

ICS 71. 120. 30

CCS J 75



中华人民共和国国家标准

GB/T ××××—××××

氢气液化热交换器

Hydrogen liquefaction heat exchangers

(征求意见稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

国家市场监督管理总局

国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	6
4 通用要求	9
5 材料	100
6 设计	18
7 制造、检验和验收	27
8 安装、使用和维护	41
附录 A（资料性）热交换器设计条件与工艺数据	43
附录 B（资料性）正仲氢组成、转化热及工程计算参考数据	49
附录 C（资料性）正仲氢转化催化剂相关要求	55

前 言

本标准按照 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。

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专利的责任。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本标准起草单位：四川空分设备（集团）有限责任公司、甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司、浙江大学、中国特种设备检测研究院、中国科学院理化技术研究所、中国石化工程建设有限公司、兰州兰石换热设备有限责任公司、上海蓝滨石化设备有限责任公司、机械工业兰州石油化工设备检测所有限公司、北京航天发射技术研究所、航天氢能科技有限公司、开封空分集团有限公司、兰州石油机械研究所有限公司、湖北迪峰换热器股份有限公司、杭州中泰深冷技术股份有限公司、杭氧集团股份有限公司、苏州三川换热器股份有限公司、中储国能（江苏）技术有限公司、中国寰球工程有限公司、中石化广州工程有限公司、浙江省特种设备科学研究院、菏泽市产品检验检测研究院、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、山东中杰特种装备股份有限公司、杭州弘泽新能源有限公司、浙江久立特材科技股份有限公司、陕西智拓固相增材制造技术有限公司、中山先进低温技术研究院、湖北新楚风汽车股份有限公司、兰州冠宇传热与节能工程技术研究有限公司、上海蓝海科创检测有限公司。

本标准主要起草人：程香、张尚文、王凯、陈志伟、董学强、元少昀、李治国、何富均、李金波、苏厚德、曹锦鋈、王明富、妙丛、于旺、伍文明、孟鹏通、张国兴、高毅、王晔、龙江、金雪梅、王为亮、李双权、杨旭、叶宇峰、王松涛、韩健、陈绍庆、刘青蔚、徐昊卿、黄科、蒋小文、周燊、乔玉珍、邵羽、唐夏焘、刘流、邵长斌、蒋琛、白咚咚、陈战杨。

引 言

氢气作为清洁能源载体，其液化储存与运输是氢能产业链的关键环节。氢气液化装置中的热交换器是实现高效、安全液化的核心设备，其性能直接关系到装置的能耗、可靠性与经济性。

目前，国内尚无专门针对氢气液化装置用热交换器的国家标准，相关设计、制造、检验与运行维护缺乏统一规范。为适应氢能产业快速发展需求，提升我国氢气液化装备技术水平，保障设备安全稳定运行，特制定本标准。

本标准遵循“通用要求+特殊要求”的原则，在明确氢液化装置用热交换器共性技术要求的基础上，重点针对铝制板翅式、绕管式、管壳式、扩散焊热交换器四种典型换热器在超低温、正仲氢转化、氢气介质等极端工况下的特殊技术要求作出规定，为设备全生命周期提供统一、规范的技术依据。

氢气液化热交换器

1 范围

- 1.1 本文件规定了氢气液化装置用热交换器的材料、设计、制造、检验与验收、安装、使用及维护的安全与技术要求。
- 1.2 本文件主要针对氢液化工艺主流程中的热交换器，包括但不限于工艺氢压缩、冷却、液化、过冷及正仲氢转化等环节使用的热交换器。等温型正仲氢转化器参照使用。
- 1.3 本文件涵盖的热交换器类型如下。
 - a) 铝制板翅式热交换器；
 - b) 绕管式热交换器；
 - c) 管壳式热交换器；
 - d) 扩散焊热交换器。
- 1.4 本文件适用的设计温度、设计压力范围如下。
 - a) 铝制板翅式热交换器设计温度范围为-269℃~200℃，设计压力按 NB/T 47006 的规定；
 - b) 其他钢制热交换器设计温度范围按 GB/T 150.2 中列入材料的允许使用范围，设计压力不超过各类型热交换器已有标准规定上限。
- 1.5 本文件规定的热交换器主要材质包括铝合金、非合金钢、合金钢、不锈钢及其复合材料。
- 1.6 热交换器界定范围如下
 - a) 热交换器本体及其与外部管道的连接。
 - 1) 焊接连接的第一道环向接头坡口端面；
 - 2) 法兰连接的第一个法兰密封面；
 - 3) 螺纹连接的第一个螺纹接头端面；
 - 4) 专用连接件或管件连接的第一个密封面。
 - b) 接管、人孔、手孔等的承压封头、平盖及其紧固件。
 - c) 非受压元件与受压元件的连接焊缝。
 - d) 直接连接在热交换器上的非受压元件，如支座、垫板等。
 - e) 直接安装在热交换器上的超压泄放装置。
- 1.7 本文件不适用于移动式压力容器上的热交换器。

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 150.1~150.4-2024 压力容器

GB/T 151-2026 热交换器

GB/T 242 金属管 扩口试验方法

GB/T 713.2 承压设备用钢板和钢带 第2部分：规定温度性能的非合金钢和合金钢

GB/T 713.3 承压设备用钢板和钢带 第3部分：规定低温性能的低合金钢

GB/T 713.4 承压设备用钢板和钢带 第4部分：规定低温性能的镍合金钢

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 1220 不锈钢棒

GB/T 2054 镍及镍合金板

GB/T 3621 钛及钛合金板材

GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分

GB/T 3191 铝及铝合金挤压棒材

GB/T 3198 铝及铝合金箔

GB/T 3880（所有部分） 一般工业用铝及铝合金板、带材

GB/T 3965 熔敷金属中扩散氢测定方法

GB/T 4436 铝及铝合金管材外形尺寸及允许偏差

GB/T 4437（所有部分） 铝及铝合金热挤压管

GB/T 4732（所有部分） 压力容器分析设计

GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法

GB/T 6886 烧结不锈钢过滤元件

GB/T 6893 铝及铝合金拉（轧）制管材

GB/T 7735 无缝和焊接（埋弧焊除外）钢管缺欠的自动涡流检测

GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB/T 9948 石化和化工装置用无缝钢管

GB/T 13296 锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管

GB/T 13305 不锈钢中 α -相含量测定法

GB/T 13350 绝热用玻璃棉及其制品

GB/T 14976 输送流体用不锈钢无缝钢管

GB/T 18443.3 真空绝热深冷设备性能试验方法 第3部分：漏率测量

GB/T 24593 锅炉、热交换器用奥氏体不锈钢焊接钢管

GB/T 27698（所有部分） 热交换器及传热元件性能测试方法

GB/T 29465 浮头式热交换器用法兰

GB/T 31480 深冷容器用高真空多层绝热材料

GB/T 31481-2015 深冷容器用材料与气体的相容性判定导则

GB/T 44457 加氢站用储氢压力容器

NB/T 10558 压力容器涂敷与运输包装

NB/T 10938 绕管式热交换器

NB/T 11917 扩散焊热交换器

GB/T 40045-2021 氢能汽车用燃料电池 液氢

NB/T 47006 铝制板翅式热交换器

NB/T 47008 承压设备用碳素钢和合金钢锻件

NB/T 47009 低温承压设备用合金钢锻件

NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件

NB/T 47013（所有部分） 承压设备无损检测

NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

NB/T 47015 压力容器焊接规程

NB/T 47016 承压设备产品焊接试件的力学性能检验

NB/T 47018 承压设备用焊接材料订货技术条件

NB/T 47019 (所有部分) 锅炉、热交换器用管订货技术条件

NB/T 47020 压力容器法兰分类及技术条件

NB/T 47021 甲型平焊法兰

NB/T 47022 乙型平焊法兰

NB/T 47023 长颈对焊法兰

NB/T 47029 压力容器用铝及铝合金锻件

JB/T 4734 铝制焊接容器

SH/T 3096 高硫原油加工装置设备和管道设计选材导则

HG/T 20615 钢制管法兰 (Class 系列)

HG/T 20592 钢制管法兰、垫片、紧固件

SA-182/SA-182M 高温用锻制或轧制合金钢和不锈钢公称管道法兰、锻制管配件、阀门和零部件 (Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-temperature Service)

SB-162 镍板材、薄板和带材 (Specification for Nickel Plate, Sheet, and Strip)

SA-240/SA-240M 压力容器和一般用途铬及铬镍不锈钢板、薄板和钢带 (Specification for Chromium and Chromium-nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications)

SB-247 铝和铝合金模锻、手工锻和轧制环形锻件 (Specification for Aluminum and Aluminum-alloy Die Forgings, Hand Forgings, and Rolled Ring Forgings)

SB-209/SB-209M 铝和铝合金薄板和板材 (Specification for Aluminum and Aluminum-alloy Sheet and Plate)

SB-221/SB-221M 铝和铝合金挤压棒材、杆材和型材 (Specification for Aluminum and Aluminum-alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes)

SB-265 钛和钛合金带材、薄板和板材 (Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate)

SA-276/SA-276M 不锈钢棒材和型材 (Specification for Stainless Bars and Sharps)

ASTM D4179-11 成型催化剂和催化剂载体单颗粒压碎强度的标准测试方法 (Standard Test Method for Single Pellet Crush Strength of Formed Catalysts and Catalyst Carriers)

TSG 21-2016 固定式压力容器安全技术监察规程

3 术语和定义

GB/T 151、NB/T 47006、NB/T 10938、NB/T 11917 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

正氢 orthohydrogen

氢分子的一种同质异构体，分子中原子核的自旋方向是相同的（平行）。

3.2

仲氢 parahydrogen

氢分子的一种同质异构体，分子中原子核的自旋方向是相反的（逆平行）。

3.3

正常氢 normal hydrogen

在室温附近处于热力学平衡状态，即约含 75 %正氢和 25 %仲氢的氢。

3.4

平衡氢 equilibrium hydrogen

在给定温度下，正氢与仲氢达到热力学平衡组成的氢。

3.5

正仲氢转化 ortho- to para-hydrogen conversion

氢气中正氢向仲氢转变的过程。

3.6

仲氢转化率 para-hydrogen conversion rate

在规定温度、压力和入口组成条件下，氢气中仲氢摩尔分数由入口值向相应平衡值接近的程度。

注：仲氢转化率可按附录 C 中式 (C.1) 计算。

3.7

冷箱 cold box

容纳超低温设备、管道及其支承部件，并提供绝热保冷环境的封闭装置。

注：氢液化装置中冷箱通常采用高真空多层绝热结构。

3.8

催化空速 catalytic space velocity

单位体积催化剂在单位时间内处理的、折算至标准状态的气体体积流量。

注：催化空速常用单位为 h^{-1} 。

3.9

连续转化型板翅式热交换器 continuous conversion plate-fin heat exchanger

在板翅式热交换器内部设置催化剂装填结构，使氢气冷却换热过程与正仲氢催化转化过程连续耦合进行的板翅式热交换器。

3.10

连续转化型绕管式热交换器 continuous conversion coil-wound heat exchanger

在绕管式热交换器内部设置催化剂装填结构，使氢气冷却换热过程与正仲氢催化转化过程连续耦合进行的绕管式热交换器。

3.11

正仲氢转化器 ortho- to para-hydrogen converter

在低温条件下利用催化作用促进氢气中正氢向仲氢转化的设备。

注：按工艺特征，正仲氢转化器通常可分为等温型、绝热型和连续型。

3.12

钢铝过渡接头 steel-aluminium transition joint

由多层金属材料组成，用于实现不锈钢管和铝管之间可靠连接的复合接头。

注：复合连接可采用爆炸焊、摩擦焊或其他经验证的工艺。

3.13

超低温工况 cryogenic service

设备设计温度不高于-196℃，或操作介质温度处于液氮温区及以下的工况。

3.14

漏率 leak rate

在规定试验条件下，单位时间通过缺陷处泄漏的气体量。

注：漏率常用单位为 Pa·m³/s。

3.15

氦质谱检漏 helium mass spectrometer leak test

以氦气为示踪介质，利用质谱检漏仪检测设备泄漏的试验方法。

3.16

液氮冷冲击试验 liquid nitrogen thermal shock test

通过将设备浸入液氮中或向设备内部通入液氮，使设备整体降温至液氮温度以验证其在低温下的密封性、结构完整性的试验。

3.17

清洁度 cleanliness

设备与工艺介质接触表面残留颗粒、水分、油分及其他污染物受控的程度。

3.18**j 因子 j-factor (Colburn factor)**

表征对流换热性能的无量纲因子。

注：j 因子可按 $j = St \cdot Pr^{2/3}$ 计算，其中 St 为斯坦顿数，Pr 为普朗特数。

3.19**f 因子 f-factor (friction factor)**

表征流体流动阻力特性的无量纲因子。

4 通用要求**4.1 一般规定**

4.1.1 热交换器的设计、制造、检验、验收、安装、使用和维护除应符合本文件的规定外，还应符合国家现行有关法规、规章及强制性标准的规定。

4.1.2 热交换器的设计、制造单位应建立健全且有效运行覆盖产品全生命周期的质量保证体系，并取得相应特种设备生产许可（如适用）。

4.1.3 TSG 21 管辖范围内的热交换器，其材质、设计、制造、安装、改造与维修和使用应接受特种设备监督管理部门的管理。

4.1.4 热交换器的设计应确保其在规定的设计寿命内安全可靠运行，充分考虑氢液化工艺的极端工况，包括氢气介质、超低温、正仲氢转化热、热应力循环等影响。

4.1.5 热交换器所在系统宜设置必要的安全附件、检测仪表和超压泄放装置。

4.1.6 热交换器设计应考虑冷热侧温差引起的应力与膨胀效应，并确保在全工况下结构与换热性能的稳定性。

4.1.7 对无法按照 GB/T 150.3-2024、本文件及相应引用标准进行设计计算的热交换器或受压元件，可按 GB/T 150.1-2024 中 5.1.6 规定的方法进行设计。

4.2 资格与职责**4.2.1 资格**

从事热交换器设计、制造、检验、安装和维护的单位及人员，应具备相应的资质、资格和能力。

TSG 21 管辖范围内的热交换器的设计单位、制造单位应持有相应的特种设备生产许可证。

4.2.2 职责**4.2.2.1 用户或设计委托方的职责**

用户或设计委托方应履行以下职责。

- a) 热交换器的用户或设计委托方应以正式书面形式向设计单位提出完整、准确的设计条件与工艺数据，具体可参见附录 A；
- b) 明确设备的使用工况、性能要求及使用寿命；
- c) 参与设计评审、关键节点见证及出厂验收；
- d) 提供符合要求的安装、运行与维护条件。

4.2.2.2 设计单位的职责

热交换器的设计单位至少包含以下职责。

- a) 依据设计条件，遵循本文件及相关标准进行设计；
- b) 对设计文件的正确性、完整性负责；
- c) 提供完整的设计文件，包括传热计算书、强度计算书、风险评估报告（相关法规或设计委托方要求时）、设计图样、制造技术条件、安装与使用维护说明等；
- d) 在设计使用年限内保存热交换器的全部设计文件；
- e) 设计单位向热交换器用户出具的风险评估报告符合 GB/T 150.1-2024 中附录 F 的要求。

4.2.2.3 制造单位的职责

热交换器的制造单位至少包含以下职责。

- a) 制造单位应按照设计文件要求进行制造、检验和试验，如需要对原设计文件进行修改，应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；
- b) 制造单位在热交换器制造前应制定完善的质量计划，其内容至少应包括热交换器或元件的制造工艺控制点、检验项目和合格指标；
- c) 热交换器的检查部门在热交换器制造过程中和完工后，应按本文件、设计文件和质量计划的规定对热交换器进行各项检验和试验，出具相应报告，并对报告的正确性和完整性负责；
- d) 制造单位在检验合格后，应出具产品质量合格证；
- e) 制造单位对其制造的每台热交换器产品应在设计使用年限内至少保存下列技术文件备查：
 - 1) 质量计划；
 - 2) 制造工艺图或制造工艺卡；
 - 3) 产品质量证明文件；
 - 4) 焊接工艺和热处理工艺文件；
 - 5) 标准中允许制造单位选择的检验、试验项目记录；
 - 6) 制造过程中及完工后的检查、检验、试验记录；
 - 7) 原设计图和竣工图。

4.2.2.4 监督检验机构的职责

监督检验机构的职责按 TSG 21 的规定。

5 材料

5.1 一般规定

5.1.1 选择受压元件用材应依据其使用条件（如设计温度、设计压力、介质特性和操作特点等），材料的化学成分、微观组织、性能（力学性能、工艺性能、化学性能和物理性能），热交换器的制造

工艺以及经济合理性来确定，并应具有良好的耐腐蚀性能，优先选用具有成熟应用经验的材料。

5.1.2 与氢气或液氢接触的元件用材料应具有抗氢脆、氢腐蚀、低温脆性转变等风险的能力。材料在操作工况下应具有足够的韧性。

5.1.3 受压元件及与受压元件相焊接的非受压元件用材均应具有良好的焊接性。

5.1.4 根据热交换器设计温度的不同，除板翅式热交换器翅片外，受压元件可按下表 5-1 选择不同类型的材料。

表 5-1 受压元件依据设计温度的选材原则

设计温度（℃）	材料类型
$-269 \leq T < -196$	奥氏体型不锈钢或铝和铝合金
$-196 \leq T < -70$	奥氏体型不锈钢或镍合金钢
$-70 \leq T < -20$	低温低合金钢
$-20 \leq T \leq 420$	非合金钢、低合金钢

5.1.5 受压元件用钢材的使用(使用状态、超声检测、使用温度的上限及下限、非合金钢和合金钢的拉伸试验和冲击试验、许用应力等)应符合 TSG 21、GB/T 150.2 或 GB/T 4732.2 及相关材料标准的规定。铬镍奥氏体型不锈钢用于设计温度低于 -196°C 的受压元件时，材料及受压元件的制造还应满足 GB/T 150.3-2024 附录 E 的规定。

5.1.6 受压元件用铝及铝合金的使用（使用状态、超声检测、使用温度的上限及下限、铝及铝合金的拉伸试验和冲击试验、许用应力等）应符合 TSG 21、JB/T 4734 的规定。

5.1.7 对材料有特殊技术要求(如要求特殊的冶炼方法、严格的化学成分、较高的冲击吸收能量指标或侧膨胀值或断裂韧度、铁素体含量要求、奥氏体稳定系数和低温马氏体自转变温度要求、提高无损检测合格等级、增加力学性能检验率、较高的断后伸长率指标、屈强比的限制、低倍组织、金相检查要求等)时，应在设计文件中规定。

5.1.8 受压元件采用新材料或境外牌号材料时，应按 TSG 21-2016 第 2.1.2 或 2.1.3 条的规定执行。

5.1.9 受压元件用材料应附有材料制造单位的质量证明书，质量证明书的内容（需要时应包括材料交货状态的热处理工艺参数）应齐全、清晰，并且印刷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、材料标准号、牌号、规格、炉批号、交货状态、热处理工艺参数（需要时）、质量证明书签发日期等内容。可追溯的信息化标记包括二维码或条码等。从非材料制造单位取得材料时，应取得材料制造单位提供的质量证明书原件或在材料质量证明书原件的复印件上加盖材料经营单位公章和经办负责人签字（章）。

5.1.10 热交换器制造单位应对取得的材料及材料质量证明书的真实性和一致性负责,对不能确定材料质量证明书的真实性或者对性能和化学成分有怀疑的主要元件材料应进行复验。材料复验报告应纳入产品质量证明文件。

5.1.11 材料复验应符合 GB/T 150.4 及相关材料标准的规定。

5.2 受压元件用材

5.2.1 奥氏体型不锈钢

5.2.1.1 奥氏体型不锈钢受压元件通常可选用 S30408、S30403、S30409、S31008、S31608、S31603、S31609、S32168、S32169 等牌号。

5.2.1.2 钢板应符合 GB/T 713.7 的规定。

5.2.1.3 输送流体用钢管应符合 GB/T 14976 的规定,换热管用钢管应符合 GB/T 13296 及 NB/T 47019.5 的规定。

5.2.1.4 锻件应符合 NB/T 47010 的规定,锻件级别不得低于 III 级。

5.2.1.5 设计温度低于-196℃时,奥氏体型不锈钢受压元件用板材、管材及锻件应按 GB/T 6394 进行晶粒度检测,检测结果应不粗于 5 级,取样方向、取样部位按照 NB/T 47010 的要求执行。

5.2.1.6 接触液氢的受压元件用奥氏体型不锈钢钢材应满足下列要求。

- a) 宜选用 S30403、S31608 或 S31603 等牌号。应采用液氢容器专用的铬镍奥氏体型不锈钢,固溶处理状态交货,热轧钢板表面加工类型宜采用 1D,冷轧钢板表面加工类型宜采用 2B,用连铸坯或钢锭轧制的钢板,其压缩比不应小于 3.0;
- b) 材料的制造单位应对液氢容器专用奥氏体型不锈钢钢板、钢管(含成品采购管件)和钢锻件的材料质量证明书上的化学成分进行实测,根据实测值按 GB/T 150.2-2024 中 4.10 c)的规定进行奥氏体稳定性系数、低温马氏体自转变温度的计算,计算结果应满足奥氏体稳定性系数不小于零、低温马氏体自转变温度不高于受压元件最低设计温度的要求;
- c) 材料为氧气转炉或电炉冶炼的镇静钢,并应采用炉外精炼工艺并进行真空处理;
- d) 钢材应按 GB/T 13305 或用校准的铁素体磁性测量仪进行铁素体含量测定,铁素体测量含量应不大于 3 %;
- e) 管件成形后使用铁素体测量仪测得的铁素体显示含量应不大于 5%,当超过 5%时应进行固溶处理;
- f) 与液氢介质接触的钢板表面粗糙度应不大于 Ra1.6,且油脂残留量应不大于 125mg/m²;锻件表面宜抛光,表面粗糙度不大于 Ra0.8。钢管宜为抛钢管,内表面粗糙度不大于 Ra0.8;
- g) 用于壳体的钢材应按批进行-196 °C或-253℃下的低温夏比 V 型缺口冲击试验,合格指标按表 5-2 的要求。

表 5-2 用于液氢环境的奥氏体型不锈钢冲击试验要求

名称	数量	试验温度 ℃	3个标准试样冲击吸收能量平均值 $KV_2^{a,b,c,d,e}$ J	侧膨胀值LE mm
钢板	1组(3个)	-253	≥54	≥0.53
钢管	1组(3个)	-253	≥54	≥0.53

锻件	1组（3个）	-253	≥54	≥0.53
^a 3个试样的冲击吸收能量平均值需满足规定值，至多允许有1个试样的冲击吸收能量低于规定值，但不应低于规定值的 75%。 ^b 冲击试验标准试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm。当钢材尺寸无法制备标准试样时则应依次制备宽度为7.5 mm、5 mm的小尺寸冲击试样，其冲击吸收能量指标分别为标准试样冲击吸收能量指标的75%、50%，侧膨胀值与标准试样侧膨胀值的指标相同。 ^c 当无法制备 5 mm×10 mm×55 mm 小尺寸冲击试样时，免做冲击试验。 ^d 当设计委托方允许时，每批钢板、锻件、接管也可采用-196℃下进行一组（3个试样）的冲击试验代替-253℃下的冲击试验，-196℃下3个试样的冲击吸收能量平均值KV_2不低于 70 J、每个试样的侧膨胀值LE不小于 0.76mm。 ^e 冲击试验时全程应采取液氮吸热，保证冲击时试样的温度不高于试验温度，每个试样的冲击试验时间不得超过3秒。				

5.2.1.7 不锈钢制绕管式换热器的材料应满足 NB/T 10938 的规定，与氢接触的换热管应采用无缝管。

5.2.2 低合金钢和非合金钢

5.2.2.1 低合金钢和非合金钢板应符合 GB/T 713.2 的规定，低温低合金钢板应符合 GB/T 713.3 的规定，镍合金钢板应符合 GB/T 713.4 的规定。

5.2.2.2 钢管应符合 GB/T 9948 的规定，换热管用钢管还应符合 NB/T 47019 的规定。

5.2.2.3 低合金钢和非合金钢锻件应符合 NB/T 47008 的规定，低温低合金钢锻件应符合 NB/T 47009 的规定。

5.2.2.4 设计压力大于 41MPa 且小于 100MPa 的临氢环境用铬钼钢材料应满足 GB/T 44457 中的相应要求。

5.2.2.5 非合金钢或低合金钢制热换热器在高温临氢环境服役时，为防止产生氢腐蚀，可依据图 5-1(纳尔逊曲线)进行选材。该曲线未考虑可能存在的其他腐蚀性物质（如硫化氢）、蠕变、回火脆性或其他高温损伤机制、高温高压氢与蠕变等协同作用等因素。

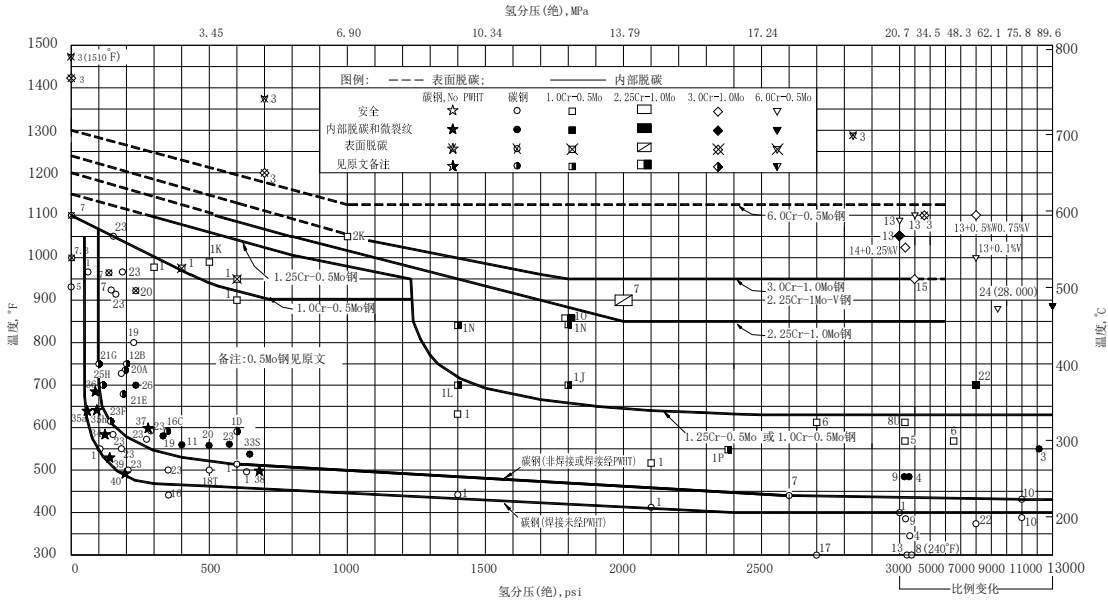


图 5-1 非合金钢和低合金钢在含氢环境中服役时为避免高温氢腐蚀的操作限制

5.2.2.6 热换热器在高温氢气和硫化氢共存环境下服役时，可基于服役温度、含硫量或硫化氢的浓度

按照 SH/T 3096 进行选材。

5.2.2.7 镍合金钢应采用电炉+炉外精炼方法或氧气转炉+炉外精炼方法生产，并经真空处理。

5.2.2.8 镍合金钢钢板应以离线淬火+回火（QT）的调质热处理状态交货，厚度小于等于 8mm 的钢板允许采用离线淬火+两相区淬火+回火（QLT）热处理状态供货。

5.2.2.9 镍合金钢钢板热处理后应在工厂进行喷丸处理以去除钢板表面氧化铁皮，钢板表面满足 GB/T 8923.1 中的 SA2.5 级规定。钢板出厂前涂刷无机富锌底漆（车间防锈底漆），漆膜厚度为 $30 \pm 5 \mu\text{m}$ ，局部厚度不超过 $50 \mu\text{m}$ 。

5.2.2.10 06Ni7DR, 06Ni9DR 每张钢板在工厂应进行剩磁检查，检查沿钢板四边进行，剩余磁场强度不大于 30 高斯为合格。每张钢板四角都应检测，检测点位于板厚 1/2 位置处，且距离顶角棱边距离 10~15mm。

5.2.3 铝和铝合金

5.2.3.1 受压元件用板材、带材、箔材应符合 GB/T 3880、GB/T 3198、GB/T 3190 的规定，宜选用 3003、3004、5083、5052、5454 等牌号，选用的产品状态一般为 O 态、H111 态或 H112 态。

5.2.3.2 受压元件用铝和铝合金管应符合 GB/T 6893、GB/T 4436 或 GB/T 4437 的规定，宜选用 5052，5083，6061 或 6063 等牌号，5052 及 5083 一般为 H112 态，6061 及 6063 一般为 T6 态。

5.2.3.3 受压元件用铝合金锻件应符合 NB/T 47029 的规定，选用 5052，5083，6061 等牌号，5052 及 5083 一般为 H112 态，6061 一般为 T6 态。

5.2.3.4 铝和铝合金用于受压元件时，其设计温度应满足如下要求。

- a) 最低设计温度为 $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 对含镁量大于或等于 3% 的铝合金，最高设计温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其他铝和铝合金，最高设计温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.2.3.5 受压元件用铝和铝合金材料还应符合 NB/T 47006、JB/T 4734 的规定。

5.2.3.6 材料表面应光滑清洁，无裂纹、折叠、氧化皮等缺陷。

5.2.3.7 铝制板翅式热交换器的隔板应为铝基三层钎焊复合板。

5.2.3.8 铝制绕管式热交换器的材料应满足 GB/T 151、JB/T 4734 的相关规定，与氢接触的换热管应采用无缝管。

5.2.3.9 铝制扩散焊热交换器的板材、管材、锻件以及金属粉末材料应满足 GB/T 151、NB/T 11917 的相关规定。

5.2.4 熔化焊焊接材料

5.2.4.1 焊接材料的选择应使按合理的焊接工艺施焊的焊缝金属力学性能满足 NB/T 47016 和设计文件的规定，并确保在设计和服役条件下力学性能、耐腐蚀性能及低温韧性 with 母材相匹配。

5.2.4.2 受压元件用焊接材料应符合 NB/T 47018、NB/T 47015 的规定。

5.2.4.3 钢制热交换器的焊接材料，还应符合 GB/T 150.2 或 GB/T 4732.2 的要求。铝及铝合金制热交

换热器的焊接材料应符合 JB/T 4734 的要求。

5.2.4.4 受压元件用焊接材料，其熔敷金属的抗拉强度不宜低于母材标准规定的下限值，且应当保证焊缝金属的拉伸性能满足母材标准规定的下限值，其冲击吸收能量满足设计文件的要求。

5.2.4.5 受压元件用焊接材料，其熔敷金属的冲击吸收能量不宜低于母材标准的规定值。当冲击吸收能量低于母材标准的规定值时，应按 NB/T 47014 的方法制备焊接试件，其焊缝金属冲击吸收能量指标应在设计文件中规定。

5.2.4.6 奥氏体型不锈钢材料焊缝金属 Cr、Ni 元素含量不应低于相应的母材标准规定值，其耐腐蚀性能也不应低于母材相应要求。

5.2.4.7 不同钢号钢材相焊时，焊接材料选用原则如下。

- a) 低碳钢之间、低碳钢与低合金钢、低合金钢之间相焊，选用焊接材料应保证焊缝金属的抗拉强度高于或等于强度较低一侧母材抗拉强度下限值，且不宜超过强度较高一侧母材标准规定的上限值；
- b) 低碳钢、低合金钢与奥氏体型不锈钢相焊，当设计温度高于 370℃时，宜采用镍基焊接材料；
- c) 低碳钢、低合金钢与铁素体型不锈钢或奥氏体-铁素体型不锈钢相焊，应采用适于异种钢焊接的焊接材料，与奥氏体-铁素体型不锈钢相焊也可采用双相钢焊材；
- d) 耐热型低合金钢之间或耐热型低合金钢与其他低合金钢之间相焊，宜按铬钼含量低侧母材选用焊材。

5.2.4.8 用于镍合金钢焊接的焊条、焊丝等焊材优先选用进口牌号；选用国内等同牌号焊材时，应是相同工况中热交换器已成功使用的焊材。

5.2.4.9 铝制受压元件的焊接，为保证焊缝金属的耐蚀性，当母材为纯铝时，宜采用纯度不低于母材的焊丝，母材为铝镁合金或铝锰合金时，宜采用含镁量或含锰量不低于母材的焊丝。

5.2.4.10 用于铝制受压元件焊接的焊丝应严格控制杂质含量，焊丝和填充丝表面应保持光亮、光滑，应无毛刺、凹坑、划痕、氧化皮、裂纹、折叠及夹杂等缺陷。

5.2.4.11 焊接材料应有产品质量证明书和清晰、牢固的标志，热交换器的制造单位应当建立并且严格执行焊材的验收、复验、保管、烘干、发放和回收制度。

5.2.5 钢铝过渡接头

5.2.5.1 不锈钢钢管和铝管之间应采用钢铝过渡接头进行连接。与不锈钢钢管和铝管直接焊接连接的钢铝过渡接头的不锈钢侧和铝侧的材料牌号宜与外部连接管道的材料一致。

5.2.5.2 用于制造钢铝过渡接头的不锈钢和铝或铝合金的材料应符合下表 5-3 所列标准的要求。当过渡层采用镍和钛时，镍板和钛板应分别满足 GB/T 2054 或 SB-162 和 GB/T 3621 或 SB-265 的规定。

表 5-3 钢铝过渡接头材料

序号	位置	材料类型	常用材料牌号	国内标准	ASME 标准
----	----	------	--------	------	---------

1	钢材侧	奥氏体不锈钢板材	S30408	GB/T 713.7	SA-240/SA-240M
2		奥氏体不锈钢锻件	S30403 S31608	NB/T 47010	SA-182/SA-182M
3		奥氏体不锈钢棒料	S31603	GB/T 1220	SA-276/SA-276M
4	铝材侧	铝合金板材	5083-O	GB/T 3880	SB-209/SB-209M
5		铝合金锻件	5083-H112, 5454-O	NB/T 47029	SB-247
6		铝合金棒料		GB/T 3191	SB-221/SB-221M
7	过渡层	镍	N02200, N02201	GB/T 2054	SB-162
8	过渡层	钛	TA1, TA2	GB/T 3621	SB-265
9	过渡层	铝	1100, 1060	GB/T 3880	SB-209/SB-209M

5.2.5.3 用于制造钢铝过渡接头的多层金属材料之间的连接应采用可靠的热套、爆炸焊、摩擦焊等工艺制造，同种材料禁止分层复合。接头强度应不低于各多层材料中的较低者。

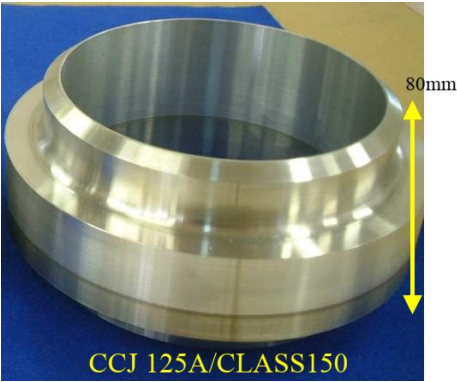


图 5-2 爆炸焊型钢铝过渡接头示意图



图 5.3 热套型钢铝过渡接头示意图



图 5-4 摩擦焊型钢铝过渡接头

5.2.5.4 钢铝接头的母材应进行超声检测，设计文件中应提出技术等级及质量等级。

5.2.5.5 当采用爆炸成形的复合板制造钢铝过渡接头时，复合板的界面结合率应为 100%，复合板层数应至少为 3 层，中间过渡层的层数和材质由钢铝过渡接头制造厂根据制造工艺确定。每一道爆炸焊接界面在进行下一层爆炸焊接之前都应进行超声检测，满足 NB/T 47013.3 的 I 级合格。

5.2.5.6 钢铝过渡接头的力学性能应满足以下要求：

- a) 多层金属材料复合后应做垂直于复合层方向的拉伸试验，抗拉强度应大于等于 90 MPa；
- b) 各材料结合界面的剪切强度：铝与铝间应大于等于 70 MPa，铝与钛间应大于等于 70 MPa，钛与镍间应大于等于 140 MPa，镍与不锈钢间应大于等于 140 MPa。

5.2.5.7 设计文件中应对钢铝过渡接头提出无损检测和力学性能试验要求，包括检测和试验方法以及合格指标。

5.2.5.8 钢铝过渡接头在出厂前至少应进行如下检验，如有额外要求应在合同中明确。

- a) 外观和尺寸检查；
- b) 公称直径不小于 DN50 的钢铝过渡接头，其结合面的内外侧应进行 PT 检测；
- c) 钢铝过渡接头应进行氦检漏，对公称直径小于或等于 DN150（6 NPS）的过渡接头，泄漏率不得超过 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。对公称直径大于 DN150（6 NPS）的过渡接头，泄漏率不得超过 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ；
- d) 如有要求，应进行不小于 1.5 倍设计压力的液压试验；
- e) 按设计文件的要求进行低温冲击试验。

5.2.5.9 钢铝过渡接头的制造单位应提供钢铝过渡接头与不锈钢管、铝管焊接时的温度控制和焊接工艺要求。实施钢铝过渡接头与不锈钢管、铝管焊接的施工单位，应根据钢铝过渡接头制造单位推荐的焊接工艺要求制定焊接工艺并实施焊接，焊接后的焊接接头应进行氦检漏，合格指标按设计文件的规定。

5.2.6 紧固件材料

5.2.6.1 受压元件用紧固件的材料应符合 GB/T 150.2-2024 的 8 或 GB/T 4732.2-2024 的 8 的规定。

5.2.6.2 设计温度低于 -20℃ 的受压元件紧固件用钢还应符合 GB/T 150.3-2024 附录 E 的相应规定。

5.3 其他元件用材

5.3.1 封装材料

5.3.1.1 板翅式热交换器内催化剂的封装材料应有良好的力学性能和耐低温性能。当封装材料与热交换器直接焊接连接时，还应具有良好的焊接性能。

5.3.1.2 封装材料的材质通常采用奥氏体型不锈钢、铝合金或者两者的复合材料。奥氏体不锈钢和铝合金应分别符合 GB/T 713.7 和 GB/T 3880 的规定。

5.3.1.3 封装材料形式可采用金属丝网，通过烧结或其他方式复合成具有封装催化剂、防止催化剂漏出功能的结构型式。当封装材料采用烧结不锈钢过滤元件的结构时，应满足 GB/T 6886 的规定。

5.3.1.4 封装材料的过滤精度应与所用的催化剂相适应，并应满足设计文件的要求。

5.3.2 绝热材料

5.3.2.1 氢气液化冷箱内热交换器所用的绝热材料可采用高真空多层绝热材料，多层绝热的反射屏或间隔物可采用铝箔、阻燃双面镀铝膜、玻璃纤维布、玻璃纤维纸。

5.3.2.2 高真空多层绝热的反射屏采用铝箔时，厚度应为 0.005 mm~0.025 mm，抗张强度不低于 200MPa；间隔物采用玻璃纤维布时，厚度应为 0.015 mm~0.100 mm，，含水率≤0.3%（质量比）。

高真空多层绝热材料还应符合 GB/T 31480 的规定，且应满足在操作时的液氢低温条件的使用要求。

5.3.2.3 阻燃双面镀铝膜表面应有连续、明亮的光泽，无油迹、汗渍、手印等污渍，不打褶，边缘应光滑、平整。对着光源目测，不应有明显划痕、孔洞、杂质、镀铝层脱落。

5.3.2.4 玻璃纤维纸和阻燃双面镀铝膜均应满足与氧的相容性要求，玻璃纤维纸与氧的相容性按 GB/T 31481-2015 的 4.3 进行评价，阻燃双面镀铝膜与氧的相容性按 GB/T 31481-2015 的 4.2 进行评价。

5.3.2.5 高真空多层绝热辅料包括脱脂玻璃纤维带、3M 铝箔胶带等，应满足 GB/T 31480 的要求。

5.3.2.6 采用超细玻璃纤维制品应符合GB/T 13350中玻璃纤维毡的相关规定，且满足以下要求。

a) 含水率≤0.3%（质量比）；

b) 密度≤16kg/m³；

c) 导热系数：在标准大气压力和常温下，导热系数≤0.033W/（m.K）；在真空度为0.133pa（0.001mmHg）和温度-269℃（4K）~232℃（505K）下，导热系数≤0.0036 W/（m.K）。

5.3.3 正仲氢转化催化剂

5.3.3.1 用于正仲氢转化的催化剂通常为过渡金属氧化物（如氧化铁、氧化铬）负载在特定载体上。具体要求参见附录 C。

5.3.3.2 催化剂应有产品合格证和性能检测报告，包括组成、粒度、比表面积、活性、机械强度等指标。

5.3.3.3 催化剂应具有良好的低温活性、高选择性、良好的机械强度及热稳定性。

6 设计

6.1 工艺设计

6.1.1 一般要求

6.1.1.1 热交换器的工艺设计应依据需方或设计委托方提供的设计条件、工艺流程和边界条件进行，并应满足安全、可靠、可制造、可检验、可安装、可操作和可维护的要求。

6.1.1.2 工艺设计应结合氢液化工艺特点，综合考虑氢气及相关介质在工艺条件下的真实气体效应、热物性变化、多股流换热特性、正仲氢转化热效应影响。

6.1.1.3 对承担正仲氢转化功能的热交换器，工艺设计应考虑传热、流动与正仲氢转化反应之间的相互影响。

6.1.2 设计条件

6.1.2.1 热交换器的需方或设计委托方应以书面形式向设计单位提出工艺设计条件。工艺设计条件至少应包括以下内容：

- a) 操作数据，包括各物流的介质名称、组成、纯度、相态、流量、温度、压力及操作弹性等；涉及相变、两相流或液化过程时，应提供气相分率或相组成等参数；
- b) 物性数据，包括各介质在设计计算温度、压力和组成范围内的密度、定压比热容、黏度、导热系数等；涉及相变、两相流或液化过程时，应提供相平衡数据；涉及正仲氢转化时，应提供正仲氢平衡组成及转化热数据；
- c) 允许阻力降、最小传热温差、换热负荷及其他传热要求；
- d) 正仲氢转化要求，包括入口仲氢摩尔分数、目标出口仲氢摩尔分数或目标转化率、催化剂类型或性能数据、催化剂装填条件及允许床层阻力降等；
- e) 安装要求，包括设备布置、管口方位、接口条件、冷箱内外布置、绝热方式及检修维护要求等；
- f) 工艺设计需要的其他必要条件。

6.1.2.2 设计输入中缺失或存在不一致的关键工艺参数，应由需方或设计委托方书面确认。

6.1.3 选型

6.1.3.1 热交换器型式及主要工艺参数应根据氢液化工艺流程要求、操作温度、操作压力、介质性质、允许阻力降、传热要求、制造检验条件以及安装、操作和维护要求确定，并应满足安全可靠的要求。

6.1.3.2 氢液化装置中的热交换器可按表 6-1 进行选型，各热交换器的典型工艺位置如图 6-1 所示。

表 6-1 氢液化装置主要热交换器推荐型式

工艺位置或功能	宜选热交换器型式	选型要求
级后冷却器	管壳式热交换器、扩散焊热交换器，或其他满足工艺要求的热交换器	应满足相应压缩机系统对压力、温度、流量、振动、冷却介质和检修维护的要求。
无转化低温氢热交换器	铝制板翅式热交换器、绕管式热交换器	应满足多股流换热、小传热温差、低漏热、低温材料适用性和流量分配要求。
连续转化型热交换器	连续转化型板翅式热交换器、连续转化型绕管式热交换器	应满足传热、阻力降、正仲氢转化、催化剂装填和反应热导出的要求。
等温型正仲氢转化器	管壳式热交换器，或其他满足工艺要求的热交换器	应满足催化床层温度控制、转化率、阻力降和检修维护要求。
注：绝热型正仲氢转化器不承担换热功能，不作为本表热交换器型式推荐对象。		

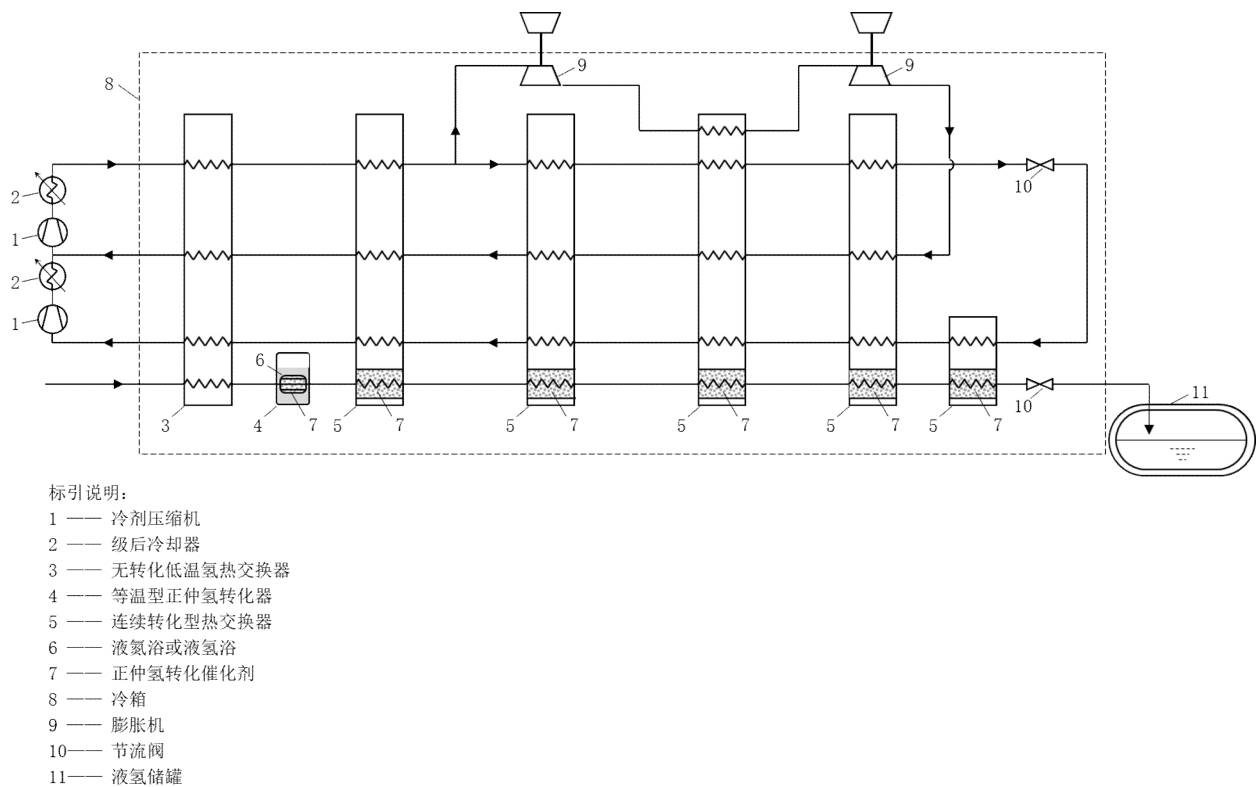


图 6-1 典型氢液化装置中热交换器的工艺位置示意图

6.1.3.3 采用表 6-1 以外的热交换器型式时，应根据工艺计算、结构设计、制造检验条件和运行经验进行论证，并在设计文件中说明选型依据。

6.1.4 工艺计算

6.1.4.1 热交换器工艺计算应包括热量衡算、传热计算和阻力降计算。对承担正仲氢转化功能的热交换器，还应包括正仲氢转化计算。计算结果应满足工艺设计条件要求。

6.1.4.2 工艺计算所采用的氢气、氦气及其他低温工质物性数据，应覆盖设计规定的温度、压力和组成范围。物性数据应包括密度、定压比热容、焓、黏度、导热系数、普朗特数及必要的相平衡数据。涉及正仲氢转化时，还应包括正仲氢平衡组成、正仲氢转化热及组成变化对热力性质的影响。

6.1.4.3 工艺计算应采用来源可靠的物性数据库，并确保物性数据库的适用范围和参数定义满足工艺计算的要求。

6.1.4.4 热量衡算应根据各物流的流量、组成、相态、温度、压力和目标出口参数进行。对存在正仲氢转化的工况，应考虑正仲氢转化热的影响。

6.1.4.5 传热计算应考虑介质热物性随温度、压力、相态和组成的变化。对多股流热交换器，应进行各物流之间的热量匹配计算，并校核最小传热温差和温度交叉。宜采用分温区或沿程离散方法进行计算。

6.1.4.6 阻力降计算应包括沿程阻力和局部阻力。对多股流或并联流道结构，应校核各通道的流量分配。对装填正仲氢转化催化剂的流道，应考虑催化剂装填对有效流通截面和流速的影响，计算床层

阻力降。

6.1.4.7 对承担正仲氢转化功能的热交换器，应依据入口仲氢摩尔分数、目标出口仲氢摩尔分数或目标转化率、操作温度、操作压力、流量、催化剂性能数据及允许床层阻力降等条件，进行正仲氢转化计算或校核。计算或校核宜包括下列内容：

- a) 根据操作温度确定平衡仲氢摩尔分数。目标出口仲氢摩尔分数不应高于相应温度下的平衡仲氢摩尔分数；目标转化率应按相应温度下的平衡仲氢摩尔分数进行校核；
- b) 根据入口仲氢摩尔分数、出口仲氢摩尔分数和平衡仲氢摩尔分数，计算仲氢转化率；
- c) 根据催化剂性能数据、流量和目标转化要求，确定或校核催化剂装填量和催化空速；
- d) 计算正仲氢转化热，并确定其对热量衡算和最小传热温差的影响；
- e) 计算催化剂床层阻力降，并校核其是否满足允许床层阻力降要求。

6.1.4.8 对连续转化型热交换器，宜进行传热、流动和正仲氢转化耦合计算；也可先进行热量衡算、传热计算和阻力降计算，再进行转化计算以确定催化剂装填量，并根据计算结果进行迭代校核。

6.1.5 设计文件

6.1.5.1 工艺设计文件至少应包括下列内容：

- a) 工艺数据表，内容宜包括各物流的正常工况、设计工况、最大负荷工况、最小负荷工况及必要的特殊工况；
- b) 物性数据来源及计算方法说明；
- c) 热交换器选型说明；
- d) 热量衡算书；
- e) 传热计算书；
- f) 阻力降计算书；
- g) 正仲氢转化计算或校核说明，适用于承担正仲氢转化功能的热交换器；
- h) 工况校核说明及其他必要的设计说明。

6.1.5.2 采用本文件附录 B 的数据或关联式进行计算时，工艺设计文件中应说明正仲氢组成数据、正仲氢转化热数据、传热与阻力关联式的适用范围和取值方法。附录 B 已要求计算文件说明物性数据来源、正仲氢组成数据、正仲氢转化热折算方法以及 j 因子和 f 因子关联式的适用范围，可与本条协调使用。

6.2 铝制板翅式热交换器

6.2.1 一般规定

6.2.1.1 铝制板翅式热交换器的设计除符合本标准的规定外，还应满足 NB/T 47006 的相关规定。

6.2.1.2 热交换器的传热计算应采用准确的介质物性数据，特别对于氢气液化冷箱内的铝制板翅式热交换器，应考虑氢气、氦气等介质在低温和超低温下特殊的热物理性质。

6.2.1.3 封头、导流片设计应优化，减少流动死区，降低流动阻力。翅片型式、高度、间距等参数应

根据介质特性和传热要求优化选择。

6.2.1.4 通道布置时应考虑多股流布置的复杂性和各通道间的密封可靠性。存在相变的介质通道不宜布置在芯体外侧。

6.2.1.5 氢气液化冷箱内的板翅式热交换器的芯体工艺层应设置吹扫口或可与冷箱内部空间连通的管口，便于冷箱抽真空。

6.2.1.6 冷箱内的板翅式热交换器的支座结构设计应考虑减少漏热，其与冷箱内部支撑结构之间应设置隔热材料，且隔热材料应同时满足隔热要求和结构强度要求。

6.2.1.7 氢气接管（铝管）流速宜控制在：当设计压力在 0.1 MPa~3.0 MPa 时，最大流速不超过 15 m/s；设计压力大于 3.0 MPa 时，最大流速不超过 10 m/s。

6.2.1.8 液氢接管（铝管）流速宜控制在 0.5 m/s~2 m/s。

6.2.2 连续转化型板翅式热交换器

6.2.2.1 连续转化型板翅式热交换器设计时除了考虑催化剂的存在对传热和压降的影响，还应考虑正仲氢转化热对传热面积和通道布置的影响。

6.2.2.2 连续转化型板翅式热交换器装填催化剂的介质通道的翅片型式宜选用平直翅片、多孔翅片或波纹翅片，翅片高度、节距的大小还应满足催化反应的相关要求。

6.2.2.3 装填催化剂的介质通道不宜设置导流片，且翅片宜比隔板边缘内缩一定尺寸。

6.2.2.4 连续转化型板翅式热交换器的材质选用应考虑催化剂活化工况的影响。

6.2.2.5 催化剂床层两端应设置防止催化剂颗粒泄漏或流失的封装结构（如金属丝网、多孔板），封装结构的材料应满足本文件 5.3 的相关要求，封装结构的过滤精度应大于催化剂的颗粒尺寸。

6.2.2.6 催化剂封装结构可根据需要设置于板翅式热交换器芯体外部或内部，当置于芯体内部时，应不影响钎焊。

6.2.2.7 热交换结构设计时应考虑催化剂装填、更换和活化再生的便利性。

6.3 绕管式热交换器

6.3.1 一般规定

6.3.1.1 根据管程流体数量，绕管式热交换器分为单股流和多股流两种结构型式，主要零部件及名称见图 6-1 和图 6-2。

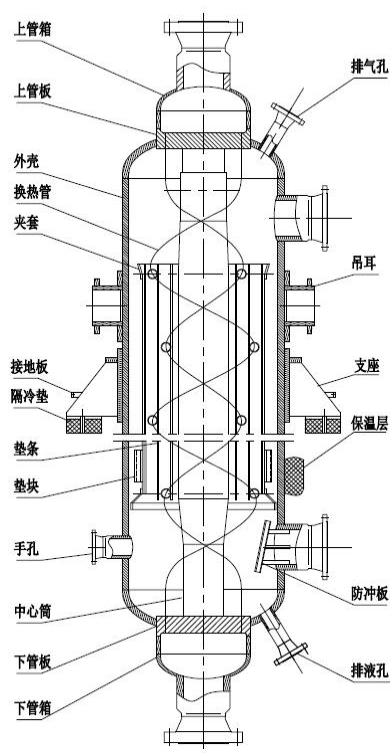


图 6-1 单股流绕管式热交换器

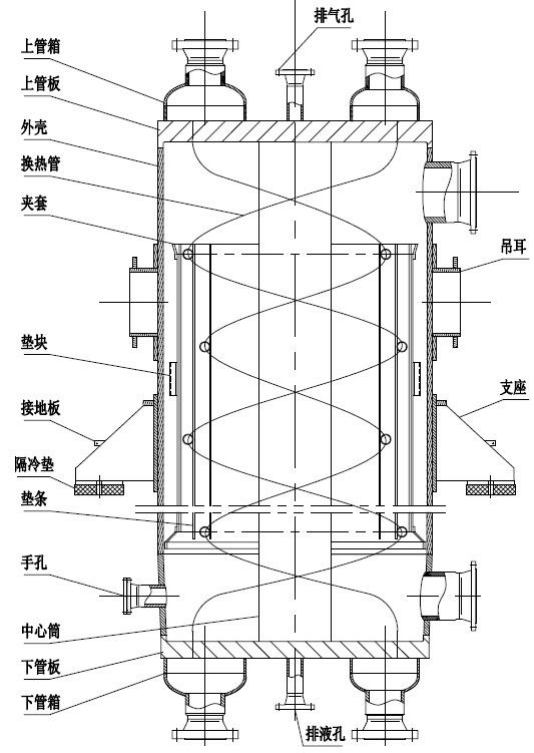


图 6-2 多股流绕管式热交换器

6.3.1.2 不锈钢制绕管式热交换器的设计除符合本文件的规定外，还应满足 NB/T 10938 的相关规定。

6.3.2 结构设计

6.3.2.1 绕管式热交换器的芯体设计时应设置合理的换热管缠绕角度、不同层换热管间的层间距和同层换热管间的轴向间距，以保证介质分布均匀和管束的结构稳定。

6.3.2.2 中心筒、管板以及芯体支撑结构应有足够的强度和刚度，以承受管束的缠绕预应力、操作温差应力及介质压力。中心筒与管板的连接结构按图 6-3。

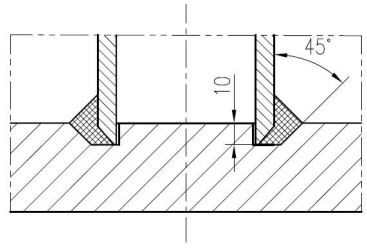


图 6-3 中心筒与管板的连接结构

6.3.2.3 对于装填催化剂的绕管式热交换器，催化剂可根据需要装填在壳程或换热管内，结构设计应确保催化剂固定可靠、气流分布均匀且压降低。

6.3.2.4 绕管式热交换器结构设计时应合理布置进、出口管箱，降低制造过程中的梳管难度。

6.3.2.5 换热管宜通过专用绕管机缠绕在中心筒上，并通过定位元件（如平垫条、异性垫条、管箍等）与中心筒进行可靠连接固定，热交换器的芯体结构设计应考虑其在生产制造、检验试验、运输、安装以及正常运行等各阶段可能存在的各种载荷，对中心筒和相关支撑结构进行强度校核。

6.3.2.6 中心筒的最小直径 D_0 （一般薄壁管应取推荐值的上限）为： $D_0 \cong (10 \sim 20) d_0$ ，其中 D_0 为中心筒外径， d_0 为换热管外径。

6.3.3 设计计算

- 6.3.3.1 传热计算应考虑螺旋管内的强制对流、壳程的复杂流动以及管、壳程间的传热耦合。
- 6.3.3.2 管内传热计算应考虑流体在螺旋管内流动时，流体受离心力的作用而向外壁挤压，产生二次环流，加强了对流体的扰动，相应的换热系数和流动阻力都比直管大。
- 6.3.3.3 壳程的传热计算尤其是在存在相变的情况下，应有工程经验支撑，如在横向逆流操作条件下，若沿着流体流动方向缠绕足够多的管子，则绕管式热交换器的平均温差可按与纯逆流热交换器同样的方法计算。若精度提高或有多流体等问题，传热面积的计算可以使用更复杂的迭代法。
- 6.3.3.4 压降计算应分别考虑管程和壳程，壳程压降计算需考虑缠绕管束的特殊流道。管程需要考虑螺旋管内流动的影响。
- 6.3.3.5 应进行详细的机械设计计算，包括管束的缠绕应力、管板强度、中心筒强度和稳定性、热膨胀差补偿等。中心筒的热补偿结构见图 6-4。

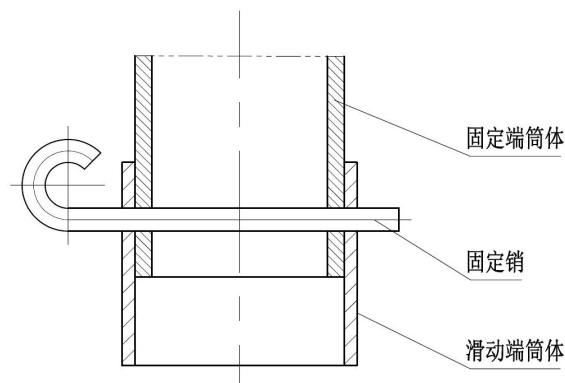


图 6-4 中心筒的热补偿结构

- 6.3.3.6 对于装填催化剂的绕管式热交换器，需计算催化剂床层的传热与反应。
- 6.3.3.7 管板初始厚度可参照 U 形管热交换器的管板进行计算，再根据管板位置和结构进行局部应力分析。

6.4 管壳式热交换器

6.4.1 结构设计

- 6.4.1.1 热交换器的结构设计应符合 GB/T 151 的规定。
- 6.4.1.2 介质含氢的热交换器宜选用固定管板式、U 形管式或浮头式结构型式。在设计温度低于 -100°C 时，宜优先选用 U 形管式或浮头式热交换器。
- 6.4.1.3 固定管板与标准设备法兰配合时，管板密封面结构尺寸、加工精度和粗糙度应符合 NB/T 47020、NB/T 47021、NB/T 47022 或 NB/T 47023 的相应规定。
- 6.4.1.4 法兰的设计应符合 GB/T 150.3 的规定，设备法兰优先采用 NB/T 47021~NB/T 47023、GB/T

29465 标准,接管法兰优先采用 HG/T 20615 或 HG/T 20592 标准。

6.4.1.5 密封结构及垫片应根据设计条件(介质、温度、压力)按相关标准设计或选用,通常可选用柔性石墨波齿复合垫片、缠绕垫片、八角垫、椭圆垫或金属平垫片等标准垫片,有成熟使用经验时,也可采用其他密封结构及垫片。

6.4.1.6 对于钢制热交换器,焊接接头的结构设计按 GB/T 150.3 或 GB/T 4732.3 和 GB/T 151 的规定;对铝或铝合金制热交换器,焊接接头的结构设计按 JB/T 4734 的规定。

6.4.1.7 管箱平盖与管箱的连接紧固件、壳体法兰和管箱法兰的连接紧固件宜采用双头螺柱。

6.4.1.8 管板与换热管的连接通常采用强度焊加贴胀方式,必要时可采用强度焊加强度胀。当要求管接头的可靠性较高、承压能力高、热交换器承受交变载荷、需要防止管接头被冲刷腐蚀、换热管与管孔的缝隙可能诱发间隙腐蚀、管接头存在应力腐蚀倾向和管理操作条件(如操作温度)苛刻时,可以采用内孔焊结构。

6.4.1.9 当介质中含氢时,钢制管束换热管与管板采用强度焊或强度焊加贴胀接头时,管板管孔直径偏差应不低于 I 级管束的要求。

6.4.1.10 对多管程结构,应尽可能使各管程的换热管数相近,分程隔板槽形状应简单,密封面长度应尽可能短。

6.4.1.11 当换热管间需要机械清洗时,换热管应采用正方形或转角正方形排列,相邻两换热管之间的净空距离不宜小于 6mm,对于外径为 10mm、12mm、14mm 的换热管,其中心间距应分别不小于 17mm、19mm、21mm。

6.4.1.12 分程隔板与管箱内壁应焊接牢固,采用双面连续焊缝或开坡口的全焊透连续焊缝焊接。如采用双面连续焊缝,最小焊脚尺寸为 3/4 倍分程隔板的设计厚度,且从密封面开始不小于 50mm 的范围内应为全焊透结构。允许采用与焊接连接等强度的其他连接方式,必要时,设计文件中应提出对焊缝的无损检测要求。

6.4.1.13 当介质中含氢或设计温度低于-45℃时,U 形换热管的弯曲半径不应小于 2 倍的换热管外径。

6.4.1.14 确定折流板间距时,应综合考虑设计条件、工艺要求、强度计算、流致振动等因素,管束两端的折流板应尽可能靠近壳程进、出口接管,其余折流板宜按等间距布置。换热管的无支撑跨距不应超过 GB/T 151-2026 表 7-40 的规定值,当存在流致振动时,应减小折流板间距或加设支持板,必要时应采取设置消音板等防振措施。折流板和支持板管孔直径及允许偏差按 GB/T 151 的规定,对流体脉动场合、存在流致振动的场合,管孔直径及允许偏差应采用 I 级或 TI 级管束的规定值。

6.4.1.15 立式热交换器上管板未设置排净口且有排净要求时,每个独立管程至少有 1~3 根换热管的上端面与上管板表面齐平。

6.4.1.16 设计温度低于-20℃的承压焊接接头结构设计应符合 GB/T 150.3-2024 附录 E 的相应规定。

6.4.1.17 热交换器采用高效传热元件或高效传热结构时,可按照 GB/T 27698 的规定由具有试验能力的测试机构进行性能测试。

6.4.2 设计计算

6.4.2.1 热交换器的设计单位（设计人员）应依据用户或设计委托方所提供的设计条件进行设计，考虑热交换器在全寿命周期内可能出现的所有失效模式，提出防止失效的措施。

6.4.2.2 按规则设计的热交换器，至少应考虑防止韧性断裂、屈曲、泄漏（过量变形）、均匀腐蚀和磨蚀等失效模式，并相应进行所需要的设计计算。

6.4.2.3 按分析设计的热交换器，至少应考虑防止塑性垮塌、局部过度应变、泄漏、屈曲、棘轮、疲劳和均匀腐蚀和磨蚀等失效模式，并相应进行所需要的设计计算。

6.4.2.4 热交换器的规则设计应符合 GB/T 151、GB/T 150 的规定，分析设计应符合 GB/T 4732 的规定。

6.4.2.5 当管壳式热交换器的设计条件、结构型式、公称直径、使用场景符合 GB/T 151 的适用范围时，可按 GB/T 151 进行设计计算。

6.4.2.6 当管壳式热交换器的设计压力不超过 35MPa、但 GB/T 151 不适用于该管板计算时，可按如下方法进行设计计算。

- a) 当结构型式符合 GB/T 4732.3 第 9 章的适用范围时，可按 GB/T 4732.3 进行管板强度和安定性评定、换热管强度和轴向稳定性校核，其他结构及元件按 GB/T 151 进行设计计算；
- b) 对不能按照 GB/T 150.3、GB/T 151 及相应引用标准进行设计计算的热交换器或受压元件，可按 GB/T 150.1-2024 中 5.1.6 规定的方法进行设计。

6.4.2.7 当管壳式热交换器的设计压力超过 35MPa 且小于 100MPa、但结构型式符合 GB/T 4732.3 第 9 章的适用范围时，可按 GB/T 4732.3 第 9 章进行管板强度和安定性评定、换热管强度和轴向稳定性校核，其他结构及元件按 GB/T 4732.3 进行设计计算。

6.4.2.8 当热交换器的设计条件、结构型式、公称直径、使用场景超出 GB/T 151 和 GB/T 4732.3 的适用范围或用户要求时，可按 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 进行基于应力分类法或弹塑性方法的分析设计。

6.4.2.9 当热交换器承受交变载荷但按 GB/T 4732.4 可免除疲劳评定时，应按 GB/T 4732.3 进行设计计算；若按 GB/T 4732.4 不能免除疲劳评定，应按 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 进行分析设计并进行疲劳评定。

6.4.2.10 对 U 形管、浮头式热交换器，管板计算时除换热管取名义厚度外，其他元件一般应采用有效厚度进行校核计算。对固定管板式热交换器，除换热管取名义厚度外，应按各元件分别同时取名义厚度和有效厚度对管板及其相关元件进行校核计算。

6.4.2.11 对有不同工况的热交换器，应按最苛刻的工况设计；必要时还应考虑不同工况的组合，并在设计文件或相应技术文件中注明各工况操作条件和设计条件下的压力和温度值。

6.4.2.12 根据设计条件，确定热交换器的计算工况，逐一对其进行校核计算，并符合下列规定。

- a) 对于 U 形管热交换器、浮头热交换器，若不能保证壳程压力与管程压力在任何情况下同时作用，则应分别对壳程压力（ P_s ）与管程压力（ P_t ）单独作用的两种工况进行校核。如壳程压力和管程压力之一为负压时，则应计入压差的危险组合；
- b) 固定管板式热交换器的计算工况见表 6-2，工况①～④为应核算的工况。当壳体带膨胀节时

或 P_s 与 P_t 之一为负压时，应附加计算⑤、⑥工况；

表 6-2 固定管板式换热器的计算工况

设计条件	计算工况					
	仅壳程压力作用		仅管程压力作用		壳程压力、管程压力同时作用	
	工况①	工况②	工况③	工况④	工况⑤	工况⑥
p_s	p_s		0		p_s	
p_t	0		p_t		p_t	
热膨胀差	不计入热应力	计入热应力	不计入热应力	计入热应力	不计入热应力	计入热应力

c) 上述 a)、b)各种型式热交换器，如壳程压力与管程压力同为正压，且能保证在任何情况下同时作用，则其承受两侧压力作用的公用元件可以按压差进行设计，即仅对壳程与管程压力同时作用的“计算工况”做校核计算。必要时还应相应提出相关制造、检验、试压等方面的技术要求以确保压差计算元件的安全运行。

6.5 扩散焊热交换器

6.5.1 结构设计

扩散焊热交换器的芯体是由板片（流道板）或板翅通过扩散焊接方式结合。芯体可以有蚀刻板片组成，也可为板翅式结构。

- a) 板片流道蚀刻或加工为直通道、Z 形通道、波纹形通道等，波纹截面为半圆形、圆形、矩形、水滴型等流道；
- b) 根据冷箱空间要求，设计合理适配的热交换结构；
- c) 扩散焊热交换器的进口宜设置能够防止扩散堵塞的滤网装置；
- d) 扩散焊热交换器芯体与管箱、管箱与接管之间的焊接宜采用全焊透结构；
- e) 扩散焊热交换器接管与管道的连接宜采用焊接形式，采用其他连接时应同样保证密封可靠。

6.5.2 设计计算

扩散焊热交换器的设计计算应满足以下要求。

- a) 依据成熟可靠的传热计算软件并结合实际工程验证经验，进行传热计算；
- b) 应依据结构设计进行三维建模，对模型进行等效处理后进行详细的温差应力分析；
- c) 应依据结构设计进行三维建模，并以模型为基础进行芯体流道的压力应力、壳体的压力应力、管道载荷等的分析计算；
- d) 有限元分析计算应按照 NB/T 11917、GB/T 4732 的标准要求进行。

7 制造、检验和验收

7.1 通用要求

7.1.1 热交换器的制造、检验和验收，除遵守本标准规定外，还应符合 GB/T 150.1-2024 和 GB/T

150.4-2024 的有关规定，当热交换器的设计温度低于-20℃时，还应满足 GB/T 150.3-2024 附录 E.3 的有关规定。其中板翅式热交换器还应符合 NB/T 47006 的有关规定，绕管式热交换器还应符合 NB/T 10938 的有关规定，管壳式热交换器还应符合 GB/T 151 的有关规定，扩散焊热交换器还应符合 NB/T 11917 的有关规定。

7.1.2 熔化焊焊接坡口应采用机械加工（车削、铣削）或等离子切割方式加工，不应使用火焰切割，因其热影响区会形成粗晶组织，低温韧性急剧下降；坡口表面应光滑、无毛刺、无分层、无裂纹；坡口及两侧各 25mm 范围内应清理干净，不得有油污、锈蚀、氧化皮、水分等污染物。

7.1.3 低温热交换器的焊接应控制焊接热输入，多层多道施焊。

7.1.4 焊接接头表面应按相关标准进行外观检查，不应有表面裂纹、未焊透、未熔合、咬边、表面气孔、弧坑、未填满、夹渣和飞溅物，焊缝与母材应圆滑过渡，角焊缝的外形应凹形圆滑过渡。

7.1.5 对于扩散焊热交换器，宜制作真空扩散焊接试件，焊接试件的低温冲击性能满足使用要求。

7.1.6 对于冷箱内的热交换器，所有与工艺介质接触的内表面，出厂前必须进行彻底清洁和干燥，确保内部无油脂、颗粒物、水分及其他可能存在低温冻堵，影响介质纯度、产品性能或系统安全的污染物。

7.1.7 冷箱内热交换器的清洁度控制指标应满足以下要求。

- a) 颗粒物：粒径 $\geq 100\ \mu\text{m}$ 的颗粒物不得检出；
- b) 油脂含量 $\leq 10\ \text{mg/m}^2$ ；
- c) 水分：露点 $\leq -40^\circ\text{C}$ （在设备出口测得）；
- d) 氧气及其他杂质含量应符合工艺要求。

7.1.8 冷箱外热交换器的清洁与干燥要求按工艺要求执行。

7.1.9 制造厂应规定并执行有效的清洁和干燥工艺规程（如溶剂清洗、碱性清洗、蒸汽吹扫、干燥气体吹扫、真空干燥等），并对最终清洁度进行验证（如擦拭法、粒子计数、露点检测、气质谱分析等）。

7.1.10 清洁、干燥后的热交换器应采取充氮保护等有效措施，防止在存储和运输过程中被再次污染，氮封压力宜不低于 0.05MPa（表压）。

7.1.11 热交换器的出厂资料应满足以下要求。

- a) 制造单位应向热交换器采购方提供出厂资料，对热交换器使用有特殊要求时，还应提供使用说明书；
- b) 热交换器的出厂资料应至少包含以下内容：
 - 1) 热交换器竣工图样；
 - 2) 热交换器产品合格证（含产品数据表）；
 - 3) 产品质量证明文件（含材料清单、主要受压元件材质证明书、质量计划或检验计划、外观及几何形状尺寸检验报告、焊接记录、无损检测报告、耐压试验报告、泄漏试验报告等）；

- 4) 产品铭牌的拓印件或者复印件;
- 5) 特种设备监督检验证书(对需要监督检验的热交换器);
- 6) 热交换器设计文件。

7.1.12 热交换器的涂覆和运输包装应符合 NB/T 10558 的规定。

7.2 铝制板翅式热交换器

7.2.1 制造

7.2.1.1 翅片成型应尺寸精确,翅形均匀,表面无毛刺、裂纹、划伤等缺陷。

7.2.1.2 芯体组装前,翅片、导流片、封条、隔板应进行去油清洗,清洗后的油脂含量应不大于 10 mg/m²。

7.2.1.3 连续转化型板翅式热交换器装填催化剂的通道的翅片在分片组装时应采取有效措施保证翅片流道流通方向对齐,以便催化剂顺利装填。

7.2.1.4 芯体组装应在洁净环境中进行,环境洁净度应满足工艺要求,防止油污、灰尘、金属屑等杂物污染零部件表面。

7.2.1.5 组装时应严格控制层间对齐度,芯体上下平面的错位量每 100 mm 高不大于 1 mm,且总错位量不大于 5 mm。

7.2.1.6 芯体组装叠层后钎焊前应用专用夹具夹紧,保证翅片、封条与隔板之间的钎焊间隙均匀一致。

7.2.1.7 芯体钎焊应具有评定合格的钎焊工艺支持。

7.2.1.8 连续转化型板翅式热交换器的催化剂装填应在芯体钎焊、热交换器整体检验合格后进行,装填前宜对催化剂进行筛选处理,确保颗粒尺寸均匀。

7.2.1.9 催化剂装填应在洁净干燥环境下进行,按设计量均匀装填至指定通道。

7.2.1.10 催化剂的活化处理宜在装填完成后进行,活化要求按供应商的相关规定。活化处理后的催化剂通道应进行有效密封处理,防止催化剂失活。

7.2.2 检验和试验

7.2.2.1 封头和接管等受压元件的 A、B 类焊接接头应进行 100%射线或超声检测,射线或超声检测分别按 NB/T 47013.2、NB/T 47013.3 进行,射线检测技术等级不低于 AB 级,质量等级 II 级合格;超声检测技术等级不低于 B 级,质量等级 I 级合格。

7.2.2.2 所有熔化焊焊接接头应按 NB/T47013.5 进行 100%渗透检测,质量等级不低于 I 级。

7.2.2.3 热交换器制造完成后应进行耐压试验,耐压试验的项目和要求应符合 GB/T 151、NB/T 47006 和设计文件的相关规定。

7.2.2.4 当采用水压试验进行耐压试验时,试验完成后应采取有效措施吹干水分,吹干后的露点应不大于-40℃。

7.2.2.5 对于连续转化型板翅式热交换器,装填催化剂后的通道试压应进行气压试验,试验介质应为干燥无油洁净的氮气或其他惰性气体。

7.2.2.6 放置在氢气液化冷箱内的热交换器,应在制造完成后进行液氮冷冲击试验,试验时将热交换

器浸入液氮中或往热交换器中通入液氮，待热交换器整体冷却至液氮温度（-196℃）后保温至少 30 分钟，随后复温至常温，应至少完成≥3 次完整液氮冷冲击试验。

7.2.2.7 液氮冷冲击试验过程中应无异常声响后，试验完成后对热交换器进行外观检查，应无裂纹、无可见变形。

7.2.2.8 对于不装催化剂的热交换器，液氮冷冲击试验可于耐压试验前进行，若在耐压试验后进行，则液氮冷冲击试验后应再次进行耐压试验；对于装填催化剂的连续转化型板翅式热交换器，液氮冷冲击试验宜在催化剂装填前进行。

7.2.2.9 热交换器制造完成后应进行泄漏试验，泄漏试验应于耐压试验合格后进行。位于氢气液化冷箱内的板翅式热交换器以及介质为氢、氦的板翅式热交换器，设备出厂前用于定量确定漏率值的泄漏试验应采用氦检漏，氦检漏按 GB/T 18443.3 进行，外漏率和通道间的串漏率均应不低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

7.2.3 验收

验收时，制造方应提交以下材料。

- a) 设计文件与计算书；
- b) 材料质量证明文件；
- c) 压力试验与泄漏试验记录；
- d) 低温冷冲击试验记录；
- e) 热工性能测试报告及原始数据（若有）；
- f) 产品合格证。

7.2.4 不合格品处置

制造过程中出现的不合格品处理应符合以下要求。

- a) 出现不符合本文件要求的情况时，应进行原因分析并采取处理措施；
- b) 可修复缺陷允许返修后重新检验；
- c) 返修后仍不满足文件要求的设备应判定为不合格产品。

7.3 绕管式热交换器

7.3.1 制造

7.3.1.1 绕管式热交换器的制造须使用专用场地，场地地面应整洁，工具摆放应整齐，不得有妨碍换热管绕制的物品在场地堆放。

7.3.1.2 在绕管式热交换器工作架上应置有软质工位器具保护，且在装配过程中必须对换热管加以防护，以避免在绕制过程中磕碰、划伤换热管。

7.3.1.3 位于氢气液化冷箱内的绕管式热交换器以及介质为氢、氦的绕管式热交换器的换热管应采用无缝管。

7.3.1.4 当换热管采用焊接钢管时，焊接钢管不得应用于毒性危害程度为极度、高度危害的介质，且

设计压力应小于 10.0MPa；当设计压力大于等于 10.0MPa 时换热管应采用无缝管。

7.3.1.5 用作换热管的焊接钢管应采用不加填充金属的自动电弧焊或电阻焊的焊接方法制造，焊接接头系数取 0.85。

7.3.1.6 不锈钢换热管的供货热处理状态应为固溶，宜酸洗后交货。

7.3.1.7 用作换热管的焊接钢管的焊缝外侧余高应予以清除，与外表面平齐，无明显焊道痕迹，电弧焊管的内焊道应光滑均匀，不允许存在焊瘤、焊渣、咬边、凹陷等缺陷。焊缝内侧余高不得大于 0.15mm。电阻焊焊管内的内毛刺应予以清除，与内表面平齐，无明显焊道痕迹。

7.3.1.8 用作换热管的焊接钢管不得有螺旋向和环向焊缝。

7.3.1.9 不允许采用焊补的方法修正换热管的表面缺陷。

7.3.1.10 对于多次变形宜导致换热管材料发生不可接受的冷作硬化或导致其在介质中的抗腐蚀能力不足时，换热管应选择直管供货。除此之外，当单根换热管长度大于 20m 时，换热管宜采用盘状方式供货，盘状供货的换热管，应视材质、规格及设计技术要求等对最小允许盘管圈径进行控制，盘管圈径一般不应小于 10 倍的换热管外径，推荐为 1.3m~1.5m。

7.3.1.11 每根换热管都应有相应的标识，但不能使用硬标识。

7.3.1.12 换热管的弯曲应采用冷弯工艺，并控制弯曲半径和椭圆度，避免产生褶皱和裂纹。

7.3.1.13 换热管的缠绕应在专用绕管机上进行，控制缠绕张力均匀，确保管束层间紧密且有序。

7.3.1.14 管板与换热管、中心筒与管板的焊接应按照评定合格的焊接工艺执行。

7.3.2 检验和试验

7.3.2.1 绕管式热交换器的无损检测应按设计文件、本文件及 NB/T 47013 的要求执行，无损检测人员应持相应资格证书上岗。

7.3.2.2 位于氢气液化冷箱内的绕管式热交换器以及介质为氢、氦的绕管式热交换器，所有 A、B 类承压焊接接头均应按 NB/T 47013.2 进行 100%射线检测，检测技术等级不低于 AB，质量等级 I 级合格；或按 NB/T 47013.10 进行 100%可记录的超声检测，检测技术等级不低于 B，质量等级不低于 I 级合格；

7.3.2.3 换热管与管板的焊接接头，应按 NB/T 47013.5 进行 100%渗透检测，线性缺陷及圆形缺陷质量等级均为 I 级。当设计文件规定时，应进行棒阳极射线检测。

7.3.2.4 所有 A、B、C、D、E 类焊接接头按 NB/T 47013.5 进行 100%渗透检测，I 级合格

7.3.2.5 换热管选用 GB/T 24593 中的钢管时应逐根进行液压试验。当供需双方协议约定，也可按 GB/T 7735 进行钢管（逐根）的涡流检测替代液压试验，对比样管人工缺陷应符合 GB/T 7735 中验收等级 E4H 或 E4 的规定。

7.3.2.6 换热管应按 GB/T 242 进行扩口实验，每批抽查两根钢管，每根钢管各取一个试样，试样长度大于 50mm，顶心锥度为 60°，扩口后外径的扩口值为 20%，扩口后试样不得出现裂纹和裂口。

7.3.2.7 换热管应进行展平试验（对壁厚与外径之比等于或大于 10%的钢管），或反向弯曲试验（对壁厚与外径之比小于 10%的钢管），每批抽验两根钢管，每根钢管各取一个试样，试样长度为 100mm，

展平实验时，试样沿与焊接接头成 90° 角的两侧侧向刨开。将带焊接接头的半圆弧试样平放在二块平行板之间，用压力机或其他方法均匀的展平，展平后试样上不得出现裂纹、未焊透和因精整内焊接接头而形成的折叠。反向弯曲试验时，按展平的方法将试样展平，再将展平的试样围绕一个直径为 4 倍壁厚的芯轴弯曲，芯轴平行于焊接接头，原钢管内壁焊接接头应位于试样外侧最大弯曲处，试验后试样上不得出现裂纹，未焊透和因精整内焊接接头而形成的折叠。

7.3.2.8 换热管绕制前应进行水下气密性试验或耐压试验。

7.3.2.9 绕管式热交换器制造过程中可通过气密性试验的方式对换热管和管板的连接焊缝进行泄漏检查。位于氢气液化冷箱内的绕管式热交换器以及介质为氢、氦的绕管式热交换器，设备出厂前用于定量确定漏率值的泄漏试验应采用氦检漏，氦检漏按 GB/T 18443.3 进行，外漏率和通道间串漏率均应不低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

7.3.2.10 绕管式热交换器制造完成后应进行耐压试验，耐压试验的类型、试验方法和要求应符合 GB/T 150、NB/T 10938 和设计文件的相关规定。当采用水压试验进行耐压试验时，试验完成后应采取有效措施吹干水分，吹干后的露点应不大于 -40 °C。

7.3.2.11 对于装填催化剂的绕管式热交换器，装填催化剂后的通道试压应进行气压试验，试验介质的选取应考虑不对催化剂的性能产生影响，通常采用干燥无油洁净的氮气或其他惰性气体。

7.3.2.12 对于用于液氮温区、液氢温区、液氦温区等低温环境以及放置在氢气液化冷箱内的绕管式热交换器，应在制造完成后进行液氮冷冲击试验，试验方法和要求按 7.2.2.6。液氮冷冲击试验过程中应无异常声响，试验完成后对热交换器进行外观检查，应无裂纹、无可见变形。

7.3.2.13 对于不装催化剂的绕管式热交换器，液氮冷冲击试验可于耐压试验前进行，若在耐压试验后进行，则液氮冷冲击试验后应再次进行耐压试验；对于装填催化剂的绕管式热交换器，液氮冷冲击试验宜在催化剂装填前进行。

7.3.3 验收

验收时，制造方应提交以下材料：

- a) 设计文件与计算书；
- b) 材料质量证明文件；
- c) 压力试验与泄漏试验记录；
- d) 低温冷冲击试验记录；
- e) 热工性能测试报告及原始数据（若有）；
- f) 产品合格证。

7.3.4 不合格品处置

制造过程中出现的不合格品处理应符合以下要求。

- a) 出现不符合本标准要求的情况时，应进行原因分析并采取处理措施。
- b) 可修复缺陷允许返修后重新检验。

- c) 返修后仍不满足规范要求的设备应判定为不合格产品。

7.4 管壳式热交换器（含发卡式热交换器）

7.4.1 制造

7.4.1.1 管壳式热交换器的制造除满足本文件和设计文件的要求外，还应满足 GB/T 151、GB/T 150.4 的相关规定，发卡式热交换器也应按照本节及上述标准执行。

7.4.1.2 当采用 GB/T 150.3-2024 附录 F 确定最低允许使用温度的热交换器承压件，制造检验还应符合 GB/T 150.4-2024 附录 E 的相关规定。

7.4.1.3 与氢接触的 S31603 或 S31608 的 U 形换热管冷弯后，当实测铁素体显示含量大于 3%时，U 形弯管段应重新做惰性气体保护下的固溶处理。

7.4.1.4 与氢接触的 U 型换热管不宜拼接。

7.4.1.5 发卡式热交换器当外壳尾部采用异型结构时，不宜采用铸钢。

7.4.1.6 当管程存在压力循环时，换热管与管板的连接应采用胀焊并用或内孔焊。

7.4.1.7 管壳式热交换器的制造应按经评定合格的制造工艺文件、设计图样及本文件要求执行，制造单位应建立覆盖全制造过程的质量控制点，对管板加工、换热管与管板连接、壳体焊接、管束组装等关键工序实施见证。

7.4.1.8 材料与下料应符合以下要求。

- a) 主要受压元件材料应符合设计文件及本文件第 5 章的要求，材料进场时应核对质量证明文件的完整性、有效性，对需复验的材料应按本文件及相关标准要求化学成分、力学性能、低温冲击性能等项目复验，合格后方可使用；
- b) 材料下料宜采用机械加工或等离子切割方式，下料后应去除毛刺、飞边，对坡口表面进行清理，确保无油污、锈蚀、氧化皮及分层、裂纹等缺陷；
- c) 换热管下料应采用专用切割设备，切口端面应与换热管轴线垂直，端面倾斜偏差不应大于换热管外径的 1%，且不得大于 1.5mm；下料后应去除管端内外毛刺，清理管端内外表面 25mm 范围内的污染物。

7.4.1.9 成型与加工应符合以下要求。

- a) 壳体、封头、管箱等受压元件的成型应符合设计文件及 GB/T 150 的要求，成型后应检查尺寸偏差，确保圆度、直线度、平面度等符合规定，无裂纹、褶皱、变形等缺陷；
- b) 管板加工应符合以下要求：
 - 1) 管板钻孔应采用专用钻床或数控机床，管孔直径偏差、孔位偏差、孔壁粗糙度应符合设计文件及 GB/T 151 的要求，含氢介质工况下应不低于 I 级管束的精度要求；
 - 2) 管板密封面、法兰密封面的加工精度、粗糙度应符合设计文件及相关法兰标准的要求，密封面不得有径向划痕、裂纹、凹陷等缺陷；
 - 3) 折流板、支持板的加工应符合设计文件要求，管孔直径及允许偏差应符合 GB/T 151 的规定，流致振动工况下应采用 I 级或 TI 级管束的精度要求；折流板、支持板应无毛刺、

变形，周边应光滑；

- 4) 换热管的 U 形弯制应采用专用弯管设备，弯曲半径应符合设计文件要求，含氢介质或设计温度低于-45℃工况下，U 形换热管的弯曲半径不应小于 2 倍换热管外径；弯制后应检查换热管的圆度、壁厚减薄量，无裂纹、褶皱、变形等缺陷。

7.4.1.10 焊接工艺与实施应符合以下要求。

- a) 管壳式热交换器的焊接应按本文件第 7.1 节通用要求执行，焊接工艺应经评定合格，焊工应持相应资格证书上岗；
- b) 壳体、管箱、封头的 A、B 类焊接接头应采用全焊透结构，焊接工艺应符合设计文件及 GB/T 150 的要求；低温工况下的焊接接头应符合 GB/T 150.3-2024 附录 E 的相关规定；
- c) 管板与换热管的连接应符合设计文件要求，优先采用强度焊加贴胀的连接方式，高压、含氢、交变载荷工况下可采用强度焊加强度胀或内孔焊结构；焊接与胀接工艺应经评定合格，严格控制焊接变形与胀接应力；
- d) 接管、支座、垫板等与壳体的焊接应符合设计文件要求，角焊缝应连续饱满，与母材圆滑过渡，无咬边、未熔合、裂纹等缺陷；低温工况下的角焊缝应进行焊后消应力处理；
- e) 焊接完成后应及时清理焊缝表面的焊渣、飞溅物，对焊缝进行外观检查，符合本文件第 7.1 节的要求。

7.4.1.11 管束与壳体组装应符合以下要求。

- a) 管束组装前应对所有零部件进行清理、检查，确认无缺陷、无污染物后方可进行组装；换热管穿管前应逐根检查，确认无裂纹、无变形、无堵塞，管端清洁无毛刺；
- b) 穿管过程中应采取防护措施，避免换热管表面划伤、变形，严禁强行穿管；折流板、支持板应按设计间距均匀布置，定位牢固，无松动、歪斜；
- c) 管束与壳体组装时，应保证管束与壳体的同轴度，避免换热管与壳体内壁、折流板与壳体之间的间隙过大或过小；固定管板式热交换器的管板与壳体、管箱的连接应保证密封面贴合良好，无偏斜；
- d) 浮头式、U 形管式热交换器的浮头、管箱的组装应符合设计文件要求，保证密封性能，无卡涩、泄漏隐患；
- e) 热交换器的支座、吊耳等附件的组装应符合设计文件要求，位置偏差符合规定，焊接牢固，无变形。

7.4.1.12 清洁与干燥应符合以下要求。

- a) 管壳式热交换器的清洁与干燥应符合本文件第 7.1 节通用要求，所有与工艺介质接触的内表面，出厂前必须进行彻底清洁和干燥，确保内部无油脂、颗粒物、水分及其他可能造成低温冻堵、影响介质纯度的污染物；
- b) 管程、壳程的清洁应采用适宜的清洗工艺，如溶剂清洗、碱性清洗、蒸汽吹扫、高压水冲洗等，清洗后应进行吹扫，确保无残留清洗液、无颗粒物；

- c) 清洁完成后应进行干燥处理，可采用干燥气体吹扫、真空干燥等方式，干燥后设备出口露点应符合设计文件要求，冷箱内管壳式热交换器的露点应不高于-40℃，冷箱外管壳式热交换器的露点按工艺要求执行；
- d) 清洁、干燥合格后的热交换器应及时采取充氮保护措施，氮封压力宜不低于 0.05MPa(表压)，防止在存储和运输过程中被再次污染。

7.4.1.13 表面处理与防护应符合以下要求。

- a) 热交换器的外表面处理应符合设计文件及 NB/T 10558 的要求，碳钢设备外表面应进行喷砂处理，清洁度达到 Sa2.5 级，然后涂刷防锈漆、面漆，漆膜厚度符合设计要求；
- b) 不锈钢设备外表面可根据设计要求进行酸洗钝化、抛光处理，表面无锈蚀、无划痕、无氧化皮；
- c) 设备的法兰密封面、螺纹面等加工面应采取防护措施，涂抹防锈脂，包裹防护膜，防止在运输、存储过程中被损伤、锈蚀。

7.4.2 检验和试验

7.4.2.1 管壳式热交换器的检验和试验应按本文件、设计文件及 GB/T 151 的要求执行，检验和试验项目、合格指标应在质量计划中明确，对关键检验项目应实施第三方见证或监检。

7.4.2.2 材料检验与复验应符合以下要求。

- a) 主要受压元件材料进场时，应核对质量证明文件的完整性、有效性，确认材料的牌号、规格、状态、性能符合设计文件及相关标准要求；
- b) 对需复验的材料，应按本文件及相关标准要求进行化学成分、力学性能、低温冲击性能等项目的复验，复验合格后方可使用；低温钢、不锈钢、镍合金钢等材料的复验应符合本文件第 5 章的要求；
- c) 换热管进场时，应逐根进行外观检查，确认无裂纹、无锈蚀、无变形、无重皮；按设计文件要求进行尺寸偏差、壁厚、圆度的检查，符合 GB/T 151 的要求；
- d) 焊接材料应核对质量证明文件，按要求进行烘焙、保温，使用前应检查外观，无受潮、无锈蚀、无药皮脱落等缺陷。

7.4.2.3 工序过程检验应符合以下要求。

- a) 下料工序应检查下料尺寸、坡口尺寸、表面质量，符合设计文件及工艺要求，无毛刺、飞边、裂纹、分层等缺陷；
- b) 成型工序应检查成型尺寸、圆度、直线度、壁厚减薄量，符合设计文件及 GB/T 150 的要求，无裂纹、褶皱、变形等缺陷；
- c) 机加工工序应检查管板孔的直径、孔位、孔壁粗糙度，法兰密封面、管板密封面的平面度、粗糙度，符合设计文件要求，无划痕、裂纹、凹陷等缺陷；
- d) 焊接工序应检查焊接工艺执行情况、焊工资格、焊接参数、预热 / 后热温度，焊缝外观成型符合本文件第 7.1 节的要求，无裂纹、未焊透、未熔合、咬边、气孔、夹渣等缺陷；

- e) 胀接工序应检查胀接工艺执行情况、胀接压力、胀接长度、管壁减薄量，符合设计文件及工艺要求，无过胀、欠胀、裂纹、泄漏等缺陷；
- f) 组装工序应检查管束与壳体的同轴度、折流板间距、管板与管箱的贴合度、支座位置等，符合设计文件要求，无松动、歪斜、卡涩等缺陷。

7.4.2.4 无损检测应符合以下要求。

- a) 管壳式换热器的无损检测应按设计文件、本文件及 NB/T 47013 的要求执行，无损检测人员应持相应资格证书上岗；
- b) 换热器的 A、B 类焊接接头应进行 100%射线检测、超声波检测或 TOFD 检测。
- c) 所有与氢气接触的 A、B 类承压焊接接头均应按 NB/T 47013.2 进行 100%射线检测，检测技术等级不低于 AB，质量等级 I 级合格；或按 NB/T 47013.10 进行 100%可记录的超声检测，检测技术等级不低于 B，质量等级不低于 I 级合格；
- d) 换热管与管板的焊接接头，应按 NB/T 47013.5 进行 100%渗透检测，线性缺陷及圆形缺陷质量等级均为 I 级。当设计文件规定时，应进行棒阳极射线检测；
- e) 所有 A、B、C、D、E 类焊接接头的可及表面按 NB/T 47013.5 进行 100%渗透检测，I 级合格；
- f) 换热管及管头：换热管逐支涡流检测，所有胀焊管头渗透检测，重点检测热影响区、胀接过渡区疲劳裂纹与氢致缺陷。

7.4.2.5 耐压试验应符合以下要求。

- a) 管壳式换热器的耐压试验应按设计文件、本文件及 GB/T 150、GB/T 151 的要求执行，耐压试验分为水压试验和气压试验，优先采用水压试验；
- b) 水压试验：采用电阻率 $\geq 18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 去离子水，氯离子含量 $\leq 25\text{ppm}$ ，试验压力为 1.25 倍设计压力，保压 30min，无渗漏、无可见变形、无异常声响为合格。试验后用高纯氮气彻底烘干，设备出口露点不高于 -40°C ；
- c) 气压试验仅适用于水压试验无法实施的场合，应符合以下要求：试验压力为 1.1 倍设计压力，试验介质应采用干燥、无油的洁净氮气或其他惰性气体；
- d) 耐压试验过程中，如发现渗漏、变形等异常情况，应立即停止试验，泄压后查明原因，处置完成后重新进行试验，严禁带压补焊、紧固螺栓。

7.4.2.6 泄漏试验应符合以下要求。

- a) 管壳式换热器的泄漏试验应在耐压试验合格后进行，按设计文件、本文件及相关标准要求执行，优先采用氦检漏法；
- b) 氦检漏试验应符合以下要求：
 - 1) 试验应按 GB/T 18443.3 的要求执行，采用真空法或吸枪法，对设备的所有焊缝、密封面、接管、管板与换热管接头进行全面检测；
 - 2) 位于氢气液化冷箱内的管壳式热交换器以及介质为氢、氦的管壳式热交换器，设备出

厂前用于定量确定漏率值的泄漏试验应采用氦检漏，设备整体外漏率应不低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

- 3) 试验过程中发现的超标泄漏点，应泄压后进行处置，处置完成后重新进行氦检漏试验，直至合格。
- c) 氦检漏试验可作为替代方法，应符合以下要求：
 - 1) 试验介质为 1% 氦气+ 99% 干燥洁净空气的混合气体，试验压力为 0.6MPa，保压时间不少于 2h；
 - 2) 采用酚酞试纸对所有焊缝、密封面、接头进行检测，试纸无变色为合格；
 - 3) 试验完成后，应将设备内的混合气体排净，用干燥氮气吹扫，彻底清除残留氦气。
- d) 气密性试验应符合设计文件要求，试验压力为设计压力，保压时间不少于 30min，采用肥皂水或其他检漏液对所有密封面、焊缝进行检测，无气泡产生为合格。

7.4.2.7 液氮冷冲击试验应符合以下要求。

- a) 放置在氢气液化冷箱内的管壳式热交换器，应在制造完成后进行液氮冷冲击试验，试验应在耐压试验前完成；若在耐压试验后进行，试验完成后应再次进行耐压试验；
- b) 液氮冷冲击试验应符合以下要求：
 - 1) 试验时将热交换器浸入液氮中，或向设备管程、壳程通入液氮，待设备整体冷却至液氮温度（-196℃）后，保温时间不少于 30min；
 - 2) 随后将设备复温至常温，完成 1 次完整的冷冲击循环，应至少完成 3 次完整的冷冲击循环；
 - 3) 试验过程中应无异常声响、无爆裂、无泄漏，试验完成后对设备进行外观检查，无裂纹、无可见变形、无密封失效为合格。
- c) 试验过程中如发现异常情况，应立即停止试验，查明原因，处置完成后重新进行试验。

7.4.2.8 清洁度与干燥检验应符合以下要求。

- a) 热交换器清洁完成后，应对清洁度进行检验，检验方法可采用擦拭法、粒子计数法、气质谱分析法等，符合本文件第 7.1 节的要求；
- b) 干燥完成后，应对设备出口的露点进行检测，冷箱内设备露点应 $\leq -70^\circ\text{C}$ ，冷箱外设备露点应 $\leq -40^\circ\text{C}$ ，无残留水分、无油污为合格。
- c) 清洁度、干燥度检验不合格的设备，应重新进行清洗、干燥，直至检验合格。

7.4.3 验收

验收时，制造方应提交以下材料。

- a) 设计文件与计算书；
- b) 材料质量证明文件；
- c) 压力试验与泄漏试验记录；
- d) 低温冷冲击试验记录；

- e) 热工性能测试报告及原始数据（若有）；
- f) 产品合格证。

7.4.4 不合格品处置

制造过程中出现的不合格品处理应符合以下要求。

- a) 出现不符合本标准要求的情况时，应进行原因分析并采取处理措施；
- b) 可修复缺陷允许返修后重新检验；
- c) 返修后仍不满足规范要求的设备应判定为不合格产品。

7.5 扩散焊热交换器

7.5.1 制造

7.5.1.1 流道板加工

- a) 热交换器流道板的加工可采用化学蚀刻、机械铣刻等方式。
- b) 采用激光切割方式对流道板外型进行修整，保证流道板对位精度。

7.5.1.2 焊接要求

- a) 局部缺陷扩散焊界面单个未焊合区特征尺寸不应大于 1.0 mm。结合质量芯体扩散焊结合率应不低于 95%。整体缺陷未焊合总面积占扩散焊界面的比例不应超过 3 %。通道压塌、明显变形或流道阻塞等缺陷不得影响设计流通截面和压降性能。特殊设备要求对于液氢温区设备、首台产品或制造工艺发生重大变更的设备，可采用更严格指标。
- b) 焊后处理：焊接完成后必须进行脱氢退火处理，处理温度为 200-300℃，保温时间不少于 2 小时，以有效去除焊接过程中可能吸收的扩散氢。焊后氢含量应符合 GB/T 3965 标准要求，控制在≤5 mL/100g 以内，防止延迟氢致裂纹的产生。
- c) 接头性能：扩散焊界面的抗拉强度应不低于母材强度的 95%，在-253℃低温条件下的冲击韧性不得低于 35 J。焊缝区域不得存在裂纹、未焊合、孔洞或夹杂等宏观或微观缺陷，须通过无损检测与金相分析双重验证。
- d) 氢脆防控措施：焊接过程中应严格控制氢源引入，避免使用含水分或有机物的保护气体。推荐采用低氢型焊材，并控制焊接线能量以减少热影响区脆化风险。焊后应及时进行脱氢处理，处理温度一般为 200~300℃，保温时间不少于 2 小时，具体工艺应根据材料特性制定，确保有效释放残余氢含量，提升接头抗氢脆能力。
- e) 扩散焊板式热交换器在制造完成后，应认真清洗并干燥处理，去除油脂、水分及其他杂质。

7.5.2 检验和试验

7.5.2.1 扩散焊热交换器芯体与管箱、管箱与接管、接管与管道的焊接接头应进行 100%射线或超声检测。

7.5.2.2 耐压试验：出厂产品应按照 NB/T 11917 标准逐台进行耐压试验；合同有规定或设计有要求时，

应进行气压保压试验。在保压期间，热交换器不得出现可见泄漏、异常压降或结构异常。试验进行期间，须采取可靠的安全防护措施。当耐压试验采用水压试验时，试验完成后应立即将内部水排尽，并用洁净的热风吹扫直至彻底吹干。

7.5.2.3 泄漏试验：水压试验合格并干燥后，按 NB/T 11917 标准逐台进行泄漏试验。外漏率检验应采用氦质谱检漏真空法作为主要检验方法。室温条件下对外漏率不应大于 $5 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；内漏检测应采用一侧充氦加压、另一侧抽真空并用质谱检测的方法检测通道间串漏率不应大于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

7.5.2.4 液压疲劳试验：合同有规定或设计有要求时，按 NB/T 11917 标准进行。

7.5.2.5 干燥试验：合同有规定或设计有要求时，按 NB/T 11917 标准进行。

7.5.2.6 液氮冷冲击试验与复检：对于液氢温区设备、液氮温区设备、首台产品、结构或工艺重大变更产品以及用户要求的产品，应进行低温验证。试验时，均匀喷淋液氮，降温速率 $3 \sim 10 \text{ K/min}$ 至 -196°C ，保温 $5 \sim 10 \text{ min}$ ；浸泡降温（小型样品）：浸液氮 $10 \sim 20 \text{ min}$ 。可选 $1 \sim 5$ 次冷热循环，停止后自然复温并记录；试验后检测外观、密封性、结构及材料性能，详细记录全过程数据。低温验证后应复检对外漏率和通道间串漏率，并满足本文件要求。

7.5.2.7 深冷运行试验：合同有规定或设计有要求时，在接近实际运行温度条件下，对产品进行的低温运行验证试验。验证设备在设计低温工况下，按启动、稳态运行、停机与复温等操作，验证的结构可靠性、密封性能及换热性能，考核其在深冷环境下长期运行的稳定性，确认无泄漏、无变形开裂、无冰堵及热应力损伤，确保满足低温介质（液氮、液氢等）工况下的安全使用与换热效率要求。

7.5.2.8 扩散焊热交换器检验与试验流程图如图 7-1 所示。

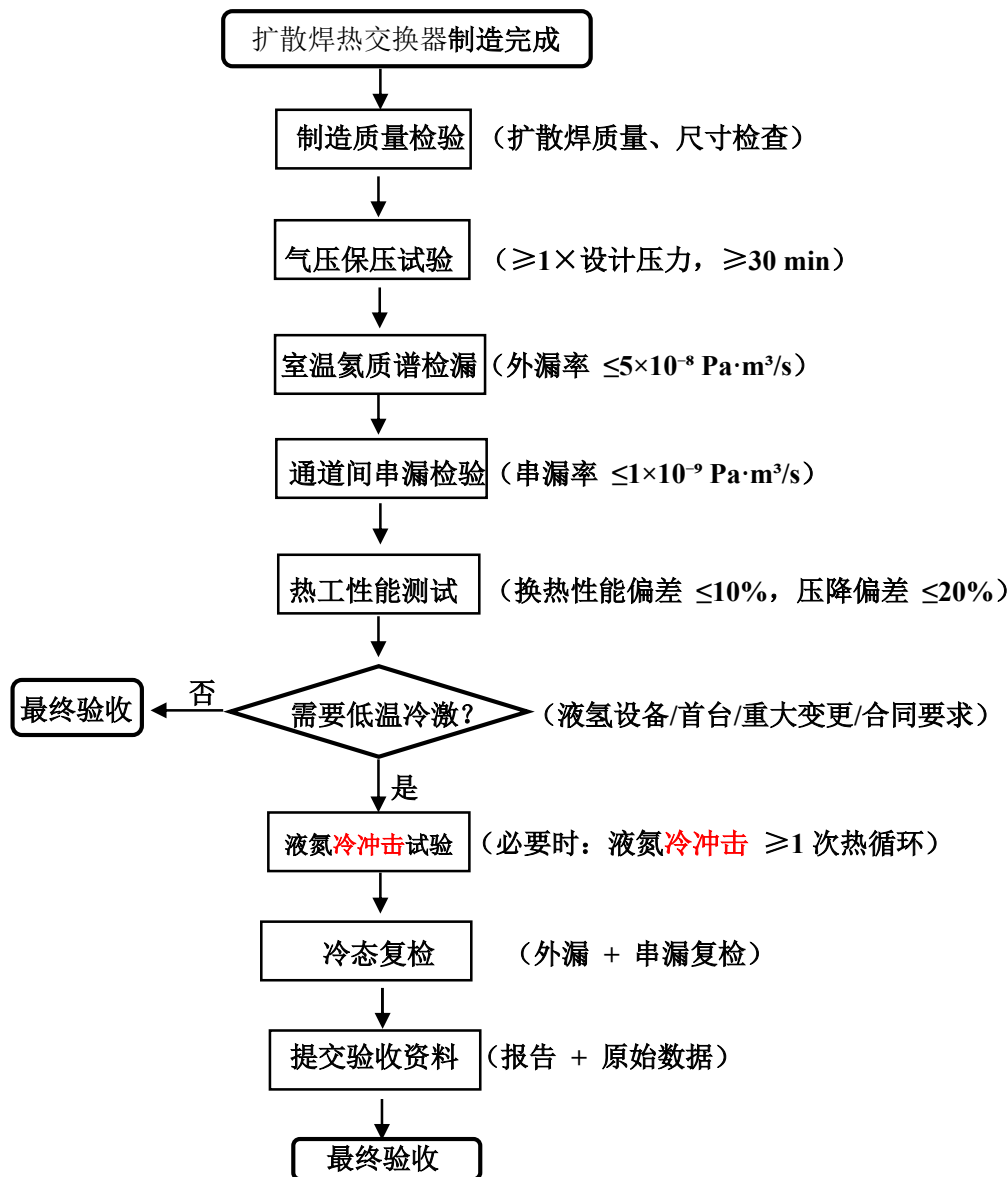


图 7-1 扩散焊热交换器检验与试验流程图

7.5.3 验收

验收时，制造方应提交以下材料。

- a) 设计文件与计算书；
- b) 材料质量证明文件；
- c) 扩散焊制造记录；
- d) 压力试验与泄漏试验记录；
- e) 低温冷冲击试验记录；
- f) 热工性能测试报告及原始数据（若有）；
- g) 产品合格证。

7.5.4 不合格品处置

制造过程中出现的不合格品处理应符合以下要求。

- a) 出现不符合本标准要求的情况时，应进行原因分析并采取处理措施。
- b) 可修复缺陷允许返修后重新检验。
- c) 返修后仍不满足规范要求的设备应判定为不合格产品。

8 安装、使用和维护

8.1 一般要求

热交换器的安装、操作和维护应由经过培训的合格人员进行，并遵守设备技术文件、工艺操作规程及安全规范相关规定。

8.2 安装

热交换器安装时，通常应遵循以下内容。

- a) 安装前应对设备和文件资料进行检查，至少包括下列内容：
 - 1) 设备外观良好，无凹痕、锈蚀、油漆剥落等缺陷；
 - 2) 设备密封面不得有影响密封性能的划痕、斑点、裂纹、磕伤等缺陷；
 - 3) 设备内部洁净度和保护气体露点宜满足设计文件要求；
 - 4) 随机文件应完整。
- b) 设备吊装应平稳进行，避免发生碰撞和设备不当受力；
- c) 热交换器配管时，管道应对中良好，避免强力装配；
- d) 安装在冷箱内的热交换器，配管和支撑布置应充分考虑设备及管道冷缩补偿需求；
- e) 冷箱内热交换器和低温管道应进行可靠的固定和良好的绝热。冷箱外热交换器及其管道要求具备绝热或防冻伤功能时，应进行绝热或防冻伤防护。

8.3 使用

热交换器按照产品使用说明书、操作规程进行操作，主要内容如下。

- a) 试车前应查阅设计文件、竣工资料有无特殊要求和说明，对试压、试车程序有无特殊要求等。依据设计文件、竣工资料等编制操作规程；
- b) 试车前应清洗整个系统，必要时在入口管线上设置过滤网或采取其他措施，防止多余物进入热交换器；
- c) 首次投用或长期停用后重新启用热交换器，必须严格按照预定的开车程序进行操作，通常包括系统吹扫、置换、气密性检查、冷却等步骤；
- d) 开车、停车或切换操作过程中应缓慢升温或降温，严格控制设备升降温速率，避免造成热冲击，工艺介质的升降温速率依据热交换器结构形式由设计单位给出，其中铝制板翅式热交换器升降温速率一般不大于 1°C/min，升降温速度不得超过 30°C/h；
- e) 运行中应密切监控热交换器进出口温度、压力以及设备压降等关键参数，发现异常应及时处理；
- f) 对于装填催化剂的热交换器，应连续监控仲氢转化率，实时评估催化剂活性衰减情况；

- g) 热交换器停车、停用时，需依据产品使用说明书、操作规程对内部残存工艺介质进行处理。

8.4 维护

热交换器按照产品使用说明书及产品规范进行维护，至少包括以下内容。

- a) 定期检查设备外部以及绝热层是否完好；
- b) 定期校验系统仪表和安全附件；
- c) 定期分析热交换器运行参数，评估热交换器的工艺性能和结垢程度。当设备压降异常增大时，表明设备通道产生堵塞，宜采取相应措施进行处理；
- d) 停车检修时，如需进入设备内部或拆卸内件，必须严格执行隔离、置换、通风等程序，确保人员在有限空间内作业安全；
- e) 应严格按专门的操作规程进行催化剂更换、再生；
- f) 建立完整的设备档案，记录设备在设计、制造、安装、运行、检验以及维修等全生命周期相关信息。

附录 A

(资料性)

热交换器设计条件与工艺数据

- A.1 板翅式热交换器的工艺数据表见表 A.1。
- A.2 绕管式热交换器的工艺数据表见表 A.2。
- A.3 管壳式热交换器的工艺数据表见表 A.3。
- A.4 扩散焊热交换器的工艺数据表见表 A.4。
- A.5 氢液化典型工艺流程见图 A.1。

表 A.1 板翅式热交换器数据表

(制造单位名称)				板翅式热交换器数据表						(工程承包商)					
订单号:				文件号:						页码: 第 页/共 页					
用户:								工程项目:							
项目号:								设备位号:							
安装方式: 立式 ☐ 卧式 ☐								设备台数:							
是否耦合正仲氢催化转化: 是 ☐ 否 ☐															
		流通股 1		流通股 2		流通股 3		流通股 4		流通股 5		流通股 6			
01 流通股类型 (冷/热)															
02 介质名称															
03 流量 kg/h															
04		进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口		
05 气相分率															
06 气体流量 kg/h															
07 液体流量 kg/h															
08 操作温度 °C															
09 液体物性															
密度 kg/m³															
粘度 mPa.s															
导热系数 W/ (m.K)															
比热容 kJ/ (kg.K)															
汽化潜热 kJ/kg															
表面张力 N/m															
10 气体物性															
密度 kg/m³															
粘度 mPa.s															
导热系数 W/ (m.K)															
比热容 kJ/ (kg.K)															
11 操作压力 MPa. G															
13 允许压降 kPa															

14 污垢系数	m ² .K/W							
15 热负荷	KW							
16 有效换热面积	m ²							
17 对数平均温差 LMTD	℃							
18 设计换热裕量	%							
19		流股 1	流股 2	流股 3	流股 4	流股 5	流股 6	简图
20 设计压力	MPa.G							
21 设计温度	℃							
22 腐蚀裕量	mm							
23 进口接管尺寸	mm							
24 进口法兰压力等级/类型								
25 出口接管尺寸	mm							
26 出口法兰压力等级/类型								
27 翅片材质								
28 隔板、封条材质								
29 封头材质								
30 通道层数								
31 入口仲氢浓度								
32 出口仲氢目标浓度								
33 出口仲氢平衡浓度								
34 催化剂填充通道								
35 催化剂填充量	m ³							
36 芯体尺寸	mm	长度:		宽度:		高度:		
37 质量	设备总重量:		Kg;		压力试验总重量:		Kg;	
38 备注:								
版本号:		日期:		设计:		校对		审核

表 A.2 绕管式热交换器数据表

(制造单位名称)		绕管式热交换器数据表				(工程承包商)	
订单号:		文件号:				页码: 第 页/共 页	
用户:				工程项目:			
项目号:				设备位号:			
安装方式: 立式 ☐ 卧式 ☐				设备台数:			
设备尺寸 (直径×总长):				管程数:			
是否耦合正仲氢催化转化: 是 ☐ 否 ☐							
01	管程 I		管程 II		壳程		
02 介质名称							
03 流量	kg/h						
04	进口	出口	进口	出口	进口	出口	
05 气相分率							
06 气体流量	kg/h						
07 液体流量	kg/h						
08 操作温度	℃						
09 液体物性							

密度	kg/m³						
粘度	mPa.s						
导热系数	W/ (m.K)						
比热容	kJ/ (kg.K)						
汽化潜热	kJ/kg						
表面张力	N/m						
10 气体物性							
密度	kg/m³						
粘度	mPa.s						
导热系数	W/ (m.K)						
比热容	kJ/ (kg.K)						
11 操作压力	MPa. G						
12 允许压降	kPa						
13 污垢系数	m².K/W						
14 热负荷	KW						
15 对数平均温差 LMTD	℃						
16 有效换热面积	m²						
17 设计换热裕量	%						
18		管程 I	管程 II	壳程	简图		
19 设计压力	MPa.G						
20 设计温度	℃						
21 腐蚀裕量	mm						
22 进口接管尺寸	mm						
23 进口法兰压力等级/类型							
24 出口接管尺寸	mm						
25 出口法兰压力等级/类型							
26 入口仲氢浓度							
27 出口仲氢目标浓度							
28 出口仲氢平衡浓度							
29 催化剂填充通道							
30 催化剂填充量	m³						
31 换热管（管程 I）	数量：	根：	材质：	；	规格（外径×壁厚）：	mm；	
32 换热管（管程 II）	数量：	根：	材质：	；	规格（外径×壁厚）：	mm；	
33 壳体规格（内径×壁厚）：	mm；	壳体圆筒/封头材质：					
34 管箱规格（内径×壁厚）：	mm；	管箱圆筒/封头材质：					
35 质量	设备总重量：		Kg；	压力试验总重量：		Kg；	
36 备注：							
版本号：	日期：	设计：	校对	审核			

表 A.3 管壳式热交换器数据表

(制造单位名称)		管壳式热交换器数据表		(工程承包商)	
订单号：		文件号：		页码：第 页/共 页	
用户：			工程项目：		
项目号：			设备位号：		

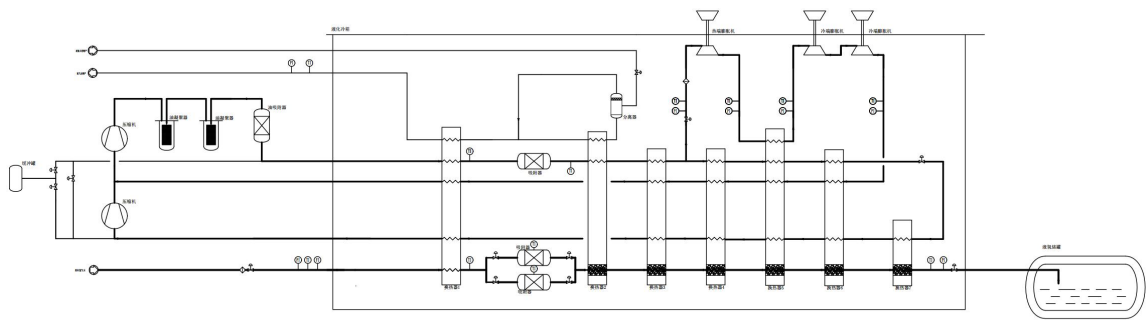
安装方式：立式 ☐ 卧式 ☐		设备台数：		
设备尺寸（直径×总长）：		结构形式： 固定管板 ☐ U形管式 ☐ 浮头式 ☐ 填料函式 ☐		
是否耦合正仲氢催化转化：是 ☐ 否 ☐				
01	管程		壳程	
02 介质名称				
03 介质流量 kg/h				
04	进口	出口	进口	出口
05 气相分率				
06 气体流量 kg/h				
07 液体流量 kg/h				
08 操作温度 °C				
09 液体物性				
密度 kg/m ³				
粘度 mPa.s				
导热系数 W/（m.K）				
比热容 kJ/（kg.K）				
汽化潜热 kJ/kg				
表面张力 N/m				
10 气体物性				
密度 kg/m ³				
粘度 mPa.s				
导热系数 W/（m.K）				
比热容 kJ/（kg.K）				
11 操作压力 MPa. G				
12 允许压降 kPa				
13 污垢系数 m ² .K/W				
14 热负荷 KW				
15 总传热系数 W/（m ² .K）				
16 对数平均温差 LMTD °C				
17 有效换热面积 m ²				
18 设计换热裕量 %				
19	管程	壳程	简图	
20 设计压力 MPa.G				
21 设计温度 °C				
22 腐蚀裕量 mm				
23 进口接管尺寸 mm				
24 进口法兰压力等级/类型				
25 出口接管尺寸 mm				
26 出口法兰压力等级/类型				
27 入口仲氢浓度				
28 出口仲氢目标浓度				
29 出口仲氢平衡浓度				

30 催化剂填充通道			
31 催化剂填充量 m ³			
27 换热管 数量:	根:	材质:	; 规格 (外径×壁厚): mm;
28 壳体规格 (内径×壁厚):	mm;	壳体圆筒/封头材质:	
29 管箱规格 (内径×壁厚):	mm;	管箱圆筒/封头材质:	
30 质量	设备总重量: Kg;	压力试验总重量:	Kg;
31 备注:			
版本号:	日期:	设计:	校对 审核

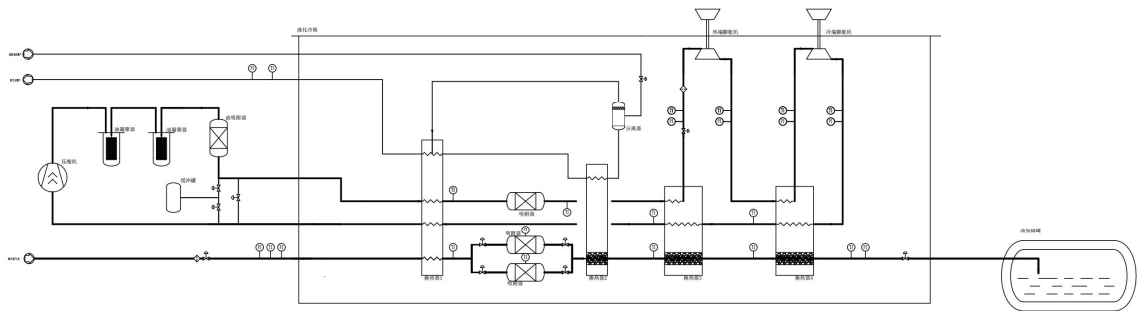
表 A.4 扩散焊热交换器数据表

(制造单位名称)		扩散焊热交换器数据表						(工程承包商)					
订单号:		文件号:						页码: 第 页/共 页					
用户:						工程项目:							
项目号:						设备位号:							
安装方式: 立式□ 卧式□						设备台数:							
	流股 1		流股 2		流股 3		流股 4		流股 5		流股 6		
01 流股类型 (冷/热)													
02 介质名称													
03 流量 kg/h													
04	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口	
05 气相分率													
06 气体流量 kg/h													
07 液体流量 kg/h													
08 操作温度 °C													
09 液体物性													
密度 kg/m ³													
粘度 mPa.s													
导热系数 W/(m.K)													
比热容 kJ/(kg.K)													
汽化潜热 kJ/kg													
表面张力 N/m													
10 气体物性													
密度 kg/m ³													
粘度 mPa.s													
导热系数 W/(m.K)													
比热容 kJ/(kg.K)													
11 操作压力 MPa. G													
13 允许压降 kPa													
14 污垢系数 m ² .K/W													
15 热负荷 KW													
16 有效换热面积 m ²													
17 对数平均温差 LMTD °C													
18 设计换热裕量 %													
19	流股 1	流股 2	流股 3	流股 4	流股 5	流股 6	简图						

20 设计压力	MPa.G						
21 设计温度	℃						
22 腐蚀裕量	mm						
23 进口接管尺寸	mm						
24 进口法兰压力等级/类型							
25 出口接管尺寸	mm						
26 出口法兰压力等级/类型							
27 翅片材质							
28 隔板、封条材质							
29 封头材质							
30 通道层数							
31 芯体尺寸	mm	长度:		宽度:		高度:	
32 质量	设备总重量:		Kg:		压力试验总重量:		Kg:
33 备注:							
版本号:	日期:		设计:		校对		审核



氢气Claude循环



氢气逆Brayton循环

图 A.1 氢液化典型工艺流程

附录 B

(资料性)

正仲氢组成、转化热及工程计算参考数据

B.1 一般说明

- B.1.1 本附录给出氢气液化热交换器工艺计算中常用的正仲氢组成数据、正仲氢转化热数据，以及连续转化型板式热交换器传热与阻力计算关联式。
- B.1.2 本附录适用于氢气液化装置用热交换器的热量衡算、正仲氢转化计算、传热计算和阻力降校核。对装填正仲氢转化催化剂的热交换器，可作为传热、流动和正仲氢转化耦合计算的参考。
- B.1.3 本附录所列数据和关联式为工程计算参考。采用其他经验证的物性数据库、状态方程、经验关联式或专用软件时，应明确数据来源、适用范围、参数定义和计算方法。
- B.1.4 本附录所列数据和关联式的适用温度、压力、组成、雷诺数及结构条件，应按相应表格、公式或说明采用。超出适用范围时，不宜直接外推使用；确需使用时，应通过试验数据、经验证的计算模型或工程经验进行校核。

B.2 组成特性

- B.2.1 氢气按核自旋异构体组成可分为正氢和仲氢。
- B.2.2 正常氢在室温附近的平衡组成可近似取为正氢 75 %、仲氢 25 %。
- B.2.3 平衡氢组成随温度变化。温度降低时，平衡仲氢摩尔分数升高。常用温度下的平衡仲氢和正氢摩尔分数见表 B.1，平衡仲氢摩尔分数随温度变化关系见图 B.1。
- B.2.4 当工程计算涉及正仲氢转化率、目标仲氢含量、分段转化设计、催化剂装填量或换热与反应耦合计算时，可采用与相应温度对应的平衡仲氢摩尔分数作为平衡极限。热量衡算应采用实际入口组成、实际出口组成及相应物性数据，不应以平衡组成数据直接替代实际组成。

表 B.1 平衡仲氢/正氢摩尔分数

温度/K	平衡仲氢摩尔分数/%	平衡正氢摩尔分数/%
15	99.99	0.01
20	99.82	0.18
25	99.04	0.96
30	97.06	2.94
35	93.60	6.40
40	88.82	11.18
45	83.18	16.82
50	77.19	22.81
55	71.27	28.73

60	65.71	34.29
65	60.64	39.36
70	56.12	43.88
75	52.14	47.86
80	48.65	51.35
85	45.61	54.39
90	42.97	57.03
95	40.68	59.32
100	38.69	61.31
110	35.45	64.55
120	33.00	67.00
130	31.13	68.87
131	30.97	69.03
140	29.71	70.29
150	28.61	71.39
160	27.78	72.22
170	27.13	72.87
180	26.64	73.36
190	26.26	73.74
200	25.96	74.04
220	25.57	74.43
240	25.33	74.67
260	25.19	74.81
280	25.11	74.89
300	25.07	74.93

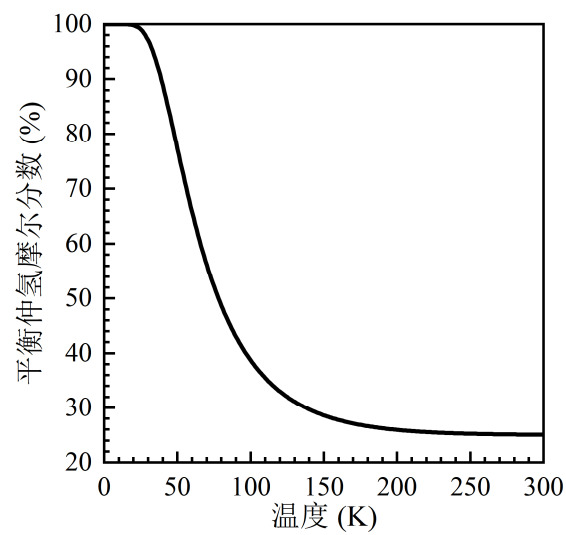


图 B.1 平衡仲氢摩尔分数随温度变化关系图

B.3 热力性质

B.3.1 氢气液化热交换器工艺计算所需热力性质通常包括密度、定压比热容、焓及相平衡数据。

B.3.2 本附录未列出正氢、仲氢和平衡氢的完整热力性质表。工程计算时，应根据设计温度、压力和组成范围，采用经验证的物性数据库、状态方程、实验数据或专用软件确定热力性质。

B.3.3 对涉及多股流换热、低温换热、相变或液化过程的热交换器，应按温度、压力和组成变化选取局部物性参数。必要时宜采用分段计算或沿程离散计算方法。

B.3.4 对承担正仲氢转化功能的热交换器，热量衡算应采用与实际正仲氢组成相一致的焓值；当采用不含转化效应的热物性数据进行计算时，应另行计入正仲氢转化热，并在计算书中说明处理方法。

B.3.5 采用连续转化型板翅式热交换器实验关联式计算传热系数时，热力性质参数的取值应与关联式建立时的参数定义一致。未作专门说明时，可按局部温度、局部压力和局部正仲氢组成确定。

B.4 输运性质

B.4.1 氢气液化热交换器传热和阻力计算所需输运性质通常包括导热系数、动力黏度和普朗特数。需使用运动黏度时，可由动力黏度和密度换算得到。

B.4.2 本附录未列出正氢、仲氢和平衡氢的完整输运性质表。工程计算时，应采用与实际温度、压力和组成相对应的输运性质数据。

B.4.3 对低温、高压及正仲氢组成变化明显的工况，应考虑输运性质随温度、压力和组成的变化。

B.4.4 对连续转化型热交换器，传热性能和流动阻力受催化剂装填、流道结构、局部雷诺数和氢气输运性质影响。采用关联式计算时，宜按分段或沿程离散方法确定局部输运性质。

B.5 正仲氢转化热

B.5.1 正氢向仲氢转化为放热过程。

B.5.2 在氢气液化温区，正仲氢转化热会影响热交换器热量衡算、局部温升、最小传热温差和液氢储存蒸发损失。装填催化剂的热交换器和正仲氢转化器进行工艺计算时，应计入正仲氢转化热。

B.5.3 不同温度和压力下的正仲氢转化热见表 B.2。表 B.2 数据用于实际转化过程计算时，应按数据定义、单位质量基准和实际正仲氢组成变化进行折算，并在计算书中说明折算方法。

B.5.4 对连续转化型热交换器，宜结合温区分段、催化剂布置、传热能力和目标仲氢摩尔分数，对转化热释放进行分段计算。

B.5.5 对液氢储存前未达到目标仲氢含量的工况，宜评估后续继续转化引起的蒸发损失风险。

表 B.2 不同压力下正仲氢转化热

	正仲氢转化热 / kJ/kg				
温度/K	1000 kPa	2000 kPa	3000 kPa	4000 kPa	5000 kPa
20	699.32	699.33	699.34	699.35	699.38
25	698.85	699.05	699.17	699.26	699.34
30	697.08	697.90	698.23	698.41	698.54

35	692.02	696.39	697.13	697.48	697.69
40	698.26	695.90	696.42	696.82	697.07
45	701.04	698.07	696.97	696.79	696.87
50	702.02	699.56	698.48	697.54	697.15
55	702.10	700.15	699.35	698.43	697.65
60	701.33	699.87	699.13	698.53	697.77
65	699.58	698.52	697.82	697.43	696.89
70	696.65	695.91	695.28	694.98	694.64
75	692.30	691.82	691.28	691.01	690.80
80	686.33	686.04	685.59	685.35	685.21
85	678.54	678.40	678.05	677.84	677.73
90	668.82	668.79	668.54	668.35	668.27
95	657.09	657.16	656.98	656.83	656.76
100	643.37	643.51	643.40	643.28	643.23
105	627.72	627.91	627.87	627.78	627.75
110	610.26	610.50	610.50	610.45	610.43
115	591.17	591.43	591.48	591.47	591.46
120	570.64	570.93	571.02	571.03	571.04
125	548.90	549.22	549.33	549.37	549.40
130	526.21	526.54	526.68	526.74	526.79
135	502.80	503.14	503.30	503.39	503.45
140	478.91	479.26	479.44	479.54	479.62
145	454.77	455.13	455.33	455.45	455.53
150	430.61	430.96	431.17	431.31	431.41
155	406.60	406.95	407.18	407.32	407.43
160	382.92	383.27	383.51	383.67	383.78
165	359.72	360.07	360.31	360.48	360.61
170	337.13	337.48	337.73	337.90	338.04
175	315.25	315.60	315.85	316.03	316.17
180	294.16	294.51	294.76	294.95	295.10
185	273.94	274.28	274.53	274.73	274.88
190	254.62	254.95	255.21	255.41	255.57
195	236.23	236.56	236.82	237.02	237.19
200	218.80	219.12	219.38	219.59	219.75
210	186.80	187.12	187.37	187.58	187.76
220	158.56	158.86	159.12	159.33	159.51

230	133.89	134.18	134.42	134.63	134.81
240	112.52	112.80	113.04	113.25	113.43
250	94.16	94.43	94.66	94.87	95.05
260	78.50	78.76	78.99	79.19	79.37
270	65.23	65.47	65.70	65.89	66.07
280	54.04	54.28	54.49	54.69	54.86
290	44.67	44.89	45.10	45.29	45.46
300	36.85	37.06	37.26	37.45	37.62

B.6 连续转化型板翅式热交换器传热与压降关联式

B.6.1 装填催化剂后的连续转化型板翅式热交换器流道，其传热与阻力特性不同于未装填催化剂的常规板翅式热交换器。进行工艺设计或校核时，可采用经试验验证的 j 因子和 f 因子关联式。

B.6.2 本附录给出的关联式适用于下列范围：

- a) 雷诺数范围：100~1400；
- b) 温度范围：40 K~120 K；
- c) 压力范围：0.1 MPa~2 MPa。

超出上述范围时，不宜直接外推使用；必要时，应结合补充试验、数值模拟或经验证的其他模型进行校核。

B.6.3 连续转化型板翅式热交换器流道的 Colburn j 因子可按式 (B.1) 计算。

$$j = 1.27 \times 10^{-4} \times \text{Re}^{0.507} \text{Pr}^{1.9517} \left(\frac{y_{\text{p}}}{y_{\text{p,eq}}} \right)^{0.042} \quad (\text{B.1})$$

式中：

j 为 Colburn j 因子；

Re 为雷诺数；

Pr 为普朗特数；

y_{p} 为局部仲氢摩尔分数；

$y_{\text{p,eq}}$ 为相应温度下的平衡仲氢摩尔分数。

B.6.4 连续转化型板翅式热交换器流道的 f 因子可按式 (B.2) 计算。

$$f = 109.12 \frac{\mu_{\text{h}}(1-\varepsilon)^2 D_{\text{h}}}{\rho_{\text{h}} u d_{\text{p}}^2 \varepsilon^3} + 0.11384 \frac{(1-\varepsilon) D_{\text{h}}}{d_{\text{p}} \varepsilon^3} \quad (\text{B.2})$$

式中：

f 为流动阻力因子；

μ_{h} 为氢气动力黏度，单位为 Pa·s；

ρ_{H} 为氢气密度，单位为 kg/m^3 ；

u 为表观流速，单位为 m/s ；

D_{H} 为流道水力直径，单位为 m ；

d_{P} 为催化剂颗粒等效直径，单位为 m ；

ε 为催化剂床层空隙率。

B.6.5 采用式（B.1）和式（B.2）进行设计计算时，应采用与实际工况相对应的温度、压力和组成条件下的热力性质与输运性质参数，并应与 B.3 和 B.4 的规定一致。

B.6.6 对承担正仲氢连续转化功能的板翅式热交换器，采用上述关联式进行计算时，还应考虑催化剂装填对有效流通截面、传热面积、局部流量分配、床层压降和反应放热的影响，并宜与反应动力学和能量衡算进行耦合校核。

B.7 计算文件要求

B.7.1 采用本附录数据或关联式进行工程计算时，计算文件宜至少说明下列内容：

- a) 物性数据来源及计算方法；
- b) 正仲氢组成数据来源及插值方法；
- c) 正仲氢转化热数据来源、单位基准和折算方法；
- d) j 因子和 f 因子关联式的适用范围；
- e) 催化剂粒径、空隙率、装填方式和有效流通截面；
- f) 超出本附录适用范围时采用的校核方法。

附录 C

(资料性)

正仲氢转化催化剂相关要求

C.1 一般说明

C.1.1 本附录给出氢气液化装置中正仲氢转化催化剂在分类、选用、性能评价、装填使用、活化再生、贮存运输及更换处置等方面的参考要求。

C.1.2 本附录适用于正仲氢转化器，以及在冷却换热过程中实现正仲氢连续催化转化的连续转化型热交换器。

C.1.3 催化剂的选型和使用宜结合工艺温区、目标仲氢摩尔分数、催化空速、允许压降、设备结构形式以及供货方技术文件综合确定。

C.1.4 对承担连续转化功能的热交换器，催化剂的应用宜与传热、流动和正仲氢转化过程协同考虑。

注：本附录可作为本文件 5.3.4、6.1 及 7 中有关催化剂材料、工艺设计、检验与验收条款的补充参考。

C.2 催化剂分类与适用特征

C.2.1 正仲氢转化催化剂可按组成和应用特征分为下列类型：

- a) 金属氧化物型催化剂；
- b) 负载型催化剂；
- c) 复合型或分段组合型催化剂；
- d) 其他经工程验证适用于低温正仲氢转化的催化剂。

C.2.2 催化剂宜根据适用温区、活性水平、机械强度、装填方式、压降特性和再生要求进行选择。

C.2.3 对液氢温区及其邻近低温区，宜优先选用低温活性高、起活温度低、反应放热可控的催化剂。

C.2.4 对液氢温区及较高低温区，宜优先选用活性稳定、机械强度高、抗粉化性能好的催化剂。

C.2.5 对于跨越多个温区运行的正仲氢转化系统，宜采用分温区配置方案。不同温区可根据平衡组成变化、反应动力学特征及床层压降要求，选用不同类型或不同粒径范围的催化剂。

C.3 供货状态与供货文件

C.3.1 催化剂供货时宜提供下列文件：

- a) 产品合格证；
- b) 产品名称、型号、批号和生产日期；
- c) 主要化学组成或有效组分说明；
- d) 外形、粒度范围及净质量；
- e) 贮存条件、有效期和使用注意事项。

C.3.2 催化剂性能检测报告宜至少包括下列内容：

- a) 化学组成；

- b) 外形和粒度范围；
- c) 比表面积；
- d) 堆积密度或装填密度；
- e) 机械强度；
- f) 磨损率或粉化率；
- g) 低温活性；
- h) 热稳定性；
- i) 推荐催化空速范围；
- j) 推荐活化条件。

C.3.3 对用于连续转化型热交换器的催化剂，性能检测报告中宜增加下列内容：

- a) 颗粒尺寸分布；
- b) 床层压降特性；
- c) 气流分布适应性；
- d) 颗粒迁移和粉化风险说明。

C.4 技术性能指标与推荐指标

C.4.1 正仲氢转化催化剂的性能评价项目宜包括：

- a) 低温活性；
- b) 适用温区；
- c) 机械强度；
- d) 磨损率或粉化率；
- e) 堆积密度；
- f) 比表面积；
- g) 床层压降特性；
- h) 热稳定性；
- i) 活化条件；
- j) 活性衰减规律或使用寿命。

C.4.2 工程选型、供货验收和性能对比时，可参考表 C.1 给出的典型技术指标。

表 C.1 正仲氢转化催化剂推荐技术指标

项目	典型工况 A	典型工况 B	说明
试验温度/K	21	77	代表液氢温区和液氮温区典型条件
试验压力/atm	1.36	1.36	推荐试验条件
氢气体积空速	300 cc(H ₂) / (min·cc 催化剂)	1200 cc(H ₂)/(min·cc 催化剂)	应注明折算状态
出口仲氢含量/%	≥97	≥46.5	推荐指标
仲氢转化率/%	≥96	≥86	推荐指标

平均抗压强度/N·颗 ⁻¹	≥7	≥7	也可对两类催化剂分别考核
颗粒外观	粉末、球形、条形或规则颗粒	粉末、球形、条形或规则颗粒	应满足装填要求
粒径范围/mm	由供需双方协商	由供需双方协商	宜结合压降与分布器结构确定
比表面积/(m ² /g)	≥200	≥200	宜作为出厂控制参数
磨损率或粉化率/%	供货方声明	供货方声明	宜作为连续运行评价参数

注 1：表中指标为资料性推荐值，不作为唯一判定依据。

注 2：对于分段组合式催化剂，可按不同温区分别确定其技术指标。

注 3：当采用其他试验条件时，宜在性能报告中同时给出试验条件和对应结果。

C.5 试验与评价方法

C.5.1 低温活性评价宜在规定温度、压力和催化空速条件下进行。测试结果宜至少包括入口仲氢摩尔分数、出口仲氢摩尔分数、对应温度下平衡仲氢摩尔分数和仲氢转化率。

C.5.2 仲氢转化率可按式（C.1）计算：

$$\eta = \frac{y_{p,out} - y_{p,in}}{y_{p,eq} - y_{p,in}} \times 100\%$$

(C.1)

式中：

η ——仲氢转化率，单位为百分数（%）；

$y_{p,in}$ ——入口仲氢摩尔分数；

$y_{p,out}$ ——出口仲氢摩尔分数；

$y_{p,eq}$ ——试验温度下平衡仲氢摩尔分数。

C.5.3 仲氢含量测定宜参照 GB/T 40045-2021 进行。

C.5.4 机械强度测定宜参照 ASTM D4179-11 或等效方法进行，并报告试样数量、平均值和离散性。

C.5.5 对用于正仲氢转化器或连续转化型热交换器的催化剂，宜在代表性粒径、床层高度和流速条件下测定床层压降，并与转化性能同步评价。

C.5.6 稳定性评价宜通过恒定工况连续运行试验或加速老化试验进行，并考察催化剂活性衰减、机械完整性和床层压降变化。

C.6 活化与再生

C.6.1 催化剂是否需要活化及活化方式，应根据催化剂类型和供应商技术文件确定。

C.6.2 活化可采用原位活化或非原位活化。

C.6.3 活化过程应控制温度、气氛、升温速率和保温时间，并防止受潮、污染和异常过热。

C.6.4 活化完成后，宜通过性能确认或过程记录验证活化效果。

C.6.5 催化剂是否可再生，应根据催化剂体系、失效模式和供应商建议确定。

C.6.6 再生前后宜对活性、压降和机械完整性进行评估。

C.6.7 再生条件不宜导致催化剂载体损伤、颗粒破碎或不可逆失活。

C.7 贮存、运输与更换要求

C.7.1 催化剂应在干燥、清洁、密封条件下贮存，避免受潮、受油污染和机械冲击。

C.7.2 催化剂包装宜标明名称、型号、批号、净重、生产日期和贮存要求。

C.7.3 催化剂运输过程中应采取防震、防潮和防污染措施。

C.7.4 催化剂更换前，应确认旧床层运行状态、压降变化和活性衰减情况。

C.7.5 更换过程中应避免异物混入，并记录装填批次、装填量和装填日期。

C.8 失效、废弃及安全环保提示

C.8.1 催化剂常见失效形式可包括活性衰减、粉化、堵塞、结块和污染中毒。

C.8.2 催化剂失效判断宜结合转化率下降、压降升高、局部异常温升和运行周期综合确定。

C.8.3 废弃催化剂应根据其组成、污染状态和危险特性分类处置。

C.8.4 含有危险成分或受污染的废弃催化剂，应按照相关安全、环保和危险废物管理规定处理。

C.8.5 催化剂拆卸、转移和包装过程中，宜采取防尘、防火、防静电和人员防护措施。
