

# 铝合金汽车零部件表面金属陶瓷复合涂层的制备与研究

向峻伯, 姜雪茹, 王从明, 陈凯滨, 于志刚

(成都工业职业技术学院, 四川成都 610218)

**摘要:** 采用激光熔覆技术在铝合金汽车零部件表面制备了金属陶瓷复合涂层, 研究了激光熔覆工艺参数对熔覆层成形效果的影响。采用SEM、EDS等分析技术研究了熔覆层的微观组织和元素分布, 用显微硬度计测试了熔覆层的显微硬度, 利用摩擦磨损试验机试验了熔覆层的耐磨性能。结果表明, 当激光功率为1.2 kW时, 熔覆层的成形效果良好, 无明显缺陷产生, 熔覆层与基体呈现良好的冶金结合; 增大激光功率, 熔覆层稀释率变大。熔覆层的微观结构主要为胞状晶、定向枝晶和细小的等轴晶。与基体相比, 熔覆层的显微硬度和耐磨性显著提高, 硬度提高了8倍, 耐磨性能提高了8.8倍。

**关键词:** 激光熔覆; 复合涂层; 微观组织; 显微硬度; 磨损

随着汽车轻量化进程<sup>[1-3]</sup>的不断加深, 汽车零部件开始大量运用铝合金材料。ADC12铝合金<sup>[4-6]</sup>是一种压铸铝合金, 其密度小、比强度高、弹性好、加工性能好, 广泛运用在汽车零部件。但由于铝合金自身的低硬度、耐磨性弱等特点, 对其用途范围有着极大的约束。而磨损是汽车零件如齿轮、轴承等最常见的失效形式之一<sup>[7-10]</sup>, 每年因磨损造成的生命财产安全损失不计其数, 因此汽车零部件的耐磨性能的提升成为了研究的热点之一。

激光熔覆技术作为一种先进的材料修复和防护增材制造技术, 在汽车行业中已经有大量的运用<sup>[11-13]</sup>。铝合金的磨损一般都发生在其表面, 相对于电镀<sup>[14]</sup>、气相沉积法<sup>[15]</sup>、超音速喷涂技术<sup>[16]</sup>等工艺, 激光熔覆技术制备的涂层具备更好的冶金结合、更高的硬度、更好的耐磨性能。丁健君等<sup>[17]</sup>在AA6061铝合金表面激光熔覆制备了一层Cu/Cr合金熔覆层, 通过调整工艺参数, 获得了较为理想的熔覆层。李琦等<sup>[18]</sup>在A390铝合金基体上激光熔覆NiCrAl/TiC复合涂层, 铝合金的耐磨性和耐腐蚀性都得到了大幅提升。WC作为一种高硬度、高耐磨的材料, 能大幅提升材料的耐磨损性能, 而Ni合金对WC有着良好的润湿性。鉴于此, 本文选用的熔覆粉末是Ni粉和WC粉的混合粉末, 利用YAG光纤激光器在铝合金表面制备了一层Ni-WC复合涂层, 以提高材料的耐磨性能, 为高强度、耐磨的汽车零件提出了一种制备方法。

## 1 试验材料与方法

激光熔覆粉末(中国北京中国冶金集团公司)为80wt.%Ni粉(150~300目)和20wt.%WC粉(150~300目)。为了使粉末混合均匀, 将粉末用酒精混合在QM-1卧式碗磨机中, 转速为250 r/min, 时间为6 h, 放入真空干燥箱100 °C下干燥3 h, 然后进行激光熔覆试验。激光熔覆的基材为ADC12铝合金锭。基体材料的化学成分如表1所示, 基体尺寸为200 mm×150 mm×15 mm。采用200#和600#的碳化硅砂纸对基体表面进行磨削和粗粒化处理。在激光熔覆试验前, 用丙酮清洗基底表面, 去除油脂。为了降低基体与涂层之间巨大的温度梯度所引起的热应力, 对基体在150 °C下进

作者简介:

向峻伯(1981-), 男, 副教授, 学士, 研究方向为发动机技术、金属学及金属工艺、教育实践、数字化资源建设。E-mail: xiangj\_b@163.com

中图分类号: TM286

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

06-0675-06

收稿日期:

2021-01-18 收到初稿,

2021-03-02 收到修订稿。

行2 h预热。采用JHL-1GX-2000激光熔覆设备（武汉楚天激光有限公司）进行激光熔覆试验制备金属陶瓷复合涂层，该激光熔覆设备为连续波光纤激光器，最大功率为2 kW。根据我们的前期验证，激光熔覆试验采用的激光束尺寸为3 mm，扫描速度为200 mm/min，送粉速率为60 g/min，为研究工艺参数对熔覆层的影响，选取的激光功率范围为0.8~1.4 kW。图1为激光熔覆试验示意图，在做熔覆试验时，铝合金基板板材须朝安全无人方向倾斜20°角，以免激光束反射造成设备和人员伤害。

熔覆试验完成后，用碳化硅砂纸对熔覆层表面进行打磨，去除表面的疏松层，通过线切割将涂层沿着涂层垂直于横截面方向切割成金相样品，并使用超声清洗仪在无水乙醇中清洗涂层。用XQ-2B金相镶嵌机制成金相试样，再使用400#、800#、1200#、1500#和2000#的碳化硅砂纸对金相试样进行研磨、抛光。将体积配比为2:3:5的HF、HCl和HNO<sub>3</sub>混合溶液对试样进行蚀刻20 s，然后用乙醇洗涤并用吹风机干燥。用多功能X射线衍射仪（XRD）分析了涂层的物相组成。采用扫描电子显微镜（SEM）和能谱仪（EDS）进行微观结构和能谱分析。采用维氏硬度计测试熔覆层横截面的硬度，测试示意图如图2所示，加载质量为200 g，加载时间为15 s。采用MFT-R4000往复摩擦磨损试验机测试熔覆层表面和基体的耐磨性能，摩擦副直径为5 mm，硬度为HRC65的高铬钢球，载荷为10 N，磨损时间为3 h，通过扫描电镜（SEM）观察横截面的腐蚀形貌。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 激光功率对熔覆层形貌的影响

熔覆层的宏观形貌主要由功率 $P$ 、扫描速度 $V$ 、激光束直径 $D$ 等因素影响和控制，三个因素互相作用，可以用单位面积能量<sup>[19]</sup>来说明，即激光比能 $E_s$ 。

$$E_s = \frac{P}{D \times V} \quad (1)$$

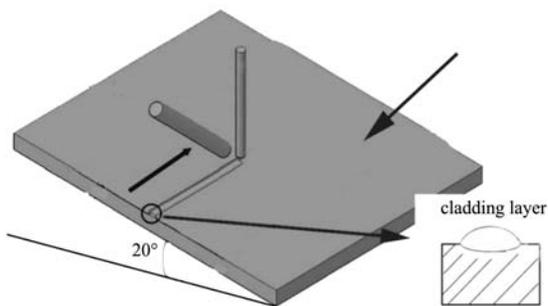


图1 激光熔覆试验示意图

Fig. 1 Schematic illustration of laser cladding

可通过激光比能来阐述工艺参数对熔覆层宏观尺寸的影响。而通过涂层的宏观尺寸不仅能反映熔覆层宏观质量的好坏，还可以反映出熔覆层稀释率的大小，这就间接反映出熔覆层性能的优劣。稀释率是基体材料对熔覆粉末的成分稀释程度，其可以用 $\lambda$ 来表示。

$$\lambda = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad (2)$$

式中： $S_1$ 和 $S_2$ 分别是熔池面积和熔覆层面积。稀释率过低，熔覆层无法与基体达到牢固结合；稀释率过高，熔覆层过度稀释，弱化了涂层性能，这就间接地反映了熔覆层的性能。

当激光功率为0.8 kW时，激光比能为80 J/mm<sup>2</sup>，此时熔覆层的稀释率为21%，熔覆层横截面的宏观形貌如图3a所示，从图中可看出熔覆层厚度较小，大量WC颗粒团聚在熔覆层底部，且在熔覆过程中有大量的粉末飞溅，表面十分粗糙，有大量粉末没有熔化，成形效果不佳。图3b是激光功率为1.0 kW时的熔覆层宏观形貌，此时激光比能为100 J/mm<sup>2</sup>，稀释率为23%，WC颗粒主要分布在熔覆层的中部和底部，无明显缺陷，且结合效果良好。当加大激光功率至1.2 kW时，激光比能增大到120 J/mm<sup>2</sup>，熔覆层宏观形貌如图3c所示，稀释率为28%，熔覆层变宽，WC颗粒分布较为均匀，无缺陷产生，结合界面良好。当激光功率为1.4 kW时，激光比能达到140 J/mm<sup>2</sup>，熔覆层如图3d所示，稀释率增大至49%，熔覆层较矮，熔池较深，可看到熔覆层存在明显的裂纹，熔覆层成形效果不佳。

图4是激光功率和激光比能、稀释率之间的关系曲线图。保持其他工艺参数不变，当激光功率较小时，单位面积上吸收的能量较小，导致有很多粉末和基体

表1 ADC12铝合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of ADC12 aluminum alloy

	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Ni	Sn	Al
$w_B / \%$	11	3.5	≤0.3	0.5	0.35	0.7	≤0.5	≤0.1	余量

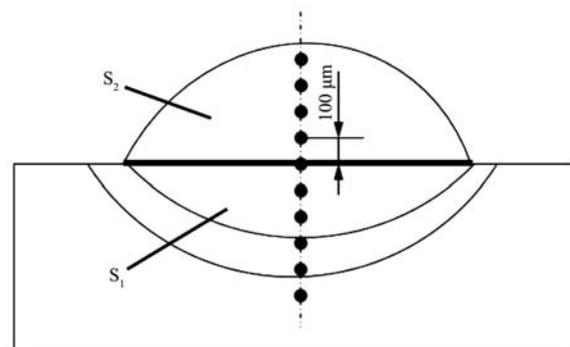


图2 硬度测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hardness test

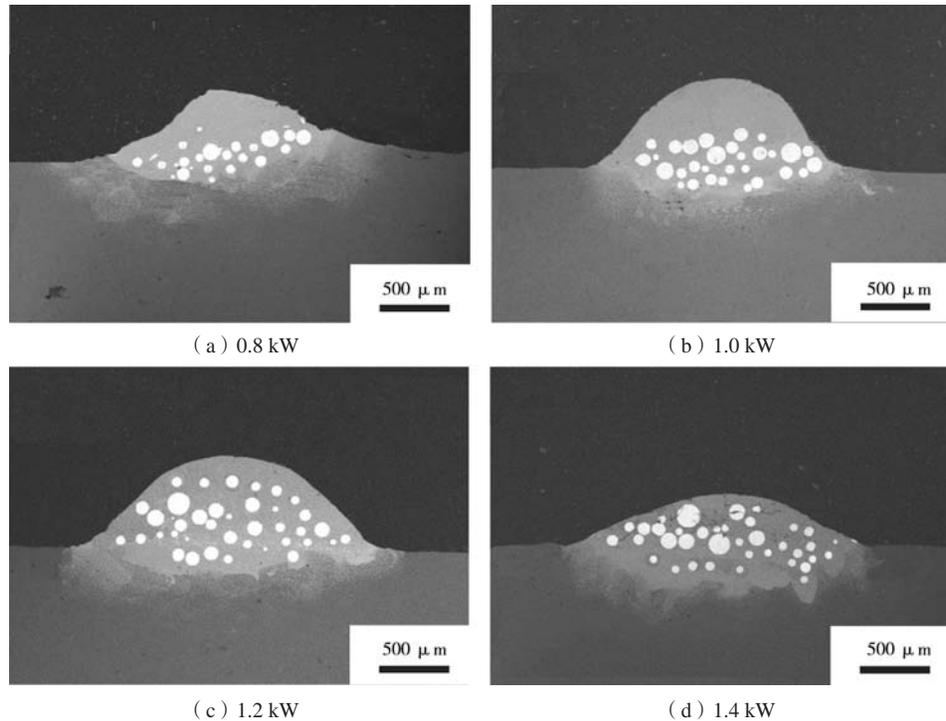


图3 不同功率下熔覆层的宏观形貌图

Fig. 3 Macro-morphology of cladding layer at different powers

材料还未熔化,造成了飞溅。WC颗粒不能熔化,熔体在熔池内的对流较弱,在熔池底部造成了团聚,此时基体熔化较少,对熔覆层的稀释效果较弱。增大激光功率,保持其他参数不变,激光比能也增大,单位面积吸收能量增大,粉末被完全熔化,更多的基体也被熔化,导致熔覆层稀释率变大。熔池内产生强烈对流现象,使得WC颗粒进一步均匀分布。当增大功率至1.4 kW时,熔覆层的能量密度过大,导致熔覆层出现大量微裂纹。

## 2.2 微观组织

如图5所示为激光功率为1.2 kW时的熔覆层的横截面组织。图5a是熔覆层的SEM图,熔覆层组织均匀,无明显的气孔、裂纹等缺陷。通过图5b的放大图发现,熔覆层主要存在的是黑色的等轴晶和亮白色的长针相,根据EDS扫描结果表2显示,二者主要元素是Ni-Al。激光束照射在熔覆粉末和基体上时,Ni会与基体Al发生反应,生成NiAl<sub>3</sub>相和NiAl相<sup>[15-16]</sup>,而NiAl相优先于NiAl<sub>3</sub>相生长,遍布存在于熔覆层,故黑色的等轴晶为NiAl相,亮白色的长针相为NiAl<sub>3</sub>相。图5c和图5d是熔覆层与基体结合区域的微观组织SEM图,分别呈现为胞状晶和具有方向性生长的树枝晶。图5e和图5f是结合区过渡的EDS面扫描结果,可明显看出,熔覆层到基体方向上,Ni元素逐步减少,Al元素逐步增多,这一变化趋势呈现出明显的成分过渡现象,达到熔覆层

与基体冶金结合的目的。

## 2.3 硬度

图6是激光功率为1.2 kW的熔覆层到基体方向上的

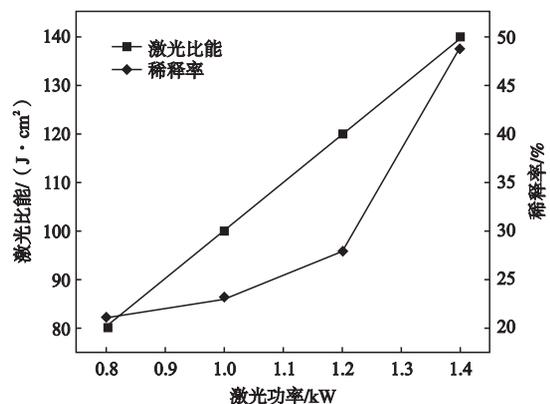


图4 激光功率与激光比能、稀释率的关系

Fig. 4 Relationship between laser power, laser specific energy and dilution rate

表2 图5b中相的EDS点扫描分析结果  
Table 2 EDS point-scan analysis results of phase in Figure 5b

位置	Al	Ni	Cr	Fe	C	Si	W
点1	23.48	28.57	10.75	2.01	26.62	-	7.34
点2	27.64	45.23	3.52	2.37	16.78	12.43	1.23

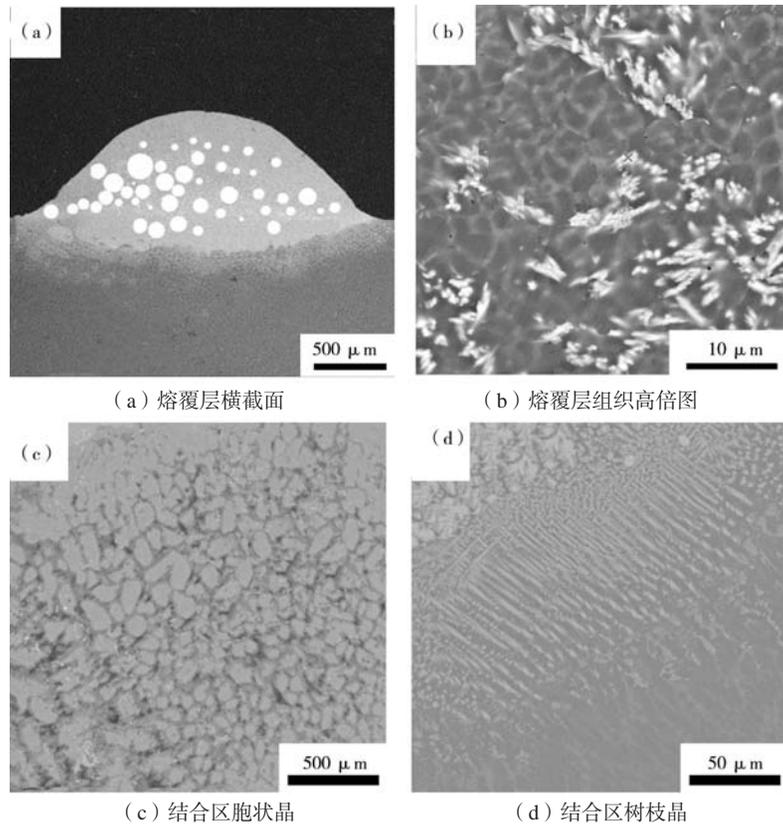


图5 微观组织SEM图

Fig. 5 SEM images of microstructure

硬度变化。铝合金基体的显微硬度为HV77.3，熔覆层的显微硬度HV625.6~967.5，结合区的显微硬度逐步减小。熔覆层的显微硬度较高，达到了基体的9倍左右，是因为细晶强化的作用，Ni和Al发生反应生成了细小的NiAl<sub>3</sub>相和NiAl相，形成细小致密的等轴晶。而部分测试点上硬度突然增大达到HV967.5，可能是由于有WC硬质颗粒存在，起到了颗粒强化的作用。冶金结合区域的硬度逐渐减小，由于基体对熔覆层的稀释作用，Ni元素含量变小，Al元素含量变大，且微观组织由胞状晶向粗大的树枝晶转变，使得显微硬度在向着基体方向逐渐减小至与基体铝合金硬度接近。

## 2.4 磨损性能

图7显示了基体铝合金与激光功率为1.2 kW的熔覆层在1 h磨损时间内的磨损量，熔覆层耐磨损性能提升了8.8倍。相比于铝合金基体，熔覆层的耐磨性能大幅度提升。图8是基体铝合金与激光功率为1.2 kW的熔覆层表面的磨损形貌SEM图。从图8a中可明显看出，铝合金磨损表面出现又大又深的犁沟和划痕，主要表现为严重的粘着磨损；图8b是熔覆层的磨损面呈现较浅的沟槽和划痕，主要表现为磨粒磨损和轻微的粘着磨损。

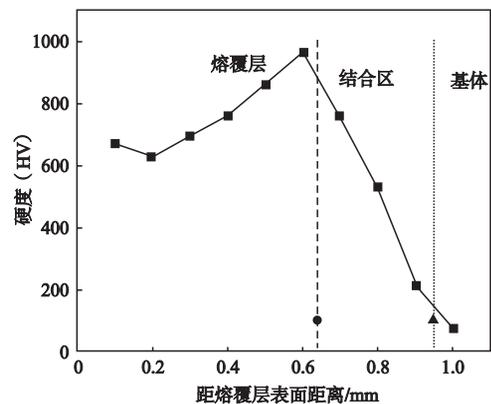


图6 熔覆层到基体的硬度变化图

Fig. 6 Microhardness change curve from cladding layer to substrate

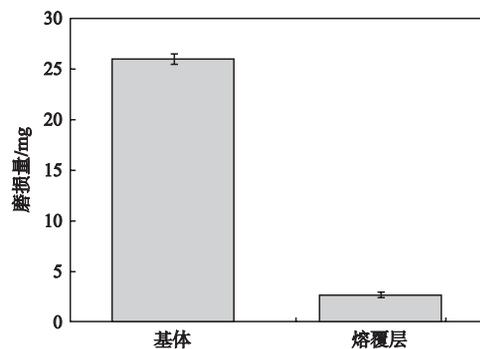


图7 磨损性能对比

Fig. 7 Comparison of wear resistance between cladding layer and substrate

## 2.5 磨损机理

图9分别是铝合金与熔覆层的磨损机理图。铝合金表面组织呈现为粗糙的微观组织，难以阻止磨损对表面的侵入和犁削，磨损面出现大量又深又宽的犁沟和划痕。熔覆层表面的细小均匀的微观组织有

效地阻止了磨损对表面的犁削，且硬质颗粒WC的存在也对磨损起到了阻碍作用。在细晶强化和颗粒强化的双重作用下，熔覆层的耐磨性能得到了大幅度的提升。

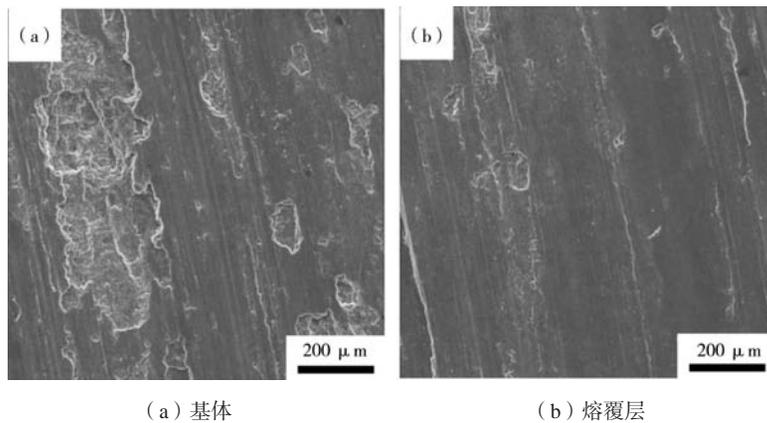


图8 磨损表面SEM形貌  
Fig. 8 SEM images of worn surface

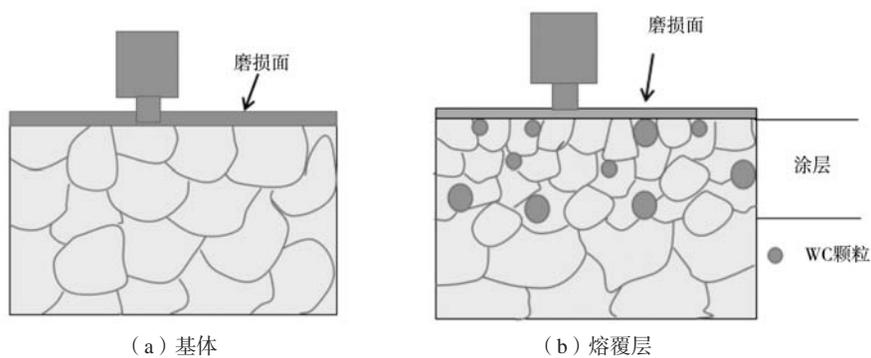


图9 磨损机理图  
Fig. 9 Wear mechanism diagram

## 3 结论

(1) 当激光功率为1.2 kW时，熔覆层无明显缺陷，WC颗粒分布均匀，界面冶金结合效果好，成形效果好。保持其他参数不变，增大激光功率，激光比能增大，熔覆层稀释率增大。

(2) 当激光功率为1.2 kW时，熔覆层组织均匀，主要由黑色等轴晶NiAl相和亮白色的长针相NiAl<sub>3</sub>相组成；结合区主要呈现为胞状晶和具有方向性生长的

树枝晶结构。从熔覆层到基体方向上，Ni元素含量减少，Al元素含量增加，呈现出一个良好的元素过渡现象，证明结合区的冶金结合良好。

(3) 当激光功率为1.2 kW时，熔覆层的硬度相比于基体，提高了近8倍；磨损性能提升了约8.8倍。这主要是由细晶强化和颗粒强化的作用，大幅度提升了材料表面的硬度和耐磨性能。

## 参考文献:

- [1] 陈来, 王占坤, 邹纯, 等. 汽车用铝合金副车架成形工艺及应用现状 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 390-395.
- [2] 钱东伶, 芦富敏, 余忠土, 等. 汽车底盘用铸造铝合金的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (10): 1077-1082.
- [3] 李光霖, 刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 47-61.
- [4] 周龙富, 杨湘杰, 魏涛. 振动凝固对ADC12铝合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2013, 62 (11): 1130-1133.
- [5] SUN Y H, YAN H, XIONG J J. Al<sub>3</sub>Ti/ADC12 composite synthesized by ultrasonic chemistry in situ reaction [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2020, 27 (1): 10-18.
- [6] 薄兵, 潘冶, 陆韬, 等. 工艺参数对ADC12铝合金压铸件微孔缺陷与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 127-130.
- [7] 梁朝杰, 王成磊, 梁满朝, 等. 不同温度固溶+时效处理对6082铝合金锻件组织和摩擦磨损性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (09): 62-66.
- [8] 高辉, 刘伟杰. 2A12铝合金电沉积Ni-Co-MoS<sub>2</sub>复合镀层的耐磨性能研究 [J]. 电镀与精饰, 2020, 42 (10): 1-5.
- [9] 张洪源. 铝合金表面激光熔覆钛基粉末涂层的性能与组织 [J]. 粉末冶金工业, 2020, 30 (4): 71-75.
- [10] 杨桂娟. 挤压铸造工艺参数对铝合金连杆力学和磨损性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (19): 73-79.
- [11] 王争强, 李文戈, 杜旭, 等. 激光熔覆技术在轴类零件再制造过程中的应用现状 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (11): 35-40.
- [12] 王雪, 于秀涛. 超声振动下车用316L钢激光熔覆WC-Ni涂层组织和摩擦性能分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40 (8): 745-749.
- [13] 甘守武, 陈志军, 李蕊. 激光沉积车用WC-0.25Ti粉末增强7056铝合金板成形性能分析 [J]. 粉末冶金工业, 2020, 30 (5): 73-77.
- [14] 孙源, 罗彦, 王旭敏, 等. 2024-T6铝合金表面电镀镍/氧化石墨烯涂层的耐蚀性能 [J]. 材料保护, 2019, 52 (8): 15-23, 44.
- [15] 周佳, 孙丽丽, 郭鹏, 等. 铝合金表面沉积类金刚石薄膜的研究进展 [J]. 表面技术, 2020, 49 (1): 113-121.
- [16] 黄国华, 陈安军. 电弧喷涂工艺参数对铝镁合金涂层结合强度的影响 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (6): 110-112.
- [17] 丁健君, 郑恢俊. AA6061铝基材上激光熔覆Cu/Cr合金层的研究 [J]. 激光, 2001 (2): 57-59.
- [18] 李琦, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 铝合金表面激光熔覆NiCrAl/TiC复合涂层的磨损行为和耐蚀性能 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24 (11): 2805-2812.
- [19] 李高松, 李金华, 冯伟龙, 等. 比粉与比能对激光熔覆NiWC25特性的影响 [J]. 表面技术, 2019, 48 (5): 253-258.
- [20] MASSE J E, FABRE A, BARRALLIER L, et al. Microstructure and corrosion resistance of magnesium alloy ZE41 with laser surface cladding by Al-Si powder [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (20): 4901-4914.
- [21] KECSKES L J, SZEWCZYK S T, PEIKRISHVILI A B, et al. Hot explosive compaction of aluminum-nickelide composites [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2004, 35 (13): 1125-1131.

## Preparation and Study of Cermet Composite Coating on Aluminum Alloy Surface of Automobile Parts

XIANG Jun-bo, JIANG Xue-ru, WANG Cong-ming, CHEN Kai-bin, YU Zhi-gang  
(Chengdu Vocational and Technical College of Industry, Chengdu 610218, Sichuan, China)

### Abstract:

Cermet composite coating was prepared on the surface of aluminum alloy automobile parts by laser cladding technology, and the influence of laser cladding process parameters on the forming of cladding layer was studied. The microstructure and element distribution of the cladding layer were studied by SEM and EDS. The microhardness of the cladding layer was tested by the microhardness tester, and the wear resistance of the cladding layer was tested by the friction and wear tester. The results show that when the laser power is 1.2 kW, the macroscopic morphology of cladding layer is good without obvious defects and the cladding layer has good metallurgical bonding with the substrate. With increasing laser power, the dilution ratio of cladding layer increases. The microstructure of cladding layer is mainly composed of cellular crystal, directional dendrite and fine equiaxed crystal. Compared with the substrate, the microhardness and wear resistance of the cladding layer are significantly improved, the microhardness is increased by 9 times, and the wear resistance is increased by 9.8 times.

### Key words:

laser cladding; composite coating; microstructure; microhardness; wear