

扫描速度对车用316L不锈钢熔覆层组织及力学性能的影响^①

贺天柱¹, 吴喆¹, 张成武², 陈东升³

(1.河北省机电工程技师学院,河北 张家口 075000; 2.南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001; 3.上汽大众汽车有限公司,上海 201805)

摘要: 采用不同激光扫描速度在304不锈钢表面制备了316L熔覆层,通过金相显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜及显微硬度计分别对316L熔覆层宏观形貌、相组成、微观组织及显微硬度进行研究。结果表明,316L熔覆层呈单相奥氏体结构,随着扫描速度升高,激光功率密度降低,热输入减小,冷却速度加快,熔覆层晶粒尺寸减小。熔覆层显微硬度与扫描速度成正相关,其中扫描速度1400 mm/min制备的316L熔覆层显微硬度最高,为275HV_{0.3}。熔覆层显微硬度的升高是晶格畸变导致的固溶强化和细晶强化的协同作用引起的。磨损试验结果表明,316L熔覆层平均摩擦系数显著低于304不锈钢基体,扫描速度1400 mm/min制备的316L熔覆层摩擦系数为0.424,磨损率为 $2.29 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,磨损机理为磨粒磨损。

关键词: 激光熔覆; 显微硬度; 316L不锈钢; 扫描速度; 耐磨性; 熔覆层

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.036

文章编号: 0253-6099(2023)05-0159-05

Effect of Laser Scanning Speed on Microstructure and Hardness of Laser Cladded 316L Coating

HE Tianzhu¹, WU Zhe¹, ZHANG Chengwu², CHEN Dongsheng³

(1. Hebei Institute of Mechanical and Electrical Engineering Technician, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China; 3. SAIC Volkswagen Automotive Co Ltd, Shanghai 201805, China)

Abstract: 316L stainless steel coatings were prepared on the surface of 304 stainless steel by using laser cladding at different scanning speed, and then metallographic microscopy, X-ray diffractometer, scanning electron microscopy and microhardness tester were adopted respectively to investigate the macroscopic morphology, phase composition, microscopic structure and microhardness for the coatings. The results showed that the 316L coating had a single-phase austenitic structure, and as the scanning speed increased, the grain size of the coating became smaller due to the reduction in the laser power density and heat input, and an increase in the cooling speed. It is found that the microhardness of the coatings is positively correlated with scanning speed, and the 316L coatings prepared by laser cladding at a scanning speed of 1400 mm/min presents the highest microhardness of about 275HV_{0.3}. The improvement of the microhardness of the coating is ascribed to the effect of solid solution strengthening caused by lattice distortion combined with the effect of fine crystal strengthening. The wear test showed that the average friction coefficient of 316L coatings was significantly lower than that of 304 stainless steel substrate. And the 316L coating prepared by laser cladding at 1400 mm/min has a friction coefficient of 0.424 and wear rate of $2.29 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and is prone to abrasive wear.

Key words: laser cladding; microhardness; 316L stainless steel; scanning speed; wear resistance; laser cladded coating

316L不锈钢具有优异的耐蚀性、良好的韧性和延展性,广泛用于制作汽车核心部件^[1-3]。但316L不锈

钢强度较低,易造成严重的变形和失效^[4],因此,通过表面改性技术修复和制备316L熔覆层具有重要意义。

① 收稿日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(51975270)

作者简介: 贺天柱(1973—),男,河北宣化人,高级讲师,主要研究方向为机械加工、激光增材制造及先进制造。

激光熔覆是一种先进的表面改性技术,具有热输入小、稀释率低、基体与熔覆层形成良好冶金结合等优异特性^[5-9]。激光工艺参数对熔覆层质量、组织和性能起到了至关重要的作用^[10-12]。本文采用3种扫描速度在304不锈钢表面制备316L熔覆层,系统研究了扫描速度对316L熔覆层相组成、显微组织及显微硬度的影响,为激光熔覆316L不锈钢熔覆层工艺参数的选取提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 实验材料

采用成都科泰隆科技有限公司生产的316L不锈钢商用合金粉末为熔覆粉末。316L不锈钢粉末粒径50~105 μm,粉末形貌见图1。在激光熔覆前,将合金粉末在真空干燥箱中80℃下干燥6h,去除粉末中的水分。以304不锈钢为基体材料,基材尺寸200 mm×200 mm×10 mm。激光熔覆前,采用角磨机将基材表面打磨光亮,并用酒精清洗基材表面,去除表面氧化皮和杂质。实验材料化学成分见表1。

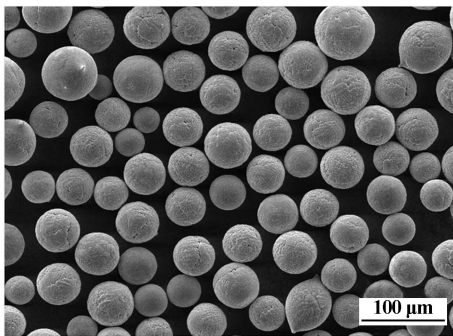


图1 316L 不锈钢粉末形貌

表1 实验材料化学成分(质量分数) %

实验材料	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
304 不锈钢	0.07	2	0.045	0.03	0.75	10.5	17.5	—	余量
316L 不锈钢粉末	0.03	1.45	0.03	0.02	0.55	12.56	16.82	2.25	余量

1.2 实验设备及工艺参数

采用光纤激光器(Trudiode-3006)在304不锈钢基材表面制备了316L熔覆层。激光熔覆实验在氩气保护下进行,氩气流量18 L/min,以保证熔覆层在熔覆过程中不被氧化。激光熔覆实验采用预制粉末法,预制粉末厚度1.2 mm。激光束波长1 050 nm,光斑直径3.6 mm,激光功率2 500 W,激光扫描速率分别选择1 000 mm/min、1 200 mm/min和1 400 mm/min,所得熔覆层分别命名为A1、A2、A3。

1.3 表征

采用X射线衍射仪(XRD, Shimadzu, XRD-7000)检测316L熔覆层相组成;采用标准金相制样方法制备金相试样,观察熔覆层的金相组织形貌。

1.4 维氏硬度

采用HVS-1000维氏显微硬度计对3种熔覆层由熔覆层表面至基体的显微硬度进行测试,测试载荷300g,加载时间15 s,间隔0.1 mm,同一水平位置测量3次取平均值。

1.5 干滑动摩擦磨损

采用往复式摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验。磨损实验前对样品表面进行打磨抛光至镜面,以消除粗糙度对摩擦系数的影响。摩擦副选取GCr15钢球,磨损实验参数为:加载载荷10 N、磨痕长度7 mm、频率120 Hz、磨损时间30 min。试验后,通过激光共聚焦显微镜观察磨痕形貌,计算磨损率:

$$W = \frac{V}{S \times L} \quad (1)$$

式中 W 为磨损率; V 为磨损体积, mm^3 ; S 为磨损长度, mm ; L 为施加载荷, N 。

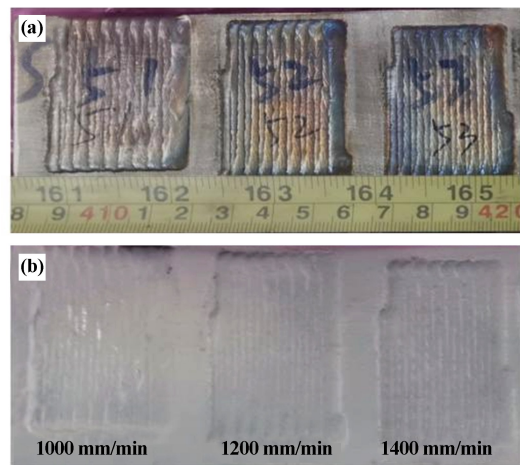
2 实验结果与讨论

2.1 宏观形貌

不同扫描速度下熔覆层的宏观形貌如图2所示。由图2(a)可见,扫描速度的变化改变了熔覆过程中的热输入,同时激光能量密度也随之改变。激光能量密度与扫描速度间的关系可表示为^[13-16]:

$$E = \frac{P}{\pi r^2 v_1} \quad (2)$$

式中 P 为激光功率, W ; E 为激光能量密度, J/mm^2 ; r 为光斑半径, mm ; v_1 为扫描速度, mm/s 。



(a) 宏观形貌;(b) 探伤形貌

图2 316L 熔覆层宏观形貌

结合式(1),随着扫描速度升高,激光能量密度降低,熔覆过程中热输入降低。扫描速度较低时,熔覆层表面粗糙度较高,熔覆轨迹较深;扫描速度逐渐升高,激光能量密度逐渐降低,熔覆层表面光滑且连续,没有明显的凸起或搭接缺陷。由图2(b)可见,3种扫描速度所制备的熔覆层均匀致密,熔覆层没有明显气孔、裂纹等缺陷,成型性较好。

2.2 相组成

不同扫描速度所制备的316L熔覆层的相组成如图3所示。熔覆层由奥氏体组成,所对应的衍射峰分别为(111)、(200)、(220)。不同扫描速率下,奥氏体首选取向随着扫描速度升高而改变。随着热输入降低,(200)取向衍射峰逐渐升高,(111)取向衍射峰逐渐降低。这是由于扫描速度加快,冷却速率随之升高,晶格畸变变大,奥氏体的优先生长晶面由(111)转变为(200)。此外,与标准PDF卡片中奥氏体衍射角相比,316L熔覆层的衍射角均向右偏移,这是激光熔覆过程中极高的冷却速率导致了奥氏体发生晶格畸变。根据布拉格定律^[17]:

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{3}$$

式中 d 为晶格间距, nm; θ 为入射射线与散射平面间的夹角, ($^\circ$); n 为常数; λ 为衍射波长, nm。

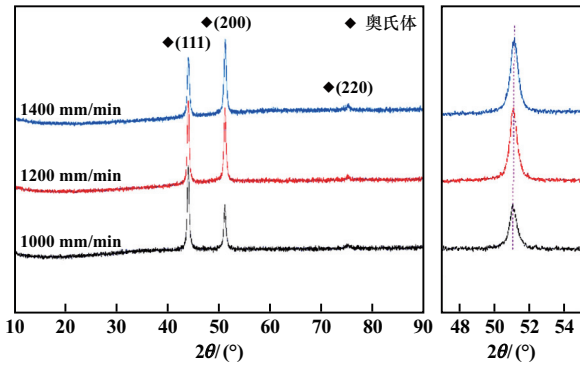


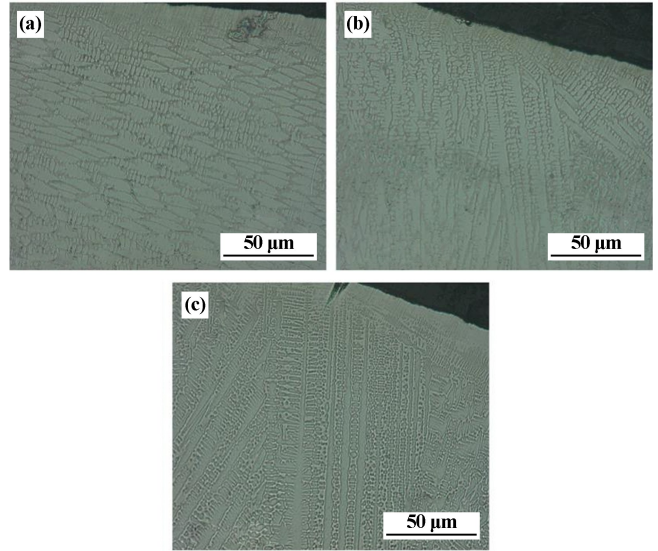
图3 不同扫描速度下316L熔覆层XRD衍射图谱

冷却速度升高,使奥氏体产生更为严重的晶格畸变,从而导致晶格间距减小, 2θ 角增大,衍射峰向右偏移。

2.3 金相组织形貌

不同扫描速度下316L熔覆层金相组织形貌如图4所示。A1熔覆层的金相组织主要为等轴晶和柱状晶。随着扫描速度逐渐升高,熔覆层组织转变为沿截面竖直向上生长的柱状晶,并且熔覆层组织显著细化。当扫描速度达到1400 mm/min时,柱状晶和二次枝晶臂细化更显著。可以用成分过冷理论来解释晶体生长和形貌转变,当液相的实际温度梯度低于平衡结晶温度时会发生晶粒形貌转变。根据成分过冷理论,合金处

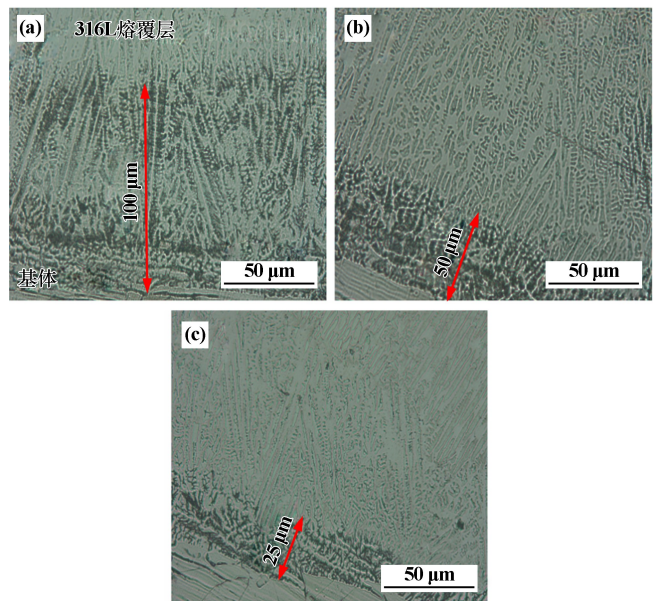
于非平衡凝固状态时,溶质再分布导致固液界面前端溶质浓度发生改变^[18]。当固液界面上端温度梯度小于熔体中液相线温度梯度时,液相处于过冷状态,凝固前沿处于亚稳态,导致枝晶在固液界面上端生长^[19]。因此,温度梯度和过冷度的变化是导致晶粒形态转变和组织细化的主要原因。



(a) 1 000 mm/min; (b) 1 200 mm/min; (c) 1 400 mm/min

图4 不同扫描速度下熔覆层显微组织

熔覆层与基体结合区形貌如图5所示。熔覆层底部主要由垂直于冶金结合线生长的柱状晶和胞状晶组成。此外,紧邻冶金结合线处生长了一层平面晶。结合非平衡凝固理论,在凝固过程中晶粒形态主要取决于温度梯度(G)与凝固速率(R)的比值^[20]。基体与熔



(a) 1 000 mm/min; (b) 1 200 mm/min; (c) 1 400 mm/min

图5 不同扫描速度下熔覆层与基体结合区显微组织

覆层结合处温差较大, G/R 值较大, 结合区形成一层较薄的平面晶。随着温度梯度逐渐降低, G/R 值逐渐减小, 晶粒生长方式由平面晶转变为胞晶和初生柱状晶, 并沿着温度梯度方向生长。结合图 5, 随着扫描速度升高, 温度梯度逐渐增加, 导致胞晶和初生柱状晶厚度由 $100\ \mu\text{m}$ 逐渐减小至 $25\ \mu\text{m}$ 。

2.4 显微硬度

图 6 为 3 种熔覆层沿截面方向测量的显微硬度曲线。可以看出, 3 种扫描速度所制备的 316L 熔覆层显微硬度均高于 304 不锈钢基体, 随着扫描速度升高, 熔覆层显微硬度升高。通常 316L 不锈钢在普通热加工状态下的显微硬度为 $150\text{HV}_{0.3}$ 。对比分析表明, 本文所制备的 316L 熔覆层具有较高的显微硬度。其中, A3 熔覆层平均显微硬度最高, 为 $275\text{HV}_{0.3}$, 约为 A1 熔覆层的 1.2 倍。这是由于较低的热输入和较高的冷却速率促进了熔覆层的晶粒细化, 由霍尔佩奇理论来解释^[21]:

$$H = H_0 + \frac{K_y}{\sqrt{\psi}} \quad (4)$$

式中 H 为显微硬度; H_0 为与晶粒尺寸无关的硬度常数; ψ 为平均晶粒尺寸; K_y 为斜率。

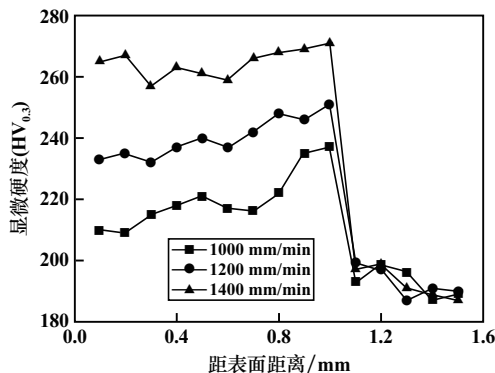


图 6 316L 熔覆层截面显微硬度曲线

由式(4)可知, 显微硬度与晶粒平均尺寸成反比, 晶粒越细小, 显微硬度越高。结合图 5, 扫描速度越快, 熔覆层组织更细小, 因而熔覆层显微硬度越高。此外, 扫描速度增加, 熔覆层过冷度增大, 冷却速度加快, 导致熔覆层内组织产生了更为严重的晶格畸变, 结合图 3, 随着扫描速度升高, 奥氏体衍射峰右移, 并产生更为剧烈的晶格畸变, 提高了奥氏体的极限固溶浓度, 从而增大了位错运动阻力, 使滑移难以进行, 进而增加了熔覆层的强度与硬度^[22]。因此, 熔覆层显微硬度的提高可归因于过冷度和晶格畸变引起的细晶强化和固溶强化的协同作用。

2.5 磨损行为

316L 熔覆层及 304 不锈钢基体的干滑动摩擦系数随时间变化曲线如图 7 所示。A1、A2、A3 和 304 基体平均摩擦系数分别为 0.447 3、0.437、0.424 和 0.577, 表明 316L 熔覆层平均摩擦系数均低于 304 不锈钢基体。干滑动磨损初期, 竖直载荷作用导致摩擦副表面发生严重的塑性变形, 增加了材料表面的粗糙度, 样品摩擦系数显著提升。硬度较高的 A3 熔覆层抗塑性变形能力较好, 塑性变形较弱, 摩擦系数最低。304 不锈钢硬度最低, 抗塑性变形能力最差, 表面粗糙度最大, 摩擦系数最高。此外, 结合图 5 可知, A3 熔覆层晶粒尺寸较细小, 晶界的增加提高了熔覆层的抗变形能力, 从而降低了熔覆层的摩擦系数。

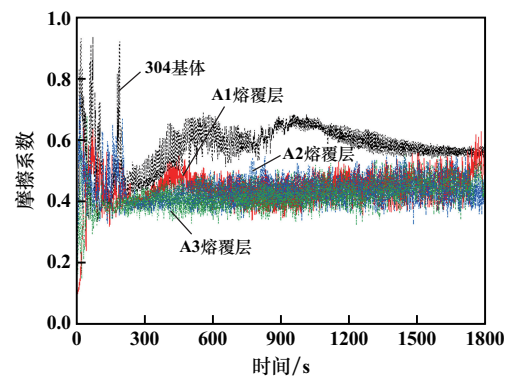


图 7 316L 熔覆层及 304 不锈钢基体摩擦系数曲线

图 8 为 304 不锈钢基体及 316L 熔覆层的磨损体积和比磨损率柱状图。304 不锈钢基体磨损体积和比磨损率均约为 316L 熔覆层的 2 倍, 表明 316L 熔覆层具有更优异的耐磨性。此外, 随着扫描速度提高, 316L 熔覆层磨损体积和比磨损率降低。

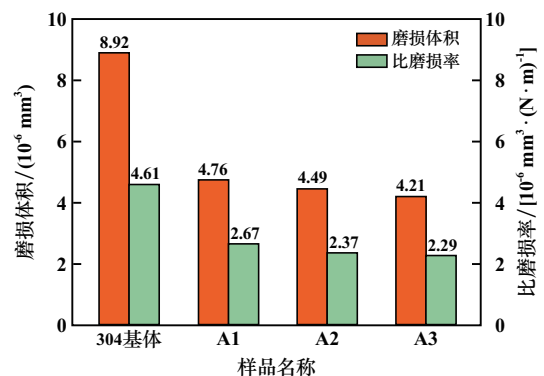
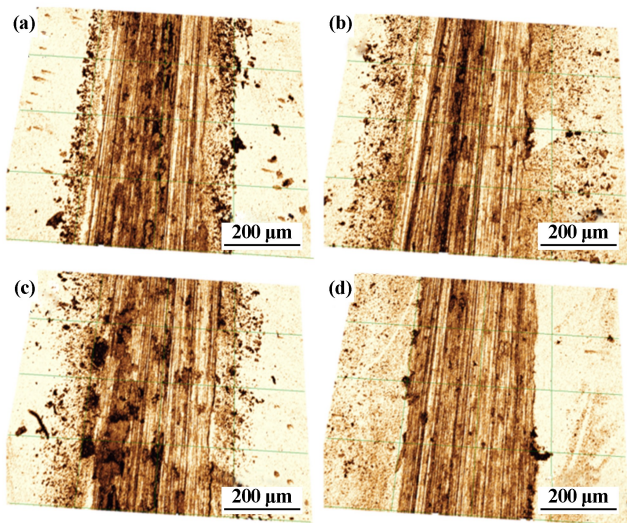


图 8 316L 熔覆层和 304 不锈钢基体磨损体积和比磨损率

为揭示 316L 熔覆层和 304 不锈钢的磨损机理, 采用激光共聚焦显微镜对熔覆层的磨损表面进行表征, 结果见图 9。可以明显看出, 304 不锈钢硬度较低, 磨损表面出现了较深的犁沟和严重的塑性变形, 并伴有

点蚀现象发生,磨痕宽度大于其他 316L 熔覆层的磨痕宽度,磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损。相较于 304 基体,316L 熔覆层磨痕宽度变窄,表面点蚀现象也随着扫描速度升高而减弱,扫描速度 1 400 mm/min 所制备的 316L 熔覆层表面并未发现由磨损而产生的点蚀坑,磨损机理主要为磨粒磨损。这是由于扫描速度的提升提高了熔覆层的显微硬度,从而提高了熔覆层的抗变形能力,减少了熔覆层表面碎屑的剥落。结合 Archard 定律,熔覆层的耐磨性与硬度成正相关。此外,扫描速度增加,熔覆层晶界数量增加,晶界面积增大,提高了熔覆层的抗变形能力,从而提升了熔覆层的硬度和耐磨性。



(a) 304 不锈钢; (b) A1 样品; (c) A2 样品; (d) A3 样品
图 9 316L 熔覆层和 304 不锈钢基体磨痕形貌

3 结 论

研究了在不同扫描速度下激光熔覆 316L 不锈钢熔覆层的组织演变、相组成、显微硬度及磨损行为,得出以下结论:

1) 随着扫描速度降低,激光能量密度升高,产生大量金属蒸气,增加熔池深度,降低熔覆层表面平整度,扫描速度 1 400 mm/min 时,可获得平整度较好的熔覆层。

2) 316L 不锈钢熔覆层主要由单相奥氏体组成,较高的扫描速度导致奥氏体产生较严重的晶格畸变。随着扫描速度升高,熔覆层内组织由柱状晶和等轴晶转变为单一的柱状晶,晶粒尺寸随扫描速度升高而减小。

3) 与 304 不锈钢基体相比,316L 熔覆层显微硬度明显提高,归因于细晶强化和固溶强化的协同作用。扫描速度 1 400 mm/min 制备的 316L 熔覆层平均显微

硬度最高,为 275HV_{0.3}。

4) 316L 熔覆层平均摩擦系数显著低于 304 不锈钢基体;其中扫描速度 1 400 mm/min 制备的 316L 熔覆层摩擦系数最低(0.424),磨损率 $2.29 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,磨损机理为磨粒磨损。

参考文献:

- [1] 李 超. 激光增材制造成形 316L 不锈钢的研究进展[J]. 机械工程材料, 2022,46(8):1-7.
- [2] 谭米雪,王 臻,赵凤君,等. 激光熔覆工艺参数对高速钢涂层性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):202-206.
- [3] 徐家乐,谭文胜,胡增荣,等. 激光熔凝 316L 不锈钢的摩擦学性能研究[J]. 应用激光, 2022,42(5):129-134.
- [4] HE Y, ZHAO Z, LUO T, et al. Failure analysis of journal bearing used in turboset of a power plant[J]. Materials & Design, 2013,52:923-931.
- [5] 王东生,田宗军,沈理达,等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2012,32(6):538-544.
- [6] 龚 丞,王丽芳,朱刚贤,等. 激光增材制造 316L 不锈钢熔覆层残余应力的数值模拟研究[J]. 应用激光, 2018,38(3):402-408.
- [7] XU P, LIN C, ZHOU C, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/Al₂O₃ composite coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2014,238:9-14.
- [8] ZHANG P, LIU X, YAN H. Phase composition, microstructure evolution and wear behavior of Ni-Mn-Si coatings on copper by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2017,332:504-510.
- [9] ZHU L, XUE P, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics and Laser Technology, 2021,138:106915.
- [10] Shayanfar P, Daneshmanesh H, Janghorban K. Parameters optimization for laser cladding of Inconel 625 on ASTM A592 steel[J]. Journal of Materials Research Technology, 2020,9(4):7288-7296.
- [11] Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. The influence of combined laser parameters on in-situ formed TiC morphology during laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2011,206:124-131.
- [12] SUI X M, LU J, HU J, et al. Effect of specific energy on microstructure and properties of laser cladded TiN/Ti₃AlN-Ti₃Al composite coating[J]. Optics & Laser Technology, 2020,131:106428.
- [13] WU C L, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Phase evolution and properties in laser surface alloying of FeCoCrAlCuNi_x high-entropy alloy on copper substrate[J]. Surface & Coatings Technology, 2017,315:368-376.
- [14] ZHAO T, ZHANG S, ZHOU F Q, et al. Microstructure evolution and properties of in-situ TiC reinforced titanium matrix composites coating by plasma transferred arc welding (PTAW)[J]. Surface & Coatings Technology, 2021,424:127637.
- [15] CHEN J W, ZHANG C H, ZHOU F Q, et al. Microstructural, electrochemical and wear-corrosion characterization of TC4-5Cu alloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021,874:159953.

(下转第 168 页)

3 结 论

1) 采用电沉积辅助溶胶-凝胶法制备的 V_2O_5 薄膜具有正交晶系结构, 主要沿(101)晶面择优生长。

2) 前驱体浓度 1:100 时, V_2O_5 薄膜具有良好的结晶度和纯度、均匀致密的表面形貌以及最佳的透射率。

3) 在近紫外区, V_2O_5 薄膜具有较高的吸收率; 在 540 nm 以上的可见光区域, V_2O_5 薄膜具有较高的透射率。相变前后 V_2O_5 薄膜的红外透过率由低温半导体态时的 89.5% 降至高温金属态时的 20.5%。

参考文献:

- [1] 齐 济. 钒氧化物的制备及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [2] Morin F J. Oxides which show a metal to insulator transition at the neel temperature[J]. Physical Review Letters, 1959, 3(1): 34-36.
- [3] XU Y K, HU Y F, SUN S, et al. Phase change behavior and multi-level storage for V_2O_5 thin film in phase-change memory application[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2020, 9(7): 3001.
- [4] 李军显, 李 毅, 周建忠, 等. 溶胶凝胶法制备 V_2O_5 薄膜及其热致相变光电特性[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(4): 316-322.
- [5] Abd-Alghafour N M, Mohammed S M, Ahmed N M, et al. Optimization of precursor concentration for the fabrication of V_2O_5 nanorods and their msd photodetector on silicon substrate[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(9): 5640-5649.
- [6] 李基铭, 覃 慧, 刘嘉铭. 水热法制备 V_2O_5 作为高性能锂离子电池正极材料[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(11): 79-84.
- [7] Korkmaz S, Meydani Tezel F, Kariper İ A. Synthesis and characterization of GO/ V_2O_5 thin film supercapacitor[J]. Synthetic Metals, 2018, 242: 37-48.
- [8] YU D R, WEI W, WEI M, et al. Research on the electrochromic properties of Mxene intercalated vanadium pentoxide xerogelfilms[J].

- Journal of Solid State Electrochemistry, 2022, 26(6-7): 1399-1407.
- [9] George A, Raj A Dhayal, Irudayaraj A Albert, et al. Two step synthesis of vanadium pentoxide thin films for optoelectronic applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 36: 464-467.
- [10] Abbasi M, Rozati S M, Irani R, et al. Synthesis and gas sensing behavior of nanostructured V_2O_5 thin films prepared by spray pyrolysis[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2019, 29: 132-138.
- [11] YANG S, CEN Y, HU B B, et al. High-performance ytterbium-doped $V_2O_5 \cdot H_2O$ binder-free thin-film electrodes for supercapacitors[J]. Chem Electro Chem, 2021, 8(11): 1993-2004.
- [12] Schneider K. Defect structure and electrical properties of vanadium pentoxide thin films[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33(13): 10410-10422.
- [13] Margoni M M, Mathuri S, Ramamurthi K, et al. Sprayed vanadium pentoxide thin films; Influence of substrate temperature and role of HNO_3 on the structural, optical, morphological and electrical properties[J]. Applied Surface Science, 2017, 418(A): 280-290.
- [14] Ramana C V, Naidu B S, Hussain O M, et al. Low-temperature growth of vanadium pentoxide thin films produced by pulsed laser ablation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(7): 35-38.
- [15] WU J, QIU D, ZHANG H L, et al. Flexible electrochromic V_2O_5 thin films with ultrahigh coloration efficiency on graphene electrodes[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165(5): D183-D189.
- [16] LIU X L, JIANG Y Q, BA D L, et al. A novel synthesis towards a vanadium pentoxide porous nanodisk film as a cathode material for advanced Li-ion hybrid capacitors[J]. Chemical Communications, 2020, 56(1): 70-73.
- [17] 刘东青. 二氧化钒薄膜制备及其热致变色特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [18] 刘亚强, 刘雪芹. 纳米 V_2O_5 薄膜的制备与特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 691-695.

引用本文: 杜金晶, 孙 晔, 朱 军, 等. 电沉积辅助溶胶-凝胶法制备 V_2O_5 薄膜及其性能研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 164-168.

(上接第 163 页)

- [16] TANG X, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Optimization of laser energy density and scanning strategy on the forming quality of 24CrNiMo low alloy steel manufactured by SLM[J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110718.
- [17] XU T Z, ZHANG S, WANG Z Y, et al. Wear behavior of graphite self-lubricating Babbitt alloy composite coating on 20 steel prepared by laser cladding[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141: 106698.
- [18] 方振兴, 祁文军, 李志勤. 304 不锈钢激光熔覆搭接率对 CoCrW 涂层组织与耐磨及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12123-12129.
- [19] LI X. Design, preparation, microstructure and properties of novel wear-resistant stainless steel-base composites using laser melting deposition[J]. Vacuum, 2019, 165: 139-147.
- [20] ZHOU S F, DAI X Q, ZHENG H Z. Microstructure and wear resist-

ance of Fe-based WC coating by multi-track overlapping laser induction hybrid rapid cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 44(1): 190-197.

- [21] YE X X, CHEN B, SHEN J H, et al. Microstructure and strengthening mechanism of ultrastrong and ductile Ti-xSn alloy processed by powder metallurgy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 709: 381-393.
- [22] LIU H, SUN S, ZHANG T, et al. Effect of Si addition on microstructure and wear behavior of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 405: 126522.

引用本文: 贺天柱, 吴 喆, 张成武, 等. 扫描速度对车用 316L 不锈钢熔覆层组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 159-163.