

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.11.06

Fe/C 配比对等离子堆焊 Fe-Cr-C 合金组织及性能的影响

魏 炜^{1,2}, 黄智泉¹, 杨 威¹, 张海燕¹

1. 郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001

2. 郑州大学, 河南 郑州 450000

摘 要: 研制了一种 Fe-Cr-C 合金粉块, 粉块化学成分中 $w(\text{Cr})/w(\text{C})$ 为 5:1, 仅改变 Fe/C 配比, 并采用等离子焊机在 Q235 钢板表面进行铺粉堆焊试验。采用金相显微镜、光谱仪(OES)、磨损实验和硬度检测等方法, 研究 Fe/C 配比对 Fe-Cr-C 堆焊合金组织及性能的影响。结果表明: Fe 元素在熔敷过程中起到助熔作用, 当不添加 Fe 粉时, 焊道无法成形; 当 Fe/C 配比为 4:1 时, 焊道成形最好, 堆焊合金中析出的 M_7C_3 型碳化物晶粒尺寸细小, 弥散分布在马氏体基体表面; 随着 Fe/C 配比的提高, Fe 的助熔作用会减少堆焊合金烧损, 但是 C 含量的降低导致显微组织中硬质相尺寸增大。当 Fe/C 配比为 10:1 时, 由于硬质相缺碳严重, 形成 M_{23}C_6 型碳化物, 耐磨粒磨损性能变差。

关键词: 等离子堆焊; 堆焊合金; Fe/C 配比; 焊道成形; 硬质相

中图分类号: TG455 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)11-0037-06

Influence of Fe/C Ratio on Microstructure and Properties of Plasma Hardfacing of Fe-Cr-C Alloy

WEI Wei^{1,2}, HUANG Zhiquan¹, YANG Wei¹, ZHANG Haiyan¹

1. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China

2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China

Abstract: The plasma transfer arc (PTA) was used to hardfacing self-developed wear-resistant alloy powder on Q235 steel, with $w(\text{Cr})/w(\text{C})$ at 5:1, the influence of Fe/C ratio on the microstructure and mechanical properties of the deposited metal was studied. The metallographic microscope, spectrometer (OES), wear-resistance experiment and hardness detection were used in this study. The results show that the Fe elements play an effective melting role in the melting process, when no Fe powder is added, the bead can not be formed; while the Fe/C ratio is 4:1, the bead is well formed, M_7C_3 carbide grain is small size and well distributed on the surface of the martensite matrix; with the increase of the Fe/C ratio, the melting aid of Fe element will reduce the burning proportion of the hardfacing alloy, however, the reduced weight percentage of C elements leads to the increased size of the hard phase grains in microstructure, when the Fe/C ratio is 10:1, the M_{23}C_6 carbides are formed, and the wear resistance deteriorates.

Keywords: plasma hardfacing; hardfacing alloy; Fe/C ratio; bead formation; hard phase

引用格式: 魏炜, 黄智泉, 杨威, 等. Fe/C 配比对等离子堆焊 Fe-Cr-C 合金组织及性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 37-42.

Citation: WEI Wei, HUANG Zhiquan, YANG Wei, et al. Influence of Fe/C Ratio on Microstructure and Properties of Plasma Hardfacing of Fe-Cr-C Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 37-42.

0 前言

大型机械装备常因磨损、腐蚀或磨蚀而失效报

废,造成巨大浪费^[1]。因此,为了提高装备服役周期,促进循环经济发展,对其耗损部件进行修复迫在眉睫。堆焊制造与再制造技术逐步成为一种快

* 收稿日期: 2022-9-25

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(201ZP20220010-1)

作者简介: 魏 炜(1989—),男,工程师,硕士研究生,主要从事先进制造的研究。

速便捷的工艺修复途径^[2]。

等离子堆焊是利用焊枪内部的钨极(电流负极)以及基体(电流正极)之间产生的等离子体作为热源,将热量转移至工件表面,并向该热能区域送入焊接粉末,使其熔化后沉积在工件表面,从而实现零件表面强化和硬化的堆焊工艺。相比于选区激光熔化技术,等离子弧堆焊层致密度高、冶金缺陷少,在合适工艺条件下可获得无缺陷、成形良好的熔敷涂层^[3],是一种能广泛适应各种高合金、高性能材料如Co、Cr、W等堆焊要求的弧焊方法^[4],具有较高的熔敷效率和低稀释率,符合绿色制造的发展趋势,在制造业中的应用日益广泛。

Fe-Cr-C耐磨堆焊合金是典型的自生碳化物强化的复合材料,堆焊层基体组织是初生碳化物+残余奥氏体+共晶碳化物+少量马氏体,具有成本低、硬度高、耐磨性好等优点,已被广泛应用于材料表面强化领域,但堆焊层韧性差,易产生裂纹和脆断等缺陷^[5-7]。邓德伟等人^[8-10]利用等离子堆焊技术在304L不锈钢表面堆焊Fe90自熔性合金粉末,研究发现堆焊层组织由马氏体、(Cr,Fe)₇C₃、CrFeB、CrB与Fe₃Si组成,硬度是基材的3.5~5.2倍,磨损量下降80%~85%;堆焊电流为130 A时,堆焊层的硬度最高,耐磨性最佳。

本文采用等离子堆焊和铺粉技术,研究了粉体中Fe/C对比对堆焊合金组织及耐磨性能的影响。

1 试验材料及方法

试验用基材为尺寸200 mm×350 mm×25 mm的Q235钢板,4组试样的 $w(\text{Cr})/w(\text{C})$ 比为5:1,调整Fe/C配比分别为10:1、8:1、4:1和0。按表1所示比例进行混合后加入5%的高锰酸钾溶液,以铺粉的方式在Q235钢板表面压制厚3 mm的粉块,随后采用PTA-400E3-2000LM等离子焊机(见图1)将压制成形的粉块熔焊到Q235钢板表面。焊接工艺参数为:焊接电流150 A,离子气流速5 L/min,焊接速度150 mm/min,摆幅10 mm,摆速1 400 mm/min。

采用电火花线切割制备用于显微分析的试件(尺寸15 mm×15 mm×12 mm)和用于耐磨性测试的试件(尺寸25 mm×25 mm×12 mm)。采用蔡司Scope1

表1 合金粉块化学成分配比(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition ratio of alloy powder blocks (wt. %)

粉块样编号	Cr	C	Si	Mn	Fe
1#	29.5	6.2	2.1	0.7	61.5
2#	33.7	7.0	2.4	0.8	56.1
3#	46.8	9.7	3.3	1.2	39.0
4#	76.7	16.0	5.4	1.9	0



图1 等离子堆焊设备

Fig. 1 Plasma hardfacing equipment

型金相显微镜观察堆焊层的微观组织形貌。采用ThermoFisher ARL3460型光谱仪对试样堆焊层进行成分检测,采用飞纳X1型扫描电镜观察试样微观组织形貌。通过二值法对堆焊合金中硬质相体积分数进行计算。采用T700型硬度仪测试试样硬度,每组试样测试5次,结果取平均值。每种耐磨试件切取3个,依据ASTM G99—04《销盘式摩擦试验测试方法》对堆焊合金进行耐磨试验,摩擦副为直径9.5 mm的氧化锆陶瓷球,载荷为100 N,转速为60 r/min,连续磨损60 min。

2 试验结果与分析

2.1 焊道表面成形

4种等离子堆焊试样焊后表面成形形貌如图2所示。不含Fe的试样4#的焊道成形最差,焊接过程中电弧吹力以及保护气都会将尚未与基体形成冶金结合的粉块吹开,焊道虚焊、咬边现象明显,难以成形。当粉块中的Fe/C配比上升时,焊道成形趋好,其中试样1#、2#焊道存在咬边且焊道铺展性差,特别是起、收弧位置处缺陷明显,试样3#熔池流动性和焊道成形最好,起、收弧位置堆焊合金饱满,未发现明显缺陷。

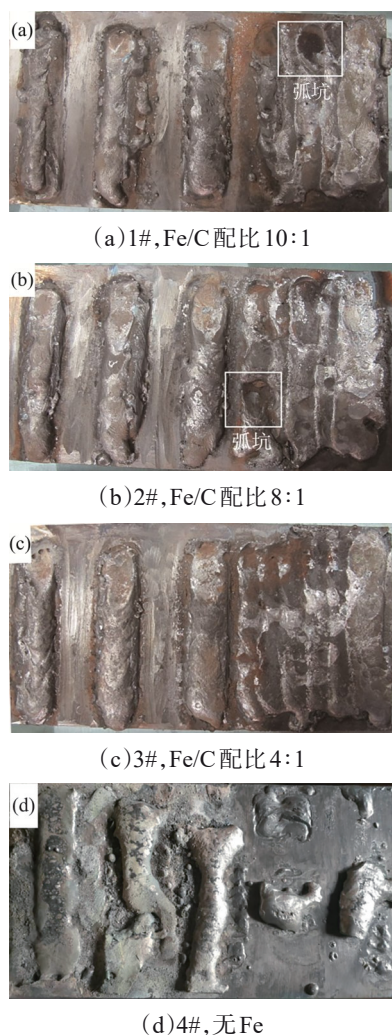


图2 等离子堆焊试样焊道成形情况
Fig. 2 Bead formation of plasma hardfacing layer

不同 Fe/C 配比导致焊道成形差异的主要原因是: Fe 的熔点为 $1\,538\,^{\circ}\text{C}$, Cr 的熔点高达 $1\,857\,^{\circ}\text{C}$, 堆焊过程中 Fe 能够起到助熔作用, 有利于熔池的流动性, 从而获得成形良好的焊道; 当无 Fe 时, 等离子弧热输入无法将粉块完全熔化, 导致堆焊飞溅大、

焊道不成形。而当 Fe/C 配比增加至 8:1 甚至 10:1 时, 大量 Fe 在试验条件下快速熔化, 而较强的等离子弧吹力作用将熔池吹开形成弧坑, 导致焊道成形不美观, 部分堆焊层出现弧坑。

2.2 显微组织及堆焊合金层成分分析

堆焊合金层化学成分如表 2 所示, 试样 3# 堆焊层化学成分变化较大, 虽然其 Cr、C 元素含量较试样 1#、2# 更高, 但其烧损也更严重。对比表 1 可知, 试样 1# 的 Cr 质量分数降低了 21.7%, 试样 2# 的降低了 30%, 试样 3# 的降低了 41.4%。试样 4# 焊道不成形, 不具备实际工程应用价值, 不再进行后续分析。

表 2 堆焊合金层成分(质量分数, %)

Table 2 Elements of hardfacing layer (wt. %)

试样编号	C	Si	Mn	Cr	Fe
1#	4.388	1.14	0.62	23.09	余量
2#	4.163	0.90	0.53	23.58	余量
3#	4.833	1.14	0.69	27.42	余量

堆焊合金层微观组织如图 3 所示。结合表 1 分析可知, 3 组试样堆焊合金组织均以马氏体基体表面分布碳化铬硬质相为主, 其中试样 1# 的碳化铬晶粒尺寸较小, 晶粒分布存在偏析, 试样 2# 晶体组织粗大, 且分布不均匀, 而试样 3# 晶粒尺寸大小均匀, 弥散分布。

3 组试样均为过共晶组织, 白色的碳化物硬质相弥散分布在马氏体基体表面。Cr 作为易形成碳化物元素, 在冷却过程中与 C 结合首先形成碳化铬硬质相。试样 1# 中 Fe/C 配比在 3 组试样中最大, C 元素质量分数最低, 导致堆焊合金中硬质相缺碳, 从而变成 M_{23}C_6 型碳化物; 随着 Fe/C 配比的降低, 试样 2# 中 C 元素质量分数增加, 堆焊合金中形成了大量粗大的 M_7C_3 型碳化物, 能够有效提高材料整体硬

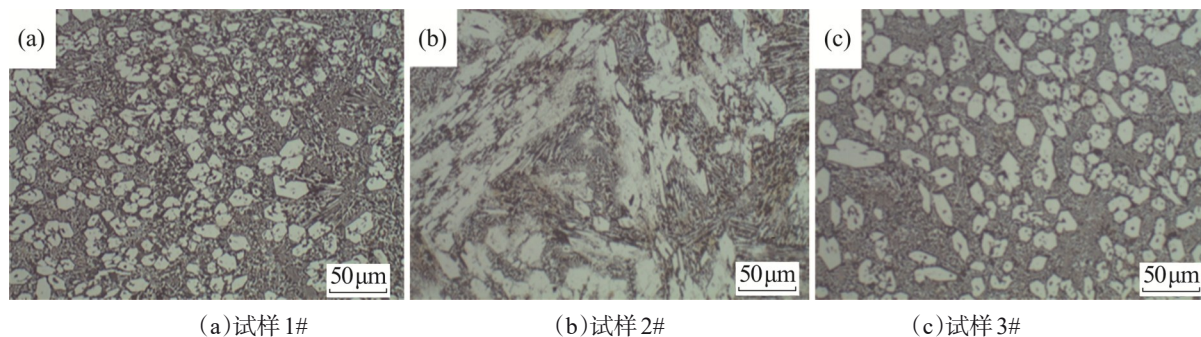


图3 堆焊合金层金相组织
Fig. 3 Microstructure of hardfacing layer

度;继续降低Fe/C配比,导致C元素的质量分数增大,由于3组试样的 $w(\text{Cr})/w(\text{C})$ 值基本相同,所以试样3#中Cr元素质量分数也随之增加。随着Cr、C元素质量分数的提高,堆焊合金中碳化物形核质点明显增加,因此试样3#堆焊合金显微组织中出现弥散分布、尺寸均匀细密的 M_7C_3 型碳化物。

堆焊合金硬质相体积分数及硬度测试结果如表3所示。Fe元素能有效提高熔池流动性,减少合金元素烧损。当Fe/C配比高时,试样合金元素含量较低,Fe质量分数的增加也导致堆焊合金中硬质相体积分数减少,因此Fe/C配比最高的试样1#的硬质相体积分数和硬度值均为3组试样中最低,分别为44.5%和52.5 HRC。随着Fe/C配比降低,试样2#中Cr、C含量明显提高,堆焊合金中硬质相体积分数增加,硬度明显上升。随着Fe/C配比进一步降低,熔池流动性也进一步降低,起、收弧位置无弧坑形成,合金烧损率超过40%,但是由于Fe含量降低,添加的合金元素更多,试样3#中Cr质量分数最高,堆焊合金中硬质相体积分数进一步上升,超过55%,硬度相较于碳化物晶粒尺寸更大的试样2#有所降低。

表3 堆焊合金硬质相体积分数及硬度

Table 3 Hardness and volume fraction of hard phase of hardfacing alloy

堆焊样编号	硬质相体积分数/%	硬度/HRC
1#	44.5	52.5
2#	50.1	58.3
3#	55.8	56.8

2.3 耐磨性分析

3组试样的磨损实验结果如图4所示,随着Fe/C配比的降低,材料耐磨性逐渐提高。结合表4发现,堆焊合金耐磨性与显微组织中硬质相体积分数相关,随着硬质相体积分数的提高,硬质相钉扎作用显著,减缓了磨料对合金的切削磨损,提高了堆焊合金整体耐磨性,而合金硬度变化与耐磨性无明显相关性。

选取耐磨性最差的1#试样和耐磨性最好的3#试样进行磨痕形貌分析,分别如图5、图6所示。两组试样磨损形式都是磨粒磨损,试样1#的最大磨损深度为14.53 μm ,磨损宽度为1 008 μm ,试样3#的最大磨损深度为10.37 μm ,最大磨损宽度为963 μm 。

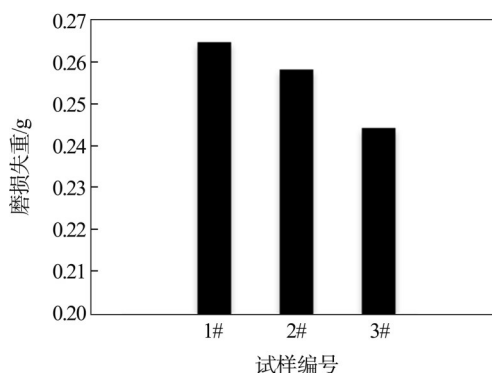


图4 耐磨实验

Fig. 4 Wear resistant experiment

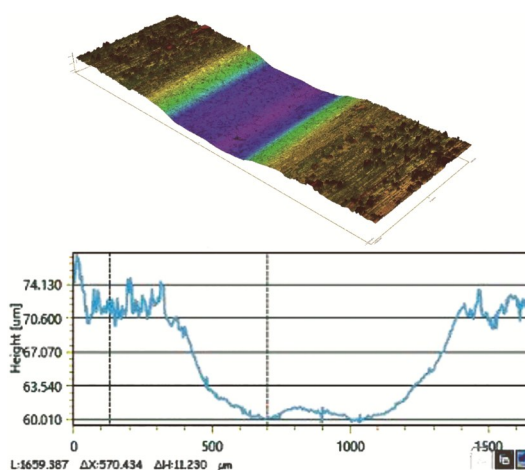


图5 试样1#磨痕形貌

Fig. 5 Wear shape of specimen 1#

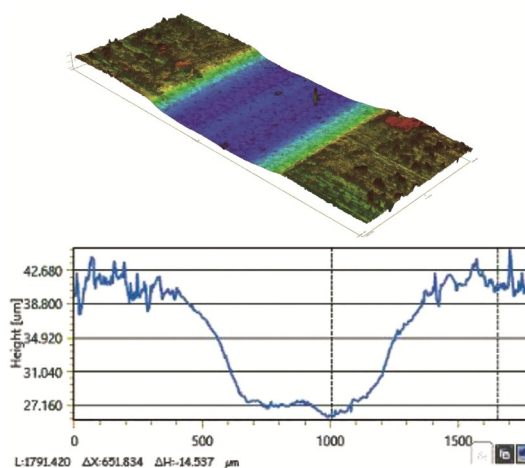


图6 试样3#磨痕形貌

Fig. 6 Wear shape of specimen 3#

由于试样3#的显微组织为弥散分布在马氏体基体表面且晶粒细小均匀的 M_7C_3 型碳化物,在磨损过程中起到钉扎作用,结合阴影理论,这种弥散分布的碳化物能够有效降低磨粒磨损对基体的磨耗,从而

减小磨损深度及宽度。而试样 1#中的硬质相主要为 $M_{23}C_6$, 硬度低于 M_7C_3 , 抵抗磨粒磨损的作用不如 M_7C_3 , 导致硬质相与基体同时磨损, 因此试样 1#的磨损深度及宽度比试样 3#更高。

3 结论及展望

针对等离子铺粉电弧熔敷 Fe 基耐磨堆焊合金组织及耐磨性能进行了研究, 重点关注了 Fe/C 配比对堆焊合金组织特征和耐磨性能的影响, 主要观点如下:

(1) Fe 元素在等离子堆焊过程中起到增强熔池流动性, 提高粉末与基材冶金结合的作用, 当 Fe/C 配比为 4:1 时, 焊道成形最好, 起、收弧端焊道饱满, 没有弧坑等外观缺陷。

(2) Fe/C 配比的提高有助于降低堆焊合金的元素烧损, 当 Fe/C 配比为 10:1 时 Cr 元素烧损率为 21.7%, Fe/C 配比为 8:1 时烧损率为 30%, Fe/C 配比为 4:1 时烧损率达到了 41.4%。

(3) 等离子堆焊合金中硬质相以 M_7C_3 和 $M_{23}C_6$ 型碳化物为主, 硬质相体积占比随着 Fe/C 配比的降低而逐渐升高, 最高达到 55.8%, 硬质相的钉扎作用显著, 减缓了磨料的切削磨损, 提高了堆焊合金整体耐磨性。

综上可知, 等离子铺粉电弧熔敷 Fe 基耐磨堆焊合金是一种非常有效的耐磨堆焊成形工艺, 其具有热输入小, 熔敷效率高的特点, 具有较高的工程应用价值。但目前仍有很多问题亟待解决, 如等离子铺粉电弧燃烧过程及熔池状态分析、基于图像的电弧稳定性研究等, 需要更多学者和工程技术人员投入到相关研究中去。

参考文献:

- [1] 林松盛, 周克崧, 代明江. 抗冲蚀磨损涂层的研究及应用进展[J]. 材料研究与应用, 2018, 12(03): 149-155.
LIN S S, ZHOU K S, DAI M J. Development of erosion resistant coatings on research and application[J]. Materials Research and Application, 2018, 12(03): 149-155.
- [2] 黄智泉. 堆焊制造与再制造技术发展综述[J]. 金属加工(热加工), 2021(06): 23-28.
- [3] HUANG Z Q. Development of surfacing and remanufacturing technology[J]. MW Metal Forming, 2021(06): 23-28.
- [3] 胡永俊, 罗俊威, 易江龙, 等. 固溶时效对等离子堆焊 $WC_p/18Ni300$ 钢复合涂层组织与性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(11): 62-68.
- HU Y J, LUO J W, YI J L, et al. Effects of solution and ageing treatment on microstructure and properties of WC reinforced 18Ni300 steel substrate composite coatings by plasma transferred arc[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2020, 41(11): 62-68.
- [4] 王红英, 徐伟波, 赵昆, 等. 获得高熔敷速度与低稀释率的等离子粉末堆焊方法[J]. 焊接, 2002(6): 27-29.
- WANG H Y, XU W B, ZHAO K, et al. Effective Method of Plasma Arc Powder Surfacing to Achieve Both High Deposition Rate and Low Ratio of Dilution[J]. Welding & Joining, 2002(6): 27-29.
- [5] 姚成武, 徐滨士, 黄坚, 等. 铁基合金激光熔覆层裂纹控制的组织设计[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 74-79, 83.
- YAO C W, XU B S, HUANG J, et al. Microstructure Design of Controlling Crack of Fe-based Laser Cladding Layer[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 74-79, 83.
- [6] 杨庆祥, 周野飞, 杨育林, 等. Fe-Cr-C 系耐磨堆焊合金研究进展[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(03): 189-196, 282.
- YANG Q X, ZHOU Y F, YANG Y L, et al. Research progress of wear-resistant Fe-Cr-C hardfacing alloys[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(03): 189-196, 282.
- [7] 王智慧, 贺定勇, 蒋建敏, 等. Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金磨粒磨损行为[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 73-76, 116-117.
- WANG Z H, HE D Y, JIANG J M, et al. Abrasive wear behavior of Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 73-76, 116-117.
- [8] 郭洋, 陈兴东, 黄岚, 等. 电流对等离子堆焊 $WC_p/Ni60$ 复合层组织与性能的影响[J]. 电焊机, 2020, 50(04): 89-94, 139-140.
- GUO Y, CHEN X D, HUANG L, et al. Effect of transfer arc current on microstructures and properties of plasma transfer arc surfacing $WC_p/Ni60$ composite layers[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(04): 89-

- 94, 139–140.
- [9] 邓德伟, 耿延朝, 田鑫, 等. 等离子堆焊铌元素增强镍基合金堆焊层的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S2): 202–206. DOI: 10.13289/j.issn.1009–6264.2014.s2.043.
- DENG D W, GENG Y Z, TIAN X, et al. Microstructure and performance of nickel-based alloy with niobium coating through plasma surfacing [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S2): 202–206. DOI: 10.13289/j.issn.1009–6264.2014.s2.043.
- [10] 耿延朝, 邓德伟, 田鑫, 等. 焊接电流对镍基铌复合堆焊层组织及性能的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2019, 55(04): 240–243.
- GENG Y Z, DENG D W, TIAN X, et al. Influence of Welding Currents on Microstructure and Performances of Ni-Nb Composite Surfacing Layers [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2019, 55(04): 240–243.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>
-
-  21
- [8] 封小松, 陈彦宾, 李俐群. 镀锌板激光钎焊温度场的数值模拟[J]. 金属学报, 2006(08): 882–886.
- FENG X S, CHEN Y B, LI L Q. Temperature Field Simulation of Laser Brazing for Galvanized Steel Sheets [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006(08): 882–886.
- [9] 冯杰. 镀锌板激光钎焊温度场及应力应变场分析[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2005.
- FENG J. The Analysis of Temperature field and Stress and Strain field in Laser Brazing of Galvanized Steel Sheet [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [10] 金湘中, 李力钧. 激光深熔焊接过程中小孔效应的试验研究[J]. 应用激光, 1999(05): 293–295, 322.
- JIN X Z, LI L J. An Experimental Study on Keyhole Effect in Deep Penetration Laser Welding [J]. Applied Laser, 1999(05): 293–295, 322.
- [11] 席明哲, 虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟[J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1527–1532.
- XI M Z, YU G. Numerical Simulation for the Transient Temperature Field of 3D Moving Laser Molten Pool [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(12): 1527–1532.
- [12] Reisgen U, Schleser M, Mokrov M, et al. Optimization of laser welding of DP/TRIP steel sheets using statistical approach [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(1): 255–262.
- [13] LI L Q, FENG X S, CHEN Y B. Influence of laser energy input mode on joint interface characteristics in laser brazing with Cu-base filler metal [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008(05): 1065–1070.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>