

# 压力管道工程中有关焊接诸多认知误区和 盲区浅析（三）

## ——焊后热处理和硬度检测

应道宴<sup>1</sup>, 汤晓英<sup>2</sup>, 尤子涵<sup>3</sup>, 余鑫萍<sup>3</sup>

(1. 全国化工设备设计技术中心站, 上海 200040; 2. 上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200333;  
3. 中石化上海工程有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 铁素体钢的电熔焊过程中, 热影响区的冷却速率是导致焊接近缝区组织变化和残余应力的关键因素。焊后热处理具有降低残余应力, 形成回火马氏体组织, 降低硬度的积极作用, 但对现场管道系统的施工而言, 增加了管道施工成本。承压设备和管道标准规范中有关 PWHT 的保温温度和豁免厚度存在较大的分歧, GB/T 20801.4—2020 对 PWHT 也作了相应规定。

**关键词:** 铁素体钢; 残余应力; 硬度; 淬硬组织; PWHT; 豁免条件; 保温温度; 局部 PWHT; 硬度检测

中图分类号: TH 49

文献标志码: A

文章编号: 1009-3281 (2024) 04-0100-010

## 1 焊接对碳钢、LTCS 和 Cr-Mo 合金钢焊接接头性能的影响

### 1.1 机理

铁素体钢的电熔焊过程中, 熔池的平均温度在 1 700 °C 以上, 而近缝区的母材, 即使采取了预热和层间温度的控制, 与熔池的温差都在 1 500 °C 以上, 且以极快的速度冷却。因此在铁素体钢母材的熔合区和热影响区, 随着碳当量或强度等级的提高, 在近缝区 800~400 °C 的快速冷却速率下, 产生马氏体相变和接近于材料屈服强度的残余应力。因此, 除了材料的化学组分外, 热影响区的冷却速率是导致焊接近缝区组织变化和残余应力的关键因素。表 1 所示为 P No.1 碳钢的可焊性分组定义和碳当量计算公式。而影响淬硬倾向和冷却速率的影响因素为:

① 碳当量, 合金组分, 强度等级: 碳钢和 Cr-Mo 合金钢的碳当量和强度等级越大, 焊后的淬硬倾向越大;

② 较厚的材料冷却速度更快, 支管连接之类的角接头(三向散热)比管道环缝(二向散热)的冷

却速度更快;

③ 焊前预热以及层间温度控制会降低冷却速度;

④ 提高焊接线能量或采用高线能量的焊接方法虽能降低马氏体形成的倾向, 但也伴随着晶粒长大, 强度及韧性下降, 回火脆性等负面影响。

### 1.2 焊接对焊接接头性能的影响

对承压设备和管道而言, 虽然焊后热处理经常又称为消除应力热处理, 碳锰钢在 550~620 °C, Cr-Mo 合金钢在 650~750 °C, 不锈钢在 800~850 °C PWHT 温度范围, 焊接残余应力都能降低到相应温度下材料短时屈服强度更低的水平, 不会对接头的力学性能产生不利影响, 而且绝大多数承压设备和管道并非属于高周疲劳荷载设施。

基于长期的工程实践经验以及失效风险的分析评估, 承压设备标准规范更关注于焊接接头淬硬组织带来的各种风险。即使是针对应力腐蚀破裂而言, 残余应力的大小也仅作为间接的影响因素, 而非决定

收稿日期: 2023-09-06

作者简介: 应道宴(1942—), 男, 教授级高级工程师。主要从事压力容器、压力管道、材料与标准化工作。

表1 P No.1 (碳钢, LTCS) 可焊性分组定义和碳当量计算公式

Table 1 Definition of weldability group and carbon equivalent calculation Formula for P No.1 (carbon steel, LTCS)

P No	Rm/MPa	材料
P No.1-1	< 485	A106 Gr. B, A516-65, 20
P No.1-2	≥ 485~< 550	A106 Gr.C, A105, A516-70, X65, Q345, 16Mn
P No.1-3	≥ 550~< 620	L485, X70
P No.1-4	≥ 620 调质 (Q+T) 或 TMCP	L555, X80

CEIIW = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V) /5 + (Ni+Cu) /15  
CEPcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B (API 5L C ≤ 0.12%)  
CE ≤ 0.45% ; 视需要预热  
CE 0.45%~0.60% ; 预热 95 ~ 200 °C  
CE > 0.60% ; 预热 200 ~ 350 °C  
CE > 0.5% ; 焊后 24 h 进行无损检测

性的控制指标。

铁素体钢焊接热影响区的淬硬组织对焊接接头带来的失效风险可归纳为：

① 焊接冷裂纹（延迟裂纹）的根源之一；

② 各种电化学腐蚀的析氢（如酸性 H<sub>2</sub>S 应力腐蚀破裂等）以及高压氢渗透所导致的氢致裂纹的发源地；

③ 淬硬状态的不稳定合金碳化物在高温高压氢侵蚀下的提前分解，丧失固定碳的作用，而导致的氢损伤；

④ 硬而脆的淬硬组织使焊接接头的抗脆断能力大幅度下降。

## 2 焊后热处理的积极作用和负面效应

对工业管道而言，焊后热处理（包括 Cr-Mo 合金钢的脱氢后热处理）的积极作用和负面效应可归纳为下列四条：

(1) 降低残余应力。当焊件的 PWHT 温度升高时，焊接残余应力立即降低到材料温度下的屈服强度，在 PWHT 温度下的保温时间会导致应变材料的松弛和再结晶，从而减少或基本上消除残余应力。

(2) 回火淬硬组织，降低硬度，以规避焊接氢致延迟裂纹以及使用环境下的氢脆，氢侵蚀倾向。

(3) 适度的回火形成回火马氏体组织，可提高焊接接头的塑性和韧性。但不适当的回火温度，包括升温、降温速度、保温时间，可能导致负面效应，如粗晶组织、强度下降、韧性降低、回火脆性、应力松弛裂纹、附加应力等。

(4) 焊后热处理是一个费事费力，昂贵的工艺过程，尤其对现场管道系统的施工而言，更为复杂

而质量控制困难。因此压力设备和管道规范一方面通过大量测试评估，制订了相应的 PWHT 豁免条款，另一方面也通过除 PWHT 以外的其他工艺措施，来替代或减少对 PWHT 的依赖方案，如提高预热温度，回火焊道，提高材料（包括焊接材料）韧性水平及抗裂性等。

## 3 承压设备和管道标准规范 PWHT 工艺的辩证认识

如上所述，适度的焊后热处理是改善焊接接头因焊接而导致负面影响的有效工艺措施。业内工程技术人员经常简单地把相应标准规范中的焊后热处理豁免条款和保温温度视为刚性的规定，而不能实事求是地根据具体工况以及产品性能和风险控制要求，平衡并协调伴随着焊后热处理而导致的各种利害得失因素，对保温温度和豁免条款作出必要的修正。

### 3.1 PWHT 保温温度

以最常见 P No.1-1、2、3 材料为例，表 2 所列是笔者近日整理的国内外典型的承压设备和管道规范 PWHT 保温温度和主要豁免条款。

从表 2 所列的碳钢材料（包括 -50 °C LTCS 和 X65 以下低合金高强钢承压设备和管道）PWHT 的保温温度和豁免厚度存在较大的分歧。

ASME 体系规范的 PWHT 保温温度都确定为 600~650 °C 以上，而欧洲 EN, BS, DIN 体系 PWHT 保温温度较低，为 550~600 °C，比 ASME 体系规范的 PWHT 保温温度低 50 °C 左右。笔者阅读欧美各家大量规范和工程规定后认为：产生分歧的原因在于，虽然 550 °C 回火已经足以将碳钢材料焊接残余应力降低到足够低的水平，但评估焊后热处理积极效果的重

表 2 国内外典型的承压设备和管道规范 PWHT 保温温度和主要豁免条款

Table 2 Typical pressure equipment and pipeline specifications at home and abroad PWHT insulation temperature and main exemption terms

标准规范	PWHT 保温温度 /℃	预热温度 /℃	PWHT 豁免条件或例外工况
ASME B31.3—2020 ASME B31.1—2022	595~650 (-)	10 ( $\leq 25$ mm) 95 ( $> 25$ mm)	符合预热温度者, 所有厚度豁免 PWHT SCC 和氢脆, 氢侵蚀工况另定 ②低温工况: AKV $\geq 20$ J
ASME B31.3—2010	595~650 ( $\geq 20$ mm)	10 ( $< 25$ mm) 50 ( $\geq 25$ mm)	符合预热温度者, $< 20$ mm 豁免 PWHT SCC 和氢脆, 氢侵蚀工况另定 ②低温工况: AKV $\geq 20$ J
GB/T 20801—2020	595~650 ( $\geq 20$ mm) $\geq 550$ ( $\geq 20$ mm, 抗拉 $\geq 535$ MPa)	10 ( $\leq 25$ mm) 95 ( $> 25$ mm)	②低温工况: AKV $\geq 20$ J
ASME VIII -1	595 ( $> 32\sim 38$ mm)		$\leq 32$ mm 豁免 PWHT 预热 95 ℃, $> 32\sim 38$ mm 豁免 PWHT SCC 和氢脆, 氢侵蚀工况另定 ②低温工况: AKV $\geq 20$ J
EN 13480-2017	550~600 ( $\geq 35$ mm)	按 EN1011-2	① SCC 和氢脆, 氢侵蚀工况另定 ②低温工况:
EN 13445-2015	550~600 ( $\geq 35$ mm) 530~580 ( $\geq 35$ mm TMCP, 屈服 275~360 MPa)	按 EN1011-2	MDMT $\leq -10$ ℃ (PD5500 0 ℃), AKV $\geq 27$ J ③低温工况如进行标准规定外的附加 PWHT, 可按标准降低最低使用温度或提高冲击 试验合格温度
BS PD5500—2015	550~600 ( $\geq 35$ mm)	按 EN1011-2	
DEP 61402030 (API 5L 管线钢)	580~620 ( $< X60$ ) 560~600 ( $\geq X60$ )	按 EN1011-2	PWHT 根据管线用户要求

点和理念不同所致。

ASME 体系更倾向于只要在低于相变温度和降低焊接接头强度的前提下, 选择较高的回火温度, 以改善淬硬的马氏体组织, 降低硬度。而欧洲体系更倾向于改善焊接接头的抗脆断能力, 在现代冶金技术提高了材料断裂韧性水平的基础上, 并采用宽板拉伸和断裂力学分析方法, 论证了采用较低回火温度, 规避回火脆性, 更有利于提高 P No.1 碳钢焊接接头的抗脆断能力。

欧洲承压设备和管道规范 (EN13480, EN13445, BS PD5500, AD2000) 对焊接接头抗脆断能力的研究和评估还得出许多有益的启示和规律。这些概念虽在 ASME 规范中没有体现, 但在 API 579 适用性评估中也照样有所体现:

①首先, 规范中列入了三种抗脆断能力的评估方法与途径, 拓宽了标准应用者的单向思维模式;

②适当温度的 PWHT 有利于提高焊态的高抗脆断能力;

③相对于采取各种工艺措施, 提高母材及焊接接头的 AKV 合格标准是根本, 是基础;

④材料冲击试验温度和冲击功与设计温度下的冲击功, 可进行换算;

如材料 (包括接头各区域) 冲击试验温度高于

设计温度, 则可按  $-1.5$  J/℃ 将材料冲击试验温度下的冲击功换算到设计温度下的冲击功。例如,  $-20$  ℃, 47 J, 相当于  $-30$  ℃, 32 J。

如材料 (包括接头各区域) 冲击试验温度低于设计温度, 则可按  $+1.0$  J/℃ 将材料冲击试验温度下的冲击功换算到设计温度下的冲击功。例如,  $0$  ℃, 20 J, 相当于  $20$  ℃, 40 J。

⑤压力元件薄膜拉应力水平的降低, 可降低钢材的最低使用温度, 但各种规范的降幅不一;

⑥小试样的冲击功判据按尺寸比例降低, 以及无法截取小试样的薄壁碳钢材料的最低使用温度规定基本相同;

⑦ 10 mm 夏比冲击试样的侧向膨胀量与冲击功的对应关系, 大致为  $0.01$  mm  $\approx 1.0$  J。

### 3.2 PWHT 豁免厚度

所有欧洲锅炉压力容器压力管道规范和 ASME 锅炉容器规范, 都把碳钢 PWHT 的豁免厚度确定为 35 mm 左右, 唯独 ASME B31.3 和 B31.1 压力管道规范的豁免厚度长期以来一直确定为 20 mm。但 2014 版起, ASME B31 管道规范, 却又在强调遵守预热温度和多层多道焊的前提下, 大大放宽了豁免厚度的限制。所有规范列入的 P No.1-1~3 碳钢, 只要符合预热及多层焊要求者都可免除焊后热处理。

① EPRI 曾对 P No.1-1 (A516-65), P No.1-2 (A515-70), P No.4-1 (A335-P11, 1.25Cr-0.5Mo), P No.5A-1 (A335-P22, 2.25Cr-1Mo), 38~13 mm 厚的母材进行端淬试验, 单焊道和多层焊淬透性测试, 坡口焊接接头的硬度、拉伸、侧弯、冲击和疲劳性能测试。其结论是: 只要符合规范规定的预热和多层焊要求者, 即使是各种规范设定的最大豁免厚度, 焊后不作焊后热处理, 都能符合各项强度、塑性、韧性、硬度和疲劳性能要求;

② TWI 对 ASME B31 管道规范(旧版)的豁免厚度 20 mm 的评估意见是: 考虑到管道焊接工程在室外现场(区别于锅炉和设备在车间里)施工环境的影响, 所以工艺控制的水平与焊接缺陷产生的几率较高所致;

③ 如上所述, 焊接对焊接接头产生淬硬、韧性下降的根源, 就在于铁素体钢焊接接头区域内冷却速度过快所致。因此, 改善的途径除了焊后高温 PWHT 的措施外, 在焊前和焊接过程中提高预热, 是从根本上降低熔融金属和热影响区在相变温度以下冷却速度更为有效的工艺措施。所谓多层和多道焊的作用也相当是第二层或相邻的后续焊道对前一焊道的回火作用;

④ 考虑到国内工业压力管道安装施工管理的现实情况, GB/T 20801.4—2020 编制工作组采纳了 ASME B31.3—2018 版对强化预热作用的规定, 但保留了 P No.1 碳钢 PWHT 豁免厚度 20 mm 以及热处理后硬度检查的规定;

⑤ 其他如控制焊接线能量、回火焊道、焊接方法的变化、低氢焊材、碱性药皮或焊剂、控制母材和焊接材料含碳量或碳当量、提高韧性水平等措施都会对改善焊接接头应用性能有所裨益。总之, 解决工程技术问题时, 实事求是, 思维模式要开放, 与时俱进, 辩证且一分为二地看待规范的条款, 才是解决工程问题的必由之路。

## 4 关于焊后热处理的几点必要说明

### 4.1 GB/T 20801.4—2020 中 PWHT 条款的说明

业内多数工程技术人员经常把标准规范条款中的规定理解为不容偏离的刚性规定。但笔者认为并非如此, 标准规范条款中, 关于焊后热处理及其豁免厚度的规定是各方利益平衡、协调、妥协的产物。其理由如下:

(1) 影响焊接接头使用性能及其改善途径是多元的。仅就铁素体钢可焊性(淬硬倾向)和最高硬度而言, 预热及焊接工艺(如多道焊, 热输入)的影响都不低于焊后热处理。另外, 评估重点的不同、冶金技术进展、可焊性和材料韧性水平的提高, 都对焊后热处理利弊的认识产生差异。此外, 国际上都有一点共识, 即压力设备标准规范中对 PWHT 的规定都是基于对可焊性、力学性能(强度和脆性断裂)的裨益评估, 而没有计及使用环境(介质, 温度)的影响, 如碱脆, 氢脆, 应力腐蚀裂纹, 氢侵蚀等的影响。

(2) 如本文表 2 列举的典型的承压设备和管道规范, 对 P No.1 材料规定的 PWHT 制度和豁免厚度就存在着很大的差异。以工业压力管道最经典的 ASME B31.3 而言, 自 2020 版起, 最常用的 P No.1 碳钢, 碳锰钢和低合金高强度钢, 在加强预热和多道焊管的前提下, 已豁免了 P No.1 所有厚度的规定性焊后热处理要求以及 PWHT 后的硬度检测要求。但基于国内工业压力管道施工现场对焊接工艺(包括预热, 焊接工艺参数和局部焊后热处理等)控制水平的现实情况, GB/T 20801.4—2020 没有采纳新版 ASME B31.3 P No.1 豁免全部厚度 PWHT 的规定, 并保留了硬度检测要求。

(3) 多年来 ASME B31.3 一直有一条 331.2.2 条款, 即:

① 允许设计或业主根据需要, 修正(更严苛或宽松, 甚至是豁免)标准中的焊后热处理要求;

② 如设计者提出更为宽松的焊后热处理要求时, 应:

- a) 充分考虑具体工况(热循环, 柔性应力分析, 脆断等)的风险控制;
- b) 使用经验或其他规范依据;
- c) 制订相应的工程技术规定;
- d) 在相应的焊接工艺评定(WPS)中进行证实;
- e) 取得业主及相关部门的认可。

4) 依据上列理由, 笔者在 GB/T 20801.4—2020 的 9.3.1 焊后热处理的基本要求中添加了 b) 和 d) 二个条款。

### 4.2 使用环境(介质, 温度)对 P No.1 碳钢焊后热处理制度的影响

本文表 2 已列入了国内外典型的承压设备和管道标准规范中的 P No.1 碳钢, 从改善焊接接头强度和韧性角度出发的 PWHT 的保温温度和豁免条件。

其中都注明,未考虑介质和使用环境的影响。表 3 所列

等为推荐的 P No.1 碳钢材料焊后热处理的工艺参数,供压力管道设计人员制订工程技术规定时参考。

表 3 应力裂纹使用环境下 P No.1 碳钢焊接接头控制应力腐蚀裂纹的推荐焊后热处理工艺参数

Table 3 Recommended post-weld heat treatment process parameters for controlling stress corrosion cracking in P No.1 carbon steel welded joints under stress cracking usage environment

材料类型	工作环境和标准规范(或文件)依据	PWHT 保温温度/°C
P No.1 碳钢	NACE MR0103 石化炼油工业防止硫化物应力裂纹选材要求	620~650
P No.1 碳钢	API RP 941 高温高压氢侵蚀用钢	620~650
P No.1 碳钢	NACE SP0403 碳钢设备与管道防止碱脆应力腐蚀破裂指南 NACE 34108-07 碱性碳酸盐应力腐蚀开裂研究进展与展望	620~650
P No.1 碳钢	NACE 0472 碳钢焊缝防止介质应力裂纹(湿硫化氢,碱脆,胺,碳酸盐)指南 API RP 945 碳钢焊缝防止胺应力裂纹	620~650
P No.1 碳钢	NACE 0472 碳钢焊缝防止介质应力裂纹(湿硫化氢,碱脆,胺,碳酸盐)指南 NACE TG347 碳钢焊缝防止碳酸盐应力裂纹	650~675
P No.1 碳钢	NACE 5A171 氢氟酸和无水氟化氢用材 API 582 6.2 节氢氟酸用材	620~650
P No.1 碳钢	NACE SP0590—2007 除氧器开裂的预防	620~650
P No.1 碳钢	API 939D, API 939E 乙醇应力腐蚀裂纹的预防	620~650

#### 4.3 低合金铬钼钢的焊后热处理工艺细分

低合金铬钼钢在工业管道领域中的使用大致可分为以动力锅炉为代表的使用在蠕变温度范围长期强度为主以及石化临氢领域,既要兼顾耐热又要抗氢,同时还需考虑规避回火脆性,提高压力元件韧性水平的多重风险控制要求。由于低合金铬钼钢的焊后热处理范围又比较宽泛,为此,笔者在表 4 和表 5 中分别列入了典型的压力管道和压力容器规范以及 API 582 推荐的 1Cr-0.5Mo, 1.25 Cr-0.5Mo, 2.25 Cr-1Mo 钢的焊后热处理温度,供压力管道设计人员参

考使用。由表 4 和表 5 可见,相对而言,以长期持久蠕变强度为主者,母材的热处理制度以退火或高温回火为宜,压力元件焊后热处理温度也偏高。而对工作温度低于或略高于蠕变阈值温度的耐热抗氢压力管道而言,要兼顾且平衡抗氢、强度、韧性等多重因素,所以回火温度就偏低一些。而对 Cr-Mo 钢厚壁压力容器而言,除了对材料有害元素控制外,为了规避累积的热履历而伴生的回火脆性风险,还需要将焊后热处理温度尽可能再压低些。

表 4 1.0Cr-0.5Mo, 1.25 Cr-0.5Mo (P No.4-1) 钢的焊后热处理温度

Table 4 Post-weld heat treatment temperature of 1.0Cr-0.5Mo, 1.25 Cr-0.5Mo (P No.4-1) steel

预热温度/°C	抗拉强度/MPa	厚度/规格/mm	PWHT 保温温度/°C	附加要求	标准
150	≤ 490	≤ 13	—	—	ASME B31.3-2012 表 330.1.1, 表 331.1.1
	≤ 490	> 13	705~745	HB ≤ 225	
	> 490	全部	705~745	HB ≤ 225	
120		≤ 16	—	C ≤ 0.15%; 多道焊	ASME B31.3-2020 表 330.1.1, 表 331.1.1, 表 331.1.3
120		> 16	650~705		
120		≤ 16	—	C ≤ 0.15%	ASME VIII -1 表 UCS 56-3
120		> 16	≥ 650		
		≤ 114×7	—	—	EN 13480.4, BS PD5500
		> 114×7	630~700 (EN) 630~690 (BS)		
			690~720		API 582 (蠕变长期强度)
			675~705		API 582 (抗氢,韧性,强度)
			665~690		API 934-C, E (临氢厚壁压力容器,回火脆性)

表5 2.25 Cr-1Mo (P No.5A-1) 钢的焊后热处理温度

Table 5 Post-weld heat treatment temperature of 2.25Cr-1Mo (P No.5A-1) steel

预热温度 /°C	抗拉强度 /MPa	厚度 / 规格 /mm	PWHT 保温温度 /°C	附加要求	标准
175		≤ 13	—	—	ASME B31.3-2012 表 330.1.1, 表 331.1.1
175		> 13	705~760	HB ≤ 225	
150	≤ 415	≤ 16	—		ASME B31.3-2020 表 330.1.1, 表 331.1.1, 表 331.1.3
150	≤ 415	≤ 16	675~760	C ≤ 0.15% ; 多道焊	
200	> 415	> 16			
150		≤ 16	—	C ≤ 0.15%	ASME VIII -1 表 UCS56-4
		> 16	≥ 675		
		≤ 114×7			
		> 114×7	670~730 (EN) 670~720 (BS)		EN 13480.4 BS PD5500
			705~730		API 582 (蠕变长期强度)
			690~720		API 582 (抗氢, 韧性, 强度)
			675~705		API 934-A (临氢厚壁压力容器, 回火脆性)

表6 特殊金属材料焊接和焊后热处理工艺一览

Table 6 List of welding and post-weld heat treatment processes for special metal materials

P-No	材料类型	工作环境和标准规范 (或文件) 依据	PWHT 保温温度 /°C
8	奥氏体不锈钢	ASME VIII -1 表 UHA-32-3、UHA-44 (马氏体相变与σ脆化)	固溶快冷
		API 582- 附录 C	
		DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 E	
		BBS doc.04002030 Best Welding practices 12 章	
		AWS D10.4 奥氏体不锈钢管道焊接	
	AWS D18.1、D18.2 奥氏体不锈钢洁净管道焊接 (氧化色)		
	321, 347	ASME VIII -1 附录 UHA-A-4 (应力松弛裂纹) API 582- 附录 C (连多硫酸应力腐蚀裂纹)	870~915
	6Mo	DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 E TIP 0402-20 6Mo 奥氏体不锈钢管道 GTAW 焊接	
	高性能奥氏体不锈钢	BBS doc.04002030 Best Welding practices 13 章	
9A, 9B	1.5%~2.5%Ni 3.5% Ni 质量分数	ASME VIII -1 表 UCS 56-5 ; UCS 56-6 (3.5% Ni) ASME B31.3 表 331.1.1	595~635
		EN13480.4 表 9.14.1-1 EN13445.4 表 10.1-1 BS PD5500 表 4.4-1	530~580
		DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 F	
	1.5%~9%Ni 质量分数	BBS doc.04002030 Best Welding practices 11 章	
10H	双相不锈钢	ASME VIII -1 表 UHA-32-4 ASME B31.3 表 331.1.1 API 582- 附录 D DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 E	S31803 1 020~1 100 °C ; S32550 1 040~1 120 °C ; S32750 1 025~1 125 °C

续表 6 特殊金属材料焊接和焊后热处理工艺一览

P-No	材料类型	工作环境和标准规范 (或文件) 依据	PWHT 保温温度 / °C
		BBS doc.04002030 Best Welding practices 14 章	
		AWS D10.18 双相钢管道焊接	
		ASME B31.3 表 331.1.1 ASME B31.1 表 132.1.1-1 ASME VIII -1 表 UCS 56-11	705~775
		API TR938-B API 582- 附录 F	745~770
15E	9Cr-1Mo-V	EN 13480	730~770
		DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/ SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 D	
		EPRI 1012748 Guideline for Welding Creep Strength-Enhanced Ferritic Alloys	
42, 43	Monel 400, M35-1	NACE 5A171 氢氟酸和无水氟化氢用材	690~720
45	incolloy 800, 800H, 800HT	ASME VIII -1 UNF-56 (d)	≥ 885
	镍基耐蚀合金	DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/ SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 G	
		BBS doc.04002030 Best Welding practices 16 章	
		NIDI 11012 镍基耐蚀合金焊接	
		STANDARD SUPPLEMENT SUP-12 NICKEL & HIGH NICKEL ALLOYS	
		AWS D10.6 (Ti 合金)、AWS D10.7 (AL 合金) 管道焊接	
43, 45	AL 合金 Cu 合金 Ti 合金	DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/ SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 I (AL 合金)、附录 H (Cu 合金)、附录 J (Ti 合金)	
		BBS doc.04002030 Best Welding practices 19 章 (AL 合金)、20 章 (Cu 合 金)、21 章 (Ti 合金),	
		API 582-6.3 附录 A、B、C、D、E	
	异种金属焊接	DEP 30106018 (2012) WELDING OF METALS (AMENDMENTS/ SUPPLEMENTS TO API 582) 附录 B、附录 K	
		BBS doc.04002030 Best Welding practices 17 章、8 章	

#### 4.4 几种特殊金属材料焊接和焊后热处理工艺一览

表 6 所列为笔者收集以及 API 582 列入的几种特殊金属材料焊接和焊后热处理工艺一览。由于篇幅所限,无法在文中详细说明,仅供业内压力管道设计人员参考使用。

## 5 管道的局部热处理

### 5.1 管道的局部热处理 (360° 加热)

压力管道系统的焊接工程与锅炉压力容器不同,其预热,层间温度控制,尤其是后热 (脱氢) 处理和焊后热处理一般无法进行整体热处理,而只能进行局部热处理。虽然在 NB/T 47015 《压力容器焊接规程》中对局部热处理有所涉及,但很粗略,尤其对管道焊

接工程中常用的局部热处理的规定少之又少,不足以对管道焊接工程的热处理工序质量进行规范。为此笔者认为有必要引进 AWS D10.10 《管道焊接局部热处理指导性文件》的有关规定予以补充。

### 5.2 均热带、加热带和绝热带 (保温) 以及相关电热偶位置

图 1、图 2 和表 7 所示为管道环缝和支管连接焊缝在预热、层间温度控制以及后热和焊后热处理过程中均热带 SB, 加热带 HB, 绝热带 (保温) GCB 以及相关电热偶位置的规定。

#### 符号说明

$t$ ——管壁 (主管, 支管) 厚度

$R$ ——管子 (主管, 支管) 半径

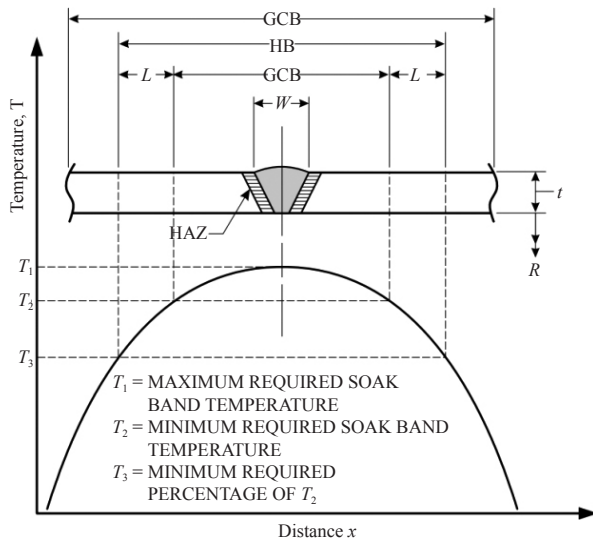


图1 管道环缝热处理过程中均热带、加热带和绝热带(保温)位置

Fig.1 Positions of soaking zones, heating zones and adiabatic (insulated) zones during heat treatment of pipeline ring joints

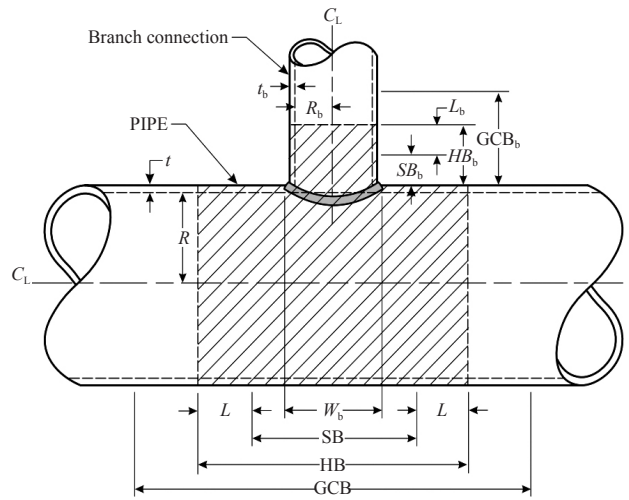


图2 管道支管连接热处理过程中均热带、加热带和绝热带(保温)位置

Fig.2 Positions of soaking zones, heating zones and adiabatic (insulated) zones during the heat treatment process of connecting pipeline branches

表7 焊后局部热处理均热带、加热带和绝热(保温)带以及电热偶位置

Table 7 Localized heat treatment zone, heating zone, insulation (insulation) zone, and thermocouple position after welding

加热类型	均热带 SB	加热带 HB	绝热带(保温) GCB	电热偶位置 (测定最低加热温度)
预热	从焊缝中心至各个方向 +75 mm 或 1.5 t, 取较大值	从焊缝中心至各个方向 +		
层间温度		$2 \left[ \frac{OD^2 - ID^2}{2} + (ID)(SB) \right]$		
焊前脱氢	从焊缝中心至各个方向 +150 mm 或 3 t, 取较大值	$\frac{OD}{OD}$	从焊缝中心至各个方向 +HB+75 mm 或 3 t, 取较大值	电热偶位置: 均热带 SB 边缘。
焊后脱氢				电热偶数量: ≤ DN 150, 1 个 DN 200~300, 2 个 DN 350~450, 3 个 DN 500~750, 4 个 DN 800~900, 5 个
焊后热处理	从焊缝边缘至各个方向 +25 mm 或 1.0 t, 取较小值	从焊缝边缘至各个方向 + 下列之一大者: ① SB+50mm ② SB+4 (Ri) <sup>0.5</sup> ③ $\frac{Hi}{OD} \left[ \frac{OD^2 - ID^2}{2} + (ID)(SB) \right]$	从焊缝边缘至各个方向 + HB+4 (Ri) <sup>0.5</sup>	

OD——管子(主管,支管)外径

ID——管子(主管,支管)内径

Hi——系数, ≤ DN 150, 水平管道单个环缝加热

Hi=5; ≤ DN 150, 水平管道 2 个环缝加热

Hi=3; > DN 150, 水平管道单个环缝加热

Hi=3

所有垂直管道环缝加热 Hi=3

### 5.3 均热带、加热带和绝热带(保温)的作用

(1) 管道局部热处理的均温带及其宽度 SB 的作用在于: 保证整个管道厚度都能达到所需要的最低加热温度。所以焊缝每个方向(管道对接接头对接焊缝两个方向, 主管与支管角接接头对接焊缝三个方向)的均热带最小宽度应包括焊缝、热影响区以及临近区

域。热电偶的监控测定位置应设立在均热带的外侧边缘位置。由于垂直管道热源自然对流的作用, 一般焊缝上端温度高于下端, 因此热电偶应设置在焊缝下方均热带的边缘位置, 以保证最低加热温度达到预期的规范要求。

#### (2) 管道局部热处理的加热带及其宽度的作用

管道局部热处理的加热带及其宽度的作用有三个: 其一, 由于管道外侧单向加热, 因此加热带的作用在于减少管道内侧的热损失。其二, 即使局部加热不可避免地存在轴向和径向温度梯度的情况, 也必须保证整个均热带范围内的金属都能达到规定最低的加热温度。其三, 由于上述管道局部加热而引起轴向和径向温度梯度, 导致在焊缝附近产生的弯曲应力和

剪切应力。加热带的最小宽度规定即是控制由温度梯度而导致的轴向和径向弯曲应力和剪切应力在可控的范围之内。必须说明的是：

① 即由于焊前预热、焊前及焊后脱氢、层间温度控制的温度通常都低于 427 °C (800 °F)，因此产生的轴向温差及由此导致的热应力（残余应力）都不显著，因此加热带和绝热（保温带）宽度的控制只需考虑径向温差的问题。表 7 中相应的 HB 和 GCB 的控制即反映了这个观点。

② 但焊后热处理的加热温度（均热带）通常都在 520 °C 以上，因此加热带宽度就必须计及轴向（表 7 中 HB 宽度栏的①和②）以及径向的温差（表 7 中 HB 宽度栏的③）问题。据 AWS D10.10 的介绍，加热带和绝热带（保温）宽度共同的作用是把加热带外侧边缘的温度控制在焊后热处理温度的 50% 以下。

③ 绝热带（又称温度梯度带或保温带）的主要作用就是控制轴向温度梯度。其保温材料的厚度和导热系数将直接影响轴向温度梯度。

### 5.4 补焊后的局部点状（非 360° 加热）焊后热处理

API 570—2021 《在役管道检验规范》的 8.2.3.3 款对管道局部现场点状焊后热处理的注意事项如下：

(1) 管道工程师应对局部点状焊后热处理进行评审，并制定适用程序；

(2) 在评价局部点状焊后热处理程序的适用性时，应考虑母材厚度、热梯度、材料特性、PWHT 引起的变化、全熔透焊接以及 PWHT 后的表面和内部 NDT 检查等因素。此外，还应考虑由于管壁局部加热引起的整体和局部变形和应变；

(3) 焊接时保持预热 / 层间温度 150 °C 或更高温度；

(4) 局部点状焊后热处理（PWHT）均温带及其宽度应不小于母材厚度的两倍。应根据热处理区域的大小和形状，设置两个以上热电偶来监测 PWHT 温度（包括加热、保温和冷却）；

(5) 局部点状焊后热处理（PWHT）加热和保温区域应包括区域内的支管或其他附件连接焊缝；

(6) 局部点状焊后热处理不适用于应力腐蚀开裂场合。

## 6 硬度检测

焊后或焊后热处理（PWHT）后，通常需要对母材、焊缝和热影响区进行硬度测试。产品焊缝的硬度

测试需要在图 3 所示的 25 mm×25 mm 范围内清洁、酸洗、打磨光滑（表面粗糙度不大于 0.4 μm）。热影响区测点的位置距熔合线不大于 0.2 mm，母材测点距离如图 3 所示。由于现场硬度测试往往只能使用符合 ASTM A833 的便携式（锤击插销式）布氏硬度计。由于受测试设备能力、表面制备条件以及操作技能等多方面因素影响，尤其是热影响区的硬度测量数据的分散性和不确定性较大，如出现个别超标高硬度值时，可在近端增加 3~5 个测点，观察数据分布情况，以确定测量数据的可靠性。并在排除了异常数据外，以焊缝、两侧热影响区和母材五个部位的实测数据平均值为依据进行评估。

而 PQR 中的硬度测试则使用符合 ASTM E92 的 HV10 或 HV5 的维氏硬度计，在焊缝横截面的金相打磨试件上，在实验室的台式维氏硬度计上测试，图 4 所示为双面焊 HV10（HV5）硬度测点的位置示意图（同样适用于单面焊）。硬度测试在距内外表面 1.5 mm 处测试，由于热影响区较窄，热影响区测点可沿熔合线（而不是图示在同一横线上）间距 1 mm 各 3 个测点采用 HV5 载荷测试。对 P No.1-1、1-2 碳钢焊接接头 HV10 或 HV5 的最大硬度限值可放宽至 HV248。

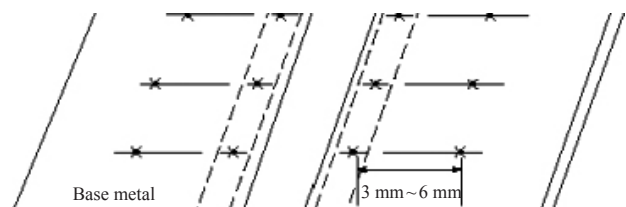


图 3 产品焊缝的硬度测试

Fig.3 Hardness testing of product welds

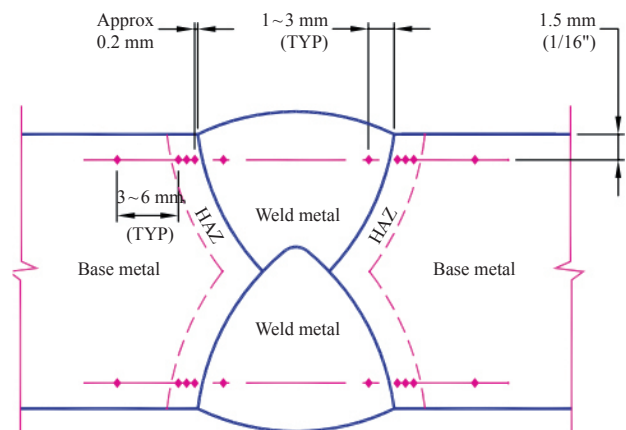


图 4 PQR 中的 HV10, HV5 硬度测试

Fig.4 HV10 and HV5 hardness testing in PQR

## Analysis of Many Misunderstandings and Blind Spots in Welding in Pressure Pipeline Engineering (3) -Post-weld Heat Treatment and Hardness Testing

Ying Daoyan<sup>1</sup>, Tang Xiaoying<sup>2</sup>, You Zihan<sup>3</sup>, Yu Xinpeng<sup>3</sup>

(1. National Technology Center of Process Equipment, Shanghai 200040, China; 2. Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical, Shanghai 200333, China; 3. SINOPEC Shanghai Engineering Co. Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** The cooling rate of heat affected zone (HAZ) in the process of electrofusion welding of ferritic steel is the key factor that leads to the change of microstructure and residual stress in the near weld zone. Post-weld heat treatment has a positive effect on reducing residual stress, forming tempered martensite structure and reducing hardness, but for the construction of on-site pipeline system, it increases the cost of pipeline construction. There are great differences in the insulation temperature and exemption thickness of PWHT, the standard specification for pressure equipment and pipelines, GB/T 20801.4—2020 also stipulates the relevant provisions of PWHT.

**Keywords:** ferritic steel; residual stress; hardness; quenched structure; PWHT, exemption conditions; holding temperature; local PWHT; hardness testing

### “书香伴墨韵，佳作耀星辉”

——《化工与医药工程》优秀作者评选

《化工与医药工程》创刊于1980年，是国家认定的学术期刊（A类）。曾荣获全国石油和化工技术期刊50强。为进一步提升期刊论文质量和学术影响力，鼓励广大专家学者积极为本刊投递优稿好稿，充分发挥优秀作者评选的激励、导向和示范作用，编辑部现开展优秀作者评选工作。本次优秀作者评选不仅是对作者在技术领域创新成果的进一步肯定，也是助力期刊发展的重要支撑，欢迎广大作者积极参与评选。

#### 一、评选范围

参加本次评选的作者需在《化工与医药工程》发表过论文，论文刊登的时间为2020年至今。

#### 二、评选标准

作者发表的论文需满足以下要求，包括但不限于发表在本刊：

1. 论文选题紧密结合生产需求和发展实践，为生产实践中前沿问题，针对专业领域的实践问题提出科学合理的策略或方法，具有较好的社会效益或较好的应用前景。
2. 论文主题明确，论点清晰；论据充分、材料翔实可靠；分析综合全面，推理严密；调研、试验、设计等方法先进可行；结论准确；文字表达精练，引证规范。
3. 论文被引频次，下载量等统计分析数据将作为综合评价的量化因素。
4. 论文曾获得荣誉奖项，将优先考虑在本刊发表论文的获奖情况。

请参与评选的作者将获奖证书、论文被引频次等数据库信息和其他申请材料的扫描件发至 [cpe.ssec@sinopec.com](mailto:cpe.ssec@sinopec.com)，邮件主题为“优秀作者评选”。评选结果将于年末公布，编辑部将为优秀作者颁发荣誉证书，评选结果将刊登于本刊。

《化工与医药工程》编辑部