

WC质量分数对激光熔覆Ni基涂层组织和性能的影响

王杉杉, 师文庆, 吴腾, 程才, 朱志凯, 陈熙淼, 谢林圯, 何宽芳

Effect of WC mass fraction on microstructure and properties of laser cladding Ni-based coatings

引用本文:

王杉杉, 师文庆, 吴腾, 程才, 朱志凯, 陈熙淼, 谢林圯, 何宽芳. WC质量分数对激光熔覆Ni基涂层组织和性能的影响[J]. 激光技术, 2023, 47(4): 463–468.

WANG Shanshan, SHI Wenqing, WU Teng, CHENG Cai, ZHU Zhikai, CHEN Ximiao, XIE Linyi, HE Kuanfang. Effect of WC mass fraction on microstructure and properties of laser cladding Ni-based coatings[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(4): 463–468.

您可能感兴趣的其他文章

1. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究

引用本文: 李镭昌, 魏昕. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究[J]. 激光技术, 2023, 47(1): 52–58.

2. CeO₂对激光熔覆Ni60合金涂层组织及性能的影响

引用本文: 陈顺高, 张晓明, 郑启池, 等. CeO₂对激光熔覆Ni60合金涂层组织及性能的影响[J]. 激光技术, 2017, 41(6): 904–908.

3. Ni60激光熔覆工艺参数对涂层裂纹及厚度的影响

引用本文: 黄海博, 孙文磊. Ni60激光熔覆工艺参数对涂层裂纹及厚度的影响[J]. 激光技术, 2021, 45(6): 788–793.

4. 激光重熔对In718熔覆层组织与性能的影响

引用本文: 晁祥瑞, 黄勇, 陈子鹏, 等. 激光重熔对In718熔覆层组织与性能的影响[J]. 激光技术, 2023, 47(4): 506–512.

5. 激光熔覆Fe06+(TiC/Mo)复合涂层硬度及耐磨性能研究

引用本文: 杨凯欣, 孙文磊, 肖奇, 等. 激光熔覆Fe06+(TiC/Mo)复合涂层硬度及耐磨性能研究[J]. 激光技术, 2023, 47(3): 393–399.

文章编号: 1001-3806(2023)04-0463-06

WC 质量分数对激光熔覆 Ni 基涂层组织和性能的影响

王杉杉¹, 师文庆^{1*}, 吴 腾¹, 程 才¹, 朱志凯¹, 陈熙森¹, 谢林圯¹, 何宽芳²

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 湛江 524088; 2. 佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 佛山 528225)

摘要: 为了研究 WC 质量分数对 Ni60 粉末激光熔覆涂层性能的影响, 采用激光熔覆技术在 Q235 碳素工具钢上制备了 WC+Ni60 的复合涂层, 并进行了理论分析和实验验证, 取得了熔覆层几何形貌、稀释率、显微组织及硬度方面的数据。结果表明, 添加 WC 后, 涂层外观成形良好, 在涂层硬度上有明显的提升效果; 稀释率随着 WC 质量分数的增加整体呈现先升高后降低的趋势; 当 WC 质量分数为 0.4 时为合适的粉末配比, 不但能保证微观组织致密、枝晶尺寸均匀, 也可避免颗粒和气孔对涂层质量造成的影响, 并保证了 2 种熔覆材料融合性和涂层整体硬度。此研究结果对激光熔覆添加 WC 的 Ni 基复合涂层制备有一定指导作用。

关键词: 激光技术; 激光熔覆; WC 质量分数; 微观组织; 硬度

中图分类号: TG174.4; TN249 文献标志码: A doi: 10.7510/jgis. issn. 1001-3806. 2023. 04. 004

Effect of WC mass fraction on microstructure and properties of laser cladding Ni-based coatings

WANG Shanshan¹, SHI Wenqing¹, WU Teng¹, CHENG Cai¹, ZHU Zhikai¹, CHEN Ximiao¹, XIE Linyi¹, HE Kuanfang²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Foshan Institute of Science and Technology, Foshan 528225, China)

Abstract: In order to investigate the effect of WC mass fraction on the properties of Ni60 powder laser cladding coating, the WC and Ni60 composite coating was prepared on Q235 carbon tool steel by laser cladding technology, and the theoretical analysis and experimental verification were carried out. The date of geometrical morphology, dilution rate, microstructure and hardness of cladding layer were obtained. The results show that, after adding WC, the coating has good appearance and the hardness of coating can be improved obviously. The dilution rate increased firstly and then decreased with the increase of WC mass fraction. When the WC mass fraction is 0.4, the appropriate powder ratio can not only ensure the dense microstructure and uniform dendrite size, but also avoid the influence of particles and pores on the coating quality, and ensure the fusion of two coating materials and the overall hardness of the coating. The results of this study have a certain guiding role for the preparation of Ni-based composite with WC added by laser melting coating.

Key words: laser technique; laser cladding; WC mass fraction; microstructure; hardness

引言

Q235 碳素工具钢有良好的韧性、优良的可塑性和可焊接性, 且制造成本低, 这些优点使得其可以广泛应用于航空航天、航海, 以及材料制造等相关领域^[1]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073089); 广东省教育厅普通高校重点领域专项项目(2020ZDZX2061); 广东海洋大学研究生“一支部一品牌”“一党员一旗帜”创建项目

作者介绍: 王杉杉(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光加工及应用。

* 通讯联系人。E-mail: swqafj@163.com

收稿日期: 2022-05-20; 收到修改稿日期: 2022-06-20

但是 Q235 由于含碳量低的缘故导致硬度较弱, 在较恶劣条件下作为零部件工作时就显得硬度和耐磨性不足, 且易腐蚀, 这些极大程度地限制了 Q235 成为高性能关键零部件。因此对 Q235 碳素工具钢进行表面改性, 来增强其性能有着重要意义。

激光熔覆技术作为一种表面改性技术, 就是利用高能量激光束在选用材料的表面镀上一层乃至多层的高性能涂层, 以达到使用要求^[2-3]。采用激光熔覆技术, 可节省高性能材料、降低生产成本, 还可增强其表面硬度、耐磨和耐腐蚀等性能^[4-6]。近年来, 因陶瓷增强金属基复合涂层所具有的优良特性, 引起了人们的广泛关注^[7-8]。其中 WC 颗粒拥有极高的硬度、稳定的

化学性能^[9-11],但WC熔点较高,难以与基材结合;而Ni60粉末具有成本低、自熔性好等特点,与WC结合有良好的湿润性,在零部件预保护和表面修复中被广泛应用^[12]。

LUO等人^[13]研究了微米级WC颗粒及纳米级WC颗粒对基材耐磨性能的影响,发现添加WC颗粒可以提高其性能,但WC质量分数太低,强化效果不明显;WC质量分数太高,易引起裂纹。DING等人^[14]试验探究了添加不同质量分数的WC+Y₂O₃对镍基合金涂层性能有何影响,发现混合粉末(WC+质量分数为0.1的Y₂O₃)的质量分数为0.3时,熔覆涂层晶粒组织紧密,涂层硬度和耐磨性最佳。LI等人^[15]采用单层激光熔覆、过渡层梯度熔覆和双层熔覆制备了3种Ni50A/WC复合涂层,比较和分析了熔覆层的形貌、微观组织和裂纹生成特点及成因,以及探讨熔覆涂层WC组织演化对裂纹形成的作用机制。WANG等人^[16]为了研究不同WC质量分数对于涂层组织形态、组成成分和硬度的影响,采用激光熔覆技术在Q235钢上制备了镍基碳化钨复合涂层,结果发现:当WC质量分数为0.2时,稀释率是最低的、涂层耐磨性能最佳;WC质量分数为0.4时,涂层平均硬度与基材相比提高5倍之多。

HU等人^[17]在不锈钢上制备不同WC添加量的Ni基熔覆涂层,发现WC颗粒并未呈均匀分布;晶粒细化程度、涂层的热力学稳定性和显微硬度都随着WC质量分数的增加有所提升。XIA等人^[18]探究了在镍基复合涂层中添加粒径大小不一样的WC颗粒的作用,发现复合材料的平均显微硬度分别提高59.70%(粗WC)和74.66%(细WC),磨损率分别降低84.87%(粗WC)和89.17%(细WC);发现WC颗粒具有物理屏蔽和固溶强化作用,提高了GH3536涂层的耐腐蚀性能。

在上述国内外学者研究的基础上,为了探讨WC质量分数的变化对Ni基涂层组织形态和性能影响的变化规律,本次实验中便选择了Ni60作为激光熔覆涂层的粉末,选择在Q235基材上进行,以此来分析不同WC质量分数的添加对Ni60复合涂层的宏观形貌、稀释率、微观组织及硬度性能等方面的影响机制。这可以为激光熔覆陶瓷增强金属基复合涂层应用于实际生产生活中提供实验依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验的基体材料用Q235碳素工具钢,尺寸为

90 mm×50 mm×3 mm(长×宽×高)。选择WC粉末(纯度为99.8%)与Ni60(平均粒径为30 μm~150 μm)的混合粉末为熔覆材料,设置WC的质量分数分别为0.0、0.2、0.4、0.6、0.8。Q235碳素工具钢、Ni60粉末质量成分如表1、表2所示。图1为Ni60和WC粉末的微观形貌图。

表1 Q235碳素钢化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of Q235 carbon steel (mass fraction)

type	C	Si	Mn	P	S	Fe
Q235	0.15	0.15	0.25	0.12	0.11	balance

表2 Ni60粉末化学成分(质量分数)

type	C	Cr	B	Si	Fe	Ni
Ni60	0.006~0.01	0.14~0.17	0.025~0.045	0.03~0.045	≤0.15	balance

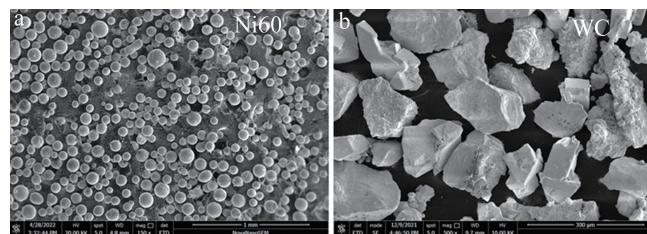


图1 粉末SEM形貌图

Fig. 1 Powders SEM morphology diagram

1.2 实验方法

实验设备选用XL-F2000W光纤激光熔覆系统进行激光熔覆实验,其激光功率阈值为0 W~2000 W。送粉方式采用预涂法,实验前,将WC粉末和Ni60粉末按照表3的成分配比进行混合。用粒度为800目的和1200目的砂纸按照顺序对基材料进行抛光,以此除去基材的表面氧化膜,再用无水乙醇将其冲洗后干燥备用。WC与Ni60的混合粉末以1 mm左右的厚度均匀铺在基体表面。通过先前的预试验发现,工艺参数为激光功率1600 W、扫描速率10 mm/s、离焦量+5 mm时产生的熔覆效果较好,因此利用该工艺参数来开展单道单层激光熔覆实验。激光熔覆加工示意图如图2所示。熔覆试样会经过线切割、镶嵌、研磨、抛光和腐蚀(腐蚀液为质量分数0.05的硝酸酒精)等工序进行处理,再利用XJL-302/302BD型号的光学金相显微镜对涂层横截面形貌进行观察;利用JSM6460扫描电

表3 WC和Ni60成分配比(质量分数)

type	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
WC	0	0.2	0.4	0.6	0.8
Ni60	1	0.8	0.6	0.4	0.2

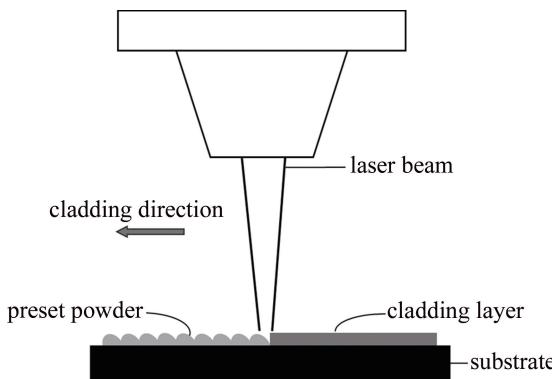


图2 激光熔覆加工示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser cladding processing

子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对涂层微观组织进行观察;利用 MHVD-1000AT 显微硬度机来测定涂层显微硬度。

2 结果与分析

2.1 涂层宏观形貌分析

涂层宏观形貌如图3所示。自上而下依次加入WC质量分数为0.0、0.2、0.4、0.6、0.8的单道熔覆涂层,对应试样S₁~S₅。可以看出,涂层表面熔覆效果良好,均表面光滑,无气孔和明显裂纹,成形性良好。说明WC和Ni60的混合粉末使用是能够满足涂层表面熔覆效果良好的基本需求。

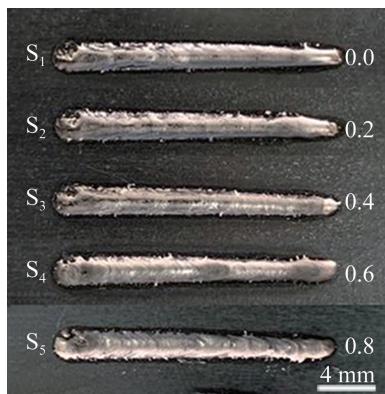


图3 激光熔覆涂层宏观形貌图

Fig. 3 Macro morphology of laser cladding layer

2.2 涂层横截面形貌

由图4所呈现的熔覆层横截面的形貌可看出,试样S₁~S₅的涂层与基体之间有了一道明亮的熔合线形成,这种现象可证明基体和熔覆粉末二者之间形成了良好的冶金结合。所有试样涂层都呈现半椭圆状,无明显裂纹,添加有WC的4个试样(S₂~S₅)中均出现不同程度的颗粒,对比发现,S₃(WC质量分数为0.4)形貌较好。

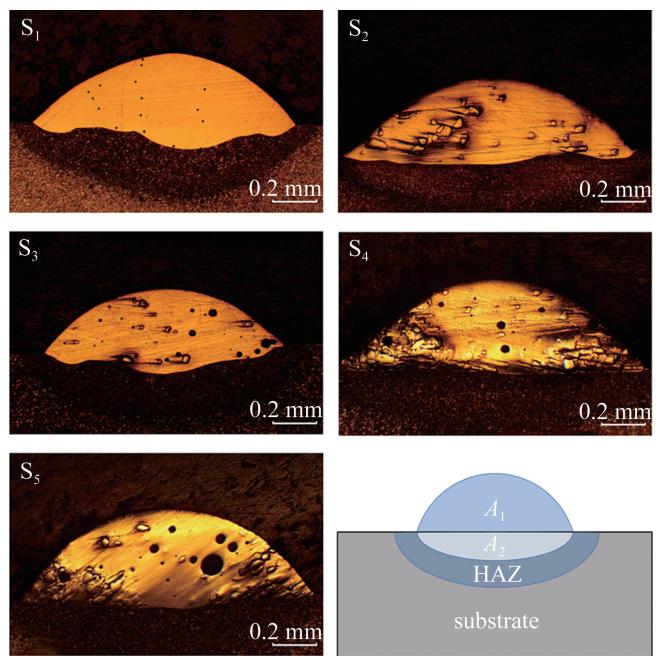
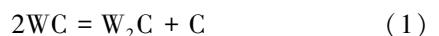


图4 熔覆层横截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cladding section

图4中出现的颗粒状为熔覆过程中未熔融的WC颗粒及其衍生相,发现WC的密度为15.63 g/cm³,是Ni60(7.53 g/cm³)的2倍左右,受重力和涂层冲刷作用,WC颗粒下沉速度较快,所以多出现在熔池的中下部^[12]。图4中WC颗粒边缘形状不同,表明WC的加入对涂层也会产生影响^[19]。

观察图4中的S₂~S₅试样,发现涂层的孔洞数量逐步增多,即随着WC粉末质量分数的增多,涂层出现孔洞,其原因有:(1)粉末材料的物理性能存在差异,WC颗粒的热膨胀、热收缩系数与Ni60不同^[19],加之激光熔覆的快速升温和凝固的特性,导致了涂层中存在孔洞;(2)未受包裹的WC粒子,在熔覆过程中部分WC在熔池中会发生如下脱碳反应^[20]:



WC在脱碳过程中产生的C原子会与O原子结合,化学反应生成一氧化碳和二氧化碳气体。在激光熔覆技术熔池有极快冷却速度的特征下,生成的气体一部分因不能及时逸散而滞留于涂层内部,然后就形成了气孔。

2.3 涂层的稀释率

可将图4的熔覆层横截面形貌分为三部分:熔覆区(cladding zone, CZ),结合区(bond zone, BZ),热影响区(heat affected zone, HAZ)。用A₁表示熔覆区面积,A₂表示结合区面积,D表示涂层稀释率。使用图

像处理软件 Image J 对 A_1 、 A_2 进行测量, 并按照下式进行稀释率的计算^[21]:

$$D = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times 100\% \quad (3)$$

由(3)式计算得出的稀释率如表 4 所示。涂层稀释率随着 WC 质量分数的增加整体呈先增加后减小的趋势。试样 $S_1 \sim S_5$ 的稀释率依次为 21.14%、13.16%、25.88%、12.22%、11.32%, 其主要影响因素是熔覆区面积 A_1 和结合区面积 A_2 。熔覆区面积 A_1 随着 WC 质量分数的添加先增加后减小再增加, 在 WC 质量分数为 0.4 时出现了突然下降。结合图 4 分析可以给出解释: $S_3 \sim S_5$ 试样涂层内部开始出现气孔和未熔 WC 颗粒, 并且气孔面积逐渐增加, 这将导致熔覆区面积 A_1 增加。结合区面积 A_2 先增加后减小, 这是由于随着 WC 质量分数的增加时, 同熔覆区面积 A_1 内, 激光熔覆涂层所需要的能量增加, 传递到结合区面积 A_2 能量减小, 但也受气孔和未熔 WC 颗粒影响, 从而导致稀释率数值出现波动。而且太低或太高的稀释率都会对涂层硬度造成一定的影响。

表 4 稀释率计算结果

Table 4 Calculation results of dilution rate

case	mass fraction of WC	A_1/mm^2	A_2/mm^2	$(A_1+A_2)/\text{mm}^2$	$D/\%$
S_1	0.0	0.25	0.07	0.32	21.14
S_2	0.2	0.29	0.04	0.33	13.16
S_3	0.4	0.20	0.07	0.27	25.88
S_4	0.6	0.34	0.05	0.39	12.22
S_5	0.8	0.36	0.05	0.41	11.32

2.4 涂层微观组织分析

通过凝固理论可知, 激光熔覆凝固组织的形貌是由结晶参数 G/R (G 是温度梯度、 R 是凝固速率) 决定的^[22-23]。图 5~图 9 是关于试样 $S_1 \sim S_5$ 熔覆涂层横截面上不同部位的显微组织特征。从图 5b、图 7b、图 8b、图 9b 皆可看出, 涂层底部与基体的 HAZ 形成了明亮的融合线, 在基材表面延伸生长了一层薄薄的平面晶^[24]。这是因为 Q235 的热传导性能好, 在结合界面形成大的正温度梯度和大过冷度, 结晶参数 G/R 最大。从图 7c 看出, 在靠近涂层底部的结合界面, 主要为致密、粗壮的树枝晶组织。温度梯度控制下枝晶的生长方向与热流方向正好相反, 理论上结合界面处与热流方向是相互垂直的, 所以树枝晶沿与结合界面垂直的方向在涂层中间或者上部继续生长^[25]。从图 8c 看出, 由于熔池中部的散热性下降, 且温度梯度较小, 所以涂层中部主要是纤细的树枝晶^[26]。

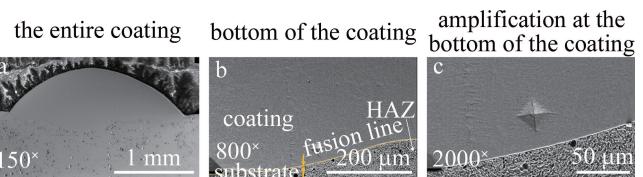


图 5 S_1 的熔覆层显微组织

Fig. 5 Microstructure of the S_1 cladding layer

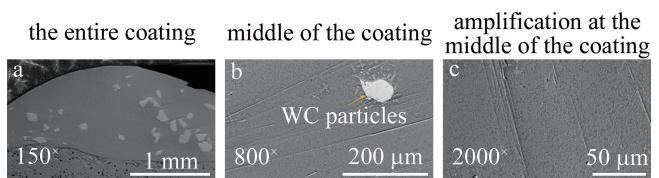


图 6 S_2 的熔覆层显微组织

Fig. 6 Microstructure of the S_2 cladding layer

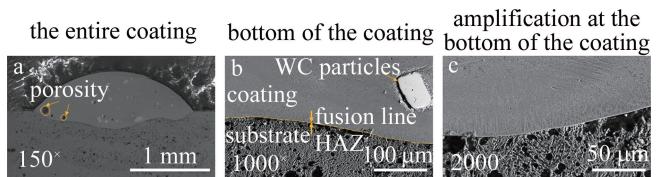


图 7 S_3 的熔覆层显微组织

Fig. 7 Microstructure of the S_3 cladding layer

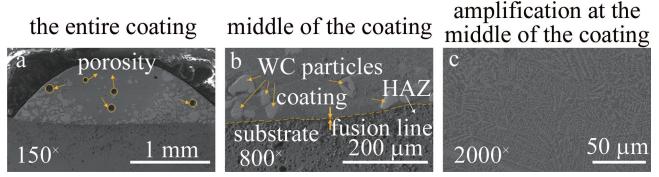


图 8 S_4 的熔覆层显微组织

Fig. 8 Microstructure of the S_4 cladding layer

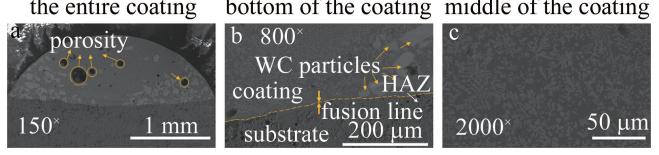


图 9 S_5 的熔覆层显微组织

Fig. 9 Microstructure of the S_5 cladding layer

对比来看: 如图 5c、图 6c 所示, S_1 、 S_2 的微观组织中晶粒较细小、枝晶生长不规律、组织不致密; 如图 7c、图 8c 所示, S_3 与 S_4 的微观组织中枝晶尺寸均匀、有方向性地向上生长, 组织细密; 如图 8b、图 9b 所示, S_4 、 S_5 由于 WC 质量分数的增加, WC 的边缘和周边区域产生了条状/块状/层状的二次碳化物, 这些二次碳化物属于脆性相, 容易造成局部应力集中和裂纹, 导致涂层质量较差^[19]。这也与前面分析出现聚集颗粒和大孔洞的原因一致, 即以未熔融的 WC 颗粒为新的形核中心, 还有 WC 溶解而形成的二次析出相。尤其是在 S_5 (WC 质量分数 0.8) 中, WC 颗粒未受 Ni 包裹的

数量增多,使得枝晶间扩散分布颗粒状中间相的数量也增多,异形核率提高,同时产生的大气孔也会抑制了枝晶的生长,最终导致组织不致密。

因此,得出在WC质量分数为0.4~0.6的条件下,既可确保微观组织密实、枝晶大小均一、生长规律一致,也能有效地规避颗粒、气孔等因素对熔覆涂层质量的影响。

2.5 涂层维氏硬度分析

在载荷1.96 N、保荷时间10 s,测量间距0.2 mm的情况下,每个试样沿最大熔深方向从涂层的顶部一直测试到基体,测试10个点,每个点横向位置左右取两个点,取3点平均值。从图10可知,随着WC质量分数的增加,S₁~S₅试样涂层的硬度依次提高,其中硬度值,S₅>S₃>S₄>S₂>S₁。说明WC质量分数的增加利于提高涂层硬度。S₂~S₅试样涂层相比基体材料的平均显微硬度193 HV_{0.2}均提高4倍以上。

虽然S₅的硬度与其它样品有明显的提升,但此硬度的提升并非由Ni60+WC复合陶瓷涂层带来的,而更多的是在较大比例WC粉末的作用下,使涂层内部、涂层表面含有较多未熔融WC颗粒而使涂层硬度增加^[27]。从图10中可以看出,当WC质量分数达到0.8时,未熔融的WC颗粒及其衍生相从底部逐步扩散到涂层顶部,其中WC分解会生成W和C元素(从(1)式和(2)式可得出),这两种元素固溶于基体中起到强化效果,但在冷却降温期间,这两种元素又会与合金元素(Ni、Cr等)生成新相重新析出并扩散分布在基体中,起到一定程度的析出、弥散强化效果^[28]。WC质量分数为0.8时,加之WC自身熔点太高,此质量分数下与Ni60融合性较差,不被包裹的WC粒子多,在熔覆过程中容易出现氧化、脱碳和烧损的现象,所以涂层才会存在较明显的大气孔。一般认为,WC的氧化、脱碳和烧损对复合涂层的性能是不利的^[19]。WC对复合涂层的性能影响是以上多种机制综合作用的结果,

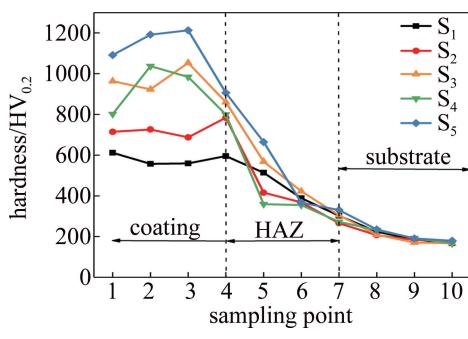


图10 维氏硬度分布图

Fig. 10 Vickers hardness profile

因此,认为当WC质量分数为0.4~0.6的情况下,既能保障两种材料的融合性,又能提升涂层整体的硬度。

3 结 论

(1) Ni60+WC复合涂层的表面熔覆情况较好,表面全部呈现光洁状态,没有气孔和明显的裂纹。通过对涂层横截面观察可知,涂层与基体都能够形成效果良好的冶金体。随着WC质量分数的不断增大,涂层的稀释率整体会呈现先升高后降低的趋势,其主要原因是熔覆区面积A₁和结合区面积A₂受气孔量和能量影响。

(2) 随着WC质量分数的增加,Ni60+WC复合涂层逐渐出现未熔融的WC颗粒、衍生相和气孔。添加有WC的4个试样中S₃(WC质量分数0.4)的形貌较好,同时微观组织致密、枝晶尺寸均匀。

(3) 随着WC质量分数的增加,S₂~S₅试样涂层硬度都有所提高。结果表明:有WC加入的陶瓷增强金属基复合涂层平均硬度是基体平均硬度的4倍以上。

结合上述分析,当WC质量分数为0.4时,可以保证两种材料的融合性,同时提升涂层的整体硬度。

参 考 文 献

- [1] WANG Y, LI H, LIANG J L, et al. Current status of research on corrosion behavior and surface corrosion protection of Q235 steel[J]. Electroplating & Finishing, 2019, 38(11): 545-548(in Chinese). 王悦,李慧,梁精龙,等. Q235钢的腐蚀行为及表面防腐研究现状[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(11): 545-548.
- [2] WANG H Zh, CHENG Y H, YANG J Y, et al. Influence of laser remelting on organization, mechanical properties and corrosion resistance of Fe-based amorphous composite coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 414(3): 127081.
- [3] HUANG G K, QU L, LU Y Zh, et al. Corrosion resistance improvement of 45 steel by Fe-based amorphous coating[J]. Vacuum, 2018, 153(3): 39-42.
- [4] WANG H Zh, CHENG Y H, ZHANG X Ch, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and properties of Fe based amorphous/nanocrystalline cladding coatings[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 250: 123091.
- [5] XI W Ch, SONG B X, WANG Z X, et al. Effect of laser re-melting on geometry and mechanical properties of YCF102 cladding layer[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 408: 126789.
- [6] WANG H Zh, CHENG Y H, YANG J Y, et al. Influence of laser remelting on organization, mechanical properties and corrosion resistance of Fe-based amorphous composite coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 414(3): 127081.
- [7] CHEN W, XU L Y, HAO K D, et al. Additive manufacturing of 15-5PH/WC composites with the synergistic enhancement of strength and ductility[J]. Materials Science and Engineering, 2022, A840: 142926.
- [8] ZHENG Zh H, LV J, LOU M, et al. Mechanical and tribological

- properties of WC incorporated Ti(C, N)-based cermets[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(7): 10086-10095.
- [9] LU L W, FENG D R, WANG Y R, *et al*. Microstructure, wear resistance and electrochemical properties of spherical/non-spherical WC reinforced Inconel 625 superalloy by laser melting deposition [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 74(12): 413-422.
- [10] CHEN H, LU Y Y, WU K H, *et al*. Effect of WC addition on TiC reinforced Fe matrix composites produced by laser deposition [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 434: 128185.
- [11] TAN Ch, HU J, SHI Q, *et al*. Enhanced hardness and toughness in WC/W2C-Ni-Cu composites fabricated by selective laser melting [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, 105: 105805.
- [12] FAN Sh Q, ZHANG L T, LI H T, *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 (in Chinese).
樊帅气, 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.
- [13] LUO J W, NIU B, CHEN J F, *et al*. Preparation technology and properties of metal matrix composite wear-resistant materials reinforced by WC particles[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2020, 12(4): 126-131 (in Chinese).
罗俊威, 牛犇, 陈俊孚, 等. WC 颗粒增强金属基复合耐磨材料制备工艺与性能研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 126-131.
- [14] DING Y X, WU Zh. Research of properties of laser cladding on Ni/WC-Y₂O₃ surface of 35CrMo steel[J]. *Surface Technology*, 2011, 40(5): 32-34 (in Chinese).
丁阳喜, 邬哲. 35CrMo 钢表面激光熔覆 Ni/WC-Y₂O₃ 熔覆层性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 32-34.
- [15] LI L Ch, WEI X. Study on the effect of laser cladding composite coating and its WC on crack formation mechanism[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(1): 52-58 (in Chinese).
李镭昌, 魏昕. 激光熔覆复合涂层 WC 对裂纹产生机理影响研究[J]. 激光技术, 2023, 47(1): 52-58.
- [16] WANG K M, LEI Y P, WEI Sh Zh, *et al*. Effect of WC content on microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC composite coating [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(7): 172-179 (in Chinese).
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.
- [17] HU Y J, WANG Z X, PANG M. Effect of WC content on laser cladding Ni-based coating on the surface of stainless steel[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103357.
- [18] XIA Y L, CHEN H N, LIANG X D, *et al*. Circular oscillating laser melting deposition of nickel-based superalloy reinforced by WC: Microstructure, wear resistance and electrochemical properties [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68(6): 1694-1704.
- [19] ZHANG H Y, ZHANG J, ZHU L, *et al*. Effects of WC content on microstructure and properties of TC4 composite prepared by laser cladding[J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(8): 83-87 (in Chinese).
张海云, 张金, 朱磊, 等. WC 含量对激光熔覆 TC4 涂层组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(8): 83-87.
- [20] LI Q, CHEN F Q, WANG Q, *et al*. Research progress of laser-cladding WC reinforced Ni-based composite coating[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(2): 129-143 (in Chinese).
李倩, 陈发强, 王茜, 等. 激光熔覆 WC 增强 Ni 基复合涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 129-143.
- [21] ZHANG J Ch, JIANG J B, HUANG X, *et al*. Effect of carbon nanotubes content on microstructure and properties of laser cladded Ni-based composite coating[J]. *Chinese Journal Lasers*, 2022, 49(2): 0202301 (in Chinese).
张家诚, 江吉彬, 黄旭, 等. 碳纳米管含量对激光熔覆镍基复合涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202301.
- [22] CAO J H, HOU Z B, GUO D W, *et al*. Morphology characteristics of solidification structure in high-carbon steel billet based on fractal theory[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(19): 12851-12862.
- [23] WANG H, QU C, ZHENG Y, *et al*. Study on the effect of vibration on solidification structures in the vibration cast-rolling process[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2021, 52(4): 452-459.
- [24] ZHU H, LI Y, LI B, *et al*. Effects of low-temperature tempering on microstructure and properties of the laser-cladded AISI 420 martensitic stainless steel coating[J]. *Coatings*, 2018, 8: 451.
- [25] DONG Y, SHU L S, LIN R. Microstructure and friction and wear properties of laser cladded Fe-Cr-Mo-Si alloy coating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1914007 (in Chinese).
董月, 舒林森, 林冉. 激光熔覆 Fe-Cr-Mo-Si 合金涂层的组织与摩擦磨损性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914007.
- [26] ZHANG L, CHEN X M, HUO J X, *et al*. Microstructure and wear-corrosion resistance performance of laser cladding martensite/ferrite coating[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2022, 27(2): 196-204 (in Chinese).
张磊, 陈小明, 霍嘉翔, 等. 激光熔覆马氏体/铁素体涂层的组织与抗磨耐蚀性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2022, 27(2): 196-204.
- [27] BAO Y F, GUO L P, ZHONG Ch H, *et al*. Effects of WC on the cavitation erosion resistance of FeCoCrNiB0.2 high entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 26(1): 102154.
- [28] SIDDIQUI A A, DUBEY A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134(8): 106619.