



中华人民共和国国家标准

GB/T 47194—2026

微通道热交换器

Micro and mini channel heat exchangers

2026-02-27 发布

2026-09-01 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 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 3

4 通用要求 4

 4.1 通则 4

 4.2 职责 4

 4.3 厚度附加量 4

5 材料 5

 5.1 基本要求 5

 5.2 板材、管材、锻件、棒材和焊材 5

 5.3 金属粉末 6

6 设计 8

 6.1 通用要求 8

 6.2 设计条件与选型计算 8

 6.3 芯体 9

 6.4 其他部件的设计计算 10

7 制造 10

 7.1 基本要求 10

 7.2 扩散焊接 10

 7.3 粉末床熔融 12

 7.4 真空钎焊 13

 7.5 熔化焊接 13

8 检验与试验 13

 8.1 基本要求 13

 8.2 扩散焊用零部件及芯体检验 14

 8.3 热交换器检验与试验 15

9 出厂验收 17

 9.1 出厂资料 17

 9.2 产品铭牌 17

 9.3 运输包装与贮存 18

10 性能测试 18



附录 A (规范性) 以验证性爆破试验确定芯体设计压力 19

 A.1 试验场地及试验准备 19

 A.2 试验设备和仪表 19

 A.3 试验试件 19

 A.4 爆破试验要求 19

 A.5 设计压力的确定 19

附录 B (规范性) 扩散焊工艺及技能评定 21

 B.1 通用要求 21

 B.2 焊接工艺评定因素及规则 21

 B.3 焊接工艺试件要求 21

 B.4 工艺评定检验要求和结果评价 21

 B.5 扩散焊操作工的技能评定 24

 B.6 规程及评定报告 24

附录 C (规范性) 金属粉末床熔融元件与钢材焊接工艺评定 29

 C.1 通则 29

 C.2 焊接工艺预规程(pWPS) 29

 C.3 焊接工艺评定因素 29

 C.4 试件制备 31

 C.5 试验及检验检测 35

 C.6 评定原则 40

 C.7 焊接工艺评定报告 41

附录 D (资料性) 超临界热交换器流动与传热性能测试方法 45

 D.1 测试系统 45

 D.2 测量仪表 46

 D.3 测试样机 46

 D.4 测量方法 47

 D.5 测试程序 48

 D.6 数据处理 49

 D.7 性能确定 52

参考文献 53

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。

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。

本文件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。

本文件起草单位：甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司、上海蓝滨石化设备有限责任公司、西安交通大学、中国石化工程建设有限公司、陕西智拓固相增材制造技术有限公司、杭州沈氏节能科技股份有限公司、兰州兰石换热设备有限责任公司、清华大学、中石化广州工程有限公司、武汉东海石化重型装备有限公司、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、北京广厦环能科技股份有限公司、山东豪迈机械制造有限公司、兰州石油机械研究所有限公司、中国特种设备检测研究院、机械工业兰州石油化工设备检测所有限公司。

本文件主要起草人：蒋琛、白博峰、张迎恺、周文学、张昊、沈泽奇、李治国、胥蕊娜、李双权、马一鸣、李明凯、王凤君、刘永超、张慧芳、苏斯君、王超、陈志伟、唐卉、范宝田。



引 言

本文件是微通道热交换器的产品建造标准,用以规范在中国境内建造或使用的微通道热交换器设计、制造、检验和验收等相关技术要求,由 10 章正文和 4 个附录构成。

本文件的主要技术条款涵盖了微通道热交换器建造的设计、材料选用、制造、检验与试验、出厂验收及性能测试中需遵循的关键技术要求,重点针对微通道结构的特殊性,细化了芯体设计、先进制造工艺、芯体验证性爆破试验、超临界流体传热性能测试及特殊检验方法等专项技术内容,同时衔接 GB/T 150《压力容器》(所有部分)、GB/T 151《热交换器》、GB/T 4732《压力容器分析设计》(所有部分)等基础性国家标准,确保技术要求的系统性与一致性。

本文件没有必要、也不可能囊括适用范围内微通道热交换器建造中的所有技术细节。实际工程设计和生产制造中,允许采用先进的技术方法(如数值模拟优化设计、新型增材制造工艺等),但工程技术人员采用这些方法时需能做出可靠判断,确保其满足本文件规定,特别是关于芯体强度、流道结构安全性、疲劳性能验证、型式试验等核心设计与检验要求。本文件既不要求也不限制设计人员使用计算机程序实现微通道热交换器的分析或设计。

对于未经全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)书面授权或认可的其他机构对本文件的宣贯或解释所产生的理解歧义和由此产生的任何后果,委员会不承担任何责任。

微通道热交换器

1 范围

- 1.1 本文件规定了微通道热交换器(以下简称“热交换器”)的材料、设计、制造、检验与试验、出厂验收及性能测试。
- 1.2 本文件适用于设计压力大于或等于 0.1 MPa 且小于 100 MPa 的热交换器,其中钛制热交换器的设计压力不超过 35 MPa。
- 1.3 本文件适用的设计温度为:
- a) 钢制热交换器设计温度范围为 GB/T 150.2 中列入材料的允许使用温度范围;
 - b) 其他金属材料热交换器按本文件相应引用标准中列入的材料允许使用温度确定。

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 压力容器 第 1 部分:通用要求
- GB/T 150.2 压力容器 第 2 部分:材料
- GB/T 150.3—2024 压力容器 第 3 部分:设计
- GB/T 150.4 压力容器 第 4 部分:制造、检验和验收
- GB/T 151 热交换器
- GB/T 222 钢及合金 成品化学成分允许偏差
- GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法
- GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 232 金属材料 弯曲试验方法
- 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 1479.1 金属粉末 松装密度的测定 第 1 部分:漏斗法
- GB/T 1479.2 金属粉末 松装密度的测定 第 2 部分:斯柯特容量计法
- GB/T 1480 金属粉末 干筛分法测定粒度
- GB/T 1482 金属粉末 流动性的测定 标准漏斗法(霍尔流速计)
- GB/T 2054 镍及镍合金板
- GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法
- GB/T 2882 镍及镍合金管
- GB/T 2965 钛及钛合金棒材
- GB/T 3077 合金结构钢
- GB/T 3280 不锈钢冷轧钢板和钢带
- GB/T 3621 钛及钛合金板材
- GB/T 3624 钛及钛合金无缝管

GB/T 4237 不锈钢热轧钢板和钢带
GB/T 4238 耐热钢钢板和钢带
GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法
GB/T 4435 镍及镍合金棒
GB/T 4732 (所有部分) 压力容器分析设计
GB/T 5161 金属粉末 有效密度的测定 液体浸透法
GB/T 5162 金属粉末 振实密度的测定
GB/T 5314 粉末冶金用粉末 取样方法
GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法
GB/T 9452 热处理炉有效加热区测定方法
GB/T 13296 锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管
GB/T 13298 金属显微组织检验方法
GB/T 14265 金属材料中氢、氧、氮、碳和硫分析方法通则
GB/T 14976 输送流体用不锈钢无缝钢管
GB/T 15445.6 粒度分析结果的表述 第6部分:颗粒形状和形态的定性及定量表述
GB/T 15620 镍及镍合金实心焊丝和焊带
GB/T 16598 钛及钛合金饼和环
GB/T 16672 焊缝 工作位置 倾角和转角的定义
GB/T 16913 粉生物性试验方法
GB/T 19077 粒度分析 激光衍射法
GB/T 19587 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积
GB/T 21832.1 奥氏体-铁素体型双相不锈钢焊接钢管 第1部分:热交换器用管
GB/T 21833.1 奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管 第1部分:热交换器用管
GB/T 25137 钛及钛合金锻件
GB/T 26723 冷轧钛带卷
GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验
GB/T 38973 增材制造制粉用钛及钛合金棒材
GB/T 39247 增材制造 金属制件热处理工艺规范
GB/T 39251 增材制造 金属粉末性能表征方法
GB/T 39255 焊接与切割用保护气体
GB/T 41882 增材制造用铜及铜合金粉
GB/T 43484 增材制造 激光粉末床熔融用高温合金粉末
GB/T 43895 增材制造 材料 模具钢粉
GB/T 44194 增材制造 金属粉末再利用技术规范
GB/T 44239 增材制造用铝合金粉
HG/T 20592 钢制管法兰(PN 系列)
HG/T 20615 钢制管法兰(Class 系列)
JB/T 4756 镍及镍合金制压力容器
NB/T 11270 钛制压力容器
NB/T 47006—2019 铝制板翅式热交换器
NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件
NB/T 47013.1 承压设备无损检测 第1部分:通用要求
NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第2部分:射线检测

- NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测
- NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第 4 部分:磁粉检测
- NB/T 47013.5 承压设备无损检测 第 5 部分:渗透检测
- NB/T 47013.7 承压设备无损检测 第 7 部分:目视检测
- NB/T 47013.8 承压设备无损检测 第 8 部分:泄漏检测
- NB/T 47013.10 承压设备无损检测 第 10 部分:衍射时差法超声检测
- NB/T 47013.11 承压设备无损检测 第 11 部分:射线数字成像检测
- NB/T 47013.14 承压设备无损检测 第 14 部分:射线计算机辅助成像检测
- NB/T 47013.15 承压设备无损检测 第 15 部分:相控阵超声检测
- NB/T 47014—2023 承压设备焊接工艺评定
- NB/T 47015 压力容器焊接规程
- NB/T 47016—2023 承压设备产品焊接试件的力学性能检验
- NB/T 47018 (所有部分) 承压设备用焊接材料订货技术条件
- NB/T 47028 压力容器用镍及镍合金锻件
- NB/T 47046 承压设备用镍及镍合金板
- NB/T 47047 承压设备用镍及镍合金无缝管
- YB/T 6122 耐蚀合金大口径无缝管

3 术语和定义

GB/T 151 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

特征尺寸 characteristic dimension

用于描述热交换器流道结构特征的尺寸参数。

注：本文件中特征尺寸是指流道的当量直径或水力直径，其计算公式为 4 倍流道截面积除以润湿周长。

3.2

微通道热交换器 micro and mini channel heat exchanger

主传热区中，一种或多种流体流道的特征尺寸不大于 2.0 mm 的热交换器。

注：对于流道截面变化的热交换器，若特征尺寸不大于 2.0 mm 的流道长度占比不小于流体主传热区流动长度的 50%，则将该热交换器归为微通道热交换器。

3.3

扩散焊 diffusion bonding

在真空或惰性气体的保护下，较高温度和压力条件时，依靠被焊接接触界面的原子扩散，实现界面原子成键而使被焊件实现冶金结合的焊接方法。

3.4

流道板 channel sheet

板表面形成有传热流道的板片。

注：常用蚀刻、机加工、电火花加工、激光等方法加工得到，不包含冲压形成的波纹板片。



3.5

增材制造 additive manufacturing; AM

以三维模型数据为基础，通过材料堆积的方式制造零件或实物的技术。

[来源：GB/T 35351—2025, 3.1.1]

3.6

粉末床熔融 powder bed fusion; PBF

通过热能选择性地熔化/烧结粉末床区域的增材制造工艺。

[来源:GB/T 35351—2025, 3.2.5]

3.7

芯体 core

扩散焊接或增材制造得到的、内部具有流体通道的传热组件。

3.8

流道表面积 channel surface area

某股流体在热交换器主传热区域内,与固体壁面直接接触的所有流道表面积之和。

注:单位为平方米(m²)。圆整后保留至少两位有效数字的流道表面积为公称流道表面积。各股流体的流道表面积在设计总图中分别给出,并注意与换热面积进行区分。

4 通用要求

4.1 通则

4.1.1 热交换器的生产单位应具有健全的质量保证体系,并有效运行。

4.1.2 热交换器的材料、设计、制造、检验与试验等应符合本文件的规定,并应遵守相关安全技术规范,且符合设计文件要求。

4.2 职责

4.2.1 用户或委托方



热交换器的用户或委托方应以书面形式向生产单位提出设计条件,并对设计条件的正确性和完整性负责。

4.2.2 生产单位

生产单位至少应承担以下职责。

- a) 按照工艺设计条件进行热交换器选型和工艺计算,对工艺设计的正确性和完整性负责。
- b) 按照机械设计条件进行机械设计计算、施工图设计,对机械设计的正确性和完整性负责。
- c) 制定产品质量计划,其内容应包括热交换器或元件的制造质量控制点、检验项目和合格指标。
- d) 按照产品标准、设计文件、质量计划的规定,进行检验和试验,出具质量检查报告,对报告的真实性、正确性、完整性负责。
- e) 产品制造完成检验合格后,出具产品质量合格证。
- f) 生产单位保留下列技术文件,保存期限不低于设计使用年限:
 - 1) 工艺设计文件;
 - 2) 机械设计文件;
 - 3) 质量计划;
 - 4) 质量记录(焊接、检查、检验、试验记录);
 - 5) 竣工资料。

4.3 厚度附加量

4.3.1 厚度附加量按公式(1)确定:

$$C = C_1 + C_2 \dots\dots\dots (1)$$

式中：
C ——厚度附加量，单位为毫米(mm)；
C₁ ——材料厚度负偏差，单位为毫米(mm)；
C₂ ——腐蚀裕量，单位为毫米(mm)。

4.3.2 芯体可不考虑厚度负偏差与腐蚀裕量。

5 材料

5.1 基本要求

5.1.1 热交换器选材应基于其使用条件(包括设计温度、设计压力、介质特性和操作特点等)，并对材料的化学成分、微观组织、性能(力学性能、工艺性能、化学性能和物理性能)，以及制造工艺和经济合理性进行综合评估。

5.1.2 受压元件用材料应附有材料制造单位的质量证明书。质量证明书的内容应齐全、清晰，并且印制可追溯的信息化标识，加盖材料制造单位质量检验章。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)。

5.1.3 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。

5.1.4 材料复验应符合 GB/T 150.4 及相关材料标准的规定。

5.2 板材、管材、锻件、棒材和焊材

5.2.1 热交换器承压部件金属材料应符合 GB/T 150(所有部分)、GB/T 4732(所有部分)及相关材料标准的要求。

5.2.2 扩散焊热交换器常用金属材料应符合表 1 的规定。

表 1 扩散焊热交换器常用金属材料

材料 类型	统一数字代号	牌号	主要零部件材料标准	
			板片、端板等	封头、接管、法兰、螺柱等
不锈钢	S22053	022Cr23Ni5Mo3N	GB/T 713.7 GB/T 3280 GB/T 4237 GB/T 4238	GB/T 713.7
	S22253	022Cr22Ni5Mo3N		GB/T 1220
	S30210	12Cr18Ni9		GB/T 3077
	S30403	022Cr19Ni10		GB/T 3280
	S30408	06Cr19Ni10		GB/T 4237
	S30409	07Cr19Ni10		GB/T 4238
	S31008	06Cr25Ni20		GB/T 13296
	S31603	022Cr17Ni12Mo2		GB/T 14976
	S31608	06Cr17Ni12Mo2		GB/T 21832.1
	S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti		GB/T 21833.1
	S31703	022Cr19Ni13Mo3		NB/T 47010
	S32168	06Cr18Ni11Ti		HG/T 20592
				HG/T 20615

表 1 扩散焊热交换器常用金属材料（续）

材料 类型	统一数字代号	牌号	主要零部件材料标准	
			板片、端板等	封头、接管、法兰、螺柱等
钛及钛 合金	—	TA1	GB/T 3621 GB/T 26723	GB/T 3621 GB/T 3624 GB/T 2965 GB/T 25137
	—	TA2		
	—	TA10		
	—	TA15		
	—	TC4		
镍及镍 合金	H06625	NS3306	GB/T 2054 NB/T 47046	GB/T 2054 GB/T 2882 GB/T 4435 NB/T 47028 NB/T 47046 NB/T 47047 YB/T 6122
	H07718	NS4301		
	H08800	NS1101		
	H08810	NS1102		
	H08825	NS1402		

5.2.3 设计文件要求时,板片用材料按炉批号进行复验,其熔炼化学成分的技术要求应符合相应引用标准要求,成分分析允许偏差应符合 GB/T 222 的规定。板片按热处理批号复验力学性能,力学复验项目至少包括抗拉强度、屈服强度、伸长率、硬度等,复验结果应符合相应标准要求。

5.2.4 同炉批号、同规格(包括厚度及外形尺寸相同)且同一热处理制度的材料为一批。每批不锈钢卷材在开平后,至少抽取 1%(且不少于 3 张)进行微裂纹检测;每批钛材、镍基合金卷材在开平后,至少抽取 10%(且不少于 30 张)进行微裂纹检测。如发现有微裂纹,则同批其余板片进行 100%微裂纹检测。板片的微裂纹检测按 NB/T 47013.5 的规定进行渗透检测,质量等级 I 级为合格。

5.2.5 板片不应采用钢印作为标志。其他受压元件的材料在被分割前应进行标志移植,有耐腐蚀要求的不锈钢,不应在耐腐蚀面采用硬印标记。

5.2.6 若设计文件有要求时,板片还应进行晶粒度检测。

5.2.7 法兰、封头体(管箱)、接管等受压元件采用不锈钢或镍及镍合金锻件时,应符合 NB/T 47010 或 NB/T 47028 的规定,锻件级别不低于 II 级;采用钛及钛合金锻件时,应符合 GB/T 16598 的规定。

5.2.8 承压部件用焊接材料应符合 GB/T 15620、NB/T 47015 或 NB/T 47018(所有部分)的规定。当采用境外牌号材料时,应符合相应标准规定。

5.2.9 热交换器铭牌应以适合使用环境的金属材料制作。

5.3 金属粉末

5.3.1 增材制造粉末床熔融工艺用金属粉末及技术要求可按照表 2 选取,选用表 2 所列材料类型的其他牌号材料时,其技术要求及性能指标不应低于相应标准中要求。



表 2 常用有色金属粉末

材料 类型	牌号	标准
铝合金	AlSi7Mg AlSi10Mg AlMgSiMnScZr	GB/T 44239
不锈钢	316L 17-4PH	GB/T 43895
高温合金	GH3536 GH4169 GH3625 GH4099	GB/T 43484
铜合金	Cu1 Cu2 CuCrZr CuNiSi CuSn10	GB/T 41882

5.3.2 制粉用钛及钛合金棒材牌号、状态及化学成分应符合 GB/T 38973 的要求。

5.3.3 金属粉末的主要性能指标包括化学成分、粒度及粒度分布、流动性、氧含量、球形率、松装密度、空心粉率等,其检测宜根据表 3 进行。金属粉末检测项目与合格指标应根据工艺要求确定,其他特殊要求由供需双方协商确定。

表 3 金属粉末主要特性及检测方法

项目	检测方法及标准
粉末粒度及分布	干筛分法:GB/T 1480 激光衍射法:GB/T 19077
形状和形态	GB/T 15445.6
比表面积	GB/T 19587
松装/表观密度	GB/T 1479.1 GB/T 1479.2
有效密度	GB/T 5161
振实密度	GB/T 5162
氢、氧、氮、碳和硫含量	GB/T 14265
流动性	安息角法:GB/T 16913 漏斗法:GB/T 1482
夹杂物	GB/T 39251
空心粉率	GB/T 39251

5.3.4 相同工艺与批号的粉末为一批次,粉末按批次进行抽样检测,取样方法按 GB/T 5314 的规定进行,取样数量应满足检测所需。

5.3.5 金属粉末的循环再利用应符合 GB/T 44194 的规定。

6 设计

6.1 通用要求

6.1.1 换热器的载荷、设计压力、设计温度等应按 GB/T 150(所有部分)、GB/T 151 及 GB/T 4732(所有部分)的相关规定确定。

6.1.2 承压元件设计计算与结构尺寸的确定应符合 GB/T 150(所有部分)或 GB/T 4732(所有部分)的相关规定。

6.1.3 换热器的失效模式按 GB/T 150(所有部分)或 GB/T 4732(所有部分)的相关规定。

6.1.4 换热器设计可采用规则设计方法、分析设计方法。无法采用规则设计方法与分析设计方法的,可采用验证性试验分析方法,或采用对比经验设计方法。

6.1.5 对不同工况的换热器,应按最苛刻的工况设计,必要时还需校核其他工况下的换热器及元件,并在图样或相应技术文件中注明各工况操作条件 and 设计条件下的压力和温度值。

6.1.6 承压元件材料的许用应力应根据其设计方法按 GB/T 150(所有部分)或 GB/T 4732(所有部分)的规定选取。扩散焊接芯体的微通道局部结构强度校核条件应符合 GB/T 150.3—2024 中 A.3.1 的规定,其中焊接接头系数取 0.7。

6.1.7 芯体的设计压力宜采用爆破试验确定。当用户或委托方与设计单位达成一致时,芯体的设计压力可通过基于公式或基于有限元分析的设计方法确定。

6.2 设计条件与选型计算

6.2.1 设计条件

6.2.1.1 用户或设计委托方应以正式书面形式向设计单位提出工艺设计条件,且至少包含以下内容:

- a) 操作数据,包括流量、温度、压力、热负荷等;
- b) 物性数据,包括介质密度、比热、黏度、导热系数和介质组成等;
- c) 允许压力降;
- d) 其他数据,包括操作弹性、工况等。

6.2.1.2 用户或设计委托方应以正式书面形式向设计单位提出机械设计条件,且至少包含以下内容:

- a) 设计所依据的主要标准和规范;
- b) 载荷数据(包括工作压力、工作温度范围、接管载荷等);
- c) 介质组分与特性;
- d) 预期使用年限;
- e) 几何参数、管口方位和维修操作空间要求;
- f) 使用地及其自然条件(包括月平均最低气温的最低值、抗震设防烈度、基本风压值、场地土类别等)。

6.2.1.3 需要时,用户或设计委托方可给出换热器污垢热阻取值要求。

6.2.2 选型计算

6.2.2.1 选型应满足下列要求:

- a) 合理选择换热器的型式、通道形状、流道表面积、特征参数,满足传热、安全可靠性及能效要求;
- b) 兼顾经济性,合理选材;

c) 满足热交换器安装、操作、维修等要求。

6.2.2.2 热交换器的工艺计算应进行优化,提高传热效率,满足工艺设计条件要求。

6.3 芯体

6.3.1 常用传热元件结构

6.3.1.1 流道具有立体结构特点的传热元件,通常采用粉末床熔融工艺制造,由三周期极小曲面结构 (TPMS)为特征传热单元构成,如图 1 所示。

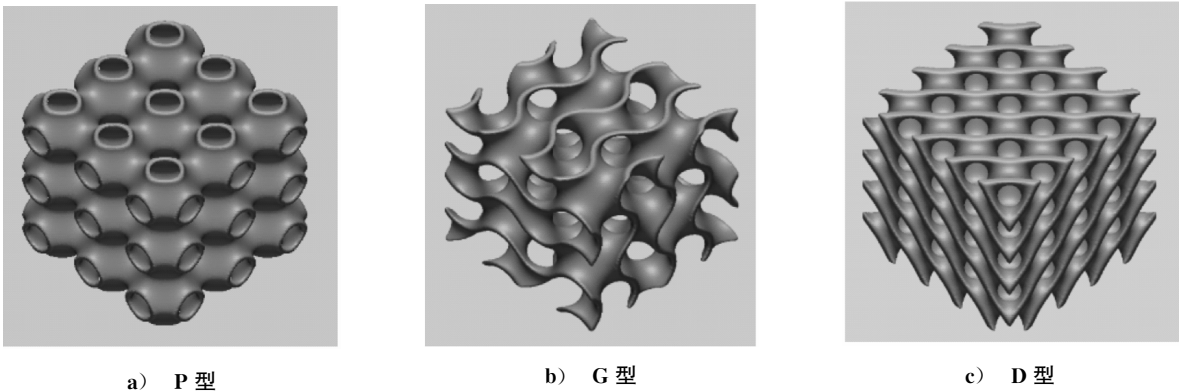


图 1 立体微通道结构

6.3.1.2 流道具有离散平面结构特点的传热元件,由特征尺寸不大于 2 mm 流道并联组成,通道间彼此独立,互不相通,可用于为管式元件或蚀刻形成的板式元件组成的热交换器中,如图 2 所示。



图 2 离散平面微通道结构

6.3.1.3 流道具有连通平面结构特点的传热元件,扰流结构在流道中周期排布,可用于机加工或蚀刻形成的板式元件组成的热交换器中,如图 3 所示。

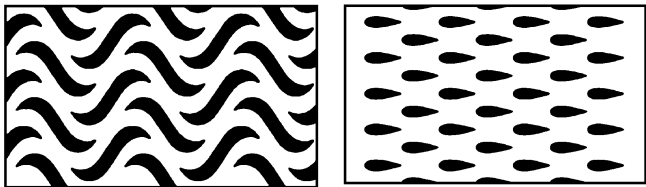


图 3 连通平面微通道结构

6.3.2 设计压力的确定

6.3.2.1 芯体的设计压力可采用基于爆破试验的方法确定,爆破试验按附录 A 的规定进行。

6.3.2.2 当存在以下情况之一时,应通过爆破试验确定芯体的设计压力:

- a) 新结构设计验证；
- b) 制造工艺、制造设备或芯体材料发生重要变化；
- c) 供需双方认为有必要时。

6.3.2.3 供需双方协商并达成一致时，热交换器的强度设计可采用基于公式的设计方法或有限元分析设计方法。

6.3.3 液压疲劳试验

当存在以下情况之一时，应按 8.3.6 的规定进行液压疲劳试验：

- a) 新结构抗疲劳性能验证；
- b) 新材料抗疲劳性能验证；
- c) 制造工艺或制造设备发生重要变化；
- d) 供需双方认为有必要时。

6.4 其他部件的设计计算

6.4.1 封头体、开口补强及接管等设计应满足 GB/T 150.3—2024 的要求，其制造、检验和验收也应满足 GB/T 150(所有部分)的相应要求。

6.4.2 无法按 GB/T 150.3—2024 进行设计计算的局部结构，应根据 GB/T 4732(所有部分)的要求进行分析计算，其制造、检验和验收也应满足 GB/T 4732(所有部分)的相应要求。

6.4.3 当封头体与芯体的焊接接头厚度不大于 38 mm 时，若该焊接接头结构无法用公式法进行计算，且难以进行 100%射线或超声检测，则应采用 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 的应力分类方法进行强度分析，宜进行局部射线或超声检测，其材料的许用应力应按选用材料标准要求的 0.7 倍取值。

7 制造

7.1 基本要求

7.1.1 热交换器制造除应符合本文件的要求外，还应符合 GB/T 150(所有部分)、GB/T 4732(所有部分)、NB/T 11270、JB/T 4756 以及设计文件要求。

7.1.2 熔化焊工艺评定应按 NB/T 47014—2023 等相关标准进行，扩散焊工艺评定应按附录 B 的规定进行。

7.1.3 焊接人员或设备操作人员应满足如下要求：

- a) 熔化焊由持有相应资格证的人员担任；
- b) 扩散焊指定专人担任，并经过扩散焊技能评定考核，扩散焊技能评定应按附录 B 的规定进行；
- c) 粉末床熔融设备操作人员经过培训并通过考核。培训由设备厂商或已接受培训并合格的人员进行。

7.2 扩散焊接

7.2.1 环境要求

7.2.1.1 扩散焊车间的相对湿度不宜大于 70%。

7.2.1.2 扩散焊装配间有良好的照明，保证装配操作部位应不低于 300 lx。

7.2.1.3 扩散焊装配间应独立、洁净、干燥。

7.2.2 真空扩散焊炉要求

7.2.2.1 真空扩散焊炉宜采用冷壁式真空扩散焊炉。

- 7.2.2.2 真空扩散焊炉的最高工作温度应不低于 1 200 ℃。
- 7.2.2.3 真空扩散焊炉均温区尺寸应大于芯体尺寸。
- 7.2.2.4 真空扩散焊炉有效工作区的炉温均匀性应满足 GB/T 9452 中Ⅲ类炉要求。
- 7.2.2.5 真空扩散焊炉的真空度应优于 4×10^{-2} Pa, 冷态压升率应不大于 0.6 Pa/h, 在真空扩散焊炉连续使用的前提下, 至少每 30 d 进行 1 次压升率检测; 扩散焊炉检修、更换或装卸密封元件后应进行压升率检测。
- 7.2.2.6 真空扩散焊炉升温及冷却速率应满足扩散焊工艺的要求。
- 7.2.2.7 真空扩散焊炉应配备温度、真空度的测量、控制和记录装置以及超温报警装置等, 应按 GB/T 9452 中Ⅲ类炉要求进行校检, 并在有效期内使用。
- 7.2.2.8 真空扩散焊炉的压力值应满足扩散焊工艺的要求。
- 7.2.2.9 真空扩散焊炉的压力误差应在工作压力的 $\pm 2\%$ 范围内, 应配备焊接压力的测量、控制和记录装置等。
- 7.2.2.10 真空扩散焊炉位移控制精度应在 ± 0.5 mm 范围内。
- 7.2.2.11 真空扩散焊炉应具备不少于 9 处温度测点。
- 7.2.2.12 应定期对扩散焊炉进行清理, 以保持炉膛清洁。

7.2.3 流道板加工

- 7.2.3.1 板片可采用蚀刻、机加工、电火花加工、激光、模压、激光切割等方法加工成流道板。
- 7.2.3.2 同一炉批号材质、同规格、同结构形式和相同加工方式的流道板应为一批。
- 7.2.3.3 每批流道板的首件应进行尺寸检测, 检测合格后进行批量加工。
- 7.2.3.4 流道板的尺寸偏差和形位公差应符合图纸的要求。
- 7.2.3.5 流道板焊接面不应存在影响焊接质量的沟槽、凹坑、划痕、磕碰、压痕等缺陷。
- 7.2.3.6 流道板应保持平整, 不应有弯曲、拱起存在。
- 7.2.3.7 可采用激光切割、蚀刻或冲压等方式对流道板外形进行修整, 保证板片对位精度。

7.2.4 流道板清理

- 7.2.4.1 芯体组装前应对流道板进行清洗, 并确保流道板表面无粉尘、油污、氧化物、锈斑、涂层、记号等异物或其他脏物。
- 7.2.4.2 可根据流道板的具体材质和表面状态进行常规清洗、化学清洗或两者同时采用。其中, 常规清洗是采用无水乙醇、丙酮、清洗剂、清洁水或去离子水等介质, 对流道板表面进行超声清洗、冲洗或擦拭清理; 而化学清洗是采用不同配比的酸液或碱液, 对流道板待焊面氧化膜进行化学清理, 经化学清理后的流道板应在规定时间内进行焊接, 超出规定时间应重新进行化学清洗, 采用化学清洗时, 不应引起晶间腐蚀、晶间氧化和合金损耗; 清洗后的流道板应进行干燥且不应产生污染, 干燥温度不宜高于 120 ℃。
- 7.2.4.3 不锈钢流道板应在最终清洗后 72 h 内完成芯体组装, 并处于无尘等条件下保存, 钛或镍基合金流道板应在最终清洗后 48 h 内完成芯体组装, 并处于真空条件下保存。流道板清洗后, 作业人员不得直接接触零件。在转运过程中, 应采取防护措施, 防止待焊面被划伤、磕碰或污染。

7.2.5 芯体组装

- 7.2.5.1 应在独立、洁净、干燥的装配间中进行芯体组装。
- 7.2.5.2 装配前应逐张检验流道板清洁度, 流道板应无锐棱、毛刺、划痕、油污、粘胶、金属屑、灰尘等影响扩散焊接质量的异物或缺陷。
- 7.2.5.3 按设计图纸要求依次堆叠、装配各层流道板以形成芯体装配体, 应保证各层流道板边缘对齐且装配方向和顺序与设计图纸一致。

7.2.5.4 组装时应使上下层各流道板之间贴合紧密且不透光,必要时可施加辅助压力,随后采用熔焊在芯体装配体边缘进行辅助定位,将其约束为一个整体的芯体装配体。

7.2.5.5 除另有规定外,组装后的芯体装配体垂直度偏差应不大于 1 mm,流道板错边量应不大于 0.5 mm。

7.2.5.6 必要时可在芯体装配体表面焊接吊装结构,使其易于搬运、吊装。

7.2.5.7 在芯体装配体上下组装压板,形成待焊装配体,压板材质可选石墨、钼合金或钛钎钼合金等;压板厚度应满足扩散焊工艺要求;压板与装配体的接触面应放置固体阻焊层,阻焊层可选陶瓷板、云母片或石墨纸等。

7.2.6 芯体扩散焊

7.2.6.1 芯体应在完好、有效的真空扩散焊设备内完成扩散焊操作。

7.2.6.2 芯体应采用真空扩散焊制造,芯体扩散焊前应具有评定合格的扩散焊工艺支持,焊接工艺评定由芯体制造厂按附录 B 进行。

7.2.6.3 扩散焊工艺评定技术档案应保存至该工艺评定失效,产品扩散焊工艺及记录保存年限应不少于产品设计使用年限。

7.2.6.4 扩散焊过程中,应确认炉内真空度、焊接温度、焊接压力、焊接时间等工艺参数值与扩散焊工艺相符无偏差,并实时记录具体参数值。

7.2.6.5 扩散焊后应对芯体表面阻焊层进行清理。

7.2.6.6 扩散焊后应对焊后芯体外观、尺寸及焊接质量进行检验。

7.2.6.7 芯体泄漏时,不应进行扩散焊返修。

7.2.6.8 为满足芯体最终外形尺寸要求,允许对芯体进行机械加工,加工前应对流道进出口进行防护,加工后彻底清除残留物。

7.3 粉末床熔融

7.3.1 环境条件

粉末床熔融设备和粉末宜在以下环境保存和运行:

- a) 环境温度:5℃~35℃;
- b) 相对湿度:不大于 75%。

7.3.2 粉末床熔融设备要求

7.3.2.1 粉末床熔融设备应处于完好状态。

7.3.2.2 成形平台的材料应与原材料具有良好的冶金相容性,厚度、平面度和粗糙度满足工艺要求,在使用前应清除表面的杂质、油污。成形平台按要求安装固定后,成形平台与铺粉器之间的平行度和距离应符合粉末床熔融设备使用说明书的规定。

7.3.2.3 添加不同牌号粉末前应将成形室清理干净,避免产生交叉污染。确保成形室保护气体类型、氧含量、真空度(电子束)、气体压力及成形平台预热温度等满足成形工艺条件。

7.3.3 成形过程

7.3.3.1 成形过程由计算机辅助完成。在正式加工前应试制力学性能样件,样件尺寸与形式应满足力学性能检测的要求。

7.3.3.2 应对主要工艺参数进行记录,具体的工艺参数监控和记录由供需双方协商确定。

7.3.3.3 成形过程中如出现中断,应由工艺责任人对中断状态进行记录和评估,并根据评估结果进行

处置。

7.3.4 粉末清理

7.3.4.1 成形完成后,宜将成形态零件在保护气氛或真空环境下冷却到环境温度或者特定温度下再进行粉末清理。

7.3.4.2 粉末清理可采用防静电毛刷、防爆吸尘器、高压气等方式进行。

7.3.4.3 清理粉末操作过程中应注意安全及人身防护。

7.3.5 初步检验

7.3.5.1 成形完成后对成形态零件进行初步检验,包括但不限于外观缺陷、外形尺寸、表面质量,应满足设计文件要求。

7.3.5.2 在不影响用户预期使用要求情况下,可采用机械加工等方式进行修补与变形校正。

7.3.6 后处理

7.3.6.1 热处理应满足以下要求:

- a) 成形后的成形态零件及随炉样件应根据设计文件要求进行去应力退火处理;
- b) 根据成形态零件的使用要求或供需双方的技术协议采用相应的热处理以改善组织性能;
- c) 对内部质量有特殊要求的成形态零件可进行热等静压处理;
- d) 热处理应符合 GB/T 39247 的规定。

7.3.6.2 从成形平台移除成形态零件时不应破坏零件或影响零件性能。常用的成形态零件移除方法有机械加工、手工去除等。

7.3.6.3 如需去除支撑时不应破坏零件或影响零件性能。常用的去支撑的方法有机械加工,手工去除等。

7.3.6.4 成形态零件表面是否需要处理由供需双方协商确定,常见的表面处理方法有喷砂、打磨、抛光、磨粒流、精磨、机械加工和电化学腐蚀等。

7.4 真空钎焊

热交换器的真空钎焊工艺制造宜根据 NB/T 47045 的规定进行。

7.5 熔化焊接

7.5.1 受压元件相关的焊接(含非受压元件与受压元件的焊接,熔入永久焊缝内的定位焊接等),及其补焊或返修应按 NB/T 47014—2023 进行焊接工艺评定。

7.5.2 熔化焊焊接接头类型可按 NB/T 47006—2019 的规定确定。

7.5.3 熔化焊接工艺评定报告、焊接工艺规程、施焊记录及焊工的识别标记等工艺评定技术档案的保存年限不应少于产品设计使用年限。

7.5.4 焊缝表面不应有裂纹、未融合、气孔、夹钨、弧坑和飞溅物。

7.5.5 金属粉末床熔融芯体与钢材焊接工艺评定,应按附录 C 的规定进行。

8 检验与试验

8.1 基本要求

8.1.1 热交换器的无损检测应按 NB/T 47013.1 的规定,由持有相应类别的无损检测人员资格证的人员担任;其他项目检验人员应经过岗前培训并获得上岗证。

- 8.1.2 检验记录或报告应完整,检验与试验记录或报告的保存时间应不少于热交换器设计使用年限。
- 8.1.3 当用户有特殊要求时,可制造具有相同材料与相同结构的平行试件,按协议对其焊接质量进行无损和有损检测。
- 8.1.4 检验与试验所用仪器、仪表的检定或校准应符合相关法律法规和企业管理制度规定。

8.2 扩散焊用零部件及芯体检验

8.2.1 流道板检验

- 8.2.1.1 流道板焊接表面粗糙度 Ra 不应大于 $0.8\ \mu\text{m}$ 。
- 8.2.1.2 流道板外观、几何尺寸和表面质量应符合设计图纸要求。流道板长度及对角线偏差应为 $\pm 0.5\ \text{mm}$,宽度偏差应为 $\pm 0.2\ \text{mm}$,厚度偏差符合标准要求;长边直线度偏差不应大于长边长度的 1.0% ,且不大于 $1.0\ \text{mm}$;流道板厚度一致性的偏差不应大于 $0.05\ \text{mm}$ 。
- 8.2.1.3 流道板的微结构尺寸检测按批进行,检测项目为流道深度、宽度和流道肋宽,如图 4 所示。同一炉批号材质、同规格、同结构形式和相同加工方式的流道板为一批。
- 8.2.1.4 结构尺寸应采用精度不低于 $0.01\ \text{mm}$ 的量具或仪器按批进行测量。抽检比例符合下列规定。
- a) 流道板抽检比例应不低于流道板总数的 10% 。
 - b) 单张流道板上的流道检测,应在流道长度方向上均匀选择 3 处(组)进行;每处(组)的检测点数量不低于流道板上总通道数的 5% ,且应均匀覆盖整个流道板。
 - c) 如发现结构尺寸偏差超出图纸要求或表 4 要求,应提高流道板抽检比例为不低于 20% 。
- 8.2.1.5 流道板流道尺寸偏差要求应符合图纸要求及表 4 的要求,尺寸偏差超出规定的流道板不应用于芯体的制造。

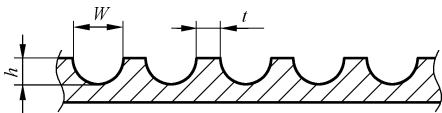


图 4 典型流道板流道检验尺寸

表 4 流道板加工精度要求

序号	检测项目	尺寸偏差允许范围
1	流道深度(h)	$\pm \max(0.08 \times h, 0.05)\ \text{mm}$
2	流道宽度(w)	$\pm \max(0.08 \times w, 0.05)\ \text{mm}$
3	流道肋宽(t)	$0 \sim \max(0.08 \times t, 0.05)\ \text{mm}$

8.2.2 宏观尺寸与变形

- 8.2.2.1 扩散焊后目视检查芯体外观,芯体应颜色均匀、板片无翘曲变形,扩散焊焊缝处无未焊合、开裂等缺陷。
- 8.2.2.2 扩散焊焊前及焊后应按设计文件和工艺文件要求对扩散焊芯体进行尺寸、形位公差检验。
- 8.2.2.3 芯体组装完成后,从芯体上端板面起始,分别沿四边方向对组装芯体焊前高度(H)进行测量,测量点总数不少于 9 处,各边上检测点应均匀排布,测量时应保证各层流道板之间贴合紧密,按 NB/T 47013.7 中透光目视检测法进行检测,不透光为合格。
- 8.2.2.4 芯体扩散焊完成后,从芯体上端板面起始,分别沿四边方向对焊后高度(H')进行测量,测量点



总数不少于 9 处,各边上检测点应均匀排布。

8.2.2.5 根据公式(2)对芯体高度变形百分比(F)进行计算, F 不应大于 5%。

$$F = \frac{\sum_1^N H_i/N - \sum_1^N H'_i/N}{\sum_1^N H'_i/N} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- F —— 芯体高度变形百分比;
- H —— 芯体焊前高度,单位为毫米(mm);
- H' —— 芯体焊后高度,单位为毫米(mm);
- N —— 高度测量点数。

8.2.2.6 测量焊后芯体的上端板平面度,平面度公差应不大于 2.0 mm。

8.2.2.7 相邻上下两板片间的内凹、外凸量不应超过 1.0 mm;芯体上下平面的错位量每 100 mm 高不大于 0.5 mm,且总错位量不大于 2.0 mm。

8.2.3 渗透检测

8.2.3.1 扩散焊芯体或试件的外表面应根据 NB/T 47013.5 进行渗透检测,采用 C 级灵敏度进行检测,Ⅰ级为合格,且无线性缺陷存在。

8.2.3.2 当需要对芯体外缘进行机加工时,渗透检测应在加工后进行。

8.2.3.3 在扩散焊芯体进出口等开放通道区域,及其周围 5 倍流道特征尺寸范围内可免于渗透检测。

8.3 热交换器检验与试验

8.3.1 外观及尺寸

热交换器外形尺寸应符合设计图纸要求。外表面无明显凹坑、缺口,以及肉眼可见的熔化焊缺陷。

8.3.2 射线、超声与渗透检测

8.3.2.1 热交换器制造完成后,应根据设计要求以及为用户约定的要求进行射线、超声与渗透检测。

8.3.2.2 热交换器熔化焊的焊接接头的射线、超声与渗透检测方法应按以下要求进行:

- a) 射线检测按 NB/T 47013.2 进行,检测技术等级不低于 AB,质量等级Ⅰ级为合格;
- b) 超声检测按 NB/T 47013.3 或 NB/T 47013.15 进行,检测技术等级不低于 B,质量等级不低于Ⅰ级为合格;
- c) 渗透检测按 NB/T 47013.5 进行,检测灵敏度等级 C 级,质量等级Ⅰ级为合格。

8.3.2.3 封头体或接管与芯体的焊接接头应进行 100%渗透检测。

8.3.2.4 封头体或接管与芯体的焊接接头应进行 100%射线检测,或进行 100%超声检测(若接头厚度不小于 15 mm 且不大于 150 mm)。若由于结构限制无法进行 100%射线或超声检测,当焊接接头厚度不大于 38 mm 时,应满足 6.4.3 的规定;当焊接接头厚度大于 38 mm 时,不应采用该结构,应进行结构优化。

8.3.2.5 封头体与接管的对接接头应进行 100%渗透检测,及 100%射线或超声检测。

8.3.2.6 封头体与接管的角接接头应进行 100%渗透检测,宜进行 100%射线或超声检测。

8.3.2.7 除另有规定外,总管与分布接管等承压对接接头应进行 100%渗透检测,及 100%射线或超声检测。

8.3.2.8 除另有规定外,总管与分布接管等承压角接接头应进行 100%渗透检测,宜进行 100%射线或超声检测。

8.3.2.9 无损检测报告应完整,保存时间不应少于产品设计使用年限。



8.3.3 耐压试验

8.3.3.1 热交换器制造完成后,应逐台进行耐压试验,耐压试验的压力和要求应在图纸中注明。

8.3.3.2 热交换器耐压试验应按 GB/T 150.4 的规定进行,应使用 2 个精度等级不低于 1.6 级、量程相同并经过校验的压力表。压力表的量程应在设计压力的 1.5 倍~3 倍,宜为试验压力的 2 倍。

8.3.3.3 热交换器冷、热侧应分别进行耐压试验。一侧进行耐压试验时,余侧同时处于无压力状态,按照压差设计的热交换器应符合设计图纸的要求。

8.3.3.4 耐压试验通常采用液压试验。试验介质应洁净且对工件无腐蚀,液压试验宜采用水作为试验介质,水的氯离子含量不应超过 25 mg/L。对不宜进行液压试验的热交换器,可采用气压试验或气液组合试验。

8.3.3.5 耐压试验压力应不小于按公式(3)或公式(4)的计算值,并符合下列规定:

液压试验压力:

$$p_T = 1.25p \times \frac{[\sigma]}{[\sigma]'} \quad \dots\dots\dots (3)$$

气压试验或气液组合试验压力:

$$p_T = 1.1p \times \frac{[\sigma]}{[\sigma]'} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

p_T ——试验压力,单位为兆帕(MPa);

p ——设计压力,单位为兆帕(MPa);

$[\sigma]$ ——热交换器用材料在耐压试验温度下的许用应力,单位为兆帕(MPa);

$[\sigma]'$ ——热交换器用材料在设计温度下的许用应力,单位为兆帕(MPa)。

热交换器铭牌上规定有最大允许工作压力时,式中应以最大允许工作压力代替设计压力 p 。热交换器各元件所用材料不同时,应取各元件材料的 $[\sigma]/[\sigma]'$ 比值最小者。

8.3.3.6 耐压试验时,应分段缓慢升压,升压与降压速率应满足设计文件规定,并包含在出厂资料中。整个过程中,所有密封和焊接部位应无任何泄漏现象。

8.3.3.7 水压试验合格后,应将流道内积水排净,保持流道干燥。

8.3.4 泄漏试验

8.3.4.1 热交换器经耐压试验合格后方可进行泄漏试验。

8.3.4.2 泄漏试验应按设计文件规定的方法和要求逐台进行。泄漏试验可采用气密性试验、氨检漏试验、卤素检漏试验和氨检漏试验等。

8.3.4.3 应使用 2 个精度等级不低于 1.6 级、量程相同并经过校验的压力表。压力表的量程应在设计压力的 1.5 倍~3 倍,宜为试验压力的 2 倍。

8.3.4.4 气密性试验应符合下列要求:

- a) 所用气体应为干燥、洁净的空气、氮气或其他惰性气体;
- b) 气密性试验压力为热交换器的设计压力;
- c) 试验时压力应缓慢上升,达到规定压力后保持足够长的时间,对所有焊接接头和连接部位进行泄漏检查;
- d) 试验过程中,无泄漏为合格,如有泄漏,应在修补后重新进行试验,必要时,热交换器可浸入水中检查。

8.3.4.5 当采用氨检漏时,应按 NB/T 47013.8 的规定对热交换器逐台进行氨质谱检测,应在热交换器的所有压力腔充分干燥合格后进行,宜采用护罩技术法。

8.3.5 干燥度测试

当热交换器设计要求或合同规定时,应进行干燥度测试,测试应按 NB/T 47006—2019 中附录 H 的规定进行。

8.3.6 液压疲劳试验

8.3.6.1 当设计要求或合同规定时,热交换器应按本文件进行液压疲劳试验。

8.3.6.2 试验应在专用的液压疲劳试验设备上进行,介质一般采用水或油。试验设备应有可靠的安全防护措施。

8.3.6.3 应使用 2 个精度等级不低于 1.6 级、量程相同并经过校验的压力表。压力表的量程应在设计压力的 1.5 倍~3 倍,宜为试验压力的 2 倍。

8.3.6.4 液压疲劳试验用扩散焊芯体的板片数应不小于设计规定的最小板片数。

8.3.6.5 热交换器进行液压疲劳试验时,一侧压力循环频率应保持恒定,另一侧宜处于 0.2 MPa~0.3 MPa 的恒定静压水平。

8.3.6.6 试验设备需设置排气装置,充满水或油时应保证热交换器内空气排尽。

8.3.6.7 进行液压疲劳试验后,如发现泄漏,应查找漏点进行分析,并重新进行验证。

8.3.6.8 液压疲劳试验结果应记录,保存年限应不少于产品设计使用年限。

9 出厂验收

9.1 出厂资料



9.1.1 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。

9.1.2 热交换器出厂资料应至少包含以下内容:

- a) 热交换器竣工总图;
- b) 热交换器产品合格证(含产品数据表);
- c) 产品质量证明文件(含主要受压元件材质证明书、材料清单、封头体和锻件等外购件的质量证明文件、质量计划或检验计划、结构尺寸检查报告、焊接记录、无损检测报告、耐压试验报告及泄漏试验报告等);
- d) 产品铭牌的拓印件或者复印件;
- e) 特种设备制造监督检验证书(对需监督检验的热交换器);
- f) 热交换器设计文件(对需监督检验的热交换器,应包含强度计算书或者应力分析报告、按相关规定要求的风险评估报告,以及其他必要的设计文件)。

9.2 产品铭牌

9.2.1 热交换器应有产品铭牌,产品铭牌应固定在明显位置,铭牌应清晰、牢固、耐久,铭牌托架的高度应大于绝热层厚度。

9.2.2 铭牌上内容宜包括:

- a) 产品名称;
- b) 产品编号;
- c) 制造日期;
- d) 产品质量;
- e) 各股流体的公称流道表面积;

- f) 设计压力；
- g) 耐压试验压力；
- h) 最高允许工作压力；
- i) 设计温度；
- j) 工作介质；
- k) 主体材料；
- l) 产品标准；
- m) 制造单位；
- n) 监检标志(对需监督检验的热交换器)；
- o) 制造许可级别(对需监督检验的热交换器)；
- p) 制造许可证编号(对需监督检验的热交换器)；
- q) 设备代码(对需监督检验的热交换器)。

9.2.3 设计文件有要求时,产品应设置进出口标识。

9.3 运输包装与贮存

9.3.1 热交换器外表面应去除油污、脏物,以保持干净。

9.3.2 接头所有外露加工接触面均应加以保护,以防止机械损伤。

9.3.3 包装应采取可靠的防震、防移动措施。多台产品同箱时应有防相互磕碰等措施。

9.3.4 包装箱可用木板或纤维板制造,也可用金属或多层纸箱以及其他材料制成。

9.3.5 包装之前应采取防尘、防潮、防水、防震处理措施。

9.3.6 运输过程中应堆放牢固,避免颠簸、跌落和踩踏。

9.3.7 不应与化学物质及潮湿性材料装在同一车厢、船舱、集装箱内运输。

9.3.8 在运输和中转时应防雨、防雪和防浸湿。

9.3.9 热交换器应贮存在无腐蚀性气体、无漂浮金属屑、通风良好、干燥的环境中。

9.3.10 对于氮封的热交换器,在存放期内各通道的氮封压力不应低于 0.05 MPa,否则应用干燥氮气补充至氮封压力。

9.3.11 对于无法进行氮封或供需双方同意不进行氮封的热交换器,存放期间应采用塑料薄膜包装并放置干燥剂或稀释剂。

10 性能测试

10.1 符合下述情况时,热交换器应通过试验确定流动阻力:

- a) 当采用直流道、Z 型流道以外的流道结构,且该产品流道设计为首次设计时;
- b) 当设计文件有规定时。

10.2 热交换器应用于液体-液体、蒸汽-液体、蒸汽-空气无相变、汽-液冷凝有相变、汽-液沸腾与蒸发有相变、汽-气冷凝有相变的流动与传热性能测试宜参照 GB/T 27698.1~GB/T 27698.3 进行。

10.3 热交换器应用于超临界流体传热的性能测试宜参照附录 D 进行。

附 录 A
(规范性)

以验证性爆破试验确定芯体设计压力

A.1 试验场地及试验准备

- A.1.1 试验场地应设在地坑内或采取对试验人员保护的掩体,并全程监控。
- A.1.2 试验场地无大量灰尘及腐蚀性气氛的大气,地面不产生尘土,设备与地面接触的部位应有效隔离。
- A.1.3 试验场地四周 5 m 内设置警戒线,试验前应清除试验场地内所有与试验无关的物品。
- A.1.4 试验前应编制《试验方案》和《应急预案》,并经审核批准后方可实施。
- A.1.5 在试验场地进出口等明显位置张贴试验告知书,注明试验方法、时间、地点、警戒范围以及可能造成的危害等。
- A.1.6 在进行爆破试验前应认真做好试验人员的安全工作。

A.2 试验设备和仪表

- A.2.1 试验使用的测量仪器、仪表应经计量部门检定合格并在有效期内。
- A.2.2 试压泵选用应满足测量试验预测爆破压力的要求。
- A.2.3 压力表精度为 1.6 级,表盘刻度极限值应为试验压力的 1.5 倍~3 倍,宜为试验压力的 2 倍,表盘直径不应小于 100 mm。压力表至少 2 只,其中 1 只应带有记录功能。

A.3 试验试件

- A.3.1 扩散焊试件的流道板尺寸应不小于 200 mm×200 mm,应至少包含 30 层流道板。
- A.3.2 粉末床熔融试件尺寸应不小于 200 mm×200 mm×200 mm。
- A.3.3 试件材质、所用制造工艺应与产品一致。
- A.3.4 试件应焊接或打印试验所需的封头体和接管。

A.4 爆破试验要求

- A.4.1 试验规定用洁净水、液压油等作试压介质,试验介质和温度应符合 GB/T 150.4 的规定。
- A.4.2 试验容器在进行验证性爆破试验前,耐压试验压力不应超过预期设计压力的 1.25 倍。
- A.4.3 验证性爆破试验的加压应缓慢进行,首先逐渐加压至预期设计压力的 0.5 倍,保压观察后以 1/10 预期设计压力的增量逐步加压至预期设计压力,进行不少于 10 min 的保压观察后继续以 1/10 预期设计压力的增量加压至爆破或设定的停止点。
- A.4.4 验证性爆破试验可选择适当的压力作为停止点,只要采用该停止点压力计算得到的设计压力满足预期的设计压力要求即可。

A.5 设计压力的确定

A.5.1 试验温度下最高允许工作压力

试验温度下最高允许工作压力 P' 按公式(A.1)计算:

$$P' = \frac{P_b \times R_m \times \phi}{4 R_{mave}} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

P' —— 试验温度下的最高允许工作压力，单位为兆帕(MPa)；

P_b —— 爆破试验压力或试验停止点压力，单位为兆帕(MPa)；

R_m —— 材料标准抗拉强度下限值，单位为兆帕(MPa)；

ϕ —— 焊接接头系数，扩散焊芯体焊接接头系数取 0.7，粉末床熔融芯体系数取 1.0；

R_{mave} —— 室温下 3 个试样的平均抗拉强度，且不低于母材标准值，单位为兆帕(MPa)。

A.5.2 设计温度下的最高允许工作压力

设计温度下的最高允许工作压力 P_{max} 按公式(A.2)进行计算：

$$P_{max} = P' \frac{[\sigma]^t}{[\sigma]^T} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

P_{max} —— 设计温度下的最高允许工作压力，单位为兆帕(MPa)；

P' —— 试验温度下的最高允许工作压力，单位为兆帕(MPa)；

$[\sigma]^t$ —— 容器元件材料在设计温度下的许用应力，单位为兆帕(MPa)；

$[\sigma]^T$ —— 容器元件材料在试验温度下的许用应力，单位为兆帕(MPa)。

A.5.3 确定依据

采用 A.5.1 与 A.5.2 得到的最高允许工作压力作为确定热交换器设计压力的依据。

附 录 B

(规范性)

扩散焊工艺及技能评定

B.1 通用要求

B.1.1 制造单位应按照设计文件规定和制造工艺拟定预焊接工艺规程,施焊试件和制取试样,检验试件和试样,检测焊接接头。对预焊接工艺进行评价,并形成焊接工艺评定报告。

B.1.2 焊接工艺评定应在该制造单位进行。

B.1.3 焊接工艺及技能评定所用设备、仪表应处于正常工作状态,仪器、仪表应在检定的有效期内。

B.1.4 焊接工艺评定合格,则焊接该试件的焊机操作工也取得了扩散焊接操作工资格。

B.1.5 技能评定试验应按评定合格的焊接工艺规程进行。

B.1.6 技能评定合格后,应形成技能评定报告。

B.2 焊接工艺评定因素及规则

B.2.1 母材

B.2.1.1 牌号改变时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.1.2 表面制备方法 with 状态,或表面粗糙度值提高时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.2 填充金属(若有)

B.2.2.1 增加或取消填充金属时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.2.2 填充金属成分改变时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.3 气体

扩散焊炉内气氛改变时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.4 技术措施

B.2.4.1 装炉前,改变母材表面制备方法时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.4.2 减小试件压缩百分比时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.4.3 改变设定的扩散焊接压力范围时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.4.4 改变设定的扩散焊接温度范围时,应重新进行焊接工艺评定。

B.2.4.5 减少加压时间时,应重新进行焊接工艺评定。

B.3 焊接工艺试件要求

B.3.1 试件采用光滑平整的板片叠加进行扩散焊接,板片的长度与宽度均不小于 200 mm。

B.3.2 试件应包含至少 50 层扩散焊接界面。

B.3.3 母材、填充金属和试件的焊接应符合拟定的预焊接工艺规程要求。

B.4 工艺评定检验要求和结果评价

B.4.1 试件检验项目与取样数量要求

B.4.1.1 试件检验项目包括以下各项:

- a) 外观检测；
- b) 拉伸试验；
- c) 微观金相检验；
- d) 附加试验。

B.4.1.2 检验项目和取样数量应符合表 B.1 的规定。

表 B.1 检验项目和取样数量

拉伸试验 ^a		微观金相检验 ^c	附加试验 ^d			
横向	纵向		弯曲试验 ^b	冲击试验 ^b	晶粒度检测	腐蚀试验
3	3	3	4	3	3	2

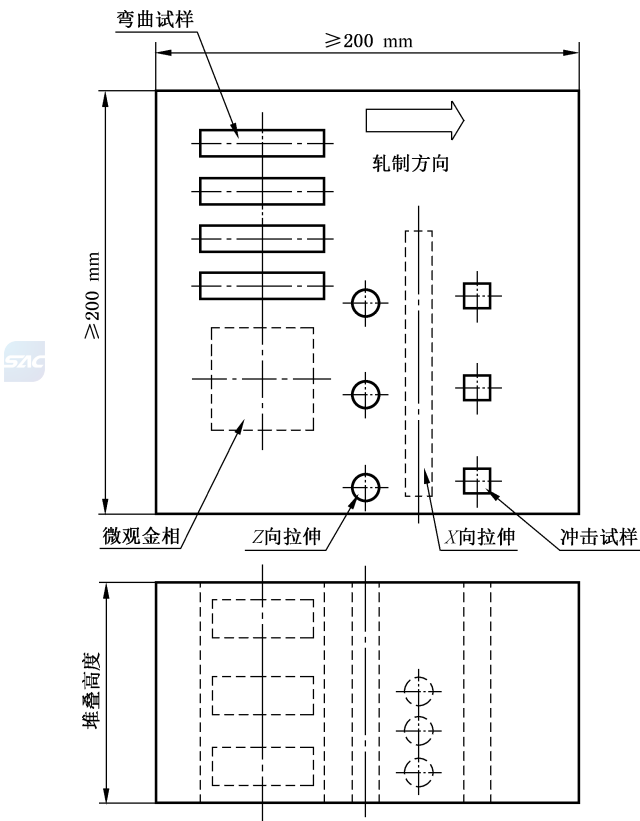
^a 横向——垂直于板片焊接界面；纵向——平行于板片焊接界面。

^b 垂直于板片焊接界面。

^c 分别从试件顶部、中心、底部各取 1 件。

^d 由供需双方依据产品的使用条件协议确定的试验项目。

B.4.1.3 试件取样采用冷加工方法，当采用热加工方法取样时，则应去除热影响区。取样位置见图 B.1。



- 注 1：Z 向指垂直焊接界面的方向。
- 注 2：X 向和 Y 向指平行焊接界面的方向。

图 B.1 取样位置

B.4.2 外观检测

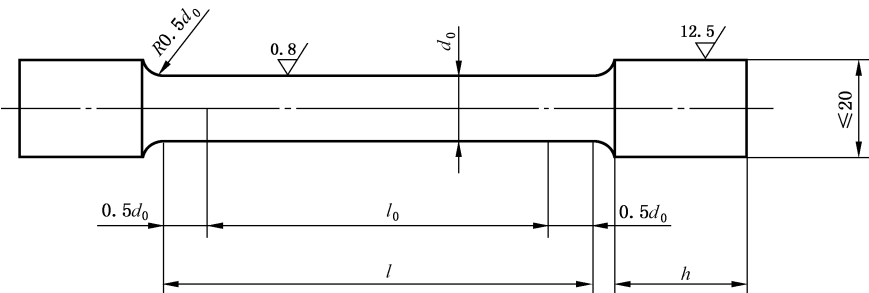
试件外观检测应使用目视检测法进行,宜参照 NB/T 47013.8 进行。试件不应有裂纹、分层。

B.4.3 拉伸试验

B.4.3.1 试样加工要求

按图 B.2 加工圆棒状拉伸试样,试样中至少包含一个焊接界面。

单位为毫米



标引符号说明:

h ——按试验机夹具尺寸定;

l_0 ——标距长度, $l_0 = 5d_0$ 。

图 B.2 圆棒状拉伸试样

B.4.3.2 试验方法

拉伸试验按 GB/T 228.1 的规定测定抗拉强度、断后伸长率。

B.4.3.3 合格指标

拉伸试验的合格指标如下:

- a) 无填充金属时,不低于母材标准规定的抗拉强度最低值;
- b) 有填充金属时,不低于母材和填充金属的抗拉强度最低值中的较小值。

B.4.4 弯曲试验

B.4.4.1 不锈钢试样

B.4.4.1.1 试样加工应满足如下要求:

- a) 试样受拉伸表面不应有划痕和损伤;
- b) 试样宽度为 38 mm;
- c) 试样厚度 3 mm 或 10 mm。

B.4.4.1.2 试验应按如下要求进行:

- a) 弯曲试验按 GB/T 232 或 GB/T 2653 的规定进行;
- b) 弯心直径为 4 倍试样厚度;
- c) 试样的焊缝中心应对准弯心轴线;
- d) 弯曲角度应以在试样承受载荷时测量为准。

B.4.4.1.3 合格指标为弯曲试样弯曲到 180°后,试样弯曲外表面无裂纹。

B.4.4.2 钛及钛合金试样

钛及钛合金试样的弯曲试验应满足 GB/T 3621 的要求,或满足 GB/T 26723 的要求。

B.4.5 冲击试验

B.4.5.1 试样制取应符合下列规定:

- a) 试样从叠加高度方向取样,即试样中轴线垂直于板片焊接界面;
- b) 缺口轴线平行于板片焊接界面。

B.4.5.2 试样形式、尺寸和试验方法应符合 GB/T 229 的规定。

B.4.5.3 冲击试验由供需双方协商确定。

B.4.6 微观金相检验

B.4.6.1 试样加工应满足下列要求:

- a) 试样至少包含一个扩散焊接面;
- b) 试样宽度不小于 25 mm;
- c) 试样在抛光后再用适当侵蚀剂侵蚀以获得清晰的界面。

B.4.6.2 试样的制取、研磨、侵蚀及检验应符合 GB/T 13298 的要求,采用 100 倍~500 倍的光学显微镜进行检测。

B.4.6.3 在扩散焊接界面或其附近没有裂纹、未熔合或气孔等缺陷为合格。

B.4.7 晶粒度检测

B.4.7.1 需要时,可对扩散焊接层(界面)进行晶粒度检测。

B.4.7.2 晶粒度检测可使用微观金相试样,也可按照 GB/T 6394 的要求制备试样。

B.4.7.3 晶粒度测定方法应符合 GB/T 6394 的规定,晶粒度应满足设计文件的要求。

B.4.8 腐蚀试验

需要时,可对扩散焊接界面进行晶间腐蚀、应力腐蚀、均匀腐蚀等试验来验证焊接界面的抗腐蚀性能,腐蚀试样的制备及试验方法可参照 GB/T 4334、GB/T 17897、GB/T 4157、JB/T 7901 和 YB/T 5362。

B.5 扩散焊操作工的技能评定

B.5.1 操作工通过了本文件规定的预生产焊接试验或生产焊接试验考核,则认为其获得了评定中所用焊接方法与同类型焊接设备的操作资格。

B.5.2 操作工完成产品样件焊接,且样件满足 B.4 规定的拉伸试验与微观金相检验合格要求,则认为其获得了评定中所用焊接方法与同类型焊接设备的操作资格。

B.6 规程及评定报告

扩散焊预焊接工艺规程可参考表 B.2 编写,扩散焊工艺评定报告可参考表 B.3 编写,技能评定报告可参考表 B.4 编写。

表 B.2 扩散焊预焊接工艺规程

单位名称：											
预焊接工艺规程编号：						日期：					
焊接方法：						机械化程度：					
接头简图(接头形式与尺寸、焊层)											
母材：											
牌号或等级：											
表面粗糙度：											
单板厚度：											
单板尺寸：						单板接触面积：					
堆叠数量：						堆叠高度：					
其他：											
填充金属：											
标准号：						公称成分：					
其他：											
气体：											
炉内气氛：						气体成分：			(若为真空则填充)		
真空度：						气体流量：			(若为真空则填充)		
其他：											
焊接技术：											
母材表面清理方法：											
焊接压力：						焊接温度：					
焊接时间：						压缩百分比：					
其他：											
检验要求及执行标准：											
编制		日期		审核		日期		批准		日期	

表 B.3 扩散焊工艺评定报告

单位名称：						
焊接工艺评定编号：				预焊接工艺规程编号：		
焊接方法：				机械化程度：		
接头简图(接头形式与尺寸、焊层)						
母材：						
牌号或等级：						
表面粗糙度：						
单板厚度：						
单板尺寸：				单板接触面积：		
堆叠数量：				堆叠高度：		
其他：						
填充金属：						
标准号：				公称成分：		
其他：						
气体：						
炉内气氛：				气体成分：		(若为真空则填充)
真空度：				气体流量：		(若为真空则填充)
其他：						
焊接技术：						
母材表面清理方法：						
焊接压力：				焊接温度：		
焊接时间：				压缩百分比：		
其他：						
拉伸试验：				报告编号：		
试样编号	取样位置	面积/mm ²	断裂载荷/kg	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断裂部位
弯曲试验：				报告编号：		

表 B.3 扩散焊工艺评定报告（续）

试样编号		试样厚度/mm		弯心直径/mm		弯曲角度/(°)		试验结果			
冲击试验：						报告编号：					
试样编号		试样尺寸/mm		试验温度/℃		冲击吸收功/J					
金相检验：						报告编号：					
试样编号		取样位置		检验结果							
晶粒度检测：						报告编号：					
试样编号		晶粒度									
晶间腐蚀：						报告编号：					
试样编号		试验方法				试验结果					
附件说明：											
结论：											
评定结果：											
焊工姓名				焊工代号				施焊日期			
编制		日期		审核		日期		批准		日期	

表 B.4 扩散焊技能评定报告

姓名						
身份证号						
焊工钢印号						
焊接工艺规程编号						
试件编号						
技能评定项目代号						
母材牌号或等级：	母材厚度：			表面粗糙度：		
填充金属标准号：	填充金属公称成分：			焊接日期：		
焊接变素	实际数值			评定范围		
焊接操作类型						
焊接方法						
拉伸试验：			报告编号：			
试样编号	取样位置	面积/mm ²	断裂载荷/kg	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断裂部位
金相检验：			报告编号：			
试样编号	取样位置		检验结果			
结论：						
评定结果：						
编制		审核			批准	

附 录 C
(规范性)

金属粉末床熔融元件与钢材焊接工艺评定

C.1 通则

金属材料与金属粉末床熔融成形元件通过钨极气体保护焊或激光焊进行连接组装承压设备时,应按本附录完成相关工艺评定。

C.2 焊接工艺预规程(pWPS)

钨极气体保护焊工艺预规程宜参照 NB/T 47015 编制,激光焊工艺预规程宜参照 GB/T 19867.4 编制,工艺参数应在规定允许范围。

C.3 焊接工艺评定因素

C.3.1 焊接方法及分类

焊接方法的类别为钨极气体保护焊、激光焊。

C.3.2 金属材料及分类

本附录规定的焊接工艺评定金属材料按表 1、表 2 所列牌号类型进行分组。

C.3.3 填充金属

填充金属包括焊丝、填充丝、金属粉、熔嘴等。

焊接用保护气体应符合 GB/T 39255 的规定。

C.3.4 焊后热处理

各类金属材料与激光金属粉末床熔融成型元件通过钨极气体保护焊或激光焊后不进行焊后热处理。如产品标准、设计图样有要求时,应制备焊后热处理试件,当热处理工艺发生除保温时间以外的变化时,应新进行焊接工艺评定。

C.3.5 不同焊接方法的焊接工艺评定因素及分类

C.3.5.1 专用焊接工艺评定因素分为重要因素、补加因素和次要因素。

- a) 重要因素是指影响焊接接头拉伸性能和弯曲性能的焊接工艺评定因素。
- b) 补加因素是指影响焊接接头冲击韧性的焊接工艺评定因素。
- c) 次要因素是指对焊接接头力学性能和弯曲性能无明显影响的焊接工艺评定因素。

C.3.5.2 各焊接方法的专用焊接工艺评定因素及分类按表 C.1 的规定执行。

表 C.1 焊接工艺评定因素

焊接方法	因素分类	焊接工艺评定因素
钨极气体保护焊	重要因素	1) 增加或取消填充金属
		2) 实芯焊丝、药芯焊丝、金属粉之间变更
		3) 预热温度比评定合格值降低 50 ℃
		4) 改变单一保护气体种类;改变混合保护配比超出 GB/T 39255 公称值制备公差;从单一保护气体改用混合保护气体,或反之;增加或取消保护气体
		5) 当金属材料为钛及钛合金、镍及镍合金时,取消焊缝背面保护气体,或背面保护气体从惰性气体改变为混合气体,或背面保护气体流量比评定值减少 10%或更多
		6) 当金属材料为钛及钛合金时,取消焊缝尾部保护气体,或尾部保护气体从惰性气体改变为混合气体,或尾部保护气体流量比评定值减少 10%或更多
		7) 对于纯钛、钛合金,由密闭室内焊接,改变为密闭室外焊接
	补加因素	1) 从评定合格的焊接位置改变为向上立焊
		2) 道间最高温度比评定记录值高 50 ℃ 以上
		3) 改变电流种类或极性
		4) 增加热输入或单位长度焊道的熔敷金属体积超过评定合格值
		5) 由每面多道焊改为每面单道焊
		6) 机动焊、自动焊时,单丝焊改为多丝焊,或反之
	次要因素	1) 改变坡口形式
		2) 增大或减小坡口根部间隙
		3) 增加或取消非金属或非熔化的焊接熔池金属成形块(或焊缝背面成形块)
		4) 增加衬垫,或改变衬垫的公称成分
		5) 改变焊丝或填充丝直径
		6) 增加或取消可溶性嵌条
		7) 与评定试件相比,改变焊接位置
		8) 立缝反面清根露出正面合格的焊缝金属时,根部焊道向上或向下
		9) 保护气体流量改变超出规定范围
		10) 除重要因素中 5)外,增加或取消背面保护气体,改变背面保护气体规定的流量和组成
		11) 改变焊接电流范围
		12) 在直流电源上叠加或取消脉冲电流
		13) 钨极的种类或直径
		14) 不摆动焊或摆动焊
		15) 改变焊前清理和层间清理方法
		16) 改变清根方法
		17) 机动焊、自动焊时,改变电极(焊丝、钨极)间距、摆动幅度、频率和两端停留时间
		18) 从手工焊改为机动焊、自动焊,或反之
		19) 有无锤击焊缝
		20) 嘴孔、喷嘴尺寸

表 C.1 焊接工艺评定因素（续）

焊接方法	因素分类	焊接工艺评定因素
激光焊	重要因素	1) 改变坡口形式
		2) 增加或取消衬垫
		3) 增大坡口根部间隙
		4) 增加或取消锁底焊缝
		5) 改变焊丝或填充丝直径
		6) 增加或取消填充金属
		7) 预热温度比已评定合格值降低 50 ℃
		8) 改变气体保护方式(如真空、惰性气体等)
		9) 电流改变超过评定值±5%；电压改变超过评定值±2%；焊接速度改变超过评定值±2%；焦点电流改变超过评定值±5%
		10) 激光发射器至工件距离改变超过评定值±5%；振荡幅度或宽度改变超过评定值±20%；脉冲频率相对评定值发生改变
		11) 机动焊、自动焊时,改变电极(焊丝、钨极)间距、摆动幅度、频率和两端停留时间
		12) 对于纯钛、钛合金,由密闭室内焊接,改变为密闭室外焊接
		13) 改变激光发射器轴线对工件的角度；改变焊接设备的类型；真空焊接环境压力增加超过评定值
		14) 增加饰面焊道；单面焊改为双面焊,或反之
	次要因素	1) 减小坡口根部间隙
		2) 改变焊前清理和层间清理方法

C.4 试件制备

C.4.1 通则

按照 C.6.2 规定,评定中的钢材可用一个标准试件代替涵盖相同类别金属材料、相同焊接方法的焊接试件,对于激光金属粉末熔融成型材料,应逐牌号制备焊接试件。

C.4.2 试件的形状和尺寸

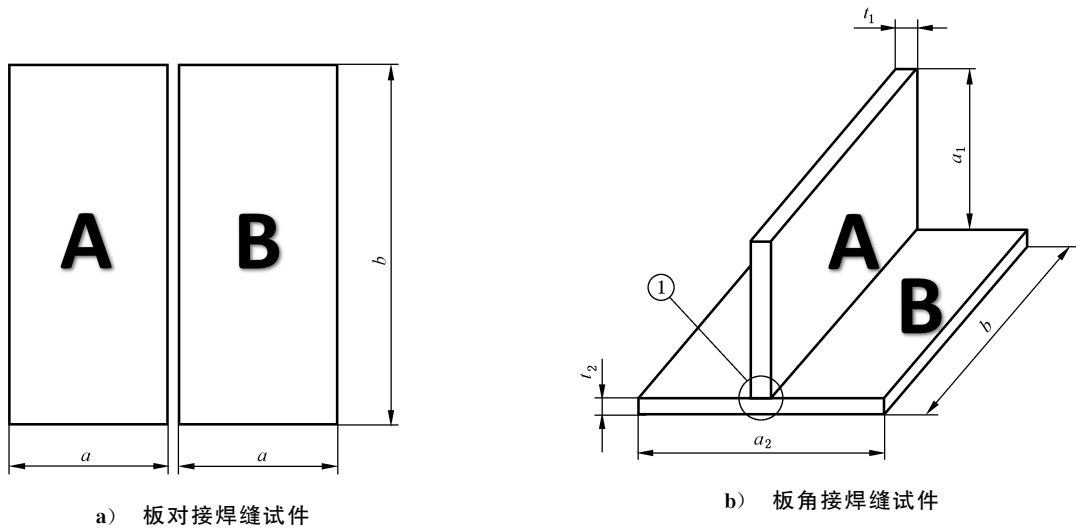
C.4.2.1 对接焊缝试件厚度与焊件厚度要求按照 C.6.3 的规定。

C.4.2.2 试件的形状及最小尺寸应符合图 C.1～图 C.4 的要求,且试件的长度应满足表 C.2 中规定的取样数量需求。

C.4.2.3 如需进行附加试验时,允许制备附加试件或尺寸更长的试件。产品标准或规范要求时,板材试件应做轧制方向标记。

C.4.3 板与板焊缝试件

板与板连接焊缝试件应按图 C.1 制备。



标引符号说明:

A —— 试件 1;

B —— 试件 2;

a —— 试件宽度;

b —— 试件长度;

t —— 试件厚度。

注 1: $a = 3t$ 且不小于 150 mm; $b = 6t$ 且不小于 300 mm; 厚度不同时, t 为较小值。

注 2: A 为钢板, B 为激光金属粉末熔融成形元件; 或 A、B 均为激光金属粉末熔融成形元件。

注 3: ① 坡口及组对符合焊接工艺预规程规定。

注 4: $a_1 \geq 6t_1$ 且 ≥ 50 mm; $a_2 \geq 6t_2$ 且 ≥ 100 mm; $b \geq 200$ mm; t_1 和 t_2 为厚度。

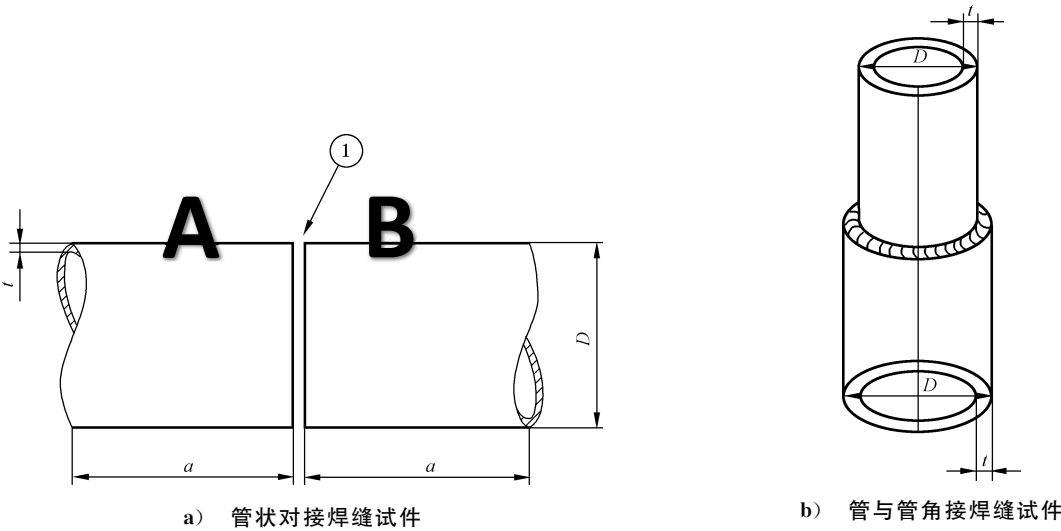
图 C.1 板与板焊缝试件

C.4.4 管与管焊缝试件

C.4.4.1 管与管连接焊缝试件应按图 C.2 制备。当管直径较小无法满足表 C.2 的取样规定时, 应制备多件试件以满足取样要求。管与管角焊缝试件应将激光成形管状元件作为内管。

C.4.4.2 直径 D 大于 150 mm 且大于 $20t$ 的管, 其焊接工艺评定可在板对接焊缝试件上进行。试验取样应包含焊缝的搭接及功率衰减区。

C.4.4.3 管状对接焊缝试件见图 C.2a), 管与管角接焊缝试件见图 C.2b)。



标引符号说明：

A —— 试件 1；

B —— 试件 2；

a —— 试件宽度；

b —— 试件长度；

t —— 试件厚度；

D —— 管外径。

注 1： $a=3t$ 且不小于 150 mm；厚度不同时， t 为较小值。

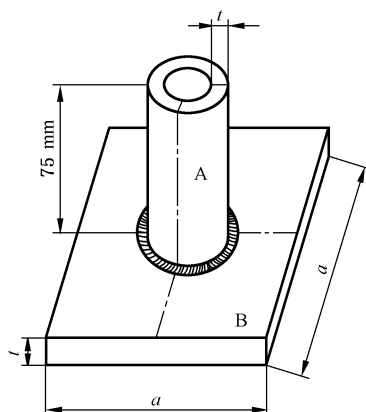
注 2： A 为激光金属粉末熔融成形管状元件；B 为钢管；或 A、B 均为激光金属粉末熔融成形元件。

注 3： ①坡口及组对符合焊接工艺预规程规定。

图 C.2 管与管焊缝试件

C.4.5 管与板焊缝试件

管与板角接焊缝试件应按图 C.3 制备。当管直径较小无法满足表 C.2 的取样规定时，应制备多件试件以满足取样要求。



标引符号说明：

A —— 试件 1；

B —— 试件 2；

a —— 试件宽度；

b —— 试件长度；

t —— 试件厚度。

注 1： a 为板的最小尺寸； $a \geq D + 6t$ 且不小于 $D + 150$ mm， t 为板厚且 $t \geq t_1$ 。

注 2： D 为管外径； t_1 为管壁厚， $t_1 \geq 1.5$ mm。

注 3： L 为管长度； $L \geq 75$ mm。

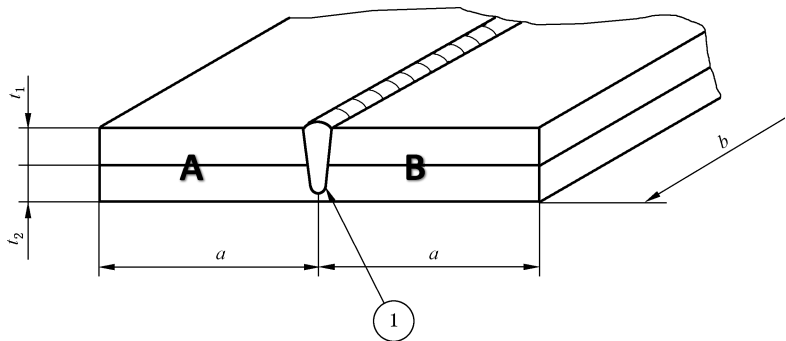
注 4： A 为激光金属粉末熔融成形管状元件；B 为钢板；或 A、B 均为激光金属粉末熔融成形元件。

注 5： ①坡口及组对符合焊接工艺预规程规定。

图 C.3 管与板角焊缝试件

C.4.6 其他试件

板与板搭接穿透焊缝试件如图 C.4 所示。焊缝可以是全焊透焊缝或不完全焊透的焊缝。



- 标引符号说明：
- A——试件 1；
 - B——试件 2；
 - a ——试件宽度；
 - b ——试件长度；
 - t ——试件厚度。
- 注 1： $a \geq 4(t_1 + t_2)$ ，且不小于 100 mm， t_1 和 t_2 为板厚度。
- 注 2： $b \geq 300$ mm。
- 注 3：该接头限由两层板组成。
- 注 4：①坡口及组对符合焊接工艺预规程规定。
- 注 5：A 为激光金属粉末熔融成形管状元件；B 为钢板；或 A、B 均为激光金属粉末熔融成形元件。

图 C.4 板与板搭接穿透焊缝试件

C.4.7 试件的焊接

- C.4.7.1 试件的焊接应按照在实际焊接生产环境相近的条件下进行。
- C.4.7.2 定位焊缝最终熔入焊接接头时，试件还应包含定位焊缝。
- C.4.7.3 试件的焊接应在监督检验机构指派的具有相应资格检验人员的见证下进行。

C.5 试验及检验检测

C.5.1 试验及检验检测范围

钨极气体保护焊的焊接工艺评定试验与检验检测项目按 NB/T 47014—2023 的规定执行。激光焊的焊接工艺评价试样试验和检验包括无损检测和破坏性试验，具体要求见表 C.2。

表 C.2 激光焊焊缝的试验及检验

试件	试验/检验检测种类	试验/检验检测范围	备注
对接焊缝 图 C.1a) 和图 C.2a)	目视检测	100 %	—
	射线检测	100 %	a
	超声检测	100 %	a
	表面裂纹检测	100 %	b
	金相检验	至少 1 个截面	c
	硬度试验	有要求时	d

表 C.2 激光焊焊缝的试验及检验（续）

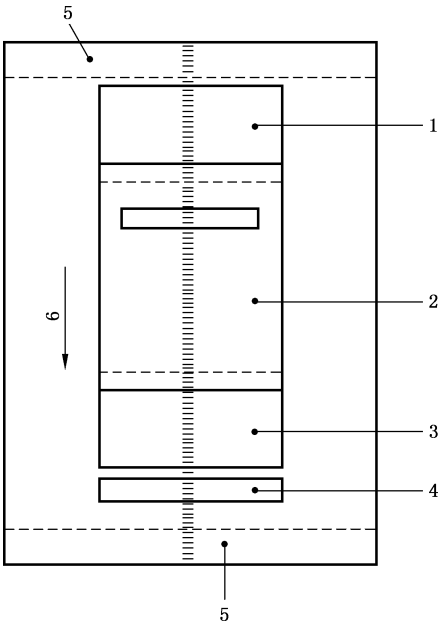
试件	试验/检验检测种类	试验/检验检测范围	备注
对接焊缝 图 C.1a)和图 C.2a)	横向弯曲	有要求时： 2 个背弯和 2 个面弯	e
	纵向弯曲	有要求时： 1 个背弯和 1 个面弯	f
	横向拉伸	2 个试样	g
	冲击试验	1 组试样	h
角接焊缝 图 C.1b)、图 C.2b) 和图 C.3	目视检测	100 %	—
	表面裂纹检测	100 %	b
	超声检测	100 %	i
	硬度试验	有要求时	—
	金相检验	2 个截面	e
	其他试验	有要求时	j
搭接焊缝 图 C.4	目视检测	100 %	—
	金相检验	2 个截面	e
	其他试验(如：硬度、 密封、剪切)	有要求时	j
<p>a 射线检测(或超声波检测)均可。</p> <p>b 渗透检测或磁粉检测。对于非磁性材料,采用渗透检测。</p> <p>c 板对接焊缝要求 1 个截面;管对接焊缝(见图 C.6)要求 3 个截面;每个焊接位置按 GB/T 16672 中定义各选一个截面进行宏观或微观金相检验。</p> <p>d 是否做硬度试验,按母材和焊材条件或设计文件规定。</p> <p>e 当厚度大于 20 mm 时,可用 4 个侧弯代替 2 个面弯和 2 个背弯。</p> <p>f 异质接头性能不均匀时可用纵向弯曲代替横向弯曲试验。</p> <p>g 不适用于图 2b)的管板对接焊缝。</p> <p>h 力学性能试验取样位置要求按 C.6.2 的要求,从焊接接头处截取一组(或多组)试样。冲击试验的温度按母材类别或钢材标准的规定选取。在使用填充材料的情况下,应从焊缝的表层和根部区域取附加的冲击试样。</p> <p>i 超声衰减或材料厚度的原因而使超声波检测无法实施的情况除外。</p> <p>j 当通过其他方法无法评定 WPS 时,应进行附加试验,以验证构件的力学性能。</p>			

C.5.2 试样的取样要求

C.5.2.1 试样的截取位置应按图 C.5～图 C.8 要求。

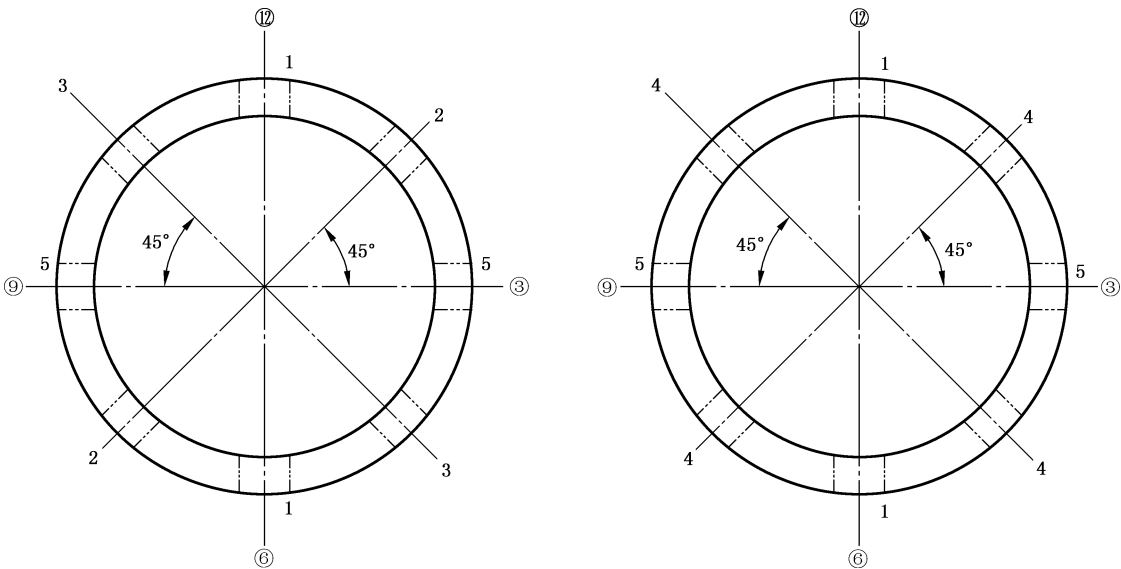
C.5.2.2 搭接焊缝试件,应从搭接部位和激光束流衰减的焊缝区内各截取 2 个金相试样。如束流衰减前搭接部位无法截取 2 个试样时,应在束流衰减焊缝区截取一个试样,如无法截取一个试样,则应在该部位截取其他试验检验检测项目的试样。

C.5.2.3 试样应在无损检验检测的合格部位内截取。允许避开未超标的缺陷部位截取试样。



- 标引序号说明：
- 1——金相、面弯和背弯试样；
 - 2——硬度和附加试样；
 - 3——拉伸、面弯和背弯试样；
 - 4——金相、冲击试样；
 - 5——留白不取样区； t 不小于 25 mm 时，留白 25 mm； t 大于 25 mm 时，留白不小于 50 mm；
 - 6——焊接方向。

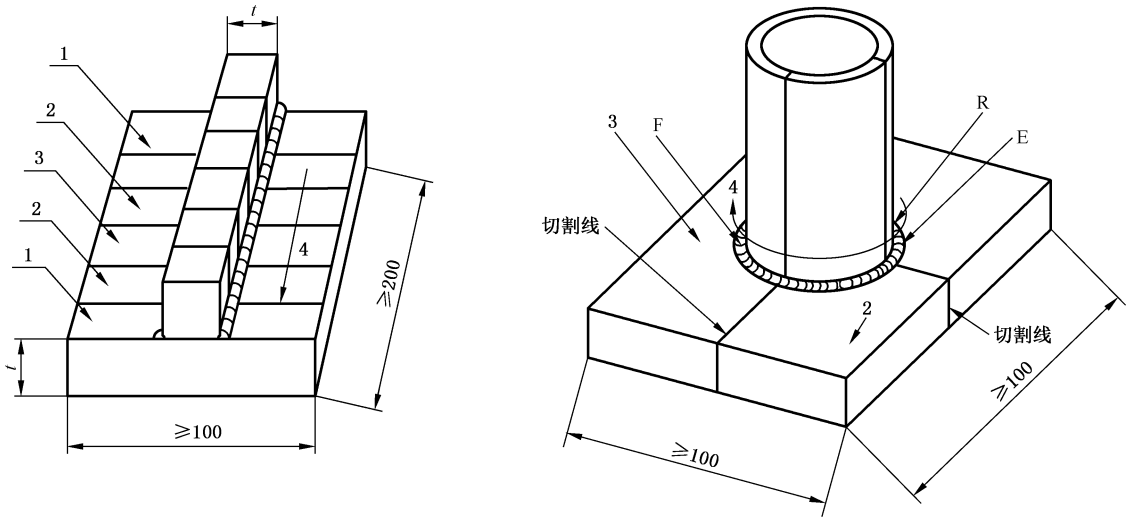
图 C.5 板对接焊缝试样的取样位置



- 标引序号说明：
- 1——金相、拉伸试验；
 - 2——面弯试样；
 - 3——背弯试样；
 - 4——侧弯试样；
 - 5——冲击试样；
 - ③⑥⑨⑫——钟点记号，表示水平固定位置焊接时的定位标记。

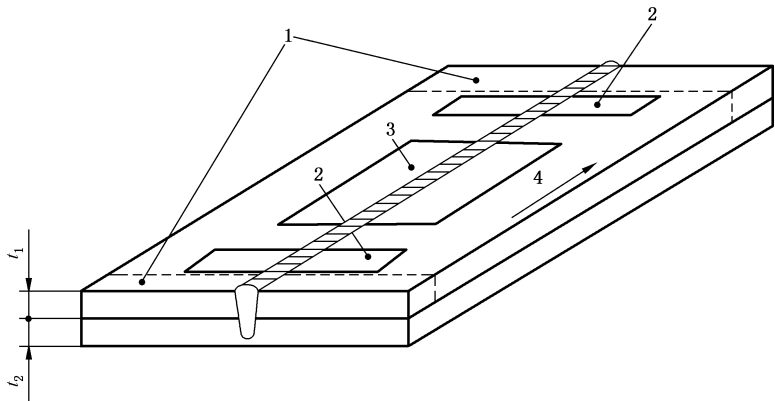
图 C.6 管对接焊缝试样的取样位置

单位为毫米



- 标引说明：
- 1——留白不取样区： t 不小于 25 mm 时，留白 25 mm； t 大于 25 mm 时，留白不小于 50 mm；
 - 2——金相试样、硬度试样；
 - 3——其他试样；
 - 4——焊接方向；
 - R——开始搭接的部位；
 - E——束流功率开始衰减的部位；
 - F——束流功率结束衰减的部位。

图 C.7 角接焊缝试样的取样位置



- 标引序号说明：
- 1——留白不取样区： t 不小于 25 mm 时，留白 25 mm； t 大于 25 mm 时，留白不小于 50 mm；
 - 2——金相试样/硬度试样；
 - 3——其他试样；
 - 4——焊接方向。

图 C.8 搭接穿透焊缝试样的取样位置

C.5.3 无损检测

- C.5.3.1 当试件有焊后热处理时,应在完成热处理后进行无损检测,最后截取试样进行力学性能试验。
- C.5.3.2 无损检测方法的选择应满足 GB/T 150.4 的要求。试件焊缝应至少选择表 C.3 中的射线或者超声检测中的一种方法和一种表面检测方法进行检测,且检测结果应满足表 C.3 的质量等级要求。
- C.5.3.3 试件应满足表 C.3 规定的合格指标要求。

表 C.3 无损检测技术与合格指标

检测方法	检测标准	检测技术等级 (不低于)	合格指标
射线胶片照相检测(RT)	NB/T 47013.2	AB	Ⅱ
不可记录的脉冲反射法超声检测(UT)和 脉冲反射法超声成像检测(UIT)	NB/T 47013.3	B	I
磁粉检测(MT)	NB/T 47013.4	—	I
渗透检测(PT)	NB/T 47013.5	—	I
目视检测(VT)	NB/T 47013.7	—	无异常
衍射时差法超声检测(TOFD)	NB/T 47013.10	B	Ⅱ
射线数字成像检测(DR)	NB/T 47013.11	AB	Ⅱ
射线计算机辅助成像检测(CR)	NB/T 47013.14	AB	Ⅱ
相控阵超声检测(PAUT)	NB/T 47013.15	B	I

C.5.4 力学性能试验

C.5.4.1 拉伸试验

- C.5.4.1.1 拉伸试验宜在室温下进行,对接接头拉伸的试样及试验方法应符合 GB/T 228.1 的要求。
- C.5.4.1.2 对于外径大于 50 mm 的管,焊缝正面和背面的余高应去除,使得试样的厚度与管母材壁厚相同。对于外径小于或等于 50 mm 的管,当采用小直径管的整个截面时,管内表面多余的焊缝金属可以保留。
- C.5.4.1.3 试样的拉伸强度应不小于钢材产品标准规定的最小值。

C.5.4.2 弯曲试验

- C.5.4.2.1 对接接头的弯曲试样及试验应符合 GB/T 2653 和 NB/T 47016—2023 中 7.2 的要求。异种(或异质)材料的板对接接头,可用 2 个纵弯试样(一个面弯和一个背弯)来代替横向弯曲试样。无其他规定时,弯曲角度应为 180°。弯心直径按照相关技术条件选取。
- C.5.4.2.2 试样弯曲到规定的角度后,其拉伸面上的焊缝、熔合区及热影响区,沿任何方向不应有单条长度超过 3 mm 的开口缺陷,试样的棱角开口缺陷不计,但由于未熔合、夹渣或其他内部缺欠引起的棱角开口缺陷长度应计入。安全技术规范、产品标准或设计文件另有规定时,执行其规定。

C.5.4.3 冲击试验

- C.5.4.3.1 冲击试验应在室温或相应钢材标准规定的温度下进行,对接接头拉伸的试样及试验方法应符合 GB/T 229 的要求。

C.5.4.3.2 试样形式、尺寸和试验方法应符合 GB/T 229 的规定。当试样尺寸无法制备 10 mm×10 mm×55 mm 时,可制备 7.5 mm×10 mm×55 mm 或 5 mm×10 mm×55 mm 的冲击试样。

C.5.4.3.3 试样冲击吸收能量合格指标应满足 NB/T 47016—2023 中 7.3 的要求。当安全技术规范、产品标准或设计文件另有规定时,执行其规定。

C.5.4.4 硬度试验

C.5.4.4.1 试样焊缝金属区、热影响区、母材应按照 GB/T 4340.1 的规定进行维氏硬度试验。

C.5.4.4.2 试验载荷和测得的硬度值应满足被焊工件的设计要求,并符合产品标准规定。

C.5.4.5 破坏性试验

C.5.4.5.1 试样焊缝应按照 GB/T 26955 进行宏观和微观检验,用肉眼或低倍放大镜(放大倍数小于 50 倍)观察检验。

C.5.4.5.2 宏观检验可能包括未受到影响的母材部分。微观金相检验应按照 GB/T 26955 进行。

C.5.4.5.3 焊缝检验宏观和微观检验结果报告应附有相应的金相照片。

C.5.4.5.4 缺欠的合格等级宜根据 GB/T 22085.1、GB/T 6417.1 确定。

C.5.5 附加试验

C.5.5.1 试件不符合 C.5.3.2 规定的无损检测要求时,应再焊制一块试件进行同样的检测。如果附加的试件仍不符合相关要求,该焊接工艺评定不合格。

C.5.5.2 如果试样有个别检测项目由于允许的缺欠造成不符合 C.5.4 的要求时,可在同一试件(材料足够时)再制取一个试样,或取自相同试验条件下的另一试件。如果附加的这个试样仍不符合相关要求,该焊接工艺评定不合格。

C.6 评定原则

C.6.1 一般原则

C.6.1.1 当焊接方法、母材类别、填充金属类别、热处理类别和激光焊适用的设备改变时,需根据本附录重新进行焊接工艺评定。

C.6.1.2 生产单位评定合格的焊接工艺仅适用于该生产单位同样技术和质量控制条件下的车间焊接。

C.6.1.3 评定合格的激光焊工艺仅对所使用的设备和焊接预规程确定的夹具、固定装置及工具有效。

C.6.1.4 焊接设备进行重大更改(如搬迁、大修、更改核心元器件等),评定合格的焊接工艺需重新评定。

C.6.2 母材评定规则

C.6.2.1 评定合格的焊接工艺仅对试件的母材牌号或不同牌号组合有效。

C.6.2.2 评定合格的工艺中母材为钢材的,可沿用到符合 NB/T 47014—2023 所规定母材评定规则的等效牌号。

C.6.3 母材尺寸评定规则

C.6.3.1 钢板的厚度覆盖范围按 NB/T 47014—2023 中表 6~表 9 的规定。

C.6.3.2 管件的厚度按照熔深对厚度的覆盖范围按表 C.4 的规定。

单位为毫米

熔深	覆盖厚度
$s < 5$	$t \pm 20\%$
$5 \leq s \leq 25$	$t \pm 15\%$
$s > 25$	$t \pm 10\%$

注: t 为试件的厚度; s 为熔深。有衬垫时, s 可能大于 t ; 有封底焊缝(或密封焊缝)时, s 也可能小于 t 。

表 C.5 管件直径的覆盖范围

单位为毫米

管件试件的直径	允许覆盖范围
D	$\geq 0.75D$


焊接工艺评定报告应采用合适的格式,详细记录评定的试验项目和结果。钨极其他保护焊的焊接工艺评定报告格式宜参照 NB/T 47014—2023 中表 G.2;激光焊工艺评定报告格式可参考表 C.6。

表 C.6 激光焊工艺评定报告

焊接工艺评定报告格式(PQR)	
生产单位：_____	地址：_____
焊接工艺评定报告(PQR)编号：_____ PWPS 编号：_____	
规范/标准：_____	
设备型号：_____	设备编号：_____
焊接日期：_____	焊接方法：_____
接头简图(接头形式、尺寸、衬垫、各种焊接方法或焊接工艺的焊缝金属厚度)：	
厚度覆盖范围：_____	
尺寸覆盖范围：_____	
焊缝熔深：_____	
母材牌号：_____	

表 C.6 激光焊工艺评定报告（续）

焊接工艺评定报告格式(PQR)						
<div>厚度/mm: _____</div> <div>外径/mm: _____</div> <div>焊接材料种类: _____</div> <div>真空: _____</div> <div>保护气体: _____ 背面保护气体: _____</div> <div>焊接位置: _____</div> <div>预热: _____</div> <div>焊后热处理: _____</div> <div>其他信息: _____</div> <div>结论: 本评定符合本文件附录 C 及技术要求规定, 焊接试件、无损检测、热处理、测定性能, 确认试验记录正确、真实。</div> <div>评定结果: 合格<input type="checkbox"/> 不合格<input type="checkbox"/></div>						
编制	日期	审核	日期	批准	日期	生效日期:
监督检验机构确认				第三方检验机构确认		

<div>焊接试验详细报告</div> <div>焊接工艺规程</div> <div> 激光焊工艺规程见 GB/T 19867.4—2008 的附录 A</div> <div>试验结果</div> <div>试件标识:</div> <div>无损检测:</div> <div>检测人员:</div> <div><div>目视检测:</div><div>射线检测:</div><div>胶片型号:</div><div>超声检测:</div><div>渗透检测:</div></div> <div><div>要求</div><div>要求</div><div>标记:</div><div>要求</div><div>要求</div></div> <div><div>是<input type="checkbox"/></div><div>是<input type="checkbox"/></div><div>是<input type="checkbox"/></div><div>是<input type="checkbox"/></div><div>是<input type="checkbox"/></div></div> <div><div>否<input type="checkbox"/></div><div>否<input type="checkbox"/></div><div>否<input type="checkbox"/></div><div>否<input type="checkbox"/></div><div>否<input type="checkbox"/></div></div> <div></div>				焊接作业人员:					
							无缺欠	有缺欠	
								合格	不合格

表(续)

拉伸： 拉伸试验： 要求 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 试验人员： 试样种类： 标准试样 <input type="checkbox"/> 非标试样 <input type="checkbox"/> 焊缝加工平齐：是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>									
试样		尺寸	R _m N/mm ²	延伸率 %	断裂部位			备注	
标识	种类				母材	热影响区 (HAZ)	焊缝		
弯曲试验： 面弯试验： 要求 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 背弯试验： 要求 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 侧弯试验： 要求 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 试验人员：									
试样		尺寸 mm	弯心直径 mm	间距 mm	弯曲条件			弯曲角度	备注
标识	种类				面弯	背弯	侧弯		
试件标识： 冲击试验： 要求 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 试验人员：									

编号	缺口部位 横截面 cm ²	温度 ℃	位置				冲击功 J		备注
			试样		缺口		单值	平均值	
			中心	表面	焊缝	HAZ			
硬度试验： 要求 是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 试验人员：									
试样示意图			测量点位置 N				结果		

表(续)

破坏性试验：	要求	是 <input type="checkbox"/>	否 <input type="checkbox"/>
试验人员：			
试验报告附件明细：			
试验依据：			
试验报告编号：			
试验结果：	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>	
试验依据：			
试验报告编号：			
试验结果：	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>	
试验依据：			
试验报告编号：			
试验结果：	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>	
试验依据：			
试验报告编号：			
试验结果：	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>	
试验依据：			
试验报告编号：			
试验结果：	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>	
试验依据：			
试验报告编号：			
试验结果：	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>	

附 录 D
(资料性)

超临界热交换器流动与传热性能测试方法

D.1 测试系统

D.1.1 超临界流体-超临界流体、超临界流体-液态单相测试系统

测试系统如图 D.1 所示。系统右侧为热流体循环回路,可采用蒸汽、电力等作为热源。系统左侧为冷流体循环回路,通常采用水作为冷侧介质,低于 0℃ 的测试可采用乙二醇等做为冷侧介质。

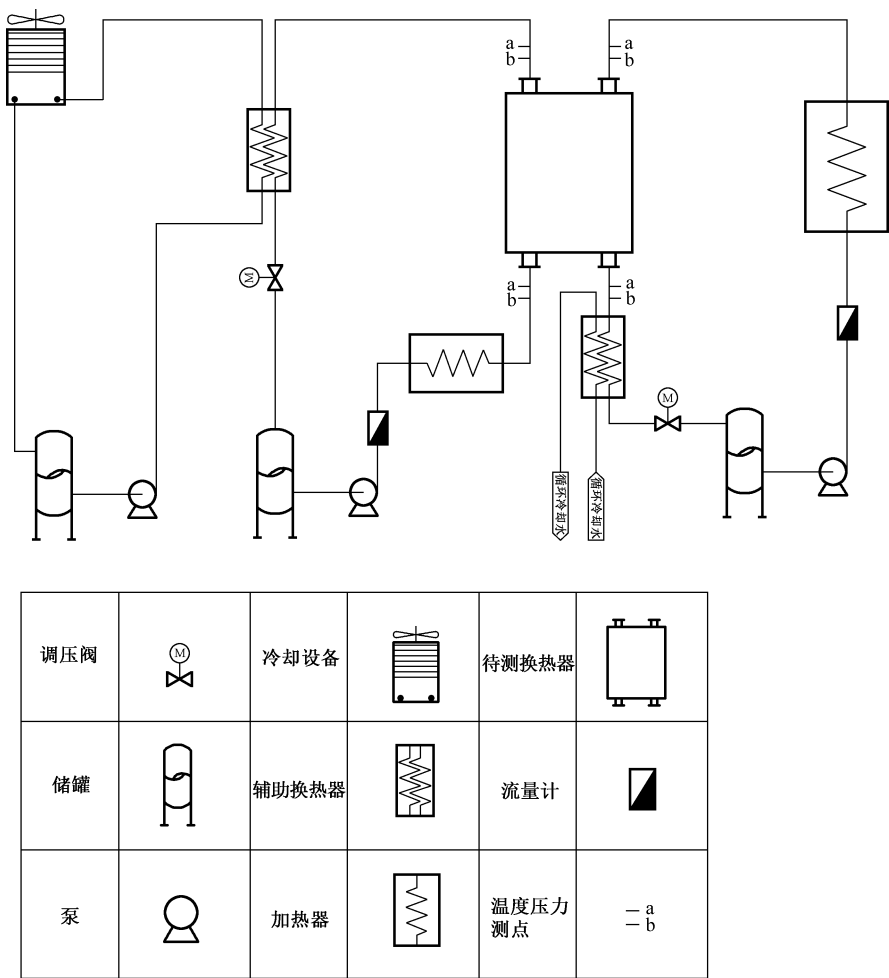


图 D.1 超临界流体-超临界流体、超临界流体-液态单相测试系统

D.1.2 超临界流体-气态单相性能测试

被测热交换器一侧为超临界流体,另一侧为单相气体。超临界流体侧为闭式循环系统,气体侧通常为类似风洞的开式系统,如图 D.2 所示。

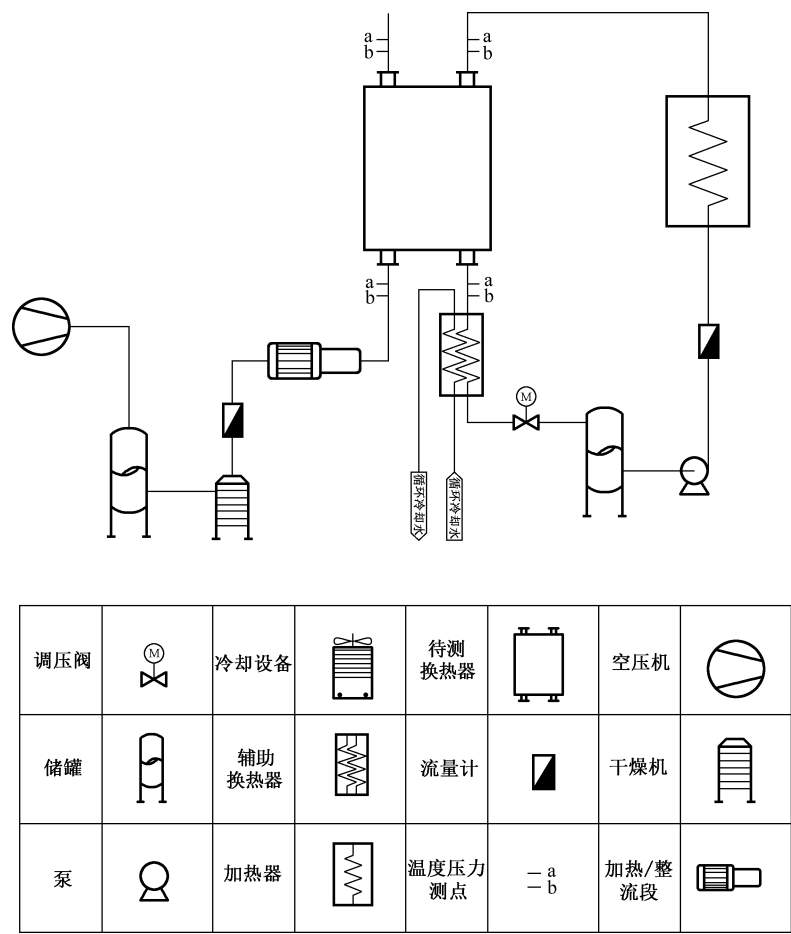


图 D.2 超临界流体-气态单相性能测试

D.2 测量仪表

D.2.1 测量仪表准确度等级不低于表 D.1 要求。

表 D.1 测量仪表准确度等级

测量项目	流量	温度	压力	压差
准确度等级	0.2 级	±0.5℃	0.1 级	0.1 级

D.2.2 称重仪表准确度等级为 GB/T 7724 规定的高级及以上。

D.2.3 仪表测量上限为所测参数的 1.5 倍~2.0 倍。

D.2.4 测试仪表在计量检定或校准有效期内使用。

D.3 测试样机

D.3.1 样机的单张流道板上通道数不宜少于 5 条,冷流体与热流体流道层数均不宜少于 5 层。

D.3.2 在进行性能测试前,需明确样机以下参数:

- a) 换热工质类型;
- b) 冷、热流体进口温度范围;



- c) 冷、热流体进口压力范围；
- d) 冷、热流体侧通道层数、结构布局；
- e) 冷、热流体侧通道截面形状及尺寸；
- f) 冷、热流体通道数量；
- g) 冷、热流体通道长度；
- h) 流动形式(顺流、逆流、错流等)；
- i) 热交换器材质及质量。

D.4 测量方法

D.4.1 质量

电子天平放置在牢固平稳的试验台上,调平后不随意挪动。操作环境保持清洁、干燥,避免直接阳光照射,并防止空气流动引起天平摆动,天平在接通电源后预热稳定不少于 30 min 再进行使用。

D.4.2 流量测量

使用科里奥利力流量计测量流量,宜在流量计上游安装过滤器。

D.4.3 温度测量

温度采用卡套插入式测温传感器,测温点架构如图 D.3 所示,保护套端部伸入流通通道 1 mm~1.5 mm,且宜在上游增加扰动钢丝网,保证层流边界层和主流温度均匀。

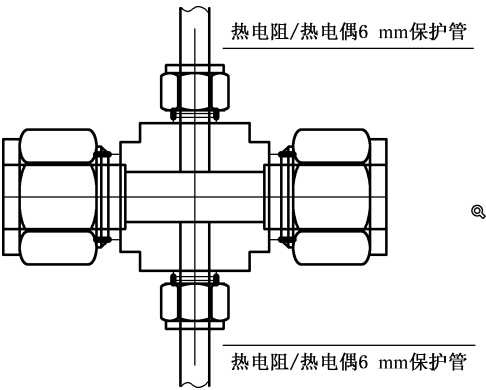


图 D.3 测温点架构图

D.4.4 压力(差)测量

压力和压差接头宜采用图 D.4 的结构,利用直径 3 mm 不锈钢管与压力传感器和差压传感器连接,确保高温测试流体不烧坏压力感知元件。

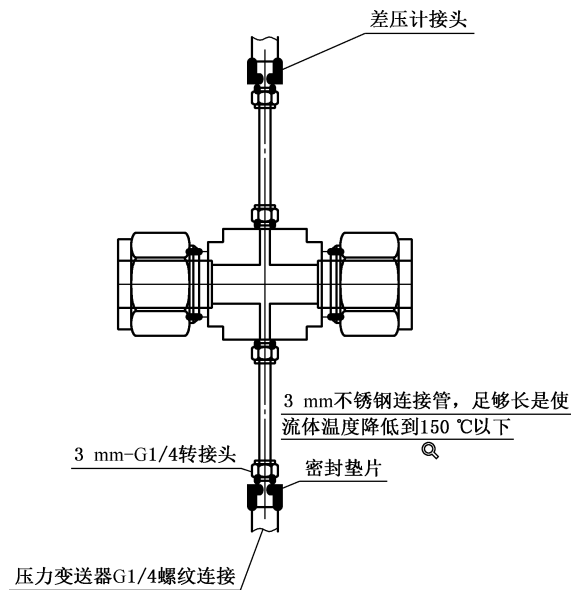


图 D.4 压力和压差接头结构图

D.5 测试程序

D.5.1 超临界流体-超临界流体测试程序

D.5.1.1 首先根据热交换器设计文件,确定热交换器的工况范围,选取典型的工况点,确定冷热侧流体的入口温度、压力、质量流量目标值。

D.5.1.2 测试前,检查测量仪表是否在检定日期之内,且状态正常。

D.5.1.3 开始运行前,对系统进行压力试验,试验压力参考热交换器设计文件中的试验压力,然后对系统抽真空,加注测试的流体,启动增压泵待测流体冷态循环达到一定的流量,在启动加热器并逐步调节调压阀,让冷热流体逐步达到温度、压力、流量目标值,等待系统达到热平衡,记录数据。

D.5.1.4 按以下测试程序进行测试:

- 热交换器进口与出口温度 5 min 内变化幅度均不大于 0.5℃时,认为达到稳态;
- 每个测试工况稳定 5 min 及以上,且热平衡相对误差不大于 5%时,进行数据采集;
- 每个测试工况至少重复测量 3 次,每次间隔 5 min 以上,测量结果取平均值。

D.5.1.5 可根据用户需求和设备特征协商确定测试流速、温度、压力。

D.5.2 超临界流体-液态单相性能测试

D.5.2.1 首先根据热交换器设计文件,确定热交换器的工况范围,选取典型的工况点,确定冷热侧流体的入口温度、压力、质量流量目标值。

D.5.2.2 测试前,检查测量仪表是否在检定日期之内,且状态正常。

D.5.2.3 开始运行前,对超临界流体循环系统进行压力试验,试验压力参考热交换器设计文件中相应流体一侧的试验压力,然后对试验系统抽真空,加注测试的流体,启动增压泵待测流体冷态循环达到一定的流量,再启动加热器并逐步调节调压阀,让超临界流体逐步达到温度、压力、流量目标值,调节液态侧的温度、压力、流量达到目标值,系统达到热平衡,记录数据。

D.5.2.4 按以下测试程序进行测试:

- a) 热交换器超临界流体侧以及液体侧出口温度 5 min 内变化幅度均不大于 0.5 °C, 认为达到稳态;
- b) 每个测试工况稳定 5 min 以上, 且热平衡相对误差不大于 5% 时, 进行数据采集;
- c) 每个测试工况至少重复测量 3 次, 每次间隔 5 min 以上, 测量结果取平均值。

D.5.2.5 热交换器应用于低流速工况时, 宜对其进行低流速性能测试。可根据用户需求和设备特征协商确定测试工况。

D.5.3 超临界流体-气态单相性能测试

D.5.3.1 首先根据热交换器设计文件, 确定热交换器的工况范围, 选取典型的工况点, 确定冷热侧流体的入口温度、压力、质量流量目标值。

D.5.3.2 测试前, 检查测量仪表是否在检定日期之内, 且状态正常。

D.5.3.3 对于超临界流体侧: 开始运行前, 对超临界流体循环系统进行压力试验, 试验压力参考热交换器设计文件中相应流体一侧的试验压力, 然后对试验系统抽真空, 加注测试的流体, 启动增压泵待测流体冷态循环达到一定的流量, 再启动加热器并逐步调节调压阀, 让超临界流体逐步达到温度、压力、流量目标值, 调节液态侧的温度、压力、流量达到目标值, 系统达到热平衡, 记录数据。

D.5.3.4 对于气体侧: 启动电脑控制端与数据采集系统, 确保信号正常; 检查供气道阀门是否正确打开, 然后依次启动冷冻式干燥机和压缩机。将空气压缩进入缓冲气罐; 当缓冲气罐汇总的压力稳定后打开主流电磁阀, 通过在控制电脑上设定风速值调节风洞试验段入口风速, 并通过毕托管测量风速反馈在控制电脑上, 调节风速至目标值; 确保超临界流体侧处于循环流动状态后, 开启加热器, 设定温度值对空气进行加热, 气流温度调至目标值; 系统达到热平衡, 记录数据。

D.5.3.5 按以下测试程序进行测试:

- a) 热交换器超临界流体侧以及气体侧出口温度 5 min 内变化幅度均不大于 0.5 °C, 认为达到稳态;
- b) 每个测试工况稳定 5 min 以上, 且热平衡相对误差不大于 5% 时, 进行数据采集;
- c) 每个测试工况至少重复测量 3 次, 每次间隔 5 min 以上, 测量结果取平均值。

D.6 数据处理

D.6.1 数据采集

试验前, 根据需要可测量热交换器重量。在试验中, 采集热交换器冷侧流体流量、热侧流体流量、入口温度、出口温度、压力、压差。

D.6.2 数据计算

D.6.2.1 热流量

根据热交换器进出口工质的温度和压力, 确定工质的焓值, 并计算两侧工质的热流量。

热侧热流量计算见公式(D.1):

$$\Phi_h = (h_{h, \text{out}} - h_{h, \text{in}}) q_{m, h} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- Φ_h —— 热流体的热流量, 单位为瓦(W);
- h_h —— 热侧流体的焓, 单位为焦耳每千克(J/kg);
- $q_{m, h}$ —— 热侧流体的质量流量, 单位为千克每秒(kg · s⁻¹);

in,out ——下角标,分别表示流体进口、出口。

冷侧热流量计算见公式(D.2):

$$\Phi_c = (h_{c,out} - h_{c,in}) q_{m,c} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

Φ_c ——冷流体的热流量,单位为瓦(W);

h_c ——冷侧流体的焓,单位为焦耳每千克(J/kg);

$q_{m,c}$ ——冷侧流体的质量流量,单位为千克每秒(kg·s⁻¹);

in,out ——下角标,分别表示流体进口、出口。

D.6.2.2 热交换器的热流量(传热功率)

热流量取冷热两侧流体的热流量的平均值 Φ_m ,计算方法见公式(D.3):

$$\Phi_m = (\Phi_h + \Phi_c)/2 \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

Φ_m ——平均热流量,单位为瓦(W)。

D.6.2.3 加权平均温差(WATD)

对于超临界压力流体等物性变化强烈的工质,常用的对数温差(LMTD)已不能够准确描述冷热工质之间的传热温差大小,宜采用加权平均温差计算传热系数、传热面积、传热功率等。计算热交换器的加权平均温差需要对热交换器沿流动方向进行等传热量分段划分,如图 D.5 所示。

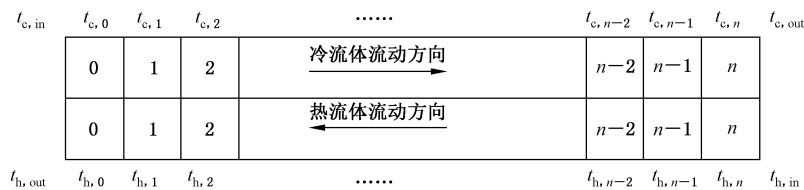


图 D.5 热交换器的微元划分

加权平均温差的计算见公式(D.4):

$$\Delta t_m = \frac{n}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{\Delta t_{m,i}}} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

Δt_m ——加权平均温差,单位为摄氏度(℃)。

若从热交换器热端向冷端迭代按公式(D.5)~公式(D.7)计算:

$$\Delta t_{m,i} = t_{h,i} - t_{c,i} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

$$t_{h,i+1} = t_{h,i} - \frac{\Phi_m}{n} / c_{p,h} \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

$$t_{c,i+1} = t_{c,i} - \frac{\Phi_m}{n} / c_{p,c} \quad \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

Δt_m ——加权平均温差,单位为摄氏度(℃);

t ——温度,单位为摄氏度(℃);

c_p ——定压比热容,单位为焦耳每千克开尔文[J/(kg·K)];

in,out ——下角标,分别表示流体进口、出口;

c,h ——下角标,分别表示冷热流体。

起始端边界条件见公式(D.8)~公式(D.11):

$$t_{h,0} = t_{h,in} \quad \dots\dots\dots (D.8)$$

$$t_{h,n} = t_{h,out} \quad \dots\dots\dots (D.9)$$

$$t_{c,0} = t_{c,out} \quad \dots\dots\dots (D.10)$$

$$t_{c,n} = t_{c,in} \quad \dots\dots\dots (D.11)$$

式中:


t ——温度,单位为摄氏度(℃);

in,out ——下角标,分别表示流体进口、出口;

c,h ——下角标,分别表示冷热流体。

若从热交换器冷端向热端迭代按公式(D.12)~公式(D.14)计算:

$$\Delta t_{m,i} = t_{h,i} - t_{c,i} \quad \dots\dots\dots (D.12)$$



$$t_{h,i+1} = t_{h,i} + \frac{\Phi_m}{n} / c_{p,h,i} \quad \dots\dots\dots (D.13)$$

$$t_{c,i+1} = t_{c,i} + \frac{\Phi_m}{n} / c_{p,c,i} \quad \dots\dots\dots (D.14)$$

式中:

Δt_m ——加权平均温差,单位为摄氏度(℃);

t ——温度,单位为摄氏度(℃);

c_p ——定压比热容,单位为焦耳每千克开尔文[J/(kg·K)];

in,out ——下角标,分别表示流体进口、出口;

c,h ——下角标,分别表示冷热流体。

起始端边界条件见公式(D.15)~公式(D.18):

$$t_{h,0} = t_{h,out} \quad \dots\dots\dots (D.15)$$

$$t_{h,n} = t_{h,in} \quad \dots\dots\dots (D.16)$$

$$t_{c,0} = t_{c,in} \quad \dots\dots\dots (D.17)$$

$$t_{c,n} = t_{c,out} \quad \dots\dots\dots (D.18)$$

式中:

$t_{h,out}, t_{h,in}, t_{c,in}, t_{c,out}$ ——实验测量的热交换器端口流体温度。为更准确计算传热温差,微元段的长度越小、 n 的数值越大,传热温差的计算精度越高。计算时微元段的长度宜不大于 1 mm。

D.6.2.4 热重比

热重比(HWR)的计算见公式(D.19):

$$HWR = \Phi_m / M \quad \dots\dots\dots (D.19)$$

式中:

HWR ——热重比,单位为瓦每千克(W·kg⁻¹);

Φ_m ——平均热流量,单位为瓦(W);

M ——热交换器质量,单位为千克(kg)。

D.6.2.5 单位温差热重比

单位温差热重比(UTD-HWR)的计算见公式(D.20):

$$UTD-HWR = \frac{\Phi_m}{M \Delta t_m} \quad \dots\dots\dots (D.20)$$

式中：

UTD-HWR ——单位温差热重比,单位为瓦特每千克摄氏度($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

Φ_m ——平均热流量,单位为瓦(W);

M ——热交换器质量,单位为千克(kg);

Δt_m ——加权平均温差,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$)。

D.6.2.6 传热系数

传热系数 K 的计算见公式(D.21):

$$K = \frac{\Phi_m}{A \Delta t_m} \dots\dots\dots (\text{D.21})$$

式中：

K ——传热系数,单位为瓦特每平方米开尔文($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$);

Φ_m ——平均热流量,单位为瓦(W);

A ——传热面积,单位为平方米(m^2);

Δt_m ——加权平均温差,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$)。

D.7 性能确定

根据需要可确定如下性能参数：

- a) 热流量(Φ_m)随质量流量 q_m 变化的测试曲线；
- b) 传热系数(K)随质量流量 q_m 变化的关系式或测试曲线；
- c) 压力降(Δp)随质量流量 q_m 变化的关系式或测试曲线；
- d) 热重比(HWR)随质量流量 q_m 变化的测试曲线；
- e) 单位温差热重比(UTD-HWR)随质量流量 q_m 变化的测试曲线。

参 考 文 献

[1] GB/T 4157 金属在硫化氢环境中抗硫化物应力开裂和应力腐蚀开裂的实验室试验方法

[2] GB/T 4334 金属和合金的腐蚀 奥氏体及铁素体-奥氏体(双相)不锈钢晶间腐蚀试验方法

[3] GB/T 6417.1 金属熔化焊接头缺欠分类及说明

[4] GB/T 7724 电子称重仪表

[5] GB/T 17897 金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法

[6] GB/T 19867.4 激光焊接工艺规程

[7] GB/T 22085.1 电子束及激光焊接接头 缺欠质量分级指南 第1部分:钢

[8] GB/T 27698.1 热交换器及传热元件性能测试方法 第1部分:通用要求

[9] GB/T 27698.2 热交换器及传热元件性能测试方法 第2部分:热交换器

[10] GB/T 27698.3 热交换器及传热元件性能测试方法 第3部分:传热元件

[11] GB/T 35351—2025 增材制造 术语

[12] JB/T 7901 金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法

[13] NB/T 47045 钎焊板式热交换器

[14] YB/T 5362 不锈钢在沸腾氯化镁溶液中应力腐蚀试验方法

