

耐热钢表面激光熔覆陶瓷工艺

刘立君^{1,2}, 王晓陆¹, 沈秀强¹, 宋袁曾³

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080; 2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100;
3. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324)

摘 要: 耐热钢 H13 可用于制作飞机耐热 400 ~ 500℃ 工作温度的结构零件, 而在飞机有些特殊工作环境下要求其零件表面同时具有耐磨性, 因此针对耐热钢在特殊服役环境中磨损失效问题, 利用小功率 Nd: YAG 激光器在 H13 钢表面熔覆 SiC 陶瓷颗粒, 通过金相显微镜、扫描电镜及能谱分析仪研究不同工艺参数条件下熔覆层宏观形貌和微观组织结构。结果表明: 熔覆试样横截面出现明显的分层现象(熔覆层、熔合区、热影响区、基体), 熔覆层组织致密、无方向性, 无明显的气孔裂纹; 熔合区组织晶粒较为细小, 以树枝晶和等轴晶为主; 粗大的柱状晶组织沿 H13 钢基体熔合线向熔合区生长。SiC 陶瓷颗粒熔覆层、熔合区到基体 SiC 含量存在明显的梯度, 表明熔覆层与基体形成了良好的冶金结合, 分析了耐热钢表面激光熔覆陶瓷的耐磨性。此外, 由于 SiC 陶瓷颗粒硬而脆的特性以及与基体材料之间热膨胀系数的差异, 当扫描速度提高至 40 mm/min、60 mm/min 时熔覆层出现了贯穿性裂纹。上述研究成果为提高飞机耐热零件表面耐磨性提供一定理论支持。

关键词: 飞机耐热零件; 激光熔覆陶瓷; 耐磨性

DOI: 10.15938/j.jhust.2020.01.019

中图分类号: TG456.7 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2020)01-0127-07

Technology of Laser Cladding Ceramics on Heat Resistant Steel Surface

LIU Li-jun^{1,2}, WANG Xiao-lu¹, SHEN Xiu-qiang¹, SONG Yuan-zeng³

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;
3. Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd, Shanghai 201324, China)

Abstract: Heat resistance steel type of H13 is used for the aircraft structure parts whose working temperature is 400 ~ 500℃. Moreover, it is required to wear resistance for the parts in some special service environments. In order to solve the problem of wear failure in hot work dies during service, a low power laser type of Nd: YAG was used to cladding SiC ceramics on the surface of H13 steel. The macroscopic feature, microstructures and

收稿日期: 2018-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(51275468); 商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目(COMAC-SFGS-2017-36736); 哈尔滨市科技创新人才创新基金(2017RAXXJ012); 宁波市“科技创新 2025”重大专项(2018B10047 和 2019B10053)。

作者简介: 王晓陆(1994—), 男, 硕士, 助理工程师;

沈秀强(1991—), 男, 硕士, 助理工程师。

通信作者: 刘立君(1968—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: 888liulijun@163.com.

compositions were observed by the metalloscope, scanning electron microscope and energy depressive spectroscopy. Experimental results indicated that that the cross sections of the cladding sample were markedly divisional (Clad Zone, Fusion zone, Heat-affected zone, Substrate Zone). The microstructure of cladding layer is non-directional and compact, without obvious crack and porosity and with good performance. The homogeneous microstructure of bonding layer is dendrite and equiaxed grain with small size, and the massive columnar crystal grew from the bond line of H13 steel substrate to fusion zone. The wear resistance of laser cladding ceramics on heat resistance steel surface is analyzed. Besides, a through crack appeared after the scanning speed up to 40 mm/min、60 mm/min on the cladding layer as the hard and brittle characteristic of SiC ceramics and the difference of thermal expansion coefficient between SiC ceramics and substrate; The above research results provide some theoretical support for improving the surface wear resistance of aircraft heat-resistant parts.

Keywords: heat-resistance parts of aircraft; laser cladding ceramics; wear resistance

0 引言

H13 钢具有优良的耐磨性、抗热疲劳、热强度,除在压铸模、热冲裁模、热锻模、热挤压模中得到了广泛应用,也在飞机、火箭等耐热 400 ~ 500℃ 工作温度的结构零件上应用^[1-2],有些飞机结构零件除承受较大的冲击载荷、工作介质的冲蚀、高温氧化以及剧烈的冷热循环引起的热应力外,还承受机械磨损^[3-4],提高耐热钢表面耐磨性能,在特定应用环境具有迫切的需求^[5]。

激光熔覆工艺作为一种表面改性技术,其特点是将合金粉末等熔覆材料用不同的添加方式置于基体材料表面。利用高能密度的激光使基体材料与熔覆层材料一起熔化,熔覆材料与基体形成良好的冶金结合,提高了基体材料表面的硬度、耐磨性等特点^[6-8]。因此,可利用激光熔覆技术在 H13 钢基体材料表面熔覆涂层,在修复零件失效区域的同时提高基体材料的表面性能,延长零件的使用寿命,节约

生产成本^[9-10]。近年来激光仿生强化提高零件表面性能的研究引起了大量国内学者的重视^[11-13]。金属零件表面仿生强化技术是从仿生角度出发,在金属制品表面形成抗疲劳、耐磨损的仿生结构,改善零件的耐磨损、抗热疲劳及减粘性能,从而提高金属零件的使用寿命^[14-16]。

本文利用小功率激光器将 SiC 陶瓷颗粒熔覆在 H13 钢表面,研究不同工艺参数下试样熔覆层的宏观形貌及组织结构特点,并对行激光熔覆陶瓷仿生结构耐磨性能进行分析,为零件表面进一步仿生耐磨工艺实验提供前期理论研究基础。

1 实验方法及材料

1.1 实验材料

本文实验中选用的基体材料为 H13 钢,牌号 4Cr5MoSiV1。其热处理状态为 1 020 ~ 1 050℃ 淬火 540 ~ 650℃ 回火,H13 钢的化学成分如表 1 所示。

表 1 H13 耐热钢化学成分(质量分数/%)

Tab. 1 Chemical composition of the H13 steel (wt %)

元素	C	Mn	Si	V	Cr	Mo
含量	0.32 ~ 0.45	0.20 ~ 0.50	0.80 ~ 1.20	0.80 ~ 1.20	4.75 ~ 5.50	1.10 ~ 1.75

从表 1 能够看出 H13 钢的碳含量属于中碳钢的范围,实验中 H13 钢的硬度为 43HRC 左右。Cr 元素的含量较高,它对提高基体的韧度、耐磨损性、淬透性和高温强度具有有利的影响,同时少量的铬溶入基体中产生固溶强化的作用还能显著改善钢的

耐蚀性能^[17]。此外钢中的 Si 和 Cr 元素能提高氧化膜的致密性从而提高钢的抗氧化性,Mn、Mo 等元素的加入起到固溶强化的作用并且提高了钢的淬透性。V 元素的存在细化了钢的晶粒和显微组织,在回火处理时增加了钢的回火稳定性及增强了二次硬

化效应。

实验中试板尺寸切割成 $80\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 如图 1 所示。表面用砂轮打磨干净并用丙酮进行清洗, 除去油渍、锈等杂物。

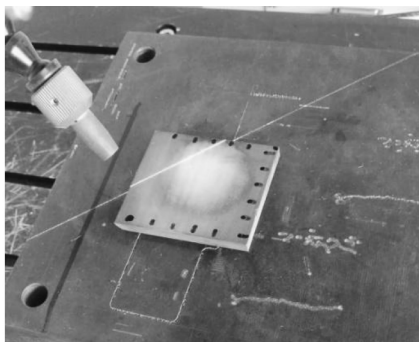
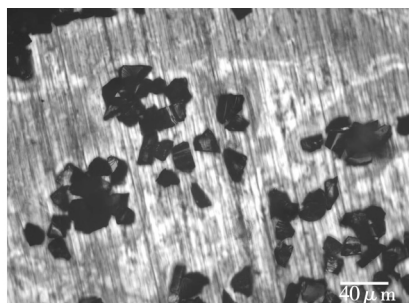


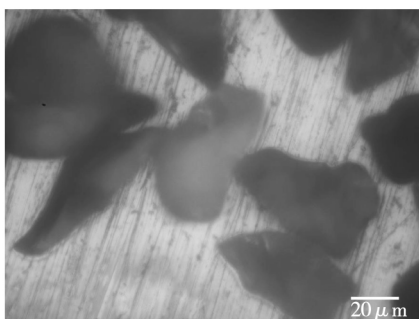
图 1 待加工试件

Fig. 1 Specimen to be processed

激光熔覆层的材料为 SiC 陶瓷颗粒, 六方晶体结构, 具有耐腐蚀、耐高温、强度大、导热性能良好、抗冲击等特性, 缺点是断裂韧性较低, 脆性较大在基体材料表面进行熔覆时极易发生裂纹^[1]。实验中所用的 SiC 陶瓷颗粒为 $48\text{ }\mu\text{m}$ (300 目), 宏观照片如图 2 所示。



(a) 100倍



(b) 400倍

图 2 SiC 陶瓷颗粒的形貌

Fig. 2 Morphology of SiC ceramic particles

1.2 实验方法

本文激光熔覆实验中选用的激光器是 Nd: YAG

激光器, 型号为 WF300, 最大功率为 300 W, 如图 3 所示。激光熔覆层制备过程中影响熔覆层性能的工艺参数包括电流大小、离焦量、频率、扫描速度等^[4]。电流大小影响热输入量进而影响焊缝的熔深以及陶瓷熔覆层的组织性能; 离焦量有正负之分是影响激光焊接质量的重要因素, 激光焦点位置 (光斑中心) 能量密度高度集中, 在焊接过程中容易蒸发成孔^[2]。因此, 必须选择合适的离焦量; 当熔覆层陶瓷粉末铺粉厚度确定时, 扫描速度偏大, 则熔覆层熔化不够充分与基体材料不能形成良好的结合, 导致熔覆层性能较差。扫描速度偏小, 此时熔覆层能够充分熔化, 但易出现熔深过大甚至焊穿^[2]。本实验在前期研究的基础上, 选择的激光熔覆工艺参数为电流 120 ~ 160 A, 脉宽 5 ms, 频率 5 Hz, 离焦量 4 mm, 扫描速度为 20 mm/min、40 mm/min、60 mm/min。

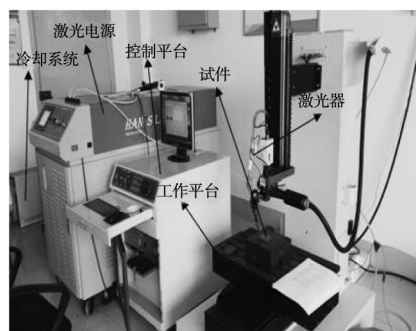


图 3 Nd: YAG 激光器

Fig. 3 Nd: YAG Laser

根据设定的激光焊接参数, 激光熔覆选用预置粉末方法。将 H13 钢试板表面打磨、清洗干净后, 将 SiC 陶瓷颗粒均匀的铺在焊接位置, 铺粉层厚度 0.4 mm, 进行焊接, 如图 4、图 5 所示。



图 4 试件加工局部图

Fig. 4 Local image of tests processing

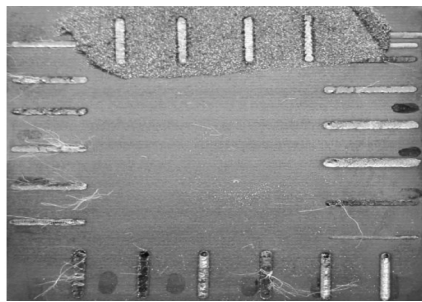


图5 H13 钢表面激光熔覆陶瓷试件

Fig. 5 Tests of laser cladding ceramics on the surface of H13 steel

试板焊接完成后,利用线切割机沿试样的横截面进行切割。然后利用试样镶嵌机镶嵌试样,并在金相砂纸上按照 $38\text{ }\mu\text{m}$ (400 目)、 $23\text{ }\mu\text{m}$ (600 目)、 $18\text{ }\mu\text{m}$ (800 目)、 $11\text{ }\mu\text{m}$ (1200 目) 的顺序研磨后进行抛光。腐蚀剂选用 10% 的硝酸酒精 + 10% 的 Cr_2O_3 电解腐蚀。金相试样腐蚀后进行组织观察,并对具有典型特征的试样利用 SEM 进一步研究。沿整个试样横截面从近表面熔覆层到热影响区,利用 EDS 进行能谱分析,观察合金元素的含量差异得到熔覆层的分布深度。

2 熔覆层的组织观察及性能分析

2.1 熔覆层形貌分析

激光熔覆过程中,激光束首先辐照到 SiC 陶瓷颗粒涂层,涂层吸收激光能量发生熔化,同时部分激光能量透过粉末层辐照到基体表面,达到熔点后基体熔化形成熔池。此时, SiC 颗粒与熔池中液态的 Fe 发生冶金反应,形成结合区域,而靠近母材方向熔化的基体则不含有 SiC 颗粒。激光束以一定的焊接速度扫过整个熔覆区域后,熔池冷却,形成熔覆层。基体近表面熔覆层的宏观形貌如图 6 所示。

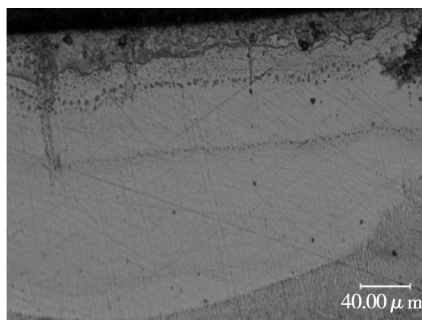


图6 表面熔覆层形貌

Fig. 6 Morphology of cladding layer on the surface

从图 6 能够看到,在熔覆试样的近表面处出现了一层较薄的熔化层。分析认为,此区域几乎全部

是由熔化的 SiC 陶瓷颗粒形成的,它与基体的自熔区域分界明显。由 SiC 颗粒自身熔化形成的熔化层,决定了熔覆层所具有的耐磨、耐高温等性能。熔覆粉末层在吸收激光能量过程中,并不能保证粉末层中所有的 SiC 陶瓷颗粒都发生完全熔化。当陶瓷颗粒所吸收的能量不足时产生两种现象。一种是部分 SiC 陶瓷颗粒吸收了激光束能量,颗粒的四周轮廓发生熔化变得比较光滑,但陶瓷颗粒的中间位置未发生熔化。另一种现象是位于熔覆层靠近底部的陶瓷颗粒,由于上层颗粒的阻挡或者激光的扫描速度过快等原因,使得陶瓷颗粒吸收的能量较少,仍保持着原始形态。此时陶瓷颗粒就会“镶嵌”在熔化的基体或者熔覆层中,如图 7 和图 8 所示。

这种“镶嵌”状态的陶瓷颗粒在提高基体材料的耐磨性方面具有显著地作用。实际上这就是另一种零件修复工艺—激光熔注工艺所要实现的。首先基体表面 SiC 陶瓷熔覆层存在硬质相提高了 H13 钢基体承受应力的能力,增加了基体的塑性变形抗力,阻碍了裂纹的萌生扩展,本身就具有较高的耐磨性能。在磨损实验中当表面的熔覆层脱落后,“镶嵌”状态的陶瓷颗粒就会裸露出来,此时陶瓷颗粒是高于基体表面的。随着磨损进行陶瓷颗粒首先承受载荷,其次再是基体,延缓了基体承受磨损的时间,减少了基体的磨损,因此增加了基体的耐磨性能。

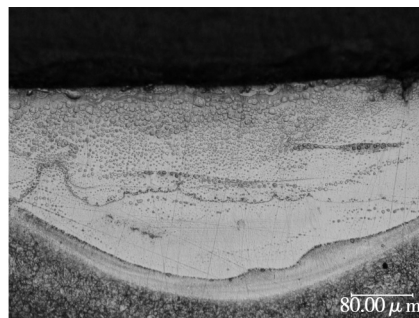


图7 未熔化的陶瓷颗粒形貌

Fig. 7 Morphology of non-molten ceramic particles

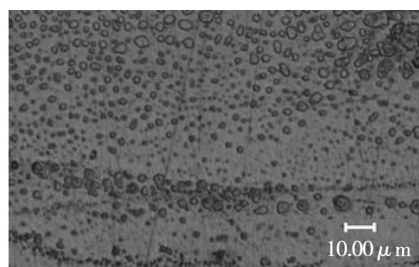


图8 激光熔覆陶瓷颗粒增强复合材料层

Fig. 8 Reinforced composite layers of laser cladding ceramics

当激光熔覆扫描速度增加到 40 mm/min、60 mm/min 时在熔覆试样的整个横截面上出现了贯穿性裂纹,如图 9 所示,在熔覆试样的整个横截面上除了贯穿性主裂纹之外还出现了二次裂纹。分析认为,在激光熔覆过程中随着扫描速度的增加,熔覆层及基体的热输入量就会减少,熔池冷却速度也较快,使得熔覆层成分分布不均匀,产生裂纹。另一方面,熔覆层成分为 SiC 陶瓷颗粒,本身韧性较差属于硬而脆相。热输入量不足,位于结合区中的熔覆层与基体材料之间不能发生充分的冶金反应,导致不能形成良好的冶金结合,在残余热应力的作用下熔覆层产生的裂纹向下扩展,直到基体的交界处。此外,熔覆层材料 SiC 陶瓷颗粒与基体材料 H13 钢的热膨胀系数不同,导致熔覆试样横截面上各区的热膨胀率与收缩率存在差异,熔池凝固后极易出现开裂。

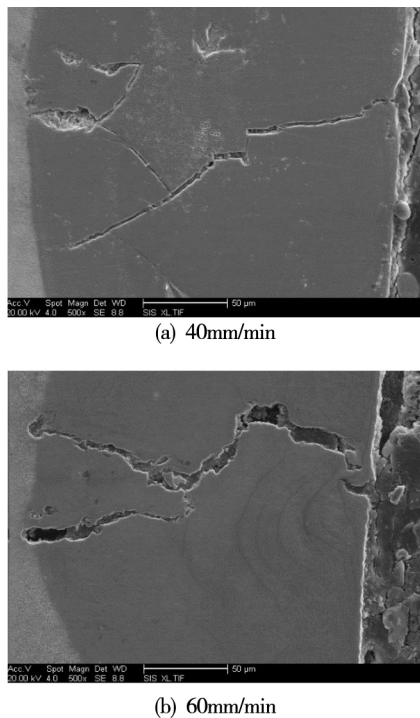


图 9 激光熔覆试样横截面上出现的裂纹
Fig. 9 Cracks on the cross section of samples by laser cladding

2.2 熔覆层的组织分析

试样腐蚀后在整个横截面上能够看到明显的分区,如图 10 所示。从熔覆层表面到基体依次为 SiC 陶瓷颗粒熔覆区 (clad zone, CZ), 熔合区 (fusion zone, FZ), 热影响区域 (heat-affected zone, HAZ) 及基体材料区 (substrate zone, SZ)。各个分层区高倍下的显微结构如图 11 所示。

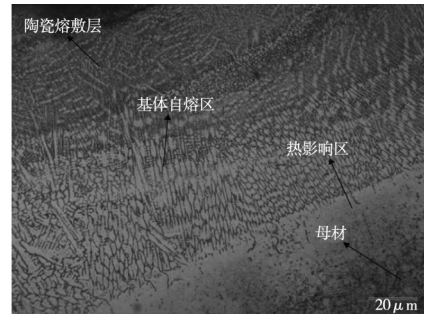


图 10 激光熔覆层横截面的形貌
Fig. 10 Morphology of on the cross of samples by laser cladding

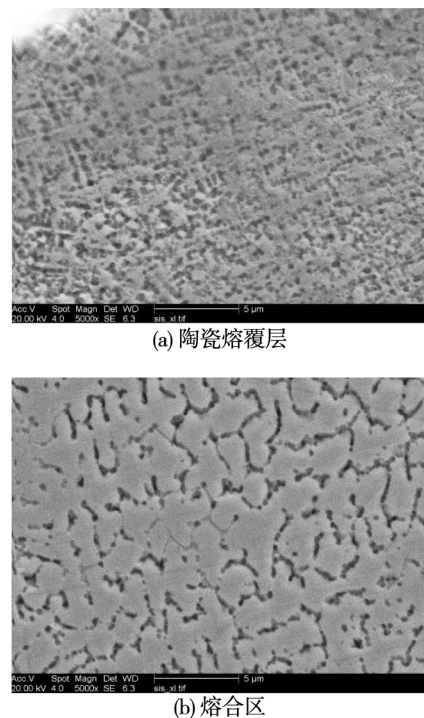
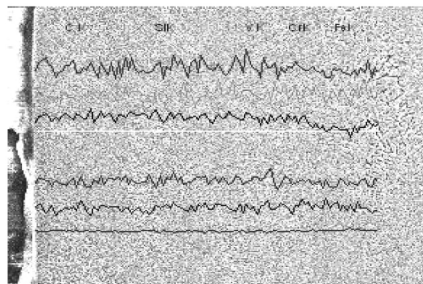
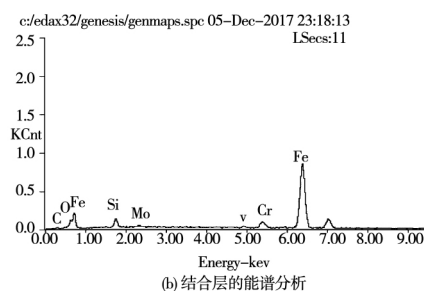
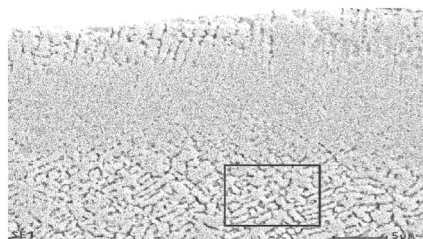
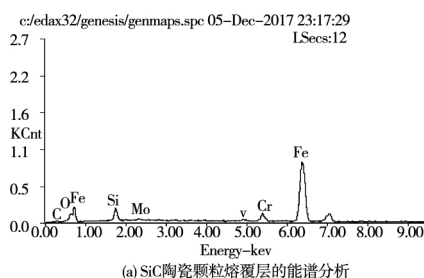
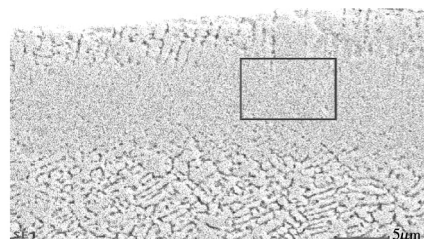


图 11 SiC 陶瓷熔覆层的横截面显微组织
Fig. 11 Cracks on the cross section of samples by laser cladding

从图 11 (a) 可以看出,合适的工艺参数条件下 SiC 陶瓷熔覆区的组织无方向性、比较致密,主要是由熔化的 SiC 陶瓷颗粒形成的硬质相组成,没有出现明显的裂纹及气孔等缺陷,组织性能良好。图 11 (b) 所示为熔合区位于陶瓷熔覆层与热影响区之间,晶体主要以树枝状晶和等轴晶为主含有少量柱状晶。在激光熔覆的冷却过程中,基体的温度较低,因此熔覆层的散热方向是朝向基体,此时位于基体与熔覆层交界处的熔合区温度梯度最大,最先发生晶粒形核。依附于熔合线形成的晶核沿散热方向相反的方向生长,即垂直于熔合线向焊缝中心生长。

柱状晶持续生长直到相互接触时才停止。随着晶粒的长大液/固界限向前推移,温度梯度也随之减小,由于激光熔覆冷却速度较快,过冷度也较大,此时晶体的形核率较高,晶体来不及长大就发生凝固,因此熔合区的晶粒比较细小。

熔覆层界面的能谱分析如图12所示。



(c) 熔覆层到结合层的能谱分析

图12 熔覆层的能谱分析结果

Fig. 12 Results of EDS of laser cladding

图12(a) SiK 的质量分数为 5.45%, 12(b) SiK 的质量分数为 4.26%, 可以发现结合层的 Si 含量要明显少于熔覆层, 并且远大于基体材料中的含量 (0.8% ~ 1.20%)。图12(c) 更加明显的反映了这一变化趋势。分析认为, 造成这一现象的原因是激光熔覆过程中液态的熔覆层材料与基体在冷却凝固过程中发生了原子扩散, 造成了熔覆层的稀释, 导致 Si 元素含量减少。Si 元素含量的这种变化趋势说明熔覆层与基体材料之间产生了良好的冶金结合, 这是影响熔覆层质量的重要因素。冶金结合质量较差, 则熔覆层易出现裂纹等缺陷, 不能满足基体材料修复性能的要求。

3 结 论

1) 当激光熔覆扫描速度提高至 40 mm/min、60 mm/min 时, 在熔覆层的整个横截面上出现了贯穿性裂纹, 降低了熔覆层的性能。一方面是因为热输入减小, 熔覆层成分不能均匀分布, 与基体材料之间结合性较差; 另一方面 SiC 陶瓷颗粒硬而脆, 韧性较差与基体 (H13 钢) 的热膨胀系数和收缩率不同, 在熔池凝固时极易产生裂纹。

2) 合适的工艺参数条件熔覆试样横截面上出现明显的分区: SiC 陶瓷颗粒熔覆区、结合区、热影响区域及基体材料区。熔覆区组织致密无明显气孔裂纹, 性能良好; 结合区晶体以树枝状晶和等轴晶为主, 晶粒比较细小, 熔合线处晶体主要是柱状晶。

3) 熔覆层、结合区、基体 SiK 的含量变化为熔覆层大于结合区、结合区大于基体, 这种变化趋势说明熔覆层结合区、基体具有良好的冶金结合。

参 考 文 献:

- [1] 赵昌盛, 居建村. 热作模具钢 H13 失效分析 [J]. 模具制造, 2002(9): 50.
- ZHAO Changsheng, JU Jiancun. Failure Analysis of Hot Work Die Steel H13 [J]. Mold Manufacturing, 2002, 9(14): 50.
- [2] KCHAOU M, ELLEUCH R, DESPLANQUES Y, et al. Failure Mechanisms of H13 Die on Relation to the Forging Process—A Case Study of Brass Gas Valves [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(2): 403.
- [3] GU J, LI J, CHEN Y. Microstructure and Strengthening-Toughening Mechanism of Nitrogen-Alloyed 4Cr5Mo2V Hot-Working Die Steel [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2017, 7(8): 310.
- [4] 李映颖, 谭光宇, 陈友龙. 基于飞行数据的航空发动机健康状况分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(5): 43.

- LI Yingying, TAN Guangyu, CHEN Youlong. Health Analysis of Aeroengine Based on Flight Data [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16 (5): 43.
- [5] KIM Y S, JOUN M S. Reason of Die Fracture in Hot Forging of Aluminum Fixed Scroll and Its Practical Measures [J]. Transactions of Materials Processing, 2017, 26.
- [6] 李福泉, 高振增, 李俐群, 等. TC4 表面丝粉同步激光熔覆制备复合材料层的微观组织和性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(1): 177.
- LI Fuquan, GAO Zhenzeng, LI Liqun, et al. Microstructure and Properties of Composite Layer Prepared by Simultaneous Laser Cladding of TC4 Surface Powder [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46 (1): 177.
- [7] 张坚, 吴文妮, 赵龙志. 激光熔覆研究现状及发展趋势 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(6): 131.
- ZHANG Jian, WU Wenni, ZHAO Longzhi. Current Status and Development Trend of Laser Cladding Research [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (6): 131.
- [8] 杨晓倩, 李亚江, 马群双, 等. 激光熔覆工艺研究现状及发展 [J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2015(1): 30.
- YANG Xiaoqian, LI Yajiang, MA Qunshuang, et al. Research Status and Development of Laser Cladding Process [J]. Abstracts of Machinery Manufacturing (Welding Volume), 2015 (1): 30.
- [9] 叶宏, 雷临苹, 喻文新, 等. H13 钢激光熔覆 Co 基涂层组织及热疲劳性能 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 136.
- YE Hong, LEI Linping, YU Wenxin, et al. Microstructure and Thermal Fatigue Properties of Laser Cladding Co-based Coating on H13 Steel [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29 (2): 136.
- [10] HEMMATI I, OCELÍK V, HOSSON J T M D. Effects of the Alloy Composition on Phase Constitution and Properties of Laser Deposited Ni-Cr-B-Si Coatings [J]. Physics Procedia, 2013, 41 (1): 302.
- [11] 于义涛. H13 钢激光仿生强化热疲劳及磨损性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [12] ZHAO K P, LIU L J, ZHANG X C, et al. Local Laser Bionic Blocking Experimental Study of Hot Work Mould Surface Cracks [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(201/202): 4.
- [13] CUI W, BAI G, HONG Y E, et al. H13 Laser Bionic Coupling Processing and Wear-resistance Performance Research [J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2018.
- [14] 李福泉, 王树立, 陈彦宾, 等. Ti6Al4V 表面激光熔覆生物陶瓷复合涂层研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 122.
- LI Fuquan, WANG Shuli, CHEN Yanbin, et al. Study on Ti6Al4V Surface Laser Cladding Bioceramic Composite Coating [J]. China Laser, 2015, 42 (6): 122.
- [15] HEMMATI I, OCELÍK V, HOSSON J T M D. Effects of the Alloy Composition on Phase Constitution and Properties of Laser Deposited Ni-Cr-B-Si Coatings [J]. Physics Procedia, 2013, 41 (1): 302.
- [16] XIE S, LI R, YUAN T, et al. Laser cladding assisted by friction stir processing for preparation of deformed crack-free Ni-Cr-Fe coating with nanostructure [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 99(1): 374.
- [17] 岳彩旭, 马晶, 刘飞, 等. 模具钢 Cr12MoV 精密硬态切削过程刀具磨损 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014(5): 56.
- YUE Caixu, MA Jing, LIU Fei, et al. Tool Wear During Precision Hard Cutting of Die Steel Cr12MoV [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19 (5): 56.
- [18] 张艺, 马志凯, 孙铂, 等. 激光熔覆材料的研究现状及发展 [J]. 热加工工艺, 2015(14): 40.
- ZHANG Yi, MA Zhikai, SUN Platinum, et al. Research Status and Development of Laser Cladding Materials [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (14): 40.
- [19] 刘西洋, 孙凤莲, 王旭友, 等. NdYAG 激光 + CMT 电弧复合热源平焊工艺参数对焊缝成形的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15(6): 107.
- LIU Xiyang, SUN Fenglian, WANG Xuyou, et al. Effect of Welding Parameters of Nd YAG Laser + CMT arc Composite Heat Source on Welding Seam Formation [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2010, 15 (6): 107.
- [20] 刘立君, 姜亚青, 邱铁男, 等. 模具表面激光强化离焦量波动声信号特征 HHT 分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 51.
- LIU Lijun, JIANG Yabin, QI Tienan, et al. HHT Analysis of Acoustic Signal Characteristics of Laser-enhanced Defocus Amplitude Fluctuations on the Mold Surface [J]. Journal of Welding Technology, 2013, 34 (9): 51.
- [21] 刘敬福, 李赫亮, 于小月, 等. 扫描速度对 45 钢表面 Ni 基 TiC 激光熔覆层性能的影响 [J]. 材料保护, 2014, 47(6): 69.
- LIU Jingfu, LI Heliang, YU Xiaoyue, et al. Effect of Scanning Speed on the Properties of Ni-based TiC Laser Cladding on the Surface of 45 Steel [J]. Materials Protection, 2014, 47 (6): 69.

(编辑: 温泽宇)