

# G115 钢 CMT + P 焊接工艺及组织和性能

徐连勇<sup>1,2,3</sup>, 庞红宁<sup>1</sup>, 赵雷<sup>1,2</sup>, 韩永典<sup>1,2</sup>, 迟大钊<sup>3</sup>

(1. 天津大学, 天津, 300072; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津, 300072;

3. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001)

**摘要:** 基于冷金属过渡加脉冲 (CMT + P) 的焊接方法, 研究了新型回火马氏体耐热钢 G115 的焊接性以及焊接接头组织和性能。结果表明, 焊接接头经热处理后为回火马氏体组织, 焊缝晶粒呈现出等轴晶和柱状晶两种不同的形貌, 而焊接热影响区和母材晶粒均为等轴晶。与焊条电弧焊 (SMAW) 相比, CMT + P 焊接方法有效降低了热输入, 大幅度减小了热影响区宽度, 提高了焊接接头的拉伸性能和热影响区冲击韧性, 焊接接头焊缝冲击韧性略有降低。焊接接头的室温和高温拉伸断裂机理均为韧性断裂, 室温拉伸断口的韧窝内存在一定量的析出相。

**关键词:** 新型回火马氏体耐热钢; 微观组织; 力学性能; 冷金属过渡

**中图分类号:** TG 444

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20200208002

## 0 序言

为了满足新一代 630 ~ 650 °C 先进超超临界机组的需要, 钢铁研究总院和宝钢联合研发出一种新型回火马氏体耐热钢 G115, 其 650 °C 下  $1 \times 10^5$  h 持久外推强度是 P92 钢的 1.5 倍, 抗高温蒸气氧化性能与可焊性和 P92 钢相当, 可用于 630 ~ 650 °C 温度段主蒸汽管道和集箱等厚壁部件<sup>[1]</sup>, 将应用到世界首台 630 °C 超超临界燃煤电站二次再热机组大唐山东郓城主蒸汽管道。目前, 针对 G115 钢的研究局限于 G115 钢母材的高温性能<sup>[2-3]</sup>, 而对于 G115 钢焊接工艺的研究鲜见报道。对传统铁素体耐热钢, 如 P92, P91 和其它 9% ~ 12% Cr 高等级耐热钢, 成熟应用的焊接方法为钨极氩弧焊打底, SMAW 或埋弧焊填充盖面, 这种焊接工艺焊接热输入高、热影响区较宽, 在焊接接头易发生不完全重结晶区 (IV 区) 早期失效<sup>[4-6]</sup>。而减小热影响区尺寸可以降低 IV 区早期失效的倾向<sup>[7]</sup>, 与 P92, P91 相比, G115 钢合金含量高、焊接困难, 焊接接头容易出现裂纹、韧性指标不合格和金相微观缺陷等问题, 减小焊接热输入有望解决 G115 的焊接难题。冷金属过渡 + 脉冲焊接技术 (CMT + P) 综合了 CMT 低热输入和

脉冲焊大熔深的优点, 相比于 SMAW, 可显著降低焊接热输入<sup>[8-9]</sup>, 陈庆宏等人<sup>[10]</sup>将 CMT + P 用于 P92 钢的焊接, 提高了焊接接头性能。开展 G115 钢的焊接工艺和组织以及力学性能研究, 对其工程应用具有积极意义。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

板材厚度为 15 mm, 处理工艺为正火 1070 °C 保温 1.5 h 空冷 + 回火 780 °C 保温 3 h 空冷, 初始组织为板条马氏体。焊丝采用直径为 1.2 mm 的 G115 钢同质实心焊丝 GER-95。

### 1.2 试验方法

采用 CMT + P 复合焊接, 定义一个循环周期内的 CMT 出现的个数与脉冲出现的个数之比为脉冲比 (CMT/P), 其数值直接影响焊接热输入和焊缝的熔深; 三组焊接工艺参数如表 1 所示; 保护气为 Ar + 2.5% CO<sub>2</sub> 混合气体, 气体流量为 15 L/min; 焊接坡口为 60° V 形坡口, 钝边 1 mm, 初始端坡口间隙为 1 mm, 末端坡口间隙为 1.5 mm。

焊接过程中用信号采集卡获取 CMT + P 焊接电流和电压信号, 采用表达式 (1) 精确计算出不同焊接工艺参数下的焊接热输入。

$$E = \frac{\eta \int_{t_1}^{t_2} U_t I_t dt}{(t_2 - t_1)v} \quad (1)$$

收稿日期: 2020-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975405); 哈尔滨工业大学现代焊接国家重点实验室基金资助项目 (AWJ-20-R01)。

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding parameters

编号	热输入 $E/(\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1})$	送丝速度 $v_1/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $v_2/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	脉冲比	焊枪摆动幅度 $A/\text{mm}$	摆动停留时间 $t/\text{s}$
1	5.7	4.5	4~5	1:10	无	无
2	5.7	4.5	4~5	1:10	0.5	0.1
3	7.7	5~5.5	5	1:15	1	0.2

式中:  $E$  为热输入;  $U_t$  为电压;  $I_t$  为电流;  $v$  为焊接速度;  $\eta$  为热效率系数, 取 0.8.

焊前预热至 200 ℃ 以防止冷裂纹产生, 焊接过程中保持层间温度为 250 ℃, 焊后进行 780 ℃ 保温 3 h 焊后热处理.

对三种工艺焊接接头成形质量分析, 发现焊接工艺 1 宏观成形较差, 填充过程中出现明显的焊道偏移及侧边未熔合; 焊接工艺 2 宏观成形较好, 未出现焊道偏移, 但通过金相观察发现侧边未熔合缺陷; 焊接工艺 3 焊缝正面和背面外观均匀美观, 成形良好, 金相观察无缺陷. 焊接热输入低是造成焊接工艺 1 和焊接工艺 2 侧边未熔合的主要原因, 而熔池偏移造成了焊道偏移, 焊枪适当摆动可以消除焊道偏移. 鉴于焊接工艺 3 成形质量良好, 后续重点分析焊接工艺 3 接头的组织和性能.

从焊缝中心位置制备金相试样并研磨抛光, 经 5 g  $\text{FeCl}_3 + 15 \text{ mL HCl} + 80 \text{ mL H}_2\text{O}$  腐蚀液浸蚀 35 s, 观察焊接接头宏观形貌和微观组织. 使用显微硬度计对接头硬度分布进行测试, 加载力为 3 N. 室温拉伸试验按照 GB/T228.1—2010 在 DDL300 电子万能试验机上进行, 加载速率为 0.375 mm/min; 高温拉伸试验在电子蠕变试验机上进行, 试验温度为 650 ℃, 加载速率为 0.125 mm/min, 并采用扫描电镜观察拉伸断口形貌. 焊缝金属冲击试验参照 GB/T2649—2008 进行, 在 JBS-300B 数显率自动冲击试验机上进行室温测试, 焊缝金属试样的缺口轴线位于焊缝中间并垂直于焊缝表面, 热影响区试样的缺口轴线过熔合线并垂直于焊缝表面.

## 2 结果分析

### 2.1 焊接接头显微组织

G115 焊缝焊接接头宏观形貌和各微区金相组织如图 1 所示, 焊接接头成形质量良好. 金相观察位置如图 1a 所示, 远离焊缝的母材由于没有经历焊接热循环过程, 其组织仍为图 1b 所示的原始板

条马氏体组织, 原奥氏体晶粒尺寸约为 50  $\mu\text{m}$ , 板条马氏体在原奥氏体晶粒内部和边界形核长大, 如图 1b 中线条所示. 在焊接过程中, 焊缝和母材相邻的部位存在很窄的熔合区, 如图 1c 所示, 这个区域的温度处于固液相线之间, 焊缝与母材不规则的结合在一起, 组织具有很大的不均匀性. G115 在采用 SMAW 焊接时, 易在熔合区产生液化裂纹, 但利用 CMT + P 并未观察到焊接接头存在液化裂纹现象. 从图 1c 中明显观察到从熔合线到焊缝中心存在着具有特定生长方向的柱状晶, 这是因为焊接时熔池温度较高, 母材温度较低, 母材到焊缝中心存在着很大的温度梯度, 在焊接过程中冷却速度较快的情形下, 熔化的金属由熔合线向焊缝中心生长导致的.

焊缝组织呈现出等轴晶和柱状晶两种不同的形貌. 焊根 (距离焊接接头下表面 2 mm 以内) 主要为等轴晶如图 1d 所示. 形成等轴晶形貌的原因有两点, 一是焊根处只存在一道焊道, 晶粒从母材两侧同时向焊缝中心生长, 导致晶粒柱状晶特征不明显或只存在少量尺寸较小的柱状晶; 二是在后续的焊接过程中, 填充层对焊根进行了二次加热, 使焊根处的组织发生了相变再结晶, 存在的少量柱状晶组织也转变成了等轴晶组织. 图 1e 为填充焊道中典型的柱状晶马氏体组织. 从焊缝中心至熔合线之间区域柱状晶特征比较明显, 在填充焊过程中每个焊道中心与相邻区域存在很大的温度梯度, 且各个方向的温度梯度不同, 液态金属以柱状晶的形态向各个温度梯度方向生长, 在温度梯度大的方向晶粒生长较快, 尺寸也较大, 由于各个方向的温度梯度不同, 焊缝中柱状晶的生长方向也不同.

HAZ 区域内由于距焊缝远近不同, 经历了不同的焊接热循环, 组织转变过程也不相同, 这个区域划分为 4 个区域: 熔合区、粗晶区、细晶区和不完全重结晶区. 熔合区和粗晶区组织如图 1c 所示. 细晶区和不完全重结晶区如图 1f 所示. 焊接接头焊接热影响区总宽度约为 1.5 mm, 而前期 SMAW 焊接



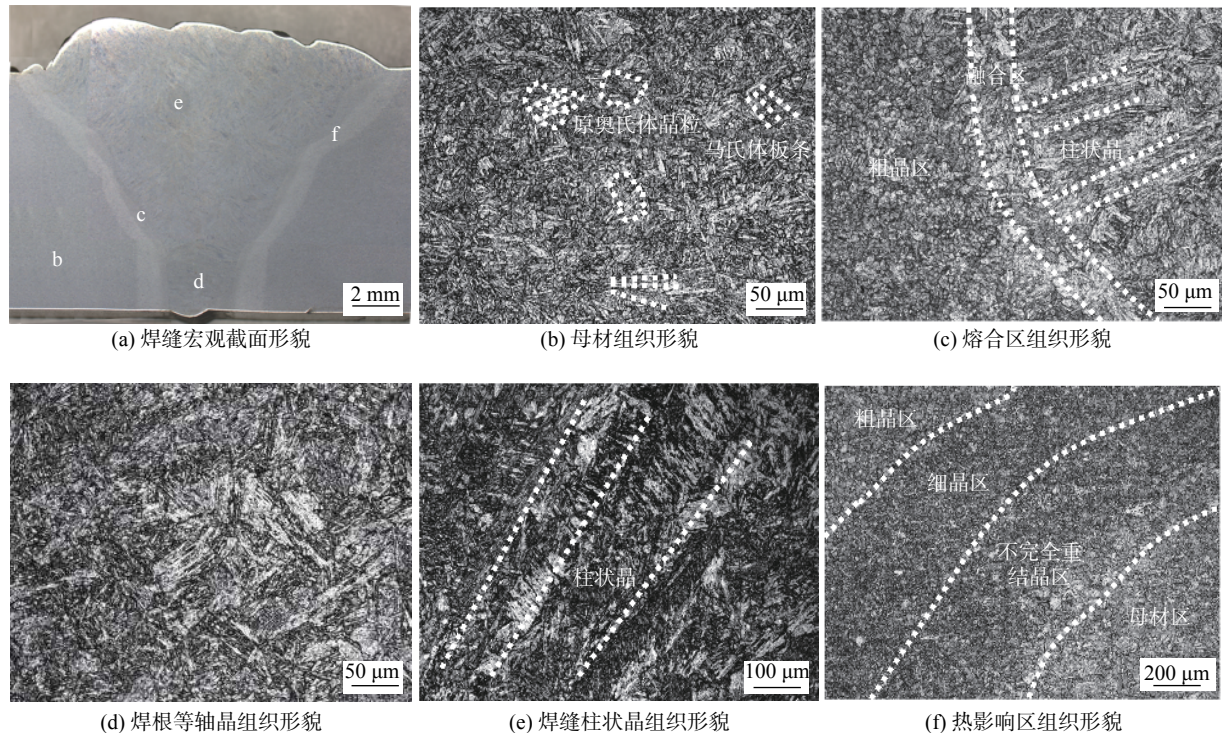


图 1 焊接接头各不同区域金相组织

Fig. 1 Microstructures in different parts of welding joint. (a) macroscopic feature; (b) microstructure of base material; (c) microstructure of fusion zone; (d) equiaxial structure; (e) columnar crystal structure; (f) microstructure of HAZ

接头热影响区宽度为 2.5 ~ 3 mm, CMT + P 焊接方法显著降低了热影响区宽度. 焊接接头热影响区的宽度与铁素体耐热钢高温蠕变过程中的 IV 型断裂有关, 焊接热影响区越窄, 产生 IV 型裂纹倾向性越小<sup>[7]</sup>, 所以采用 CMT + P 获得窄的焊接 HAZ 区对于提升 G115 钢焊接接头寿命具有重要的意义.

## 2.2 焊接接头的维氏硬度

焊接接头硬度测试结果如图 2 所示. 母材的平均硬度为 210 HV0.3, 热影响区的平均硬度 207 HV 0.3, 两者相差较小. 在焊接热影响区每隔 0.2 mm 测试一个点, 根据硬度变化情况判断焊接热影响区

的宽度约为 1.5 mm, 与宏观测量结果一致. 焊接接头的硬度最大值位于焊缝以及近缝处, 细晶区的硬度略微大于粗晶区, 通过硬度变化情况判断细晶区尺寸约为 0.4 mm, 粗晶区约为 0.5 mm, 未完全重结晶区约为 0.5 mm.

## 2.3 焊接接头拉伸与冲击性能

### 2.3.1 焊接接头冲击性能

试验母材、焊接热影响区以及焊缝冲击性能分别为 47, 53, 62 J. SMAW 方法获得的焊缝和热影响区冲击吸收能量分别为 51 和 38 J, 可以看出, G115 钢 CMT + P 方法焊缝冲击吸收能量与 SMAW 方法焊缝冲击吸收能量相当, 而 CMT + P 热影响区冲击吸收能量明显高于 SMAW 冲击吸收能量.

CMT + P 工艺下, G115 钢焊接接头的焊缝和焊接热影响区的平均冲击吸收能量小于母材, 焊缝组织为粗大的柱状晶组织, 热影响区晶粒较细但组织不均匀, 所以母材韧性较好; 焊缝的平均冲击吸收能量小于焊接热影响区的平均冲击吸收能量, 主要是由于焊接热影响区晶粒尺寸比焊缝小, 表现出较好的韧性.

### 2.3.2 焊接接头拉伸性能

G115 钢母材的室温抗拉强度为 778 MPa, 高

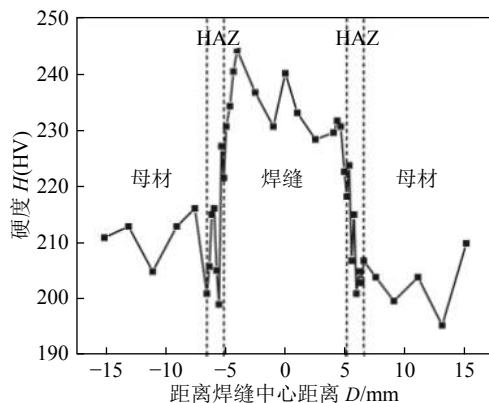


图 2 焊接接头显微硬度

Fig. 2 Microhardness of welded joint

温抗拉强度为 281 MPa<sup>[2-3]</sup>, 前期 SMAW 焊接头室温抗拉强度为 723 MPa, 高温抗拉强度为 240 MPa. CMT + P 工艺焊接接头室温抗拉强度为 739 MPa, 高温抗拉强度为 277 MPa, 高于 SMAW, 可见降低焊接热输入提升了焊接接头的拉伸性能.

室温和高温焊接接头拉伸试样的断裂位置均位于焊接热影响区、并呈现明显的缩颈特征, 是由于焊接热影响区组织晶粒大小不等, 组织不均匀导致了其力学性能较差, 属于焊接接头的薄弱区域. 图 3 为高温拉伸和室温拉伸试样的断口形貌, 可见两者断口均为纤维状, 存在着大量的韧窝, 为典型

的韧性断裂; 相比于室温拉伸断口, 高温拉伸断口颈缩更加显著, 高温拉伸断口的韧窝和尺寸大于室温拉伸断口的韧窝尺寸, 主要是因为随着温度的升高, 材料的塑性变形能力增强, 在高温拉伸过程中, 材料的塑性变形大, 形成的韧窝尺寸较大, 深度较深. 高温拉伸断口在高温环境中被氧化, 只能在表面观察到氧化膜, 而在室温拉伸断口的韧窝内观察到了较多的第二相, 如图 3c 中箭头所示. 主要是由于韧窝的形成与空洞有关, 而空洞一般在析出相处形成, 因为在析出相处很容易形成应力集中, 容易产生空洞, 空洞在滑移的作用下进一步长大并和其它空洞连接在一起就形成了韧窝状断口.

### 3 结论

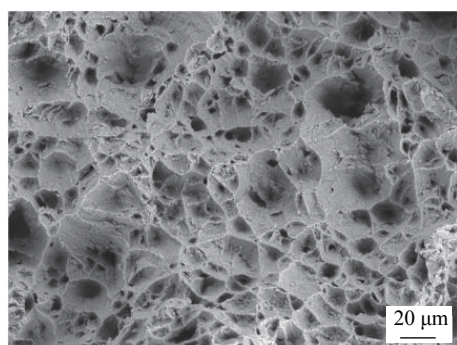
(1) CMT + P 焊接工艺可实现低热输入下 G115 钢厚板的连接, 焊接热影响区尺寸约为 1.5 mm, 相比于 SMAW, 热影响区尺寸显著减小.

(2) G115 母材和焊接热影响区的晶粒均为等轴晶特征, 组织形貌为板条马氏体. 焊根处的焊缝晶粒为等轴晶, 焊缝的其它区域为柱状晶、沿熔合线向焊缝中心为柱状的板条马氏体.

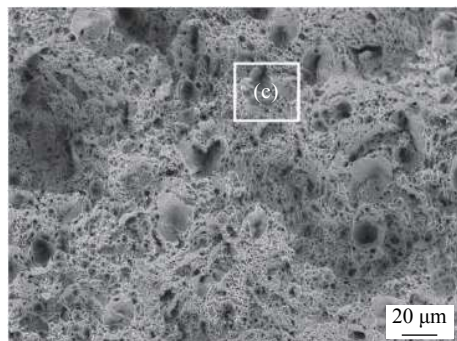
(3) CMT + P 焊接接头拉伸性能高于 SMAW, 热影响区冲击韧性明显优于 SMAW. 焊接接头在室温拉伸和高温拉伸后均发生韧性断裂, 韧窝处存在析出相.

### 参考文献

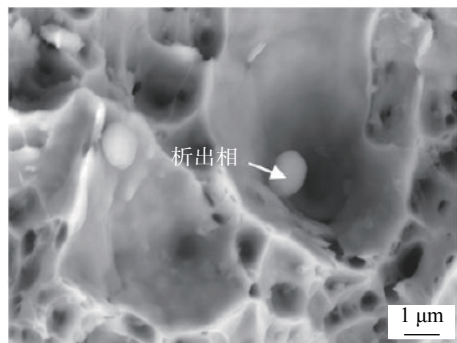
- [1] Liu Z, Xie X. The Chinese 700 °C A-USC development program[M]. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants, 2017.
- [2] 李海昭, 梁军, 周超, 等. 正火温度对 G115 钢组织及室温强度的影响 [J]. 金属热处理, 2018, 39(1): 71 - 76.  
Li Haizhao, Liang Jun, Zhou Chao, *et al.* Effect of normalizing temperature on microstructure and room temperature strength of G115 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 39(1): 71 - 76.
- [3] Xiao B, Xu L, Zhao L, *et al.* Tensile mechanical properties, constitutive equations, and fracture mechanisms of a novel 9% chromium tempered martensitic steel at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 690: 104 - 119.
- [4] Zhao L, Jing H, Xu L, *et al.* Analysis of creep crack growth behavior of P92 steel welded joint by experiment and numerical simu-



(a) 高温试样断口形貌



(b) 室温试样断口形貌



(c) 室温试样断口形貌放大图

图 3 焊接接头断口组织形貌

Fig. 3 Fracture morphology of welded joint. (a) fracture morphology of high temperature specimen; (b) fracture morphology of room temperature specimen; (c) enlargement of room temperature specimen



- lation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 558: 119 – 128.
- [5] 徐忠峰, 王淦刚, 鲁立, 等. 焊后热处理对 P92 钢焊接接头显微组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44(1): 148 – 151.
- Xu Zhongfeng, Wang Gangang, Lu Li, *et al.* Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of P92 steel welded joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(1): 148 – 151.
- [6] 乔亚霞, 武英利, 徐连勇. 9% ~ 12%Cr 高等级耐热钢的 IV 型开裂研究进展 [J]. 中国电力, 2008(5): 33 – 36.
- Qiao Yaxia, Wu Yingli, Xu Lianyong, *et al.* Research progress on Type IV cracking of 9% ~ 12%Cr high-grade heat-resisting steel[J]. Electric Power, 2008(5): 33 – 36.
- [7] Zhao L, Jing H, Xu L, *et al.* Experimental study on creep damage evolution process of Type IV cracking in 9Cr0.5Mo1.8WVNb steel welded joint[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 19: 22 – 31.
- [8] 黄瀚川, 徐连勇, 荆洪阳, 等. SAF2507 超级双相不锈钢 CMT + P 熔滴过渡特性 [J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 127 – 136.
- Huang Hanchuan, Xu Lianyong, Jin Hongyang, *et al.* Study on droplet transfer of CMT + P welding process in SAF2507 super duplex stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 127 – 136.
- [9] Ge J, Wang K, Zhang D, *et al.* Microstructure characteristics and mechanical properties of steel stud to Al alloy by CMT welding-brazing process[J]. China Welding, 2016, 25(1): 49 – 56.
- [10] 陈庆宏, 吕小青, 徐连勇, 等. P92 钢的 CMT + P 焊接接头组织性能 [J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 110 – 114.
- Chen Qinghong, Lü Xiaoqing, Xu Lianyong, *et al.* Microstructure and properties of CMT + P welded joints of P92 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 110 – 114.
- 
- 第一作者简介:** 徐连勇, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事焊接结构方面的科研和教学工作; 发表论文 60 余篇; Email: [xulianyong@tju.edu.cn](mailto:xulianyong@tju.edu.cn).
- 通信作者简介:** 赵雷, 副教授; Email: [zhaolei@tju.edu.cn](mailto:zhaolei@tju.edu.cn).

(编辑: 杨婉春)