

高铬铁基药芯焊丝不同堆焊工艺下的显微组织与性能研究*

王淑峰¹, 谷明霞², 白成峰¹, 周晓晓¹, 迟静¹, 李敏¹, 赵健³, 侯帅帅⁴

(1 山东科技大学材料科学与工程学院, 青岛 266590; 2 山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266590;
3 山东科技大学电气与自动化工程学院, 青岛 266590; 4 青岛市产品质量监督检验研究院, 青岛 266101)

摘要 采用高铬铁基耐磨合金细粉做成药芯焊丝, 分别用埋弧堆焊和等离子束堆焊方法制备耐磨试样, 对试样的显微组织、硬度分布、耐磨性分别进行研究。实验表明: 埋弧堆焊和等离子束堆焊组织具有较明显的区别, 埋弧堆焊试样结晶定向性更好, 晶粒更细化; 埋弧堆焊涂层显微硬度平均值为 791HV_{0.2}, 等离子束堆焊涂层显微硬度平均值为 774HV_{0.2}, 埋弧堆焊涂层的显微硬度分布更均匀; 耐干砂磨粒磨损性能埋弧堆焊是等离子束堆焊的 1.7 倍。

关键词 埋弧堆焊 等离子束堆焊 高铬铁基药芯焊丝 显微组织 耐磨性能

中图分类号: TG445; TG455 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11896/j.issn.1005-023X.2015.12.024

Research of Microstructure and Properties of High Chromium Iron Based Flux-cored Wire Using Different Hardfacing Processes

WANG Shufeng¹, GU Mingxia², BAI Xianfeng¹, ZHOU Xiaoxiao¹, CHI Jing¹,
LI Min¹, ZHAO Jian³, HOU Shuaishuai⁴

(1 College of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590;
2 College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590;
3 College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao 266590; 4 Qingdao Product Quality Supervision and Inspection Institute, Qingdao 266101)

Abstract The wear-resistant samples were prepared by submerged arc hardfacing and plasma arc hardfacing process respectively using high chromium iron base alloy fine powder flux-cored wire. The microstructure, hardness distribution, wear resistance of the samples were studied respectively. The experiments show that the microstructure has a significant difference between the submerged arc hardfacing sample and the plasma arc hardfacing sample, crystallization stereospecificity of the submerged arc hardfacing sample is better, and its grain is refined; the average microhardness of the submerged arc hardfacing sample is 791HV_{0.2}, the average microhardness of the plasma arc hardfacing sample is 774HV_{0.2}, the submerged arc hardfacing sample has more uniform microhardness distribution; the dry sand abrasive wear resistance of the submerged arc hardfacing sample is about 1.7 multiples that of the plasma arc hardfacing sample.

Key words submerged arc hardfacing, plasma arc hardfacing, high chromium iron based flux-cored wire, microhardness, wear-resistant property

0 引言

药芯焊丝具有成分易调整, 燃弧稳定等特点, 特别适合制作高硬度、轧制拔制困难的堆焊合金材料^[1-3]。药芯焊丝耐磨堆焊因其良好的经济性和较好的耐磨效果, 常用来制造或修复各种耐磨产品^[4-7], 如发动机曲轴、冲压模具、破碎机衬板和锤头、挖掘机斗齿、刮板输送机中部槽和底板等。堆焊合金的耐磨性能不仅取决于所含硬质相和基体相的成分、比例、分布、形态、尺寸等, 还取决于耐磨产品的制备技术。

当前药芯焊丝耐磨堆焊技术主要有埋弧堆焊和明弧堆

焊两种。埋弧堆焊具有生产效率高、金属成分稳定、劳动环境好、无飞溅及强光等优点, 但需要清渣工序, 增加了工人的劳动强度; 明弧堆焊具有焊层层间温度可控、可有效降低焊接热应力、施焊工艺简单等优点, 但同时飞溅大、弧光较强, 气体排放量大, 劳动条件差。本实验将明弧堆焊改为了等离子束堆焊工艺, Ar 气在堆焊过程中可起到较好保护效果, 类似于气体保护药芯焊丝堆焊^[8]。为比较相同成分的药芯焊丝在埋弧堆焊和等离子束堆焊两种工艺下涂层组织的结晶特征和性能差异, 采用自制的高铬铁基耐磨药芯焊丝, 在 Q235 钢板上进行了埋弧和等离子束堆焊试验, 研究高铬铁

* 青岛市科技发展计划(12-1-4-6-(4)-jch); 青岛市技术创新平台建设计划(14-7-2-42-gx); 青岛经济技术开发区重点科技发展计划(2013-1-51); 山东科技大学科研创新团队支持计划; 国家级大学生创新创业训练计划

王淑峰: 男, 1980 年生, 博士, 讲师, 主要从事等离子技术及应用方面的研究 E-mail: www.xiaojun@163.com

基耐磨药芯焊丝在埋弧堆焊及等离子束堆焊工艺下的凝固特性,并分析两种方法制备的耐磨堆焊涂层的性能。

1 实验

1.1 实验用药芯焊丝的制备

实验采用药芯焊丝的合金粉体为自制的水雾化耐磨合金粉体,熔炼温度 1650~1680 °C,雾化水压力为 10~15 MPa,筛分后取粒度区间为 270~500 目,合金成分如表 1 所示。合金粉体做成直径为 $\Phi 3.2$ mm 的药芯焊丝,填充率为 55%~57%。

表 1 药芯焊丝用耐磨合金粉体成分

Table 1 Ingredients of wear-resistant alloy powder for flux-cored wire

| Element | Cr | C | B | Nb | Ni | Fe |
|-------------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| Content/wt% | 29.5 | 4.0 | 2.3 | 0.6 | 0.5 | Bal. |

1.2 堆焊方法

两种堆焊方法采用的基板为 Q235 普通低碳钢,厚 20 mm;两种堆焊样品均为单层堆焊,堆焊层厚度 4 mm 左右。

埋弧堆焊焊剂采用莱芜市榭林焊接材料有限公司的 HJ107 焊剂,埋弧堆焊工艺参数为:焊件接负极,电流 300 A,电压 35~40 V,堆焊速度 500 mm/min。制得的样品标定为试样 1。

等离子束堆焊工艺参数为:焊件接正极,电流 300 A,电压 40~45 V,速度 500 mm/min,离子气流量 0.6~1.0 m³/h。制得的样品标定为试样 2。

1.3 显微组织分析

试样线切割后经研磨、抛光、腐蚀后在 Nikon Eclipse Me 600 显微镜下观察金相组织。分别选取堆焊层和基体结合面、堆焊层中部、堆焊层上部典型组织进行分析,为更好地比较出两种工艺下堆焊层组织的不同,所有组织图片都在 10 倍物镜下拍摄得到。

1.4 XRD 分析

两种试样都切割成 10 mm×10 mm 的块状,涂层上表面磨平抛光后在日本理学公司 (Rigaku) 生产的 D/MAX 2500PC X 射线衍射仪上进行 XRD 衍射分析。具体参数为:Cu 靶,狭缝宽 6.0 mm,工作电压 30 kV,选取衍射角度范围 20~90°,扫描速度 6(°)/min。

1.5 干砂橡胶轮磨粒磨损实验

用自制的干砂橡胶轮磨料磨粒磨损实验机对试样堆焊层进行磨损实验。将试样加工成长×宽×高为 75 mm×25 mm×7 mm,磨料为 60# 粒度的石英砂,施加负荷 130 N,橡胶轮线速度 200 m/min,磨损距离 1400 m。试样 1、试样 2 以及 Q235 基板对比试样分别加工 3 块试块,实验完成后取平均值作为最终结果。

2 结果与分析

2.1 堆焊层外观

试样 1 与试样 2 剖面的宏观照片分别如图 1(a)、(b)所

示。从图 1 中可以看出,两种涂层和基体的焊接性良好,涂层组织致密均匀,无气孔裂纹等缺陷;从涂层和母材的截面照片来看,等离子束堆焊试样涂层与基体的结合区附近更平整,这是因为等离子束流堆焊比埋弧堆焊可控性更好,从而使涂层厚度更均匀。

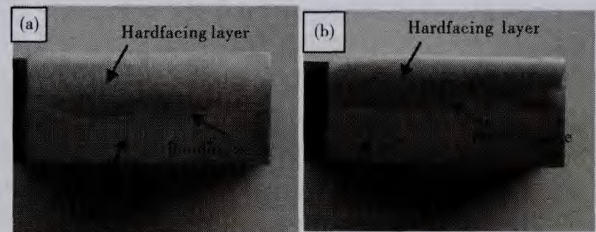


图 1 堆焊样品横截面的宏观照片

Fig. 1 Cross section macrographs of the hardfacing samples

2.2 显微组织分析

试样 1 与试样 2 从基体到堆焊层顶部的典型显微组织分别如图 2、图 3 所示。比较图 2(a)和图 3(a)可以看出,在埋弧堆焊试样中,结合区附近由平面晶往上,为较大范围的柱状晶区,而且整体较均匀;而在等离子束堆焊试样中,在结合区附近,结晶组织自平面晶往上,由柱状晶区很快过渡到等轴状晶区。从图 2(b)和图 3(b)中可以看出,埋弧堆焊试样中部结晶组织为发达的枝晶,而等离子束堆焊试样中部结晶组织同样为枝晶,但枝晶长度相比埋弧堆焊试样明显变短。从图 2(c)和图 3(c)中可以看出,两种堆焊方法在靠近顶部区域都为等轴晶区。同时从图 3(a)和图 3(c)可看出,试样 2 涂层顶部和底部的结晶形貌近似。总体来看,试样 1 中的晶粒明显比试样 2 中的晶粒要细小。

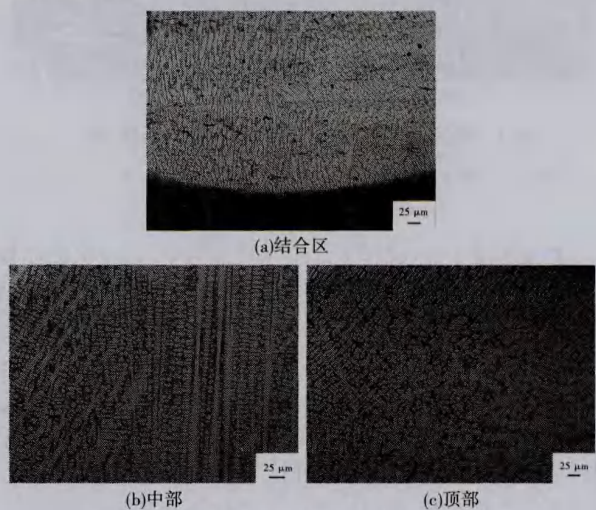


图 2 埋弧堆焊试样 1 涂层显微组织图片

Fig. 2 The coating microstructure pictures of submerged arc welding sample No. 1

分析两种试样产生这种组织形貌差异的原因,主要是两种方法的结晶凝固方式不同。在结合区附近,根据凝固结晶机理^[3],稳定的凝固壳层形成越早,表面细晶粒区向柱状晶区转变得越快,表面激冷区也就越窄;柱状晶区开始于稳定

凝固壳层的产生,而结束于内部等轴晶区的形成。对两种工艺来说,由于底部铁板基体的传热很快,可将基板看作砂型铸造中的铸型壁,且传热冷却效果比砂型更好,故在结合区附近会有非常大的过冷度,将产生大量非均质晶核,稳定凝固壳层产生很快,两个试样中靠近结合区都很快由平面晶区进入到柱状晶区,但埋弧堆焊试样柱状晶区明显更大一些,而等离子束堆焊试样则柱状晶区较小,很快进入等轴晶区。这是由于堆焊层内部熔体凝固主要由成分过冷控制,根据枝晶熔断理论^[9],生长着的柱状枝晶在凝固界面前方的熔断、游离和增殖导致了内部等轴晶晶核的形成,温度低时可使柱状晶区变窄而扩大等轴晶区;由于等离子束堆焊表面降温相比更快,所以柱状晶区较窄,同时由于内部成分过冷更大,形成的枝晶更容易发生熔断和增殖,故而在结合区附近,等离子束堆焊样品明显较窄,而埋弧堆焊样品柱状晶区相对较宽;同样,等离子束堆焊样品等轴晶区要比埋弧堆焊样品更宽。

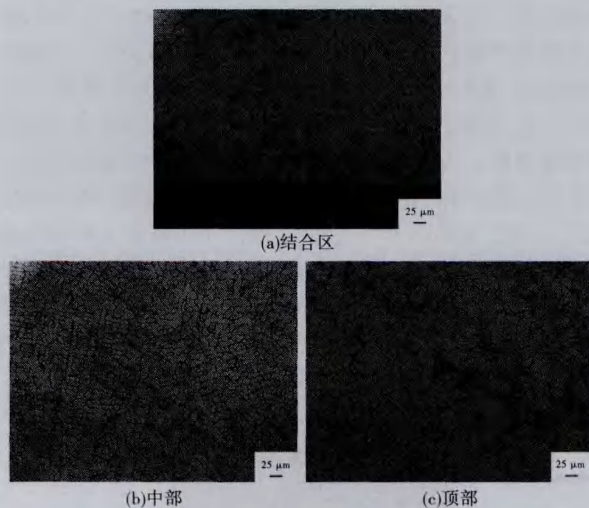


图 3 等离子束堆焊试样 2 涂层显微组织图片

Fig. 3 The coating microstructure pictures of plasma arc welding sample No. 2

在堆焊层中部,试样 1 组织以枝晶为主,且一次枝晶臂主干非常长,而试样 2 枝晶臂明显较短,而且还有部分等轴晶存在。分析其原因,埋弧堆焊试样在熔池中部结晶过程中,由于底部冷却快,顶部埋弧焊剂形成的渣壳有较好的保护作用,与等离子束堆焊相比,过冷度相对较小,形核率略低,从而使固液界面相对稳定,较厚的温度扩散层使侧向枝晶的生长受到限制,这样在同样体积的过冷熔体中每个晶粒就有更大生长空间,进而生成较长的枝晶骨架^[10];而等离子束堆焊过冷度相对较大,形核率增加,各向异性更明显,对侧枝生长更有利,因此侧向分支明显更大些,而且由于冷却的方向性相比埋弧堆焊差,枝晶生长方向更杂乱;另外由于较大成分过冷,中部还会形成部分等轴晶。

在堆焊层顶部,由于与外界直接接触,与结合区附近相似,冷速较快,成分过冷度同样较大,且由于表面熔体杂质较多,容易形成较多的异质成核核心,故晶核较多,结晶容易从

表面向内部发展而形成等轴晶,故而堆焊层顶部两种工艺都形成近似等轴晶组织,相比而言,埋弧堆焊试样 1 的单个晶粒更细小一些,且生长方向性更强。

2.3 物相分析

试样 1、试样 2 的 XRD 分析结果如图 4 所示。从图 4 中可知,2 个试样的物相组成相同,主要物相为 α -(Fe, Cr) 和 $(Cr, Fe)_7C_3$ 。

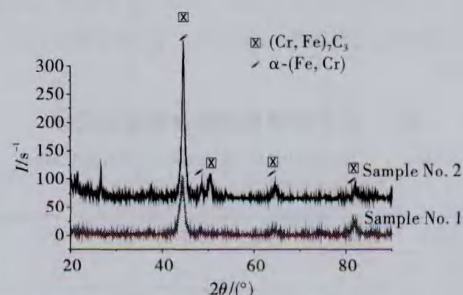


图 4 试样 1、试样 2 的 XRD 分析结果

Fig. 4 XRD diffraction patterns of the sample No. 1 and sample No. 2

2.4 显微硬度分析

试样 1、试样 2 从涂层表面到基体的显微硬度分布分析结果如图 5 所示。试样 1 的平均显微硬度为 791HV_{0.2},试样 2 的平均显微硬度为 774HV_{0.2},从显微硬度分布曲线可看出,埋弧堆焊的显微硬度分布更均匀,也进一步反映了埋弧堆焊层组织更致密均匀。

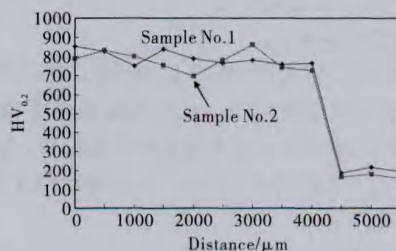


图 5 试样 1、试样 2 的显微硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness distribution of the sample No. 1 and sample No. 2

2.5 耐磨性分析

在干磨粒磨损试验机上测试试样 1、试样 2 的耐磨性能,与 Q235 材料比较的结果如表 2 所示。从表 2 中可看出,埋弧堆焊试样相对耐磨性是 Q235 的 2.57 倍,等离子束堆焊试样相对耐磨性是 Q235 的 1.5 倍。

试样 1、试样 2 及 Q235 材料磨损后的显微形貌如图 6 所示。从图 6 中可以看出,试样 1 磨损形貌具有较连续的犁沟状磨痕,磨痕比较均匀;试样 2 除沟槽外,还有较多的磨损坑,说明涂层组织不是很均匀,且有较多缺陷存在,试样 2 磨损相比试样 1 更严重,试样 1、试样 2 的磨损机制皆为微观切削磨损;参比样 Q235 的磨损十分严重,密布宽而深的犁沟、犁皱,磨损机制主要为切削磨损和严重的多次塑变磨损。

在表面堆焊层的磨损过程中,冶金层的主要组织为固溶

有大量合金元素的树枝状奥氏体,韧性比较好。在圆滑的石英砂磨粒的作用下,材料被挤压推移到磨粒运动路径的两侧,中间形成“犁沟”,两侧堆积隆起;带有棱角的石英砂颗粒则对冶金层起到显微切削作用。由于试样1结晶方向性好,内部组织更细小均匀,所以磨损相对也更为均匀一致。磨损结果表明,这种细小均匀、从基体向表面定向结晶的显微组织更有利于耐磨性的提高。

表2 试样1、试样2以及Q235标样的耐干砂磨粒磨损性能对比

Table 2 Dry sand abrasive wear resistance comparison of the sample No. 1, sample No. 2 and Q235 steel

| Sample | Weight loss/mg | Relative wear-resistance |
|--------|----------------|--------------------------|
| Q235 | 1.3982 | 1 |
| No. 1 | 0.5434 | 2.57 |
| No. 2 | 0.9207 | 1.5 |

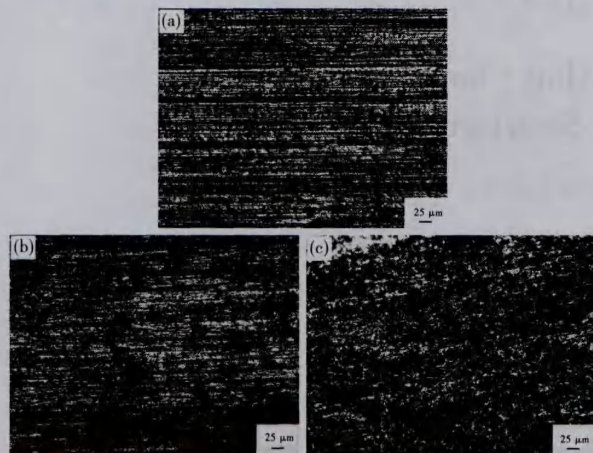


图6 试样1(a)、试样2(b)及Q235基板参比样(c)磨粒磨损后的显微形貌

Fig. 6 The worn microstructure of the sample No. 1 (a) and sample No. 2 (b) and Q235 substrate (c)

3 结论

(1)本实验条件下,埋弧堆焊试样比Ar气保护等离子束堆焊试样结晶晶粒更细小均匀,组织定向性更好,且一次枝晶臂主干更长;由结合区至涂层顶部,晶粒呈现平面晶→柱状晶→等轴状晶→枝晶→等轴状晶的结晶特点。

(2)埋弧堆焊试样和Ar气保护等离子束堆焊试样堆焊层物相一致,由 α -Fe和 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 组成;埋弧堆焊试样平均显微硬度为791HV_{0.2},等离子束堆焊试样的平均显微硬度为774HV_{0.2},埋弧堆焊试样显微硬度更均匀。

(3)相同实验条件下,埋弧堆焊试样耐磨损性能是Q235的2.57倍,等离子束堆焊试样耐磨损性能是Q235的1.5倍;磨粒磨损机理皆为微观切削磨损,组织细小均匀、从基体

向表面定向结晶的显微组织更有利于耐磨性的提高。

参考文献

- 1 Shan Jiguo, Dong Zujue, Xu Binshi. The development and its application status in basic industry of welding technology in China[J]. China Surf Eng, 2002(4):19(in Chinese)
单际国,董祖珏,徐滨士.我国堆焊技术的发展及其在基础工业中的应用现状[J].中国表面工程,2002(4):19
- 2 Bajić N, Bajić D, Veljić D, et al. The advantages of using activated flux-cored wire compared to solid wire in the MAG welding process from the aspect of metallurgical characteristics [J]. Metalurgija, 2014, 53(3): 361
- 3 Shlepakov V N, Gavriljuk Yu A, Kotelchuk A S, et al. Application of mechanized welding with self-shielding flux-cored wire in repair of metallurgical equipment [J]. Paton Welding J, 2013, 2013(3): 38
- 4 Gong Jianxun, Li Dan, Xiao Yifeng, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-B-C hardfacing alloys [J]. Trans Mater Heat Treatment, 2010, 31(3): 137(in Chinese)
龚建勋,李丹,肖逸峰,等. Fe-Cr-B-C堆焊合金的显微组织及耐磨性[J].材料热处理学报,2010,31(3):137
- 5 Yang Wei, Wang Xin, Zhang Yongsheng, et al. The research of hardfacing submerged flux-cored wires with high Cr cast iron [J]. China Surf Eng, 2007, 20(4): 33(in Chinese)
杨威,王欣,张永生,等.高铬铸铁耐磨堆焊埋弧药芯焊丝研究[J].中国表面工程,2007,20(4):33
- 6 Eremin E N. Using boride compounds in flux-cored wires for depositing maraging steel [J]. Weling Int, 2013, 27(2): 144
- 7 Yeremin Ye N, Losev A S. Mechanical properties and thermal stability of a maraging steel with borides, deposited with a flux-cored wire [J]. Weling Int, 2014, 28(6): 465
- 8 Hou Yafang, Ma Mingliang. The process and application of CO₂ gas shielded flux-cored stainless steel wire welding [J]. Welding Techn, 2009, 38(9): 58(in Chinese)
侯亚芳,马鸣亮. CO₂气体保护药芯焊丝堆焊不锈钢工艺及其应用[J].焊接技术,2009,38(9):58
- 9 吴树森,柳玉起.材料成形原理[M].北京:机械工业出版社,2011
- 10 Zhao Zhiwei. Solidification behaviors and microstructure of undercooled metals [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012(in Chinese)
赵志伟.过冷金属的凝固特性与组织研究[D].西安:西安工业大学,2012

(责任编辑 周媛媛)