

P92 钢与 Inconel 625 合金厚板超窄间隙激光填丝 焊接头的组织与性能

朱洪羽, 聂璞林, 李铸国, 黄坚

上海交通大学材料科学与工程学院上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

摘要 利用超窄间隙激光填丝焊技术实现了 P92/Inconel 625 异种接头, 研究了焊接接头的组织和力学性能。结果表明, 焊接接头的焊缝整齐, 侧壁熔合良好, 无气孔等缺陷; 焊缝具有典型的凝固组织特征。P92 钢热影响区的组织为马氏体, 并分为粗晶区和细晶区。焊接接头界面中 P92 钢粗晶区的硬度最大, 经热处理后硬度减小。常温拉伸试验中试样均断裂于 Inconel 625 合金, 高温拉伸试验和高温持久试验中试样均断裂于 P92 钢, 焊接接头的冲击韧性介于两种母材之间。

关键词 激光技术; 超窄间隙激光填丝焊; P92 钢; Inconel 625 合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0602003

Microstructures and Properties of Joints in Ultra-Narrow-Gap Laser Wire Welding of P92 Steel and Inconel 625 Alloy Thick Plates

Zhu Hongyu, Nie Pulin, Li Zhuguo, Huang Jian

Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract The dissimilar weldment of P92/Inconel 625 is realized by the ultra-narrow-gap laser welding with filler wire and the microstructures and mechanical properties of the welded joints are systematically investigated. The results show that the quality of the welded joints have smooth welds, nice sidewall fusion, no pores and other defects. The welds possess a typical characteristic of solidification structure. The microstructure in the heat affected zone of P92 steels is martensite, which is divided into the coarse grain and fine grain zones. The micro-hardness in the fine grain zone of P92 steel at the welded joint interface is the largest, but it decreases after heat-treatment. The specimens fracture at Inconel 625 alloy in the tensile tests at the room temperature, but fracture at P92 steel in the tensile and stress-rupture tests at high temperature. The impact toughness of welded joints is between those of the two kinds of base materials.

Key words laser technique; ultra-narrow-gap laser welding with filler wire; P92 steel; Inconel 625 alloy; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

超超临界技术可以提高发电机组的效率、减少有害物质的排放, 已经得到广泛应用^[1-2]。随着发电机组容量的增大, 机组内的温度和压力也增大, 这对材料的高温性能提出了更高的要求。铁素体/马氏

体钢和镍基超合金都被广泛用作高温条件下的结构材料^[3-4]。在 P91 钢的基础上, 通过添加钨并降低钼的含量可得到 P92 钢。P92 钢具有良好的蠕变性能、延性和韧性以及抗孔洞性能, 已被广泛应用于发电设备中。Inconel 625 合金属于固溶强化的镍基超合金, 其内部含有大量的 Cr、Mo、Fe 和 Nb 原子, 具

收稿日期: 2017-11-28; **收到修改稿日期:** 2017-12-26

作者简介: 朱洪羽(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: 18345175360@163.com

导师简介: 聂璞林(1978—), 男, 助理研究员, 硕士生导师, 主要从事激光焊接及激光表面改性方面的研究。

E-mail: nplhxy@sjtu.edu.cn(通信联系人)

有很好的耐腐蚀性能及蠕变性能。P92 钢可承受的蒸汽温度高达 625 °C^[5],而 Inconel 625 合金的使用温度更高^[6],异种金属接头已被广泛应用于有温度梯度和服役性能存在差异的结构当中。此外,镍基超合金的价格昂贵,使用便宜的材料代替镍基超合金在节约成本的同时也可以充分利用各种材料的性能^[7-8]。

发电机组对厚板结构的需求越来越大。窄间隙焊接技术和激光焊接技术是适合厚板焊接的两种方法,超窄间隙激光填丝焊接方法综合了激光焊接和窄间隙焊接的优势,能较好地解决大厚板高质量焊接问题^[9-12]。

采用窄间隙激光焊接技术焊接厚板 P92 钢和 Inconel 625 合金具有很多优势,如减少焊丝填充量、降低成本、提高焊接效率、减小焊接变形,能够有效控制 P92 钢热影响区中“软化区”的形成,从而提高焊接接头的强度。焊接过程中不同位置 P92 钢热影响区的峰值温度不同,热影响区可以分为粗晶区、细晶区和临界晶区。Zhao 等^[13-15]研究发现,临

界晶区的软化和结构中三向应力的共同作用会使焊接构件产生裂纹。高能束焊接方法可以减小合金热影响区的宽度,是改善焊接接头性能的有效方法^[16-17]。Wiednig 等^[8]利用电子束焊接方法避免了 P92/Inconel 625 异种接头“软化区”的形成,但在热影响区中残留了大量的块状高温铁素体。高温铁素体会减小构件的冲击韧性,而且其体积分数越大,冲击韧性减小越大^[18]。目前,有关厚板 P92/Inconel 625 窄间隙激光焊接的研究鲜有报道。

本文采用超窄间隙激光焊接技术焊接了厚度为 25 mm 的 P92/Inconel 625 异种接头,研究了接头显微组织与力学性能的变化,为后续的研究和工业应用提供了参考。

2 试验材料与方法

选择 P92 钢和 Inconel 625 合金作为试验母材,其化学成分见表 1。选用 Inconel 625 焊丝作为填充材料。

表 1 P92 钢和 Inconel 625 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of P92 steel and Inconel 625 alloy (mass fraction, %)

Element	C	Ni	Fe	Cr	Mo	W	Si	Mn	V	Nb	Ta	Ti
P92 steel	0.10	0.385	Bal.	9.01	0.57	1.72	0.37	0.55	0.25	0.07	0.31	-
Inconel 625 alloy	0.02	Bal.	4.60	22.10	9.20	-	0.09	0.05	-	3.45	-	0.18

采用最大输出功率为 10 kW 的光纤激光器进行焊接试验。异种母材的尺寸均为 100 mm × 75 mm × 25 mm,钝边厚度为 4 mm,宽度为 1.5 mm,坡口角度为 4°。焊接前,将试样待焊面抛

光并用丙酮擦拭。打底焊一次焊透钝边,然后采用单道单层焊接方式实现厚板的连接。激光焊接坡口和焊接示意图如图 1 所示。

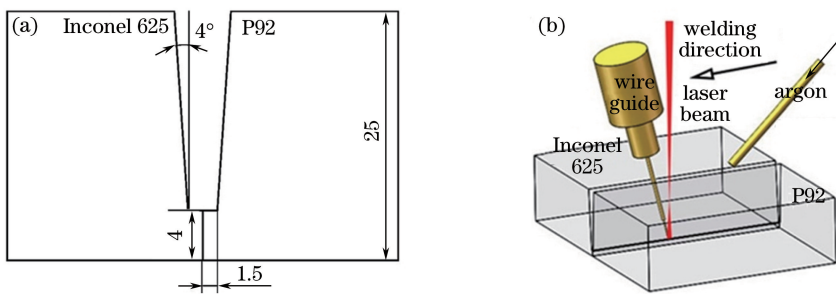


图 1 激光焊接示意图。(a)坡口;(b)焊接

Fig. 1 Schematic of laser welding. (a) Groove; (b) welding

试验过程中没有采取预热和控制层间温度的措施,待上一道焊缝冷却到室温后再进行下一次焊接。

焊接完成后将试样放入保温炉中,在 730 °C 条件下保温 16 h 进行热处理。焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of welding

Layer No.	Laser power /kW	Welding speed / (m · min ⁻¹)	Defocusing /mm	Wire feeding rate / (m · min ⁻¹)
1	4.0	1.20	0	-
2-12	3.3-3.5	0.42	20	1.1

焊后采用射线检测试样的内部缺陷。用苦味酸腐蚀 P92 钢热影响区及钢一侧母材, 5 g FeCl₃ 和 100 mL HCl 的混合溶液腐蚀焊缝及 Inconel 625 合金。采用金相显微镜、扫描电子显微镜(SEM)及透射电子显微镜(TEM)观察焊接接头的形貌。显微硬度测试载荷为 1000 g, 加载时间为 15 s。在板厚中部取三个试样进行拉伸及冲击试验, 测试结果取平均值。在焊缝中部取试样进行高温持久试验。冲击试样尺寸为 5 mm×10 mm×55 mm, 高温拉伸及持久试样示意图如图 2 所示。

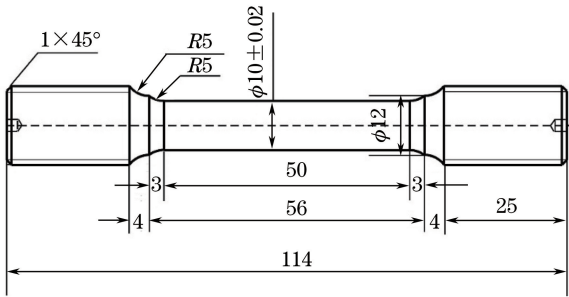


图 2 高温拉伸及持久试样示意图

Fig. 2 Schematic of tensile and stress-rupture of samples at high temperature

3 结果与分析

3.1 焊接接头宏观形貌

P92/Inconel 625 异种接头横截面的宏观形貌如图 3 所示。可以看出, 焊接接头总共有 12 层, 每

层高度约为 2 mm, 宽度为 3~4 mm, 从上到下的宽度相近, 焊缝形状齐整。射线检测结果表明, 焊缝内部没有产生侧壁未熔合、气孔等缺陷, 按 GB/T3323-2005 标准将焊缝等级评定为 I 级。

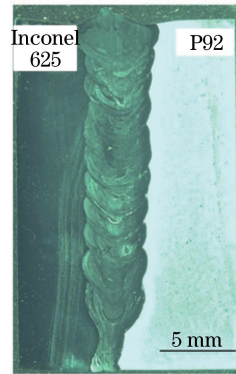


图 3 焊接接头的宏观形貌

Fig. 3 Macromorphology of welded joint

3.2 焊接接头的显微组织

由于激光填丝焊的工艺参数接近, 焊缝各层的组织形貌相似, 因此, 只分析了热处理后填充第四层及其与第三层交界处的焊缝组织形貌特征, 结果如图 4 所示。由图 4(a)可知, 焊缝具有典型的凝固组织特征, 柱状组织从熔合线边缘垂直向焊缝中心生长; 由图 4(b)、(c)可以看出, 焊道相邻道次间的组织形貌相似、凝固组织生长方向相同; 相邻道次之间存在一层很窄的过渡区域, 过渡区域内的晶粒细小, 但仍保持着上一道焊缝晶粒的形貌特征和方向性。

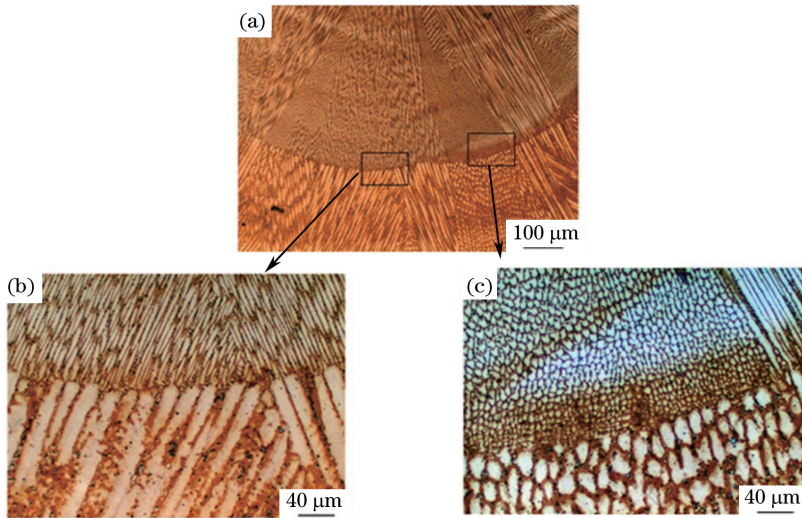


图 4 组织形貌。(a)焊缝区;(b)(c)图 4(a)的局部放大图

Fig. 4 Microstructures. (a) Weld zone; (b)(c) local magnifications of Fig. 4(a)

图 5 所示为枝晶间断续分布的白色颗粒, 白色颗粒的能谱(EDS)分析结果见表 3。结合表 1 和表 3 可以看出, 白色颗粒中 Nb、Mo 和 Fe 元素的含量大于焊

丝的。在激光焊接过程中, 焊缝区镍基合金的凝固伴随着 Laves 相在枝晶间析出, 形态上呈断续分布的特点, 焊缝区中含有更多的 Nb 和 Mo 元素。由此推断,

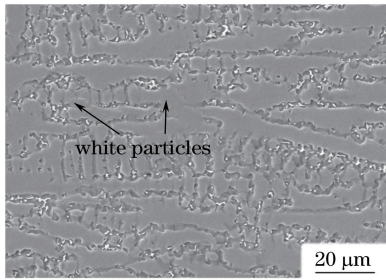


图 5 枝晶间分布的白色颗粒

Fig. 5 White particles in interdendritic zone

枝晶间分布的白色颗粒为 Laves 相^[19-21]。

P92 钢热影响区(HAZ)的形貌如图 6 所示,依据晶粒的形貌将其分为粗晶区(CGHAZ)和细晶区(FGHAZ)。可以看出,P92 钢热影响区的宽度约为 1.0 mm,小于电弧焊接头热影响区的宽度^[22-24]。热影响区的大小对 9Cr 钢的高温性能有显著影响,较小的热影响区可以提高接头的力学性能。由于激光填丝焊的热输入量较小,热影响区中没有生成铁素体。因此,激光填丝焊对提高 P92/Inconel 625 异种接头的力学性能具有积极作用。

表 3 白色颗粒的 EDS 分析结果(质量分数,%)

Table 3 EDS analysis results of white particles (mass fraction, %)

Element	Ti	V	Nb	Fe	Ni	Cr	Mo	Mn
Value	2.36	0.33	40.95	9.09	13.17	8.72	11.30	0.21

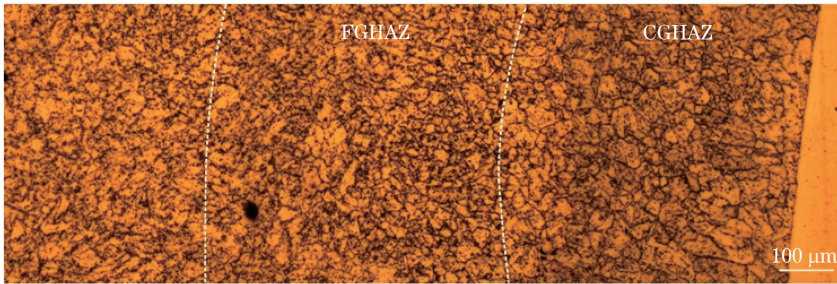


图 6 P92 钢热影响区的显微组织

Fig. 6 Microstructure of HAZ of P92 steel

P92 钢热影响区中粗晶区和细晶区的微观形貌如图 7 所示。粗晶区中的 P92 钢在加热过程中经历了从回火马氏体到奥氏体的相变,由于原马氏体边界处起强化作用的碳化物溶解于奥氏体,因此,高温条件下的奥氏体粗化长大。在随后的冷却过程中,奥氏体转化为淬火马氏体,形成了粗晶区。在粗晶区中没

有发现削弱接头韧性的高温铁素体^[25]。细晶区形成在靠近 P92 钢一侧,其尺寸小于粗晶区的。细晶区经历的热循环峰值温度小于粗晶区,碳化物没有完全溶解,剩余的碳化物具有抑制晶粒长大的作用,从而形成了细晶区。经过热处理后,淬火马氏体经历了向回火马氏体的转变,原奥氏体晶粒尺寸没有变化。

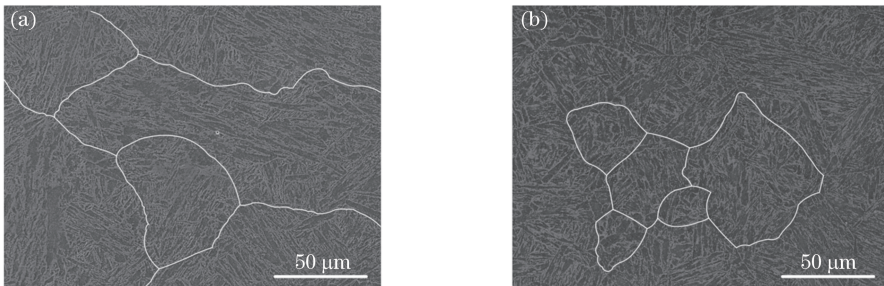


图 7 P92 钢热影响区。(a)粗晶区;(b)细晶区

Fig. 7 HAZ of P92 steel. (a) CGHAZ; (b) FGHAZ

3.3 焊接接头力学性能

3.3.1 显微硬度

热处理前后焊接接头的显微硬度分布如图 8 所示。Inconel 625 合金的显微硬度为 240 HV,P92 钢

的显微硬度为 215 HV。镍基高温合金的高温稳定性能好,在焊接热循环下,热处理前后 Inconel 625 合金一侧热影响区和焊缝的显微硬度没有发生明显变化。焊缝区的显微硬度约为 290 HV。

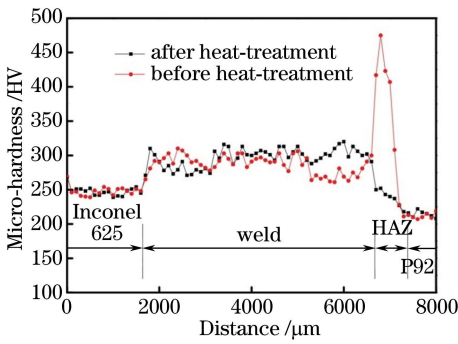


图 8 焊接接头的显微硬度分布

Fig. 8 Micro-hardness distributions of welded joints

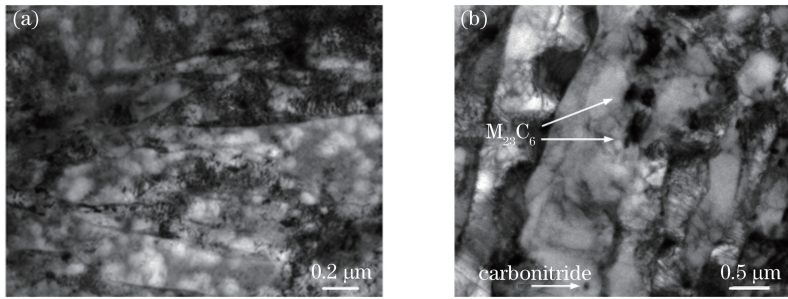


图 9 P92 钢粗晶区中马氏体板条的 TEM 图像。(a) 热处理前; (b) 热处理后

Fig. 9 TEM images of martensite lath in CGHAZ of P92 steel. (a) Before heat-treatment; (b) after heat-treatment

3.3.2 拉伸强度

经过热处理的焊接接头拉伸试验结果如图 10 所示。从图 10(a) 可以看到, 在室温拉伸试验中, 接头断裂的位置在远离焊缝的镍基母材一侧, 说明焊

缝强度高于 Inconel 625 合金。室温下接头的屈服强度为 303 MPa, 延长率为 21.1%, 断裂强度为 488 MPa, 如图 10(b) 所示。

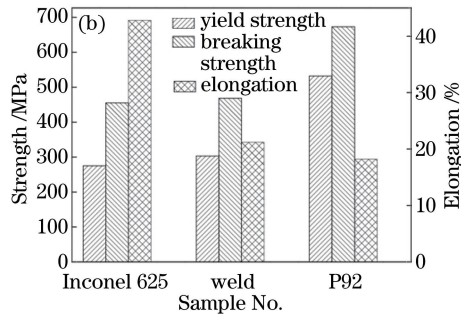
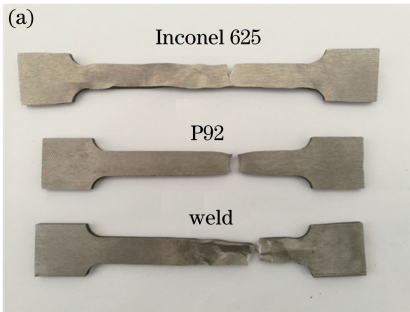


图 10 焊接接头拉伸试验结果。(a) 断裂位置; (b) 力学性能

Fig. 10 Tensile test results of welded joints. (a) Fracture position; (b) mechanical properties

3.3.3 冲击性能

室温下焊接接头冲击试验的结果见表 3。Inconel 625 合金的最大冲击功为 104.78 J, P92 钢的最小冲击功为 48.91 J, 接头的冲击功为 87.84 J。P92 钢的显微组织主体为板条马氏体, 边界含有碳化物 $M_{23}C_6$, 马氏体之间含有少量的高温铁素体, 高温铁素体的脆性大, 裂纹既可以沿着晶间扩展, 也可以在高温铁素体晶粒内扩展。焊缝中形成的

白色相使得焊缝的冲击韧性小于 Inconel 625 合金。由于镍基合金的韧性大, 因此, 尽管焊缝组织中的晶粒粗大, 但接头的冲击性能仍然大于 P92 钢。焊接接头冲击断口的形貌图 11 所示。可以看出, Inconel 625 合金的冲击断口呈大而深的韧窝; 焊缝冲击断口的韧窝小且浅, 并出现了解理平台; P92 钢的断口呈明显的河流花样, 属于脆性断裂。

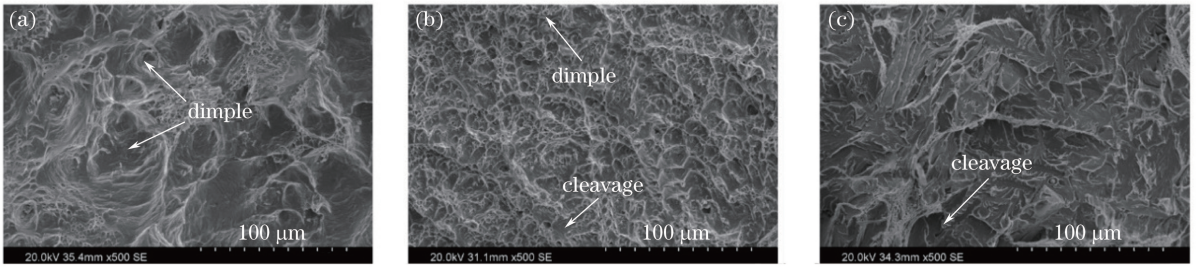


图 11 冲击断口形貌。(a) Inconel 625 合金;(b)焊缝;(c) P92 钢

Fig. 11 Microstructure of impact fracture. (a) Inconel 625 alloy; (b) welds; (c) P92 steel

表 4 焊接接头的冲击试验结果

Table 4 Impact test results of welded joints

Material	Inconel 625	Weld	P92
Impact energy /J	104.78	87.84	48.91

3.3.4 高温拉伸试验

焊接接头在 620 °C 下的高温拉伸试验结果如图 12 所示。可以看到,接头的断裂处位于 P92 钢区域,说明焊接接头的强度大于 P92 钢。接头的抗拉强度达到了 310 MPa。另外,接头的断后伸长率为 32.5%,断面收缩率达到了 81.5%。



图 12 焊接接头的高温拉伸试验

Fig. 12 Tensile test of welded joints at high temperature

3.3.5 高温持久试验

高温持久试验的结果如图 13 所示。随着应力水平的增大,试样的持久寿命缩短,当温度为 620 °C,应力为 120,130,140,150 MPa 时,试样的持久寿命 T 分别为 3913.2,1843.4,481.9,232.1 h。除此之外,应力大小的数值与断裂时间的对数值呈线性关系,因

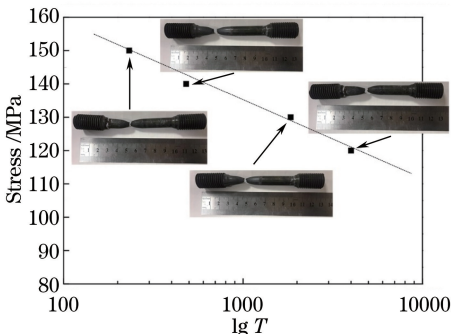


图 13 高温持久试验结果

Fig. 13 Results of stress-rupture test at high temperature

此,可以预测其他参数下接头的断裂时间^[26]。由图 13 可以清楚地判断,试样持久断裂发生的位置在 P92 钢一侧,说明焊接接头的强度高于 P92 钢。

4 结 论

通过超窄间隙激光填丝焊技术,实现了 25 mm 厚板的 P92 钢与 Inconel 625 合金的焊接,研究了焊接接头的组织和力学性能,得到以下结论。

- 1) 焊接接头的焊缝具有典型的凝固组织特征,柱状组织垂直于熔合线边缘向焊缝中心生长,枝晶间有富含 Nb、Mo 和 Cr 元素的白色颗粒生成。
- 2) P92 钢热影响区宽度为 1.0 mm 左右,P92 钢热影响区中没有高温铁素体生成。
- 3) 焊接接头界面中 P92 钢粗晶区的硬度最大,经热处理后粗晶区的硬度减小,不存在“软化区”;焊接接头的力学性能高于 P92 钢。

参 考 文 献

- [1] Huo W H, Li J, Yan X. Effects of coolant flow rates on cooling performance of the intermediate pressure stages for an ultra-supercritical steam turbine [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62 (2): 723-731.
- [2] Nowak G, Rusin A. Shape and operation optimisation of a supercritical steam turbine rotor [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 417-425.
- [3] Ampornrat P, Gupta G, Was G S, et al. Tensile and stress corrosion cracking behavior of ferritic-martensitic steels in supercritical water [J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 395: 30-36.
- [4] Li J B, Shang S, Sun Y Z, et al. Parameter nondimensionalization in laser direct metal deposition formation of Inconel 625 and its influence on single track geometric morphology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302010.

李进宝, 商硕, 孙有政, 等. Inconel 625 激光直接金属沉积成形参数无量纲化及其对单道几何形貌的影响

- 响[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302010.
- [5] Francis J A, Bhadeshia H K D H, Withers P J. Welding residual stresses in ferritic power plant steels [J]. *Materials Science and Technology*, 2007, 23(9): 1009-1020.
- [6] Yeni C, Kocak M. Fracture analysis of laser beam welded superalloys Inconel 718 and 625 using the FITNET procedure [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(8): 532-539.
- [7] Skouras A, Flewitt P E J, Peel M, *et al.* Residual stress measurements in a P92 steel-In625 superalloy metal weldment in the as-welded and after post weld heat treated conditions [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, 123: 10-18.
- [8] Wiednig C, Lochbichler C, Enzinger N, *et al.* Dissimilar electron beam welding of nickel base alloy 625 and 9%Cr steel[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 86: 184-194.
- [9] Wang B P, Zhao Y, Huang J. Investigation on microstructure of thick plate stainless steel joint welded by multi-pass laser welding with filler wire [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (2): 0203008.
王柏平, 赵勇, 黄坚. 厚板不锈钢激光填丝多道焊的接头组织分析 [J]. 中国激光, 2013, 40 (2): 0203008.
- [10] Zhang G W, Xiao R S. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0803007.
张国伟, 肖荣诗. 60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙光纤激光焊接接头组织性能研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803007.
- [11] Zhao Y, Wang Q Z, Huang J, *et al.* Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0203007.
赵勇, 王清盟, 黄坚, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203007.
- [12] Zhang Y W, Zhang M L, Sun Z Y, *et al.* Microstructure and properties of 50 mm thick SA508Gr.3Cl.2 steel welding joints by ultra-narrow-gap laser welding with filler wire[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1102006.
张益文, 张茂龙, 孙志远, 等. 50 mm 厚 SA508Gr.3Cl.2 钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能 [J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102006.
- [13] Zhao L, Jing H Y, Xiu J J, *et al.* Experimental investigation of specimen size effect on creep crack growth behavior in P92 steel welded joint [J]. *Materials and Design*, 2014, 57: 736-743.
- [14] Laha K, Chandravathi K S, Rao K B S, *et al.* An assessment of creep deformation and fracture behavior of 2.25Cr-1Mo similar and dissimilar weld joints[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(1): 115-124.
- [15] Laha K, Chandravathi K S, Parameswaran P, *et al.* Characterization of microstructures across the heat-affected zone of the modified 9Cr-1Mo weld joint to understand its role in promoting type IV cracking[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(1): 58-68.
- [16] Divya M, Das C R, Albert S K, *et al.* Influence of welding process on type IV cracking behavior of P91 steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 613: 148-158.
- [17] Shanmugarajan B, Padmanabham G, Kumar H, *et al.* Autogenous laser welding investigations on modified 9Cr-1Mo (P91) steel [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(6): 528-534.
- [18] Arivazhagan B, Kamaraj M. A study on factors influencing toughness of basic flux-cored weld of modified 9Cr-1Mo steel [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 20(7): 1188-1195.
- [19] Nie P L, Ojo O A, Li Z G. Numerical modeling of microstructure evolution during laser additive manufacturing of a nickel-based superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2014, 77: 85-95.
- [20] Li G, Huang J, Wu Y X. An investigation on microstructure and properties of dissimilar welded Inconel 625 and SUS 304 using high-power CO₂ laser [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76 (5/6/7/8): 1203-1214.
- [21] Xu F J, Lü Y H, Liu Y X, *et al.* Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2013, 29(5): 480-488.
- [22] Zhao L, Jing H Y, Xu L Y, *et al.* Analysis of creep crack growth behavior of P92 steel welded joint by experiment and numerical simulation [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 558: 119-128.
- [23] Chen G, Wang G Z, Zhang J W, *et al.* Effects of initial crack positions and load levels on creep failure behavior in P92 steel welded joint [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 47: 56-66.

- [24] Wang X, Pan Q G, Ren Y Y, *et al.* Microstructure and type IV cracking behavior of HAZ in P92 steel weldment[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 552: 493-501.
- [25] Moon J, Lee C H, Lee T H, *et al.* Phase transformation and impact properties in the experimentally simulated weld heat-affected zone of a reduced activation ferritic/martensitic steel [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 455(1/2/3): 81-85.
- [26] Wei Y H, Qiao S F, Lu F G, *et al.* Failure transition mechanism in creep rupture of modified casting 9Cr-1.5Mo-1Co welded joint [J]. *Materials and Design*, 2016, 97: 268-278.