

WC 颗粒熔解析出对 Ni60 熔覆层性能的影响

芦海俊¹, 水剑虹², 王锴¹, 尚勇¹, 姜海峰¹, 魏金¹

(1. 中铁工程装备集团隧道设备制造有限公司, 河南 新乡 453011;
2. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 三门峡 450001)

摘要: **目的** 确定含 WC 微粒镍基熔覆层中不同共晶相对熔覆层性能的影响规律。**方法** 通过等离子工艺制备含 WC (质量分数 10%) 的 Ni60 熔覆层, 并调整电流, 以控制 WC 的熔解析出。通过维氏硬度计、剪切试验、磨粒磨损试验研究不同电流下熔覆层硬度、抗剪强度和耐磨性的变化情况, 并通过扫描电镜和 X 射线衍射仪分析不同熔覆层的磨损形貌、组织和物相组成。**结果** 在不同电流下制备的熔覆层物相均主要为 γ -(Fe,Ni)、 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 、WC、 W_2C 、 $FeNi_3$ 、 FeW_2B_2 等。熔覆电流由 110 A 增至 200 A 时, 熔覆层的硬度由 846.7HV 降至 665.8HV, 抗剪强度由 174.9 MPa 增至 373.2 MPa。当电流低于 140 A 时, W、Cr、C 等合金元素生成了块状先共晶相, 可有效减轻磨粒磨损程度, 提高耐磨性; 当电流进一步增大时, W、Cr、C 等合金元素以鱼骨状过共晶相析出, 在磨粒磨损过程中易断裂、脱落, 导致耐磨性下降。**结论** 熔覆电流的变化会影响含 WC 微粒 Ni60 熔覆层的共晶碳化物成分、形态和数量, 在熔覆电流较小时有利于块状先共晶相的生成, 可提高其耐磨性。在熔覆电流为 140 A 时, Ni60+WC (10%) 熔覆层的综合性能最优。

关键词: WC; Ni60; 抗剪强度; 磨粒磨损; 熔覆电流

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0189-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.016

Effects of Dissolving and Precipitating of WC Particles on Performance of Ni60 Coating

LU Hai-jun¹, SHUI Jian-hong², WANG Kai¹, SHANG Yong¹, JIANG Hai-feng¹, WEI Jin¹

(1. China Railway Engineering Equipment Group Tunnel Equipment Manufacturing Co., Ltd., Henan Xinxiang 453011, China;
2. Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Henan Sanmenxia 450001, China)

ABSTRACT: The Ni60 coatings containing WC particles have been widely used because of its excellent performance. The effects of preparation technology, size and content of WC particles on performance of Ni60 coatings are in-depth studied, but the effects of different eutectic carbides generated during cladding are not so clear. The work aims to study the effects of

收稿日期: 2022-03-14; 修订日期: 2022-09-08

Received: 2022-03-14; Revised: 2022-09-08

基金项目: 河南省科技攻关重点项目 (202102210210); 中铁高新工业股份有限公司科技开发计划 (2021-10); 中铁工程装备集团隧道设备制造有限公司科研项目 (2021-KY018)

Fund: Key Science and Technology Program of Henan Province, China (202102210210); Science and Technology Development Plan of China Railway Hi-Tech Industry Corporation Limited (2021-10); Research Project of China Railway Engineering Equipment Tunnel Equipment Manufacturing Co., Ltd. (2021-KY018)

作者简介: 芦海俊 (1990—), 男, 硕士, 主要研究方向为耐磨材料。

Biography: LU Hai-jun (1990-), Male, Master, Research focus: wear resistant material.

通讯作者: 尚勇 (1981—), 男, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为金属材料。

Corresponding author: SHANG Yong (1981-), Male, Doctoral candidate, Senior engineer, Research focus: metal material.

引文格式: 芦海俊, 水剑虹, 王锴, 等. WC 颗粒熔解析出对 Ni60 熔覆层性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 189-196.

LU Hai-jun, SHUI Jian-hong, WANG Kai, et al. Effects of Dissolving and Precipitating of WC Particles on Performance of Ni60 Coating[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 189-196.

different eutectic carbides on the shear strength and wear resistance of Ni60 coatings containing WC particles to improve the performance of Ni60 coatings.

Long squares made by 42CrMo steel with dimensions of 100 mm×40 mm×20 mm were used as matrix and ground by a grinder before cladding. Different Ni60 coatings containing 10% WC particles(50-150 μm) were prepared with different cladding currents (110, 140 170, 200 A) by plasma arc. The samples for wear test were single-side coating, and the samples for shear test were double-side coating. The microhardness of different coatings was measured by microhardness (HV-1000Z). The dry abrasive wear tests were performed on grain-abrasion testing machine (MLGS-225C) and the weight losses were calculated. The shear tests were carried out by universal testing machine (UTM535X-30T) with a selfmade shear tooling which had a square hole in the middle, the areas of the coating and the maximal forces during shear test were measured, and the shear strengths were calculated. The wear morphology, microstructure and phase composition were studied by scanning electron microscope (EM-30AX+) and X-ray diffraction (XRD-6100X).

The results showed that the coatings by different cladding currents were mainly composed of γ -(Fe,Ni), $M_{23}C_6$, M_7C_3 , WC, W_2C , FeNi₃ and FeW₂B₂. When the current increased from 110 A to 200 A, the microhardness of the coatings decreased from 846.7HV to 665.6HV, and the shear strength increased from 174.7 MPa to 373.2 MPa. The weight loss decreased initially, followed by an increase when the cladding current was larger than 140 A, the minimum weight loss was 0.434 g when the cladding current was 140 A. Massive eutectic carbides were generated by alloying elements such as W, Cr and C in the coating. When the cladding current was not above 140 A, the massive eutectic carbide can stop hard abrasive particles from scratching the coating matrix because of its high hardness and large size, which can enhance the abrasive resistance of the coating; When the cladding current was larger than 140 A, eutectic herringbone carbides containing W, Cr and C were generated, which were hard and crisp. And eutectic herringbone carbides would break into fragments first and then turned to pellets under the continuous impact of hard abrasive particles, then the protective effect of eutectic herringbone carbides on coating matrix was reduced. The pellets can be easily stripped from the coating when the coating matrix around them were worn off, which resulted in a further decrease of the abrasive resistance of the coating. The change of cladding current can affect the composition, morphology and quantity of eutectic carbides of Ni60 coatings containing WC particles. Small cladding current is conducive to the formation of massive eutectic carbides, which can improve the wear resistance of the coating. The Ni60+WC(10%) coating has the best comprehensive performance when the cladding current is 140 A.

KEY WORDS: WC; Ni60; shear strength; abrasive wear; cladding current

在工程机械运转过程中,许多零部件长期承受磨粒磨损,使用寿命较短,在其表面通过堆焊、喷涂及激光熔覆等方法制备熔覆层可显著提高其使用寿命。镍基熔覆层与钢铁部件结合良好,向其中添加碳化钨等陶瓷相可进一步提高镍基熔覆层的耐磨性能,研究人员对不同工艺下制备的 Ni/WC 熔覆层组织和耐磨性等进行了诸多研究^[1-16]。Yang 等^[1]通过真空熔覆技术制备了多层 Ni/WC 熔覆层,对其微观组织及形成机制进行了分析。樊帅奇等^[4]分析了 WC 粉末的初始状态对 Ni60/WC 熔覆层组织、物相组成及耐磨性能的影响。等离子熔覆工艺具有技术成熟、使用成本低等优点,在工业生产中广泛应用,采用等离子工艺制备 Ni/WC 熔覆层的研究成果较多^[17-23]。段文军等^[22]采用等离子堆焊工艺在 H13 钢表面制备了镍基碳化钨涂层,并分析确定了 H13 钢及镍基碳化钨涂层在不同磨损模式时的磨损失效形式。仇会健等^[23]通过外加磁场调控 Ni/WC 涂层中的 WC 颗粒分布,提高了涂层的硬度,解决了 WC 沉底的问题,细化了涂层组织。

上述研究主要集中于制备工艺,以及 WC 的种类、尺寸、添加量等对性能的影响,有部分研究分析了 WC 颗粒熔解后在 Ni60 熔覆层中生成的新物相种类^[2],但关于不同新物相对熔覆层耐磨性和抗剪强度的影响等方面的研究较少。文中采用不同电流敷焊添加质量分数 10%的 WC 微粒的 Ni60 熔覆层,分析了不同熔覆电流时熔覆层生成物相的变化情况,以及不同物相对熔覆层耐磨性和抗剪强度的影响规律,拟为其在生产中的应用提供指导。

1 实验

1.1 熔覆层的制备

基材采用尺寸为 100 mm×40 mm×20 mm 的 42CrMo 钢板。等离子熔覆粉末采用添加粒径为 50~150 μm 铸造 WC 微粒(质量分数 10%)的 Ni60A 粉末, Ni60 成分如表 1 所示。在堆焊前,用磨床对基材待堆焊面进行研磨,并用酒精清洗吹干。等离子堆焊设备为 DML-V03BD,采用不同电流并控制其余参数熔覆得

到 4 组试样, 熔覆工艺如表 2 所示。其中, 磨粒磨损试样采用单面熔覆, 剪切试样采用双面熔覆。

表 1 Ni60 粉成分
Tab.1 Chemical composition of Ni60

Element	C	B	Cr	Fe	Si	Ni
Mass fraction/%	1.11	2.56	20.43	4.15	5.64	Bal.

表 2 等离子熔覆工艺参数
Tab.2 Process parameters of plasma cladding

Parameter	Current/A	Power feed rate/(g·min ⁻¹)	Deposition rate/(mm·min ⁻¹)	Pendulum width/mm
1	110	21	4	9
2	140	21	4	9
3	170	21	4	9
4	200	21	4	9

1.2 性能测试及组织观察

利用线切割将试样加工成 75 mm×25 mm×15 mm 的磨粒磨损试样。采用线切割及磨床加工, 以保证熔覆层表面光滑平整。选用 60 目的石英砂对熔覆层进行干式磨粒磨损试验 (磨粒磨损试验机的型号为 MLGS-225C, 转速为 200 r/min, 试样与橡胶轮的压 力设置为 100 N), 以 1 000 r 为 1 个磨损周期, 清洗并测量磨损前后试样的质量, 直至磨损量不变或磨损至基体。随后采用线切割加工制备 15 mm×15 mm 的试样, 并用 EM-30AX+扫描电镜观察其表面磨损形貌。

利用线切割制备剪切试样, 采用 UTM535X-30T 万能试验机进行剪切试验, 过程如图 1 所示。在试验前测量熔覆层的面积 S , 采集剪切试验中的最大力 F , 根据公式: $\tau=F/S$, 计算熔覆层的剪切强度 τ 。

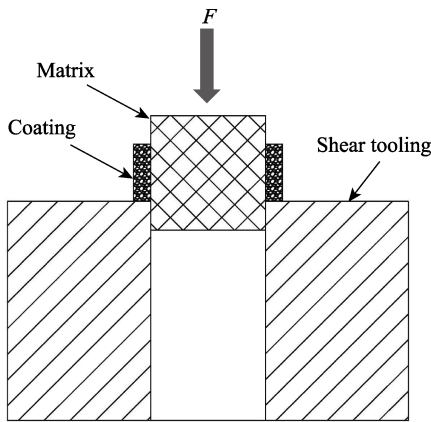


图 1 熔覆层剪切试验示意图
Fig.1 Schematic diagram of shear test

采用磨粒磨损试样制备熔覆层金相试样, 经打磨抛光后用王水腐蚀, 随后采用 EM-30AX+扫描电镜观察含 WC 的熔覆层中的组织变化情况, 并用附带的

能谱仪分析组织中不同相的元素组成。在每个熔覆层试样表层下 1~2 mm 深且无 WC 颗粒的位置随机测量 10 个硬度点, 并计算算术平均值 (设备为 HV-1000Z 维氏硬度计, 载荷为 4.9 N, 保持 15 s)。用日本岛津 XRD-6100X 射线衍射仪分析熔覆层的物相组成。

2 结果及分析

2.1 熔覆层物相分析

不同熔覆层的 XRD 物相分析结果如图 2 所示。不同电流下制备的熔覆层物相组成基本相同, 主要为 γ -(Fe,Ni)、 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 、WC、 W_2C 、 $FeNi_3$ 、 FeW_2B_2 等。随着电流的增大, 熔池热输入量增大, W_2C 比 WC 更容易受热分解^[24], W_2C 含量降低, $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 等物相含量增加。

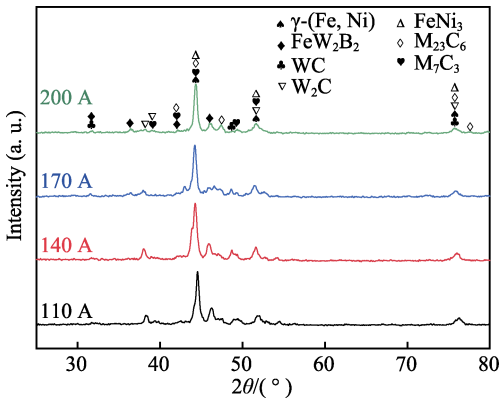


图 2 不同熔覆层 XRD 物相检测结果
Fig.2 XRD patterns of different coatings

2.2 熔覆层微观组织分析

不同电流下制备的含 WC 镍基熔覆层的金相组织如图 3 所示。当电流发生变化时, 熔覆层表层和底部的组织存在明显差异。在熔覆电流为 110 A 时, 熔覆层中存在未熔合的孔洞, 熔池底部为分布较为分散的不规则 WC 颗粒, 以及夹杂分布的深色块状碳化物 A, WC 颗粒的溶解程度较小。熔覆层表层主要为细小的等轴晶及夹杂分布的尺寸小于 10 μm 的块状深色组织 A。能谱分析结果显示深色组织 A 主要为 Cr、Ni、W 等元素生成的共晶碳化物。当熔覆电流增至 140 A 时, 因热输入量增大, 熔池冷速减慢, 因此熔池底部存在明显的 WC 颗粒沉积现象, 分布于距熔合线 200 μm 范围内。由于曲率半径会影响熔解速度, 因此 WC 颗粒在棱角处熔解得较多。熔覆层表层中的块状或长条状的深色硬质相 C 长大至 10~50 μm 以上。在高倍镜下观察发现, 除大块深色共晶相 C 外, 熔覆层组织中还密布着块状及椭圆形状的 10 μm 以下的共晶组织 D。当熔覆电流为 170 A 时, 熔覆层底部的 WC 颗粒进一步熔解, 部分 WC 颗粒完全熔解, 未完

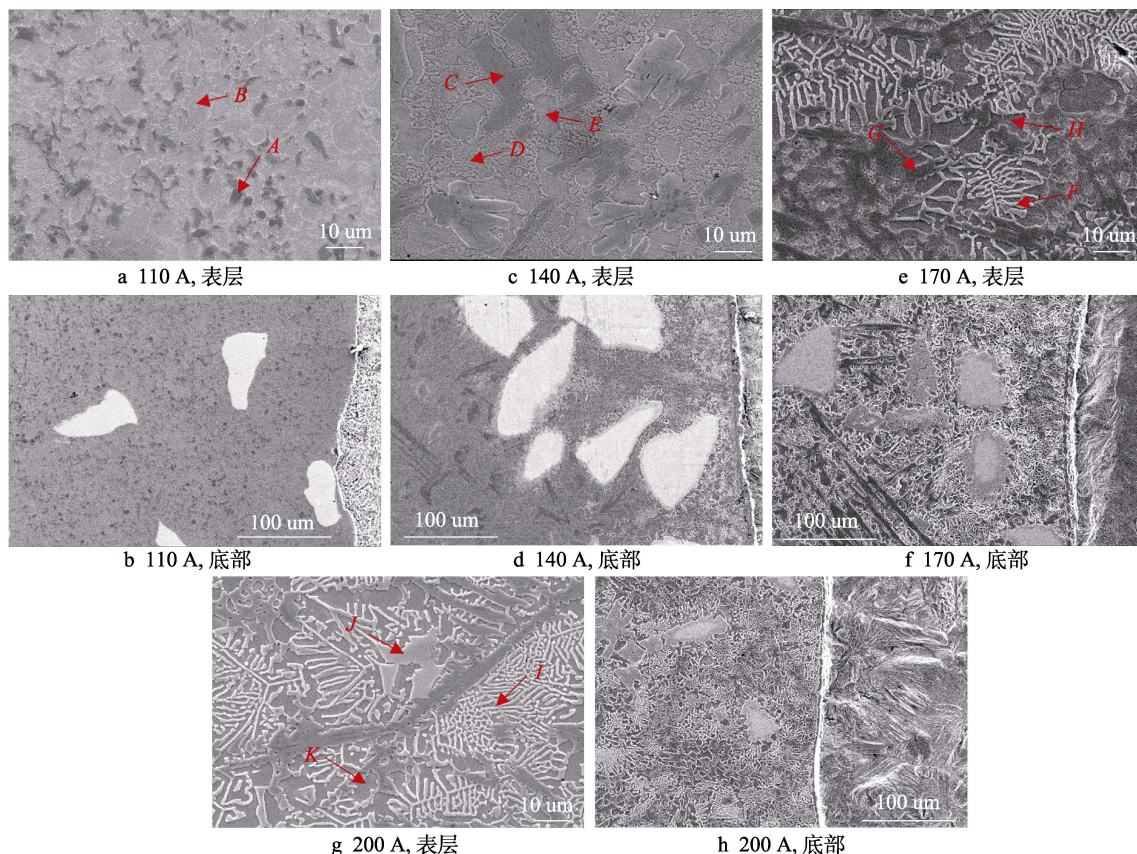


图 3 不同熔覆电流熔覆层微观组织

Fig.3 Microstructure of coating of different cladding current: a) 110 A, surface; b) 110 A, bottom; c) 140 A, surface; d) 140 A, bottom; e) 170 A, surface; f) 170 A, bottom; g) 200 A, surface; h) 200 A, bottom

全熔解的 WC 颗粒呈椭圆形。熔覆层表层组织存在较多的鱼骨状、针状共晶组织 *F*，部分区域存在一定数量的块状共晶相 *G*。当熔覆电流进一步增至 200 A 时，熔覆层底部的 WC 颗粒基本熔解，仅在个别 WC 颗粒核心残存。熔覆层中共晶相 *I* 以鱼骨状、针状形态析出，仅有少量灰色或黑色的块状共晶相 *J* 存在，且熔覆层基体为枝晶状。

在等离子熔覆过程中，WC 颗粒熔解，熔池中新

增的 W 原子和 C 原子与其他合金元素发生多种相变反应^[25]，生成成分复杂的碳化物相，且随着温度和合金元素浓度的不同，碳化物的种类和形态也不同。当熔覆电流较小时，因熔池温度较低，且新熔解的 W 和 C 的含量较少，W 原子和 C 原子扩散不充分，W 的碳化物以块状先共晶相析出^[12]。综合 EDS 能谱和 XRD 结果可知，该先共晶相为富 (W、Cr) 的 $M_{23}C_6$ 及 M_7C_3 共晶组织 (见表 3 中 *A*、*C* 等)。当熔覆电

表 3 熔覆层不同物相能谱成分分析
Tab.3 EDS spectra of different phases in the coating

Positions	Current/A	wt. %						
		Fe	Ni	Si	Cr	W	C	B
<i>A</i>	110	8.52	40.11	3.92	34.20	3.85	9.40	
<i>B</i>		11.02	73.19	3.70	5.09	0.60	4.64	1.76
<i>C</i>	140	3.88	27.05		54.95	8.94	5.18	
<i>D</i>		12.03	66.64	4.97	8.92	2.89	4.55	
<i>E</i>		15.90	70.11	3.38	7.30	0.34	2.97	
<i>F</i>	170	21.70	10.86	2.28	47.54	8.90	8.72	
<i>G</i>		12.30	23.46	4.84	41.11	6.29	12.00	
<i>H</i>		17.74	64.40	1.06	4.69	0.63	7.42	4.06
<i>I</i>	200	22.81	14.01	0.04	43.77	16.85	1.61	0.91
<i>J</i>		16.47	8.09		43.39	23.07	8.98	
<i>K</i>		26.63	53.46	0.40	5.35	1.56	7.94	4.66

流增大时, 熔池温度增高, 且 W、C 等元素的含量增大, 熔池中成分过冷度增大, 使得初始奥氏体形成树枝晶结构, 初始奥氏体与金属溶液间相界面的增大使得共晶碳化物的形核率增大, 且碳化物横向长大的速度受到抑制, 因此 W 的碳化物在液相中以鱼骨状、羽毛状等过共晶组织析出^[26-27]。EDS 能谱结果显示, 它同样为富 (W、Cr) 相 (见表 3 中的 F、I)。结合 XRD 检测结果可知, 鱼骨状共晶组织为 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 、 FeW_2B_2 等, 碳化物的形态及成分均发生了明显变化。

2.3 硬度、磨损质量损失及剪切强度分析

在不同电流下, 含 WC 镍基熔覆层的维氏硬度检测结果如图 4 所示。随着熔覆电流的增大, 熔覆层的硬度逐渐下降。在熔覆电流为 110 A 时, 焊接熔覆层的硬度最高, 达到 846.7HV。分析其原因可知, 随着熔覆电流的增大, 熔覆层的稀释率提高, 虽然 W、C 等元素熔解增多, 但其主要与合金元素形成共晶碳化物, 导致对熔覆层基体的固溶强化作用减弱, 综合作用导致熔覆层基体硬度下降。

不同电流下熔覆试样的性能如图 5 所示。随着熔覆电流的增大, 试样的抗剪强度逐渐增大。其中, 当电流由 110 A 增至 140 A 时, 熔覆层的抗剪强度由 174.9 MPa 提高至 355.6 MPa。继续增大电流, 熔覆

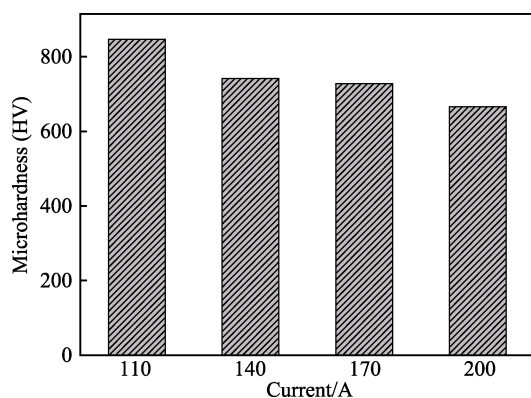


图 4 不同熔覆层的硬度
Fig.4 Microhardness of different coatings

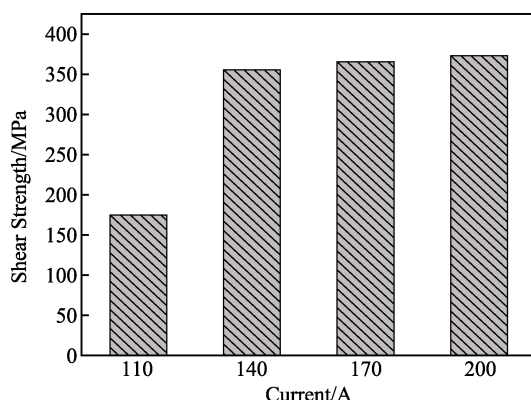


图 5 不同熔覆层抗剪强度
Fig.5 Shear strength of different coatings

层抗剪强度的增长趋势变缓。当电流增至 200 A 时, 熔覆层的抗剪强度提高至 373.2 MPa。

不同熔覆层的磨损损失曲线如图 6 所示。整体而言, 在 140 A 下试样的磨损损失最小, 耐磨性最好; 其次是在 170 A 下制备的试样; 在 200 A 下制备的试样的耐磨性最差。此外, 在 110、140 A 下制备的试样经过一段时间的磨损后, 其磨损曲线较为稳定; 在 170、200 A 下制备的试样的磨损区间存在较明显的起伏。

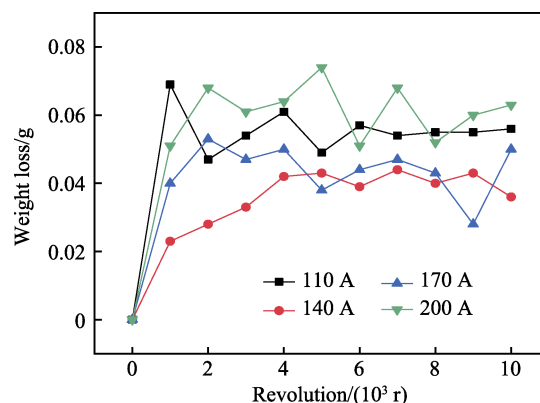


图 6 不同熔覆层的磨损特性曲线
Fig.6 Wear characteristic curves of different coatings

2.4 磨粒磨损形貌分析

不同电流下制备试样的磨损形貌如图 7 所示。当熔覆电流为 110 A 时, 熔覆层表面存在较多的深色浮凸硬质相, 阻挡了犁沟的扩展, 但个别硬质相表面存在犁沟。硬质相间的熔覆层基体有多处犁沟, 存在一定程度的磨损。当熔覆电流为 140 A 时, 熔覆层表面存在浮凸尺寸较大的不规则块状和花瓣状硬质相, 有效阻挡了磨粒磨损。硬质相间的基体较光滑, 无明显犁沟, 磨损程度最轻。当电流增至 170 A 时, 熔覆层表面分布着较多的鱼骨状凹坑, 凹坑内存在断续的白色颗粒。结合前述微观组织研究及白色颗粒成分的分析 (如表 4 所示), 确定白色颗粒为磨损后残余的鱼骨状共晶碳化物颗粒。熔覆层表面部分区域存在块状硬质相, 存在一定程度的磨损。当熔覆电流为 200 A 时, 其熔覆层表面与熔覆电流为 170 A 的熔覆层类似, 其表面遍布较多的不规则凹坑, 且无块状硬质相存在。熔覆层表面存在较多的宽且深的犁沟, 磨损程度较为严重。

2.5 分析与讨论

首先分析熔覆电流对熔覆层结合性能的影响。随着熔覆电流的增大, 熔覆层中 Fe 元素的质量分数由 11.02% 增至 26.63% (见表 3), 说明热输入量的增大使得熔池中熔覆层与基体间元素的扩散流动增强, 稀释率增大, 熔覆层中碳及合金元素含量降低, 熔覆层基体韧性增加, 在受到应力时抵抗裂纹产生及扩展的

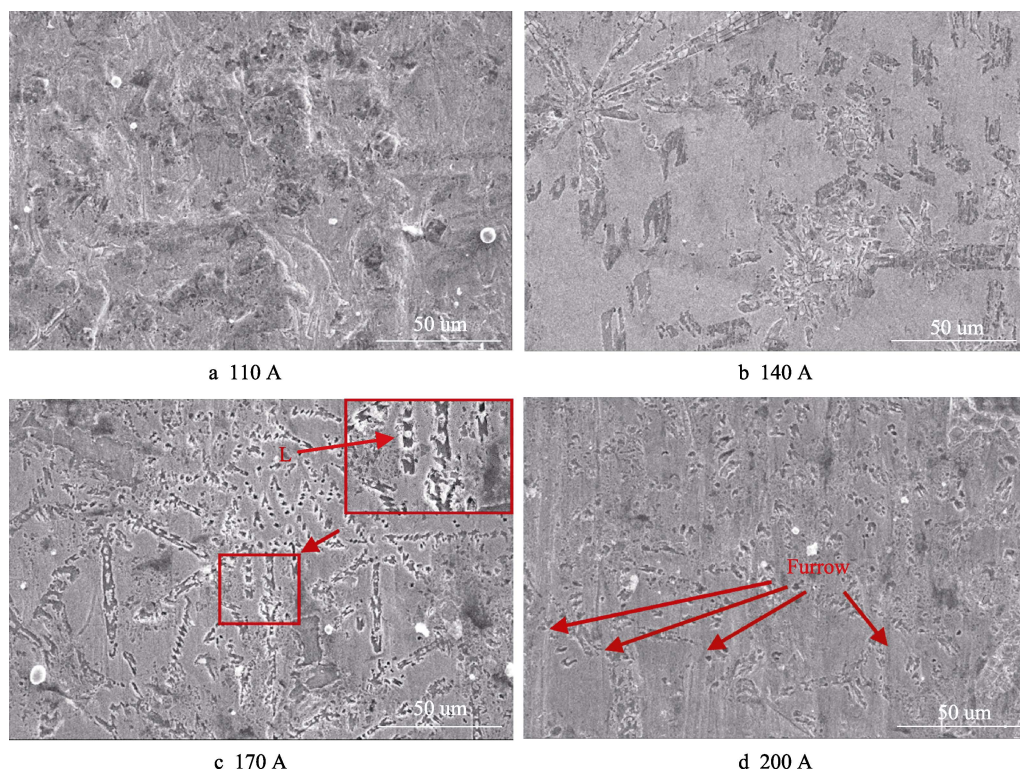


图 7 不同熔覆层磨粒磨损形貌
Fig.7 Abrasion morphology of different coatings

表 4 170 A 时耐磨层磨损表面颗粒能谱检测结果
Tab.4 EDS spectra of particles on the
coating surface by 170 A

Element	wt. %					
	Fe	Ni	Si	Cr	W	C
L	19.61	17.07	0.53	47.02	9.65	6.12

能力增大。同时,当电流增大时,WC 颗粒的熔解程度增大、尺寸减小,其形状也由不规则多边形变为椭圆形,因此 WC 颗粒对熔覆层基体的割裂作用减弱,且椭圆形 WC 颗粒因无尖锐棱角,因此不易出现应力集中,在应力作用下不易萌生裂纹,综合作用使得熔覆层的抗剪强度增大。当熔覆电流增至一定程度时,因耐磨层组织中生成的共晶碳化物等硬质相增多,耐磨层韧性下降,导致抗剪强度的增长趋势放缓。

其次,分析熔覆电流对熔覆层耐磨性的影响。在熔覆电流为 110 A 时,WC 颗粒的熔解量较小,熔池中的 W、C 元素的含量较低。同时,因冷速较快, W 与 Cr、Ni 等元素新生成的共晶相来不及长大。小尺寸共晶相无法有效抵挡磨粒磨损,虽然熔覆层基体的硬度较高,但因共晶相对熔覆层基体的保护作用较差,小尺寸共晶相间的熔覆层基体磨粒磨损严重,因此耐磨性较差。当熔覆电流增至 140 A 时,熔池的输入热量增大,WC 颗粒的熔解程度增大,熔池中 W 和 C 元素的含量增大。同时,因熔池冷速放缓,新生成的硬质相长大至数十微米,生成了密布于大块硬质相

间的细小块状共晶相。大块共晶相可有效抵挡硬质磨粒的冲击和犁削,细小块状共晶组织可很好地保护大块共晶相间的基体,保证基体对大块共晶相的固定与支撑,两者的协同作用使得熔覆层的耐磨性能显著提升。当熔覆电流增至 170 A 及以上时,因熔池温度和元素浓度发生变化,熔池处于高温的时间更久,冷速变慢,共晶相形态由颗粒、块状变为枝晶状、鱼骨状。由于合金元素形成了共晶组织,且熔覆层的稀释率增大,因此熔覆层基体中的合金元素含量降低,基体硬度下降,耐磨性下降。质地脆硬的细长鱼骨状共晶组织在硬质磨粒的冲击作用下部分部位出现断裂,导致共晶碳化物呈间断状。在硬质磨粒的不断冲击磨蚀下,间断状共晶碳化物的棱角磨损严重,形成了椭圆形的共晶碳化物颗粒。同时,颗粒周围的基体不断被磨损,基体与共晶碳化物颗粒的接触面积减少,结合力下降。由于共晶碳化物颗粒的体积较小,因此当其周围基体磨损到一定程度时,共晶碳化物颗粒在硬质磨粒的冲击下从基体表面脱落,形成鱼骨状凹坑。此时,耐磨层基体无共晶碳化物的保护,磨损加剧。基体在磨损一段时间后,鱼骨状凹坑形貌消失,表面残存点状凹坑。基体继续磨损,直至下方鱼骨状共晶碳化物露出,重复上述磨损过程。鱼骨状共晶碳化物的磨粒磨损失效过程如图 8 所示。在磨损的不同阶段,熔覆层耐磨性的变化可能是 170 A 及 200 A 试样磨损曲线存在明显起伏的原因。

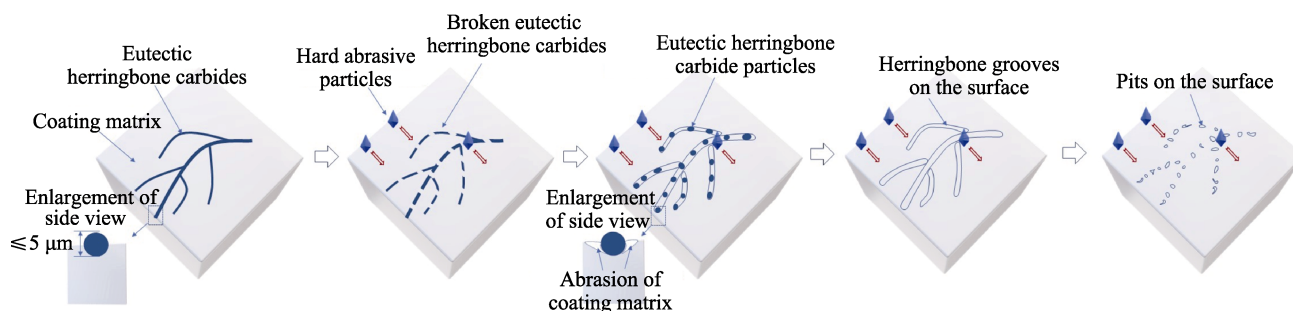


图 8 鱼骨状共晶碳化物磨粒磨损示意图

Fig.8 Schematic diagram of abrasion process of herringbone hypereutectic structure

3 结论

1) 随着熔覆电流的增大, Ni60+WC (10%) 微粒熔覆层的硬度逐渐下降, 抗剪强度增大, 耐磨性先提高后降低。当熔覆电流为 140 A 左右时, 熔覆层的综合性能最优。

2) 不同电流下制备的熔覆层物相组成相似, 主要为 γ -(Fe,Ni)、 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 、WC、 W_2C 、FeNi₃、FeW₂B₂ 等。

3) 当熔覆电流较小时, 熔覆层中的 W、Cr、C 等合金元素以块状先共晶相析出, 不同尺寸的共晶相协同作用, 可有效提高熔覆层的耐磨粒磨损性能。当熔覆电流较大时, 熔覆层中的 W、Cr、C 等合金元素以鱼骨状过共晶相析出, 在磨损过程中易受到磨粒冲击, 从而发生断裂、脱落, 使得耐磨粒磨损性能变差。

参考文献:

- [1] YANG Gui-rong, HUANG Chao-peng, SONG Wen-ming, et al. Microstructure Characteristics of Ni/WC Composite Cladding Coatings[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016, 23(2): 184-192.
- [2] 袁有录, 李铸国. Ni60A+WC 增强梯度涂层中 WC 的溶解与碳化物的析出特征[J]. 材料工程, 2013, 41(11): 12-19.
YUAN You-lu, LI Zhu-guo. Dissolving and Precipitating Characteristics of WC and Carbides in the Ni60A+WC Graded Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(11): 12-19.
- [3] 唐康康, 丁彰雄, 李超. 纳米 WC 增强 Ni 基金属熔层组织结构与抗磨粒磨损特性[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 27-32.
TANG Kang-kang, DING Zhang-xiong, LI Chao. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Nano-WC Reinforced Ni-Based Alloy Spray-Melted Coatings[J]. Surface Technology, 2017, 46(8): 27-32.
- [4] 樊帅奇, 张蕾涛, 李海涛, 等. WC 初始状态对激光熔覆 Ni60/WC 涂层组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(6): 157-162.
FAN Shuai-qi, ZHANG Lei-tao, LI Hai-tao, et al. Effect

of Initial State of WC on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni60/WC Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(6): 157-162.

- [5] 刘峰, 李超毅, 秦鹏翔, 等. 金属相成分对 WC 颗粒强化激光熔覆金属熔覆层力学性能的影响[J]. 材料保护, 2019, 52(9): 95-99.
LIU Feng, LI Chao-yi, QIN Peng-xiang, et al. Effect of Metal Phase Composition on Mechanical Properties of Laser Cladded WC Reinforced Metallic Composite Coating [J]. Materials Protection, 2019, 52(9): 95-99.
- [6] 申井义, 林晨, 姚永强, 等. 高频微振对激光熔覆镍基 WC 增强涂层的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 230-237.
SHEN Jing-yi, LIN Chen, YAO Yong-qiang, et al. Effect of High Frequency Microvibration on Laser Cladding Nickel-Based WC Reinforced Coatings[J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 230-237.
- [7] BANSAL A, ZAFAR S, SHARMA A K. Microstructure and Abrasive Wear Performance of Ni-Wc Composite Microwave Clad[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(10): 3708-3716.
- [8] 田治泰. 镍基碳化钨氮化铬复合涂层组织与性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018: 11-52.
TIAN Zhi-tai. Study on Microstructure and Properties of Nickel-Base Tungsten Carbide Composite Coating[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018: 11-52.
- [9] 郭岩, 刘刚, 李太江, 等. 镍基碳化钨颗粒增强复合熔覆层的组织结构与摩擦学性能[J]. 金属热处理, 2017, 42(8): 6-10.
GUO Yan, LIU Gang, LI Tai-jiang, et al. Microstructure and Tribological Properties of Ni-Based WC Particles Reinforced Composite Clad Layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(8): 6-10.
- [10] 王振廷, 陈华辉. 碳化钨颗粒增强金属基复合材料涂层组织及其摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(3): 203-206.
WANG Zhen-ting, CHEN Hua-hui. Microstructure and Friction and Wear Behavior of Induction Clad Ni-Based Composite Coating Reinforced with Micro- and Nano-WC Particulates[J]. Tribology, 2005, 25(3): 203-206.
- [11] 疏达. 激光熔覆碳化钨增强镍基涂层原位合成机制及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017: 29-103.
SHU Da. Study on In-Situ Synthesized Mechanism and

- Property of Tungsten Carbide Reinforced Ni-Based Coating by Laser Cladding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017: 29-103.
- [12] 崔祥祥. 激光熔覆纳米碳化钨/镍基涂层的制备及摩擦学性能研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2020: 37-54.
- CUI Xiang-xiang. Preparation and Tribological Properties of Laser Cladding Nano-WC/Ni-Based Coating[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2020: 37-54.
- [13] 肖奇, 孙文磊, 刘金朵, 等. Ni60A/WC 激光熔覆涂层表面抗蚀行为[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8146-8150.
- XIAO Qi, SUN Wen-lei, LIU Jin-duo, et al. Surface Corrosion Behavior of Ni60A/WC Laser Cladding Coating [J]. Materials Reports, 2021, 35(8): 8146-8150.
- [14] 王文权, 杜明, 张新戈, 等. H13 钢表面电火花沉积 WC-Ni 基金属陶瓷涂层微观组织及摩擦磨损性能[J]. 金属学报, 2021, 57(8): 1048-1056.
- WANG Wen-quan, DU Ming, ZHANG Xin-ge, et al. Microstructure and Tribological Properties of WC-Ni Matrix Cermets Coatings Prepared by Electrospark Deposition on H13 Steel Substrate[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(8): 1048-1056.
- [15] DAI Qiu-lian, LUO Can-bin, YOU Fang-yi. Crack Restraining Methods and Their Effects on the Microstructures and Properties of Laser Cladded WC/Fe Coatings[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(12): 2541.
- [16] 杨二娟, 李勇, 李巍, 等. WC 含量对激光熔覆 NiCrBSi-WC 复合涂层显微结构及力学性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(9): 238-244.
- YANG Er-juan, LI Yong, LI Wei, et al. Effect of WC Particle Content on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Cladded NiCrBSi-WC Composite Coating[J]. Surface Technology, 2019, 48(9): 238-244.
- [17] 李朋洋, 余新泉, 黄怡, 等. 火焰喷焊和等离子堆焊制备 Ni60 及 Ni60-WC 涂层的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2017, 41(10): 38-43.
- LI Peng-yang, YU Xin-quan, HUANG Yi, et al. Microstructure and Properties of Ni60 and Ni60-WC Coatings by Flame Spraying and Plasma Arc Surfacing[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(10): 38-43.
- [18] 刘元彬. Ni60A/WC-¹²Co 等离子堆焊工艺和性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016: 21-54.
- LIU Yuan-bin. Research on Process and Properties of Plasma arc Welding Ni60A/WC-¹²Co[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016: 21-54.
- [19] 陈稳. 热处理对等离子堆焊 WC 增强镍基覆层组织与热疲劳性能的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018: 21-59.
- CHEN Wen. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Thermal Fatigue Properties of WC Reinforced Ni-Based Coatings by PTAW[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018: 21-59.
- [20] 傅卫, 王惜宝, 陈国喜. 镍基 WC 等离子弧熔敷层的组织和高温磨损性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 65-68.
- FU Wei, WANG Xi-bao, CHEN Guo-xi. Microstructure and High Temperature Abrasion Resistance of Ni-Based WC Composite Layer Deposited by Plasma Arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 65-68.
- [21] 芦琪, 杜聪, 王洪福, 等. 热锻模等离子喷焊制备 Ni60 基陶瓷覆层的试验研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(8): 131-133.
- LU Qi, DU Cong, WANG Hong-fu, et al. Experiments Research on Ni-Based Ceramics Layers by Plasma Spray Welding on Hot Forging Die[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(8): 131-133.
- [22] 段文军, 李贞, 王好平, 等. 盾构滚刀材料表面镍基碳化钨涂层摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 313-321.
- DUAN Wen-jun, LI Zhen, WANG Hao-ping, et al. Tribological Properties of Ni-Based WC Coating Prepared on Shield Disc Cutter Material Surface[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 313-321.
- [23] 仇会健, 黄海鸿, 赵伦武, 等. 磁场调控等离子喷焊制备 Ni/WC 复合涂层[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31(2): 31-36.
- ZHANG Hui-jian, HUANG Hai-hong, ZHAO Lun-wu, et al. Ni/WC Composite Coating Prepared by Magnetic Field Controlled Plasma Transfer Arc Welding[J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(2): 31-36.
- [24] GUSTAFSON P. A Thermodynamic Evaluation of the C-Cr-Fe-W System[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(10): 2547-2554.
- [25] 黄汝清, 李祖来, 山泉, 等. 钢、铁基复合材料中铸造碳化钨颗粒的分解过程[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(2): 164-167.
- HUANG Ru-qing, LI Zu-lai, SHAN Quan, et al. Decomposition Process of Casting Tungsten Carbide Particle in Steel/Iron Substrate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(2): 164-167.
- [26] 李福泉, 魏连峰, 李俐群, 等. 激光-TIG 复合熔注制备 WC_p/Al 复合材料层的微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(4): 619-624.
- LI Fu-quan, WEI Lian-feng, LI Li-qun, et al. Microstructures of WC_p/Al Metal Matrix Composites Layer Produced by Hybrid Laser-TIG Melt Injection[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 619-624.
- [27] 李力军, 杨瑞林, 郭战利. 稀土在 WC 颗粒复合耐磨材料中的作用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(12): 23-26.
- LI Li-jun, YANG Rui-lin, GUO Zhan-li. Effect of Rare Earth in Complex Wear Resistant Material Containing WC Granules[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(12): 23-26.