝热方式，减少传热及散热面积，确保容器满足真空绝热性能指标要求。
- 6.11.1.6 罐体不设人孔或检查孔。
- 6.11.1.7 罐体设置溢流口。几何容积不大于 10m^3 的液氢容器，还应配备防过充装置。
- 6.11.1.8 罐体应设置排尽口，其应能使内容器中的液体及可能存在于液氢中的固体颗粒杂物完全排尽。
- 6.11.1.9 真空夹层应设置带真空隔离阀的真空封结装置。真空隔离阀的漏气速率应至少优于夹层漏气速率指标一个数量级。

6.11.2 罐体支座

罐体支座高度超过 457mm 时，应采取填充或包覆防火材料、表面涂敷防火涂料等防火措施，确保火灾情况下 2 小时不失稳。高度测量值为从支腿或鞍座底板上平面到其与储罐最近的连接点之间的垂直距离，见图 1。

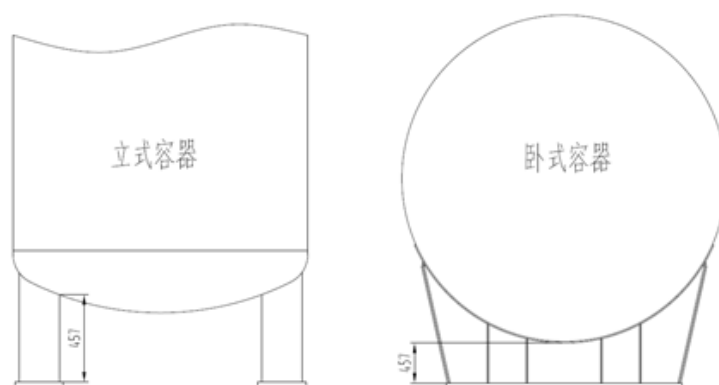


图1 罐体支座高度测量部位

6.11.3 绝热设计

- 6.11.3.1 液氢容器应根据液氢的介质特性以及对真空绝热性能的要求进行绝热结构的选择和设计。
- 6.11.3.2 应采用合适的方法进行绝热性能设计和计算。当夹层绝热材料的表观导热系数未知时，应采用试验方法确定。

6.11.3.3 应使用具有阻燃性能的绝热材料。当液氢容器罐体处于 650℃ 的环境中时，夹层中绝热材料的绝热性能在 30 分钟内不应退化。

6.12 管路系统设计

6.12.1 管路系统的设计准则和设计计算方法按照 GB/T 20801.3 的规定，同时应充分考虑各种工况下可能出现的极端情况。

6.12.2 管路系统中的液体流速不宜超过 3.5m/s，管路系统中的气体流速不宜超过 16m/s。

6.12.3 管路应进行柔性设计，其结构应避免因热胀冷缩、机械颤动或振动等所引起的损坏，必要时应设置补偿装置。

6.12.4 所有可能排出氢气或液氢的出口管路均应引至集中排放管。集中排放管设计时应满足以下要求：

- a) 集中排放管路直径应满足泄放量要求；
- b) 应充分考虑排放时产生的背压，其应满足超压泄放装置的稳定性要求，避免引起超压泄放装置的频繁启闭；
- c) 当多个管路连接到集中排放管上时，应采取措施避免维修或是更换阀门时发生氢气回流、泄漏等情况。

6.12.5 管路设计时至少应考虑到使用场景的影响。

6.12.5.1 终端使用的容器的管路系统至少应考虑以下问题：

- a) 进液管路应包含三个相互独立并且串联在一起的装置，自罐体向外依次为球阀或截止阀、紧急切断装置（或等效装置）和装卸接头；
- b) 出液管路应自罐体向外依次设置手动隔离阀和紧急切断装置及第三道阀门或装卸接头；
- c) 用气管路应自罐体向外依次设置截止阀、紧急切断装置、经济阀及单向阀；
- d) 泵进液及回气管路应自罐体向外依次设置手动隔离阀和紧急切断装置；
- e) 增压进液管路应设置手动隔离阀；
- f) 安全泄放管路应使用三通切换阀，确保任何情况下应保证至少有一组超压泄放装置与内容器保持连通。

6.12.5.2 过程使用的容器的管路系统设计由设计委托方负责并确定，并且所有管路至少应设置一道尽量靠近罐体的阀门。

6.12.6 进液管路、出液管路、泵进液管路、泵回气管路等管线中的管路应使用真空绝热管，管路上设置的阀门及接头应采用真空夹套结构。

6.12.7 管路的管子之间、管子与管座、管子与管件及阀门之间当采用焊接结构时应采用等壁厚、全截面焊透的对接接头。

6.12.8 外部管路系统中真空绝热管路设计时需要满足以下要求：

- a) 真空绝热管路内管的设计压力应不低于罐体设计压力，外管的设计压力不高于-0.1MPa；
- b) 真空绝热管路的设计应与液氢介质特性相适应，充分考虑内管热胀冷缩的影响，必要时应考虑设置补偿装置；
- c) 真空绝热管路焊接结构的设计应避免产生过大的应力集中和明显变形；
- d) 真空绝热管路上应设置真空测量装置及外管防爆装置。

7 安全附件、仪表和装卸附件

7.1 基本要求

7.1.1 安全附件、仪表和装卸附件的设置，除应符合 TSG 21 和本文件的规定外，还应满足设计文件的要求。

7.1.2 安全附件、仪表和装卸附件的制造许可和型式试验应符合相应安全技术规范的要求。

7.1.3 安全附件包括内容器安全泄放装置、外壳防爆装置、管路安全阀、紧急切断装置及导静电装置等。

7.1.4 仪表包括压力测量装置、液位测量装置和真空度测量装置等。

7.1.5 装卸附件包括装卸阀门、装卸接头等。

7.1.6 安全附件、仪表和装卸附件与罐体或管路之间的连接可采用焊接连接、法兰连接或螺纹连接等方式。

7.1.7 液氢容器采用带电气控制元件的安全附件、仪表和装卸附件时，应符合电气元件防爆设计的相关标准的要求。

7.2 内容器超压泄放装置

7.2.1 内容器应至少设置两组相互独立的超压泄放装置，任何情况下应保证至少有一组超压泄放装置与内容器保持连通。为满足安全泄放的要求，每一组超压泄放装置应设置一个全启式弹簧安全阀作为主泄放装置，且并联一个爆破片装置作为辅助泄放装置。

7.2.2 超压泄放装置的应满足下列要求：

- a) 主安全阀的整定压力应不大于内容器设计压力，回座压力应不低于整定压力的 0.9 倍；
- b) 作为辅助泄放装置的爆破片装置在 427℃时的爆破压力应不大于内容器设计压力的 1.1 倍，同时，其在 20℃下爆破压力不大于内容器耐压试验压力。选用的爆破片在爆破时不应产生碎片、脱落和火花，应采用材质为 316 或纯 Ni 的反拱刻槽型爆破片；

- c) 主安全阀的排放能力应保证内容器在非火灾条件下的压力不超过其设计压力的 1.1 倍，每组超压泄放装置的总排放能力应保证内容器在火灾条件下的压力不超过其设计压力的 1.21 倍；
- d) 每一个安全阀的排放能力均应满足按非火灾条件考虑时内容器的安全泄放要求；每一组超压泄放装置的排放能力均应满足按火灾条件考虑时内容器的安全泄放要求。

7.2.3 超压泄放装置与罐体之间不得安装截止阀门。

7.2.4 超压泄放装置的设计应考虑入口压降和出口背压的影响，内容器超压泄放装置入口压降不大于主安全阀整定压力的 3%，集中排放管内背压不大于主安全阀整定压力的 10%。

7.2.5 内容器需要的安全泄放量及超压泄放装置的排放能力计算方法按 CGA S-1.3 的规定。

7.2.6 进行内容器需要的安全泄放量计算时，应按 CGA S-1.3 中的要求至少考虑到下列工况及可能的组合：

- a) 绝热系统结构完好且处于正常的真空状态下，外部为环境温度，内容器的温度为泄放压力下所储存介质的饱和温度，且增压系统处于全开工作状态；
- b) 绝热系统结构完好，但夹层已丧失真空状态下，外部温度为环境温度，内容器的温度为泄放压力下所储存介质的饱和温度；
- c) 绝热系统结构完好或部分完好，但夹层真空已丧失，且外部遭遇火灾或遭遇 650℃ 及以上高温；
- d) 绝热系统完全损坏，夹层真空已丧失，且外部遭遇火灾或遭遇 650℃ 及以上高温。

7.2.7 设计人员应根据实际条件判明可能发生的各种工况及可能的组合工况，内容器超压泄放装置的排放能力应能满足 7.2.6 中的 a)、b)、c) 中可能有几种工况同时发生时的安全泄放要求，但也应充分研究发生 7.2.6 中极端工况 d) 的可能性。

7.3 外壳防爆装置

7.3.1 外壳防爆装置的泄放压力应不大于 0.05MPa，其排放能力足以使夹层的压力限制在不超过 0.1MPa。

7.3.2 外壳防爆装置的设计与布置应充分考虑液氢的低温影响，尽量避免其动作时空气进入夹层空间。

7.3.3 立式容器的泄压装置应位于顶部中心区域，并垂直向上。当需要两个或两个以上的装置时，应对称布置。

7.3.4 对于卧式容器的泄压装置应位于壳体顶部，尽可能靠近中心位置并垂直向上。当需要两个或两个以上的装置时，其离两端封头的距离至少为筒体长度的四分之一。多个泄压装置应均匀布置。

7.3.5 外壳防爆装置的总排放面积不小于内容器几何容积 (m^3) 与 $341\text{mm}^2/\text{m}^3$ 的乘积。

7.4 管路安全阀

两端均可关闭且有可能存留液氢的管路，应设置管路安全阀，其整定压力不超过管路设计压力的 1.5 倍。

7.5 紧急切断装置

7.5.1 液氢容器应按如下要求设置紧急切断装置，但确认在工程系统中已设置紧急切断装置或类似的能防大量泄漏的其它紧急闭止装置时除外：

- a) 紧急切断装置由紧急切断阀、远程控制系统以及易熔塞组成。紧急切断装置应动作灵活、性能可靠、便于检修，且不应兼作它用；
- b) 紧急切断阀应符合相应标准的规定。阀门中与氢接触的元件，其材质需能满足液氢的使用条件。紧急切断阀可使用截止阀或球阀，不允许使用闸阀；
- c) 紧急切断阀应采用自动控制的型式，上阀杆不允许安装手轮；
- d) 紧急切断阀如采用真空阀门，其真空性能应能满足液氢容器的使用要求；
- e) 紧急切断装置应便于远程控制系统关闭操作，操作装置应设置于工程系统中人员易于到达的位置；
- f) 易熔塞可选用易熔合金材料或尼龙，选用易熔合金材料时，其应在 $70^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 时熔融；
- g) 远程控制系统采用气动控制系统时，所用气体气源宜采用氦气。

7.5.2 在遭遇火灾或充装、排液过程中发生意外泄漏时，紧急切断装置应能自动关闭，且应在 10s 内完成闭合。

7.5.3 紧急切断装置应经耐压试验和气密性试验检验合格。

7.6 导静电接地装置

液氢容器的罐体、管路、阀门和支座等连接处的导电性应良好，并设置可靠的导静电连接端子。罐体金属与接地导线末端之间的电阻值应不大于 5Ω 。

7.7 压力及液位测量装置

7.7.1 压力及液位测量装置应与液氢相适应，且满足使用工况要求。

7.7.2 应采用波登管式压力表，不允许采用隔膜式压力表。

7.7.3 液位测量装置宜采用机械指针式差压液位计，如采用数显式差压液位计需满足防爆要求。

7.7.4 压力及液位测量装置与罐体之间应装设隔膜阀。

7.8 带变送器或者电气控制元件的测量装置

带变送器或者电气控制元件的测量装置的防护等级应不低于 GB/T 4208 中 IP65 级，防爆要求满足 GB 3836.1 中 IIC，温度组别不低于 GB 3836.1 中 T1，宜选用本安型或隔爆型仪表。

7.9 装卸附件

7.9.1 装卸阀门、装卸接头等与氢接触的元件，其材质应能满足液氢的使用条件，其形式的选择应考虑漏热量的影响。

7.9.2 装卸阀门应采用真空阀门，其真空性能应能满足液氢容器的使用要求。

7.9.3 装卸阀门的公称压力应不低于管路的设计压力，其耐压试验和气密性试验压力应满足以下要求：

- a) 耐压试验压力为阀门公称压力的 1.5 倍；
- b) 气密性试验压力为阀门公称压力，阀门应在全开和全闭工作状态下进行气密性试验合格。

7.9.4 装卸接头可按用户的要求配置防错装的快速连接接头。

7.9.5 装卸接头应具有良好的密封性，密封填料应采用阻燃材料并适应液氢的使用条件。

8 制造

8.1 一般要求

8.1.1 液氢容器的制造应符合本文件的要求外，还应符合 TSG 21、GB/T 150、GB/T 18442 标准及经规定程序批准的设计文件的要求。

8.1.2 内容器制造过程中应避免钢板表面的机械损伤。

8.1.3 封头成型后应进行固溶化处理，且控制铁素体测量值 $\leq 5\%$ 。

8.1.4 内容器的焊接应严格控制线能量。在焊接工艺评定所确认的范围内，应选用较小的焊接线能量，以多道施焊为宜。

8.1.5 内容器纵、环焊接接头在焊接完成后进行铁素体含量检测，要求铁素体测量值 $\leq 8\%$ 。

8.1.6 与液氢介质接触的奥氏体不锈钢管采用冷弯成型时应控制铁素体测量值不大于 8%，当超过 8%时应进行固溶处理。

8.1.7 与介质接触的所有零部件表面，应进行脱脂与氧气清洁处理，合格指标不高于 125mg/m^2 ，且符合设计图样的规定。

8.2 材料复验

8.2.1 钢板的复验应满足以下要求：

- a) 逐张检查钢板表面质量和标记，并测量铁素体含量，其合格指标 $\leq 1\%$ ；
- b) 按炉复验化学成分，其结果应满足表 1 要求；
- c) 按批复验力学性能，其结果应满足表 2 要求；
- d) 按批进行冲击试验，数量及结果满足表 3 的要求；
- e) 奥氏体不锈钢开平板整卷使用时，应在开平操作后，分别在板卷的头部、中部和尾部所对应的开平板上各截取一组复验试样；
- f) 奥氏体不锈钢开平板非整卷使用时，应在开平板的端部截取一组复验试样。

8.2.2 钢管和管件的复验应满足以下要求：

- a) 按炉复验化学成分，其结果应满足表 1 要求；
- b) 按批复验力学性能，其结果应满足表 2 要求；
- c) 按批进行冲击试验，数量及结果满足表 3 的要求；
- d) 钢管的最小冲击试样可取 2.5*10*55mm 的尺寸试样，无法取样的管件可免做力学性能和冲击试验。

8.2.3 锻件的复验应满足以下要求：

- a) 按炉复验化学成分，合格指标满足表 1 的要求。
- b) 按批复验力学性能，合格指标满足表 2 的要求。
- c) 按批进行冲击试验，数量及合格指标满足表 3 的要求

8.2.4 焊材的复验应满足以下要求：

- a) 钨极氩弧焊和熔化极气体保护焊焊丝：按批进行化学成分复验。按批进行熔敷金属力学性能、低温冲击性能试验，数量要求和合格指标满足表 4 的要求。熔敷金属试板的制备按照 NB/T47018.3 的要求进行；
- b) 埋弧焊的焊丝和焊剂：采用交叉组合批次匹配进行熔敷金属力学性能、低温冲击性能试验，数量要求和合格指标满足表 4 的要求。对其焊丝按批进行化学成分复验。熔敷金属试板的制备按照 GB/T 25774.1 中的 1.6 型要求进行；
- c) 焊材的熔敷金属需测量铁素体含量，其合格指标满足表 4 的要求。

8.3 焊接工艺

8.3.1 液氢容器按本文件及 NB/T 47014 进行焊接工艺评定，且符合 TSG 21、GB/T 150.4 的规定及设计图纸要求。

8.3.2 内容器焊接工艺评定测试要求按表 12。

表12 内容器焊接工艺评定试验要求

序号	试验项目	试样数量	试验温度	合格指标	试验方法	备注
1	横向拉伸	焊接接头：2	室温	强度：符合 NB/T 47014 第 6.4.1.5.4 条	GB/T 228.1	
		母材：1	-269℃	断后伸长率：≥35%	GB/T 228.4	
2	横向弯曲	面弯+背弯：2+2 或侧弯：4	室温	符合 NB/T 47014 6.4.1.6.4 条	GB/T 2653	当板厚小于 10mm，采用面弯和背弯试验；当板厚大于等于 10mm，可以采用侧弯代替面弯和背弯
3	冲击试验	母材：1 组（3 个） 焊缝区：1 组（3 个） 热影响区：1 组（3 个）	-196℃	冲击功：≥47J 侧向膨胀量：≥0.53mm	GB/T 229	
		母材：1 组（3 个） 焊缝区：1 组（3 个） 热影响区：1 组（3 个）	-269℃	冲击功：≥38J 侧向膨胀量：≥0.53mm		
注：冲击试验标准试样为 10*10*55，宽度为 7.5mm 或 5mm 的小尺寸冲击试样的冲击功指标，分别为标准试样冲击功指标的 75%或 50%，取样方法按 NB/T 47014 进行。冲击试验每个试样的冲击吸收功均不低于规定值。						

8.4 产品焊接试件与试样

8.4.1 内容器应逐台制备产品焊接试件。

8.4.2 试件的力学性能检验试验方法、合格指标及试验要求，应符合表 13 的规定。

表13 产品焊接试件力学性能检验的试验方法、合格指标及试验要求

序号	试验项目	试样数量	试验温度	合格指标	试验方法	备注
1	横向拉伸	焊接接头：1	室温	NB/T47016 6.1.4.1 条	GB/T 228.1	
2	横向弯曲	面弯+背弯：1+1 或 侧弯：2 个	室温	NB/T47016 6.2.4 条	GB/T 2653	当板厚小于 10mm，采用面弯和背弯试验；当板厚大于等于 10mm，可以采用侧弯代替面弯和背弯。
3	冲击试验	母材：1 组（3 个） 焊缝区：1 组（3 个） 热影响区：1 组（3 个）	-196℃	冲击功：47J 侧向膨胀量：0.53mm	GB/T 229	
注：冲击试验标准试样为 10*10*55，宽度为 7.5mm 或 5mm 的小尺寸冲击试样的冲击功指标，分别为标准试样冲击功指标的 75%或 50%，取样方法按 NB/T47016 进行。冲击试验每个试样的冲击吸收功均不低于规定值。						

9 检验与试验

9.1 试验顺序

试验顺序按 GB/T 18442.5-2019 第 4.1 条规定。

9.2 冷充试验

9.2.1 当低温性能型式试验在使用现场进行时，制造单位应先做冷充试验。其它情形下，制造单位可根据用户要求决定是否做冷充试验。冷充试验前应编制试验大纲。

9.2.2 冷充试验通常采用液氮作为试验介质，其充装量不得超过内容器支撑结构允许的载荷。

9.2.3 充液完成后应至少静置 48 小时。

9.2.4 介质充装时及静置期内应注意观察支撑结构连接处、外管路系统等各处有无漏冷、结霜、明显变形、断裂等情况。

9.2.5 容器外壳表面相邻区域内温差不得超过 5℃。

9.3 低温性能型式试验

液氢容器的低温性能型式试验要求，应符合 TSG 21 及 GB/T 18442.5 的规定。

9.3.1 静态蒸发率检测

9.3.1.1 静态蒸发率检测可以采用液氮或液氢作为介质。

9.3.1.2 检测方法可参照 GB/T 18443.5 的规定，但使用液氢试验时，应充分考虑其安全性，做好安全措施。

9.3.1.3 当采用液氮作为介质进行静态蒸发率检测时，应满足 6.6.1 的要求。当几何容积小于 50m³ 时，应充装至额定充满率；当几何容积大于或等于 50 m³且小于等于 100 m³时，应通过应力计算，在确保内容器结构安全条件下，选取不小于 50%且最接近额定充满率的充满率，并将该实际充满率下测试的静态蒸发率记做额定充满率下的静态蒸发率。

9.3.1.4 当采用液氢作为介质时，应充装至额定充满率。

9.3.1.5 可以采用静态日升压速率测定的方法代替静态蒸发率检测。

9.3.2 静态日升压速率检测

9.3.2.1 静态日升压速率检测介质为液氢，检测时液氢充至额定充满率的 75%。

9.3.2.2 静态日升压速率检测方法按附录 A 执行。

9.4 其他

其他检验与试验要求，参照 GB/T 18442.5 的规定。

附录 A

(规范性)

静态日升压速率检测

本附录规定了固定式真空绝热液氢压力容器在规定压力区间内静态日升压速率的检测原理与方法、检测条件及检测步骤，以及检测记录与检测报告。

A.1 检测原理与方法

本检测采用液氢作为检测介质。在检测过程中介质的质量维持不变，在无介质输入或输出的闭式系统中进行。

从检测规定的起始条件开始，关闭被检件各条管路开口，并开始记时，直至内容器压力升高到规定的节点压力为止，此压力升高值与过程所经历的时间之比，称为“静态日升压速率”，单位为千帕每天（kPa/d）。

A.2 检测条件与检测步骤

A.2.1 检测条件

- a) 液氢初始充装量不小于内容器额定充满率的 75%。
- b) 待测系统需在 0MPa 的压力下静置不少于 48 小时，将内容器内压力（表压）0MPa 作为检测的起始条件。

A.2.2 检测步骤

- a) 当被检件内容器符合 A.2.1 的检测条件时，开始计时。
- b) 以时间间隔不大于 1 h 采集或记录内容器内压力、环境压力与环境温度随时间变化的数据，记录格式见表 A.1。
- c) 若待检容器设计压力小于 0.72MPa，当被检件内容器内压力(表压)为 0 MPa 时，记录时刻 t_0 ；当被检件内容器内压力(表压)达到 0.4 MPa 或设计压力（P）中的较小值时，停止计时，记录时刻 t_1 。
- d) 若待检容器设计压力大于等于 0.72MPa，当被检件内容器内压力(表压)为 0 MPa 时，记录时刻 t_0 ；当被检件内容器内压力(表压)达到 0.72 MPa 时，停止计时，记录时刻 t_2 。

表 A.2 静态日升压速率检测报告

检测前仪器情况		检测介质	
充液结束时间		初始充装率 %	
检测开始时间		检测结束时间	
平均环境温度 °C		平均大气压 KPa	
内容器有效容积 m ³		检测后仪器情况	
日升压速率 kPa/d			
备注			

编制：

核对：

审核：
