

# WC 含量对铁基复合涂层组织与磨损性能的研究

朱继祥<sup>1</sup>, 雷 声<sup>1,2</sup>, 李帅<sup>1</sup>, 吴彦博<sup>1</sup>, 朱银锋<sup>1</sup>, 任悦<sup>3</sup>, 刘亚峰<sup>1</sup>, 许海丽<sup>1</sup>

(1.安徽建筑大学机械与电气工程学院,安徽 合肥 230601)

(2.安徽省工程机械智能制造重点实验室,安徽 合肥 230601)

(3.北京理工大学材料学院,北京 100081)

**[摘要]** 为了解决导辊零部件表面易磨损失效问题,采用激光熔覆在 GCR15 轴承钢表面制备了不同 WC 含量铁基复合熔覆层。分别通过 SEM、EDS、XRD 和磨损试验机对熔覆层微观组织、元素分布、物相组成和耐磨性能进行分析。结果发现,WC 的添加量对合金熔覆层组织及性能影响较大。熔覆层与 GCR15 轴承钢基材冶金结合良好,熔覆层组织主要由胞状晶和等轴树枝晶组成,物相以  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$  为主。熔覆层平均显微硬度随 WC 含量的增加而增加,其中 WC 含量为质量分数 50% 的熔覆层平均显微硬度最高,约为基材的 3 倍。在耐磨性能方面,磨损机理主要为磨料磨损和氧化磨损。随着熔覆层 WC 质量分数的增加,磨损量先减小后变大,WC 含量为质量分数 30% 的熔覆层耐磨性能最佳。

**[关键词]** 激光熔覆,磨损性能,WC 颗粒,铁基合金,微观组织

**[中图分类号]** TG148 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2021)01-0028-07

## Research on the Microstructure and Wear Properties of Iron-Based Composite Coating with WC

Zhu Jixiang<sup>1</sup>, Lei Sheng<sup>1,2</sup>, Li Shuai<sup>1</sup>, Wu Yanbo<sup>1</sup>,  
Zhu Yinfeng<sup>1</sup>, Ren Yue<sup>3</sup>, Liu Yafeng<sup>1</sup>, Xu Haili<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

(2.Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery of Anhui Province, Hefei 230601, China)

(3.School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To solve the problem of serious wear and tear failure of guide roller parts, Fe-based composite cladding layers with different contents of WC were prepared for the surface of GCR15 bearing steel by laser cladding technology. The microstructure, element distribution, phase composition and wear resistance of the cladding layer were analyzed by SEM, EDS, XRD and wear tester. The results show that the addition of WC has an apparent influence on the microstructure and properties of the alloy cladding layer. The cladding layer has good metallurgical bonding with GCR15 bearing steel substrate. The microstructure of cladding layer is mainly composed of cellular crystals and equiaxed dendrites, and the main phase of it is  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  and  $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$ . Compared with the substrate, the average microhardness of the cladding layer increases obviously with the increase of WC content. When the content of WC is 50 wt.%, the average microhardness of cladding layer is the highest, which is about three times higher than that of GCR15 bearing steel substrate. In terms of wear resistance, the wear mechanism is mainly including abrasive wear and oxidation with the increase of WC mass fraction of cladding layer, the amount of wear decreases and then increases. The cladding layer with the 30 wt.% WC content has the best wear resistance.

**Key words:** laser cladding, wear performance, WC particles, Fe-based alloy, microstructure

导辊作为轧钢领域导卫装置设备中主要的零部件,具有优良的耐磨性、抗热疲劳性、抗氧化性和较高的抗冲击韧性等<sup>[1-2]</sup>。导辊在较为恶劣的工作环境中承受着较大交变热应力,而表面磨损破坏和裂纹剥落

收稿日期:2020-07-03.

基金项目:国家自然科学基金项目(51877001)、安徽省教育厅自然科学重点资助项目(kj2016A146)、安徽建筑大学科研项目(横 20180022、AJ-CXY-KF-17-38)。

通讯作者:雷声,博士,教授,研究方向:材料成形技术. E-mail:leish1964@vip.126.com

是导致导辊部件失效的主要原因<sup>[3]</sup>. 激光熔覆技术因其热量集中、加热冷却快、热影响区小等特点受到广泛关注<sup>[4-5]</sup>.

目前在零部件表面制备金属基复合涂层,碳化物、氮化物和氧化物陶瓷颗粒的加入可以有效提高涂层表面硬度和耐磨损特性. 其中 WC 颗粒因其具备硬度高、润湿性好、热膨胀系数低等优点,可改善合金的微观组织结构,获得更好的机械性能和广泛应用<sup>[6]</sup>. 余畅等<sup>[7]</sup>采用激光熔覆技术在 45 钢上制备了 WC+Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 硬质相的铁基复合涂层,发现复合涂层具有较高的硬度、良好的耐磨性. Chen 等<sup>[8]</sup>采用激光增材技术制备高强度高韧性 WC 增强铁基复合材料,铁基复合材料具有良好的抗压强度,约为 2 833 MPa,断裂应变约为 32%. 王黎明等<sup>[9]</sup>对不同含量的 WC 增强 Fe 基复合材料进行研究,发现随着 WC 含量的增加涂层硬度及致密度呈现增大到减小的趋势,质量分数 30% WC 的涂层孔隙率最低. Chen<sup>[10]</sup>在碳钢表面制备了新型致密度高的 NiAl/WC 复合涂层,但存在严重的裂纹缺陷问题. 与此对比,添加质量分数 5%Fe 可以减少 NiAl/WC 涂层的裂纹,获得低摩擦系数和最小磨损率的熔覆涂层. 由于熔覆合金与 WC 硬化相热膨胀系数不同,以及激光熔覆的快速熔凝容易导致涂层中裂纹的产生. 通过合理设计增强相 WC 含量,制备出无裂纹、无孔隙的高质量熔覆层,对于 WC 颗粒增强 Fe 基复合材料关键技术的研究,是目前需要解决的问题之一.

针对导辊零部件主要磨损失效问题,原有铁基熔覆材料已不能满足导辊所需高耐磨性. 以 GCR15 轴承钢为基体,采用同轴送粉激光熔覆技术,通过添加不同含量 WC 球形颗粒增强相,制备了 WC 铁基复合材料涂层. 开展不同 WC 含量铁基复合涂层内部组织结构变化与耐磨性能之间影响机理的研究. 确定最佳含量的 WC 铁基复合合金涂层,以获得致密性高耐磨性好的优良机械性能,可以为导辊零部件表面强化的广泛工业应用提供新技术理论支持.

1 实验材料及方法

1.1 实验材料及涂层制备

实验选用 GCR15 轴承钢为基材,尺寸为(Φ50 mm×Φ40 mm×15 mm),选择经济性适中、机械性能优越的铁基合金作为激光熔覆材料,导辊原熔覆铁基合金材料成分如表 1 所示. WC 球形颗粒粉末分别以质量分数为 20%、30%、40%、50%的含量添加到铁基合金粉末中,经充分机械研磨混合均匀后真空干燥. 激光熔覆实验采用型号 LDM-4000 激光器和型号为 DPSF-2 送粉器,选择氩气保护,熔覆工艺参数见表 2,熔覆厚度约为 1 mm.

表 1 铁基合金元素成分(质量分数,%)

Table 1 The main chemical composition of the alloy (wt. %)							
成分	C	Si	Mo	Ni	Cr	B	Fe
含量	0.14	0.97	1.04	1.47	15.04	1.29	Bal.

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Parameters of laser cladding process			
激光功率/kW	扫描速度/(mm/s)	熔覆速度/(mm/s)	送粉速率/(g/min)
1.8	7	0.1	30

1.2 熔覆涂层性能表征

将试样沿着垂直于激光器扫描方向线切割成尺寸为 10 mm×15 mm×20 mm 的块状样品. 通过日立 SU8230 型高新场发射扫描电子显微镜,观察熔覆层微观组织形貌,并分析样品熔覆层截面区域元素分布;通过 Smart Lab X 型射线衍射仪和 Jade-6.5 软件分析熔覆层的物相成分;通过 HLN-11A 型显微硬度计在切割面从熔覆层表面向基体处每隔 0.1 mm 取点进行显微硬度测量;通过 MMW-1 型磨损试验机对不同 WC 含量的熔覆层进行磨损失重测试.

2 结果与讨论

2.1 涂层微观组织分析

熔覆层中微量元素 Ni、B、Si 具有脱氧造渣特性,有助于提高合金组织润湿性和避免涂层开裂<sup>[11]</sup>. 图 1 为不同 WC 含量熔覆层与基体微观组织形貌,可以看出在基材与熔覆层交界线处出现一条明显细窄结合带,涂层的稀释率较低并形成了良好的冶金结合,涂层组织致密性较高,未发现气孔或其它组织缺陷存在. 熔覆层中球形亮白色为 WC 颗粒弥散分布铁基合金涂层中,部分 WC 发生了分解. 由于 WC 质量分数大,导致熔覆层底部存在小部分 WC 颗粒.

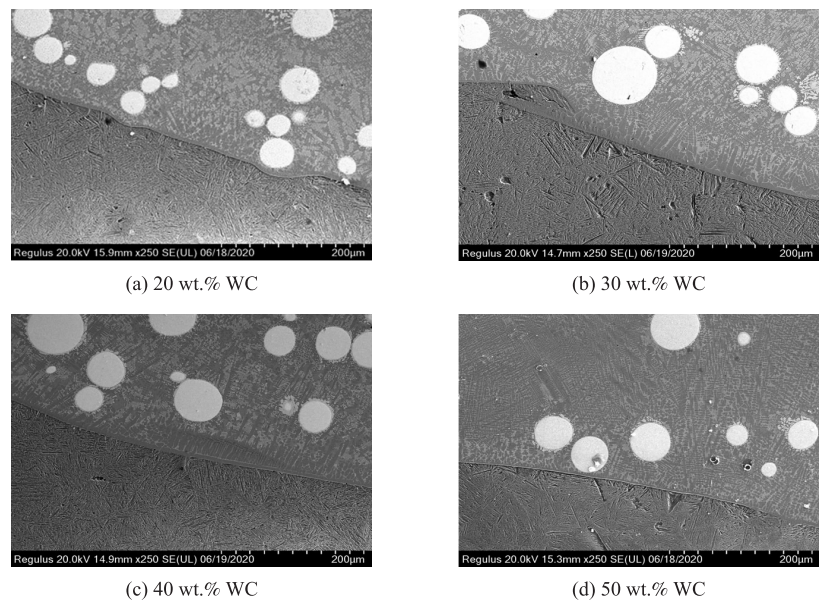


图 1 不同 WC 含量下熔覆层的 SEM 图

Fig. 1 SEM microstructure of laser cladding with different content of WC

图 2 分别为质量分数 30% 和质量分数 50% WC 含量的熔覆层不同区域 SEM 微观组织形貌图. 激光熔池中合金温度梯度  $G$  和凝固速度  $R$  的比值  $G/R$  决定着熔覆层组织形态<sup>[12-14]</sup>, 熔覆层组织形态对涂层机械性能有较大影响. 图 2(a) 熔覆层底部与基材靠近区域, 在基材快速冷却作用下发生激冷反应, 晶粒组织生长伴随着外延特性并形成了垂直于基材界面的柱状树枝晶组织<sup>[15]</sup>. 图 2(c) 熔覆层中部因为冷却速度较慢, 散热较差导致枝晶发生了粗化和长大, 形成了具有一定方向性的等轴树枝晶、分散存在少量枝晶间与枝晶共晶组织; 图 2(d) 熔覆涂层表面与空气接触散热较快, 在涂层顶层区域存在树枝晶和胞状晶组织.

图 2(e)、(f) 分别为 WC 含量质量分数 30% 和质量分数 50% 熔覆层底部 WC 颗粒周边微观形貌, 对图中不同区域成分分析如表 3 所示. 在高能激光束下 WC 颗粒发生了部分溶解, 球面边界外衍生出亮白色鱼骨状析出物(1, 5 处), 根据表 3 能谱分析析出物主要元素成分由 Fe、W、Cr 组成. 1 和 5 处 Fe 和 W 元素质量分数分别为 38.69%、57.54%; 46.10%、46.64%, 并存在少量的 Cr 元素. 可见析出物元素 Fe、W 含量比较高, 结合图 3 XRD 图谱可知, 鱼骨状析出物主要为富钨化物  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  和  $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$ , 存在少量 Fe-Cr 化合物. 图 2(f) WC 颗粒中心区域 3 处存在烧损裂纹, 由能谱分析显示该处 Fe 质量分数为 21.52% 和 W 质量

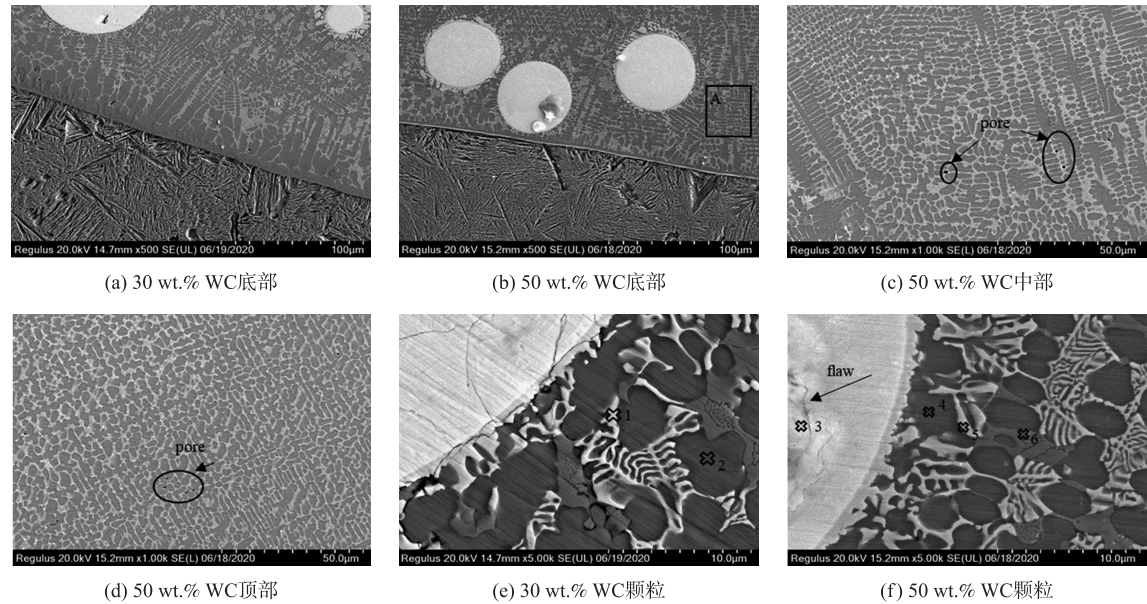


图 2 质量分数为 30% 和 50% 的 WC 熔覆层不同区域 SEM 微观组织形貌图

Fig. 2 SEM microstructure of different areas of WC cladding layer with 30 wt.% and 50 wt.% content



分数为 35.96%,以及较高含量的 O 41.30%,表明氧极易在裂纹处富集和 Fe 元素渗入到 WC 颗粒内部. 主要因为 WC 自身热膨胀系数低、脆性大,且熔覆熔池的冷却过程中合金组织内部积聚大量热应力. 当热应力值超过 WC 自身强度时表面将产生裂纹,从 WC 核中心向边缘扩散<sup>[9]</sup>.

结合表 3 能谱分析发现:图 2(e)同一熔覆层内 2 处枝晶区域较 1 处枝晶间元素 Fe 含量增加较多,而元素 W 含量大幅度减少,表明少部分的 WC 溶解扩散在铁基合金里,距离 WC 颗粒越远 W 含量越少. 在熔覆过程中 WC 颗粒在熔池中部分溶解并弥散分布于熔覆层中,与基体合金元素形成高强度 Fe-W-Cr 类化合物. 熔池冷却过程中高强度 Fe-W-Cr 类化合物固溶于枝晶及枝晶间,起到固溶强化的作用. 枝晶间区域 6 和共晶组织区域 4 成分均含有 Fe、Cr、W 元素,枝晶间相比共晶组织区域元素 Fe 含量略微减少,元素 W 含量近乎不变,而元素 Cr 含量略微提高,说明在鱼骨状析出物周边各元素成分含量均匀,无偏析现象. 结合图 3 的 XRD 分析,推断出枝晶间析出主要为  $\text{Fe}_2\text{W}$  强化相和 Fe-Cr 化合物. 随着 WC 含量的增加在涂层内部的 A 区域等轴晶状组织分布更加均匀,共晶组织变的更为细小,且组织细化程度越高<sup>[16]</sup>. 当 WC 含量质量分数 50%时,涂层组织中由于 WC 含量的增加提高了熔体的相对黏度,气体未及时逸出导致一些孔洞缺陷存在,如图 2(c)、(d)所示. 综合分析各点成分比差异较大的原因,主要因为在熔覆过程中 WC 自身发生微溶. 一方面,由于 WC 颗粒自身破裂和合金中铁元素渗入 WC 颗粒内部造成的元素成分差异. 另一方面,溶解扩散在铁基合金中的 W 元素和 C 元素,与固溶于枝晶间铁元素生成新的硬化相,带来铁基熔覆层元素成分变化.

表 3 不同 WC 含量下熔覆层 EDS 成分分析(质量分数, %)

Table 3 Analysis of EDS composition of laser cladding coating under different content of WC( wt. %)

区域		组成元素			
		Fe	Cr	O	W
质量分数 30% WC 熔覆层	1	38.69	3.77	—	57.54
	2	84.24	3.83	—	11.94
	3(WC 缺陷处)	21.52	—	41.30	35.96
质量分数 50% WC 熔覆层	4	78.85	3.64	—	13.37
	5	46.10	4.55	—	46.64
	6	70.27	7.94	—	17.36

## 2.2 涂层物相分析

图 3 为在 WC 含量质量分数 30%、质量分数 50%的熔覆层的 XRD 物相分析. 在 WC 含量为质量分数 30%的熔覆层 XRD 图谱中衍射峰最多,主要包含  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$ 、WC、 $\text{W}_2\text{C}$ 、Fe-Cr、 $\text{Fe}_2\text{W}$  等;含质量分数 50%的 WC 熔覆层主要包含物相  $\text{Fe}_2\text{W}$ 、 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、WC、 $\text{W}_2\text{C}$ 、 $\text{M}_7\text{C}_3$  等;对比下发现熔覆层中随着 WC 质量分数的增加,衍生出的物相减少,并生成新硬化相  $\text{M}_7\text{C}_3$ (M 为 Fe、Cr)<sup>[17]</sup>.  $\text{W}_2\text{C}$  的存在验证了添加物 WC 在高温下的分解反应,并且熔覆层中铁元素可与未分解的 WC 颗粒和新生的  $\text{W}_2\text{C}$  硬质相生成  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ <sup>[18]</sup>. 在熔池内部中 WC 颗粒分解有助于 W、C 元素固溶到枝晶与枝晶间,由于 W 元素过饱和带来的晶格畸变,抑制了位错运动,阻碍晶界滑移,使得熔覆层合金固溶体的强度与硬度增加,起到固溶强化作用. 已溶解的 W 和 C 元素与铁基合金其它元素发生反应生成  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$  和  $\text{M}_7\text{C}_3$  新硬质相与未溶解的 WC 颗粒均匀地分布在熔覆层中,起到了很好的弥散强化作用,有助于提高熔覆层的力学性能.

## 2.3 涂层显微硬度分析

图 4 为不同 WC 含量下的涂层截面硬度变化曲线. 不同 WC 含量(20%、30%、40%、50%)涂层平均硬度分别为 894.36  $\text{HV}_{0.1}$ 、954.73  $\text{HV}_{0.1}$ 、882.39  $\text{HV}_{0.1}$ 、1 015.29  $\text{HV}_{0.1}$ ,远高于基材平均硬度 337.2  $\text{HV}_{0.1}$ . WC 的添加明显提高了涂层表面硬度,添加质量分数 50% WC 的熔覆层表面硬度最高为 1 063.9  $\text{HV}_{0.1}$ ,约为基材的 3 倍. 而 WC 添加量在质量分数 20%的熔覆层硬度最低为 850.6  $\text{HV}_{0.1}$ . 在添加量为质量分数 30% WC 的熔覆层硬度略微减小,其余 WC 含量质量分数 20%和质量分数 40%的熔覆层硬度值较为相近. 一方面,WC 颗粒增强相弥散分布在铁基饱和固溶体中起到了弥散强化作用,激光熔覆表面快速熔凝特性抑制了晶粒的长大产生细晶强化;另一方面,在激光束下,熔覆层 WC 分解成具有高硬度的硬化相  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$ 、 $\text{M}_7\text{C}_3$  等,显著提高了熔覆层硬度. 在热影响区与熔覆层底部位置,硬度逐渐升高,因为熔池内部大量合金元素 Fe、Cr、Ni 等元素扩散起到稀释效果<sup>[19]</sup>,且熔覆层中未分解的 WC 颗粒沉聚在熔覆层底部,

带来熔覆层硬度的提升.

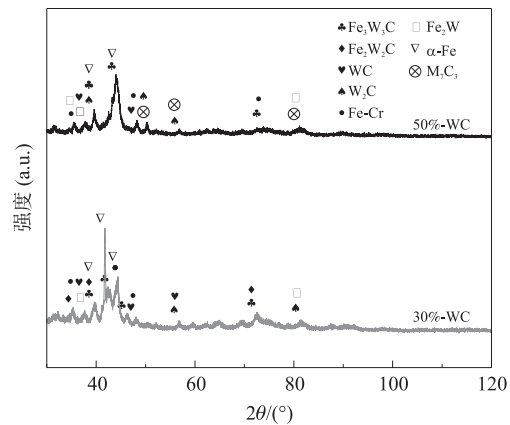


图 3 质量分数为 30%和 50% WC 熔覆层 XRD 物相分析  
Fig. 3 XRD of laser cladding coating under 30 wt. % and 50 wt. % of WC

2.4 熔覆层摩擦磨损性能分析

图 5 为不同 WC 含量熔覆层磨损失重量对比,可以看出添加 WC 的熔覆层的磨损失重量较基材得到很大改善. 当 WC 含量逐渐增加时,熔覆层表面磨损失重量先减少后增大,其中含量质量分数 30% WC 的熔覆层耐磨性能最好而磨损量仅为 9.1 mg,较基材总磨损量少 40.1 mg. 质量分数 50% WC 的熔覆层耐磨性较差,磨损量为 28.2 mg,相比基材总磨损量少 20.9 mg. 熔覆层耐磨强化机理在于新生硬化相和富铬碳化物二次硬化相的析出. 这是由于 WC 颗粒溶解在合金熔覆层产生固溶强化作用,熔覆层中诸如 WC、Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C、Fe<sub>2</sub>W<sub>2</sub>C、Fe<sub>2</sub>W 等强化相和富铬化合物 Fe-Cr 阻碍了晶粒的增长,提高了熔覆层耐磨性.

图 6 为 GCR15 基材与不同 WC 含量熔覆层表面磨损形貌图. 图 6(a)为 GCR15 基材表面磨损形貌,可见有较深的犁沟,金属块脱落形成的凹坑与周边颗粒状的金属屑. 这是由于在摩擦磨损过程中表面发生

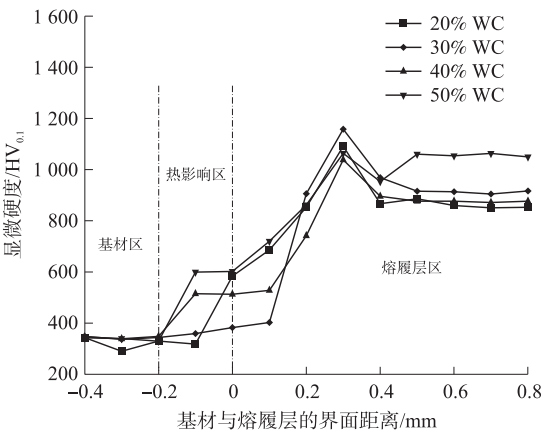


图 4 不同 WC 含量下熔覆层截面硬度变化曲线  
Fig. 4 Variation of cladding layer in microhardness under different content of WC

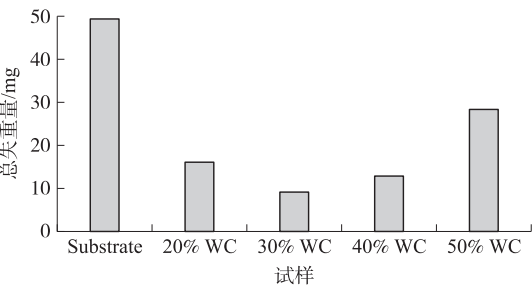


图 5 基材与不同 WC 含量熔覆层磨损量对比  $\Delta G$  (mg)  
Fig. 5 Comparison of wear mass loss between substrate and cladding layer with different content of WC  $\Delta G$  (mg)

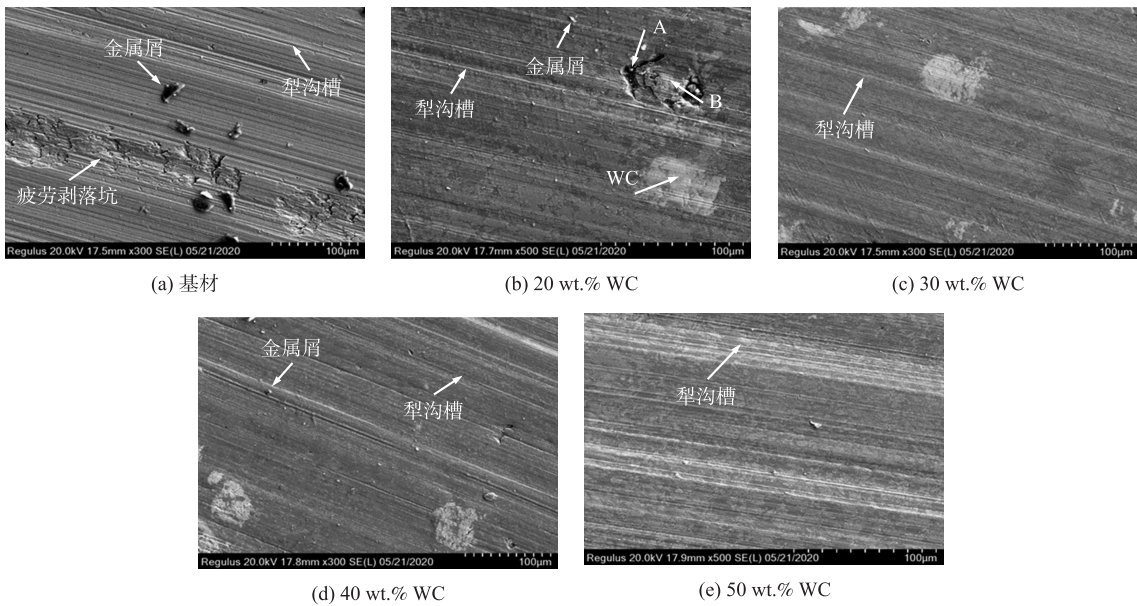


图 6 基体与不同含量 WC 熔覆层表面磨损形貌图  
Fig. 6 Surface wear morphology of substrate and cladding layer with different content of WC

了冷焊而形成黏着点,在相对滑动中产生较大的应力,疲劳剥落产生凹坑形貌。基体磨损机理主要存在磨料磨损和剥落磨损。图 6(b)~(e)为不同 WC 含量熔覆层表面磨损形貌图,添加不同 WC 含量的熔覆层磨损重量相比基体磨损表面存在较浅的犁沟和磨屑颗粒并出现片状亮白色区域。结合图 5 磨损重量可知熔覆层中添加不同含量的 WC,可有效改善基材表面的磨损。由于溶解的 WC 固溶于枝晶和枝晶间,形成高强度 Fe-W-Cr 类化合物或其它碳化物 ( $M_7C_3$ 、 $W_2C$ ),均能提高熔覆层的耐磨性。其次未熔的硬质相 WC 与涂层良好结合也有助于提高熔覆层的耐磨性。

随着 WC 含量的增加,磨损表面犁沟形貌呈现出“深—浅—深”形貌。图 6(b)为含质量分数 20% WC 熔覆层磨损表面,犁沟浅显且数量大量减少,并出现磨屑颗粒和剥落现象。对磨屑颗粒 A 点 EDS 分析各元素质量分数为 Fe 70.00%、C 23.67%、O 6.33%。银白色区域 B 点的 EDS 分析各元素质量分数为 Fe 22.39%、Cr 1.16%、O 2.19%、W 53.65%、C 20.62%。磨屑颗粒主要由 Fe、C、O 3 个元素组成,而亮白色区域主要存在 W 元素。可知磨屑颗粒主要是铁碳颗粒及氧化物,亮而白色区域主要是熔覆层表面的 WC 颗粒和富钨碳化物及氧化层。

图 6(c)显示含质量分数 30%的 WC 熔覆层中犁沟最为浅显,趋近于光滑,且磨屑近乎消失。由上文磨损量分析可知在质量分数 30% WC 的熔覆层磨损重量最小,耐磨性最好。熔覆层中新生硬质相和未熔融 WC 均匀的分布,可以在一定程度上减缓磨环的磨粒对熔覆涂层表层的犁削作用<sup>[20]</sup>,有效提高熔覆层表面耐磨性。质量分数 50% WC 的熔覆层磨损形貌具有深浅不一的犁沟,整体上相对平整,并存在少量的磨屑。在硬度变化曲线中质量分数 50% WC 的涂层平均硬度最高,对应的耐磨性反而较差,说明硬度的高低与耐磨性的好坏只是在一定条件下有所关联。由涂层中添加过量的 WC 则导致合金涂层的组织分布不均及较差的致密性,而耐磨性也随之变差。综合分析,添加不同 WC 含量的铁基合金熔覆层表面磨损机理主要以磨粒磨损为主及少量氧化磨损。

### 3 结论

(1)在 GCR15 轴承钢表面熔覆了不同 WC 含量铁基复合涂层。在基材与熔覆层交界线处存在一条细窄的结合带,且涂层组织无明显缺陷。涂层组织从顶层到底部分别由胞状晶、等轴晶树枝晶和柱状晶组成。

(2)WC 含量为质量分数 30%和质量分数 50%的铁基复合涂层中增强相主要以  $Fe_3W_3C$ 、 $Fe_2W_2C$  为主,随着熔覆层 WC 含量的增加产生了新硬化相  $M_7C_3$ 。高硬度的硬化相  $Fe_3W_3C$ 、 $Fe_2W_2C$ 、 $M_7C_3$  等与 WC 颗粒弥散分布涂层中显著提高了涂层硬度。当 WC 含量为质量分数 50%时,平均硬度(1 015.29 HV<sub>0.1</sub>)最高且约为基材的 3 倍。不同 WC 含量的熔覆层平均硬度变化差别不大。

(3)WC 含量为质量分数 50%时的熔覆层由于涂层的 WC 颗粒分布不均及较差的致密性,导致耐磨性随之变差。在 WC 含量为质量分数 30%时的熔覆层耐磨性能最好,较基材磨损重量少 40.1 mg,熔覆层磨损机理以磨料磨损为主和少量氧化磨损。

### [参考文献]

- [1] 张丽民,王书明,夏雯,等. 等离子熔覆技术在导辊上的应用[J]. 金属热处理,2010,35(4):21-23.
- [2] 邵春娟,米国发,许磊,等. 新型耐磨导卫板制备及性能分析[J]. 材料导报,2017,31(S2):380-384.
- [3] 张开源,尹延国,张国涛,等. 高能球磨-粉末冶金法制备硫化亚铁/铁基轴承材料的摩擦学性能[J]. 中国机械工程,2019,30(18):2172-2178.
- [4] 张航,路媛媛,王涛,等. 激光熔覆 WC/H13-Inconel625 复合材料的冲击韧性与磨损性能[J]. 材料工程,2019,47(4):127-134.
- [5] AMADO J M, MONTERO J, TOBAR M J, et al. Laser cladding of Ni-WC layers with graded WC content[J]. Physics procedia, 2014, 56:269-275.
- [6] 王开明,雷永平,魏世忠,等. WC 含量对激光熔覆 Ni 基 WC 复合涂层组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2016,37(7):172-179.
- [7] 余畅,朱宇,简险峰,等. WC+Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 增强铁基合金激光熔覆涂层磨损性能[J]. 金属热处理,2013,38(12):21-24.
- [8] CHEN H Y, GU D D, KOSIBA K, et al. Achieving high strength and high ductility in WC-reinforced iron-based composites by

- laser additive manufacturing[J]. Additive manufacturing, 2020, 35: 101195.
- [9] 王黎明,从善海,胡梅. WC增强Fe基复合材料的组织与性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2015, 43(5): 22-29.
- [10] CHEN W F, SHAN X, GUO Y, et al. The effect of reactive element species and concentrations on the isothermal oxidation of  $\beta$ -NiAl coating fabricated by spark plasma sintering[J]. Surface and coatings technology, 2019, 15: 841-848.
- [11] 范鹏飞,孙文磊,张冠,等. 激光熔覆铁基合金梯度涂层的组织性能及应用[J]. 材料导报, 2019, 33(22): 3806-3810.
- [12] 刘洪喜,董涛,张晓伟,等. 激光熔覆制备 WC/Co50/Al 硬质合金涂层刀具的微观结构及切削性能[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 104-112.
- [13] ZHU Q, LEI Y C, CHEN X Z, et al. Microstructure and mechanical properties in TIG welding of CLAM steel[J]. Fusion engineering and design, 2011, 4-5(86): 407-411.
- [14] 刘建弟,张述泉,王华明. 激光熔覆 WC 颗粒增强复合涂层的组织及耐磨性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2600-2607.
- [15] LU J Z, CAO J, LU H F, et al. Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding [J]. Surface and coatings technology, 2019, 369: 228-237.
- [16] LI W, XU P Q, WANG Y Y, et al. Laser synthesis and microstructure of micro- and nano-structured WC reinforced Co-based cladding layers on titanium alloy [J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 749: 10-22.
- [17] 王东生,田宗军. 激光熔覆 NiCrBSi/WC-Co 复合涂层的组织与耐磨性能[J]. 机械工程材料, 2019, 43(11): 16-20.
- [18] 黄浩科,李祖来,山泉,等. 碳化钨/钢基复合材料的界面重熔[J]. 材料研究学报, 2014, 28(3): 191-196.
- [19] MUVVALA G, KARMAKAR D P, NATH A K. Monitoring and assessment of tungsten carbide wettability in laser clad metal matrix composite coating using an IR pyrometer[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 714: 514-521.
- [20] 熊中,王艳,徐强,等. WC 对铁基合金喷焊层组织及磨损性能的影响[J]. 电焊机, 2016, 46(12): 104-107.

[责任编辑:顾晓天]