

尾吹保护对激光熔覆 Stellite 6 合金涂层 组织和力学性能的影响^{*}

王 东¹, 李铸国¹, 王晓娟², 杨仁杰², 乔尚飞², 刘 霞²

(1. 上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240; 2. 上海电气电站设备有限公司 上海汽轮机厂, 上海 200240)

摘 要: 为解决激光熔覆 Stellite 6 涂层的裂纹与气孔问题, 利用尾吹保护的特殊工艺, 以半导体激光器为光源, 氩气为保护气, 同轴送粉的方式熔覆制备了合金涂层复合材料。并利用光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪和显微硬度计分别对尾吹保护工艺下激光熔覆 Stellite 6 合金涂层的成型性、显微组织和硬度进行测试分析。结果表明: 在 15 L/min 的尾吹气保护下, 熔覆所得合金涂层成型良好; 熔覆过程中的气孔、热裂纹的缺陷得到抑制; 层间、结合处涂层的微观组织得到了细化, 晶体生长形态由树枝晶转变为等轴晶; 多层多道涂层间的硬度分布均匀; 晶粒生长方向发生改变, 熔覆层组织与 β 相 Co 基本保持一致。由此证明, 引入尾吹保护工艺能够改善激光熔覆 Stellite 6 合金涂层的组织性能。

关键词: 激光熔覆; 钴基合金 (Stellite 6); 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG174.44; TG115 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)02-0052-05

Effect of Makeup Gas Protection on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Cladded Stellite 6 Coating

WANG Dong¹, LI Zhu-guo¹, WANG Xiao-juan², YANG Ren-jie², QIAO Shang-fei², LIU Xia²

(1. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240; 2. Shanghai Turbine Plant, Shanghai Electric Power Generation Equipment Co. Ltd., Shanghai 200240)

Abstract: To eliminate porosities and cracks of the Stellite 6 coating, makeup argon gas protection was applied during the laser cladding process. Microstructure and hardness of the coating were observed and analyzed by optical metalgraphic (OM), X-ray diffractometer and vicker micro-hardness tester. The results show that under the protection of makeup gas (flow rate 15 L/min), fine grain can be obtained with a low dilution rate, caused by high cooling rate, and lower thermal stress; at the interface, interdendritic zones will be formed between the layers, improving mechanical properties of the coating; the grain grows along the direction (200), consistent with β -Co; for multilayer conditions, the hardness is more uniform with the makeup gas protection.

Key words: laser cladding; cobalt-base alloys (Stellite 6); microstructure; mechanical properties

0 引 言

激光熔覆是利用激光束将合金粉末与基体金属薄层熔化, 制取良好抗磨、抗热、抗腐蚀和抗

疲劳性能合金涂层的一种表面处理技术^[1]。与传统的涂层技术相比, 激光熔覆具有冷速快 (高达 10^6 °C/s)、热输入低、畸变小、涂层稀释度低等

收稿日期: 2013-10-24; 修回日期: 2014-01-10; 基金项目: * 国际科技合作专项基金 (2009DFB50350)

作者简介: 王东 (1988—), 男 (汉), 江苏苏州人, 硕士生; 研究方向: 激光熔覆

网络出版日期: 2014-03-18 16:40; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140318.1640.004.html>

引文格式: 王东, 李铸国, 王晓娟, 等. 尾吹保护对激光熔覆 Stellite 6 合金涂层组织和力学性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 52-56.

优点^[2-4],在汽轮机叶片材料防护等方面受到了广泛关注^[5-6]。但在激光熔覆过程中,包含的激光、粉末材料及基体间的相互作用是相当复杂的,这就导致在普通工艺下,熔覆层的成形质量很难得到准确控制^[7]。特别是对于 Stellite 6 粉末而言,在送粉量、激光功率、扫描速度、保护气流量等参数已经达到最优工艺的前提下,存在的气孔缺陷以及多层多道熔覆层的不均匀性依然导致熔覆所得合金涂层的性能下降,降低了其使用寿命^[8]。例如 Sun S^[9]等人在利用 YAG 焊的方法优化 Stellite 6 合金涂层熔覆工艺时,所得的涂层稀释率大且不可避免的产生了气孔与热裂纹。文中利用半导体激光作热源,引入尾吹保护气的特殊工艺,对 Stellite 合金涂层的熔覆进行了进一步优化,以抑制 Stellite 合金熔覆层热裂纹缺陷的产生。并综合应用多种材料分析方法,从微观组织、硬度和相结构等方面,研究了尾吹保护对激光熔覆 Stellite 6 合金涂层性能的影响。

1 材料与方法

1.1 材料及装置

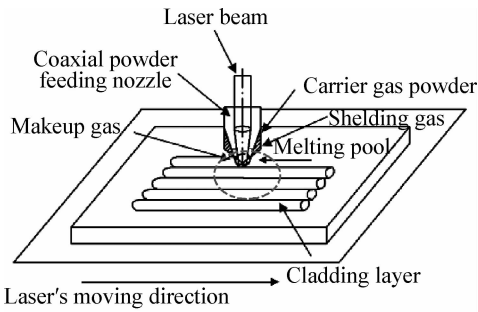
试验用熔覆金属粉末为 Stellite 6 合金粉(上海司太立有限公司),其化学成分为表 1 所示。

表 1 Stellite 6 合金化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of Stellite 6(wt/%)

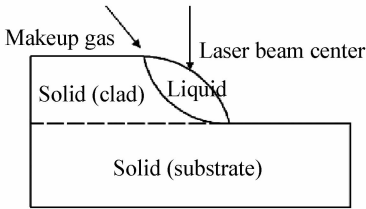
Element	C	Cr	Si	W	Fe
Content	1.15	29.00	1.10	4.00	3.00
Element	Mo	Ni	Mn	Co	
Content	1.00	3.00	0.50	Bal.	

工作原理与试验装置如图 1 所示。整个系统由半导体激光器及其机器人系统、同轴送粉喷嘴、送粉器、分粉器、辅助装置以及尾吹保护气装置组成。其中尾吹保护气喷嘴跟随熔池移动,始终位于熔池凝固的固液界面。熔覆粉体 Stellite 6 在 150 ℃干燥 2 h 后,装入送粉系统。所用基材为沉淀硬化不锈钢(0Cr17Ni4Cu4Nb),使用砂纸打磨清洗去除油污,以提高熔覆成型质量。

激光光源为 DL-035Q 高功率半导体激光器(德商罗芬激光技术公司),保护气和尾吹气均为氩气,采用同轴同步送粉的方式进行熔覆试验,熔覆方案为搭界率 50% 的 7 道熔覆。



(a) Schematic molding



(b) Magnification of the circle in (a)

图 1 成形原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of laser cladding process with makeup gas protection

1.2 激光熔覆参数

激光熔覆作为相对复杂的工艺,涂层组织性能与所用参数有直接关系。为保证试验条件的一致性,激光熔覆试验的功率、扫描速度保持一致且确定为 2 800 W 与 8 mm/s,合金粉末(Stellite 6)熔覆时所用保护气与尾吹气流量分别为 5 L/min 和 15 L/min。在此工艺参数下,激光熔覆 Stellite 6 合金涂层的成型良好,性能为最优。

1.3 组织性能表征方法

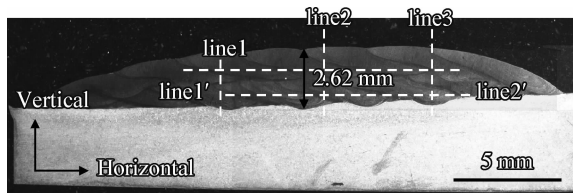
熔覆完成后,使用 Buehler Phoenix 4000 金相制样机,将试件沿垂直熔覆方向纵截面解剖并制备金相样品后进行腐蚀后在光学显微镜(Zeiss axio imager A1m)与扫描显微镜(Quanta fel 230)下对组织进行观察,于 X 射线衍射仪(Ultima IV)进行相结构测试。并在显微硬度计(402SXV)上进行显微硬度测试,力值大小为 1 kg,保载时间 15 s,间隔为 0.3 mm,包括熔覆涂层横截面垂直与平行熔覆方向两种方式。

2 结果与分析

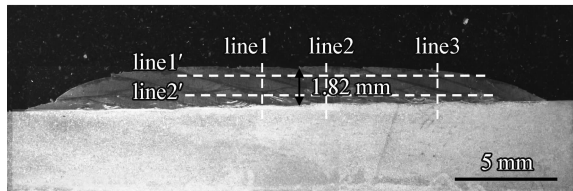
2.1 尾吹保护对熔覆层成形的影响

图 2(a)(b)分别为无尾吹和加尾吹情况下,搭接率为 50% 的 7 道双层连续叠加熔覆层宏观形貌。与 YAG 焊等其他工艺相比^[9-10],由于半导体

激光低热影响的特性,总体来说,所得熔覆涂层的不锈钢基体稀释率小,性能改变得到了控制。



(a) Without gas protection



(b) With gas protection

图2 无尾吹和加尾吹熔覆涂层横截面形貌和熔覆层硬度测试方向

Fig. 2 Cross section morphologies of the coatings obtained without/with makeup gas protection and direction of hardness tests

由稀释率定义计算:

$$\xi = S_2 / (S_1 + S_2) \quad (1)$$

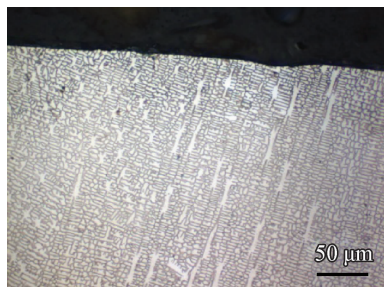
S_1 和 S_2 分别为熔覆层横截面与基体融化面积,如图 2(a)所示,无尾吹保护熔覆方向的后续道次的涂层稀释率略有增大;并且对于熔覆过程最后道次的涂层,其稀释率达到了 13.6%。这是

由于连续多道熔覆时,熔池凝固的大量热能无法立刻释放而残留于熔覆层与基材中,使得后续道次的熔池温度升高,基材熔化部分增多,元素扩散加剧,热影响区扩大,熔覆稀释率因此升高。而适当流量的尾吹保护气能够加快熔池的空气流动,减少多道熔覆的热量残留。同时,熔覆合金层稀释率很小为 4%且基本保持稳定。

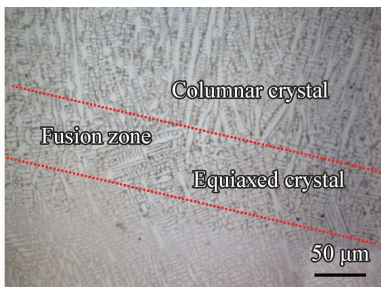
如图 2 所示,尾吹保护下的熔覆涂层在高度上有所下降。但是尾吹保护的引入减少了层间与基体、涂层结合处的气孔,也降低了合金粉末在熔覆过程中因未熔化而残留在涂层内部造成缺陷的可能性,因而解决了热裂纹产生的问题。并且与空气接触的最外层由于尾吹气的保护作用,也免于氧化变得白亮,提高了熔覆层表面的性能。

2.2 尾吹保护对熔覆层微观组织的影响

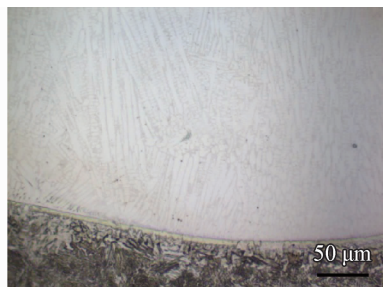
图 3 分别为两种工艺下熔覆层由顶部至结合处不同位置的金相组织。与宏观结果一致,两种工艺下熔覆层与基材都形成了良好的冶金结合,获得了细小的合金组织,并且这种组织呈现出与热流一致的生长方向均由基底垂直向顶端生长。熔覆上下层间出现了细小的灰色亮带。进一步观察发现,这一区域的两侧为细密树枝晶,中间为细密胞状树枝晶,且晶界尺寸较其他区域小^[11]。



(a) Surface



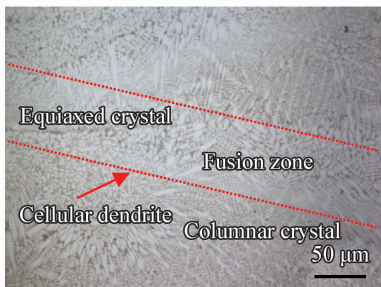
(b) Interface between layers



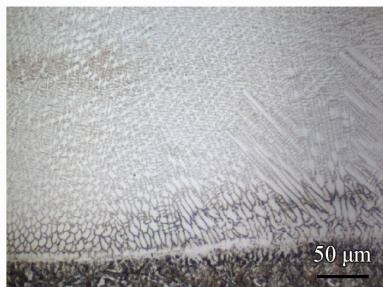
(c) Interface between layer and substrate



(d) Surface



(e) Interface between layers



(f) Interface between layer and substrate

图3 无尾吹(a,b,c)和有尾吹(d,e,f)保护的试样熔覆层横截面金相组织

Fig. 3 Cross section OM structure taken from the coating without (a,b,c) and with (d,e,f) makeup gas protection

如图 3(d)~(f) 所示,尾吹保护作用下,顶部、层间以及界面等结合面局部枝晶生长方向发生改变,出现了放射状的胞状等轴晶区域。熔覆过程中尾吹气在温度梯度基本保持不变的情况下,提高了熔池周边区域特别是熔池表面的冷却速度。 $G/\sqrt{R}$ 比值下降后,微区的生长形态由柱状晶转为等轴晶,原本细小的组织进一步减小为微米级别。尤其是层间以及顶端产生的胞状等轴晶,其直径在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下,熔覆层组织显著变细。

尾吹气体搅动作用下,未熔化的粉末颗粒沿熔覆方向运动后落入新的熔池中,成为细小的凝固核心。在表层熔池合金固液成分扩散凝固后形成了宏观上的表面颗粒粘着现象。表面凸起经过磨削磨平后,残留的细晶组织对合金涂层的表面性能有一定提高。但由于极高的温度梯度影响,除顶部区域外的涂层组织仍保持垂直热流生长方向。

2.3 尾吹保护对熔覆层相结构的影响

选取两组熔覆试样对其表面进行了 X 射线衍射的图谱检测。如图 4 所示,与标准卡片对比后发现,无论是否引入尾吹保护,熔覆层组织均由面心立方的 β 相 Co、CoCr 化合物相及少量的 CoC 化合物相组成。其中,图谱衍射峰 2θ 角分别为 44° 、 51° 、 75° 和 91° ,代表的晶粒取向为 (111)、(200)、(220)、(311),与 β 相 Co 基本保持一致。但是,该曲线与 PDF 卡片衍射图谱相比略有左移。这是因为根据 X 射线衍射方程:

$$2d \sin\theta = n\lambda \tag{2}$$

半径较大的 Cr 置换了 Co 原子,从而使得晶格常数增大,峰值的 2θ 角度减小。

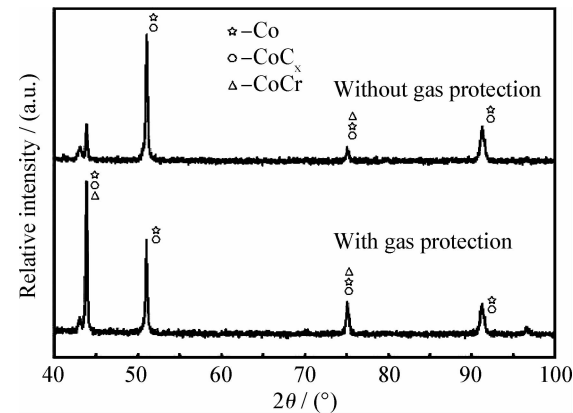


图 4 熔覆层 X 射线衍射图谱

Fig. 4 XRD patterns of the clad coating

图 4 中存在尾吹保护的涂层衍射图谱的峰值强度与标准卡片基本吻合,且在 44° 时衍射图谱达到了最高峰。而图 4 的无保护涂层则与之相反,在 51° (200) 方向上获得了最高的衍射峰。结合金相照片结果分析,这是由于无尾吹保护时,熔覆得到涂层组织沿热流方向形成了明显的定向生长组织。这种强烈的生长倾向,在尾吹气体的作用下被严重削弱,转化为更为自由的生长方式,提高了涂层组织的各向异性。

2.4 尾吹保护对熔覆层显微硬度的影响

如图 2 所示,选取两组试样的中心三道合金涂层进行了横截面的硬度测试,结果如图 5 所示,涂层的垂直熔覆方向硬度都随着与熔覆层表面距离增长而轻微波动减小。到达母材区域后,硬度由 $500\text{ HV}_{1.0}$ 左右突然降至 $350\text{ HV}_{1.0}$ 左右后保持稳定。其波动主要是由于当测试区域经过层间细小胞状等轴晶区时,减小的晶粒尺寸增多的晶界使得硬度值上升造成的。

通过图 5(c) 的平行熔覆方向硬度分布可以看出,无尾吹工艺下熔覆层平均硬度除了上下层的周期波动之外,还存在着从左至右逐渐减小的趋势。原因在于涂层的温度在熔覆过程中由左至右的熔覆层叠加方向上逐渐升高,造成了后续道次硬度的轻微下降。

存在尾吹保护的情况下,气流带走了熔池的热量,降低了后续道次的回火作用。熔覆层显微硬度分布变得均匀稳定,整体硬度有了一定程度 (约 10%) 的提高。表面微区薄层的硬度达到了接近 $550\text{ HV}_{1.0}$ 的理想水平。相较无尾吹工艺下的试样,母材与合金涂层的结合处硬度也由 $460\text{ HV}_{1.0}$ 提高到了 $500\text{ HV}_{1.0}$ 。

3 结 论

(1) 激光熔覆 Stellite 6 合金涂层在引入合适流量的尾吹保护气后,气孔缺陷得到抑制,获得了良好保护的光亮白洁涂层表面;并且在熔覆过程中后续道次的稀释率保持稳定。

(2) 由于尾吹气流动散热的影响,熔覆多道界面处晶粒显著减小,微区晶体由树枝晶生长转变为等轴晶生长,形成层间细晶区域。未熔合金粉末颗粒在尾吹保护作用下,与新的熔池凝固,产生了表面黏着现象。

(3) 加入尾吹保护后,熔覆涂层整体硬度提

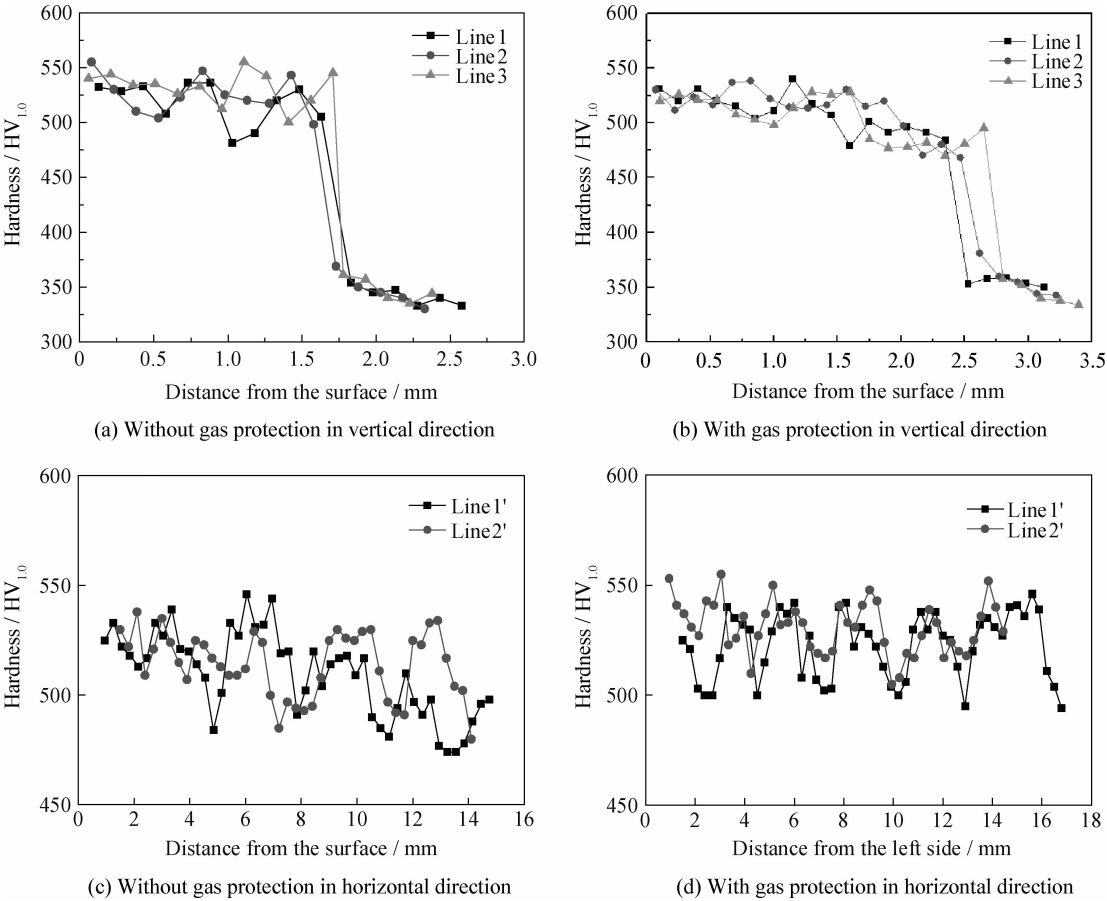


图 5 无尾吹和有尾吹熔覆层横截面垂直和平行熔覆方向的硬度分布

Fig. 5 Microhardness curves of laser cladding specimen in vertical and horizontal direction of hardness tests

高了 10%，多层多道之间的硬度波动减小，熔覆层硬度分布更为均匀。熔覆层组织与 β 相 Co 基本保持一致，晶粒生长的各向异性得到了提高。

参考文献

[1] 刘录录, 孙荣禄. 激光熔覆技术及工业应用研究进展 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(11): 58-61.

[2] 李强, 欧阳家虎. 材料表面激光熔覆研究进展 [J]. 材料科学与工艺, 1996, 4(4): 22-36.

[3] 戚克强. 热作模表面激光熔覆司太立合金粉的工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(16): 146-148.

[4] 王斌修, 李成彪. 激光熔覆技术研究现状及展望 [J]. 机床与液压, 2013, 41(7): 192-194.

[5] Wang G, Jia X, Li J, et al. Current state and development of the research on solid particle erosion and repair of turbo-machine blades [M]//Re-engineering Manufacturing for Sustainability, Springer Singapore; 2013: 633-638.

[6] Yu H J. Development status of laser clad cobalt-based alloy coatings [J]. Advanced Materials Research, 2013, 748: 192-195.

[7] 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表

面平整度的影响 [J]. 中国激光, 2010(1): 296-301.

[8] DOliveira A S, da Silva P S C P, Vilar R. Microstructural features of consecutive layers of stellite 6 deposited by laser cladding [J]. Surface & Coatings Technology, 2002, 153 (2): 203-209.

[9] Sun S, Durandet Y, Brandt M. Parametric investigation of pulsed Nd: YAG laser cladding of Stellite 6 on stainless steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 194(2): 225-231.

[10] Oberländer B C, Lugscheider E. Comparison of properties of coatings produced by laser cladding and conventional methods [J]. Materials Science and Technology, 1992, 8 (8): 657-665.

[11] D'Oliveira A, Paredes R S C, Santos R L C. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(2): 167-174.

作者地址: 上海市东川路 800 号 200240
上海交通大学材料学院
Tel: (021) 5474 8940-8022
E-mail: wangdongdong654@sjtu.edu.cn