DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.005

H13 钢表面激光熔覆 WC 颗粒增强复合涂层的实验研究

石晓蕾[1],李海洋[1],邱焕霞[1],宋建丽[1,2],邓琦林[3],唐　彬[4]
(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100192;2. 山东省特种焊接技术重点实验室,山东 威海 264209;3.上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240;4. 上海电力股份有限公司吴泾热电厂,上海 200241)

摘　要:在 H13 钢表面制备了 H13+H13/WC 颗粒增强复合涂层,对涂层组织演化机理、界面行为及显微硬度分布、摩擦磨损性能等进行了分析与表征。结果表明,熔覆层与基体形成良好的冶金结合,复合熔覆层成形质量良好;相同工艺参数下,H13/20%WC 熔覆层的硬度最高,平均显微硬度为 639 HV,具有较好的耐磨性。H13 钢基体的磨损机制主要为磨粒磨损、氧化磨损和少量的剥层磨损,各熔覆层磨损形式主要是磨粒磨损和氧化磨损

关键词:H13 钢;激光熔覆;WC 复合涂层;组织性能
中图分类号:TG174　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1253-06

Experimental Study of Laser Cladding WC Particle-reinforced Composite Coatings on H13 Steel Surface

SHI Xiaolei[1], LI Haiyang[1], QIU Huanxia[1], SONG Jianli[1,2], DENG Qilin[3], TANG Bin[4]
(1. School of Instrument Science and Opto Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Shandong Provincial Key Lab. of Special Welding Technology, Weihai 264209, China; 3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 4.Shanghai Electric Power Co., Ltd., Wujing Thermal Power Plant, Shanghai 200241, China)

Abstract: Particle-reinforced composite coatings of H13+H13/WC were prepared on the surface of H13 steel substrate. The microstructure evolution mechanism, interface behavior, microhardness distribution and wear performance of the coatings were analyzed and characterized. The results show that the cladding layers have been metallurgical bonded with the matrix, and the forming quality of the composite coatings is perfect. Under the same process parameters, the microhardness of the H13/20% WC coating is the highest, with an average value of 639 HV, with good wear resistance. The wear mechanism of H13 steel matrix is mainly abrasive wear, oxidation wear and a little stripping wear, and the wear forms of each cladding layer are mainly abrasive wear and oxidation wear.

Key words: H13 steel; laser cladding; WC composite coating; microstructure and properties

H13(4Cr5MoSiV1)钢具有较高的强度、硬度、耐磨性和韧性,是目前使用最广泛的热作模具钢之一。热作模具工作环境恶劣,极易出现磨损、热疲劳裂纹和塑性变形等缺陷,造成制件不合格或模具失效[1]。H13 钢热作模具再制造技术主要有电弧堆焊、电子束焊接、激光加工等多种[2-4]。和其他技术相比,激光熔覆技术具有成形组织细小、熔覆层与基体结合强度高、对基体热影响小,成形零件综合力学性能好等特点,在金属零件再制造领域具有广阔的应用前景。

目前,在热作模具激光熔覆再制造领域,国内外学者已进行了较多研究和探索,并对其可行性进行了论证。Prakash Kattire 等[5]在 H13 钢表面激光熔覆 CPM 9V 粉末,探讨了激光工艺参数对熔覆层形貌、组织、硬度的影响,分析了熔覆层的组织性能与工艺参数之间的关系,研究了熔覆层表面残余应力,获得的熔覆层硬度比基体提高 4 倍。叶宏等[6]在 H13 钢表面制备了 Co 基和 Ni 基合金涂层,分析了各涂层的组织、成分和物相,在一定程度上解决了 H13 钢工作时易产生热疲劳失效等问题。Tran 等[7]在 H13 钢表面熔覆 Cu/TiB2 复合涂层,制备了耐磨性较好

收稿日期:2019-09-12
基金项目:国家自然科学基金项目(51775050);山东省特种焊接技术重点实验室开放课题基金项目(2017)
作者简介:石晓蕾(1994-),女,山东临沂人,硕士生.研究方向:激光加工与材料加工技术.电话:18810130217,E-mail:sxl0319rachel@163.com
通讯作者:宋建丽(1969-),女,山西永济人,博士,教授.研究方向:激光加工与材料加工技术.电话:15910969186,E-mail:songjianli@bistu.edu.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的 Cu/TiB2 多道激光熔覆层，涂层的表面显微硬度达到 650 HV0.5，涂层与基体之间形成高强度的冶金结合。

当前大部分研究工作聚焦于不同工艺参数下单一熔覆层的表面形貌、显微组织及硬度等性能[8-12]，而对熔覆层与基体材料的匹配设计及性能与组织间的协调作用机制等方面的研究则较少涉及。本论文在 H13 钢表面进行 H13+H13/ 不同含量 WC 颗粒增强复合涂层的激光熔覆实验，研究不同 WC 含量对成形组织形态、界面演化及硬度分布的影响规律，并对 H13+H13/20%WC 复合涂层的成分分布、物相组成及摩擦磨损性能进行了测试分析，旨在阐明材料界面行为和组织特性，探索材料、组织和各性能之间的相互作用与协调机制，为热作模具激光熔覆再制造材料–组织–性能一体化调控提供理论依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验采用的 H13 钢基体材料经厂家热处理，化学成分如表 1，试件尺寸为 160 mm×100 mm×12 mm。熔覆材料为球形铁基自熔性合金粉末 H13 及不规则形状微细 WC 粉末颗粒，粉末材料形貌如图 1。实验前用 400-1200 号砂纸依次打磨基体表面，去除氧化层，然后用工业乙醇和丙酮清洗干净，烘干后备用。

1.2 实验方法

首先，采用 2 kW 半导体激光器及三轴数控工作台在 H13 钢表面制备与基体亲和力好的 H13 钢基底层，然后分别在其上制备 WC 含量为 10%、15%、20%、40%的 H13/WC 颗粒增强复合涂层。经优化，选用的工艺参数为：送粉量 3.5 g/min、搭接率 25%、激光电流 60 A 及扫描速度 200 mm/min。

激光熔覆完成后，采用线切割制备分析试样，采用南京迈塔光电 CM 200 正置光学金相显微镜 OM、日本 JSM-7001F 电子场发射扫描电子显微镜 SEM 进行显微组织观察和 EDS 能谱分析；采用 D/max-2550-X 射线衍射仪进行 XRD 物相分析，采用上海研润 HMAS-DSMZ 自动转塔硬度仪测试熔覆层显微硬度分布、济南恒旭 SGW-10A 摩擦磨损试验机进行熔覆层表面摩擦磨损实验。

2 实验结果与分析

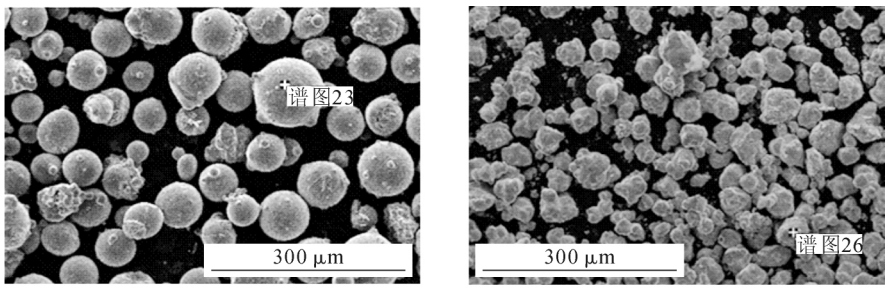
2.1 H13+H13/WC 颗粒增强复合熔覆层显微组织

激光熔覆过程中发现：所有材料熔覆层表面均十分平整，搭接完好，添加 WC 后熔覆层表面更为光滑平整，当 WC 含量超过 20%时，熔覆层出现开裂现象，故后续不再研究。

图 2 (a)~(c)所示分别为基底层为 H13 钢粉末材料，顶层为 H13/10%、15%及 20%WC 复合粉末的熔覆层横截面不同部位金相组织照片。由图中可以看出，两层材料之间具有明显的分界线，熔覆层与基体形成良好的冶金结合，结合面为光亮的平面晶带，如图 2(a)；结合面上部主要为不规则形状的树枝晶及胞晶组织（蓝色虚线下方），且随着 WC 含量的增加，熔覆层胞晶组织所占比例增加。受温度梯度和冷却速率影响，底部和中部组织基本沿着温度梯度最大的方向，即热流方向呈外延生长趋势；熔覆层之间也形成较好的冶金结合，如图 2(b)。H13/WC 复合熔覆层顶部受到空气对流的影响，冷却速度加快，且热流和温度梯度方向改变，所以树枝晶出现了转向，基本平行于扫描方向且顶层组织更加细小。随着 WC 含量的增加，一些细小的 WC 颗粒成为异质核心促进凝固过程非均质形核，细化了晶粒，对熔覆层

表 1 H13钢基体材料/粉末化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of the H13 steel matrix and the powder

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



(a)H13粉末　　(b)WC粉末

图 1 H13 及 WC 粉末 SEM 形貌
Fig.1 SEM morphology of H13 and WC powder

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

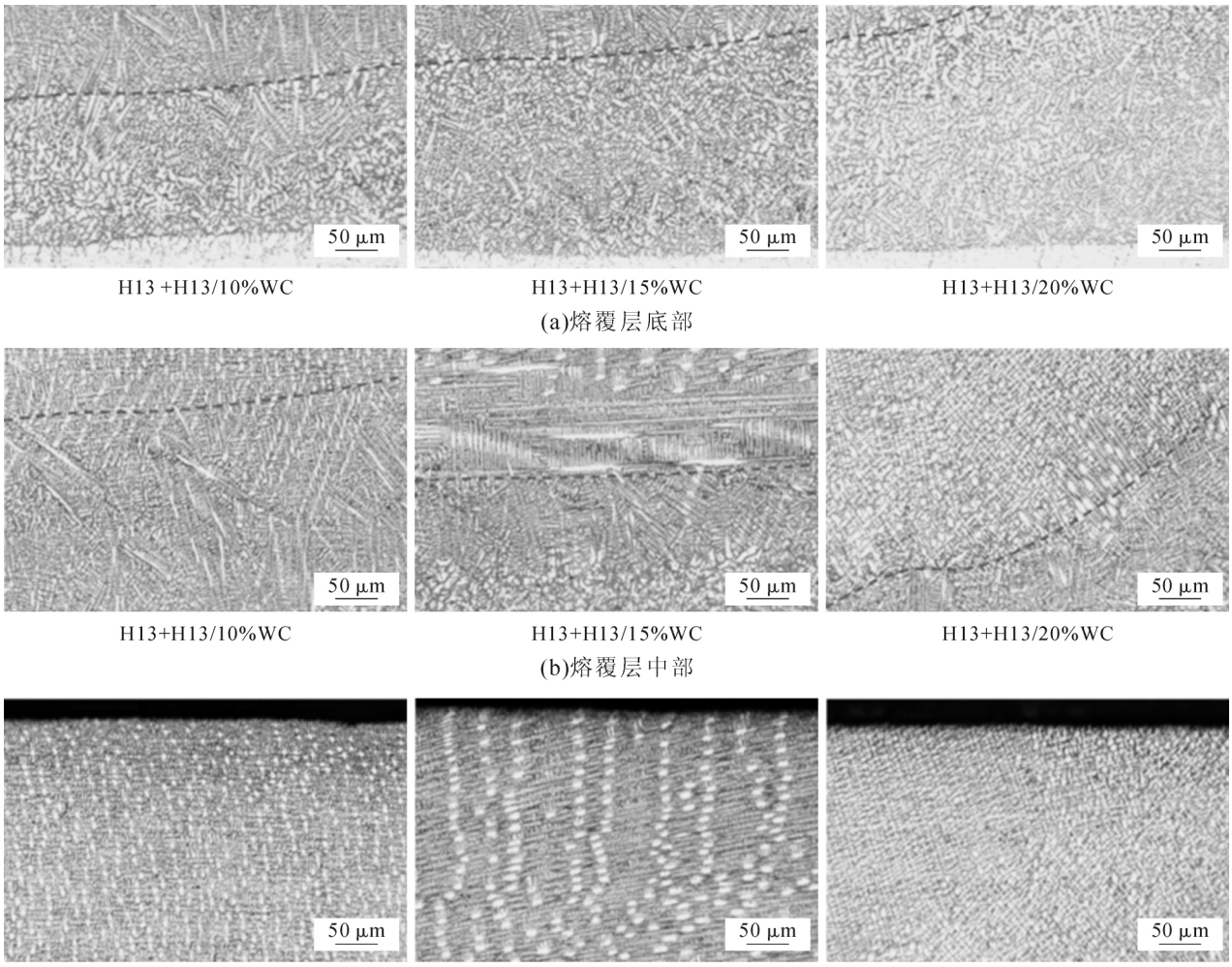


图 2　H13+ H13/ 不同含量 WC 复合熔覆层金相组织

Fig.2　Microstructure of H13+ H13/ composite cladding layers with different WC contents

性能起到增强作用；一部分 C 和 Fe、Cr 元素生成细小的碳化物，起到固溶强化的效果。H13+H13/20% WC 熔覆层顶部枝晶臂生长明显得到抑制，与其他 WC 含量熔覆层相比，等轴晶及胞晶组织比例提高，有利于改善熔覆层表面的组织性能，如图 2(c)。

图 3 为 H13+H13/20%WC 激光熔覆复合涂层组织全貌，由图 3 可知，熔覆层与熔覆层之间、熔覆层与基体之间的界面处都呈良好的冶金结合，且整个熔覆层无明显的缺陷，组织细小致密、生长良好。

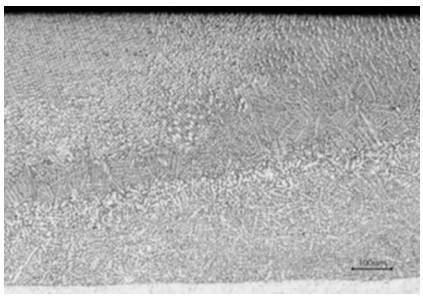


图 3　H13+H13/20%WC 颗粒增强复合涂层显微组织全貌

Fig.3　Microstructure of H13+H13/20%WC particle-reinforced composite coating

2.2　H13+H13/WC 颗粒增强复合涂层显微硬度分布

将熔覆层和 H13 钢基体的界面处定义为 0 点，沿垂直于界面的正负方向，每隔 0.1 mm 测量一次硬度值，不同 WC 含量 H13 钢复合涂层的显微硬度分布如图 4，不同 WC 含量 H13 复合涂层平均显微硬度如图 5 所示。从图中看出：含 H13/WC 的复合熔

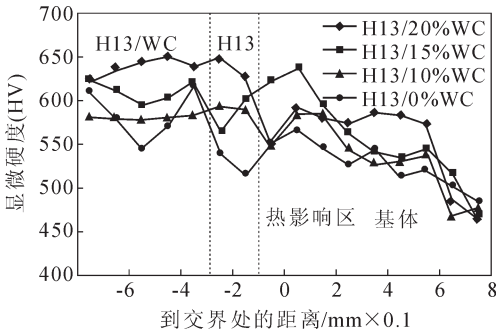


图 4　H13/ 不同 WC 含量熔覆层显微硬度分布

Fig.4　Microhardness distribution of cladding layer with H13/ different WC contents

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

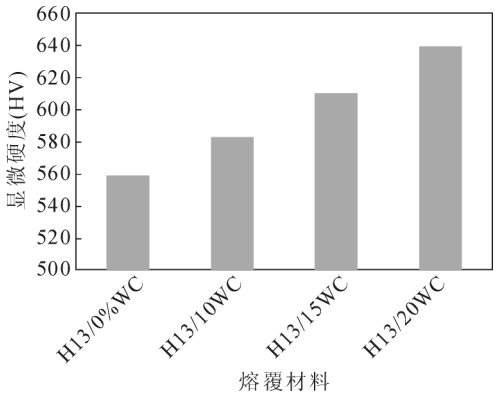


图 5 不同 WC 含量 H13 复合涂层平均显微硬度
Fig.5 Average microhardness of H13 composite coating with different WC contents

覆层显微硬度明显高于基体，随着 WC 含量的增加，平均显微硬度增高，H13 钢激光熔覆层显微硬度也略高于基体。由于 H13 材料熔覆层厚度不大，在多层熔覆时，在重熔和二次加热作用下，部分元素发生扩散或烧损，WC 颗粒进入底层 H13 熔覆层中，W 和 C 元素与其他元素结合生成增强相，使得这一层硬度提高，两层熔覆层的显微硬度较接近；但由于顶层的二次加热及重熔，使上一层相当于经历了一个退火过程，熔覆层组织明显比复合涂层粗大，这也是使其硬度低于复合涂层的原因之一。对比分析可知，当 WC 含量为 20% 时，硬度最高，可以达到 620~650 HV。稀释区和热影响区硬度高是因为这部分组织在激光快速加热和冷却作用下，碳化物和马氏体大大增多，使此处呈现硬度峰值。

添加 WC 可以使熔覆层组织细化、枝晶间距离减小。当 WC 含量超过 20%后，虽然熔覆层硬度有所提高，但由于脆性增加，使其极易开裂。因此，复合涂层 WC 增强相含量以不超过 20%为宜。

2.3 H13+H13/20%WC 熔覆层成分及物相分析

图 6 为 H13+H13/20%WC 复合涂层元素线扫描 EDS 图谱。从图中看出：Fe 元素含量比基体界面和热影响区略有减少，而 Cr 元素含量略有增加，说明熔覆层和基体的界面处元素发生了一定程度的扩散，尤其是 Cr 元素。整个涂层内合金元素成分分布较为均匀。

图 7 为熔覆层组织高倍 SEM 及成分 EDS 分析。从图中可知，复合涂层的组织主要由树枝晶及晶

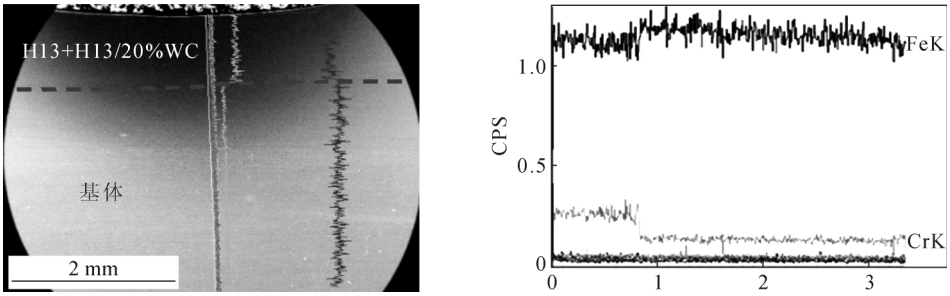


图 6 垂直于界面的 H13+H13/20%WC 熔覆层 EDS 成分线扫描
Fig.6 EDS results of H13+H13/20%WC cladding layer perpendicular to the interface

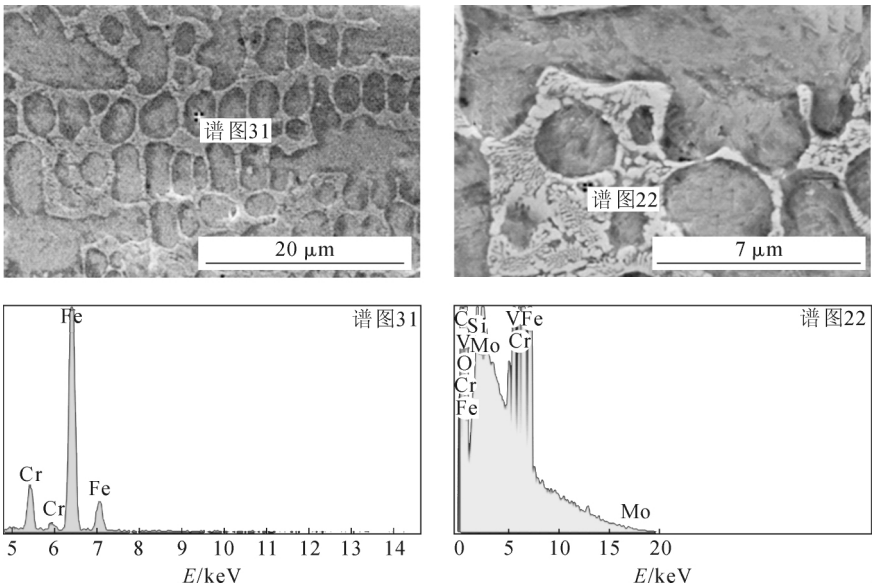


图 7 H13/20%WC 复合涂层 SEM 显微组织与 EDS 元素分析
Fig.7 SEM images and EDS analysis of H13/20% WC composite coating

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间富 Fe、Cr 的共晶及碳化物组成，组织较为致密，枝晶间距小于 10 μm。

对 H13+H13/20% WC 熔覆层的顶部，即 H13/20%WC 涂层进行 XRD 物相分析，结果如图 8 所示。可见：H13/20%WC 涂层主要由 α-Fe、Fe-Cr 化合物、Cr_7C_3、$Cr_{23}C_7$ 碳化物，以及 WC，W_2C 等相组成，因 WC，W_2C 硬质相的存在，使得整个熔覆层组织致密，硬度得以提高。

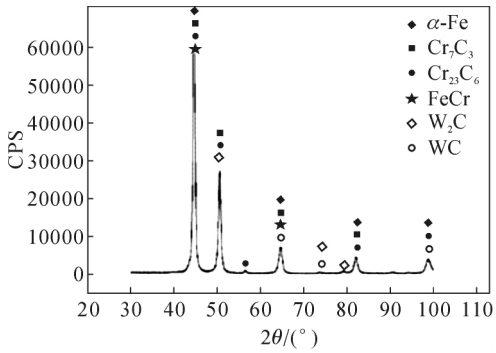
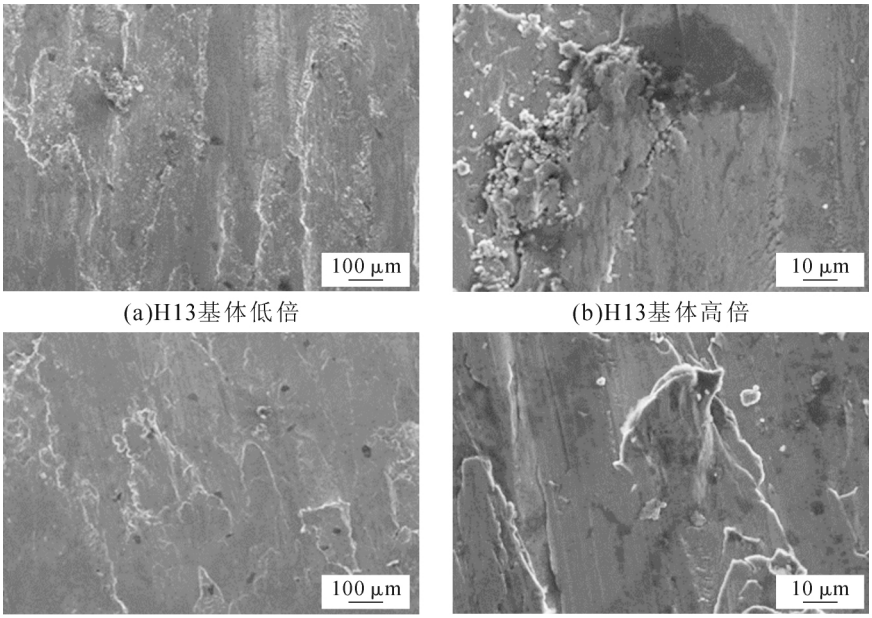


图 8 H13/20%WC 涂层 XRD 物相分析

Fig.8 XRD pattern of H13/20% WC coating

2.4 激光熔覆颗粒增强复合涂层摩擦磨损性能

采用盘-销接触方式进行干式摩擦磨损实验，试样和销分别采用 H13 钢基体和 H13+H13/20%WC 复合涂层，切取试样时保留顶层。盘（对磨副）试样为 304 L 不锈钢，试验参数为：200 r/min、实验时间 20 min，温度为室温 24 ℃，加载载荷为 150 N。图 9 为 WC 复合熔覆层和 H13 钢基体磨损表面 SEM 形貌。可见：H13 钢基体磨损表面磨痕较多，为多层堆积的氧化物，甚至出现剥落，基体 H13 钢的磨损形式主要有磨粒磨损、氧化磨损，粘着磨损以及剥层磨损。H13+H13/20%WC 复合熔覆层磨损表面比 H13 钢基体的磨损表面稍微光滑一些，没有发生剥落现象，磨痕也比较浅，可见 H13+H13/20%WC 复合涂层的磨损形式为磨粒磨损和氧化磨损。由于硬质相固溶于基体中，因此 WC 的存在，不仅提高了熔覆层硬度，还提高了熔覆层耐磨性。



(a)H13基体低倍　(b)H13基体高倍

(c)H13+H13/20%WC涂层低倍　(d)H13+H13/20%WC涂层高倍

图 9 熔覆层和基体磨损表面 SEM 形貌

Fig.9 SEM images of the cladding layer and the wear surface of the substrate

3 结论

（1）在热作模具 H13 钢表面激光熔覆制备了 H13+H13/ 不同 WC 含量颗粒增强复合涂层。OM、SEM、EDS 观察与分析表明，梯度复合熔覆层与基体形成良好的冶金结合；熔覆层组织由致密的树枝晶、胞状晶和细小等轴晶组成，无气孔、裂纹等缺陷，枝晶间距不超过 10 μm。

（2）显微硬度测试分析表明，从表层至基体，复合熔覆层硬度呈逐渐降低趋势，表层硬度较高，底部硬度相对较低。相同工艺参数下，H13/20%WC 熔覆层平均显微硬度为 639 HV，H13 钢平均显微硬度为 560 HV。W_2C、WC 硬质相固溶于基体中，有助于提高材料表面耐磨性。

（3）由 WC 颗粒增强复合涂层摩擦磨损性能测试可知，基体 H13 钢磨损形式主要有磨粒磨损、氧化磨损，粘着磨损，以及剥层磨损，H13+H13/20% WC 熔覆层磨损形式为磨粒磨损和氧化磨损。

（4）采用与 H13 钢基体亲和力好的 H13 钢粉末激光熔覆做基底层，H13/20%WC 做表面层，可得到与基体结合良好、组织致密、硬度和耐磨性好的复合

（下转第 1265 页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

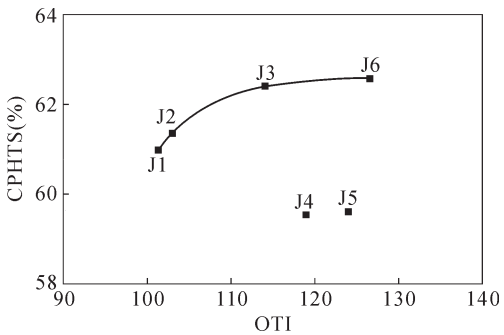


图 5　热处理后强度 CPHTS 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系

Fig.5 The relationship between thermal strength after heat treatment CPHTS and anisotropic degree index OTI

关，还与气孔结构和灰分中矿物质结构有关。热处理阶段产生的高温热应力可能导致气孔结构变形，或导致灰分中矿物质由于膨胀系数与焦质不同进而产生裂纹，两者均使焦炭的耐高温热强度变低。

3　结论

（1）光学组织对表征溶损行为的焦炭综合热性能指标（起始反应温度 T_i、平均溶损速率 CRR_{25} 和等溶损反应后强度 CSR_{25}）具有重要影响，关系均大致呈抛物线规律。但有个别焦炭的起始反应温度 T_i 和平均溶损速率 CRR_{25} 并不符合这一规律，可能与光学组织测定方法自身的局限性有关。光学组织对热强度的描述相对准确。

（2）光学组织对表征耐高温特性的焦炭综合热性能指标（热处理性指数 CPHTI 和热处理后强度 CPHTS）具有重要影响，与热处理性指数 CPHTI 大致呈抛物线规律。但个别焦炭存在奇异点，可能与其镶嵌状组织含量较高有关。光学组织与热处理后强度 CPHTS 呈逐渐衰减的指数递增趋势，但部分焦炭并不符合这一规律，这可能是由于耐高温热强度不仅受光学组织影响、还与气孔结构变形和矿物质膨胀系数与焦质不同等因素有关。

参考文献：

[1] 傅永宁. 高炉焦炭[M]. 北京：冶金工业出版社，1995.

[2] 陈洪博，白向飞，王大力，等. 焦炭光学组织与煤、焦质量关系研究[J]. 洁净煤技术，2009，15(6)：78-81.

[3] 高亚芳，杨伯威，韩正国. 焦炭光学组织与热反应性的相关性研究[J]. 中国石油和化工标准与质量，2017，37(1)：71-75.

[4] 王忠乐. 煤中矿物质的特性及其对焦炭结构和性质的影响研究[D]. 马鞍山：安徽工业大学，2014.

[5] 吕庆，王岩，谢海深，等. 灰成分及光学组织对焦炭热性能的影响[J]. 中国冶金，2016，26(8)：8-11.

[6] 刘文壮. 八钢 2 500 m³ 高炉使用高 CRI、低 CSR 焦炭炼铁实践[D]. 鞍山：辽宁科技大学，2015.

[7] Goleczka J, Tucker J. Coke quality and its assessment in the CRE laboratory [C]. Proc. 44 th Ironmaking Conf., ISS-AIME, 1985：217-232.

[8] Nomura S, Naito M, Yamaguchi K. Post-reaction strength of catalyst-added highly reactive coke[J]. ISIJ International , 2007,47 (6): 831-839.

[9] Wang Q, Guo R, Zhao X F, et al. A new testing and evaluating method of cokes with greatly varied CRI and CSR [J]. Fuel, 2016,182: 879-885.

[10] 周师庸. 应用煤岩学[M]. 北京：冶金工业出版社，1985.

[11] 蔡皓宇，程树森，赵宏博，等. 碱金属对焦炭光学组织的影响[J]. 钢铁，2013，48(12)：9-15.

（上接第 1257 页）

熔覆层，为 H13 热作模具钢表面改性和再制造提供了一种思路和参考。

参考文献：

[1] Jhavar S, Paul C P, Jain N K. Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34(8):519-535.

[2] 刘元伟，亓翔，魏训青. 热作模具的堆焊修复技术[J]. 精密成形工程，2016,8(3):68-73.

[3] Shen L, Zhou J, Ma X, et al. Microstructure and mechanical properties of hot forging die manufactured by bimetal-layer surfacing technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239:147-159.

[4] 赵雪阳. H13 钢表面激光熔覆制备金属基陶瓷复合涂层及其耐磨性的研究[D]. 广州：暨南大学，2016.

[5] Kattire P, Paul S, Singh R, et al. Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20:492-499.

[6] 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):136-140.

[7] Tran, Van Nghia; YANG, Sen; PHUNG, Tuan Anh. Microstructure and properties of Cu/TiB2 wear resistance composite coating on H13 steel prepared by in-situ laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 480-486.

[8] 张德强，考锡俊，李金华. H13 钢表面激光熔覆铁基合金粉末的工艺研究[J]. 机械设计与制造，2016, 10:41-43.

[9] 严凯，陈长军，张敏，等. 增材制造 H13 钢表面熔覆 Ni/WC 涂层组织及性能研究[J]. 应用激光，2017, 37(2):175-180.

[10] Ahn D G, Lee H J, Cho J R, et al. Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 257-260.

[11] 钱绍祥. 激光熔覆铁基合金涂层的组织及耐蚀性能 [J]. 铸造技术，2019, 40(6):613-616.

[12] 毕彦，邵振江，段文利，等. C12MoV 模具钢激光熔覆复合超硬层的耐磨性研究[J]. 锻压技术，2019, 44(8):146-149.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net