

本文引用格式: 张理, 毕贵军, 曹立超, 等. 激光熔覆 60%WC-Ni 涂层参数及性能研究[J]. 自动化与信息工程, 2022, 43(2): 1-7, 22.

ZHANG Li, BI Guijun, CAO Lichao, et al. Study on parameters and properties of laser cladding 60%WC-Ni coating[J]. Automation & Information Engineering, 2022, 43(2): 1-7, 22.

激光熔覆 60%WC-Ni 涂层参数及性能研究*

张理^{1,2} 毕贵军^{1,2} 曹立超² 常云龙^{1,3}

(1. 广东中科德弗激光科技有限公司, 广东 佛山 528000

2. 广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510070

3. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 镍基碳化钨 (WC-Ni) 复合材料是常用的激光熔覆材料之一, 可有效改善材料表面的耐磨性。但由于碳化钨 (WC) 属于硬脆材料, 受热易分解、溶解、氧化等, 导致熔覆层中 WC 体积分数受限, 且涂层容易存在裂纹。因此, 当前针对该种材料的激光熔覆研究主要集中于较低的 WC 含量 (质量分数 < 50%)。为进一步探究高含量 WC (质量分数 > 50%) 镍基合金的激光熔覆层性能, 首先, 以 60%WC-Ni 粉末为激光熔覆材料, 以 CCS-B 钢板为基材, 分别研究激光功率、送粉速度、激光扫描速度对熔覆层宽度、高度及稀释率的影响规律; 然后, 确定合适的熔覆参数组合, 并在基材表面加工制备熔覆层; 最后, 分别对基材和熔覆层进行硬度和摩擦磨损实验测试, 结果显示: 与基材相比, 熔覆层平均硬度达到 81.44 HRC, 提高了 5.45 倍; 同样时间内摩擦磨损量降低 93.6%, 摩擦系数降低 12.37%, 熔覆层的硬度和耐磨性均获得显著提升。

关键词: 激光熔覆; 工艺参数; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)02-0001-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.02.001

0 引言

激光熔覆技术是一种以高能量密度激光束为热源, 将特定材料融化在基材表面, 从而形成一层具有特定性能熔覆层的新型材料表面改性方法^[1]。该方法因具有熔覆层与基材形成强度较高的冶金结合、基体热变形量小、基体对熔覆层稀释率低等特点, 被广泛应用于金属材料工件的表面强化、修复等领域^[2]。

Ni 基合金粉末润湿性、耐磨性、耐腐蚀性较好, 并具有高温自润滑的作用, 在激光熔覆领域应用较广泛^[2-3]。WC 具有硬度高、耐磨性好的特点, 并与 Ni 基材料之间的润湿性较好^[4]。因此, 激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层具有较好的耐磨性, 该方法是近些年的研究热点并逐步在工业界获得广泛应用^[2]。

王开明等^[2]在 Ni60A 粉末中加入 20%WC, 发现随着激光功率的增大, 熔覆层平均硬度先增大后减小, 当激光功率为 2 500 W 时获得最高硬度。他们还研究了

WC 含量对激光熔覆 Ni 基 WC 复合涂层组织和性能的影响^[4], 并指出 WC 的相对质量分数为 20%时, 熔覆层耐磨性能最好, 耐磨性为 Ni60A 涂层的 3 倍以上。李福泉等^[5]制备了 WC 质量分数分别为 20%、33%、50%的 Ni 基熔覆层, 硬度分别达到 730、760、810 HV。戎磊等^[6]在 CCS-B 钢板上熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层, 当 WC 质量分数增加到 30%时, 熔覆层平均硬度达到基体硬度的 4 倍。臧春城等^[7]用激光熔覆制备的 Ni60+35WC-Ni 涂层, 硬度和耐磨性都显著提高。雷靖峰等^[8]研究 U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层发现, 送粉量是熔覆层的最大影响因子。王燕琳等^[9]利用激光熔覆在高速钢试件表面制备了 WC 含量为 35%的 Ni 基 WC 涂层, 由于 WC 弥散强化及条纹散热等作用, 耐磨性显著提高。丁阳喜^[10]用 Ni60、Ni60+15%WC、Ni60+30%WC 三种成分的合金粉末进行激光熔覆研究, 研究结果表明:

* 基金项目: 佛山市科技创新项目 (FS0AA-KJ919-4402-0101)

Ni60+30%WC 熔覆层的硬度为 67~68 HRC；在加入 WC 硬质相后，熔覆层的硬度变化不大，耐磨性却获得较大提高，相应的脆性和产生裂纹的倾向增大了。

陈永刚^[1]采用预置涂层法在基材 45#钢表面熔覆了质量分数为 50%的镍基 WC 复合涂层，经过工艺优化，获得的涂层耐磨性是淬火 45#钢的 7 倍、Ni60 涂层的 5 倍。除不锈钢外，赵伟等^[12]还在 Cu-Cr-Zr 三元铜合金表面制备了 Ni 添加 WC 颗粒的合金熔覆层，熔覆层平均硬度可达基体的 7 倍以上，耐腐蚀性也明显提升。

由于 WC 属于硬脆材料，受热易分解、溶解、氧化等，导致熔覆层中 WC 体积分数受限，且涂层容易存在裂纹。如李镭昌等^[13]研究发现，WC 组织演变对裂纹产生的影响主要是由残余 WC 颗粒内部开裂形成裂纹源，与硬质相元素引起成分偏析的作用产生；路程^[14]也发现热震循环会导致部分 Ni 基球形 WC 熔覆层的开裂损伤。

因此，当前针对该种材料的激光熔覆研究主要集中在较低的 WC 含量（质量分数<50%）。为进一步探究高含量 WC（质量分数>50%）镍基合金的激光熔覆层性能，本文以 60%WC-Ni 粉末为激光熔覆材料，在 CCS-B 钢板上进行不同激光熔覆参数的研究，分析工艺参数对熔覆层质量、形貌、显微组织的影响，并测试熔覆层的硬度及耐磨性。

1 实验

1.1 实验设备与材料

本次实验光源采用德国 IPG 公司掺杂镜(Yb) 稀土离子的 YLS-6000-S2T 型光纤激光器，最大功率为 6000 W；激光头为大族激光的 FCH10 并搭载三路同轴送粉喷嘴；送粉系统为瑞士 Metco 公司的 Twin-150 型双桶送粉器，送粉速度为 2~150 g/min；送粉气体及保护气体均采用纯度为 99.999%的氩气。激光头及送粉喷嘴搭载在德国 KUKA 公司的 KR-60HA 型机器人上，机器人重复定位精度为±0.05 mm，额定负载为 60 kg，打印过程在 KUKA 的 KP2-HV HW 双轴变位机上完成。实验设备平台如图 1 所示。

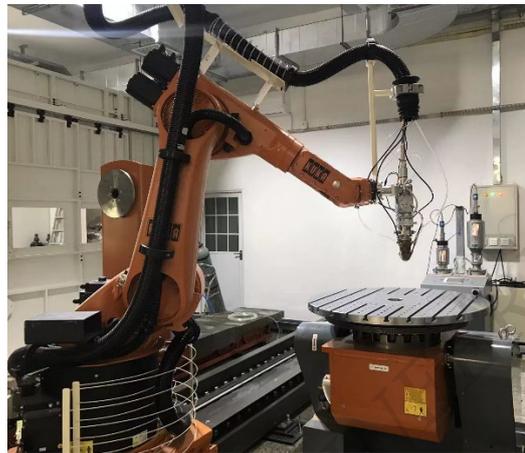


图 1 实验设备平台

本次实验采用的基体材料为船舶常用的 CCS-B 钢板，尺寸为 100 mm×100 mm×5 mm，成分如表 1 所示；熔覆粉末选用比利时 Höganäs 公司的镍包碳化钨粉末，其中 WC 质量分数为 60%，成分如表 1 所示，镍包碳化钨粉末微观形貌如图 2 所示。

表 1 实验材料成分表

实验材料	成分/%						
	C	Si	Mn	P	S	Fe	—
CCS-B	0.090	0.180	0.850	0.016	0.007	余量	—
镍包碳化钨粉末	C	Fe	Cr	W	Si	B	Ni
	2.50	0.85	1.45	57.50	1.05	0.45	余量

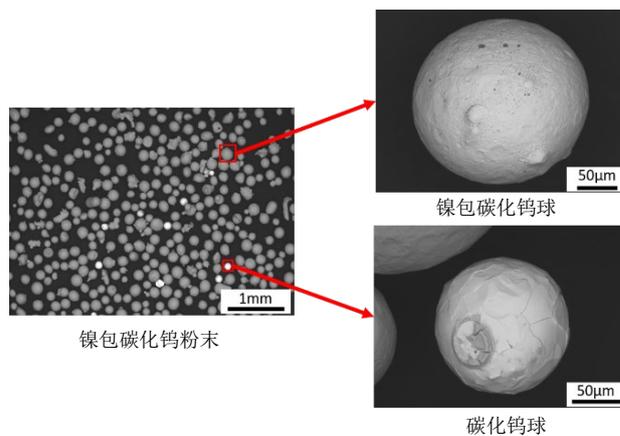


图 2 镍包碳化钨粉末微观形貌

1.2 实验设计

激光熔覆过程中需要将激光功率、送粉速度、激光扫描速度（熔覆速度）、送粉气体及保护气的压力和流量等多个参数优化组合，才能获得高质量的熔覆

层。其中, 激光功率、送粉速度和激光扫描速度这 3 个参数对熔覆层的影响较大。熔覆层的几何形状包括熔覆宽度、熔覆高度和熔覆深度。在激光熔覆过程中, 稀释率是指熔覆粉末和基体材料在激光的作用下熔化, 基体材料进入熔覆层, 导致熔覆层成分发生变化^[15], 其计算公式^[16-17]为

$$\eta = h / (H + h) \quad (1)$$

式中:

η ——合金熔覆层的稀释率;

h ——熔覆深度;

H ——熔覆高度。

其中, 熔覆高度和熔覆深度可以在显微图片中通过测量得出具体数值。在保证熔覆层和基体之间没有缺陷, 形成冶金结合的前提下, 需尽量控制稀释率。稀释率过高, 可能导致基体过度稀释涂层, 涂层开裂、变形倾向增加、性能降低^[18], 且材料未能有效形成涂层, 利用率降低。而稀释率过低, 可能导致基体与涂层结合不好, 涂层剥落^[19]。本次实验获得的代表性合金熔覆层横截面形貌如图 3 所示。

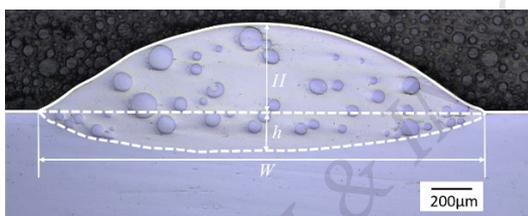


图 3 本实验获得的代表性合金熔覆层横截面形貌图

本次实验通过控制变量法, 在分别单独改变激光功率、送粉速度、激光扫描速度的情况下, 测量单道熔覆的高度、宽度、深度, 并计算稀释率, 以探究单工艺参数对熔覆层质量的影响。

本次实验选取激光功率变量分别为 800、900、1 000、1 100 和 1 200 W 五组数据, 送粉速度分别为 5.5、11.0、16.5、22.0 和 27.5 g/min; 激光扫描速度分别为 300、600、900、1 200 和 1 500 mm/min。根据以上数据获得的实验结果, 选取合适的熔覆参数, 对基体进行多层多道熔覆, 观察熔覆结果, 并将基体和熔覆结果分别进行硬度、摩擦磨损等实验测试, 对比基

体和熔覆层的耐磨性。

2 实验结果及分析

根据以往实验经验及参考文献, 本次实验将光斑直径固定为 2.5 mm, 保护气体压力为 0.1 Mpa, 流量为 15 L/min, 送粉气体压力为 0.1 MPa, 流量为 15 L/min。

1) 探究激光功率对熔覆层形貌的影响。固定送粉速度为 11.0 g/min, 激光扫描速度为 600 mm/min, 激光功率为 800~1 200 W, 每次实验增加 100 W, 共 5 组, 其宏观形貌如图 4 所示。垂直于扫描方向分别切割熔覆层, 并经研磨、抛光后, 在显微镜下测量各部分尺寸, 计算稀释率, 结果如表 2 所示。

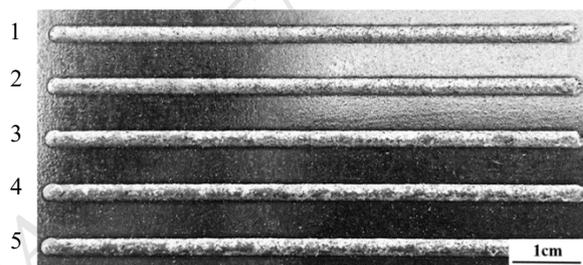


图 4 不同激光功率下熔覆层的宏观形貌

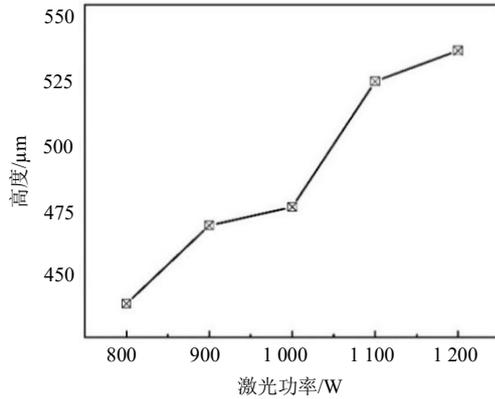
表 2 不同激光功率下熔覆层的尺寸及稀释率

试样	激光功率/W	送粉速度/(g/min)	激光扫描速度/(mm/min)	高度/ μm	宽度/ μm	深度/ μm	稀释率/%
1	800			439.05	2 189.50	138.58	23.99
2	900			469.35	2 294.03	186.51	28.88
3	1 000	11.0	600	476.51	2 347.30	199.36	29.50
4	1 100			525.24	2 369.05	233.81	30.80
5	1 200			537.15	2 434.76	242.38	31.09

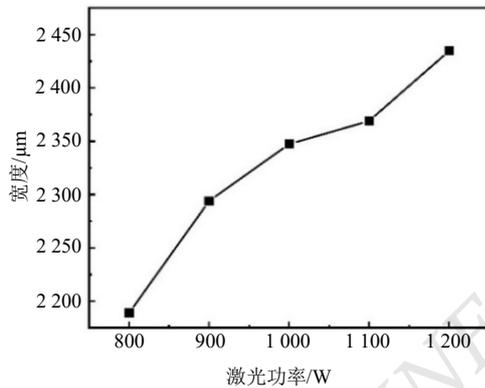
根据表 2 数据, 整理获得图 5, 更为直观地观察激光功率对熔覆层形貌的影响。

从图 5 可以看出: 随着激光功率增加, 热输入也增加, 单道熔覆的高度、宽度、深度、稀释率均有所提高, 该结果与张雪^[20]、李震等^[21]的研究结论相符; 当激光功率从 800 W 增加到 1 200 W 时, 单道熔覆高度从 439.05 μm 增加到 537.15 μm , 宽度从 2 189.5 μm 增加到 2 434.76 μm , 稀释率从 23.99% 增加到 31.09%; 当激光功率增加 50% 时, 熔覆高度、宽度、稀释率分别增加了 22.34%、11.20%、29.60%。相比之下, 激光

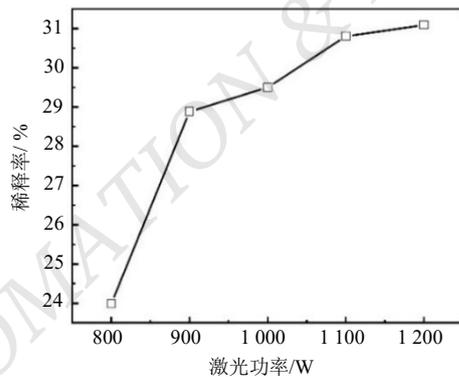
功率对熔覆高度和稀释率的影响更为明显。在激光功率从 800 W 增加到 900 W 时，稀释率增加了 19%，增加明显，而随后增加速度平缓，激光功率从 900 W 增加到 1 200 W 时，稀释率仅增加了 9.33%。



(a) 熔覆高度-激光功率关系曲线



(b) 熔覆宽度-激光功率关系曲线



(c) 稀释率-激光功率关系曲线

图 5 激光功率对熔覆层形貌的影响

2) 探究送粉速度对熔覆层形貌的影响。固定激光功率为 900 W，激光扫描速度为 600 mm/min，送粉速度为 5.5~27.5 g/min，每次实验增加 5.5 g。其中送

粉速度为 11.0 g/min 时与图 4 的 2 号一致。不同送粉速度下，熔覆层的宏观形貌如图 6 所示，熔覆层的尺寸及稀释率如表 3 所示。

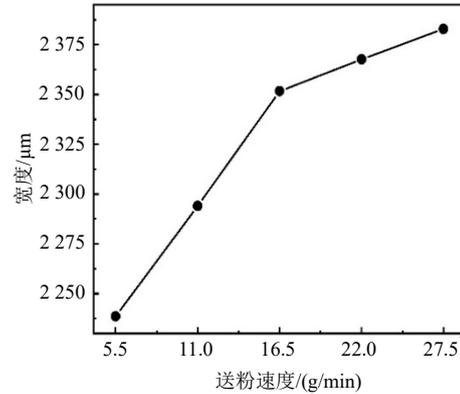


图 6 不同送粉速度下熔覆层的宏观形貌

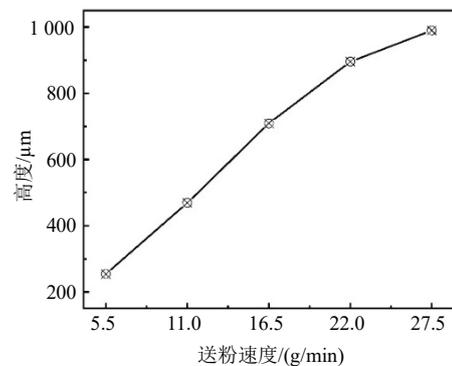
表 3 不同送粉速度下熔覆层的尺寸及稀释率

试样	激光功率/W	送粉速度/(g/min)	激光扫描速度/(mm/min)	高度/μm	宽度/μm	深度/μm	稀释率/%
6		5.5		254.29	2 238.57	255.72	50.14
2		11.0		469.35	2 294.03	186.51	28.88
8	900	16.5	600	709.52	2 351.67	157.62	18.18
9		22.0		895.72	2 367.62	72.38	7.48
10		27.5		990.00	2 382.86	28.10	2.76

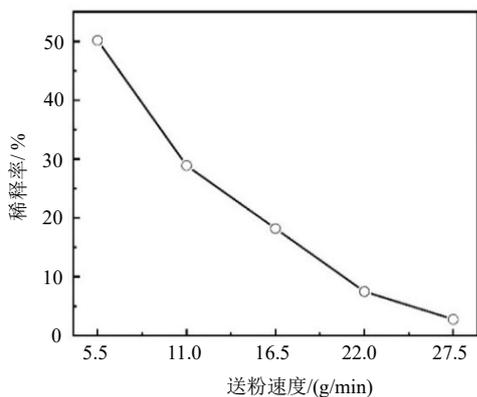
根据表 3 数据，整理获得图 7，更为直观地观察送粉速度对熔覆层形貌的影响。



(a) 熔覆宽度-送粉速度关系曲线



(b) 熔覆高度-送粉速度关系曲线



(c) 稀释率-送粉速度关系曲线

图7 送粉速度对熔覆层形貌的影响

从图7可以看出:随着送粉速度增加,单道熔覆的高度和宽度均有所增加,稀释率快速降低;当送粉速度从 5.5 g/min 增加到 27.5 g/min 时,熔覆宽度从 2 238.57 μm 增加到 2 382.86 μm ,高度从 254.29 μm 增加到 990.00 μm ,而稀释率从 50.14%降至 2.76%;当送粉速度增加 400%时,熔覆高度增加了 289.32%,熔覆宽度仅增加了 6.45%,而稀释率降低了 94.50%,说明送粉速度对熔覆高度、深度和稀释率的影响较大,而对熔覆宽度影响较小。

3) 探究激光扫描速度对熔覆层形貌的影响。固定激光功率为 900 W,送粉速度为 11.0 g/min,激光扫描速度为 300~1 500 mm/min,每次实验增加 300 mm/min。其中激光扫描速度为 600 mm/min 时与图 4 中的 2 号一致。不同激光扫描速度下,熔覆层的宏观形貌如图 8 所示,熔覆层的尺寸及稀释率如表 4 所示。

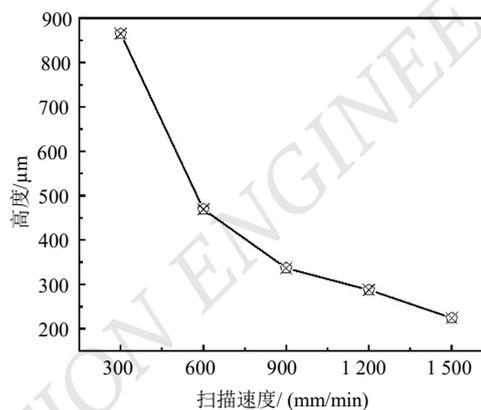
根据表 4 数据,整理获得图 9,更为直观地观察激光扫描速度对熔覆层形貌的影响。



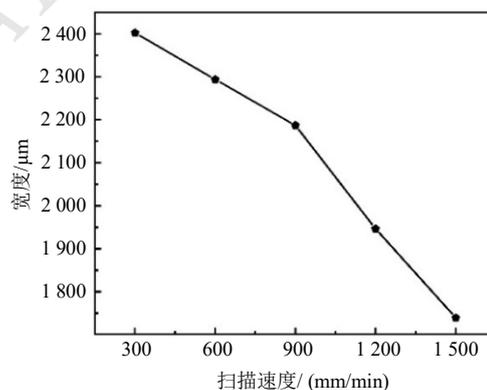
图8 不同激光扫描速度下熔覆层的宏观形貌

表4 不同激光扫描速度下熔覆层的尺寸及稀释率

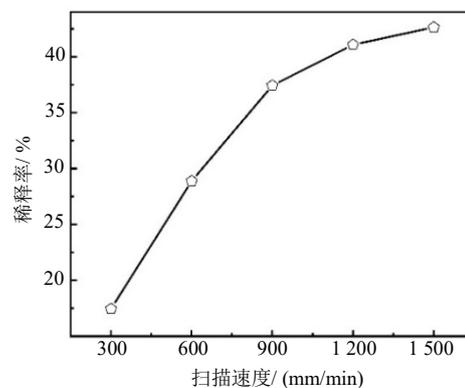
试样	激光功率/W	送粉速度/(g/min)	激光扫描速度/(mm/min)	高度/ μm	宽度/ μm	深度/ μm	稀释率/%
10			300	864.76	2 402.38	182.86	17.46
2			600	469.35	2 294.03	186.51	28.44
11	900	11.0	900	336.51	2 186.98	201.27	37.43
12			1 200	287.62	1 946.19	200.48	41.07
13			1 500	224.29	1 739.05	166.67	42.63



(a) 熔覆高度-扫描速度关系曲线



(b) 熔覆宽度-扫描速度关系曲线



(c) 稀释率-扫描速度关系曲线

图9 激光扫描速度对熔覆层形貌的影响

由图 9 可知: 随着激光扫描速度增加, 热输入降低, 熔覆的高度、宽度均有所下降, 而稀释率却明显增大; 当激光扫描速度从 300 mm/min 增加到 1 500 mm/min 时, 熔覆高度从 864.76 μm 下降到 224.29 μm , 熔覆宽度从 2 402.38 μm 下降到 1 739.05 μm , 而稀释率从 17.45% 增加到 42.63%; 当激光扫描速度增加 400% 时, 熔覆高度、宽度分别降低了 74.06%、27.61%, 稀释率则增加了 144.24%, 说明激光扫描速度对于熔覆高度和稀释率的影响更大。在激光扫描速度增加的过程中, 熔覆高度先急剧下降, 达到 600 mm/min 后则开始平缓下降, 稀释率也随着激光扫描速度的增加而增加并趋于平缓。

为进一步验证激光熔覆 WC-Ni 涂层的性能, 从以上实验结果中选取合适的参数进行多层多道熔覆实验。当激光功率取 900 W, 送粉速度取 11.0 g/min, 激光扫描速度取 600 mm/min 时, 单道熔覆层的熔覆高度为 469.35 μm , 宽度为 2 294.03 μm , 稀释率为 28.88%, 结果比较合适。因此, 选择此参数组合进行多层多道熔覆实验, 送粉气体及保护气体为氩气, 多层多道熔覆的实验参数如表 5 所示。

表 5 多层多道熔覆实验参数

光斑直径/mm	送粉气流量/(L/min)	保护气流量/(L/min)	激光功率/W	送粉速度/(g/min)	激光扫描速度/(mm/min)	搭接率/%
2.5	4	15	900	11.0	600	50

为保证熔覆效果及消除熔覆层的力学各向异性, 本次实验采用 $0^\circ \sim 90^\circ$ 打印测量, 打印路径及打印后表面成型情况如图 10 所示。共打印 3 层, 测量可得熔覆层的总厚度为 2.3 mm, 长宽均为 40 mm, 表面成型良好。

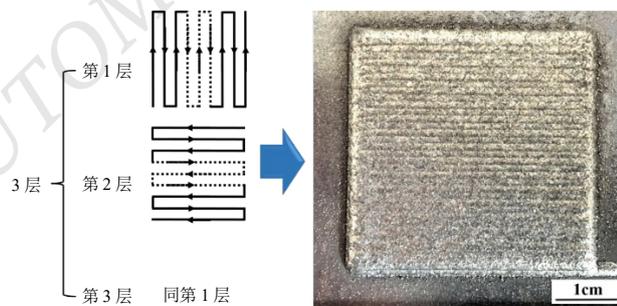
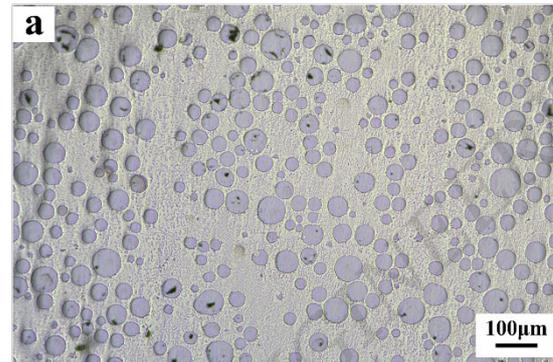
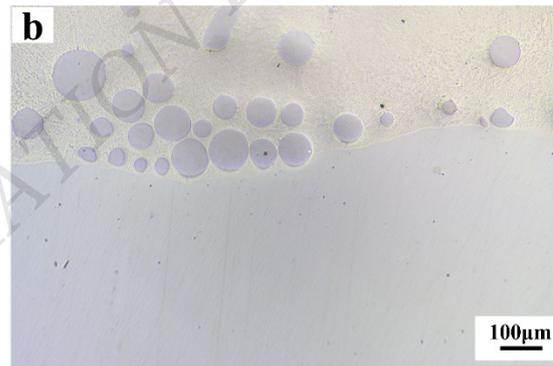


图 10 多层多道熔覆策略及结果

将熔覆结果进行切割、并用金相砂纸进行研磨、抛光后, 在显微镜下观察熔覆层的显微组织如图 11 所示。



(a) 熔覆层内部的显微组织



(b) 熔覆层与基体边界处的显微组织

图 11 熔覆层显微组织

从图 11 可以看到: 球形 WC 均匀分布在熔覆层内部, 润湿性良好; 界面处熔覆层与基体结合性良好, 未发现气孔、裂纹等明显缺陷。

随机选取基体和熔覆层 5 处, 利用洛氏硬度计分别对其硬度进行测量, 结果显示基体的平均硬度为 12.62 HRC, 镍基碳化钨涂层的平均硬度为 81.44 HRC, 相比于基体, 熔覆层的硬度提高了 5.45 倍。

分别从基体和熔覆层取样, 样品为半径 5 mm 的圆柱形, 通过旋转式摩擦磨损实验机对两者进行干摩擦磨损测试。选用的对摩擦副为 4 mm 氧化铝球, 转速为 200 r/min, 载荷 1 000 g, 摩擦时间为 30 min, 实验测试结果如表 6 所示。

表 6 摩擦磨损实验测试结果

试样	测试前重量/g	测试后重量/g	磨损量/mg	摩擦系数
基体	12.072 2	12.059 7	12.5	0.446 2
熔覆层	18.487 1	18.486 3	0.8	0.391 0

经过摩擦磨损实验测试后,可计算得出,基体磨损量为 12.5 mg,镍基碳化钨熔覆层磨损量为 0.8 mg。同等条件下,镍基碳化钨熔覆层的磨损量降低了 93.6%;基体与对摩擦副之间的摩擦系数为 0.446 2,而镍基碳化钨熔覆层摩擦系数为 0.391 0,摩擦系数降低了 12.37%。

3 结论

本文分别探究了激光功率、送粉速度、激光扫描速度 3 个单独变量对单道熔覆层形貌的影响,实验结果表明:

1) 随着激光功率增加,熔覆高度、宽度及稀释率均会有所增大,激光功率达到 900 W 后,再增加激光功率,稀释率增加不明显;

2) 随着送粉速度增加,熔覆高度显著增加,稀释率急剧下降,送粉速度对熔覆高度以及稀释率的影响较大,而对熔覆宽度的影响较小;

3) 激光扫描速度对熔覆高度及稀释率的影响较大,随着激光扫描速度增加,熔覆高度、宽度均有所下降,而稀释率则明显提升,超过 600 mm/min 后,熔覆下降高度趋于平缓。

激光熔覆 WC 涂层能够显著提高基材的硬度以及耐磨性,本次实验获得的激光熔覆镍基碳化钨涂层硬度较基体提高了 5.45 倍,达到 81.44 HRC,耐磨性提高了 10 倍以上。

参考文献

- [1] 徐淑文,陈希章,苏传出,等.工艺参数对激光熔覆层质量的影响[J].热加工工艺,2020,49(22):110-113.
- [2] 王开明,雷永平,符寒光,等.功率对激光熔覆 Ni 基 WC 涂层组织与硬度的影响[J].稀有金属材料与工程,2017,46(11):3474-3478.
- [3] 平学龙,符寒光,孙淑婷.激光熔覆制备硬质颗粒增强镍基合

金复合涂层的研究进展[J].材料导报(A),2019,33(9):1535-1540.

- [4] 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.
- [5] 李福泉,冯鑫友,陈彦宾.WC 含量对 WC/Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响[J].中国激光,2016,43(4):1-7.
- [6] 戎磊,黄坚,李铸国,等.激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层的组织与性能[J].中国表面工程,2010,23(6):40-44,50.
- [7] 臧春城,王延忠,张以都,等.激光熔覆 Ni60+35WC-Ni 涂层的微观组织和摩擦磨损特性[J].稀有金属,2015,39(5):385-391.
- [8] 雷靖峰,祁文军,谢亚东,等.U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层工艺参数优化的研究[J].表面技术,2018,47(3):66-71.
- [9] 王燕琳,陈斌,洪鑫高,等.速钢激光熔覆 Ni 基 WC 条纹表面的磨损特性[J].热加工工艺,2019,48(8):135-137,141.
- [10] 丁阳喜.Cr12MoV 钢激光熔覆 Ni 基 WC 合金性能研究[J].热加工工艺,2009,38(24):93-94,98.
- [11] 陈永刚.激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层耐磨性能的研究[J].热加工工艺,2022,51(2):106-109.
- [12] 赵伟,张柯,刘平,等.激光熔覆 Ni 基 WC 复合熔覆层组织与性能的研究[J].功能材料,2019,50(1):1098-1103,1109.
- [13] 李镛昌,魏昕.激光熔覆复合涂层 WC 对裂纹产生机理影响研究[J/OL].激光技术:1-15[2022-01-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20211216.1349.002.html>.
- [14] 路程.激光熔覆 Ni 基球形 WC 复合涂层的组织与性能研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [15] 林继兴,牛丽媛,李光玉,等.激光功率对球阀表面激光熔覆 Co 基合金涂层稀释率及耐腐蚀性能的影响[J].热加工工艺,2014,43(20):112-114.
- [16] 蒋三生,梁立帅,舒凤远.45 钢表面激光熔覆 Co 基合金覆层工艺优化[J].材料导报,2020,34(S1):448-451.
- [17] 刘伟斌,李新梅,井振宇,等.激光熔覆镍基 WC 涂层的组织及性能研究[J].应用激光,2021,41(5):961-967.
- [18] 樊增彬.WC/Ni 基合金激光熔覆工艺及熔覆层特性研究[D].济南:山东大学,2012.
- [19] 谢亚东.基于激光熔覆的高铁钢轨强化研究[D].新疆:新疆大学,2017.
- [20] 张雪.激光功率对 Ni 基-WC 熔覆层组织与性能的影响[D].鞍山:辽宁科技大学,2014.
- [21] 李震,孙荣禄.激光功率对 Ni 基 WC 熔覆层组织和性能的影响[J].金属热处理,2016,41(9):107-111.

(下转第 22 页)