

灰口铸铁表面镍基喷焊层的组织和性能研究

韩景伟¹, 吴成武¹, 张晓强¹, 程旭东²

(1. 中国石油集团济柴动力有限公司再制造分公司, 河北 沧州 062658;

2. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070)

[摘要] 制备致密完整的熔化焊与钎焊混合焊层结构具有重要意义。采用等离子喷焊技术在灰口铸铁基体上制备镍基焊层,再制造恢复了柴油机缸盖压紧环配合面机械尺寸和功能,利用金相显微镜(OM)、X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱仪(EDS)对喷焊层的成分和组织进行了分析,利用维氏硬度计测试了喷焊层的显微硬度。结果表明:喷焊层未出现裂纹和白口组织,母材的稀释率低且与喷焊层结合良好,提高了再制造效率,可取代传统手工钎焊技术,获得完整的熔化焊与钎焊混合焊层结构。

[关键词] 灰口铸铁; 等离子喷焊; 镍基合金; 显微组织

[中图分类号] TG664 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1001-1560(2019)10-0046-04

Microstructure and Properties of Nickel-Based Overlay on Gray Cast Iron

HAN Jing-wei¹, WU Cheng-wu¹, ZHANG Xiao-qiang¹, CHENG Xu-dong²

(1. Remanufacturing Center of CNPC JPEC, Cangzhou 062658, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A nickel-based coating was prepared on the gray cast iron substrate by plasma spray welding technology to restore the mechanical size and function of the workpiece. The composition and microstructures of coatings were characterized by optical metallographic microscope (OM), X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM) and X-ray energy dispersive spectrometer (EDS). Moreover, the microhardness of coatings was characterized by Vickers indentation tester. Results showed that no cracks and chills were observed on the coatings. The base material possessed a low dilution rate and was well bonded to the coating. In general, this method could improve remanufacturing efficiency, replace traditional manual brazing technology, and obtain complete fusion welding and brazing hybrid welding structure.

Key words: gray cast iron; plasma spray welding; Ni-based alloy; microstructure

0 前言

灰口铸铁由于其成本较低、不变形等优点,被广泛应用于机械制造、石油化工、矿山开采等行业作为机械本体构件^[1,2]。在再制造技术推广应用中,必然大量与铸铁类材料接触,等离子喷焊技术具有操作简单,生产效率高等特点,采用该技术对铸铁工件的表面修复、尤其对灰口铸铁在使用过程中某些配合部位因磨损和腐蚀出现尺寸超差需要用性能接近或高于本体的焊层进行尺寸恢复时具有重要的意义^[3-5]。但因铸铁本身含有大量石墨碳组分,采用等离子喷焊时会使铸铁中的碳大量融入熔池,不仅对焊层组分形成冲淡,且会大量出现裂纹和气孔等缺陷,易产生白口组织^[6]。通常需

对工件整体进行预热和焊后保温缓冷处理,但对于再制造的工件由于其他机械尺寸已经定型或体型较大,整体预热和缓冷不可能实现,研究采用等离子喷焊进行工件局部冷焊处理,形成致密完整的熔化焊与钎焊混合焊层结构的研究有重要意义。

本工作采用超低碳低铁无铬镍基粉末作为喷焊材料,通过采用联合弧形式、调整喷焊工艺参数、减小焊枪喷嘴中等离子弧通道的长度和直径比(称为压缩比)、柔化等离子弧、在冷态大气环境条件下在灰口铸铁基体上制备了镍基喷焊层,并对喷焊层的成分、组织和性能进行了分析测试。

[收稿日期] 2019-04-29

[通信作者] 程旭东(1954-),研究员,博士生导师,研究方向为功能性表面工程涂层材料,电话:13986213997, E-mail:xdcheng54@163.com

1 试 验

1.1 等离子喷焊铁基层

基体为 HT250 板材,尺寸为 150 mm×100 mm×15 mm,其化学成分(质量分数,%):3.10~3.30 C,1.60~1.80 Si,0.70~0.90 Mn,<0.25 P,<0.12 S,余量 Fe。喷焊材料为 ZX Ni22AA 镍基粉末,粒度范围为 40~80 μm,其化学成分(质量分数,%):<0.1 C,2.0~3.5 Si,0.5~1.8 B,0.5 Fe,余量 Ni。试验前对 HT250 板材进行去油除锈喷砂处理,然后采用 PTA-400E2-NR 等离子喷焊设备进行喷焊,制备喷焊层,工艺参数见表 1。

表 1 等离子喷焊工艺参数

非转移弧 电流/A	非转移弧 电压/V	转移弧电 流/A	转移弧电 压/V
100	40	50	35
喷焊速度/ (mm·min ⁻¹)	送粉速度/ (g·min ⁻¹)	喷焊距离/ mm	压缩比 (孔深/孔径)
30	10	10	1.0~1.2

1.2 测试分析

对制备的喷焊层按常规金相制备方法进行切割、抛光、腐蚀等处理。使用光学显微镜观察喷焊层的金相组织,使用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)、JSM-IT300 型扫描电镜(SEM)及其自带的能谱分析仪(EDS)对喷焊层的成分和组织进行测试和分析。使用 HV-1000 维氏硬度仪测试基体到喷焊层的硬度分布。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

图 1 为喷焊试样熔合区部位的金相组织,焊缝具有较窄的熔合区。

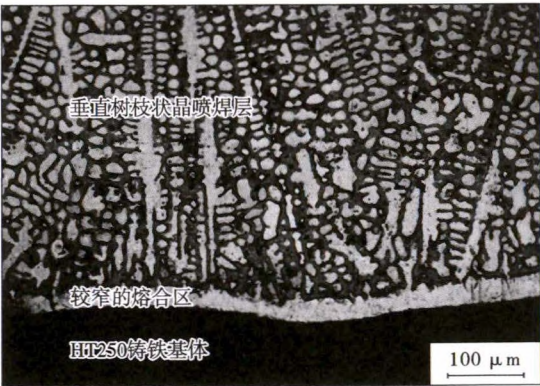


图 1 喷焊试样熔合区金相组织

在基体靠近熔合区的一侧有少量片状石墨,未发现明显二次渗碳体和白口组织。这是因为对整个喷焊过程进行了必要的工艺控制。首先,对灰口铸铁表面

喷焊部位进行粗砂喷砂处理,在露出粗糙的铸铁金属本体后,对喷焊面进行约 300 ℃ 的烘烤,烧掉浮在表面的游离碳组分,保持粗糙度较高的金属组分不变。其次,将现有的焊枪喷嘴孔道的压缩比(孔深/孔径)尽量减小,减小等离子弧刚性,增加弧柔性,致使形成的熔池刚好只将灰口铸铁表面粗糙的金属部位熔融,尽可能保持熔深浅。第三,采用联合弧作业,其作用是利用非转移弧先将内送粉的粉末预热到一定温度,而调低转移弧的电流,使其产生的离子弧柔和,作用于基体表面产生的熔池小,稀释率低;尽量避免基体中碳元素向焊层结合面扩散。第四,采用了 ZX Ni22AA 镍基粉末,其特点在于喷焊层中的镍基组织对碳和铁的固溶性较高,而 ZX Ni22AA 镍基粉末含碳、含铁量极低。在熔敷过程中,即使基体中的部分碳、铁组分进入熔池,也因熔池凝固速度快,稀释率低,控制熔合线附近碳、铁总量不超过固溶含量上限。则在熔合组织内只会形成固溶体,不会产生珠光体和二次渗碳体。在上述 4 个前提条件的保证下,焊层未发现白口组织。在焊层靠近熔合区的一侧,存在垂直于熔合区的树枝状晶,其一次晶轴与熔合线大体垂直,且部分树枝状晶与熔合线相连生长。这是由于来自基体的激冷作用使得靠近熔合区的区域过冷度较大,晶体依附原有晶核,延散热方向即垂直融合区方向生长具有优势,从而形成树枝状晶体的一次晶轴。更重要的是,图 1 中的熔合线较一般氧乙炔火焰钎焊的润湿熔合线宽,而较一般在钢基体表面熔化焊的熔合区窄得多,这就是熔池凝固快,焊层稀释率低的结果。此等离子喷焊方法曾在钢上喷焊铜焊层的应用上获得成功^[7],如钢基体上的熔池凝固速度过慢,会致使熔融的铜向基体内渗入,导致基体一侧出现较长的渗透裂纹^[8]。此熔合线可解释为类似于熔化焊与钎焊混合焊层形成的结构。

图 2 为熔覆层中上部位的金相组织,由于该处冷却速度较熔合区小,过冷度小,树枝状晶生产受到抑制,形成了不发达的树枝状晶。

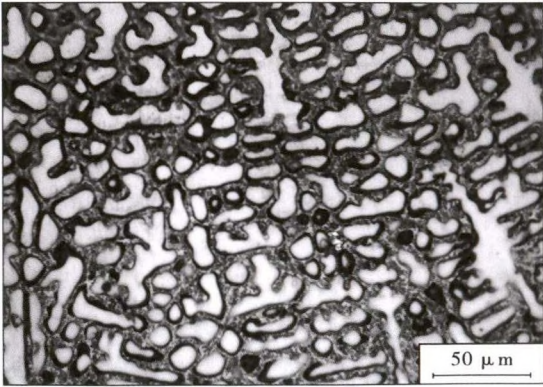


图 2 熔覆层中上部位金相组织

2.2 成分

图3为熔覆层的SEM形貌。熔合区宽约25 μm , 熔覆层组织主要包括树枝状晶结构和晶间灰色基相。采用能谱分析仪对熔合区和熔覆层各处进行了元素检测,其结果如表2所示。根据能谱分析结果,点A和点B中均含有大量的Ni和Fe元素,且2种元素的质量比分别为1:1和3:1。结合图4熔覆层的XRD谱分析结果可知,熔合区(点A)为FeNi,熔覆层内的树枝状晶体(点B)为FeNi₃。晶间灰色组织(点C)含有大量的Ni元素和少量的C、Fe元素,结合XRD谱判断基相为固溶有少量C、Fe的 γ -Ni相。

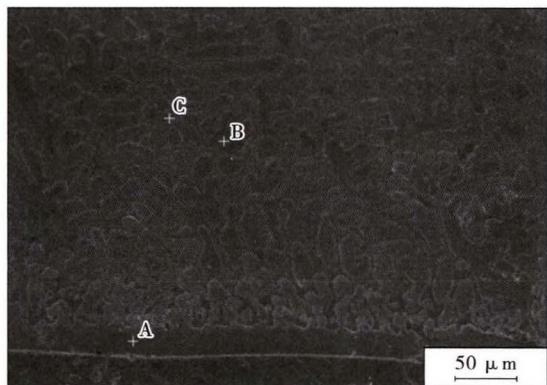


图3 熔覆层的SEM形貌

表2 熔覆层组织成分(质量分数)

位置	Ni	C	Fe	B	Si	%
A	49.8	0.8	47.1	0.5	1.2	
B	73.9	0.2	23.8	0.8	1.2	
C	82.2	0.2	16.2	0.2	0.3	

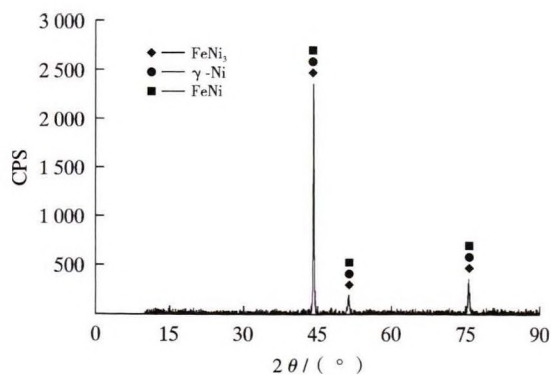


图4 熔覆层的XRD谱

2.3 熔合区元素扩散与分布

在等离子喷焊过程中,母材的稀释程度将严重影响喷焊层的质量。如果母材稀释率较高,其中的Fe元素和C元素大量进入熔合区和喷焊层,容易在焊接接头形成二次渗碳体,产生白口组织和裂纹。为了解母

材的稀释程度,对熔覆层和母材的结合区域进行了线扫描,结果如图5所示。从图中可看出,从基体到熔合区出现了Fe、Ni元素含量的骤变,熔覆层和熔合区内的元素呈现渐变趋势。整体上熔合区的Fe元素含量虽较高,但没超过与碳复合形成渗碳体的饱和上限,而Ni元素含量仅较熔覆层的略低。另外,从元素分布图上也可以看出熔合区的宽度在25 μm 左右,这也从直观上证明了此工艺形成的熔合区类似于熔化焊与钎焊混合焊层形成的结构。图中熔合区内部Fe和Ni元素的强度接近即其含量接近,而熔覆层内部的Fe元素浓度远远低于Ni元素浓度,约为Ni元素浓度的三分之一。这表明Fe元素向熔覆层中的扩散程度较低,即母材稀释率低。本工作喷焊工艺参数有效抑制了基体中的元素进入熔覆层,从而提高了熔覆层完整性,使得喷焊层性能得到明显提升。

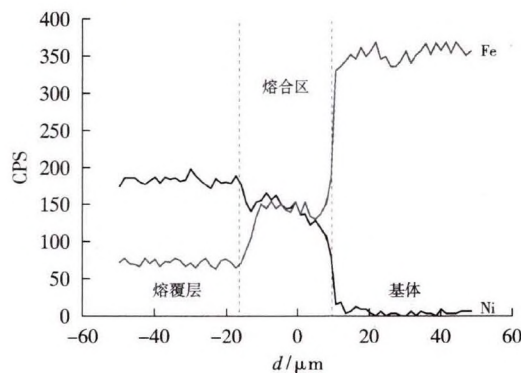


图5 熔合线处Fe和Ni元素线扫描

2.4 熔覆层性能

上述分析表明母材的稀释率低,熔覆层未出现明显的裂纹、气孔等缺陷。对熔覆层至基体的显微硬度进行了测试,载荷10 N,加载时间10 s。从熔覆层顶部开始,每隔0.5 mm取1测试点,共取10个点,其中熔覆层占6个点,基体占4个点。测试结果见图6。

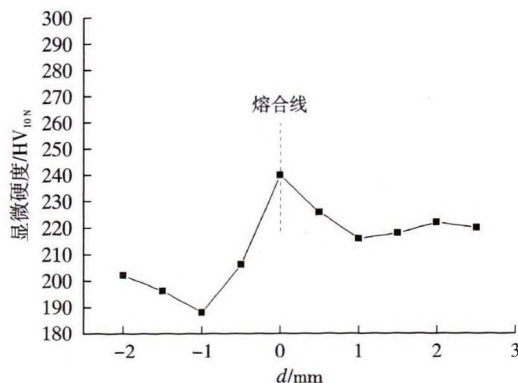


图6 喷焊层的显微硬度分布

从图6可以看出基体 HT250 的显微硬度在 200 HV_{10N} 左右, 喷焊层截面的硬度在 215~225 HV_{10N} 之间, 达到了铸铁补焊的要求。熔合区的硬度最高在 240 HV_{10N} 左右, 没有出现高硬度区域, 这是由于在半熔化区未形成较硬的白口组织。

2.5 应用实例

采用等离子喷焊系统, 利用本喷焊工艺参数成功对柴油机的缸盖压紧环面进行了修复, 所得修复面具有良好的金属光泽, 而且没有明显的气孔、裂纹等质量缺陷。

3 结 论

(1) 通过等离子喷焊工艺全过程控制, 对灰口铸铁基体进行喷砂去碳处理, 小压缩比喷嘴与联合弧共同作用, 以及低碳低铁无铬镍硼硅喷焊粉末的使用, 保证了灰口铸铁表面喷焊工艺的実施。

(2) 在不预热的条件下, 成功制备出致密且无白口组织、裂纹等缺陷的喷焊层, 在灰口铸铁表面呈现出熔合区极窄的熔化焊与钎焊混合结构。

(3) 喷焊层组织为 FeNi₃ 和 γ -Ni。由于冷却速度差异, 结晶形态从喷焊层底部到顶部由柱状晶向等轴晶转变。

(4) 母材的稀释率极低, 大幅度地抑制了母材中的 Fe 元素和 C 元素向喷焊层的扩散, 提升了喷焊层的性能。喷焊层截面的硬度在 215~225 HV_{10N} 之间, 达到了灰口铸铁表面再制造喷焊冶金结合焊层的要求。

[参 考 文 献]

- [1] 吕耀辉, 徐滨士, 向永华, 等. 灰口铸铁镍基等离子熔覆层组织和性能[J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 46-48.
- [2] 刘 蒙, 崔立山, 姜大强, 等. 铸铁表面堆焊 Co 基合金的组织和性能研究[J]. 石油机械, 2010, 38(9): 5-6.
- [3] 李大军, 郑永选, 李 博. 剪板机灰口铸铁齿轮断齿现场焊接修复[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9): 137-138.
- [4] 赵巧良, 丁卫松. 铸铁泵座断裂法兰的电弧冷焊修复[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9): 135-136.
- [5] 董 良, 魏晓伟, 周山栋, 等. 灰口铸铁表面等离子喷焊铁基金属层组织与性能研究[J]. 电焊机, 2012, 42(5): 55-57.
- [6] 李亚江. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 204-206.
- [7] 程旭东, 周尚万, 刘和运, 等. 等离子喷焊铜基自熔性合金的研制[J]. 材料保护, 2004, 37(7): 16-18.
- [8] 程旭东, 邓世均. 铜基等离子喷焊及焊层性能研究[J]. 材料保护, 1999, 32(12): 14-15.

[编校: 严 灿]

(上接第 45 页)

- [9] BOUDJOUAN F, CHELOUCHE A, TOUAM T, et al. Effects of stabilizer ratio on photoluminescence properties of sol-gel ZnO nano-structured thin films[J]. J Lumin, 2015, 158: 32-37.
- [10] YE C H, BANDO Y, SHEN G Z, et al. Thickness-dependent photocatalytic performance of ZnO nanoplatelets[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(31): 15 146-15 151.
- [11] WAN Q, WANG T H, ZHAO J C. Enhanced photocatalytic activity of ZnO nanotetrapods[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(8): 5 633.
- [12] 李芳柏, 黄志尧, 万洪福, 等. 一种有机废水的光催化处理方法及其装置: 1301668A[P]. 2001-07-04.
- [13] 周忠福, 王会利, 石回回, 等. 一种新型光催化水处理设备: 204550132A[P]. 2015-08-12.
- [14] 董寅生, 刘燕辉, 郭 超等. 一种管状光催化反应器: 101385964A[P]. 2009-03-18.

- [15] 陈 瀚. ZnO 薄膜的制备及应用[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(4): 90-93.
- [16] 王 东, 刘红缨, 贺军辉, 等. 旋涂法制备功能薄膜的研究进展[J]. 影像科学与光化学, 2012, 30(2): 91-101.
- [17] DEAN E J, GLOWINSKI R, GUIDOBONI G. On the numerical simulation of Bingham visco-plastic flow: Old and new results[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2007, 142(1): 36-62.
- [18] FILALI A, KHEZZAR L, MITSOU LIS E. Some experiences with the numerical simulation of Newtonian and Bingham fluids in dip coating[J]. Computers & Fluids, 2013, 82: 110-121.
- [19] LEE J, SON G. Numerical simulation of liquid film formation and evaporation in dip coating[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 68: 220-227.
- [20] 谢俊舰, 李木军, 沈连娟, 等. 提拉法涂胶膜厚均匀性研究[J]. 机械与电子, 2016, 34(7): 6-10.

[编校: 严 灿]