

超声振动对激光熔化沉积GH3536高温合金 摩擦磨损性能的影响

王晓东¹, 刘奋成², 吕诗劫², 裘成², 刘丰刚²

1. 中国航空发动机集团有限公司 北京 100097

2. 南昌航空大学航空制造工程学院 江西南昌 330063

摘要: 采用超声振动辅助激光熔化沉积GH3536高温合金, 并对增材制造样品的微观组织和摩擦磨损性能进行了分析。结果表明: 激光熔化沉积GH3536高温合金组织为粗大的柱状晶, 平均晶粒宽度约180 μm , 施加超声振动后, 柱状晶转变为等轴晶, 平均晶粒尺寸下降到78 μm 。施加超声振动后, 试样的平均摩擦系数由8.41降至8.17, 磨损率由 $6.37 \times 10^{-7} \text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降至 $4.25 \times 10^{-7} \text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 磨痕宽度由1122.81 μm 降至1003.21 μm , 磨痕深度由21.81 μm 降至19.71 μm 。

关键词: 激光熔化沉积; 超声振动; GH3536高温合金; 微观组织; 摩擦磨损性能

Effect of ultrasonic vibration on the friction and wear properties of laser metal deposition GH3536 superalloy

WANG Xiaodong¹, LIU Fencheng², LÜ Shijie², QIU Cheng², LIU Fenggang²

1. Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China

2. Nanchang Hangkong University, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract: Microstructure and friction and wear properties of the ultrasonic vibration-assisted (UVA) laser melting deposition of GH3536 superalloy are analyzed. The results show that the microstructure of laser melting deposition GH3536 superalloy is coarse columnar grains with an average grain width of about 180 μm . After applying ultrasonic vibration, the columnar grains are transformed into equiaxed grains, and the average grain size decreases to 78 μm . The average friction coefficient of the specimen decreases from 8.41 to 8.17, the wear rate decreases from $6.37 \times 10^{-7} \text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $4.25 \times 10^{-7} \text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, the width of the abrasion mark decreases from 1122.81 μm to 1003.21 μm , and the depth of the abrasion mark decreases from 21.81 μm to 19.71 μm after the application of ultrasonic vibration.

Keywords: laser metal deposition; ultrasonic vibration; GH3536 superalloy; microstructure; friction and wear property

基金项目: 国家自然科学基金 (52165050, 52265053, 52361010)。

第一作者: 王晓东, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为军用航空发动机维修保障技术, E-mail: michaelread@126.com。

通信作者: 刘丰刚, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光增材制造, E-mail: printlfg@163.com。

1 序言

GH3536作为一种典型的固溶强化型镍基高温合金，因其具有优异的抗氧化性、耐蚀性、焊接性，以及高温综合力学性能，而被广泛应用于燃气轮机发动机、航空发动机燃烧室、尾喷管等热端部件制造^[1, 2]。

随着航空技术的不断发展，对于航空发动机零部件的轻量化、一体化的制造提出了更高要求^[3]。传统制造方法（铸造、锻造）制造GH3536高温合金（以下简称GH3536合金）部件需经机械加工“减材”成形，这导致加工周期长、成本高、材料浪费等问题^[4]。因此，迫切寻求一种更为先进的加工技术。

激光熔化沉积技术，因其可实现高性能复杂结构金属零件的自由成形，所以逐渐成为航空航天发动机关键零部件制造的一条新途径^[5, 6]。激光熔化沉积GH3536合金内部经过了复杂的热循环，导致其在沉积方向上具有较高的温度梯

度，因此激光熔化沉积GH3536合金内部组织为外延生长的粗大柱状晶^[7]。微观组织的不均匀分布，会导致力学性能分布不均，这限制了激光熔化沉积技术的工程化应用。超声场带来的空化效应、声流效应和机械效应，能够细化晶粒、均匀组织、抑制缺陷，以及提高性能等^[8]，因此在激光熔化沉积技术中的应用更加广泛^[9-13]。因此，本文在激光熔化沉积GH3536合金过程中引入超声辅助技术，并探究超声振动对其微观组织与摩擦磨损性能的影响规律。

2 试验材料和方法

试验采用不锈钢板为成形基板，尺寸为100mm×100mm×6mm。试验所用粉末为西安欧中材料科技有限公司采用旋转电极法制备的GH3536合金球形粉末，粉末粒径为45~150μm，其化学成分见表1。试验前将粉末置于120℃的真空炉中烘干3h，以减少水分对成形质量的影响。

表1 GH3536合金粉末化学成分（质量分数） (%)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Si	Al	Cu	Ti	B	Mn	P	S	N
余量	21.73	19.14	8.73	1.56	0.77	0.077	0.047	0.026	0.016	<0.01	<0.003	<0.01	<0.005	<0.002	0.0032

激光熔化沉积系统主要包括光纤激光器、安川六轴联动机器人、送粉器、DX20机器人控制柜、水冷机和四路同轴送粉熔覆头等。超声振动（UVA）试验采用山东凯泽KZUIT-20C设备，其中包括超声发生器、超声换能器、变幅杆及振动头。超声振动辅助激光熔化沉积工艺参数为：激光功率1200W、光斑尺寸3mm、扫描速率600mm/min、超声振幅60μm。扫描路径为十字交叉扫描，超声振动辅助作用于整个激光熔化沉积过程中。该试验制备了30mm×20mm×10mm的试块，以研究其组织和摩擦磨损性能特征。

采用电火花线切割的方法，在超声振动辅助前后激光熔化沉积试块上切取典型试样，并制备成标准金相试样。采用FeCl₃溶液（8gFeCl₃+14mLHCl+20mLC₂H₅OH）作为腐蚀剂进行腐蚀，采用OLYMPUS BX53M型金相显微镜对其微观形貌进行观察。

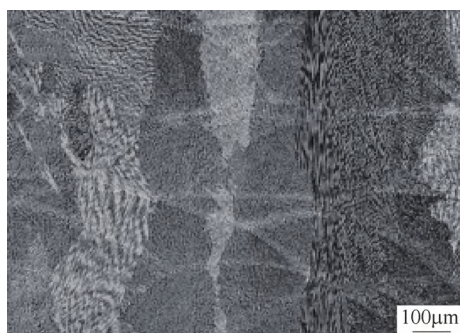
采用Rtec MFT5000型摩擦磨损试验机对超声振动辅助前后激光熔化沉积成形GH3536合金进行测试，使用电火花线切割加工出10mm×10mm×2mm

的试样，并将待磨表面用砂纸打磨后抛光至镜面，无任何划痕。采用氮化硅作为磨球，利用球盘式摩擦计在室温下进行摩擦磨损试验，在10N载荷、150r/min滑动速度下进行，旋转直径为6mm，摩擦持续1h后称重。摩擦磨损试验结束后，使用白光干涉仪观察磨损划痕的轮廓及深度，在扫描电子显微镜下观察磨损表面，分析磨损机理。

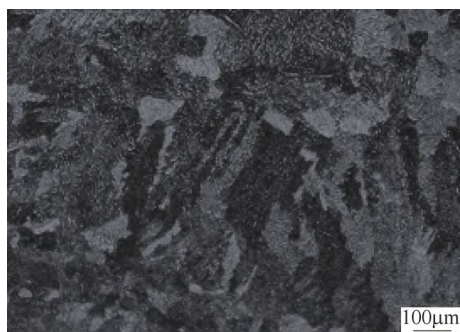
3 试验结果

图1所示为施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金的微观组织特征。从图1可看到，未施加超声振动辅助的试样存在较多粗大的柱状晶组织，柱状晶的晶界较为平直，且由底部开始生长，尺寸逐渐增大，粗大的柱状晶组织贯穿10余个熔覆层，柱状晶平均宽度180μm左右。施加超声振动后，晶粒形态发生了变化，由柱状晶转变为等轴晶，且平均晶粒尺寸减小到78μm左右。

图2所示为施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536试样摩擦系数（COFs）。由图2可看出，在摩擦磨损试验初期，即磨合阶段，施加超声振动前

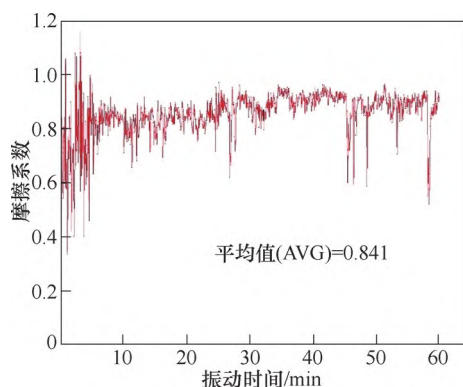


a) 未施加超声振动

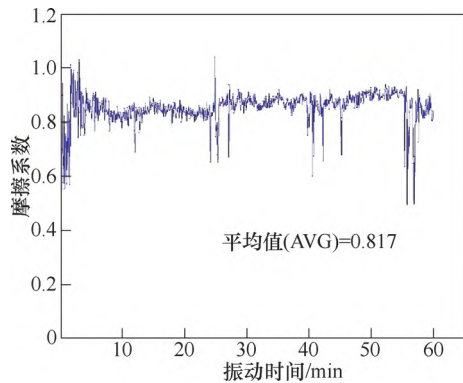


b) 施加超声振动 (振幅60μm)

图1 施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金的光镜形貌



a) 未施加超声振动试样



b) 施加超声振动试样 (振幅60μm)

图2 施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金试样的摩擦系数

后试样的摩擦系数上下波动较大,随着时间逐渐增大,在5min后趋于动态平稳。在磨合阶段,摩擦副表面存在山峰状凸起,摩擦较为剧烈并伴随着塑性变形。此时部分磨损碎屑会积聚于磨损区域,导致摩擦系数波动较大。

而随着摩擦磨损的进行,试验进入稳定磨损阶段。此时部分磨损碎屑被旋转带离试样表面,部分磨损碎屑被逐渐压实,在试样表面形成了氧化膜,使摩擦系数趋于稳定。在此阶段出现少数几次波动,可能是由于掉落的磨损碎屑被挤入摩擦区域,导致了摩擦系数的波动。摩擦系数在一定程度上可以反应材料的摩擦磨损性能,材料的摩擦系数越小,其摩擦磨损性能越好。

对比两组试样,施加超声振动后的试样,其摩擦系数曲线相对稳定,这是由于施加超声振动后,激光熔化沉积GH3536合金试样的组织和硬度分布更为均匀。未施加超声振动辅助试样的平均摩擦系数为0.841,施加超声振动的试样平均摩擦系数为0.817。由此可见,在施加超声振动后,提高了激光熔化沉积GH3536试样的摩擦磨损性能。

采用精度为0.1mg的电子天平对摩擦磨损前后的试样进行称重,通过下式计算超声前后摩擦试样的磨损率,即

$$W = \frac{V}{SP} = \frac{\Delta m}{\rho SP}$$

式中 W ——磨损率 [$\times 10^{-7} \text{cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$];

V ——磨损体积 (mm^3);

P ——法向载荷 (N);

S ——总滑动距离 (m);

Δm ——磨损质量 (g);

ρ ——密度 (g/cm^3)。

图3所示为施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金摩擦磨损试样的磨损率。两组试样的磨损率分别为 $6.37 \times 10^{-7} \text{cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 和 $4.25 \times 10^{-7} \text{cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 施加超声振动辅助试样的磨损率远小于未施加超声振动的试样,降低了33.28%。

对施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金的磨损试样表面进行扫描电镜及EDS观察,扫描电镜图如图4所示。由图4a、b可看出,施加超声振动前的试样磨痕宽度为 $1122.81 \mu\text{m}$, 超声振幅为 $60 \mu\text{m}$ 的试样磨痕宽度为 $1003.21 \mu\text{m}$ 。磨损痕迹的宽度和

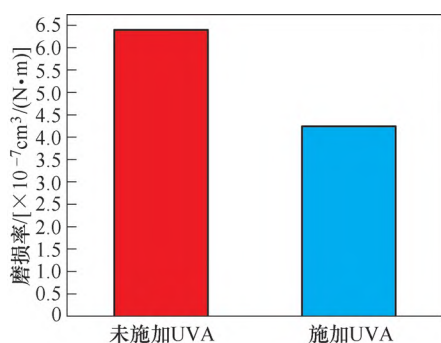
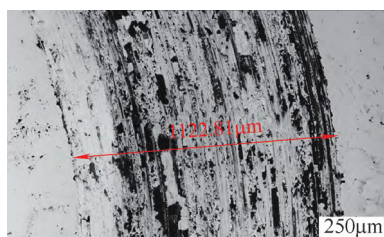


图3 施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金试样的磨损率

深度在一定程度上反映了磨损量的变化。施加超声振动降低了激光熔化沉积GH3536合金试样摩擦磨损的磨痕宽度，而磨损痕迹的宽度和深度与摩擦系数的变化规律一致，即摩擦系数越高，摩擦力越大，磨损痕迹越宽，因而未施加超声振动的试样，其摩擦系数大于施加超声振动的试样，这与前文中的结

论相符。

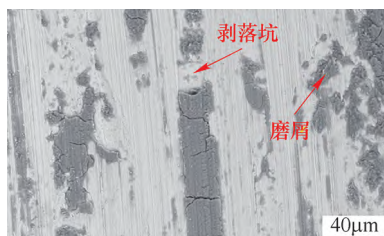
由图4c、d还可看出，两组试样表面均附着磨屑组织，未施加超声振动的试样较少，60 μm 振幅试样较多。在高倍电镜下进行EDS扫描，结果见表2。从表2可看出，这些大块磨屑组织的氧含量较高。分析认为，GH3536合金的导热系数较低，即导热性较差，摩擦过程中试样表面产生的热量累积，致使在试样中产生高温，表面与空气接触部分被氧化，两组试样均发生了氧化磨损。由图4c、e可看到，未施加超声振动试样的磨损表面有较多“犁沟状”划痕，同时存在着剥落坑及磨损碎屑，因此，未施加超声振动激光立体成形GH3536合金试样的磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损。超声振幅为60 μm 的摩擦试样表面存在着大量氧化产物，同时存在少量的划痕，局部出现分层现象（见图4b、f）。这主要是由于超声振动试样在摩擦过程中发生了加工



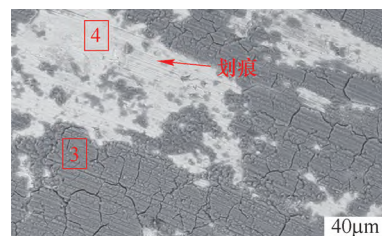
a) 未施加超声振动的磨损试样磨痕宽度



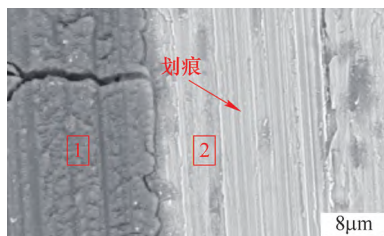
b) 施加超声振动的磨损试样磨痕宽度（振幅60 μm ）



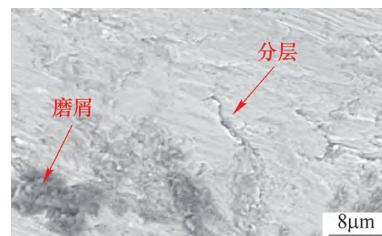
c) 未施加超声振动的磨损试样剥落坑和磨屑情况



d) 施加超声振动的磨损试样划痕情况（振幅60 μm ）



e) 未施加超声振动的磨损试样划痕情况



f) 施加超声振动的磨损试样磨屑和分层情况（振幅60 μm ）

图4 施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金试样磨损表面扫描电镜图

表2 施加超声振动前后激光熔化沉积GH3536合金试样磨损表面EDS结果（质量分数）（%）

位置	O	Ni	Cr	Fe	Mo
1	44.05	26.00	12.03	10.69	7.23
2	6.36	44.40	19.65	18.82	10.77
3	27.29	34.92	15.80	13.98	8.01
4	6.83	44.52	19.87	17.54	11.23

注：位置1~4分布见图4。

硬化,在摩擦冲击中被挤压剥落撕裂,产生了接触疲劳磨损。因此,超声振幅为 $60\mu\text{m}$ 的激光熔化沉积GH3536合金试样的磨损机制主要为氧化磨损,伴随着少部分的接触疲劳磨损。

为进一步表征施加超声振动辅助对激光熔化沉积GH3536合金摩擦磨损性能的影响,采用白光干涉仪对施加超声振动前后的摩擦试样进行观察,结果如图5所示。由摩擦试样的三维形貌图(见图5a、b)可看出,磨损区域边缘会有部分磨损碎屑堆积,相较于试样表面凸起 $4\sim 6\mu\text{m}$,三维形貌图中展示的深度 $27\mu\text{m}$ 、 $28\mu\text{m}$ 为磨损区域内的最大深度,不代表平均深度。

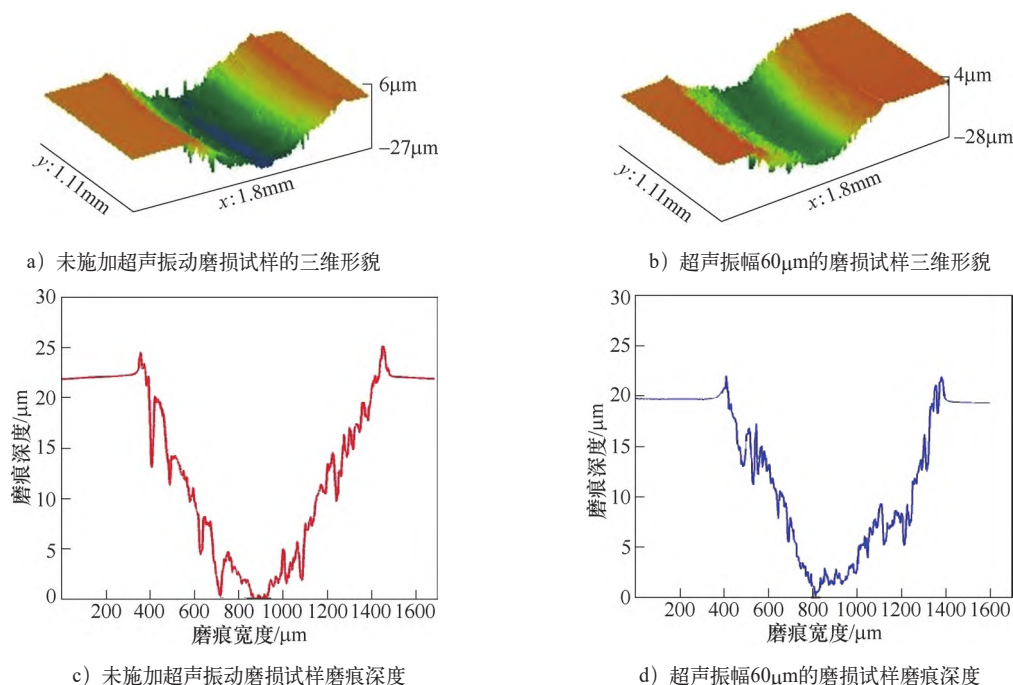


图5 施加超声振动前后磨损试样的白光干涉图像

屑颗粒会对磨损表面产生“犁沟状”划痕,部分磨屑被旋转带出磨损区域,部分磨屑被挤压至摩擦表面,而超声试样的组织质地更为均匀、坚硬,阻碍了磨屑对摩擦表面的磨损,因而产生了深度、宽度更低的磨痕。

综上所述,由所得摩擦系数、磨损率、磨痕宽度及磨痕深度试验数据可知,超声振动辅助可有效提高激光熔化沉积GH3536合金的摩擦磨损性能。

4 结束语

1) 激光熔化沉积GH3536合金试样存在较多粗大的柱状晶组织,柱状晶的晶界较为平直,粗大

由图5c、d可看出,磨痕区域边缘有凸起,与三维图像观察一致。未施加超声振动的摩擦磨损试样磨痕宽度在 $1100\mu\text{m}$ 左右,超声振幅 $60\mu\text{m}$ 的摩擦磨损试样磨痕宽度在 $1000\mu\text{m}$ 左右,这与前文中扫描电镜下观察测量的宽度基本相符。未施加超声振动的摩擦磨损试样磨痕深度为 $21.81\mu\text{m}$,超声振幅 $60\mu\text{m}$ 的摩擦试样磨痕深度为 $19.71\mu\text{m}$ 。施加超声振动后,磨痕宽度和深度均有所下降,表明施加超声振动的试样磨损率更低,这与图3的结果一致。

分析认为,施加超声振动后,激光熔化沉积GH3536合金发生CET转变,具有更为均匀分布的等轴晶组织,在摩擦磨损过程中,磨损表面脱落的磨

的柱状晶组织贯穿十余个熔覆层,柱状晶平均宽度 $180\mu\text{m}$ 左右。施加超声振动后,晶粒形态由柱状晶转变为等轴晶,且平均晶粒尺寸减小到 $78\mu\text{m}$ 左右。

2) 施加超声振动后,其摩擦系数曲线相对稳定,未施加超声振动辅助试样的平均摩擦系数为0.841,施加超声振动的试样平均摩擦系数为0.817。

3) 施加超声振动前后,激光熔化沉积GH3536合金摩擦磨损试样的磨损率分别为 $6.37 \times 10^{-7} \text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 、 $4.25 \times 10^{-7} \text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,施加超声振动辅助试样的磨损率远小于未施加超声振动的试样,降低了33.28%。

4) 施加超声振动后,磨痕宽度由 $1122.81\mu\text{m}$ 降

至1003.21 μm , 磨痕深度由21.81 μm 降至19.71 μm 。未施加超声振动试样的磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损。施加超声振动后其磨损机制主要为氧化磨损, 伴随着少部分的接触疲劳磨损。

参考文献:

- [1] 倪浩涵, 曾琦, 张恺, 等. 激光粉末床熔融GH3536合金高温低周疲劳行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (6) : 2302-2308.
- [2] 计霞, 楚瑞坤, 陈志茹, 等. 激光选区熔化GH3536高温合金的成形工艺及组织性能[J]. 金属热处理, 2020, 45 (11) : 205-210.
- [3] 吴建, 张甲甲, 郭坤, 等. 镍基高温合金叶片叶尖磨削砂轮系统加工稳定性研究[J]. 工具技术, 2021, 55 (3) : 20-25.
- [4] 沈沐宇, 谢寅, 李继康, 等. 激光功率对双激光粉末床熔融GH3536合金搭接区组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2023, 50 (24) : 125-134.
- [5] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [6] 孙小峰, 荣婷, 黄洁, 等. 激光增材制造技术在航空制造领域的研究与应用进展[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (3) : 7-14.
- [7] 王树森, 郝铭淞, 梁静静, 等. 热处理对激光立体成形GH3536力学性能的影响[J]. 铸造, 2023, 72 (5) : 508-513.
- [8] 陈健, 姚喆赫, 姚建华, 等. 超声振动辅助激光熔覆技术研究进展综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64 (12) : 36-46.
- [9] NING F, HU Y, LIU Z, et al. Ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of Inconel 718 parts: a feasibility study[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 771-778.
- [10] ZHANG M, ZHAO G L, WANG X H, et al. Microstructure evolution and properties of in-situ ceramic particles reinforced Fe-based composite coating produced by ultrasonic vibration assisted laser cladding processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 403: 126445.
- [11] MA G, YAN S, WU D, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ultrasonic assisted laser clad yttria stabilized zirconia coating[J]. Ceramics International, 2017: S0272884217307101.
- [12] WEN X, CUI X, JIN G, et al. Design and characterization of FeCrCoAlMn0.5Mo0.1 high-entropy alloy coating by ultrasonic assisted laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835: 155449.
- [13] 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国激光, 2019, 46 (1) : 114-122.

MW 20240719

(上接第24页)

- of laser clad Fe-based amorphous coatings[J]. Materials, 2019, 12 (8) : 1279.
- [16] 何珊珊. 不锈钢表面激光熔覆Co基合金复合涂层的组织及性能的研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2019.
- [17] 李信, 曲庆文, 崔林. 工艺参数对激光增材熔覆成形Co基WC复合涂层的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (2) : 89-93.
- [18] KIEHL M, SCHEID A, GRAF K, et al. Coaxial laser cladding of cobalt-base alloy stellite™ 6 on grey cast iron analysis of the microstructural and mechanical properties depending on the laser power[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32 (8) : 3821-3838.
- [19] CUI C, WU M, MIAO X, et al. The effect of laser energy density on the geometric characteristics, microstructure and corrosion resistance of Co-based coatings by laser cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 2405-2418.
- [20] WANG W R, QI W, ZHANG X L, et al. Superior corrosion resistance-dependent laser energy density in (CoCrFeNi) 95Nb5 high entropy alloy coating fabricated by laser cladding[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28 (5) : 888-897.

MW 20240715