# 埋弧堆焊 WC 颗粒增强复合层的工艺及性能

左志超<sup>1</sup>,徐维义<sup>1</sup>,王磊<sup>1</sup>,陈玉华<sup>1</sup>,谢雨田<sup>2</sup>,黄永德<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室,南昌 330036;2. 方大特钢科技股份有限公司,南昌 330012)

摘要:目的 针对传统钢材硬度低、不耐磨损的问题,选用 WC 颗粒来增强传统钢材性能,研究不同工艺对 WC 颗粒增强钢基材料的影响。方法 采用埋弧焊方法,将含有 WC 颗粒的药芯焊丝在钢板表面进行堆焊, 采用 SVS3020 显微镜、光学显微镜和显微硬度计对焊缝的显微组织进行观察与分析。结果 随着焊接电流、 电压的增大,焊缝成形逐渐完好,无焊缝缺陷,焊接速度增大,焊缝有夹渣缺陷产生;焊缝硬度随着电流、 速度的提升而增大,但随电压的提升而下降。结论 埋弧焊焊接选用 350 A 电流、32 V 电压和 20 m/s 速度成 形的焊缝质量最佳,基体的稀释作用对堆焊合金层的显微硬度也有明显影响。

关键词:WC颗粒;钢基复合材料;显微硬度

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.021

中图分类号:TG422.1 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2019)05-0137-05

## Process and Performance of Submerged Arc Surfacing WC Particle Reinforced Composite Layer

ZUO Zhi-chao<sup>1</sup>, XU Wei-yi<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, CHEN Yu-hua<sup>1</sup>, XIE Yu-tian<sup>2</sup>, HUANG Yong-de<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, China; 2. Fangda Special Steel Technology Co., Ltd., Nanchang 330012, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to enhance the properties of traditional steel with WC particles and research the effects of different processes on WC particle reinforced steel base materials to solve the problems of low hardness and wear resistance of traditional steel. By using submerged arc welding, the flux cored wire containing WC particles was surfacing welded on the surface of the steel plate, and the microstructure of the welding seam was observed and analyzed with SVS3020 microscope, optical microscope and micro-hardness tester. With the increase of current and voltage, intact and weld defect free welding seams form gradually. The weld hardness increases with the increase of current and speed, but decreases with the increase of voltage. Submerged arc welding is conducted with 350 A current, 32 V voltage and 20 m/s speed to form the best weld quality. The micro-hardness of surfacing alloy layer is also significantly affected by the dilution of matrix.

KEY WORDS: WC particles; steel matrix composites; micro-hardness

采矿、刀具、地下工程等工程和工业领域的机械 设备因长期受到砂石、矿石冲击,容易导致工件磨损 失效,造成大量能源、材料浪费。近年来,由于我 国耐磨技术和设备的不成熟,制造出来的材料抗磨 损性能普遍低于国外水平,使用寿命较短,因此提 高材料耐磨性能和工件的使用寿命已成为一种必然

收稿日期: 2019-07-21

基金项目: 江西省优势科技创新团队重点项目(20181BCB19002); 江西省科技厅重点研发计划(20171BBE50010)

作者简介: 左志超(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为埋弧焊。

通讯作者:黄永德(1975—),男,副教授,主要研究方向为激光焊与弧焊和微连接等。

趋势<sup>[1-3]</sup>。陶瓷增强金属基复合材料是一种新型材料, 与传统耐磨材料相比,陶瓷增强金属基复合材料有 效结合了金属材料和陶瓷颗粒特性,提高了材料性 能<sup>[4-5]</sup>。

WC 颗粒具有硬度大、熔点高、与钢的湿润性好, 并且具有良好稳定性等优点,因此,采用 WC 陶瓷颗 粒来增强钢基材料已成为一种可行且性能可靠的制 备零件耐磨层方法。目前制备 WC 颗粒增强金属基复 合材料的方法[6-7]主要有粉末冶金[8-9]、等离子熔 覆[10-11]、铸造[12],然而,这些方法所制备的复合材 料会存在界面结合强度、致密性、热稳定性均较差等 问题。为了避免这些缺点,研究人员开始研究原位合 成法制备复合材料。该方法是通过元素之间或元素与 化合物之间的化学反应合成的,具有良好的稳定性和 界面<sup>[13]</sup>。隋育栋<sup>[14]</sup>和其他人使用 V-EPC 方法制备 WC 颗粒增强钢基表面层复合材料,研究表明 WC 颗 粒在基体中的溶解会导致复合层表面硬度提高,而且 WC 颗粒增强了基体冲击磨料磨损性能。黄浩科等[15] 用等离子快速烧结(SPS)法烧结制备碳化钨/钢基复 合材料,研究表明界面反应的产物为 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C,其形 成过程为:在约 1314 ℃,碳化钨颗粒发生反应 2WC→W2C+C,然后在约 1341 ℃发生 W2C 与基体的 反应, 生成 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C。

基于此文中采用埋弧自动焊方法在 Q235 钢基体 表面制备耐磨合金层,研究不同电流、电压和焊接速 度对 WC 增强堆焊合金层组织与性能的影响,具有重 要的现实意义。

## 1 材料与方法

药芯焊丝外表皮选用不锈钢带,药芯由 30%的 60目WC(铸造)颗粒、石墨、硅铁、中碳锰铁以及 还原铁粉等组成,焊丝直径为 3.2 mm。试验基体选 用 150 mm×300 mm×20 mm 的 Q235 钢板,用角磨机 打磨基体,除去表面污渍锈迹,再用酒精清洗干净。 然后选用焊剂 HJ260,在焊前将焊剂在 400 ℃左右烘 干 2 h,再通过埋弧焊机 MZ-1000 在已处理的 Q235 钢表面进行堆焊,并分别编号为 1—9,埋弧焊的焊 接工艺参数如表1所示。

表 1 焊接工艺参数 Tab.1 Parameters of welding process

编号	电流/A	电压/V	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	层数
1	300	32	20	1
2	350	32	20	1
3	400	32	20	1
4	350	27	20	1
5	350	32	20	1
6	350	37	20	1
7	350	32	20	1
8	350	32	25	1
9	350	32	30	1

焊后切取金相试样进行镶嵌、磨样和抛光,用体积分数为4%的硝酸酒精溶液进行腐蚀,采用4XB-TV 倒置金相显微镜对焊缝的显微组织进行金相观察,并 用 SVS3020显微镜观察焊缝形貌。同时采用 HV-1000 显微硬度计进行显微硬度测试,其中载荷为3 N。

## 2 结果分析

#### 2.1 工艺参数对焊缝形貌的影响

埋弧自动焊电压为 32 V,速度为 20 m/s 时,焊 接电流分别为 300,350,400 A 的焊缝形貌如图 1 所 示,当电流为 300 A 时,焊缝底部存在夹渣、气孔缺 陷;当电流为 350 A 和 400 A 时,可以得到无宏观缺 陷的焊缝,并且熔宽、熔深也有所增加。电流增大, 热输入量增加,熔化金属和熔渣所得到的热量充足, 流动性上升,夹渣、气孔现象减少。焊丝熔化速度增 大,单位时间焊丝的熔敷量增大,焊缝厚度增加,由 于热输入量增大,导致两端焊缝熔深增加。

埋弧自动焊电流为 350 A,速度为 20 m/s 时,焊 接电压分别为 27,32,37 V 的焊缝形貌如图 2 所示, 其中电压为 27 V 时,热输入量不足,存在明显的夹 渣现象,随着电压增大,热输入量增加,可以形成完 好焊缝。电压增大,电弧功率增大,弧长拉长,焊缝 熔宽增大,熔深、余高略有较小,变化不大。



Fig.2 Weld appearance at different voltages



图 3 不同速度下的焊缝形貌 Fig.3 Weld appearance at different speeds

埋弧自动焊电流为 350 V, 电压为 32 V 时, 焊接 速度分别为 20, 25, 30 m/s 的焊缝形貌如图 3 所示。 速度增加, 实际上是热输入量减少, 导致焊接速度为 20 m/s 时可形成完好焊缝, 过高的焊接速度(30 m/s) 导致焊缝缺陷产生。焊接速度增加, 电弧对母材的加 热减少, 熔宽明显减小, 与此同时, 由于电弧向后方 排斥熔池金属的作用加强, 电弧直接加热熔池低部的 母材, 使熔深略为增加, 余高减小。

为了得到无宏观缺陷的焊缝,应选用适当的电流、 电压、速度,但不可过大,否则会造成 WC 颗粒严重 烧损,堆焊合金层偏析。

### 2.2 工艺参数对焊缝组织的影响

图 4 给出不同电流下堆焊合金层显微组织。可以 看出,堆焊合金层的显微组织主要是残余奥氏体树枝 晶,其中以黑色鱼骨状碳化物 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 为主,黑色鱼 骨状物质之间的区域则为铁基。在高温电弧作用下, WC 颗粒溶解,W和C元素与基体中的Fe和Cr等元 素发生扩散反应,在 WC 颗粒与基体的反应界面形 成扩散层,在凝固时以碳化物形式析出。由于基体 Q235 钢的主要合金成分为 Fe, 随着电流增大, 热输 入量提高,基体溶解增大,使得焊层稀释率随之增 大,形成的共晶组织减少,但焊接送丝速度随电流 增大而加快, W 元素浓度变化较小, 温度升高, 奥 氏体枝晶组织变粗,硬质相增多,提高复合材料的 硬度。从图 5 的金相组织可以看出,焊接电压增大, WC 颗粒溶解增大,基体溶解增大,W和C元素浓 度降低, 枝晶减少, 硬质相数量减少, 且 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 与 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 之间填充了较多的 Fe 基体。改变焊接速 度,从图 6 的金相显微组织可以看出,速度增大, 基体熔深减小,W元素浓度升高,更加容易生成碳 化物,树枝晶增大,晶粒变粗,Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C硬质相数量 提高。



a 300 A b 350 A 图 4 不同电流焊缝显微组织 Fig.4 Weld microstructure at different currents







a 20 m/s b 25 m/s 图 6 不同速度焊缝显微组织 Fig.6 Weld microstructure at different speeds

40 µm

#### 2.3 工艺参数对焊缝硬度的影响

图 7 为不同工艺下堆焊合金层横截面显微硬度 的分布情况。母材区为 Q235 钢, 硬度值在 HV140 左右, 堆焊合金层的平均显微硬度值在 HV850~ HV1110之间波动。从图7仔细观察可知,由于母材 对堆焊层的稀释作用,基材中的 Fe 元素向堆焊层扩 散,熔合区的稀释作用更大,硬质碳化物生成量减少, 从而形成了硬度过渡区,并在此位置出现明显的硬度 梯度。随着离熔合区间距离的增大,母材对合金层稀 释作用逐渐减小,堆焊层的显微硬度主要与 WC 颗粒 的溶解扩散及分布有关。对比不同电流、电压、速度 条件下的焊缝,随着电流增大,堆焊合金层显微硬度 提高; 电压增大, 堆焊合金层硬度降低; 速度增大, 堆焊合金层硬度提高。堆焊电流增大,送丝速度增大, 热量提升,WC颗粒的溶解程度和元素扩散程度加强, 堆焊层中W元素浓度提高,硬质相形成量相对增多, 显微硬度值升高;堆焊电压增大,焊缝稀释率变大, 导致 W 元素浓度下降,显微硬度下降;焊接速度增 大,基体熔深减小,稀释率变小,W元素浓度升高, 显微硬度上升。

根据图 7 曲线可知, 堆焊合金层内部硬度值存在 个别极值点, 且整体有波动现象, 其原因可能是: 硬 度测试点在不同的组织上得到的数值不同, 而堆焊层

40 µm



中存在基体组织、硬质相、晶间碳化物等硬度不同的 成分,显微硬度必然会在堆焊层中出现不同程度的变 化,因此,堆焊层的显微硬度主要与以下两个因素有 关:一方面为母材对堆焊合金层的稀释作用,会导致 显微硬度值降低;而另一方面为WC颗粒的溶解扩散 作用,硬质相生成数量增多,可促进硬度值升高。堆 焊合金层内不同区域硬度值变化的主导因素不同,受 母材稀释作用、WC扩散程度、硬质相含量及其分布 等因素的影响,导致堆焊合金层的硬度值存在上下波 动现象。

# 3 结论

采用埋弧焊的方法,针对不同工艺下对 WC 增强 钢基表面组织与性能影响的研究,获得以下结论。

1)不同工艺参数会影响焊缝表面成形,产生气 孔、夹渣等缺陷,其中焊接电流为350A、焊机电压 为32V和焊接速度为20m/s时成形的焊缝质量最佳。

2)焊缝显微组织主要为残余奥氏体树枝晶,热输入量加大、WC扩散会促进枝晶生长,枝晶变粗。

3) 基体的稀释率对堆焊合金层的显微硬度也有 明显影响。随着电流增大,堆焊合金层显微硬度提高; 电压增大,堆焊合金层硬度降低;速度增大,堆焊合 金层硬度提高。在稀释作用较小的中部区域,堆焊合 金层的显微硬度最高。而在稀释作用大的底部区域, 堆焊合金层的显微硬度最低。WC 颗粒增强钢基复合 堆焊层中存在基体组织、未溶的 WC 颗粒以及反应形 成的硬质相,导致堆焊合金层不同部位的显微硬度存 在差异。

#### 参考文献:

- 赵敏海,刘爱国,郭面焕. WC 颗粒增强耐磨材料的研 究现状[J]. 焊接, 2006(11): 26—29.
   ZHAO Min-hai, LIU Ai-guo, GUO Mian-huan. Research on WC Reinforced Metrix Composite[J]. Welding & Joining, 2006(11): 26—29.
- [2] 王彦凤,邱常明,张贵杰. 耐磨钢的发展及技术进步
   [J]. 浙江冶金, 2007(2): 13—16.
   WANG Yan-feng, QIU Chang-ming, ZHANG Gui-jie.
   Development and Technique Progress in Abrasion-resistant Steel Abroad[J]. Journal of Zhejiang Metallurgy, 2007(2): 13—16.
- [3] GE S, WANG Q, WANG J. The Impact Wear-resistance Enhancement Mechanism of Medium Manganese Steel and Its Applications in Mining Machines[J]. Wear, 2017, 376/377: 1097—1104.
- [4] 邱昆,姜云鹏,史雪萍,等.新型颗粒增强金属玻璃 复合材料的拉伸增韧机制[J].复合材料学报,2018, 35(1):124—131.
  QIU Kun, JANG Yun-peng, SHI Xue-ping, et al. Tensile Toughening Mechanism of New Particle Reinforced

Toughening Mechanism of New Particle Reinforced Metallic Glass Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(1): 124–131.

- [5] RAMAKRISHNAN A, DINDA G P. Functionally Graded Metal Matrix Composite of Haynes 282 and SiC Fabricated by Laser Metal Deposition[J]. Materials & Design, 2019: 179.
- [6] 李松林,向锦涛,周伍喜,等.超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr涂层的耐滑动磨损行为[J].中国有色金 属学报,2012,22(5):1371—1376.

LI Song-lin, XIANG Jin-tao, ZHOU Wu-xi, et al. Sliding Wear Behavior of High-Velocity Oxy-Fuel Sprayed WC-10Co4Cr Coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2012, 22(5): 1371—1376.

- [7] 山泉, 张亚峰, 张哲轩, 等. 钨含量对 WCP/钢基表层 复合材料压缩性能及热疲劳行为的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(2): 115—121.
  SHAN Quan, ZHANG Ya-feng, ZHANG Zhe-xuan, et al. Effect of W Content on Compression and Thermal Fatigue Behavior of WCP/Steel Matrix Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(2): 115— 121.
- [8] 朱流, 郦剑. WC-10%Co 激光熔覆涂层的制备及耐磨 性能[J]. 机械工程材料, 2008, 32(8): 26—29.
   ZHU Liu, LI Jian. Preparation and Wear-resistance of WC-10%Co Laser Cladded Layer[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(8): 26—29.
- [9] 袁有录,李铸国. 等离子熔覆 WC-Ni/Fe 梯度涂层的 组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(11): 131— 136.

YUAN You-lu, LI Zhu-guo. Microstructure and Properties of WC-Ni/Fe Grandient Coating on Q235 Steel Formed by Plasma Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(11): 131–136.

[10] NASCIMENTO A M D, OCELÍK V, IERARDI M C F, et al. Microstructure of Reaction Zone in WC<sub>P</sub>/Duplex Stainless Steels Matrix Composites Processing by Laser Melt Injection[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(10): 2113-2120.

- [11] LI Ye-fei, GAO Yi-min. Three-Body Abrasive Wear Behavior of CC/High-Cr WCI Composite and Its Interfacial Characteristics[J]. Wear, 2010, 268(3/4): 511-518.
- [12] 叶旋,陈绍军,钟燕辉,等.WC颗粒增强Fe基粉末冶 金复合材料研究进展[J].材料导报,2018,32(S1):361 —367.
  YE Xuan, CHEN Shao-jun, ZHONG Yan-hui, et al. Research Status on Fe Matrix Powder Metallurgy Composite Reinforced by WC Particles[J]. Materials Review, 2018, 32(S1): 361—367.
- [13] WANG H Y, JIANG Q C, LI X L, et al. InSitu Synthesis of TiC/Mg Composites in Molten Magnesium[J]. Scripta Mater, 2003, 48(9): 1349–1354.
- [14] 隋育栋, 蒋业华, 李祖来, 等. WC 溶解对 WC<sub>P</sub>/钢基 表层复合材料组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(S1): 7—10.
  SUI Yu-dong, JIANG Ye-hua, LI Zu-lai, et al. Effects of WC Dissolute in Matrix on Microstructure and Properties of WC Reinforced Steel Composite[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(S1): 7—10.
- [15] 黄浩科,李祖来,山泉,等.碳化钨/钢基复合材料的 界面重熔[J]. 材料研究学报,2014,28(3):191—196.
  HUANG Hao-ke, LI Zu-lai, SHAN Quan, et al. Interface Remelting of Tungsten Carbide Particles Reinforced Steel Composite[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(3): 191—196.