



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 30583—2026

代替 GB/T 30583—2014

## 承压设备焊后热处理规程

Specifications for post weld heat treatment of pressure equipment

2026-01-28 发布

2026-08-01 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 .....	V
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义、符号 .....	1
4 基本工艺 .....	4
5 设备、仪表和测温器材 .....	11
6 技术准备 .....	13
7 加热和控温 .....	14
8 测温 .....	15
9 保温 .....	17
10 焊后热处理报告 .....	18
11 热处理效果的评价 .....	18
附录 A (资料性) 焊后热处理厚度( $\delta_{PWHT}$ )示图 .....	20
附录 B (资料性) 单加热局部焊后热处理 .....	26
附录 C (资料性) 主副加热局部焊后热处理 .....	28
附录 D (规范性) 热处理炉有效加热区测定方法 .....	30
附录 E (资料性) 承压设备炉外整体焊后热处理记录表 .....	33
附录 F (资料性) 现场局部焊后热处理热工计算 .....	36
附录 G (资料性) 评价焊后热处理效果的测试方法 .....	37
附录 H (资料性) 焊后热处理效果评价报告(示例) .....	44
参考文献 .....	46





## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 30583—2014《承压设备焊后热处理规程》。与 GB/T 30583—2014 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 更改了对适用范围的描述(见第 1 章,2014 年版的第 1 章)；
- b) 增加了术语“局部焊后热处理”及其定义,更改了术语“梯度控制带”以及术语“均温带”“保温温度”“保温时间”的定义(见 3.1.3、3.1.4、3.1.6~3.1.8、2014 年版的 3.3、3.5~3.7)；
- c) 增加了“符号”(见 3.2)；
- d) 更改了对采用研究成果和工程实践经验的要求(见 4.1.2,2014 年版的 4.1.2)；
- e) 增加了对非合金钢和低合金钢以及奥氏体不锈钢、双相钢和镍基合金焊后热处理温度通用限值的要求(见 4.1.3)；
- f) 更改了对焊后热处理温度限定的描述(见 4.1.4,2014 年版的 4.1.3)；
- g) 更改了对焊后热处理人员的要求(见 4.1.5、4.1.6,2014 年版的 4.1.4、4.1.6)；
- h) 删除了对焊接工艺评定、产品焊接试件的要求(见 2014 年版的 4.1.5、4.1.7)；
- i) 增加了对焊后热处理实施时机的要求和方法选择的要求(见 4.1.7、4.1.8)；
- j) 更改了焊后热处理厚度的规定,删除了相关图示[见 4.2.4 d)、g)~i),2014 年版的 4.2.4 d)、g)、h)、A.5、图 A.9、A.8、图 A.12]；
- k) 更改了局部焊后热处理的要求(见 4.3.3.1~4.3.3.3、4.3.3.5~4.3.3.7、附录 B,2014 年版的 4.3.3.1~4.3.3.5、附录 B)；
- l) 增加了主副加热局部焊后热处理的要求(见 4.3.3.4、附录 C)；
- m) 增加了临时加固的要求(见 4.3.3.8)；
- n) 增加了对锅炉产品焊后热处理规范参数的要求(见表 1)；
- o) 更改了压力容器焊后热处理规范参数(见表 2,2014 年版的表 1)；
- p) 增加了对 Fe-9B 类的钢制焊件的要求(见 4.4.4)；
- q) 删除了免除焊后热处理的材料牌号(见 2014 年版的 4.4.1.3)；
- r) 增加了对于免除焊后热处理焊接接头的通用要求(见 4.4.11)；
- s) 增加了对 Fe-10I 焊件的焊后热处理要求(见 4.4.5、4.4.17)；
- t) 增加了对 Fe-5B-2 母材牌号的说明,更改了对 Fe-5B-2 焊件的焊后热处理要求(见 4.4.1、4.4.6、4.4.18,2014 年版的 4.4.1.5)；
- u) 更改了对调质钢、正火后回火焊件的热处理温度要求(见 4.4.9,2014 年版的 4.4.4)；
- v) 增加了对锅炉受压元件异种钢焊接的推荐焊后热处理温度的要求(见表 4)；
- w) 增加了对锅炉产品用 Fe-4 和 Fe-5A 用较低温度进行焊后热处理的要求(见 4.4.12)；
- x) 更改了炉内焊后热处理工艺参数的通用限值(见 4.4.15,2014 年版的 4.4.9)；
- y) 更改了炉外焊后热处理工艺参数的通用限值(见 4.4.16,2014 年版的 4.4.10)；
- z) 增加了对加热设备的总体要求(见 5.1.1、5.1.2)；
- aa) 更改了对热处理炉的要求(见 5.1.3,2014 年版的 5.1)；
- ab) 增加了对内燃、远红外辐射、电阻、感应、卡式炉等加热方法的要求(见 5.1.4~5.1.8)；
- ac) 更改了对测温、控温仪表和测量系统的要求(见 5.2,2014 年版的 5.3~5.6)；

- ad) 更改了对热处理炉有效加热区测定的要求(见 5.3、附录 D,2014 年版的 5.2、7.2.1、7.2.2、附录 C);
- ae) 更改了炉内焊后热处理工艺规程的主要内容(见 6.1);
- af) 更改了炉外焊后热处理工艺规程的主要内容(见 6.2);
- ag) 增加了对热电偶补偿导线的要求(见表 6);
- ah) 更改了测温点和布置的要求(见 8.1、8.2,2014 年版的 8.1);
- ai) 更改了温度测量和记录的要求(见 8.4,2014 年版的 8.3);
- aj) 增加了对保温材料的技术要求(见 9.1~9.4);
- ak) 更改了对保温材料层数的要求(见 9.5,2014 年版的 9.2);
- al) 增加了对保温材料厚度的要求(见 9.7);
- am) 增加了对内壁保温的要求(见 9.8);
- an) 增加了现场局部焊后热处理的热工计算方法(见附录 F);
- ao) 增加了对焊后热处理效果评价的要求(见第 11 章、附录 G、附录 H)。

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:中国特种设备检测研究院、二重(德阳)重型装备有限公司、中国石化工程建设有限公司、兰州兰石重型装备股份有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、中国石油大学(华东)、合肥通用机械研究院有限公司、一重集团大连核电石化有限公司、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、中石化广州工程有限公司、中石油华东设计院有限公司、茂名重力石化装备股份公司、抚顺机械设备制造有限公司、青岛海越机电科技有限公司、抚顺市特种设备监督检验所、宁波天翼石化重型设备制造有限公司、中石化(天津)石油化工有限公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、上海锅炉厂有限公司、山东豪迈机械制造有限公司、中石化工程质量监测有限公司、上海傅氏热处理工程有限公司、山东同新检测工程有限公司、江苏永大化工机械股份有限公司、长春特种设备检测研究院(长春市特种设备安全监控中心)。

本文件主要起草人:李军、徐彤、蒋文春、王迎君、马容忠、王金光、王天先、袁继军、郭广飞、黄嗣罗、武爱兵、李群生、胡希海、谢育辉、李佩倚、李春树、朱健、王萍、谷文斌、田有良、吉方、郑周、贾尚谊、王炯祥、陈勇、李进、张雪涛、胡海波、赵潇男、傅家仁、周荣香、李滨、戈兆文、李书涵、郭传江。

本文件于 2014 年首次发布,本次为第一次修订。

## 引 言

焊接过程中不可避免产生的残余应力,会对承压设备结构完整性及安全服役产生重要影响。焊后热处理是消除焊接残余应力,改善焊接接头组织和性能的有效手段,其质量直接关系到承压设备的整体性能和使用寿命。随着承压设备向大型化、高参数化发展,并在高温、高压、腐蚀等极端环境中服役,对焊后热处理提出了更高要求。不当的热处理极易诱发应力腐蚀开裂,并显著增加设备在服役过程中发生蠕变、疲劳等失效的风险。为提升承压设备焊后热处理工艺的规范性和科学性,保障承压设备长期服役的可靠性与寿命,现对 GB/T 30583 进行修订。本文件在 2014 年版基础上,进一步调整和细化了焊后热处理参数;明确了单加热局部焊后热处理中加热带宽度和梯度控制带宽度的要求;提出主副加热局部焊后热处理方法,解决了大型设备加热带宽度过大导致现场实施困难的问题。本文件还规定了焊后热处理效果的测试评价方法,为焊后热处理质量控制提供了技术出路。

本文件是承压设备建造通用技术标准之一,包括了承压设备焊后热处理过程中遵循的技术要求。本文件并未囊括适用范围内承压设备热处理中的所有技术细节。本文件不限制实际热处理过程采用先进的技术方法,但工程技术人员采用先进的技术方法前,需要做出可靠性的判断,确保其满足本文件的规定。





# 承压设备焊后热处理规程

## 1 范围

本文件规定了承压设备焊后热处理基本工艺、设备、仪表和测温器材、技术准备和加热、控温、测温、保温等操作的要求。

本文件适用于锅炉、压力容器(不含气瓶)的焊后热处理,其他承压设备可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文件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 3375 焊接术语
- GB/T 9452 热处理炉有效加热区测定方法
- GB/T 4989 热电偶用补偿导线
- GB/T 4990 热电偶用补偿导线合金丝
- NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

## 3 术语和定义、符号

### 3.1 术语和定义

GB/T 3375、GB/T 9452 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1.1

**焊件 weldment**

焊制的承压设备或其零部件。

#### 3.1.2

**焊后热处理 post weld heat treatment;PWHT**

为消除焊接残余应力,改善焊接接头的组织和性能,将焊件均匀加热到足够高的温度,并保持一定时间,然后均匀冷却的过程。

#### 3.1.3

**局部焊后热处理 local post weld heat treatment**

受尺寸或特殊结构限制、返修及改造修理等原因而无法进行整体热处理,采用局部加热方式进行的焊后热处理。

#### 3.1.4

**均温带 soak band;SB**

局部焊后热处理时,焊件焊缝及其两侧达到规定温度范围的带状区域。

注:均温带一般至少涵盖焊缝区、热影响区及其相邻的母材。

3.1.5

**加热带 heated band; HB**

局部焊后热处理时,为保证焊件获得规定的均温体积范围而被加热的区域。

3.1.6

**梯度控制带 gradient control band; GCB**

局部焊后热处理时,为控制温度梯度,防止焊件加热范围和均温范围散热而在其表面铺设保温材料的区域。

注:梯度控制带又称“隔热带”。

3.1.7

**保温温度 holding temperature**

为达到焊后热处理的目的,焊件或其局部均温区域在一定时间内,保持所规定的温度区间。

3.1.8

**保温时间 holding time**

焊件或其局部的均温区域在保温温度下的持续时间。该时间段自所有测温点温度均达到最低保温温度时起算,至任一测温点的温度首次低于该最低保温温度时终止。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

$A_{1\sim3}$  ——塑性系数,通过标定试验获得,单位为牛毫米(N·mm);

$A_{c1}$  ——金属的下相变点,是钢加热时,开始形成奥氏体的温度,单位为摄氏度(°C);

注:又称为“加热相变点”“下相变点”或“下临界点”;

$a_c$  ——压头与被测材料的真实接触半径,单位为毫米(mm);

$b$  ——对接焊缝厚度,单位为毫米(mm);

$b_f$  ——有效加热区宽度,单位为米(m);

$b_h$  ——线性硬化材料的塑性参数,单位为兆帕(MPa);

$c$  ——比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)],钢的比热容为0.83 kJ/(kg·°C);

$d$  ——残余应力测试时,一个测试区内两次压入的最小中心间距,单位为毫米(mm);

$d_f$  ——有效加热区直径,单位为米(m);

$E$  ——热量损失系数,保温效果良好时取0.4,否则取0.2~0.3;

$E_p$  ——线性硬化材料的塑性模量,单位为兆帕(MPa);

$E_s$  ——被测材料的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

$e$  ——自然常数,取2.718 28;

$F$  ——压入试验力,单位为牛(N);

$f$  ——角焊缝厚度,单位为毫米(mm);

GCB ——梯度控制带;

HB ——单加热局部焊后热处理加热带;

HB<sub>p</sub> ——局部焊后热处理主加热带;

HB<sub>s</sub> ——局部焊后热处理副加热带;

$h$  ——表面对流传热系数,单位为千瓦每平方米开[kW/(m<sup>2</sup>·K)];

$h_c$  ——压头与被测材料的真实接触深度,单位为毫米(mm);

$h_f$  ——有效加热区高度,单位为米(m);

$h_i$  ——压入深度,单位为毫米(mm);

$h_{max}$  ——最大压入深度,单位为毫米(mm);

- $K$  —— 幂律硬化材料的强度系数,单位为兆帕(MPa);
- $L$  —— 筒体上温度下降到局部热处理峰值温度 70% 的最小距离,单位为毫米(mm);
- $L_s$  —— 轴向方向梯度控制带边缘温度降至室温的距离,单位为毫米(mm);
- $L_t$  —— 接管上温度下降到局部热处理峰值温度 70% 的最小距离,单位为毫米(mm);
- $l_f$  —— 有效加热区长度,单位为米(m);
- $m$  —— 焊件质量,单位为千克(kg);
- $n$  —— 幂律硬化材料的应变硬化指数;
- $P$  —— 感应/电阻片加热总功率,单位为千瓦(kW);
- $P_1$  —— 感应加热加热区被加热件升温所需功率,单位为千瓦(kW);
- $P_2$  —— 感应加热辐射散热损失,单位为千瓦(kW);
- $P_3$  —— 感应加热对流散热损失,单位为千瓦(kW);
- $P_4$  —— 感应加热保温棉热损失,单位为千瓦(kW);
- $P_5$  —— 感应加热其他热损失,单位为千瓦(kW);
- $R$  —— 筒体或封头的内半径,单位为毫米(mm);
- $R_i$  —— 球形压头半径,单位为毫米(mm);
- $R_t$  —— 接管内半径,单位为毫米(mm);
- $R_o$  —— 筒体或封头的外半径,单位为毫米(mm);
- $S$  —— 垫板厚度,单位为毫米(mm);
- SB —— 均温带;
- $T_e$  —— 以热力学温度表示的室温,单位为开尔文(K);
- $T_1$  —— 以热力学温度表示的热处理峰值温度,单位为开尔文(K);
- $t_e$  —— 室温,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );
- $t_1$  —— 热处理峰值温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );
- $W_b$  —— 将接管连接到筒体的焊缝最大宽度,单位为毫米(mm);
- $W_D$  —— 主副加热中心位置之间的距离,单位为毫米(mm);
- $W_{D1}$  —— 接管与筒体连接焊缝轴向方向主加热和副加热施加区域中心距离,单位为毫米(mm);
- $W_{D2}$  —— 接管与筒体连接焊缝环向方向主加热和副加热施加区域中心距离,单位为毫米(mm);
- $W_F$  —— 压入试验力做的功,简称压入功,单位为牛毫米( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );
- $W_{\text{GCB}}$  —— 梯度控制带宽度,单位为毫米(mm);
- $W_{\text{GCBt}}$  —— 接管的梯度控制带宽度,单位为毫米(mm);
- $W_{\text{HB}}$  —— 加热带宽度,单位为毫米(mm);
- $W_{\text{HBt}}$  —— 接管的加热带宽度,单位为毫米(mm);
- $W_{\text{HBp}}$  —— 主副加热局部热处理主加热带宽度,单位为毫米(mm);
- $W_{\text{HBS}}$  —— 主副加热局部热处理副加热带宽度,单位为毫米(mm);
- $W_n$  —— 焊缝最大宽度,单位为毫米(mm);
- $W_{\text{SB}}$  —— 均温带宽度,单位为毫米(mm);
- $W_{\text{SBt}}$  —— 接管的均温带宽度,单位为毫米(mm);
- $\rho$  —— 焊件材料密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $\alpha$  —— 考虑轴向温度梯度辐射热损失系数,取值 0.15~0.2;
- $\beta_o$  —— 其他散热损失系数,取值 0.08~0.1;
- $\Delta W^{\text{eq}}$  —— 等效单轴应力条件下的压入能差,单位为牛毫米( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );
- $\Delta W_F$  —— 残余应力引起的压入功之差,简称压入能差,单位为牛毫米( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );
- $\delta$  —— 母材厚度,单位为毫米(mm);

- $\delta_B$  ——保温棉厚度,单位为毫米(mm);
- $\delta_f$  ——法兰厚度,单位为毫米(mm);
- $\delta_n$  ——筒体或封头的母材厚度,单位为毫米(mm);
- $\delta_{nt}$  ——接管母材厚度,单位为毫米(mm);
- $\delta_p$  ——平封头母材厚度,单位为毫米(mm);
- $\delta_{PWHT}$  ——焊后热处理厚度,单位为毫米(mm);
- $\delta_w$  ——焊缝的返修填充金属厚度,单位为毫米(mm);
- $\epsilon$  ——表面黑度,通常取值 0.8;
- $\epsilon_{eq}$  ——材料等效真应变;
- $\epsilon_0$  ——材料屈服应变;
- $\lambda$  ——保温棉热导率,单位为千瓦每米摄氏度[kW/(m·℃)];
- $\nu$  ——平均升温速率,单位为摄氏度每小时(℃/h);
- $\nu_{max}$  ——最大加热速率,单位为摄氏度每小时(℃/h);
- $\sigma_t$  ——材料的真应力,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma'_t$  ——当前压入试验力下的真应力,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_t^0$  ——初始压入试验力下的真应力,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_1$  ——在一测试区内第一次压入时,努氏压头短轴方向对应的残余应力,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_2$  ——垂直于  $\sigma_1$  方向的残余应力,单位为兆帕(MPa)。

## 4 基本工艺

### 4.1 通用规定

4.1.1 承压设备焊后热处理除应遵守本文件的规定外,还应符合相关产品标准、设计文件与合同的要求。

4.1.2 除本文件外,凡通过试验研究和/或实践证明有效的焊后热处理工艺,经供需双方协商确认后可用于本单位承压设备的焊后热处理。

4.1.3 非合金钢和低合金钢的焊后热处理温度不宜高于金属的下相变点( $A_{cl}$ )。奥氏体不锈钢、双相钢和镍基合金可加热到固溶温度或稳定化处理温度。

4.1.4 非合金钢和低合金钢制焊件低于 490℃ 的热过程,高合金钢(Fe-6、Fe-7、Fe-8、Fe-10I、Fe-10H、Fe-11A)制焊件低于 315℃ 的热过程,均不作为焊后热处理对待。

4.1.5 焊后热处理操作人员应经培训与考核合格后方能上岗。

4.1.6 热处理技术人员应具备一定的专业知识和实践经验,在掌握下列基本情况后,对每台(件)焊件编制相应的焊后热处理工艺规程:

- a) 焊件用钢材、焊材的焊接性和对焊后热处理的适应性;
- b) 钢材的实际回火温度,熔敷金属力学性能试件的焊后热处理条件;
- c) 焊件设计文件规定、服役要求与建造工艺过程;
- d) 焊后热处理环境,焊后热处理方法、设备、装置特点及程序。

4.1.7 焊后热处理应在焊接返修后、耐压试验前进行。

4.1.8 条件允许时优先采用整体焊后热处理。

### 4.2 焊后热处理厚度( $\delta_{PWHT}$ )

4.2.1 等厚度全焊透对接接头的  $\delta_{PWHT}$  为其焊缝厚度(余高不计),此时  $\delta_{PWHT}$  与母材厚度相同。

4.2.2 对接焊缝连接的焊接接头中,  $\delta_{PWHT}$  等于对接焊缝厚度; 角焊缝连接的焊接接头中,  $\delta_{PWHT}$  等于角焊缝厚度; 组合焊缝连接的焊接接头中,  $\delta_{PWHT}$  等于对接焊缝和角焊缝厚度中较大者。

4.2.3 螺柱焊时的  $\delta_{PWHT}$  等于螺柱的公称直径。

4.2.4 不同厚度受压元件相焊时的  $\delta_{PWHT}$  取值如下(见附录 A)。

- a) 两相邻对接受压元件中取其较薄一侧母材厚度。
- b) 筒体内封头结构, 则取筒体厚度和角焊缝厚度中较大者。
- c) 在筒体上焊接管板、平封头、盖板、凸缘或法兰时, 除图 A.3 所示取法兰厚度  $\delta_f$  外, 其余取筒体厚度。
- d) 接管与筒体、封头相焊时, 取接管厚度、接管焊缝厚度、筒体焊缝厚度或封头焊缝厚度(视接管位置取其中之一)、补强圈厚度和补强圈连接角焊缝厚度中的较大者。
- e) 接管与法兰相焊时, 取接管颈在接头处的焊缝厚度。
- f) 当非受压元件与受压件相焊, 取焊接处的焊缝厚度。
- g) 管子与管板焊接时, 取管子壁厚和焊缝厚度的较大值。
- h) 热处理后返修时, 取返修填充的焊缝金属厚度。同一位置且同一横截面的两处返修部位, 取两处焊缝金属厚度之和, 但不大于较薄一侧母材厚度。
- i) 复合板材料取复合板基材厚度。

4.2.5 焊后热处理计算保温时间的厚度:

- a) 整体焊后热处理时, 应按未经焊后热处理部分的最大  $\delta_{PWHT}$ ;
- b) 同炉内装入多台(件)承压设备或零部件时, 应按未经焊后热处理焊件上最大  $\delta_{PWHT}$ ;
- c) 局部热处理时, 应按均温带所包含未经焊后热处理焊件部分的最大  $\delta_{PWHT}$ ;
- d) 复合板材料按复合板的总厚度。

### 4.3 焊后热处理方式

#### 4.3.1 整体焊后热处理

整体焊后热处理有下列两种形式, 条件许可时应采用炉内整体加热法:

- a) 将焊件装入封闭炉内整体加热;
- b) 在焊件内部或外部整体加热。

#### 4.3.2 分段焊后热处理

焊件整体分段加热时, 加热各段重叠部分长度应至少为 1 500 mm。非加热部分的焊件(含其管接头)采取保温措施, 防止产生有害的温度梯度。

#### 4.3.3 局部焊后热处理

4.3.3.1 应将加热带环绕在锅炉、管道或容器筒体焊缝及规定的范围内, 确保加热均匀。必要时, 在背面也可布置加热器和保温材料。

4.3.3.2 局部焊后热处理主要有单加热局部焊后热处理、主副加热局部焊后热处理等方法。

4.3.3.3 单加热局部焊后热处理为仅对焊接接头区域进行加热的局部热处理, 见附录 B。

4.3.3.4 主副加热局部焊后热处理为先对焊接接头区域进行焊后热处理, 再对间隔焊接接头一定距离区域进行副加热的热过程, 见附录 C。

4.3.3.5 均温带的最小宽度为焊缝最大宽度两侧各加  $\delta_{PWHT}$  或 50 mm, 取两值中较小者。焊缝返修时, 均温带为返修焊缝周围各加  $\delta_{PWHT}$  或 50 mm, 取两值中较小者。

4.3.3.6 凸形封头上的接管局部环状加热热处理方法, 见附录 B。

4.3.3.7 筒体与接管焊接接头的均温带应包含整个焊接接头,并在接管设置单独的控制区。局部焊后热处理可采用全圆周带状加热、局部环状加热或主副加热的热处理方法。

4.3.3.8 对热处理过程中可能出现变形或开裂的承压设备焊接结构,可采取临时加固措施。

4.4 焊后热处理规范参数

4.4.1 焊后热处理规范参数见表 1、表 2。当非合金钢和某些低合金钢制焊件焊后热处理温度低于表 1、表 2 中的最低保温温度时,应按 4.4.2~4.4.6 执行,并经焊接工艺评定或试验验证。母材类别主要按 NB/T 47014 规定,其中 Fe-5B-2 含 GB/T 5310—2023 中 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN 及 GB/T 13401、GB/T 14383 中 AF91,与国外通用锅炉压力容器建造标准的 P-No.15E 相同。

注:制订焊后热处理工艺的最高焊后热处理温度和保温时间时,若对表中数据有疑问,可在获得材料生产商的钢材  $A_{Cl}$  及热处理要求的确切信息后再行确定。

4.4.2 Fe-1 类、Fe-3 类的钢制焊件,当低于表 1、表 2 中的最低保温温度进行焊后热处理时,可按表 3 的规定延长保温时间。

表 1 锅炉焊后热处理规范参数

种类		非合金钢、低合金钢						高合金钢	
钢制母材类别组别		Fe-1	Fe-3-1	Fe-3-3	Fe-4-1	Fe-4-2	Fe-5A	Fe-5B-2 <sup>a</sup>	Fe-8
最低保温温度/℃		600	600	600	650	680	680	730	b
最高保温温度/℃		710	705	640	730	760	775	785	
最短保温时间/h	$\delta_{PWHT} \leq 50 \text{ mm}$	$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.25						$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.5	b
	$50 \text{ mm} < \delta_{PWHT} \leq 125 \text{ mm}$	$2 + \frac{\delta_{PWHT} - 50}{100}$			$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$				
	$\delta_{PWHT} > 125 \text{ mm}$				$5 + \frac{\delta_{PWHT} - 125}{100}$			$5 + \frac{\delta_{PWHT} - 125}{100}$	
<sup>a</sup> Fe-5B-2 焊后热处理保温温度与填充金属成分密切相关,表中所列数值尚需调整,应满足 4.4.6 的要求。 <sup>b</sup> 焊后热处理既不要求也不阻止,由设计文件确定。									



表 2 压力容器焊后热处理规范参数

种类	非合金钢、低合金钢						高合金钢			低合金钢		高合金钢	
	Fe-1 <sup>a,b</sup>	Fe-3	Fe-4	Fe-5A Fe-5B-1 Fe-5B-3	Fe-5C	Fe-5B-2 <sup>c</sup>	Fe-6	Fe-7	Fe-8	Fe-9B <sup>e</sup>	Fe-10H	Fe-10I	Fe-11A
最低保温温度/℃	600	600	650	680	680	730	760	730	t	580	t	730	550
最短 保温 时间 /h	$\delta_{PWHT} \leq 25$ mm	$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.25		$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.25 <sup>d</sup>		$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.5	$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.25 <sup>d</sup>	$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.25 <sup>d</sup>	t	最少 1	t	$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 0.25 <sup>d</sup>	$\frac{\delta_{PWHT}}{25}$ , 最少 2
	$25 \text{ mm} < \delta_{PWHT} \leq 50$ mm												
	$50 \text{ mm} < \delta_{PWHT} \leq 125$ mm	$2 + \frac{\delta_{PWHT} - 50}{100}$	$1 + \frac{\delta_{PWHT} - 25}{100}$	$1 + \frac{\delta_{PWHT} - 25}{100}$									
	$\delta_{PWHT} > 125$ mm												

<sup>a</sup> Fe-1-2 组中 09MnNiDR 的最低保温温度为 580 ℃。

<sup>b</sup> Fe-1-4 组中 07MnMoVR(Q490R)、07MnNiVDR(Q490DRL1)、07MnNiMoDR(Q490DRL2)、12MnNiVR(Q490RW) 的最低保温温度为 550 ℃, 最高保温温度为 600 ℃。

采用 TMCP 工艺生产的钢材焊接接头最高保温温度为 570 ℃。

<sup>c</sup> Fe-5B-2 组钢制母材焊后热处理保温温度与填充金属成分密切相关, 表中所列数值尚需调整, 应满足 4.4.6 的要求。

<sup>d</sup> 采用分析设计的焊件, Fe-4、Fe-5A、Fe-5B-1、Fe-5B-3、Fe-5C 类  $\delta_{PWHT} < 125$  mm, 或 Fe-6、Fe-7 类  $\delta_{PWHT} < 50$  mm, 或 Fe-10I 类  $\delta_{PWHT} < 25$  mm 时, 保温时间至少 1 h。

<sup>e</sup> Fe-9B 类保温温度最高不超过 635 ℃。

<sup>f</sup> 焊后热处理既不要求也不阻止, 由设计文件确定。

4.4.3 Fe-5A、Fe-5B-1、Fe-5C 等类组的钢制焊件,当不能按表 1、表 2 中的最低保温温度进行焊后热处理时,最低保温温度可降低至 650 °C。降低最低保温温度后的焊后热处理最短保温时间为:

- a) 当  $\delta_{PWHT} \leq 50$  mm 时,为 4 h 与  $\left(4 \times \frac{\delta_{PWHT}}{25}\right)$  h 两值中的较大者;
- b) 当  $\delta_{PWHT} > 50$  mm 时,为表 1、表 2 中最短保温时间的 4 倍。

4.4.4 Fe-9B 类的钢制焊件,当低于表 2 中的最低保温温度(最多允许降低 55 °C)进行焊后处理时,可按表 3 的规定延长保温时间。

4.4.5 Fe-10I 类焊件焊缝厚度不大于 13 mm 时,焊后热处理既不要求也不禁止,由设计文件确定。

表 3 焊后热处理温度低于规定最低保温温度时的保温时间

比表 1、表 2 规定最低保温温度再降低温度数值/°C	降低温度后最短保温时间/h
$\leq 30$	2 <sup>a</sup>
55	4 <sup>a, c</sup>
80	10 <sup>a, b, c</sup>
110	20 <sup>a, b, c</sup>

<sup>a</sup> 最短保温时间适用于焊后热处理厚度  $\delta_{PWHT} \leq 25$  mm 的焊件。当  $\delta_{PWHT} > 25$  mm 时,厚度每增加 25 mm,保温时间至少应增加 15 min。  
<sup>b</sup> 仅适用于 Fe-1-1 和 Fe-1-2 组。  
<sup>c</sup> 当温度降低值大于 30 °C 时,允许基于温度降低进行时间插值。

4.4.6 在下列条件下,Fe-5B-2 组别焊件焊后热处理温度的限值。

- a) 最低保温温度:
  - 1) 当焊件  $\delta_{PWHT} \leq 13$  mm 时,最低保温温度为 675 °C;
  - 2) 对于异种钢焊接接头,当 Fe-5B-2 组钢材与低铬低合金钢或奥氏体钢或镍基材料焊接时,若采用铬含量标准规定值  $< 3.0\%$  材料或奥氏体或镍基的填充金属,最低保温温度为 705 °C。
- b) 最高保温温度[采用匹配的填充金属(如 EN ISO 3580 中 CrMo91 等)的焊件]:
  - 1) 对于相应的填充金属材料的较低相变温度受合金含量主要是 Ni+Mn 的总量的影响,设置最高保温温度,以避免在亚临界区进行热处理;
  - 2) 当受压元件或压力容器中用相匹配的填充金属制成的多个焊接接头要同时进行焊后热处理,则应根据最高的 Ni+Mn 含量焊缝确定焊后热处理的最高温度;
  - 3) 填充金属中的镍、锰含量为  $Ni+Mn \leq 1.0\%$  时,最高保温温度为 800 °C;
  - 4) 填充金属中的镍、锰含量为  $1.0\% < Ni+Mn \leq 1.2\%$  时,最高保温温度为 785 °C;
  - 5) 采用  $1.20\% < Ni+Mn \leq 1.5\%$  填充金属建造的工作温度不高于 525 °C 的压力容器,最高保温温度为 770 °C。
- c) 对于用与母材化学成分相匹配的填充金属制成的锅炉产品焊接接头,在完成焊接后及任何焊后热处理之前,应将焊接接头冷却至 100 °C 以下。
- d) 焊件的部分温度高于上述允许焊后热处理温度时,应采取下列任一措施:
  - 1) 焊件整体重新进行正火+回火;
  - 2) 若超过表 1 或 b) 规定的最高保温温度,但不超过 800 °C,去除焊缝金属重新焊接;
  - 3) 去除焊件上被加热超过 800 °C 及两侧相邻不小于 75 mm 的部分,重新正火+回火,或更换;

- 4) 若被加热到比上述允许温度更高,制造商应按现场焊接工艺规程焊接试板,在超出表 1 的最高保温温度限制的类似的温度下进行热处理(准确模拟产品元件超温的热过程),然后在上述规定的温度范围内和时间内进行最终热处理,并经检验验证在设计温度下该材料(包括焊接接头)的许用应力可达到 9Cr 马氏体耐热钢或同等产品,方可实施本条款规定。制造商数据报告中应注明本条款的使用情况。

4.4.7 焊后热处理的保温时间,可以在一次热处理过程中完成,也可以是在相同保温温度下,多次热处理过程的保温时间累计。

4.4.8 在保温时除另有规定外,任何一处测温点的温度允许偏差在热处理工艺规定温度的 $\pm 20^\circ\text{C}$ 内,但不应超出规定的限值。

4.4.9 调质钢制焊件焊后热处理温度不应高于回火温度,正火加回火钢制焊件焊后热处理温度不宜高于回火温度。对于某些抗回火能力较强的材料或者是壁厚特别大的材料,例如 Fe-5B-2 组别材料等,其焊后热处理温度可与回火温度基本相同。

4.4.10 不同类别材料相焊时,应根据使材料性能适用于预期工况,确定焊后热处理的温度和保温时间。容器不同钢号钢材相焊时,焊后热处理温度宜按焊后热处理温度较高的钢号执行,但温度不应超过两者中任一钢号的下相变点  $A_{C1}$ ;锅炉不同类别组别钢材相焊时,焊后热处理温度见表 4。

表 4 锅炉受压元件不同类别、组别母材焊接的推荐焊后热处理温度

单位为摄氏度

母材类别、组别	Fe-1	Fe-3-1	Fe-3-3	Fe-4-1	Fe-4-2	Fe-5A	Fe-5B-2	Fe-8 <sup>a</sup>
Fe-1	b	600~705	600~640	650~705	680~710	680~710	c	600~705
Fe-3-1	...	b	600~640	650~705 <sup>d</sup>	680~705 <sup>d</sup>	680~705 <sup>d</sup>	c	600~705
Fe-3-3	...	...	b	c	c	c	c	600~640
Fe-4-1	...	...	...	b	680~730	680~730	c	650~730
Fe-4-2	...	...	...	...	b	680~760	705~760	680~760
Fe-5A	...	...	...	...	...	b	705~775	680~775
Fe-5B-2	...	...	...	...	...	...	b	705~785
Fe-8 <sup>a</sup>	...	...	...	...	...	...	...	b

<sup>a</sup> 当某些奥氏体不锈钢在  $540^\circ\text{C} \sim 845^\circ\text{C}$  暴露一段时间时,可能发生敏化。敏化涉及沿晶界的碳化铬沉淀,可在使用过程中导致晶间腐蚀。可考虑通过使用低碳或稳定型不锈钢;或在非不锈钢部分采用镍基焊材堆焊并在完成异种金属焊缝之前进行焊后热处理,从而后续不再进行焊后热处理,以减少敏化作用。

<sup>b</sup> 见表 1。

<sup>c</sup> 较高组别的最低焊后热处理温度可能会超过较低组别的临界温度,宜考虑对这些材料组合进行单独的焊接工艺评定。

<sup>d</sup> 可采用更高的热处理温度,但不应超过两者中任一钢号的下相变点  $A_{C1}$ 。

4.4.11 当免除焊后热处理时,焊接接头的每种材料均应分别满足所对应焊件类别、组别材料的免除条件。

4.4.12 Fe-4 或 Fe-5A 类锅炉用钢管角焊缝、部分焊透焊缝和管壁上的全焊透焊缝,与较低类别、组别材料的集箱焊接时,若钢管满足铬含量标准规定值不大于 3.0%、公称直径不大于 100 mm(DN 100)、壁厚不大于 13 mm 且碳含量标准规定值不大于 0.15%时,可按表 1 规定较低类别组别温度进行焊后热处理。

4.4.13 非受压元件与受压元件相焊时,应按受压元件的焊后热处理规定执行。

4.4.14 对有再热裂纹倾向的钢材,在焊后热处理前应采取措施防止产生再热裂纹。

4.4.15 炉内焊后热处理工艺参数的通用限值(焊件和材料的升温速率或冷却速率应由制造商确定。这些速率应足以防止在焊后热处理期间在焊件中引起变形、残余应力、开裂和其他有害影响。加热和冷却速率应基于材料、厚度、焊接结构,可参考其他规范和标准,也可通过工程分析来确定)。

- a) 焊件入炉时,炉内温度应不高于 400 °C。
- b) Fe-1、Fe-3、Fe-4、Fe-5A、Fe-5B-1、Fe-5B-2、Fe-5C 和 Fe-6 焊件升温至 400 °C 后,加热范围内升温速率应不大于  $\frac{5\ 500}{\delta}$  °C/h,且不超过 220 °C/h;换热管与管板间焊接接头(没有其他元件)在高于 400 °C 时,升温速率应不大于 140 °C/h;当计算的升温速率不大于 55 °C/h,可按不超过 55 °C/h 控制升温速率;对于锅炉产品焊件  $\delta_{PWHT}$  不小于 50 mm 时,400 °C 以上的升温速率宜不大于  $\frac{8\ 500}{\delta}$  °C/h,且应不超过 335 °C/h。
- c) 保温期间,加热范围内最高与最低温度之差应不大于 80 °C。
- d) 升温 and 保温期间应控制加热范围内气氛,防止焊件表面过度氧化。
- e) Fe-1、Fe-3、Fe-4、Fe-5A、Fe-5B-1、Fe-5B-2、Fe-5C、Fe-6 等焊件温度高于 400 °C 时,加热范围内冷却速率应不大于  $\frac{7\ 000}{\delta}$  °C/h,且应不大于 280 °C/h;无其他部件的管子与管板焊缝在高于 400 °C 时,冷却速率应不大于 140 °C/h;对于锅炉产品焊件  $\delta_{PWHT}$  不小于 50 mm 时,400 °C 以上时的冷却速率宜不大于  $\frac{8\ 500}{\delta}$  °C/h,且应不超过 335 °C/h。
- f) Fe-7、Fe-10I 类焊件温度高于或等于 650 °C 时,冷却速率应不大于 55 °C/h;冷却至低于 650 °C 后,应以液体淬火或其他快冷方式降温到 400 °C 以下以防止脆化。Fe-10H 类保温后,应以液体淬火或通过其他方式快速冷却。
- g) 升温、冷却期间,压力容器焊件温度高于 400 °C 时,加热范围内任意长度为 4 600 mm 范围内的温差应不大于 140 °C;锅炉焊件当温度高于 500 °C 时,加热范围内任意长度为 4 600 mm 范围内的温差应不超过 100 °C。
- h) 锅炉焊件的升温 and 冷却速率均可不低于 55 °C/h。
- i) 焊件温度冷却至 400 °C 以下时,应在静止的空气中冷却。

4.4.16 炉外焊后热处理工艺参数的通用限值:

- a) 炉外焊后热处理工艺与炉内焊后热处理工艺相同;
- b) 加热区域冷却时,待均温带所示范围内温度低于 400 °C 后(不含 Fe-7 和 Fe-10I),才能在静止的空气中冷却。

4.4.17 Fe-10I 类焊件:

- a) 在 650 °C 以上时,冷却速率不应大于 55 °C/h;至 650 °C 以下后应快速冷却,以防止脆化。
- b) 对于合金 019Cr25Mo4Ni4NbTi(S12562),应适用铁素体不锈钢的规则,若需要进行焊后热处理,最低温度为 1 010 °C,保温后需快速冷却至 400 °C 以下。

4.4.18 Fe-5B-2 类焊件局部焊后热处理采用电阻加热。

- a) 均温带宽度:
  - 1) 当公称直径不大于 100 mm(DN100)时,焊缝两侧各  $1.5\delta$ ;
  - 2) 当公称直径大于 100 mm(DN100)且不大于 200 mm(DN200)时,焊缝两侧各  $6\delta$ ;
  - 3) 当公称直径大于 200 mm(DN200)时,焊缝两侧各  $10\delta$ 。
- b) 加热带宽度为均温带两侧各加  $4\delta_{PWHT}$ ;且加热带外缘的温度在加热、保温和冷却期间应不低于均温带边缘温度的一半。

- c) 梯度控制带宽度为加热带两侧各加  $4\delta_{\text{PWHT}}$ 。
- d) 在加热和冷却期间,加热带内的温差应不超过  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- e) 温度高于  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,加热速率应不超过  $5\ 500/\delta\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,且应不超过  $220\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。
- f) 温度高于  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冷却速率应不超过  $7\ 000/\delta\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,且应不超过  $280\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

## 5 设备、仪表和测温器材

### 5.1 加热设备

5.1.1 根据焊后热处理方式的不同,选用不同的加热设备,整体焊后热处理宜选用热处理炉和内燃法热处理系统。局部焊后热处理宜选用远红外加热器、卡式热处理炉、电磁感应加热器和柔性陶瓷电阻加热器等设备。

5.1.2 焊后热处理前,应对加热设备的能力进行评价,加热设备的能力应与所实施的热处理工艺相适应。应定期维护并在热处理前检查热源,当加热设备出现故障,若更换热源可行,则可采用备用热源,以部分或完全补偿失效的热源,否则,应重新进行热处理。

5.1.3 热处理炉应符合以下规定。

- a) 不使用煤或焦炭作为燃料。
- b) 设计炉膛时防止火焰直接喷烧焊件。
- c) 采用程序控制器或计算机等自动化方式控制焊后热处理过程,炉内温度及升(降)温速率范围可调控。
- d) 炉内用于加热焊件的介质充分流动。
- e) 在热处理过程中,炉内适时保持正压。
- f) 炉内加热区域气氛可控,防止焊件表面过度氧化。
- g) 配备温度测量、控温和报警系统,温度能够自动记录。
- h) 至少规定下列技术要求:
  - 1) 额定装载量;
  - 2) 炉内装载空间的尺寸;
  - 3) 入炉装载规定;
  - 4) 额定装载量时最大升温速率;
  - 5) 额定装载量时最大冷却速率;
  - 6) 控温仪表准确度级别;
  - 7) 测温仪表准确度级别。
- i) 有产品说明书和操作手册。

5.1.4 内燃法热处理系统应符合以下规定。

- a) 在热处理过程中,对被加热设备无深度氧化、脱碳、增碳和腐蚀等有害的影响。
- b) 保证被加热件受热均匀,必要时设置保证均匀加热的辅助装置。
- c) 不使用煤或焦炭做燃料。
- d) 加热装置能够保证持续供热,并可调节、控制热量的大小,防止加热介质直接喷射焊件。
- e) 配备温度测量、控温和报警系统,温度自动记录。
- f) 采用程序控制器或计算机等自动化方式控制焊后热处理过程,炉内温度及升(降)温速率范围可调控。
- g) 配备便于烟气排放及热气流动的烟道或排烟装置。

5.1.5 远红外辐射加热器应符合以下规定。

- a) 至少规定下列技术要求:

- 1) 额定工作电压、额定频率;
  - 2) 加热器工作温度范围和表面温度分布;
  - 3) 辐射面电功率密度;
  - 4) 工作寿命;
  - 5) 加热器升温时间。
- b) 配备温度测量、控温和报警系统,温度能够自动记录,并进行全过程自动控制。
  - c) 加热装置能够保证持续供热,并可调节、控制热量的大小。
  - d) 有产品说明书、产品合格证。
- 5.1.6 电阻加热器应符合下列规定。
- a) 至少规定下列技术要求:
    - 1) 电阻丝的单丝直径、股数;
    - 2) 额定工作电压、额定功率;
    - 3) 加热器的有效尺寸;
    - 4) 最高允许工作温度。
  - b) 配备温度测量、控温和报警系统,温度能够自动记录,并进行全过程自动控制。
  - c) 有产品说明书、产品合格证。
- 5.1.7 感应加热设备应符合以下规定。
- a) 至少规定下列技术要求:
    - 1) 电源参数(总安装容量、相数、功率、频率、电压);
    - 2) 加热设备的有效尺寸;
    - 3) 最高允许工作温度;
    - 4) 加热设备的额定功率、额定频率、额定电压。
  - b) 感应加热电源具有谐振频率自动跟踪、恒温闭环、输出功率可自动调节功能,并符合工艺要求。
  - c) 感应加热电源具有电流衰减退磁功能,焊件不留剩磁。
  - d) 感应加热器线圈选用电阻小、热导率高的材料。
  - e) 配备温度测量、控温和报警系统,温度能够自动记录,并进行全过程自动控制。
  - f) 对具有明显尖角效应影响的焊件,不可采用中频感应加热设备。
- 5.1.8 卡式炉加热应符合以下规定。
- a) 包括炉体、燃烧系统、排烟调压系统和导流系统。
  - b) 加热燃烧系统的高速调温烧嘴布置,能保证烧嘴燃烧形成围绕筒体环向流动。
  - c) 配备温度测量、控温和报警系统,温度能够自动记录;并进行全过程自动控制。
  - d) 采用程序控制器或计算机等自动化方式控制焊后热处理过程,炉内温度及升(降)温速率范围可调控。

## 5.2 测温、控温仪表和测量系统

5.2.1 测量系统一般由测温、控温、记录仪表、温度控制器和补偿导线组成。

5.2.2 焊后热处理所使用的热电偶、补偿导线的制造厂应具有相应资质,所使用的热电偶、补偿导线应有质量证明文件。

5.2.3 焊后热处理所使用的温度控制器和记录仪应符合相应标准,并有质量证明文件和说明书,应按标准规定经计量检验合格,使用前,按规定进行校准。

5.2.4 为保证测温、控温和记录仪表以及测量系统精度,温度测量控制系统应在校验有效期内,按相关要求规定的间隔时间进行校准/校验。

### 5.3 热处理炉有效加热区的测定

5.3.1 热处理炉应按附录 D 的规定测定有效加热区,有效加热区示意图宜置于热处理炉的明显位置。热处理炉有效加热区的炉温均匀性一般为 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.3.2 热处理炉有效加热区检测周期一般为 6 个月,经连续 3 个周期检测合格、正常使用的热处理炉,其检测周期可延长至 1 年,大修或改造后的热处理炉首次使用前应进行有效加热区测定。

5.3.3 对于临时炉、现场炉、快装炉、卡式炉等不在固定场所使用的热处理炉应在搭建后,首次使用前应按照附录 D 进行有效加热区的测定。

## 6 技术准备

6.1 炉内整体焊后热处理和局部焊后热处理时,焊后热处理工艺规程的主要内容包括:

- a) 所依据标准、设计文件及合同规定的要求;
- b) 焊件基本状况:名称、编号、结构、尺寸、材料、厚度及重量;
- c) 焊后热处理热工计算(当超出热处理炉规定时);
- d) 焊件热变形预防及控制措施;
- e) 焊后热处理方式与方法;
- f) 焊后热处理参数:入炉温度、升温速率、保温温度、保温时间、冷却速率和出炉温度;
- g) 热处理设备名称;
- h) 局部热处理时,加热带、均温带、梯度控制带的宽度及布置方式;
- i) 热电偶的数量及布置位置和方式;
- j) 其他技术要求。

6.2 炉外整体焊后热处理(含炉外整体分段焊后热处理)的焊后热处理工艺规程,必要时应组织专家审查。焊后热处理工艺规程的主要内容包括:

- a) 所依据标准、设计文件及合同规定的要求;
- b) 焊件基本状况:名称、编号、位号、结构、尺寸、材料、厚度及重量;
- c) 焊件总体及各部分焊后热处理热工计算;
- d) 焊件热变形预防及控制措施;
- e) 焊后热处理加热方法、加热器名称、型号、规格、数量及放置位置;
- f) 焊后热处理用辅助装置(如导流伞)及安装;
- g) 焊后热处理参数:焊后热处理厚度( $\delta_{\text{PWHT}}$ )、升温速率、保温温度、保温时间、冷却方法与冷却速率;
- h) 保温材料品种、规格及铺设方法;
- i) 控温装置、测温仪表名称、型号及数量;
- j) 热电偶、补偿导线型号及数量;
- k) 测温点布置、数量,测温仪表与焊件连接方法;
- l) 焊后热处理工艺程序及技术要求,均温及控温要求、冷却方式。

6.3 拆除焊件上与焊后热处理无关的非永久连接件。

6.4 焊件的密封面、螺钉孔等精加工表面,应采取有效措施,防止高温氧化。

6.5 进行炉外焊后热处理时,加热设备具有足够的功率储备。

6.6 焊件应完成各项检验、检测且全部合格后,在耐压试验前进行焊后热处理。

6.7 掌握天气状况,做好防风、防雨、防雪准备。

7 加热和控温

7.1 技术要求

7.1.1 当进行炉内焊后热处理时,根据焊件的技术要求,选用 GB/T 9452 规定的相应类别的热处理炉,焊件应放置在有效加热区范围内。

7.1.2 采用内部加热法进行焊后热处理时,焊件内高温气体需充分流动,焊后热处理过程中适时保持微正压。

7.1.3 加热介质应防止直接喷射焊件。

7.1.4 加热介质不应使焊件表面产生超过技术文件规定深度的氧化、脱碳、增碳和腐蚀。

7.2 仪表

7.2.1 记录在焊后热处理报告中的温度数值或曲线,需采用热电偶测量提供,选用热电偶时重点考虑其适用的使用温度范围以及与控温、记录仪表的匹配,热电偶技术要求见表 5。

表 5 常用的热电偶技术要求

名称	分度号	等级	使用温度 ℃	允许偏差 ℃
铂铑 10~铂	S	I	0~1 100	±1
		II	600~1 600	±0.25% <i>t</i>
镍铬~镍硅	K	I	375~1 000	±0.4% <i>t</i>
		II	333~1 200	±0.75% <i>t</i>
镍铬~铜镍(康铜)	E	I	375~800	±0.4% <i>t</i>
		II	333~900	±0.75% <i>t</i>

注：*t* 为被测温度的绝对值。

7.2.2 焊后热处理装置的温度测量系统在正常使用状态下,应定期做系统校验。校验时,检测热电偶、测温热电偶和控温热电偶的热端距离应靠近。校验应在热处理装置处于热稳定状态下进行,温度测量的系统校验允许温度偏差范围为±3℃。

7.2.3 热电偶补偿导线应符合 GB/T 4989 和 GB/T 4990 的精密级的规定,可根据热电偶分度号和使用环境温度按表 6 选用补偿导线。

表 6 推荐选用的热电偶补偿导线

热电偶分度号	补偿导线型号	补偿导线名称	代号	使用环境温度范围 ℃	允差 ℃
S	SC	铜~铜镍 0.6 补偿型导线	SC~GS	0~100	±2.5
K	KX	镍铬 10~镍铬 3 延长型导线	KX~GS	20~100	±1.1
E	EX	镍铬 10~铜镍 45 延长型导线	EX~GS	20~100	±1.0

## 8 测温

### 8.1 整体热处理测温点及布置

8.1.1 测温点应布置在焊件的温度容易变化部位、产品焊接试件和特定部位(如均温带边界、炉内每个加热区、炉门口、进风口、加热介质出口、烟道口、焊件壁厚突变处、分段加热的接合部以及加热介质流经途中的“死角”等)。

8.1.2 当热处理炉中有多于一台(件)焊件时,应在炉内顶部、中部和底部的焊件上以及预期温度最高、最低处设置测温点。

8.1.3 测温点应均布在焊件表面,相邻测温点沿壳体轮廓线测量的间距不超过 4 600 mm,测温点按图 1 布置成三角形排列,三角形顶点设置热电偶。

单位为毫米

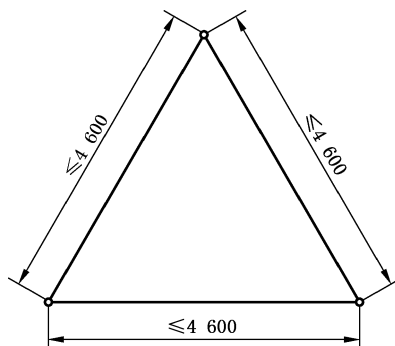


图 1 热电偶布置间距图

8.1.4 重要部位的测温点可增加备用热电偶。

8.1.5 测温点数量及其布置应在焊件图样或示意图中标示。

### 8.2 局部热处理测温点及布置

8.2.1 测温点应双侧布置在焊缝中心线、均温带边缘、加热带边缘、预期温度最高点和最低点。因结构限制无法双侧布置测温点时,可单侧布置测温点。

8.2.2 环缝局部热处理测温点数量见图 2。此外,同一圆周截面测温点布置宜符合 8.1.3 的规定。

- a) 当筒体公称直径  $< 300$  mm,在 C 截面布置测温点;当  $300$  mm  $\leq$  公称直径  $< 750$  mm,在 B、C、D 截面布置测温点;当公称直径  $\geq 750$  mm,除 B、C、D 截面布置测温点外,A 或 E 截面温度宜参考附录 B。
- b) 焊件存在厚度或组件几何形状的差异、结构复杂,散热严重时,测温点数量宜多于建议的最小测温点数量。
- c) 若  $W_{HB}$  和  $W_{SB}$  之差小于 150 mm,则 A、B、D、E 截面可不布置测温点。

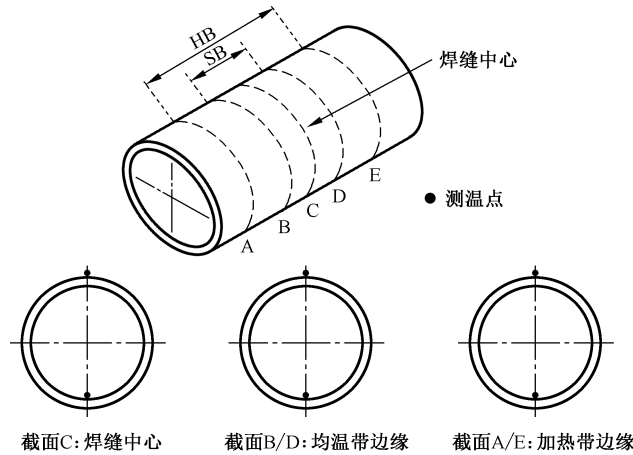


图2 环缝局部热处理最少测温点数量布置示意图

8.2.3 接管与筒体焊缝局部热处理测温点最少数量、布置可参考图3。除满足图3的要求外,同一圆周截面测温点数量还宜符合8.1.3的规定。

- a) 当筒体公称直径 $<300\text{ mm}$ ,C截面布置测温点;当 $300\text{ mm}\leq$ 公称直径 $<750\text{ mm}$ ,在C、D截面布置测温点;当公称直径 $\geq 750\text{ mm}$ ,除在B、C、D、E、G、H截面布置测温点外,A或F,I或J截面温度参考B.4.1或B.4.2。
- b) 工件存在厚度或组件几何形状的差异、结构复杂,散热严重时测温点数量宜多于建议的最小测温点数量。
- c) 若 $W_{HB}$ 和 $W_{SB}$ 之差小于 $150\text{ mm}$ ,则B、D、E、G、H截面可不布置测温点。

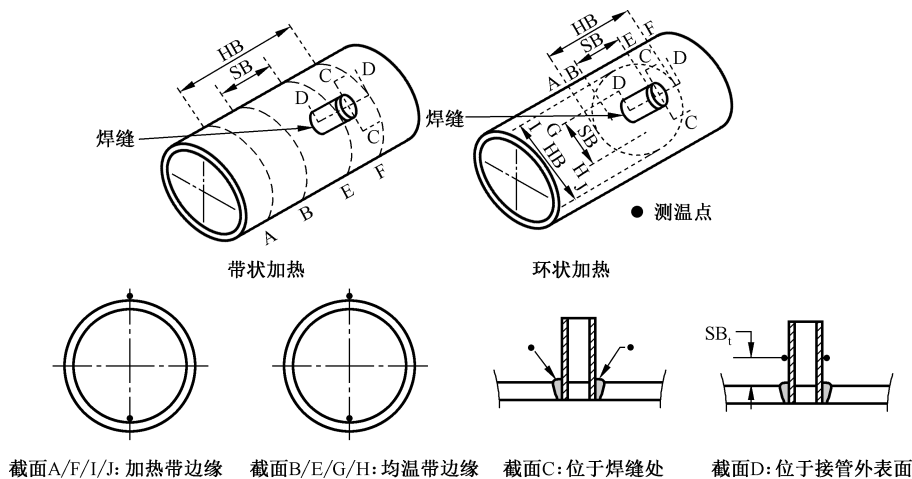


图3 接管与筒体连接焊缝局部热处理最少测温点数量布置示意图

### 8.3 热电偶焊件连接

当采用焊接方法(如电容储能点焊)连接热电偶与焊件时:

- a) 可不进行焊接工艺评定,但宜编制焊接工艺卡;
- b) 热电偶两条线端点分开约 $10\text{ mm}$ 后分别与焊件施焊;
- c) 焊接输出能量应限制在 $125\text{ W}\cdot\text{s}$ 以内;
- d) 点焊接头可不进行焊后热处理;

e) 热电偶拆除后,点焊接头部位需经打磨处理,打磨时避免损伤母材,必要时进行表面检测。

#### 8.4 温度测量及记录

8.4.1 在焊后热处理保温期间,整体焊后热处理的焊件上任一点温度、局部焊后热处理焊件均温带所示体积范围内任一点温度,都应在规定范围内。

8.4.2 为防止电偶故障,宜布置备用热电偶。

8.4.3 焊后热处理温度以在焊件上直接测量为准。

8.4.4 在焊后热处理过程中,焊件温度在 400 °C 以上时,应当连续自动显示、记录、储存、打印。记录图(表)上应能够区分每个测温点的温度与时间,并能追溯与每个测温热电偶的对应关系。

8.4.5 连续自动记录仪安装的记录纸,应与记录仪分度号标尺相匹配。

8.4.6 采用计算机系统记录、显示的热处理记录,系统相对误差应小于 0.5%;计算机系统需要在后台实时记录温度数据写入日志,避免人为修改。

8.4.7 与计算机连接的温度测量系统,宜有冷端温度自动补偿装置,其显示温度应以自动记录仪的显示温度为准进行调整。

8.4.8 当使用电子记录系统(炉子控制、记录、监测或数据采集)时,系统应满足下列要求。

- a) 系统创建的是一次性写入的、只读的且检测后才能修改的电子记录。
- b) 系统软件和再现功能可提供检查、分析和编辑记录数据的方法,但不提供任何修改原始数据的方法。
- c) 系统能生成精确和完整的记录拷贝,既可人工读取又适合检查、审查和拷贝的电子表格。
- d) 在整个记录保存期间,系统支持已校准的记录的的保护,保存和取回。在整个按规定的保存周期期间,硬件和软件正常工作。
- e) 系统提供限制方法(如口令),仅有经过书面授权的个人才可进入系统。

8.4.9 焊后热处理记录包括:测温、控温、记录仪表和测量系统精度的校准/校验记录,热处理炉有效加热区检定报告,焊后热处理时间-温度连续自动记录等。记录保存期限应不小于承压设备设计使用年限。

#### 9 保温

9.1 保温材料应能在焊后热处理温度和保温时间内保持原有性能,不降低保温效果。

9.2 保温材料应符合相应标准和订货技术条件要求,产品应有质量证明书和使用说明书。

9.3 选用保温材料时宜重点关注材料的热传导性和最高使用温度,对操作人员呼吸系统健康安全和伤害,以及成本。

9.4 保温材料不应含有对焊件有害的元素与杂质,宜采用硅酸铝纤维及其制品、高硅氧布、无碱玻璃纤维布等人造玻璃纤维。

9.5 保温材料在整个焊后热处理过程中应贴紧焊件表面,防止松动脱落。保温材料在焊件上铺设时,单层采用搭接方式,多层之间的接缝应错开,相邻两块保温材料搭接宽度要大于 100 mm。

9.6 采用内部加热法进行焊后热处理时,焊件外侧按壁厚、附件、接管尺寸特点分别采取保温措施。对于与焊件连接的支柱或裙座,其保温范围自连接处延伸至少 1 000 mm。

9.7 工件外壁保温材料厚度宜大于 60 mm。若采用感应加热热处理,外壁保温材料厚度不宜超过 100 mm,并在预期温度最低处使用额外的保温材料。

9.8 设备结构允许情况下,内壁应布置保温材料。设备壁厚小于 50 mm 时,保温材料不宜小于 60 mm;壁厚大于或等于 50 mm 时,外壁保温材料厚度不宜小于 60 mm,内壁保温材料厚度推荐 80 mm~150 mm。

9.9 保温层外表面温度不宜高于 60 ℃。

## 10 焊后热处理报告

10.1 焊后热处理报告主要内容(可选)如下。

- a) 焊后热处理炉次顺序号。
- b) 焊件名称、图号、编号、零件代号及位号,焊后热处理工艺规程编号。
- c) 焊后热处理合同号或委托书编号。
- d) 焊后热处理类型,加热方式,加热方法及辅助装置。
- e) 焊件结构图、尺寸、钢材牌号、厚度。
- f) 焊后热处理炉名称,编号及所在位置。
- g) 加热器名称、型号及编号;控温仪表和测温仪表(含热电偶及补偿导线)名称、型号及编号;保温材料名称、厚度。
- h) 测温点数量和布置图。
- i) 焊后热处理工艺:焊后热处理厚度( $\delta_{PWHT}$ )、入炉温度、升温速率、保温时间(按各测温点分别统计)、出炉温度、冷却方法与冷却速率。
- j) 焊后热处理的时间-温度数据连续自动记录。当记录图(表)不能区分每个测温点的数值时,还要提供各测温点的巡检时间-温度记录。
- k) 焊后热处理时间、地点及气象条件。
- l) 焊后热处理操作人员及责任人员签字。

10.2 炉外整体焊后热处理(含炉外整体分段焊后热处理)记录示例见附录 E。

## 11 热处理效果的评价

### 11.1 适用性

当需要时,如疲劳工况、应力腐蚀环境、现场返修等承压设备,经供需双方协商,可进行焊后热处理效果评价。

### 11.2 评价内容及测试方法

在控制焊接热处理过程及产品焊接试件评价的基础上,根据供需双方协商,可选择硬度、强度、金相或残余应力等内容对焊后热处理效果进行评价。测试方法可参照附录 G。

### 11.3 测试时机和测点布置

11.3.1 宜采用热处理前、后比对测试的方式评价热处理消除焊接残余应力效果。

11.3.2 残余应力测试宜在无损检测之后实施。

11.3.3 被测试对象的摆放、支撑方式和位置、测试角度宜相同。热处理前后的相应测点宜在相近位置,相应测点的测试方法、设备及设定参数宜保持相同。

11.3.4 测试点区域应无明显划痕,宜包括焊缝、热影响区、邻近焊缝的母材等测点。必要时可适当增加测试点。

### 11.4 评价报告

11.4.1 评价报告可包括以下内容:

- a) 母材和焊接材料的牌号;

- b) 焊件的名称及规格尺寸；
- c) 热处理方式；
- d) 热处理执行文件编号；
- e) 测试部位、测试方法和设备等信息；
- f) 相关指标的测试结果；
- g) 测试检验标准编号。

11.4.2 焊后热处理效果评价报告(示例)见附录 H。



附录 A

(资料性)

焊后热处理厚度( $\delta_{PWHT}$ )示图

A.1 本附录对不同厚度受压元件相焊时,焊后热处理厚度( $\delta_{PWHT}$ )取值举例图示。

A.2 两相邻对接受压元件中, $\delta_{PWHT}$ 取其较薄一侧母材厚度,即图 A.1 中  $\delta_{n2}$ 。

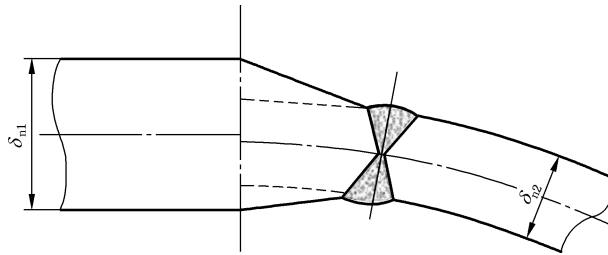
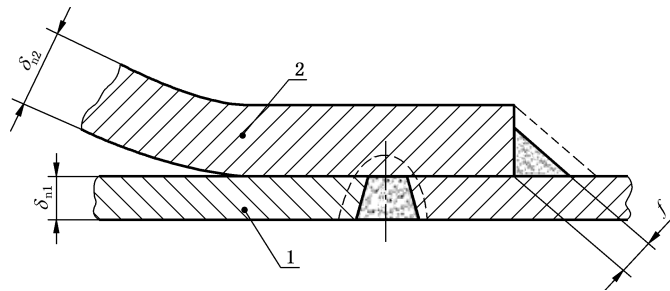


图 A.1 不等厚受压元件对接

A.3 筒体内封头结构, $\delta_{PWHT}$ 则取筒体厚度和角焊缝厚度中较大者,即图 A.2 所示  $\delta_{n1}$  和  $f$  中较大者。



标引序号说明:

1——筒体;

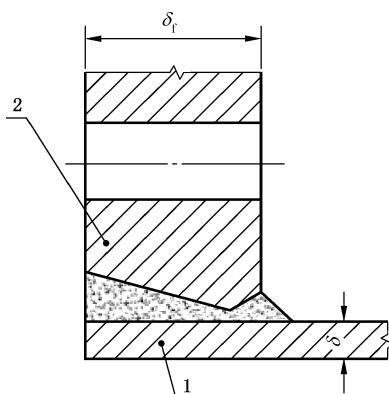
2——封头。

图 A.2 筒体内封头

A.4 在筒体上焊接管板、平封头、盖板、凸缘或法兰时, $\delta_{PWHT}$ 取值举例。

a) 筒体与法兰全焊透结构符合图 A.3 时, $\delta_{PWHT}$ 取法兰厚度  $\delta_f$ ,即图 A.3 所示  $\delta_f$ 。



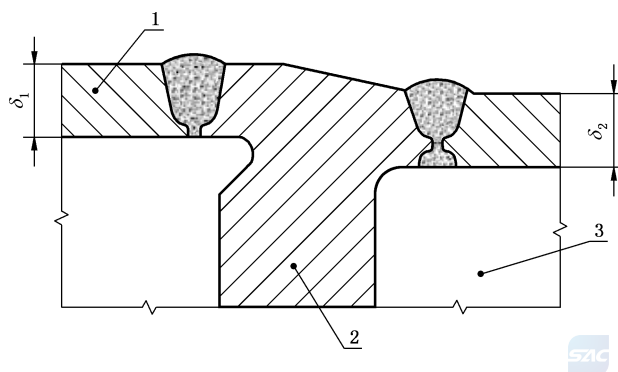


标引序号说明：

- 1——筒体；
- 2——法兰。

图 A.3 筒体焊接法兰

b) 在筒体上焊接管板时,  $\delta_{PWHT}$  取筒体母材厚度  $\delta_1$  和  $\delta_2$  中较大者, 如图 A.4 中所示。

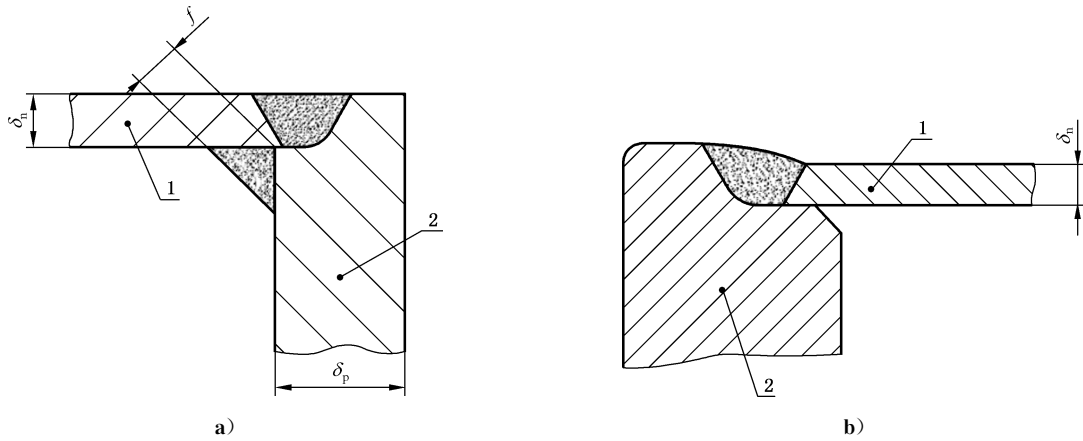


标引序号说明：

- 1——筒体；
- 2——管板；
- 3——管箱。

图 A.4 筒体上焊接带管箱的管板

c) 在筒体上焊接平封头时,  $\delta_{PWHT}$  取筒体母材厚度  $\delta_n$ , 如图 A.5 中所示。

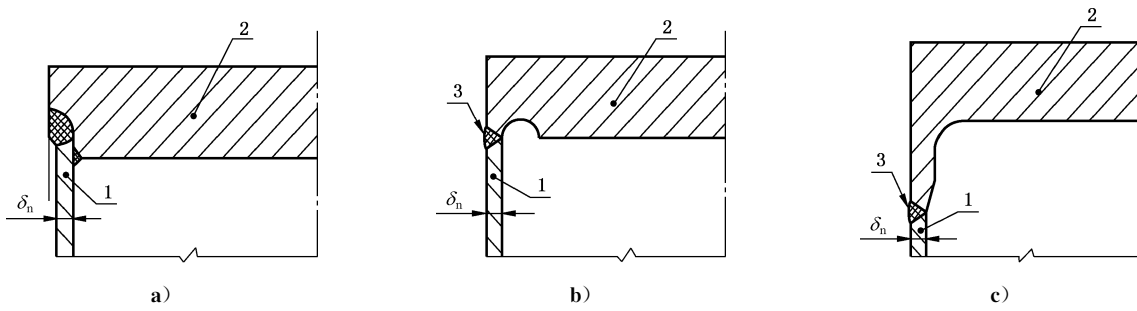


标引序号说明：

- 1——筒体；
- 2——平封头。

图 A.5 筒体上焊接平封头

d) 在筒体上焊接盖板时,  $\delta_{PWHT}$ 取筒体母材厚度  $\delta_n$ , 如图 A.6 中所示。



标引序号说明：

- 1——筒体；
- 2——盖板；
- 3——颈部焊缝。

图 A.6 筒体上焊接盖板

e) 在筒体上焊接凸缘时,  $\delta_{PWHT}$ 取筒体母材厚度, 即图 A.7 中  $\delta_n$ 。

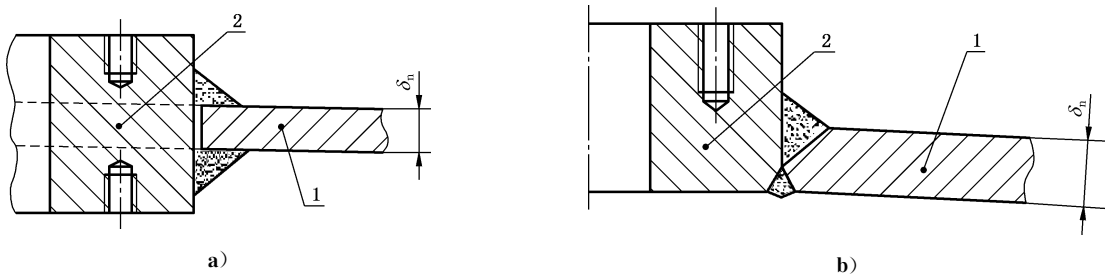
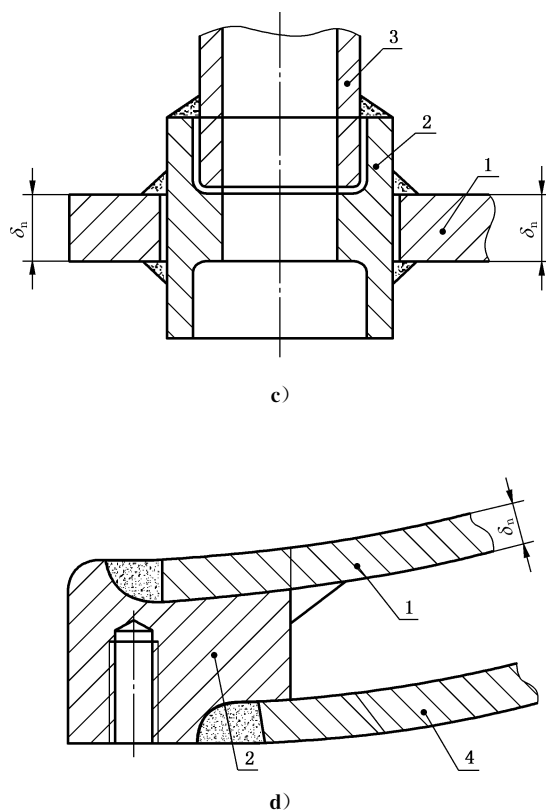


图 A.7 筒体上焊接凸缘

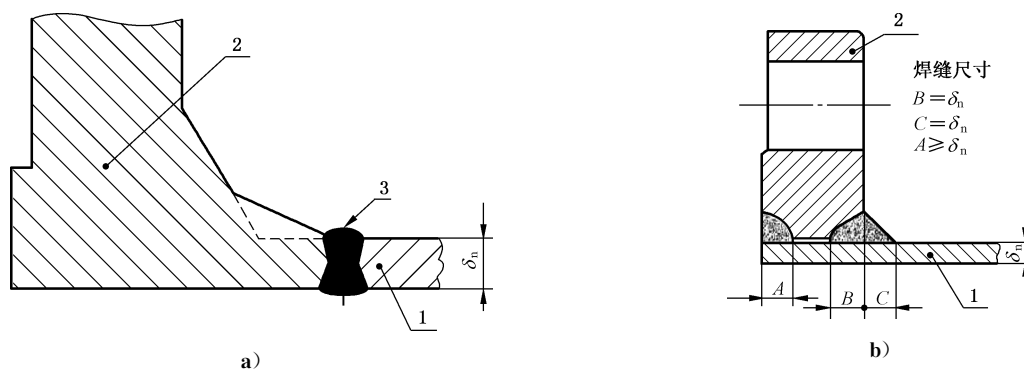


标引序号说明：

- 1——筒体；
- 2——凸缘；
- 3——接管；
- 4——夹套。

图 A.7 筒体上焊接凸缘（续）

f) 在筒体上焊接法兰时,  $\delta_{PWHT}$  取筒体母材厚度, 即图 A.8 中  $\delta_n$ 。

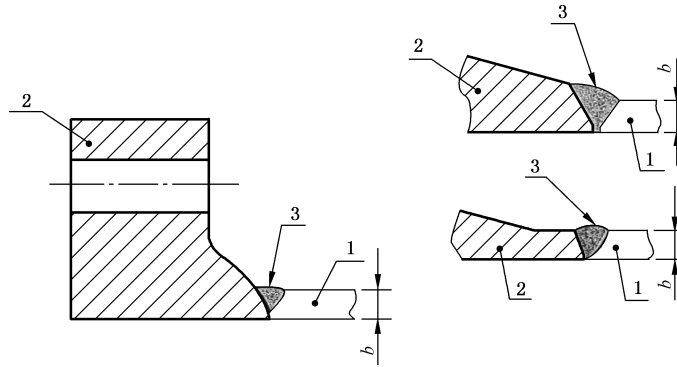


标引序号说明：

- 1——筒体；
- 2——法兰；
- 3——法兰颈焊缝。

图 A.8 筒体上焊接法兰

A.5 接管与法兰相焊时,  $\delta_{PWHT}$  取接管颈在接头处的焊缝厚度(焊缝余高不计), 即图 A.9 中  $b$ 。



标引序号说明:

- 1——接管;
- 2——法兰;
- 3——接管颈焊缝。

图 A.9 接管与法兰相焊

A.6 当非受压元件与受压元件相焊时,  $\delta_{PWHT}$  取焊接处的焊缝厚度, 即图 A.10 a)、图 A.10 b)、图 A.10 c) 中  $b$  与  $f$  中较大值; 图 A.10 d)、图 A.10 e) 中  $f$ 。

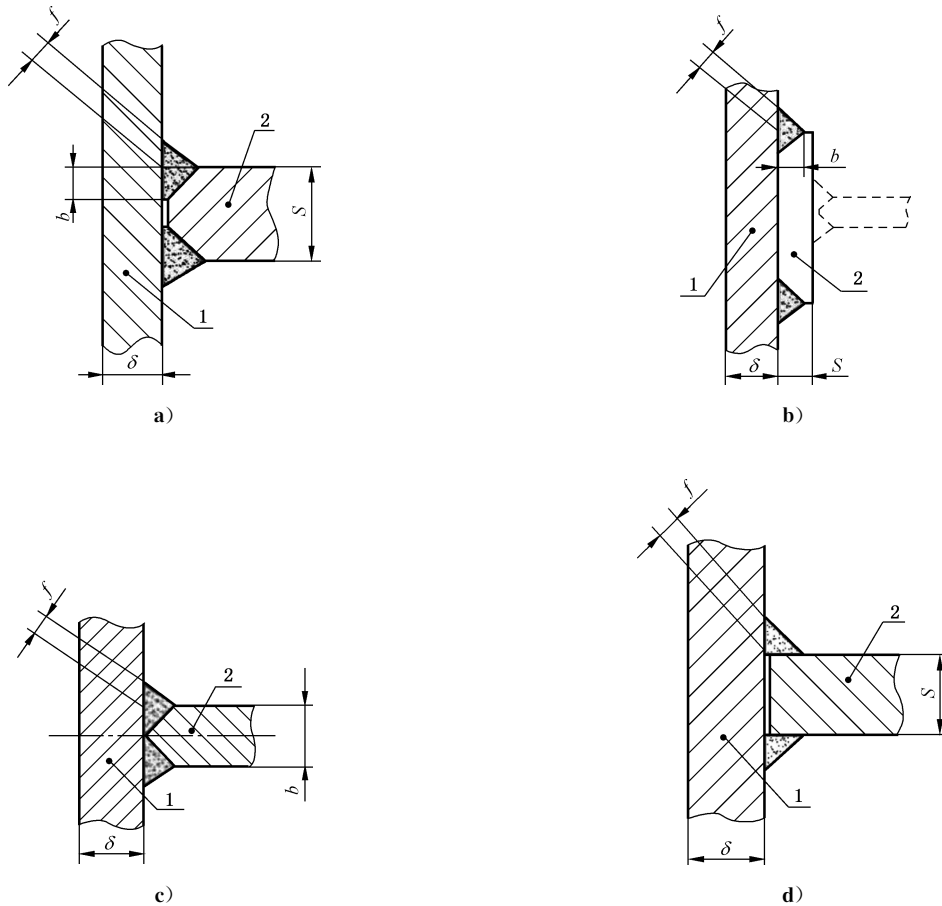
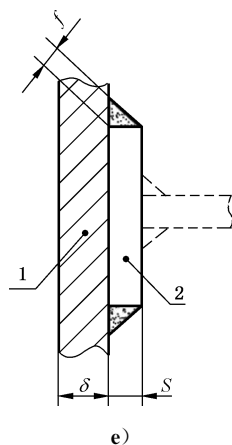


图 A.10 非受压元件与受压元件相焊



标引序号说明：  
 1——受压元件；  
 2——非受压附件。

图 A.10 非受压元件与受压元件相焊（续）

A.7 热处理后焊缝返修时， $\delta_{PWHT}$  取其所返修填充的焊缝金属厚度  $\delta_w$  如图 A.11 所示。

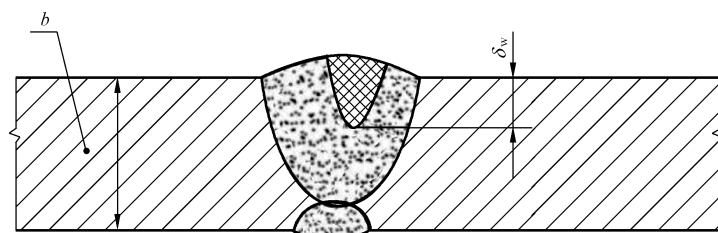


图 A.11 焊接返修图

标引序号说明：  
 $b$  ——原筒壁焊缝厚度；  
 $\delta_w$  ——返修填充的焊缝金属厚度。

**附录 B**  
(资料性)  
**单加热局部焊后热处理**

**B.1 筒体局部热处理**

筒体局部热处理时,加热带环绕包括均温带在内的筒体全圆周。若不产生有害的温度梯度,在离开均温带较远处,可减小加热带的宽度或降低其温度。均温、加热和保温范围如图 B.1 所示。

**B.2 均温带、加热带和梯度控制带**

均温带所示体积范围内任意一点温度均符合焊后热处理工艺的规定。加热带保证均温带所示体积范围的温度值,梯度控制带则保证热效率,并防止产生有害的温度梯度。

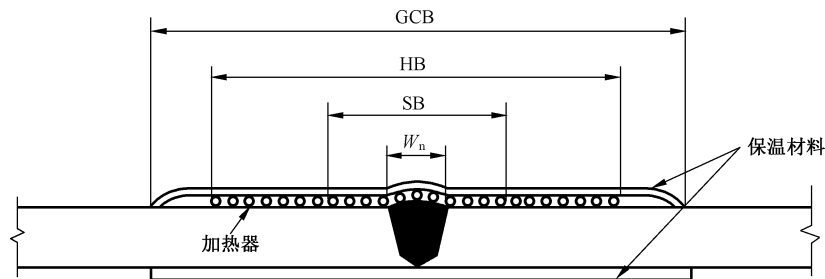


图 B.1 单加热局部焊后热处理示意图

**B.3 使用条件**

**B.3.1** 参照 8.2 布置热电偶。

**B.3.2** 采用硅酸铝纤维制品等满足相关要求的保温材料,可在焊缝正面及其背面铺设。

**B.3.3** 加热装置沿焊缝方向布置。对于平焊缝、仰焊缝,加热装置中心正对焊缝中心;对于横焊缝和立焊缝,放置加热装置时要考虑焊缝中心以下部分温度较低的影响。

**B.3.4** 焊后热处理前,制定防止焊件变形的措施。

**B.4 宽度确定**

**B.4.1** 双面铺设隔热材料,加热带宽度  $W_{HB} \geq 3\sqrt{R\delta}$ ,保温阶段,加热带边缘温度不低于热处理峰值温度的 70%。

**B.4.2** 单面铺设隔热材料,加热带宽度  $W_{HB} \geq 5\sqrt{R\delta}$ ,保温阶段,加热带边缘温度不低于热处理峰值温度的 50%。

**B.4.3** 梯度控制带宽度  $W_{GCB} = (2 \sim 3)W_{HB}$ 。

**B.4.4** 对几何不连续的特殊结构,合理布置加热装置,确保最高温度在焊缝区域。

**B.4.5** 接管与筒体连接焊缝采用全圆周带状加热进行局部热处理时,均温带、加热带和梯度控制带的布置符合图 B.2 的规定。

**B.4.6** 椭圆形封头、半球形封头上的接管采用局部环状加热热处理方法时,均温带呈圆形覆盖在焊缝及周围,加热带尺寸需足够大,加热带、梯度控制带可参考图 B.3 确定。

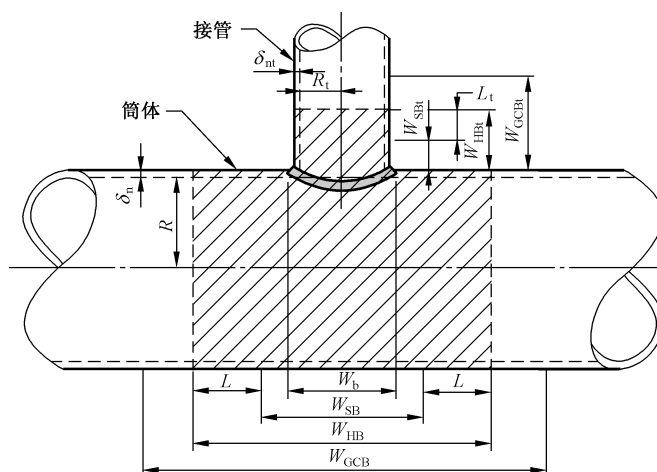


图 B.2 筒体与接管连接焊缝全圆周带状加热

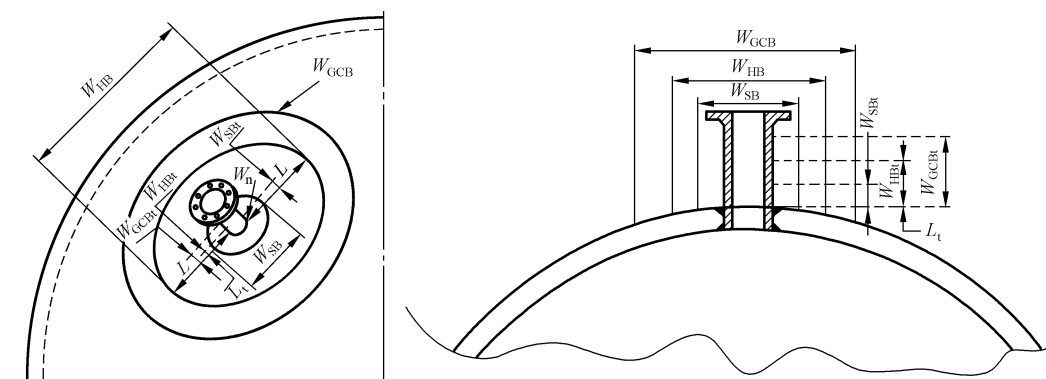


图 B.3 椭圆形封头、半球形封头上接管的局部环状加热

## 附录 C

(资料性)

## 主副加热局部焊后热处理

C.1 主加热施加在焊接接头区域,用于改善焊接接头性能和降低部分残余应力的热处理过程;副加热是主加热完成后,施加在离开焊接接头一定距离的筒体或管道表面,用于降低焊接接头内表面残余应力的热过程。主副加热示意图见图 C.1。

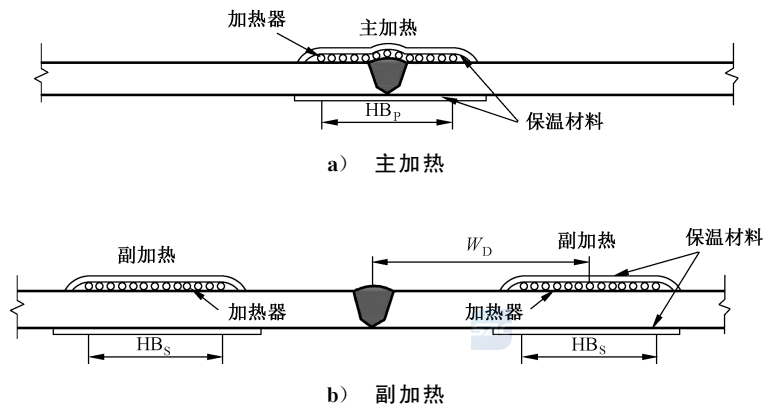


图 C.1 主副加热局部焊后热处理示意图

C.2 主加热的热处理工艺参数符合下列规定。

- 主加热的焊后热处理的规范参数见 4.4。
- 主加热带宽度  $W_{\text{HBP}} = (6 \sim 8)\delta$ , 加热带边缘温度不低于热处理温度峰值的 70%, 梯度控制带宽度  $W_{\text{GCB}} = (2 \sim 3)W_{\text{HBP}}$ ; 当采用卡式炉加热时, 两侧的梯度控制带宽度为 1 000 mm~1 500 mm。

C.3 副加热的热处理工艺参数符合下列规定。

- 副加热最高温度为主加热热处理保温温度的 40%~60%, 不超过 450 °C。
- 副加热升温速率不超过 100 °C/h。
- 副加热温度达到最高温度时, 同一位置内壁、外壁之间的温度差不大于 60 °C。
- 副加热带宽度  $W_{\text{HBS}} = 0.6\sqrt{R\delta}$ , 梯度控制带宽度  $W_{\text{GCB}} = (2 \sim 3)W_{\text{HBS}}$ 。采用卡式炉加热, 副加热带宽度为 600 mm~800 mm, 卡式炉两侧保温宽度为 500 mm~700 mm。
- 主副加热间距是主加热施加区域和副加热施加区域中心位置之间的距离, 符合下列规定:
  - 对相同厚度的环缝焊接接头, 主副加热间距  $W_{\text{D}} = 1.23\sqrt{R\delta}$ ;
  - 对于封头(球形、椭圆形、蝶形封头、锥形、法兰)与筒体的焊接接头, 在筒体侧设置单侧副加热, 主副加热间距为  $W_{\text{D}} = 1.23\sqrt{R\delta}$ ;
  - 对于直管与弯管的环缝焊接接头, 当采用主副加热时, 主副加热间距通过数值模拟和相关试验验证确定。

C.4 采用主副加热时, 先进行主加热, 加热到保温时间后, 待主加热温度降至 300 °C 以下, 再进行副加热。

C.5 接管与筒体连接的焊缝采用主副加热局部热处理方法时, 主副加热的布置见图 C.2~图 C.4, 且轴向方向主加热和副加热施加区域中心距离  $W_{\text{D1}} = 4\sqrt{R\delta}$ , 环向方向主加热和副加热施加区域中心距离  $W_{\text{D2}} = 2\sqrt{R\delta}$ 。

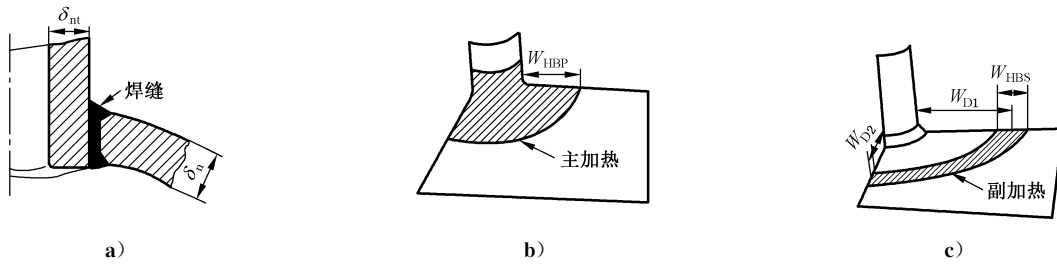


图 C.2 插入式接管与筒体连接焊缝主副加热示意

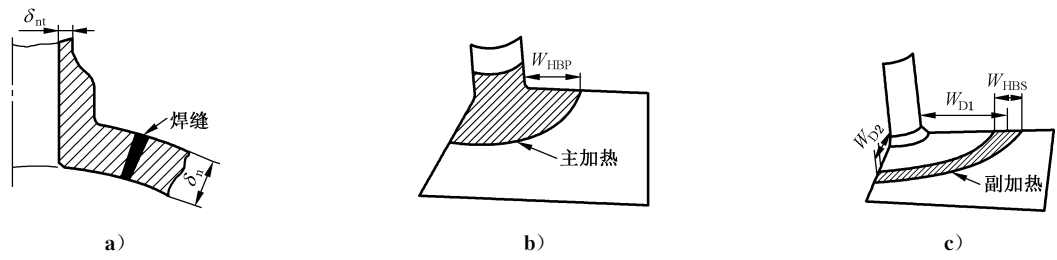


图 C.3 嵌入式接管与筒体连接焊缝主副加热示意

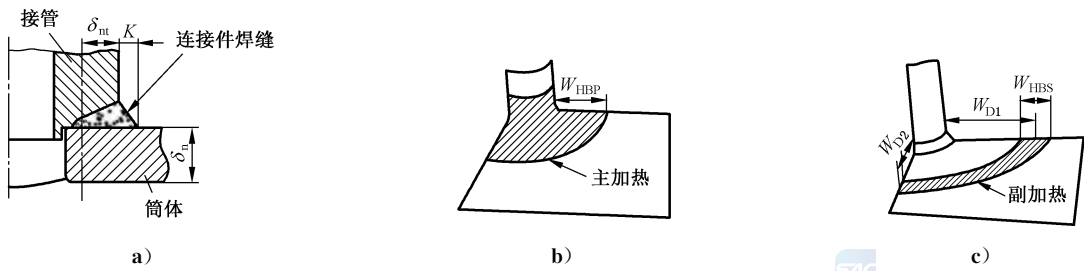


图 C.4 安放式接管与筒体连接焊缝主副加热示意

附录 D

(规范性)

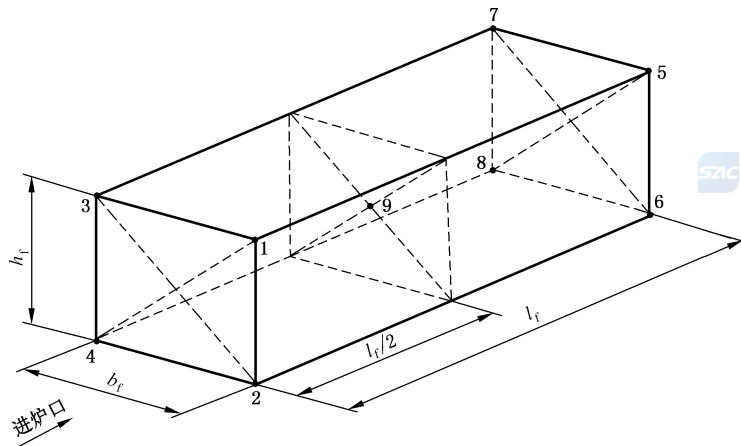
热处理炉有效加热区测定方法

D.1 热处理炉有效加热区测定方法参照 GB/T 9452 执行,检测点数量及位置按本附录的要求。

D.2 热处理炉有效加热区检测点数量和布置见表 D.1、图 D.1~图 D.6。

表 D.1 热处理炉有效加热区容积及检测点数量

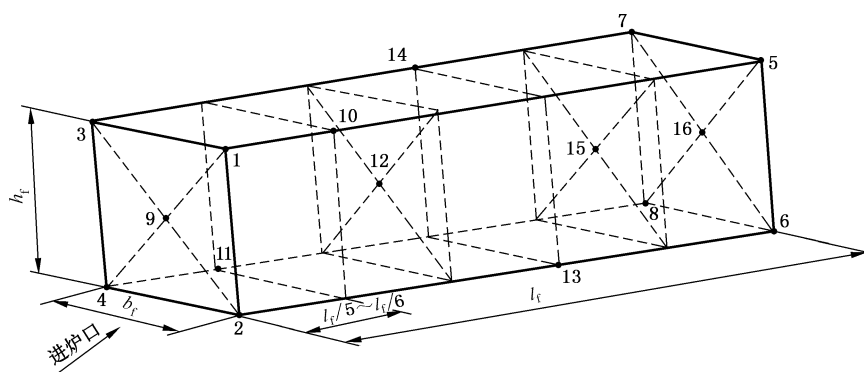
名称	有效加热区体积 m <sup>3</sup>	检测点数 个	示意图
小型炉	≤750	≥9	图 D.1、图 D.4
中型炉	(750,1 500]	≥16	图 D.2、图 D.5
大型炉	>1 500	≥25	图 D.3、图 D.6



标引序号说明:

1、2、3……—检测点位置。

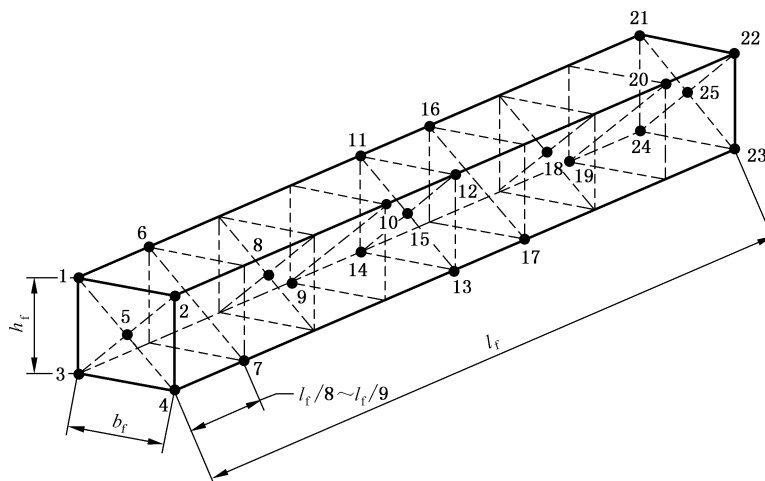
图 D.1 小型箱式热处理炉有效加热区检测点示意图



标引序号说明：

1、2、3...——检测点位置。

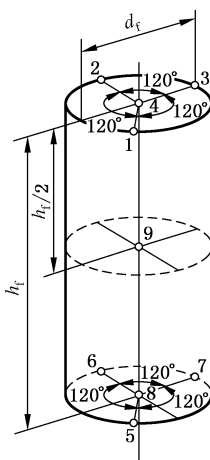
图 D.2 中型箱式热处理炉有效加热区检测点示意图



标引序号说明：

1、2、3...——检测点位置。

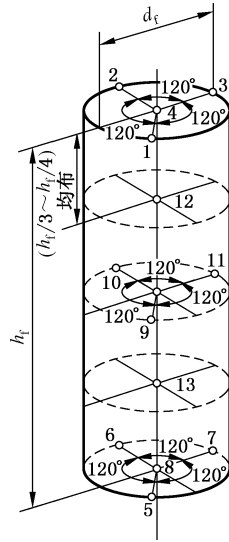
图 D.3 大型箱式热处理炉有效加热区检测点示意图



标引序号说明：

1、2、3...——检测点位置。

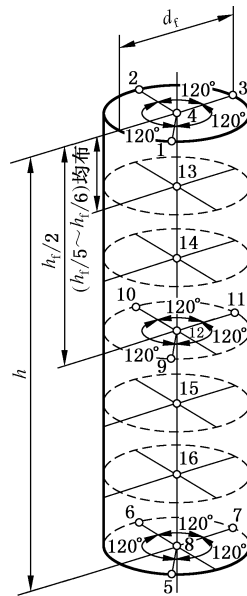
图 D.4 小型井式热处理炉有效加热区检测点位置图



标引序号说明：

1、2、3……—检测点位置。

图 D.5 中型井式热处理炉有效加热区检测点位置图



标引序号说明：

1、2、3……—检测点位置。

图 D.6 大型井式热处理炉有效加热区检测点位置图

## 附 录 E

(资料性)

## 承压设备炉外整体焊后热处理记录表

承压设备炉外整体焊后热处理记录表(示例)见表 E.1。

表 E.1 承压设备炉外整体焊后热处理记录表

项目名称	委托书编号(或合同编号、 热处理任务单编号)		
承压设备 名称及编号	位号或零部件代号		
承压设备原始条件	承压设备结构图(见附件 1)		
	钢材标准		钢号
	最大 $\delta_{PWHT}$		受热处理部分总质量
	外形尺寸		
焊后热处理 方案名称			
热处理条件	加热设施	热源	
		加热设备名称编号	
		加热设备规格型号	
		辅助装置	
	测温设施	热电偶名称、型号	
		热电偶编号	
		热电偶检验时间	
		热电偶与焊件 连接方式	
		连续自动记录仪 名称及编号	
		便携式测温计 型号及编号	
	温控设施	温度巡检记录仪 名称、编号	
		温度控制仪名称	

表 E.1 承压设备炉外整体焊后热处理记录表 (续)

热处理条件	保温	保温材料名称		现场记录	升温速率 ℃/h	
		保温材料规格			保温温度 ℃	
		保温材料生产厂及批号			保温时间 h	
		保温层厚度			冷却方法	
	天气记录	环境温度			冷却速率 ℃/h	
		风力及防护			填表人	
		雨、雪等级及防护				
特定时间记录	加热起始时间			月 日 时 分		
	( )点温度开始高于 400℃ 的时刻(升温阶段)			月 日 时 分		
	最先一点( )温度开始达到保温温度时刻(升温阶段)			月 日 时 分		
	最后一点( )温度开始达到保温温度时刻(升温阶段)			月 日 时 分		
	最先一点( )温度开始低于保温温度时刻(冷却阶段)			月 日 时 分		
	最后一点( )温度开始低于保温温度时刻(冷却阶段)			月 日 时 分		
	最后一点( )温度开始低于 400℃ 的时刻(冷却阶段)			月 日 时 分		
保温时间记录	各测温点在 $\geq 400$ ℃ 时的停留时间			见附件 2		
	各测温点在保温温度的停留时间			见附件 3		
产品焊接试件	产品焊接试件加热和辅助加热方式					
签字	热处理操作人员		时间			
	热处理责任人		时间			
	实施焊后热处理单位名称		时间			
	建造单位焊后热处理责任工程师		时间			
	监督检验人员		时间			
	第三方		时间			

表 E.1 承压设备炉外整体焊后热处理记录表 (续)

设备结构图														
(略)														
焊后热处理时各测温点在 $\geq 400$ °C范围内停留时间														
测温点编号														
升温时,到达 400 °C时刻														
冷却时,开始低于 400 °C时刻														
在 $\geq 400$ °C范围内 停留时间/h														
记录人							日期							
焊后热处理时各测温点在保温时间的停留时间														
测温点编号														
升温时, 到达保温温度时刻														
冷却时,开始低 于保温温度时刻														
在保温温度内 停留时间/h														
记录人							日期							



附录 F

(资料性)

现场局部焊后热处理热工计算

F.1 现场感应加热局部焊后热处理所需的功率计算。

a) 加热区筒体金属升温所需功率  $P_1$  可根据公式(F.1)计算:

$$P_1 = c \cdot \rho \cdot W_{HB} \cdot v \pi \frac{R_0^2 - R^2}{3 \ 600} \dots\dots\dots (F.1)$$

b) 辐射散热损失  $P_2$  可根据公式(F.2)计算:

$$P_2 = 0.023\alpha L_s \pi R \epsilon \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 \right] \dots\dots\dots (F.2)$$

$$L_s = \frac{(1.5 t_1 - 5 t_e)(W_{GCB} - W_{HB})}{3 t_1} \dots\dots\dots (F.3)$$

c) 对流散热损失  $P_3$  可根据公式(F.4)计算:

$$P_3 = 2\pi h R \left[ \frac{-9T_1}{100 \cdot (W_{GCB} - W_{HB})} L_s^2 + 0.3 T_1 L_s \right] \dots\dots\dots (F.4)$$

d) 保温棉热损失  $P_4$  可根据公式(F.5)计算:

$$P_4 = \frac{\pi \lambda t_1 (1.3 \cdot W_{GCB} + 0.7 \cdot W_{HB})}{\ln(2R + 2\delta_B) - \ln(2R)} \dots\dots\dots (F.5)$$

e) 其他热损失  $P_5$  可根据公式(F.6)计算:

$$P_5 = \beta_o P_1 \dots\dots\dots (F.6)$$

f) 加热器的输出功率不可小于被加热工件所需要的功率  $P$ , 感应加热总功率  $P$  可根据公式(F.7)计算:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \dots\dots\dots (F.7)$$

F.2 现场电阻片加热局部焊后热处理加热器的输出功率不可小于被加热工件所需要的功率  $P$ ,  $P$  可根据公式(F.8)计算。

$$P = \frac{c \times m \times v_{\max}}{3 \ 600 \times E} \dots\dots\dots (F.8)$$



## 附 录 G

(资料性)

## 评价焊后热处理效果的测试方法

## G.1 硬度检测

参照 GB/T 17394.1、GB/T 231.1、GB/T 4340.1、GB/T 230.1。

## G.2 强度试验

参照 NB/T 47016、GB/T 2651,也可参照 G.5。

## G.3 金相检验

参照 GB/T 13298、GB/T 34895。

## G.4 残余应力测定

参照 GB/T 31310、GB/T 7704,也可参照 G.5。

## G.5 压入能量法测试

## G.5.1 测试设备

采用压入能量法进行测试的设备满足以下条件:

- a) 设备出厂配备标准试样,测试前对测试设备进行校准。
- b) 强度测试采用球形压头(推荐球压头半径  $R_i=0.25\text{ mm}$  或  $0.5\text{ mm}$ );
- c) 残余应力测试采用努氏压头,压头锥顶相对棱角度分别为  $172.5^\circ\pm 0.1^\circ$ 和  $130^\circ\pm 0.1^\circ$ ;
- d) 压头表面光洁无异物;
- e) 压头轴线与压入机构主轴轴线(垂直于测试表面)间的夹角在  $\pm 0.5^\circ$ 以内。

## G.5.2 强度的测试方法

## G.5.2.1 强度测试的计算流程

强度测试的计算流程如图 G.1 所示。

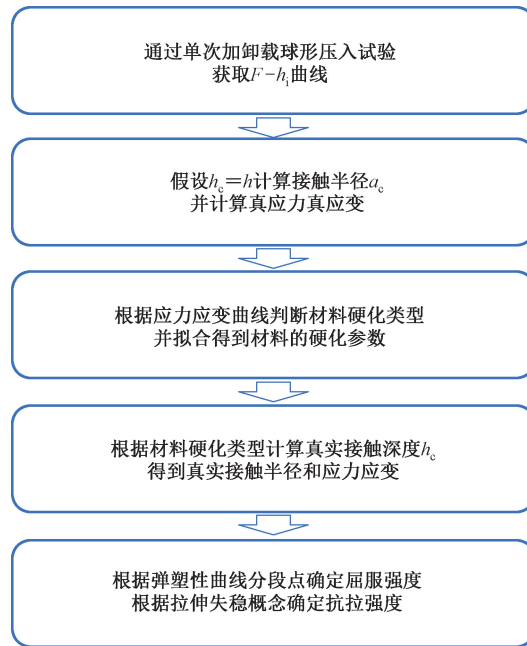


图 G.1 强度测试的计算流程

G.5.2.2 应力和应变的计算

假设真实接触深度  $h_c = h_i$ , 根据公式(G.1)计算压头与被测材料的接触半径  $a_c$  :

$$a_c = \sqrt{2R_i h_c - h_c^2} \dots\dots\dots (G.1)$$

根据公式(G.2)计算被测材料的真应力  $\sigma_t$  :

$$\sigma_t = \frac{F}{3a_c \pi^2} \dots\dots\dots (G.2)$$

根据公式(G.3)将变形能转化为等效真应变  $\epsilon_{eq}$  :

$$\epsilon_{eq} = \frac{3 \int_0^{h_i} F dh}{\pi(3.4a_c)^3 (\sigma_t' + \sigma_t^0)} \dots\dots\dots (G.3)$$

G.5.2.3 材料硬化类型的判定

根据上述计算结果绘制应力应变曲线,对 0.05~0.15 应变范围内的应力应变点进行线性拟合,得到线性相关系数  $R^2$ 。若系数大于 0.95,则判定为线性硬化材料;否则判定为幂律硬化材料。如图 G.2 所示,Q345R 为幂律硬化材料,S30408 为线性硬化材料。

根据式(G.4)拟合得到相应材料的应变硬化参数:

$$\begin{cases} \sigma_t = K \epsilon_{eq}^n & \text{幂率硬化材料} \\ \sigma_t = E_p \epsilon_{eq} + b_h & \text{线性硬化材料} \end{cases} \dots\dots\dots (G.4)$$



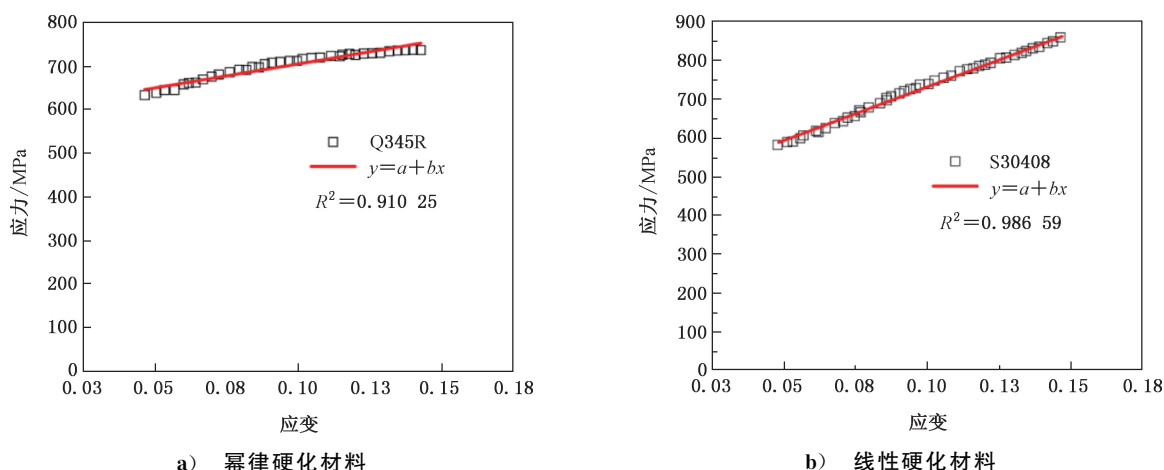


图 G.2 材料硬化类型判定示例

G.5.2.4 真实接触半径的计算

对于幂律硬化材料(如 Q345R),根据公式(G.5)计算  $h_c$ ;对于线性硬化材料(如 S30408),根据公式(G.6)计算  $h_c$ :

$$\frac{h_c}{h_i} = 1.07(1 - 1.12n + 0.70n^2) \left[ 1 + 0.65 \frac{h_i}{R_i} - 0.86 \left( \frac{h_i}{R_i} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (G.5)$$

$$\frac{h_c}{h_i} = 0.98 \left[ 1 - 12.43 \left( \frac{E_p}{E_s} \right) + 223.74 \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^2 \right] \left[ 1 + 0.263 \frac{h_i}{R_i} - 0.569 \left( \frac{h_i}{R_i} \right)^2 \right] \dots\dots (G.6)$$

根据公式(G.1)将真实接触深度  $h_c$  转化为压头与被测材料的真实接触半径  $a_c$ ,并根据公式(G.2)、公式(G.3)获取真实应力应变曲线,过程中需迭代计算硬化参数直至稳定不变。

G.5.2.5 屈服强度和抗拉强度的计算

根据公式(G.7)及弹塑性曲线分段点计算屈服强度:

$$R_{eL} = E_s(\epsilon_0 - 0.002) \dots\dots\dots (G.7)$$

根据拉伸失稳概念计算抗拉强度。对于幂律硬化材料,根据公式(G.8)计算抗拉强度;对于线性硬化材料,根据公式(G.9)计算抗拉强度:

$$R_m = K(n/e)^n \dots\dots\dots (G.8)$$

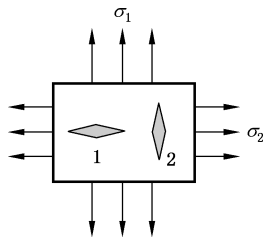
$$R_m = \frac{E_p}{e^{(E_p-b)/E_p}} \dots\dots\dots (G.9)$$

G.5.3 焊接残余应力的测试方法

G.5.3.1 测点布置

残余应力测试测点布置如下。

- a) 假定在试样表面有限区域内残余应力均匀分布,分析正交两次压入该区域获得的压入曲线确定该区域的二向残余应力,该局局部区域即为有效测试区,简称测试区,如图 G.3 所示。
- b) 测试区内两次压入的最小间距  $d$  与最大压入深度  $h_{max}$  有关。一般  $h_{max} = 0.05 \text{ mm}$ , 此时  $d \geq 4 \text{ mm}$ 。
- c) 测试焊接接头时,测试区内的两个测点通常平行于焊缝方向排布,如图 G.4 所示。



标引序号说明:

1——第 1 次压入;

2——第 2 次压入。

图 G.3 有效测试区

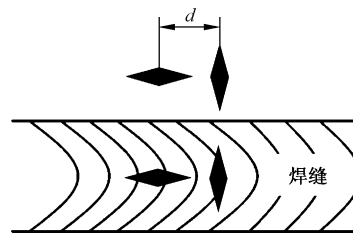


图 G.4 焊接接头测试区内的测点布置

### G.5.3.2 零应力压入曲线获取

焊缝与母材的力学性能往往存在差异,导致焊缝附近材料的零应力压入曲线与母材有所不同。当无法采用破坏性方式取得焊缝局部材料制作零应力试样时,按以下两种方法获得焊接接头不同位置的分布式零应力压入曲线:

- a) 切割释放法:采用与测试对象相同的材料和焊接工艺制作焊接模拟试样,如图 G.5 所示,根据测点布置将焊缝及其附近区域切割分离出小试块,分别进行压入试验即可得到对应位置的零应力压入曲线。一般小试块长宽尺寸为 10 mm×10 mm,厚度不低于 5 mm。

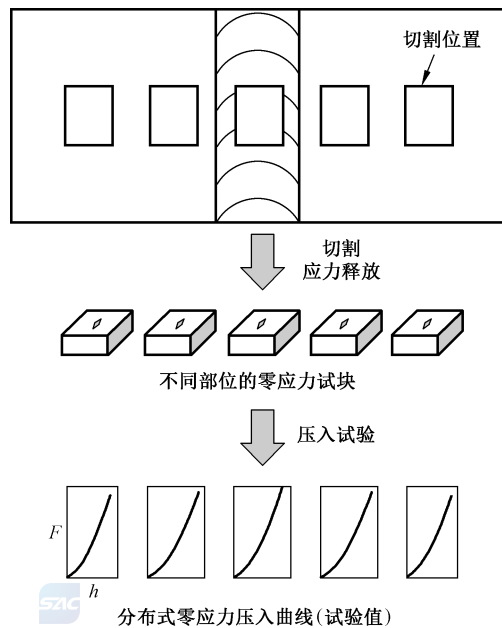


图 G.5 切割释放法

- b) 有限元预测法:如图 G.6 所示,在各残余应力测点附近取得力学性能参数(方法参照 G.5.2),然后分别导入经过验证的有限元模型模拟零应力压入过程,得到分布式零应力压入曲线。力学性能测点与残余应力测点宜平行于焊缝方向排布,间隔 5 mm~10 mm。

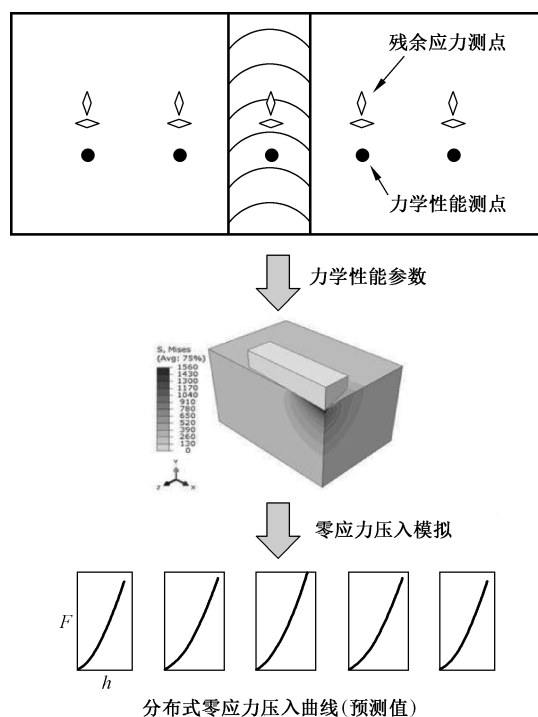


图 G.6 有限元预测法

### G.5.3.3 残余应力计算

获取残余应力所需进行的计算包括：

- a) 压入功的计算：根据公式(G.10)分别对测试区的零应力压入曲线和正交两次压入得到的压入曲线加载段积分，计算得到零应力压入功  $W_{F0}$  以及应力压入功  $W_{F1}$  和  $W_{F2}$ ：

$$W_F = \int_0^{h_{\max}} F dh \quad \dots\dots\dots ( G.10 )$$

- b) 压入能差的计算：根据公式(G.11)计算压入能差  $\Delta W_{F1}$  和  $\Delta W_{F2}$ ：

$$\begin{cases} \Delta W_{F1} = W_{F0} - W_{F1} \\ \Delta W_{F2} = W_{F0} - W_{F2} \end{cases} \quad \dots\dots\dots ( G.11 )$$

- c) 等效压入能差的计算：根据公式(G.12)将压入能差转化为等效单轴应力条件下的压入能差  $\Delta W_1^{eq}$  和  $\Delta W_2^{eq}$ ：

$$\begin{cases} \Delta W_1^{eq} = 1.16\Delta W_{F1} - 0.429\Delta W_{F2} \\ \Delta W_2^{eq} = 1.16\Delta W_{F2} - 0.429\Delta W_{F1} \end{cases} \quad \dots\dots\dots ( G.12 )$$

- d) 二向应力值的计算：根据公式(G.13)计算二向残余应力值  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ：

$$\begin{cases} \Delta W_1^{eq} = 13.96 h_{\max}^3 \sigma_1 + A_3 \left( \frac{\sigma_1}{R_{el}} \right)^3 + A_2 \left( \frac{\sigma_1}{R_{el}} \right)^2 - A_1 \left( \frac{\sigma_1}{R_{el}} \right) \\ \Delta W_2^{eq} = 13.96 h_{\max}^3 \sigma_2 + A_3 \left( \frac{\sigma_2}{R_{el}} \right)^3 + A_2 \left( \frac{\sigma_2}{R_{el}} \right)^2 - A_1 \left( \frac{\sigma_2}{R_{el}} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots ( G.13 )$$

式中  $A_{1\sim3}$  为材料塑性系数，表 G.1 给出了常用金属材料的塑性系数参考值。

表 G.1 常用金属材料塑性系数参考值

材料牌号	材料塑性系数		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$
12Cr1MoV	0.148	0.010	0.186
45 钢	0.069	0.203	0.102
12Cr2Mo1VR	0.220	0.293	0.064
Q345R	0.030	0.125	0.175
15CrMoR	0.132	0.198	0.102
SA516Gr70	0.093	0.344	0.081

G.5.4 试验程序

G.5.4.1 通则

压入试验一般需注意如下内容。

- a) 记录试验温度:试验一般在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内进行,对于温度要求严格的试验,试验在室温( $23\pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 下进行。且要保证仪器和试样的温度相对稳定,以减少试验过程中温度波动引起的试验偏差。温度波动引起的压入深度位移偏移一般不大于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ,其最大允差为 $1\% h$ 。
- b) 同一位置不能重复压入。当一测试点处曲线获取异常,则另选测试点,并对新测点位置进行记录。

G.5.4.2 测试位置

测试位置遵循下列规定:

- a) 一条测试路径由若干测点组成,通常垂直于焊缝方向,如图 G.7 所示;
- b) 一条测试路径中,测试位置至少覆盖距离焊缝中心 3 倍最大焊缝宽度  $W_n$  的范围。其中,焊缝至少布置 2 个测点,距熔合线  $1\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$  范围内至少布置 1 个测点, $3W_n$  范围内的母材至少布置 1 个测点。
- c) 当无法分辨熔合线时,适当增加焊缝边缘附近的测点数量。

单位为毫米

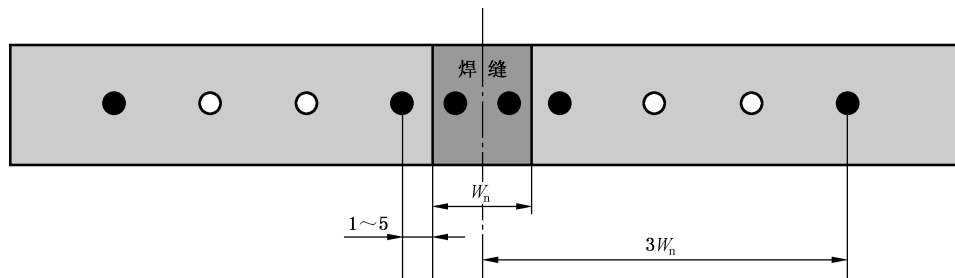


图 G.7 测试位置示意图

G.5.4.3 测试表面处理

测试区的表面按下述方式进行处理:

- a) 测试区表面与压头接触的部位可进行局部打磨抛光；
- b) 先采用粗磨进行表面平整处理和去除金属表面氧化层,打磨时用力要均匀适当,避免产生附加应力;焊缝区打磨平整,避免表面凹凸不平影响测试结果；
- c) 粗磨后用砂纸进一步抛光打磨至  $Ra0.2$  以下,减小由粗磨引入的附加应力和划痕的影响,打磨时最好在两个互相垂直的方向上交替进行。

#### G.5.4.4 测试设备安装

测试设备要满足下列要求：

- a) 使用合适的工装将测试设备固定,确保测试设备能承受最大试验力而不发生松动；
- b) 试验前需要确保压头到达最大压入深度时,传感器不超过量程；
- c) 压入机构主轴轴线与测试表面法向的夹角在  $\pm 0.5^\circ$  以内。

#### G.5.4.5 预加载

为减小测试表面质量的影响,通常要进行预加载,直到压入曲线呈稳定增长趋势后,再逐渐加大试验力增量。

- a) 一般情况下,预加载试验力小于  $5\text{ N}$ ,预加载速率小于  $0.05\text{ mm/min}$ 。
- b) 若在预加载区间内无法得到稳定的压入曲线,表明预加载失败,则更换测试位置或重新打磨并重复上述步骤,直至预加载成功。

#### G.5.4.6 压入测试

压入测试的控制要求：

- a) 预加载完成后逐渐加大试验力直到达到最大压入深度  $h_{\max}$  后卸载,测试设备同步记录压入试验力和压入深度,完成一次数据采集；
- b) 压入过程采用深度控制,加载速率小于  $0.2\text{ mm/min}$ ；
- c) 强度测试时,最大压入深度大于  $0.24$  倍的球压头半径,任一压痕中心与试样边缘的距离至少为压痕直径的  $3$  倍,两相邻压痕中心的距离至少为最大压痕直径的  $5$  倍；
- d) 残余应力测试时,正交  $2$  次压入均按照上述试验程序进行, $2$  次试验参数保持一致。压入深度和间距见 G.5.3.1。

附录 H

(资料性)

焊后热处理效果评价报告(示例)

焊后热处理效果评价报告(示例)见表 H.1。

表 H.1 焊后热处理效果评价报告

项目名称			委托书编号 (或合同编号、热处理任务单编号)			
承压设备名称及编号			位号或零部件代号			
焊后热处理方案名称						
热处理方法						
评价方法	<input type="checkbox"/> 硬度 <input type="checkbox"/> 强度 <input type="checkbox"/> 残余应力 <input type="checkbox"/> 金相分析 <input type="checkbox"/> 其他:					
承压设备 基本信息	承压设备结构图(见附件)					
	母材牌号		母材屈服/抗拉强度			
	焊材牌号		焊材屈服/抗拉强度			
测试方法及执行标准			测试设备信息			
测试部位/测点的 详细信息						
热处理前后硬度值对比						
热处理前				热处理后		
测试日期		测试人员		测试日期		测试人员
测试位置	硬度值			测试位置	硬度值	
母材-A				母材-A		
热影响区-A				热影响区-A		
焊缝				焊缝		
热影响区-B				热影响区-B		
母材-B				母材-B		
备注:						

表 H.1 焊后热处理效果评价报告 (续)

热处理前后焊接接头强度对比							
热处理前				热处理后			
测试日期		测试人员		测试日期		测试人员	
测试位置	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa		测试位置	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	
母材-A				母材-A			
热影响区-A				热影响区-A			
焊缝				焊缝			
热影响区-B				热影响区-B			
母材-B				母材-B			
备注:							
热处理前后焊接残余应力对比							
热处理前				热处理后			
测试日期		测试人员		测试日期		测试人员	
测试位置	向应力/MPa	向应力/MPa		测试位置	向应力/MPa	向应力/MPa	
母材-A				母材-A			
热影响区-A				热影响区-A			
焊缝				焊缝			
热影响区-B				热影响区-B			
母材-B				母材-B			
备注:							
热处理前后金相分析							
热处理前				热处理后			
测试日期		测试人员		测试日期		测试人员	
测试位置	金相组织			测试位置	金相组织		
母材-A				母材-A			
热影响区-A				热影响区-A			
焊缝				焊缝			
热影响区-B				热影响区-B			
母材-B				母材-B			
备注:							

参 考 文 献

- [1] GB/T 230.1 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法
- [2] GB/T 231.1 金属材料 布氏硬度试验 第1部分:试验方法
- [3] GB/T 2651 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验
- [4] GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法
- [5] GB/T 5310—2023 高压锅炉用无缝钢管
- [6] GB/T 7704 无损检测 X射线应力测定方法
- [7] GB/T 13298 金属显微组织检验方法
- [8] GB/T 13401 钢制对焊管件 技术规范
- [9] GB/T 14383 锻制承插焊和螺纹管件
- [10] GB/T 17394.1 金属材料 里氏硬度试验 第1部分:试验方法
- [11] GB/T 31310 金属材料 残余应力测定 钻孔应变法
- [12] GB/T 34895 热处理金相检验通则
- [13] NB/T 47016 承压设备产品焊接试件的力学性能检验
- [14] ISO 3580 Welding consumables—Covered electrodes for manual metal arc welding of creep-resisting steels—Classification



