

文章编号: 0258-7025(2009)09-2422-04

大厚度不锈钢板的激光焊接

吴世凯 肖荣诗 陈 铠

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 随着核电工业的发展,对厚板不锈钢的焊接要求越来越高,传统的弧焊方法效率低、变形大、组织粗大、抗核辐照性能差,难以满足使用要求。采用 3500 W Slab 及 20 kW 快轴流 CO₂ 激光器,研究了厚板万瓦级激光自熔焊接、窄间隙激光填丝焊接及激光-钨极氩弧焊(TIG)填丝复合焊接,实现了厚度超过 10 mm 的不锈钢对接焊,并对接头的显微组织和力学性能进行了研究。结果表明,激光焊接可以获得焊缝成型良好,无气孔、裂纹等缺陷的焊接接头;焊缝组织细小,热影响区窄,接头显微组织和力学性能优良。

关键词 激光技术; 激光焊; 不锈钢; 厚板; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2422

Laser Welding of Heavy Section Stainless Steel Plants

Wu Shikai Xiao Rongshi Chen Kai

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract With the development of nuclear power industry, the heavy section stainless steel vacuum vessel presents many challenges to joining methods. The conventional welding processes can't satisfy the strict accuracy and quality requirements due to its higher heat input. In this paper, a 3500 W Slab CO₂ laser and a 20 kW fast axial flow CO₂ laser were applied to weld austenitic stainless steels with a plate thickness over 10 mm. The autogenous laser welding, narrow gap laser welding with filler wire and laser-tungsten inert gas (TIG) hybrid welding with filler wire were exploited respectively. Meanwhile, the joint microstructure and properties were studied. The experimental results shown that welds with good appearances and no holes and cracks could be obtained with laser beam welding techniques, and the joint microstructures and properties are satisfied with the service requirements.

Key words laser technology; laser welding; stainless steel; heavy section; joint properties

1 引 言

根据国际原子能机构 2005 年 10 月发表的数据,全世界正在运行的核电机组共有 442 台,总装机容量为 3.69 亿千瓦,年发电量占世界发电总量的 17%,核能已成为人类使用的重要能源之一^[1]。由于核能是一种安全、清洁、可靠的能源,积极推进核电建设,对于满足经济和社会发展不断增长的能源需求、保障能源安全战略、保护环境、减缓地球温室效应具有重要的意义。我国也在《核电中长期发展规划》中提出:到 2020 年,核电运行装机容量争取达到 4000 万千瓦;核电年发电量达到 2600~2800 亿

千瓦时的目标,而先进核电制造技术的引进、吸收、创新成为实现这一目标的关键。

奥氏体不锈钢具有优良的耐腐蚀性能,较好的抗高温氧化性能和优良的高温热强性能,在核电站结构中得到广泛应用,目前常用的有 18-8 型(TP304), 18-12 型(TP347, TP316), 25-20 型(TP310)等。随着核电机组参数的提高,对不锈钢焊接结构的厚度、焊接变形、接头质量等提出了更高的要求^[2~5]。目前焊接不锈钢厚板的方法主要是氩弧焊(TIG)、窄间隙埋弧焊等常规焊接方法。由于焊接速度慢,效率低,热输入量大,热影响区较大,焊

收稿日期: 2008-10-10; **收到修改稿日期**: 2008-11-22

基金项目: 北京市教委科技发展计划(KZ200710005003)重点资助项目。

作者简介: 吴世凯(1976-),男,博士研究生,主要从事激光材料加工方面的研究。E-mail: wushikai@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 肖荣诗(1965-),男,博士,教授,主要从事激光与材料相互作用,先进材料激光加工,激光加工新工艺、新方法
及外围技术与系统方面的研究。E-mail: rxxiao@bjut.edu.cn (通信联系人)

接头组织粗大,接头残余应力、变形大,在核电站运行一定时间后,焊接接头热影响区在核辐射和应力腐蚀的共同作用下产生应力腐蚀裂纹(SCC),影响机组的运行安全。

相比常规焊接方法,激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、热输入小、焊接热影响区小、焊缝晶粒细小、焊接变形小、接头质量高等优点,作为一种先进的高效焊接方法,为此类结构的焊接提供了可行的解决办法,但受激光功率及光束质量的限制,一般激光焊接的深度不超过 10 mm^[4,5]。T. Jokinen 等^[4]采用 3 kW Nd:YAG 激光窄间隙多层焊及激光-熔化极气体保护焊(GMAW)复合焊技术实现了 20 mm 厚 AISI304L 不锈钢板的焊接,并评价了两种激光焊接技术在国际热核聚变实验堆(ITER)项目中真空反应器制造中应用的可行性。

本文采用 3500 W Slab 及 20 kW 快轴流 CO₂ 激光器,研究了厚板万瓦级激光自熔焊接、窄间隙激光填丝焊接及激光-TIG 填丝复合焊接,实现了厚度超过 10 mm 的不锈钢对接焊,对接头的显微组织和力学性能进行了研究。

2 实验方法及材料

实验采用德国 Rofin-Sinar 公司 DC035 Slab CO₂(最大输出功率 3500 W)及 SR200 CO₂ 激光器(最大输出功率 20 kW),焊接工作台为五轴联动工作台,光束采用抛物铜镜反射聚焦系统。焊接时双层喷嘴侧吹保护气,其中复合焊接时,保护气从 TIG 焊枪送出。

采用 SR200 CO₂ 激光器,对 12 mm 厚的 1Cr18Ni9Ti(TP304)不锈钢板进行了自熔焊接。焊接时不开坡口,不填充材料,焊接保护气为 He。

采用 DC035 Slab CO₂ 激光器,对 $\phi 48$ mm \times 10 mm HR3C(TP310)新型奥氏体耐热不锈钢管进行了窄间隙填丝多层焊接。其中填充材料为 $\phi 1$ mm 的 T-HR3C 焊丝,对接坡口采用 U 型坡口。

采用 DC035 Slab CO₂ 激光器,对 10 mm 厚的 TP304 不锈钢板进行了激光电弧复合焊接,填充材料为 $\phi 1$ mm 的 SMP-347 焊丝。对接坡口也是 U 型坡口。

在无焊后热处理的条件下,获得内部没有焊接缺陷,表面成型良好的焊接接头。焊后用力学性能试验机进行了焊接接头力学性能实验,试样经研磨、抛光、浸蚀后用光学显微镜进行金相组织分析。

3 实验结果及讨论

3.1 万瓦级激光自熔焊接

通过扫描焊接进行工艺参数优化后,针对 12 mm 厚 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板进行对接焊,焊接时,不开坡口,焊接工艺参数为: $f = 200$ mm, $P = 18$ kW, $V = 2.2$ m/min,保护气流量为 38 L/min He。焊缝的横截面如图 1 所示,从图中可以看出,焊缝深宽比大,焊缝成型良好,热影响区小,焊缝中没有发现气孔等缺陷。

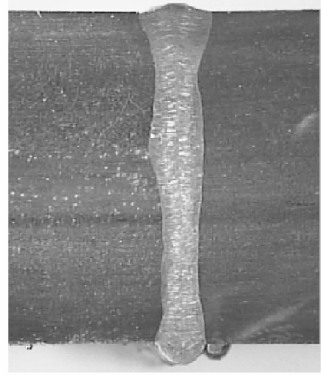


图 1 激光自熔焊缝横截面

Fig. 1 Cross-section of laser autogenous welding joint

3.2 窄间隙激光填丝多层焊接

针对 HR3C 不锈钢,采用优化后的激光焊接工艺参数进行了对接焊。焊接时工件开 U 型坡口,其中钝边厚度为 6 mm,坡口间隙为 1.8 mm。分上下两层焊接,下层焊道为自熔焊接,上层为填丝焊接。激光功率为 3500 W,上下层的焊接速度分别为 0.75 m/min 和 1.8 m/min。保护气为 5 L/min 的 Ar 和 15 L/min He 的混合气体。焊缝正、反面表面成型良好,经 X 射线探伤检验和渗透检验,100% 合格。解剖焊缝也没有发现气孔、裂纹等缺陷,焊缝横截面如图 2 所示。

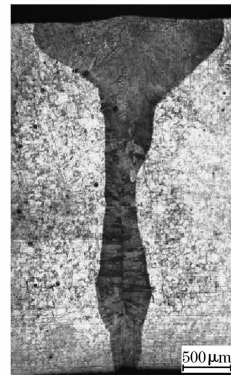


图 2 窄间隙激光填丝焊缝横截面

Fig. 2 Cross-section of narrow gap laser welding joint

3.3 激光-TIG 填丝复合焊接

针对 10 mm 厚的 TP304 不锈钢板,采用激光-TIG 填丝复合焊接,完成了对接接头的焊接。焊接时单道成型,工件也采用 U 型坡口。焊接工艺参数为:激光功率 3500 W,电弧电流 200 A,焊接速度 0.8 m/min,送丝速度 4.5 m/min,保护气为 25 L/min 的 He 气。焊接接头的正反面成型良好,焊接接头的横截面如图 3 所示。解剖焊缝未见气孔、裂纹等缺陷。

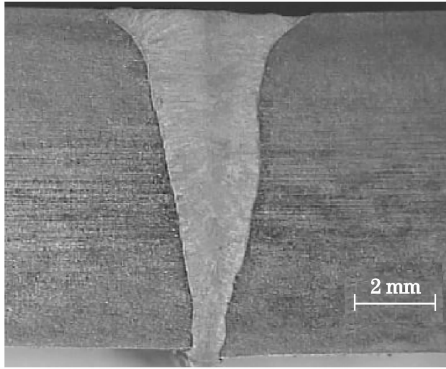


图 3 复合焊接焊缝横截面

Fig. 3 Cross-section of laser hybrid welding joint

比较 3 种激光焊接工艺,都可以获得热影响区非常窄的焊接接头,焊缝成型良好,无气孔、裂纹等缺陷。万瓦级激光自熔焊接接头的深宽比大,焊缝上部和下部的熔宽基本相当。但是由于目前万瓦级

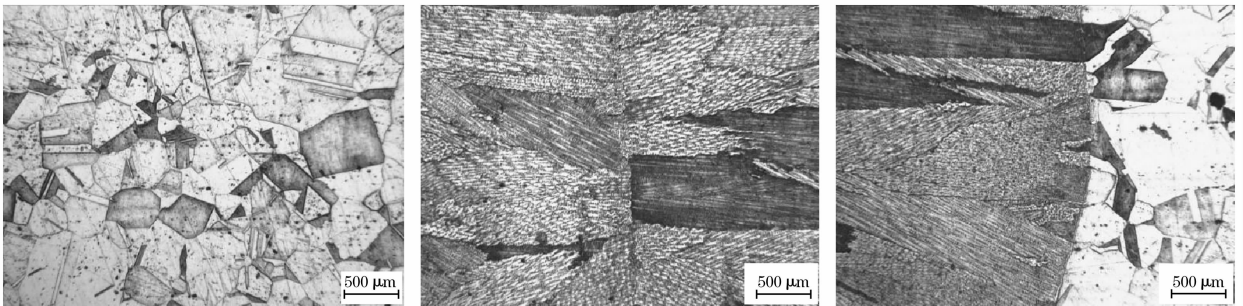


图 4 焊缝及热影响区的金相组织

Fig. 4 Microstructures of weld bead and HAZ

从图中可以看出,母材的显微组织为完全奥氏体组织,并有许多孪晶出现(黑色块状物),晶粒内弥散析出微细的金属间化合物 NbCrN 和 Nb 的碳、氮化合物以及 $M_{23}C_6$ 碳化物等强化相。焊缝中可观察到明显的沿焊缝中心对称的形态,同时由于冷却速度较快,母材中孪晶形态及弥散的强化相消失。焊缝组织主要为细小的柱状奥氏体晶群(晶体学取向相同的晶粒),同时各板条状晶群间夹杂着细小的等轴状晶粒,晶粒尺寸较

CO_2 激光器光束质量差,性能不稳定,聚焦焦点位置随激光输出功率和光束传输距离变化而变化,焊接质量难以保证^[6]。

而窄间隙激光填丝多层焊接采用常用工业级激光器即可实现不锈钢厚板的焊接。焊接工艺简单,过程稳定性好,焊接成本低,同时由于填充材料的加入,有利于热裂纹敏感钢种的焊接^[7]。窄间隙填丝多层焊接的一个不利因素是填充材料主要集中于焊缝上部的坡口中^[8],焊接接头的组织和力学性能存在一定的不均匀性,但力学性能试验结果表明接头的整体性能可以满足使用要求。

相比窄间隙激光填丝多层焊,复合焊的焊接效率可以提高;同时由于电弧的加入,增加了搭桥能力,减少了装配要求。另外由于激光和电弧的相互作用,焊接过程稳定性明显改善,减少了气孔的出现^[4]。采用填充焊丝的激光-TIG 复合焊接,焊接过程中不涉及熔滴过渡等复杂物理过程,电弧稳定性好,可以获得较高质量的焊接接头。

3.4 激光焊接接头组织和性能

为了准确评价激光焊接工艺的应用可行性,针对激光填丝多层焊接接头的组织和性能进行了研究。

HR3C 激光填丝多层焊接接头的母材、焊缝及熔合线附近的金相组织见图 4。

母材大幅度减小。在熔合线附近没有观察到明显的热影响区,熔合线附近的母材晶粒也没有长大^[9]。

图 5 为激光填丝焊接接头与热丝 TIG 对接接头的高温持久强度值对比图。其中热丝 TIG 焊接接头进行过焊后固熔处理。从图中可以看出,激光填丝焊较热丝 TIG 焊的高温持久强度有明显提高,尤其是在应力为 230 MPa 时,其断裂时间提高了约 160%。

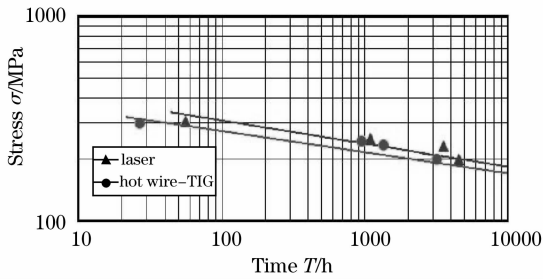


图 5 650 °C 时的高温持久强度

Fig. 5 High temperature creep rupture strength at 650 °C

4 结 论

通过工艺参数优化,采用万瓦级激光自熔焊、窄间隙多层填丝焊及激光-TIG 填丝复合焊接实现了厚度超过 10 mm 的不锈钢对接焊;激光焊接接头显微组织和力学性能优良,可满足使用要求。

参 考 文 献

- 1 Lu Ben, Zhang Lian. Application of welding in nuclear power engineering (No. 1)[J]. *Modern Welding*, 2006, (8): 24~28
卢 本,张 炼. 焊接在核电工程中的应用(一)[J]. *现代焊接*, 2006, (8): 24~28
- 2 L. P. Jones, P. Aubert, V. Avalor *et al.*. Towards advanced welding methods for the ITER vacuum vessel sectors[J]. *Fusion Engi. Des.*, 2003, **69**: 215~220

- 3 A. Sanderson, C. S. Punshon, J. D. Russell. Advanced welding processes for fusion reactor fabrication[J]. *Fusion Eng. Des.*, 2000, **49-50**: 77~87
- 4 T. Jokinen, V. Kujanpaa. High power Nd : YAG laser welding in manufacturing of vacuum vessel of fusion reactor[J]. *Fusion Eng. Des.*, 2003, **69**: 349~353
- 5 Y. Shimokusu, S. Fukumoto, M. Nayama *et al.*. Application of 7 kW class high power YAG laser welding to stainless steel tanks [J]. *J. Laser Appl.*, 2002, **14**(2): 68~72
- 6 Zhang Song, Zhao Xudong, Wu Shikai *et al.*. 10 kW class CO₂ laser welding of thick stainless steel plates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(suppl): 169~172
张 松,赵旭东,吴世凯 等. 不锈钢厚板万瓦级 CO₂ 激光焊接 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(suppl): 169~172
- 7 Wu Shikai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi *et al.*. Experiment study on laser welding heat-resistant steels for power boiler[J]. *Welding Technology*, 2008, **37**(3): 21~24
吴世凯,杨武雄,肖荣诗 等. 电站锅炉用耐热钢激光焊接工艺研究[J]. *焊接技术*, 2008, **37**(3): 21~24
- 8 Wu Shikai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi *et al.*. Microstructure and properties of welded joint for narrow gap laser welding of 42CrMo steel bevel gear shaft [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(4): 25~28
吴世凯,杨武雄,肖荣诗 等. 42CrMo 钢伞形齿轮轴窄间隙激光焊接接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(4): 25~28
- 9 Wu Shikai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi *et al.*. Laser welding of new type austenite heat-resistant steel HR3C for ultra supercritical boilers [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(6): 93~96
吴世凯,杨武雄,肖荣诗 等. 电站锅炉用 HR3C 新型奥氏体耐热钢的激光焊接[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(6): 93~96