

文章编号: 1673-5196(2017)03-0016-05

# P92 耐热钢接头组织与冲击性能

张建斌, 郑泽宇, 刘 帆

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** P92 铁素体耐热钢因其优异的高温综合性能而作为超超临界发电机组用钢. 采用金相显微镜、显微硬度计和扫描电子显微镜等分析方法, 研究了 TIG 自熔焊后 760 °C 回火不同保温时间对 P92 钢接头组织、显微硬度及冲击性能的影响, 从显微组织和断口形貌角度对性能的变化进行了分析. 结果表明: P92 钢焊态下焊缝区平均显微硬度为 400 HV<sub>0.5</sub>, 冲击韧性值为 20 J. 经回火热处理, 焊缝区显微硬度显著降低, 冲击韧性提高, 接头中 δ-铁素体体积分数显著减少. 在 760 °C 回火保温 7 h 后, 焊缝区平均硬度下降到 234 HV<sub>0.5</sub>, 冲击韧性值增加到 86 J. 随回火时间的延长, 断口形貌从韧/脆混合断裂向韧性断裂过渡.

**关键词:** P92 钢; 焊后热处理; δ-铁素体; 冲击韧性

**中图分类号:** TG407 **文献标志码:** A

## Research on microstructure and anti-impact performance of P92 heat-resistant steel joint

ZHANG Jian-bin, ZHENG Ze-yu, LIU Fan

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** P92 ferrite heat-resistant steel has been taken as raw stuff for ultra-supercritical (USC) power-generating set because of its excellent high-temperature performance. The effect of heat-proof time after TIG self-fluxing welding of P92 steel joint with tempering at 760 °C on its microstructure, microhardness and anti-impact performance was investigated by using relevant analysis method such as metallographic microscope, scanning electron microscope, and microhardness tester. The performance change was analyzed according to the microstructure and fracture morphology. The result showed that the average microhardness of P92 steel weld zone in a welding state would be 400 HV<sub>0.5</sub> and impact toughness would be 20 J. After tempering treatment, the microhardness of weld zone would reduce significantly, impact toughness would increase, and the content of δ-ferrite within the joint would reduce significantly. The average microhardness of weld zone would be decreased to 234 HV<sub>0.5</sub> and impact toughness would be increased to 86 J after tempering at 760 °C for 7 h. With extending the heat-proof time of tempering, the fracture morphology would transform from ductile/brittle mixed fracture into ductile fracture.

**Key words:** P92 steel; post-welding heat-treatment; δ-ferrite; impact toughness

近年来,随着全球对环境问题日益关注,要求火电厂降低 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub> 等废气排放,以满足越来越严格的环保要求,高效率的超临界(250×10<sup>5</sup> Pa、550 °C)和超超临界(300×10<sup>5</sup> Pa、610 °C)发电机组正在加快应用于传统的火力发电与新兴的核电产业中<sup>[1-2]</sup>. 热电厂一般通过提高蒸汽参数来提高热效率<sup>[3]</sup>,火力发电机组参数正在向超超临界参数及以

上发展,耐热钢在高温高压下以其优良的力学性能,快速地被应用到超临界和超超临界发电机组中,而 P91 和 P92 是  $w(\text{Cr}) = 9\%$  耐热钢的代表性钢种<sup>[1-5]</sup>.

在 9Cr1Mo 的基础上降 C 并添加微合金化元素 V、Nb 等得到 P91 耐热钢. 在 P91 中用 W 替代部分 Mo,且加入少量的 B,通过 W 的固溶强化及 Nb、V 等碳氮化物的弥散强化来进一步提高钢材的高温持久强度,得到新型铁素体耐热钢 P92 钢<sup>[6]</sup>. P92 钢可用于 610 °C 以上超高临界电站锅炉中的高温过热

收稿日期: 2016-11-12

作者简介: 张建斌(1972-),男,甘肃天水人,博士,副教授.

器、再热器部分和主蒸汽管道等.国内外研究人员对9Cr耐热钢焊接方法、焊后热处理和冲击韧性进行了较系统的研究<sup>[7-9]</sup>.研究表明,手工钨极氩弧焊打底+焊条电弧焊、埋弧焊和(活性)钨极氩弧焊都可用于9Cr耐热钢的焊接,且焊接工艺参数的优化选择对焊接接头性能有显著影响;焊后热处理是提高和改善焊接接头冲击韧性的有效途径,优选焊后热处理工艺制度可获得强韧性良好的焊接接头;焊接接头良好的综合力学性能与其组织密切相关.

为了避免填充金属对接头组织的影响,本文采用以TIG自熔焊作为热源研究了760℃回火,不同

保温时间对P92钢接头微观组织及冲击性能的影响,为P92钢的焊接施工及焊后热处理工艺优化提供参考.

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验材料规格为75 mm×48 mm×6 mm的P92钢板.表1为放电质谱法(GDMS)测量的P92钢化学成分,其中Cr质量分数为8.57%,W质量分数介于1.5%~2.0%,符合美国ASMESA 335—P92成分标准,属于中Cr合金钢.

表1 P92钢化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of P92 steel(mass-fraction)							%
元素	C	Cr	Mo	W	Si	Ni	Mn
P92	0.12	8.57	0.37	1.52	0.25	0.25	0.41
ASMESA335	0.07~0.13	8.5~9.5	0.30~0.60	1.5~2.0	0.50	0.40	0.30~0.60
元素	P	S	V	Nb	N	B	
P92	0.02	0.01	0.21	0.06	0.04	0.003	
ASMESA335	0.02	0.01	0.15~0.25	0.04~0.09	0.03~0.07	0.006	

### 1.2 试验方法

实验焊机(WP300)为交直流两用脉冲TIG焊机.焊前采用机械方法对母材表面的油、水、锈等清理,直至发出金属光泽,并在300-1012T型超声波清洗机中用丙酮对母材表面进行超声波清洗.依据DL/T 869—2012《火力发电厂焊接技术规程》对6 mm厚P92钢进行表面熔焊,焊后热处理实验在SX2型箱式电阻炉中进行,在760℃恒温保温时间分别为1、4、7 h,随炉冷却到室温.

使用线切割方法制作试样用于焊接接头微观组织观察和缺口冲击性能测试.冲击实验依据GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》在JB-300B半自动冲击试验机上进行,冲击试样示意图及实物图如图1所示.金相试样经过打磨与抛光后,使用Vilella试剂(苦味酸1~2 g+盐酸5 mL+酒精95 mL)腐蚀,腐蚀时间约为40 s,在4XC金相显微镜下观察组织.借助图像分析软件(Image J)对焊缝区和熔合区中的 $\delta$ -铁素体的体积分数进行定量

分析.显微硬度测量使用HV-1000显微硬度计,加载载荷为0.5 kg,加载保持时间为10 s.冲击断口形貌在JSM-6700冷场发射扫描电子显微镜下观察.

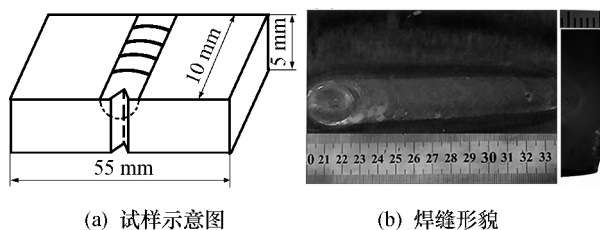
## 2 试验结果与分析讨论

### 2.1 焊接工艺

结合6 mm厚试样尺寸,选择焊接工艺如下:钨极直径为2.4 mm,氩气流量为10 L/min,弧长为3 mm,焊速选择60 mm/min,然后分别在电流参数为50、80、130、170、200 A(即对应的热输入分别为10、16、26、34、40 kJ/cm)下进行TIG自熔焊.当焊接电流为高于130 A,此时焊接热输入大于26 kJ/cm,试样被焊穿;当焊接电流低于130 A,试样熔深不足,熔池流动性差,焊缝不饱满.综合考虑焊接接头宏观形貌(如图1b所示)、熔深、熔宽及微观组织分析,选取焊接电流为130 A(热输入26 kJ/cm)进行TIG自熔焊,焊后试样用于焊接接头微观组织观察和缺口冲击性能测试.

### 2.2 金相组织与显微硬度

图2是不同热处理状态下P92钢焊接接头的金相组织.从图中可以看出,P92钢接头均包含焊缝区(WZ)、熔合区(FZ)和母材(BM)3个区域,母材组织为珠光体(黑)和铁素体(白),焊缝区与熔合区金相组织为马氏体和多边形 $\delta$ -铁素体.其中多边形 $\delta$ -铁素体多分布在于熔合区,在焊缝中心呈条状且出现几率小.在放大200倍视场下采集焊缝区和熔合区所有 $\delta$ -铁素体对其进行体积分数的定量分析.在



(a) 试样示意图

(b) 焊缝形貌

图1 冲击试样与焊缝形貌

Fig.1 Impact samples and weld metal morphology

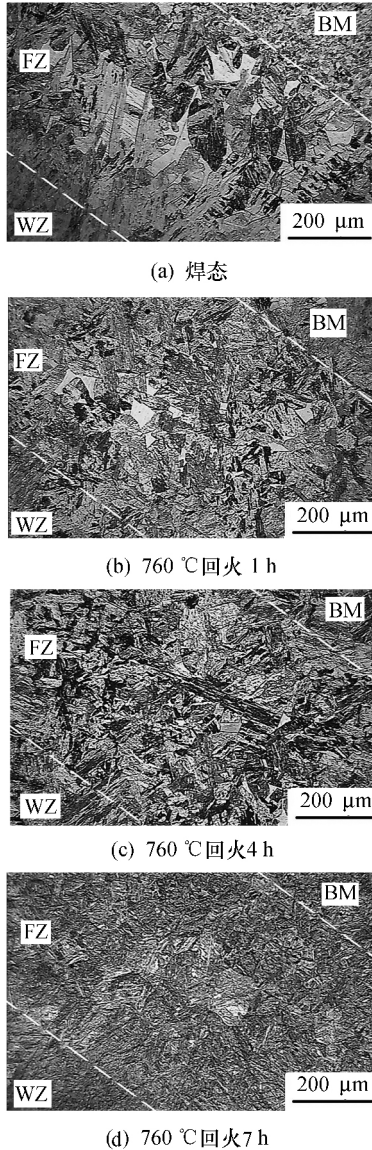


图 2 不同热处理状态下 P92 钢焊接接头的金相组织  
Fig. 2 Metallographic structure of P92 steel weld joints under different heat-treatment condition

图 2a 焊态下,焊缝区与熔合区显微组织主要为淬火马氏体以及  $\delta$ -铁素体, $\delta$ -铁素体体积分数为 11.3%,沉淀析出相很少.经 760 °C 焊后热处理(见图 2b~d),组织中淬火马氏体部分完全转变为回火马氏体,内应力降低,沉淀析出相增多.回火保温 1、4、7 h 后  $\delta$ -铁素体体积分数分别为 4.5%、2.9%和 1.1%.

图 3a 为焊态下焊缝区(WZ)SEM 组织,可见焊态下马氏体转变充分,原奥氏体晶界清晰可见.图 3b 为 760 °C 回火 7 h 焊缝区光学组织,可见焊缝组织均匀,组织中有细小弥散的沉淀析出,该沉淀相为碳化物(周强国等人认为该碳化物为  $Cr_{23}C_6$  和少量 MX 相<sup>[10]</sup>).这种组织的变化必然会对其显微硬度及冲击性能带来影响.

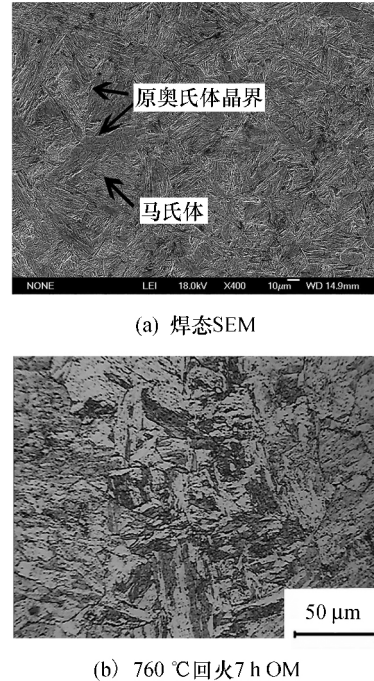


图 3 P92 焊缝组织

Fig. 3 Microstructure of P92 weld metals

图 4 为不同热处理状态下的 P92 钢焊接接头显微硬度分布曲线.以焊缝中心为原点,间距为 0.5 mm,沿着焊缝 熔合区 母材方向测量.由图 4 可以看出,P92 钢焊接接头的显微硬度变化趋势为:焊态下焊缝硬度最高,760 °C 回火处理显著降低焊缝硬度,且随回火时间的延长硬度稍有降低并逐渐接近于母材硬度.焊态下焊接接头中焊缝区、熔合区和母材平均硬度分别为 400、361、213  $HV_{0.5}$ .经 760 °C 焊后热处理硬度显著下降,且焊缝区与熔合区硬度接近.回火保温 1、4、7 h 焊缝区的平均硬度分别为 253、244、234  $HV_{0.5}$ .熔合区的平均硬度分别为 227、221、215  $HV_{0.5}$ .

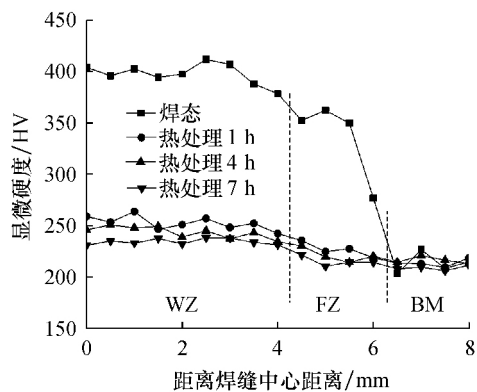


图 4 不同热处理状态下 P92 钢焊接接头显微硬度曲线  
Fig. 4 Microhardness curves of P92 steel welded joint under different heat-treatment conditions

焊态下熔合区的硬度有突降现象,如图 5 所示,图中具有菱形压痕的黑色区域组织为板条马氏体,其硬度值为 365 HV<sub>0.5</sub>;而具有菱形压痕的白色区域为 δ-铁素体,其硬度值为 210 HV<sub>0.5</sub>. δ-铁素体的硬度明显低于邻近板条马氏体的硬度.这就造成在冲击载荷的作用下 δ-铁素体周围容易产生较大的应力集中,给 P92 钢焊接接头带来不利的影响.

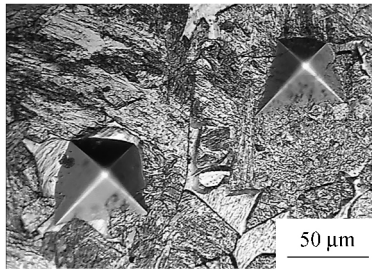


图 5 熔合区维氏硬度计压痕

Fig. 5 Vickers hardness indentation at fusion zone

与焊态硬度相比,回火处理硬度值的下降主要归因于淬火马氏体向回火马氏体转变,回火时间引起硬度值的变化与 δ-铁素体的分解、合金元素的脱溶析出和碳化物颗粒弥散强化<sup>[11]</sup>.

### 2.3 冲击韧性与断口形貌

对 P92 钢在优化焊接工艺参数下得到的 TIG 焊焊接头进行缺口冲击性能测试.图 6 为不同状态下缺口冲击吸收功和相应的平均硬度变化曲线.通过对比图 6 中焊态、回火态和母材可以发现以下趋势:显微硬度逐渐下降,焊缝冲击韧性呈上升趋势;焊态下焊缝区冲击韧性值只有 20 J,母材的冲击韧性值为 102 J,而 760 °C 回火态冲击韧性值介于焊态和母材之间.

随着回火时间的延长,焊缝冲击韧性显著提升,

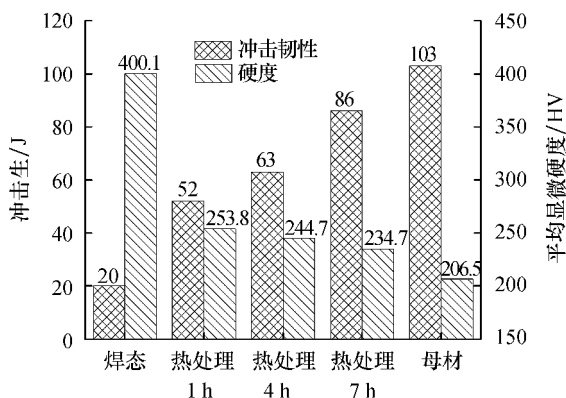
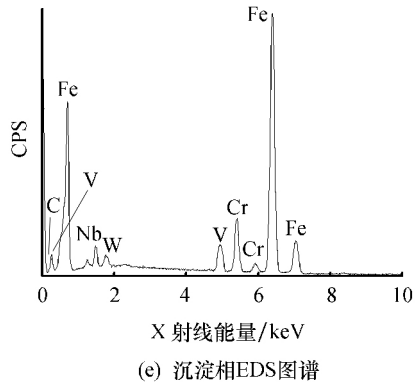
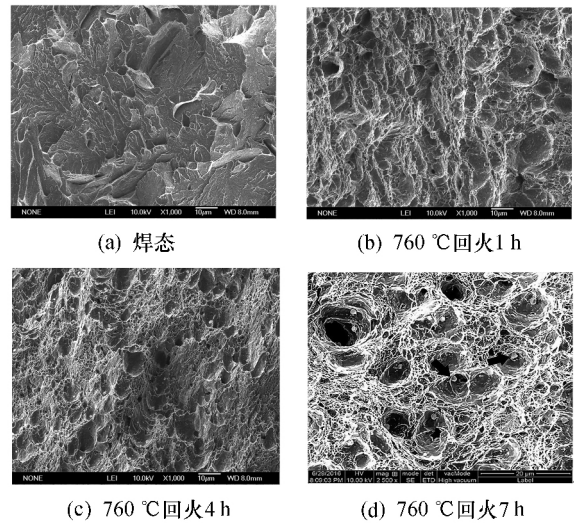


图 6 不同热处理状态下缺口冲击功与平均硬度变化

Fig. 6 Variation of average micro-hardness and notch impact toughness under different heat-treatment conditions

均满足 DL/T 868—2004《焊接工艺评定规程》中冲击吸收功大于 41 J 的要求.回火 7 h 后焊缝冲击韧性值为 86 J,这种韧性的提高归因于随着回火时间的延长接头中沉淀析出相增多. δ-铁素体尺寸变小、体积分数显著减少(由 11.3% 下降到 1.1%),内应力降低,提高工件使用寿命.

图 7 为不同热处理状态下 P92 钢焊缝冲击断口形貌.从图 7a~d 可以看出,冲击断口形貌从脆性断裂逐渐转变为以韧性为主的混合断裂.焊态下焊缝区微观断口启裂区小,基本无塑性变形,断裂沿一定的结晶面扩展,断口上有河流花样,准解理小平面比较平整、河流的流向与裂纹扩展方向一致.小平面之间以撕裂方式相接,有少量撕裂棱.经 760 °C 热处理后,断口塑性变形增大,出现较多的断口撕裂棱和韧窝.图 7b 为回火 1 h 试样的断口形貌,为典型的韧窝状和准解理断口混合形貌,深孔韧窝边缘处存在因滑移而产生的河流状花纹,韧窝呈扁平状,深孔洞



(e) 沉淀相EDS图谱

图 7 不同热处理状态下 P92 钢焊缝冲击断口形貌和 EDS 图谱

Fig. 7 Impact fracture morphologies of P92 weld metals under different heat-treatment conditions and EDS spectra

数量不多.如图 7b~d 所示,随着回火时间的延长,断口撕裂棱和深孔韧窝增多,断口的纤维区变宽,韧性提高.在回火 7 h(如图 7d 所示)试样断口中有较多的尺寸约为  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  的小颗粒球状第二相粒子(箭头所示)析出,能够清晰地看出这些球状第二相粒子与周围的微坑几乎是一一对应的,说明一个球状第二相粒子就是一个微坑的形核位置.图 7e 为图 7d 中第二相粒子的 EDS 图谱,结合文献[11]确定这类第二相粒子为 MX 碳氮化物, MX 相主要化学成分为 C、N、V 和 Nb.图中的 Fe 和 Cr 元素均来自于基体.

### 3 结论

1) P92 钢 TIG 自熔焊后在接头中会出现  $\delta$ -铁素体,焊后热处理能显著减少  $\delta$ -铁素体体积分数,回火 7 h 后  $\delta$ -铁素体体积分数降为 1.1%.

2) P92 钢经 760 °C 焊后热处理后焊缝硬度由大到小变化为:  $\text{HV}_{0.5}$  (焊态)、 $\text{HV}_{0.5}$  (回火)、 $\text{HV}_{0.5}$  (母材),回火时间对硬度影响不大.

3) P92 钢焊缝缺口冲击韧性由大到小变化为:母材、回火、焊态.焊态下焊缝断口呈脆性断裂,经历 760 °C 回火 1、4、7 h 后断口形貌从韧/脆混合断裂向韧性断裂过渡.

致谢:本文得到兰州理工大学优秀青年教师基金(01-0977)的资助,在此表示感谢.

#### 参考文献:

[1] 房菲,李静媛,王一德,等.节镍奥氏体不锈钢 Cr18Mn6Ni4N

的组织及性能[J].哈尔滨工程大学学报,2015,36(2):276-281.

- [2] LUCON E. A closer look at the fracture toughness of ferritic/martensitic steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370(4):575-580.
- [3] 沈琦,刘鸿国.新型耐热钢 T/P92、T/P122 在超超临界机组中的应用及监督[J].电力建设,2010,31(10):71-75.
- [4] 樊丁,周璟,季根顺,等.409L 铁素体不锈钢的热变形行为[J].兰州理工大学学报,2010,36(1):12-15.
- [5] SAWADA K, KUSHIMA H, KIMURA K, *et al.* Z-phase formation and its effect on long-term creep strength in 9%-12% Cr creep resistant steels[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2010, 63(2):117-122.
- [6] HOLLNER S, FOUMIER B, PENDU J L, *et al.* High-temperature mechanical properties improvement on modified 9Cr-1Mo martensitic steel through thermomechanical treatments[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 405(2):101-108.
- [7] 杨建平,郭军,乔亚霞,等.超超临界机组用 P92 钢焊接技术的研究[J].中国电机工程学报,2007,27(23):55-60.
- [8] MOHYLA P, FOLDYNOVÁ K. Effect of post-welding heat treatment on mechanical properties of joints of steel P92 formed by submerged arc welding[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2014, 56(3):206-209.
- [9] MADURAIMUTHU V, VASUDEVAN M, PARAMESWARAN P. Studies on improvement of toughness in modified 9Cr-1Mo steel A-TIG weld joint[J]. Transactions Indian Institute of Metals, 2015, 68(2):181-189.
- [10] 周强国,石全强,严伟,等.正火温度对含硅型高铬马氏体耐热钢性能的影响[J].材料研究学报,2013,27(5):461-468.
- [11] 许林青. T92 铁素体钢相变行为及热处理工艺的研究[D].天津:天津大学,2013.