

1. 8kW 高速激光熔覆鐵基合金工藝與組織結構

李岩¹ 白瑞興¹ 姜麗艷^{1,2} 王豫躍¹ 楊冠軍¹ 李長久¹ 李成新^{1*}

(1. 西安交通大學 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049;

2. 天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222) ^①

摘要:通过对传统激光熔覆的光学准直、聚焦和整形以及与之配合送粉头的重新设计从而实现均匀薄涂层的高速熔覆技术目前受到广泛关注, 由于兼具热喷涂快速沉积涂层特性以及激光熔覆冶金结合的特点, 有望成为规则表面实现替代电镀硬铬的新方法。本文采用 1.8kW 激光器, 利用快速激光熔覆技术在 45 钢基体上制备了铁基合金涂层, 模拟研究了送粉轨迹与激光路径的耦合关系, 分析了高速激光熔覆涂层的表面形貌与微观结构, 表征了涂层的表面粗糙度与显微硬度。研究表明在 1.8KW 低功率下可实现高速激光熔覆, 熔覆速率可达 150mm/s, 单层涂层厚度约 300um, 稀释率<1%。

Microstructure of Ferrous Alloy Coatings Deposited by 1.8kW High Speed Laser Cladding

Li Yan, Bai Ruixing, Lou Liyan, Wang Yuyue, Yang Guanjun, Li Changjiu, Li Chengxin*

(1 Xi'an Jiaotong University State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an, 710049

2 School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, 300222)

Abstract: High speed cladding technology which could be realized through the optical collimation, focusing and shaping system of conventional laser cladding and redesign of powder feed head, has attracted wide focus and research recently as the produced coatings are thin and uniform. Because the deposition speed is high as thermal spray and the metallurgical bonding could be obtained between coating and base metal, this technology is expected as a novel approach to realize the replacement of hard chromium plating. In this paper ferrous alloy coatings deposited by high speed laser cladding is formed on the base of C45 carbon steel with the laser power of 1.8kW, while the numerical simulation of the coupling relationship between powder trajectory and laser path is researched, surface morphology and microstructure of the coating is analyzed, and the surface roughness and hardness of the coating is tested. The results show that high speed laser cladding could be realized with the laser power of 1.8kW, and deposition speeds is up to 150mm/s, coating thickness is about 300um, and dilution ratio is less than 1%.

1 引言

电镀铬涂层因硬度高, 耐磨、耐蚀性好, 工艺简单, 成本较低, 广泛应用于液压支架、轧辊、阀门等工业产品的生产制造中, 经济效益显著^[1]。其中普遍使用的三氧化铬 (CrO₃), 又称为六价铬 (Cr⁶⁺), 连同其他含铬成分物质于 2013 年被欧盟委员会定义为对人体有害的物质, 从 2017 年 9

① 本文通讯联系人: 李成新 (西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

收稿日期: 2018 年 9 月

月開始，只能在獲得歐洲化學品總署的特殊且有限期認證後才能使用。同時，美國、日本等國家對電鍍鉻制定了嚴格的限制規定，我國也先後頒布了清潔生產法和電鍍廢水排放標準等相關文件，可替代電鍍硬鉻的塗層工藝受到廣泛關注。

熱噴塗及激光熔覆隨著表面工程技術的發展被認為是可替代電鍍硬鉻的有效方法。但是，熱噴塗技術粉末利用率低、塗層和基體的結合強度弱、孔隙率高且基體預處理複雜^[2-3]，不能在工業上大規模應用；激光熔覆塗層雖然具有結合強度強、晶粒細小、無孔隙等優點^[4-5]，但由於熔覆效率低、熔覆層過厚、開裂敏感性大，也未能在生產製造中廣泛使用^[6-7]。德國弗勞恩霍夫激光技術研究所（Fraunhofer ILT）和亞琛工業大學（RWTH-Aachen）聯合開發了超高速激光熔覆技術，該技術在3KW的激光功率下獲得稀釋率<1%，厚度為10~250μm具有冶金結合特性的塗層，熔覆速率可達200m/min，熔覆效率為500cm²/min^[8]，為替代電鍍鉻塗層工藝的開發提供了新的思路和方法。

本文通過對傳統激光熔覆的光學准直、聚焦和整形以及與之配合的送粉頭的重新設計，實現了高速激光熔覆技術，在較低激光功率下獲得了稀釋率極低，與基體呈冶金結合的均勻薄塗層，極大提高了熔覆速率。同時，利用上述高速激光熔覆技術，採用1.8KW激光功率，在45鋼基體製備了鐵基合金塗層，模擬研究了送粉軌跡與激光路徑的耦合關係，分析了高速激光熔覆塗層的表面形貌與微观結構，表征了塗層的表面粗糙度與显微硬度。

2 實驗材料與方法

2.1 原材料的選擇

試驗基體材料為45鋼，試樣尺寸規格為直徑215mm的實心圓棒。45鋼化學成分見表1。進行高速激光熔覆試驗前，對基體材料表面進行精磨處理，以降低基體表面粗糙度。

表1 45鋼化學成分

Table 1 The chemical composition of 45# steel

化學元素	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
含量 (wt%)	0.46	0.61	0.21	0.03	0.03	0.08	0.03	余量

高速激光熔覆塗層材料採用球形Fe基合金粉末（15~120μm），粉末粒徑以40μm為主，粉末形貌如圖1所示，粉末粒徑分布如圖2所示。

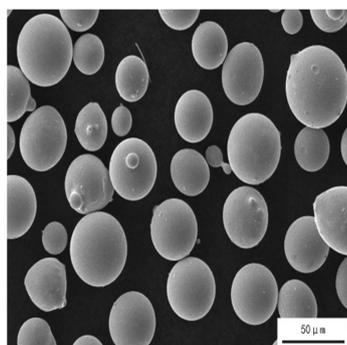


圖1 熔覆塗層粉末形貌

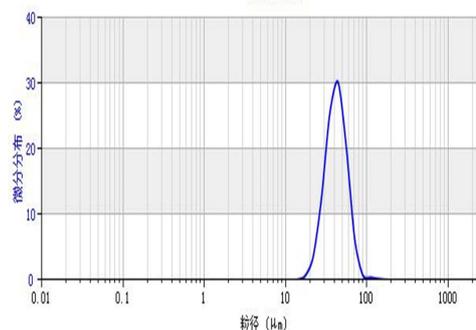


圖2 熔覆塗層粉末粒徑分布圖

2.2 高速激光熔覆工艺参数

实验采用 1800W 固定功率进行高速激光熔覆，在前期大量工艺试验的基础上，确定具体试验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

Table 2 The parameters of test

激光功率 (W)	工作距离 (mm)	送粉 气体	气体流量 (L/min)	送粉量 (g/s)	熔覆线速度 (mm/s)	机械手行走速度 (mm/s)	熔覆效率 (m ² /h)
1800	24	N ₂	7	0.817	150	0.065	0.16

实验采用 LS-909 激光粒度分析仪测量粉末粒径分布，日立 S-3400 型扫描电子显微镜观察粉末形貌及熔覆涂层的形貌与微观结构，VK9700K 彩色 3D 激光显微镜测量熔覆涂层的 3D 表面形貌及粗糙度，HV-1000 显微硬度仪测定垂直于熔覆涂层横截面的显微硬度(试验载荷 500g, 保压时间 15s)。

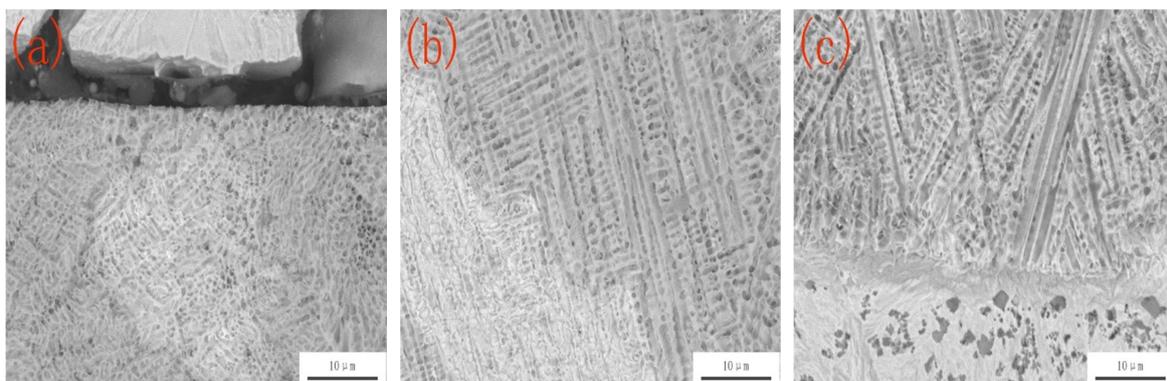


图 7 涂层不同位置组织形貌图 (a) 表层 (b) 内部 (c) 结合界面处

高速激光熔覆涂层 EDS 分析图谱如图 8 所示。通过垂直于界面方向 Cr 元素的分布可知，沿线扫描方向，Cr 元素起始含量基本为 0，随着距离增加，到达 180 μ m 左右时，Cr 元素含量发生突变，随后保持稳定的较高水平。由涂层截面可知，线扫 180~220 μ m 处为涂层与基材的结合界面，因 Cr 元素扩散，造成该区间内 Cr 元素含量的突变，证明涂层与基材之间为冶金结合。

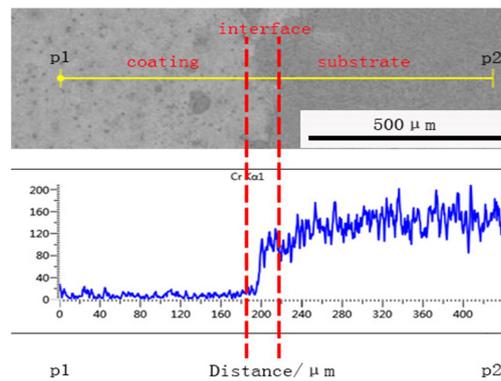


图8 高速激光熔覆涂层 EDS 分析图谱

实验采用上述高速激光熔覆工艺参数分别进行了双层和三层熔覆，涂层截面图如图9(a)、(b)所示。由图9(a)可知，双层熔覆的涂层形貌与单层熔覆的涂层没有明显变化，仅仅是涂层厚度有所增加。图9(b)显示的规律与图9(a)基本一致，即增加熔覆层数对涂层形貌结构没有明显影响，仅影响涂层厚度。

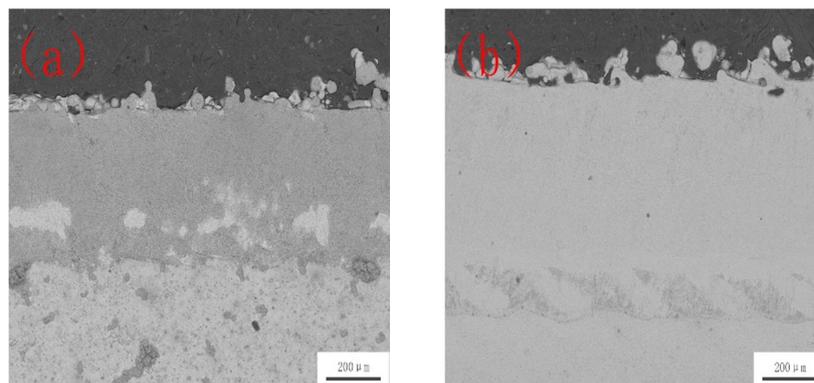


图9 高速激光多层熔覆横截面形貌 (a) 两层 (b) 三层

3.4 熔覆层显微硬度

本实验对高速激光熔覆双层Fe基涂层进行了硬度测试，双层涂层横截面显微硬度分布见图10。由图可知，随着与涂层表面的距离增加，显微硬度值由开始的波动逐渐趋于稳定，硬度值基本处于450~550HV_{0.5}之间，较传统激光熔覆工艺制备的Fe基涂层硬度有所提升^[11]。当距离涂层表面500μm时，硬度值开始下降，到达600μm处时，显微硬度值基本为250HV_{0.5}。由上述涂层形貌分析可知，双层涂层厚度约为600μm，结合涂层横截面显微硬度分布可知，涂层硬度远高于基体本身硬度。这是由于通过超高速激光熔覆工艺制备的Fe基合金涂层内部晶粒细小，由于细晶强化作用，从而使得涂层的硬度约为基材硬度2倍。

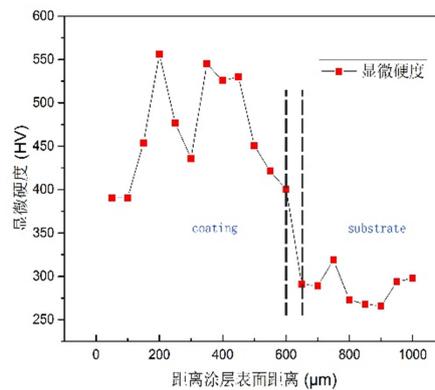


图 10 双层涂层横截面显微硬度分布

4 结论

(1) 在 1.8KW 激光功率下实现了高速激光熔覆,熔覆速率可达 150mm/s,单层涂层厚度约 300 μ m,基材熔深小,稀释率<1%,涂层与基材之间保持良好的冶金结合。

(2) 模拟研究了送粉轨迹与激光路径的耦合关系,优化了送粉喷嘴,确定了激光焦点平面,粉末焦点位置距喷嘴出口 18.6mm 时,粉末束直径最小,约 0.6mm。

(3) 高速激光熔覆工艺有效改善了制备涂层表面粗糙度,表面粗糙度值 Ra=30.0 μ m。

(4) 高速激光熔覆工艺制备的 Fe 基涂层内部晶粒细小,在细晶强化的作用下可获得约为基材 2 倍的硬度。

参考文献

- [1] 陈亚,李士嘉,王春林等.现代实用电镀技术[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [2] Khanna A S, Kanungo S. et al. Hard coatings based on thermal spray and laser cladding[J]. Journal of refractory metals& hard materials,2009,27(2):485
- [3] 李君.热喷涂技术应用与发展调研分析[D].吉林:吉林大学,2015.
- [4] Pei Yutao, Ouyang Jiahu, Lei Tingquan. et al. Developments of laser clad composite coatings[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1994 (1): 73-79.
裴宇韬,欧阳家虎,雷廷权.激光熔覆复合涂层的研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,1994(1):73-79.
- [5] Zhao Congshuo, Xing Zhiguo, Wang Haidou. et al. Advance in Laser cladding on Iron Carbon Alloy Matrix[J]. Materials Review, 2018,32(2):418-426.
赵聪硕,邢志国,王海斗等,铁碳合金表面激光熔覆的研究进展, [J].材料导报,2018,32(2):418-426.
- [6] GAO Dongqiang, WANG Rui, CHEN Wei. et al. Research Progress of Improving Material Properties by Laser Cladding[J]. Hot Working Technology, 2017,46 (12): 14-18
高东强,王蕊,陈威等.激光熔覆改善材料性能的研究进展[J].热加工工艺,2017,46(12):14-18

[7] LI Qing-tang, FU Han-guang, LEI Yong-ping. Research Development of Iron-based Wear-resistant Coating Fabricated by Laser Cladding Technique[J]. JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY:013, 39 (10): 1552-1560.

李庆棠, 符寒光, 雷永平. 激光熔覆铁基耐磨合金的研究进展[J]. 北京工业大学学报: 2013, 39 (10): 1552-1560.

[8] Thomas Schoppoven, Andres Gasser, and Konrad Wissenbach, Investigation on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. Journal of laser application, 2016, 28(2):002501-1-002501-9.

[9] XU Cheng-wei, WANG Zhen-quan, HU Xin. et al. Research on Microstructure and Property of Laser Cladding Layer on 1Cr17Ni2 Stainless Steel[J]. SURFACE TECHNOLOGY, 2011, 40(1):11-13.

徐成伟, 王振全, 胡欣等. 1Cr17Ni2 不锈钢表面激光熔覆层的微观组织和性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(1):11-13.

[10] XU peng, LIN Chengxin, ZHOU Chaoyu, SONG Zhicheng, Preparation and microstructure of 304 stainless steel layer by laser cladding[J]. TRANSACTIONS OF MATERIALS AND HEAT TREATMENT, 2013, 34(7):142-146.

徐鹏, 林成新, 周超玉, 宋志成, 激光熔覆 304 不锈钢涂层的工艺及组织[J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (7): 142-146.

[11] Shen longguang, Zhang Qingmao, Song Jie, Liao Jianhong. Wear performance of Fe-based alloy strengthened by laser cladding under high temperature[J]. High power laser and Particle Beams, 2009, 21(5):658-662.

沈龙光, 张庆茂, 宋杰, 廖健宏. 铁基合金激光熔覆层的高温磨损性能[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(5): 658-662.