

激光熔覆 Ni 基合金涂层组织性能的研究进展

王修虎^{1,2,3} 米国发¹ 李 雷² 陈晓壮³ 刘卫东¹ 张利超¹

(1.河南理工大学材料科学与工程学院;2.上海电机学院材料学院;3.上海仅博激光技术有限公司)

摘 要 镍基合金具有良好的耐高温、抗蠕变性,作为激光熔覆材料被广泛应用于各种高性能复杂结构件的快速修复及表面改性。激光增材制造镍基合金虽具有良好的硬度和耐高温性,但在苛刻的服役条件下同时承受高温和高速摩擦作用,熔覆层表面损耗仍然很大,故镍基合金熔覆层的高温耐磨性需要进一步提高与优化。从激光熔覆工艺参数、合金元素含量、增强相、自润滑相及辅助处理对镍基合金激光熔覆层的高温耐磨性能的影响进行综合阐述,分析其所面临的主要难题并提出改进措施。

关键词 激光熔覆;镍基合金;高温耐磨性

中图分类号 TG139;G353.11 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Microstructure and Properties of Laser Cladding
Ni-based Alloy Coatings

Wang Xiuhu^{1,2,3}, Mi Guofa¹, Li Lei², Chen Xiaozhuang³, Liu Weidong¹, Zhang Lichao¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University;

2.School of Materials, Shanghai Dianji University; 3.Shanghai Jinbo Laser Technology Co., Ltd.)

Abstract: Nickel-based alloy is widely used in rapid repair and surface modification of complex structural parts with high performance due to the excellent high temperature resistance and creep resistance. The laser additive nickel-based alloy exhibits desirable hardness and high temperature resistance, which suffers huge loss under harsh service conditions of high temperature and high-speed friction. Therefore, the high temperature wear resistance of nickel-based alloy cladding layer needs to be further improved and optimized. The research status of high temperature wear resistance of laser cladding nickel-based alloy was comprehensively described in aspects of the laser cladding process parameters, alloying element content, reinforcing phase, self-lubricating phase and auxiliary treatment. The main problems were analyzed and the solutions were proposed.

Key Words: Laser Cladding, Nickel-based Alloy, High Temperature Wear Resistance

激光增材制造技术(3D 打印)是建立在三维建模、数字数据处理、三维模型构建之上的一项立体快速制造技术,其基本原理是将激光束扫描到材料成形区域将材料熔化,或将熔覆粉末熔化,形成规则或具有目标形状的瞬时熔池,通过逐层覆盖堆积最终成为三维零件。激光熔覆则是激光增材制造技术其中的一种表面修复与改性技术^[1]。目前,激光增材制造技术主要有电子束熔炼技术、选择性激光烧结技术、选择性热烧结技术、选择性激光熔化沉积技术以及直接金属激光烧结熔化沉积技术。金属结构件激光增材制造技术应用较多的是选区激光熔化(SLM)技术和激光熔化沉积(LMD)技术^[2-3]。SLM 技术精度高,成形件致密,但很容易受到

预铺基板尺寸的限制,适用于小型精密器件的小批量生产和快速制造;而 LMD 技术的激光能量较大,将金属粉末直接喷涂到激光束上进行熔化沉积,通常运用五轴数控,可以实现大尺寸、多材料、多角度构件的高性能修复和快速制造,但粉末粒径大会导致材料表面的粗糙度较大,适合大面积、大体积铸件的直接成形^[4-6]。目前用于高温镍基合金的激光熔覆表面改性也主要采用 SLM 和 LMD 技术。

金属激光增材制造技术由于其设计自由、无模、快速、全致密以及近净成形等特点被用于复杂高性能金属结构零件的快速制造,同时也用于激光熔覆基体表面来进行缺陷的修复以及表面性能的合金化改良^[7-8]。以

收稿日期:2022-11-06;修改稿收到日期:2023-01-09

基金项目:上海市科委“科技创新行动计划”重大专项资助项目(19511105402)

第一作者简介:王修虎,男,1998 年出生,硕士研究生,河南焦作(454003),E-mail:212106020050@home.hpu.edu.cn

通信作者:李雷,男,1975 年出生,教授,上海(201306),E-mail: lilei1975@163.com

引用格式:王修虎,米国发,李雷,等. 激光熔覆 Ni 基合金涂层组织性能的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12):1 613-1 620.

WANG X H, MI G F, LI L, et al. Research progress in microstructure and properties of laser cladding Ni-based alloy coatings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 613-1 620.

Ni 为基体的镍基高温合金,高温下表现出优异的力学性能并具有良好的组织稳定性,镍基合金激光熔覆层则成为了相关领域研究的热点^[9-10]。目前,激光熔覆镍基合金可以达到甚至超过锻件的综合力学性能,但合金内部往往会出现一定的元素偏析、裂纹孔洞、残余应力等缺陷,因此需要在激光熔覆技术的基础上,通过改善工艺参数、添加改良元素以及辅助处理在一定程度上优化镍基合金激光熔覆层的性能^[3-4,11-12]。此外,在一些苛刻的服役条件下,如冶金装备上的前卷取侧导板、顶头、芯棒等,由于需要同时承受高温和高速摩擦,对材料的表面损耗很大,因此为适应更高的工作要求,激光熔覆镍基合金的高温耐磨性需要得到进一步研究与改进。

1 工艺参数对镍基合金熔覆层的影响

激光熔覆的主要工艺参数为激光功率、扫描速度、搭接率、进粉速率以及光斑尺寸,这些参数的组合决定了熔覆层的几何特征,并对熔覆层的温度场、应力场、内部组织转变产生不同的影响,进而对熔覆层的晶粒尺寸、相组成、硬度和耐磨性造成不同的影响。研究工艺参数对熔覆层的影响,可通过有限元分析与数值模拟设计验证、改变单一变量进行试验对比、统计学建立工艺参数与熔覆层几何特征或稀释率的关系来进行验证^[13-14]。

NIE P 等^[15]利用流体力学、有限元分析和数值模拟预测了熔覆层凝固组织及其与粉末尺寸、激光功率和激光扫描速度等工艺参数的关系,发现当激光功率和激光扫描速度在一定比例下同时增加时,粉末粒径对冷却速率和二次枝晶臂间距的影响程度减弱,这项工作有助于对激光熔覆产生更为全面的认识,并为控制镍基高温合金激光熔覆层的微观组织提供参考。YU S F 等^[16]研究了激光工艺参数对镍基合金熔覆层的影响,发现在激光功率为 2.0 kW,进粉速率为 15 g/min,激光扫描速度为 4 mm/s 时,镍基合金熔覆层与基体具有较好的冶金结合且熔覆层具有良好的晶粒度,稀释率低。CAI Z B 等^[17]在研制 Ni-Cr-Co-Ti-V 高熵合金涂层时,发现当激光功率为 1 kW,光斑直径为 3 mm,激光速度为 10 mm/s 时,激光重熔后富钛相的体积分数显著增加,显微硬度(HV)达 900。LEI J B 等^[18]采用激光熔覆制备了碳纤维增强镍基复合涂层,发现随着激光扫描速度提高,复合涂层中碳纤维的形貌更加完整,复合涂层的耐蚀性和耐磨性得到提高,当激光扫描速度为 8 mm/s,激光功率为 2.4 kW,熔覆层的硬度和耐磨性最高。LI R F 等^[19]在对镍基非晶合金的激光熔覆中也发现在一定的范围内硬度和耐磨性随着激光扫描速度提高而增加,当激光扫描速度为 8 mm/s、激光功率为 800

W 时熔覆层硬度和耐磨性达到最大。

激光工艺参数对熔覆层的影响往往通过改变熔池内稀释率和熔覆层几何形状间接影响熔覆层的性能,因此可以通过研究激光工艺参数对熔覆层几何特征以及稀释率的线性特征拟合了解激光工艺参数对其性能的影响^[20-21]。CAO Q 等^[22]发现激光功率与镍基合金熔覆层的高度、宽度以及稀释率呈正相关;然而扫描速度与熔覆层高度和宽度呈负相关,与稀释率呈正相关;进粉速率与熔覆层高度呈正相关,与熔覆层宽度和稀释率呈负相关,此发现对进一步有效控制熔覆层的质量提供参考。

2 添加相对镍基合金熔覆层的影响

2.1 微量元素对镍基合金复合涂层的影响

为了满足镍基高温合金优异的抗氧化、抗疲劳、抗蠕变和抗腐蚀等综合性能,通常会在合金粉末中加入 Al、Ti、Zr、Nb、Mo、Co、C 等一些固溶强化元素^[23-24]。加入微量元素的种类、含量都会对镍基合金熔覆层的性能产生极大影响。

通常,随着温度升高,合金表面发生氧化而使其耐磨性降低,KRELL J 等^[25]在研究激光熔覆制备 Ni₃Si 合金的高温耐磨性时发现,Ti 的加入虽然降低了 Ni₃Si 合金的抗氧化性,但改善了其摩擦学性能。随着 Ti 含量的增加,高温下熔覆层的磨损机制发生改变,提高了耐磨性。CHEN Y K 等^[26]利用激光熔覆制备了添加 Ti 元素的镍基合金熔覆层。结果表明,Ti 的加入使 Ni60-20WC 原始涂层中原位生成了 Cr₅B₃和 M₂₃C₆两种硬质碳化物,溶解了 WC,生成了 TiC 颗粒并形成网状结构,使得块状 Cr₅B₃颗粒均匀分布在组织中,涂层的硬度大幅提高。为提高球墨铸铁的镍基复合涂层的综合性能,蒋智秋等^[27]向激光熔覆镍基合金粉末添加了不同含量的 Al。结果表明,在 Al 含量为 6%时,涂层的耐磨性提高最为显著;在 Al 含量为 8%时,850 ℃的高温下抗氧化能力最强。Nb 可以促进镍基合金中晶粒的细化,降低气孔、裂纹等缺陷的产生,且可以在熔覆过程中与熔融体中的 C 原位生成 NbC 增强相,NbC 具有高硬度以及高熔点等特性^[28]。DONG G 等^[29]采用激光熔覆法在 AISI1045 碳钢上熔覆了不同 Nb 含量的镍基合金,发现 Nb 的加入使 Ni 基合金熔覆层中析出了 NbC 颗粒和 M₂₃C₆型碳化物,镀层的显微硬度和耐磨性随 Nb 含量的增加而增加。张伟等^[30]在镍基合金中加入了 V 元素,发现随着 V 含量增加,涂层中原位生成的 VC 增多,耐磨性增强。雍耀维^[31]通过将二氧化锆和石墨按照反应摩尔比混合的方式在 Ni25、Ni45 和

Ni60 中添加了 Zr 元素成功制备了含有原位自生 ZrC 颗粒的 ZrC/Ni25、ZrC/Ni45、ZrC/Ni60 镍基复合涂层。在涂层中,C 和 ZrO_2 反应生成 ZrC,不仅细化了组织结构,而且阻止了 M_7C_3 粗大碳化物和 $\gamma-Ni+M_{23}C_6$ 继续生长,进而提高组织稳定性,改善了耐磨性。

微量元素的加入可通过固溶强化、抗氧化改变磨损机理、细化晶粒减少裂纹萌生、促进强化相溶解而生成新的增强相来改变镍基涂层的性能,针对不同的情况可选择适当元素和含量来制备高温耐磨镍基复合涂层。

2.2 硬质相对镍基合金涂层的影响

添加硬质相对镍基合金熔覆层的作用一般分为两种,一种在镍基合金粉末中直接添加硬质颗粒,在熔覆过程中的硬质相颗粒大部分不熔化,直接作为强化相来提高熔覆层的性能;另外一种则是作为过渡相,通过促进形核细化晶粒或生成新的强化相来强化涂层。镍基合金熔覆层常用硬质相颗粒包括金属碳化物陶瓷和金属氧化物陶瓷^[32]。

WC 是最常用作直接添加的硬质相来制备镍基复合涂层,WC 与镍基合金具有良好的冶金结合,可制备出冶金性能良好的复合涂层。采用镍包 WC 的方式可使 WC 在涂层中分布均匀,提高涂层的耐磨性^[32-33]。WC 也可作为增强相,进一步添加微量元素制备耐磨性能更好的复合镍基涂层^[26]。FU F X 等^[34]在 2Cr13 钢表面制备了添加 WC 的镍基合金熔覆层。结果表明,

当合金粉末中 WC 的含量为 20% 时,合金涂层具有优良的硬度、耐磨和耐冲蚀性能,可有效延长设备的使用寿命。WANG K M 等^[35]在 Q235 钢表面制备了激光熔覆 Ni60A/WC 复合涂层。发现 WC 颗粒部分溶解并与其他元素反应形成共晶,共晶以块状、条状和球形的形式存在,提高了涂层硬度和耐磨性。YU S F 等^[16]通过研究 NbC 加入量对镍基合金摩擦磨损性能的影响,发现当 NbC 含量达到 6% 时,熔覆层的磨损量最小,耐磨性最好。WU T A 等^[36]在镍基粉末中添加 Nb_2O_5 ,利用激光熔覆技术在 A35 钢表面进行了熔覆试验,发现当 Nb_2O_5 含量为 15% 时,涂层晶粒得到细化且具有良好的冶金结合,耐磨性增加了 1 倍。CHAO M J 等^[37]研究了 TiO_2 掺杂对镍基复合涂层的影响。发现 TiO_2 的加入原位生成了较多的 TiB_2 和 TiC ,增加了形核位点的数量,提高了形核率,硬质相增多的同时细化了晶粒和组织,提升了耐磨性。SAHOO C K 等^[38]在镍基合金粉末中添加 TiC,采用激光熔覆技术在钢上制备了镍基合金熔覆层(见图 1),发现 TiC 的加入不仅使熔覆层具有良好的冶金结合,而且熔覆层中的 TiC,以及新生成的 Ni 和 Ti 等金属间化合物显著提高了熔覆层的耐磨性。LI Y Z 等^[39]在 NiFeBSi 镍基合金粉末中添加了 SiC,利用 TIG 焊技术获得了与 NiFeBSi 形貌相同的镍基复合涂层,且随着 SiC 的加入,致使 $\gamma(Fe, Ni)$ 枝晶间出现了多种类型的碳化物,极大地提高了熔覆层的硬度和耐磨性。

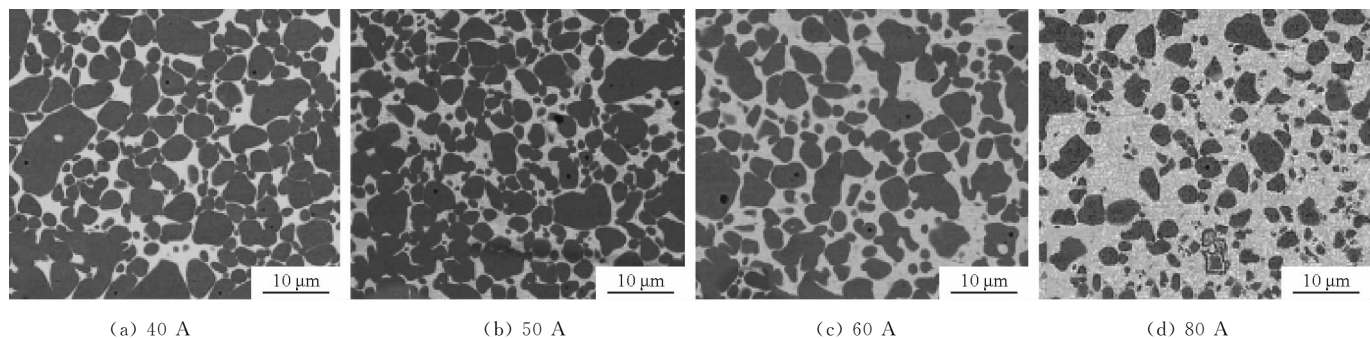


图 1 不同熔覆工艺高倍 FESEM 图像 TiC-Ni 涂层组织分布^[38]

Fig.1 High magnification FESEM images of TiC-Ni coating with different cladding processes^[38]

向镍基合金粉末中添加硬质颗粒来提高激光熔覆层的硬度和耐磨性,主要有以下几种原理:①硬质颗粒与熔覆层拥有良好的冶金结合,直接作为硬质相均匀分布在基体中起到增加强度提高耐磨性的效果^[34-35];②金属氧化物的添加往往起到细化晶粒、增强冶金结合、减少空洞裂纹萌生的作用^[36,40];③硬质相参与了激光熔池的冶金反应,致使涂层中原位生成新的碳化物及其他增强相弥散到晶体间,起到增加硬度和耐磨性的作用^[38-39]。

2.3 自润滑相对镍基合金涂层的影响

通过添加自润滑相,在镍基合金中起到减磨效果也是增加镍基合金涂层耐磨性的一个重要途径^[41-42]。常用作自润滑相的物质有软金属、石墨、碳包合金以及硫化物等。

TORRES H 等^[43]采用激光熔覆手段,将 Au、Ag 等不同的软金属固体润滑剂通过过渡金属二卤族化合物(WS_2 , MoS_2)包裹加入镍基复合涂层,使其均匀分布在组织内,得到了 600 °C 以内耐磨性提高的镍基复合

涂层。马超等^[44]采用激光熔覆技术在 40CrNi2Si2MoV 钢表面制备了不同含量的镍包石墨涂层(见图 2),发现随着镍包石墨含量的增加,熔覆层的组织逐渐细化,并伴随着石墨相的出现,在镍包石墨含量为 6% 时,表现出良好的耐磨性。LI M Y 等^[45]采用激光熔覆技术,并运用离子渗流的方式加入 S 元素,在镍基合金熔覆层表面形成 FeS 自润滑相来达到减磨效果。发现由于 FeS 的作用,复合熔覆层的摩擦因数和磨损量都减小。ZHU R Y 等^[46]在 Inconel625 合金基体上运用激光熔覆技术制备了镍基自润滑涂层 NiCrAl-IY/Ag₂O/Ta₂O₅。发现室温下 Ag 起到主要的润滑作

用,在 350 ℃ 时 NiO 和 Ag 共同作用进行润滑,当 550 ℃ 时,Ag 失去润滑效果,而 NiO 和 CrO₂ 形成的耐磨釉层为熔覆层起到了主要的润滑作用,使其在高温下的耐磨性提高很大。LU X L 等^[47]在 Ti-6Al-4V 基板上通过激光熔覆手段制备了不同六方氮化硼(hBN)含量的 Ni60-hBN 复合镀层,发现随着 hBN 含量增加,涂层的耐磨性和润滑性也不断增加,Ni60-10hBN 涂层在高温(300 ℃ 和 600 ℃)下表现出优异的摩擦学行为。LIU X B 等^[48]通过激光熔覆手段在 NiCr-Cr₃C₂ 镍基合金粉末中加入了 WS₂ 自润滑粉末。发现在 WS₂ 含量为 30% 时,涂层在 300~600 ℃ 以内具有良好的润滑和耐磨性。

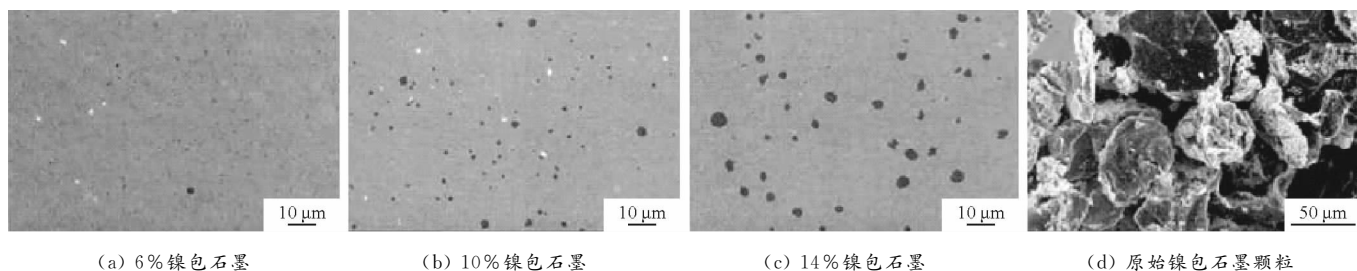


图 2 不同镍包石墨含量复合涂层中石墨的分布状态^[44]

Fig.2 Distribution of graphite in composite coatings with different nickel coated graphite contents^[44]

通过添加自润滑相来达到熔覆层减磨目的主要有以下两种形式:①所加入的软金属、石墨等自润滑相均匀分布在组织内,使得熔覆层的组织整体具有良好的稳定性和润滑性^[43-44];②加入硫化物、非金属等物质,通过物理化学结合的方式在熔覆层的表面形成润滑层及耐磨釉层来达到减摩耐磨的目的^[45-46]。通过自润滑的方式来增加耐磨性在中低温度能达到较好的耐磨效果,但在较高温度(600 ℃ 以上)自润滑相、耐磨釉层会发生不同程度的分解,导致耐磨机制变化,从而使磨损率提高,耐磨性变差^[47-48]。因此,有待进一步开发高温耐磨自润滑减摩材料体系。

2.4 稀土元素对镍基合金涂层的影响

在镍基合金粉末中加入稀土元素可使熔覆层的性能大为改善,其可细化组织晶粒,减少裂纹、缺陷和气孔、降低熔覆基体稀释率,提高抗氧化能力,使熔覆层具有更好的冶金结合能力等^[49-50]。

NING Z 等^[51]将 Ni60 合金粉末和 La₂O₃ 混合,利用激光熔覆手段在 30CrMnSiNi2A 基板上制备了添加稀土元素(La₂O₃)的镍基复合涂层,发现 La 在枝晶间偏析,限制了次生枝晶的粗化,使熔覆层的表面组织得到细化,显著减少了熔覆层中的裂纹和气孔,使熔覆层的耐磨性得到极大提高。ZHANG G Y 等^[52]在 Ni60 合金粉末中加入稀土 CeO₂,利用激光熔覆在 6063-Al 上制备了镍基合金熔覆层。发现当 CeO₂ 含量为 5%

时,在 Ni60 熔覆层具有较好的组织和形貌,且减少了裂纹和气孔,尤其是在熔覆层的表面作用更为明显,从而使熔覆层的耐磨性提高。WANG C L 等^[53]同样在 6063-Al 表面制备了不同稀土含量的镍基合金熔覆层,发现添加 4% 的 CeO₂、5% 的 La₂O₃ 和 5% 的 Y₂O₃ 的 Ni60 熔覆层比未添加稀土的熔覆层具有更好的形貌特征,气孔和裂纹明显减少,熔覆层的硬度随着熔覆层深度增加而逐渐减小,且稀土的加入使熔覆层的稀释度增加。CAI Y C 等^[54]在 Cr12MoV 钢表面利用激光熔覆手段制备了不同 CeO₂ 含量的 Ti/Ni 复合涂层(见图 3),发现熔覆层从底部到表面依次是柱状晶、胞状晶、等轴晶,适当的稀土元素使得熔覆层组织细化,并在表面析出较多的 TiC 颗粒,使得表面的耐磨性提高,但过量的稀土元素会污染晶界且导致 TiC 颗粒过度烧损,从而降低熔覆层耐磨性。

稀土元素的加入对熔覆层的影响主要有以下特点:

①稀土的加入并没有产生新的相,对枝晶的生长产生重要影响,弥散的稀土元素钉扎晶界长大,产生偏析,增加了等轴晶数量,从而实现细晶强化^[51,55];②稀土对熔覆层晶粒的作用敏感度从顶部到深处越来越弱,熔覆层顶部的晶粒最为细小,涂层表面更加致密,耐磨性、硬度最好^[52-53];③稀土元素可以净化合金晶界,吸附熔覆层中难溶 P、S 化合物等,减少熔覆层缺陷生成,但过量加入则会燃烧晶界^[54,56]。

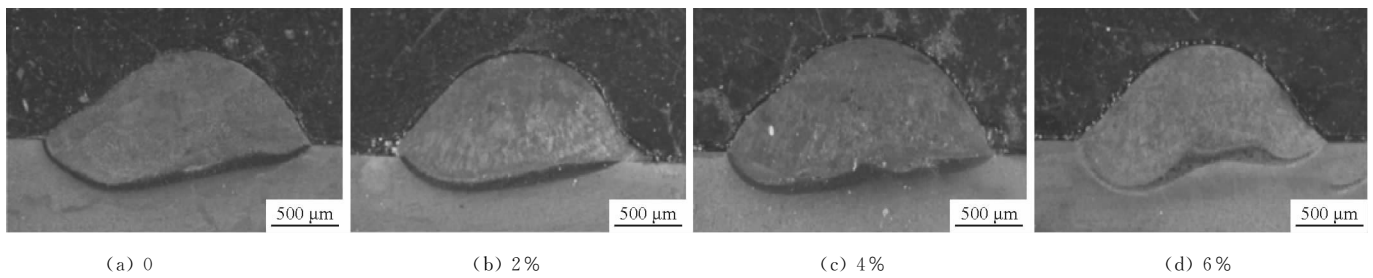


图3 不同含量稀土复合涂层界面^[54]

Fig.3 Interface of composite coating with different rare earth contents^[54]

3 辅助处理对镍基合金涂层的影响

适当的辅助处理不仅可以减少缺陷的产生,也可以优化熔覆层的性能,常见的对镍基合金熔覆层辅助处理的方式有热处理、电磁场,超声等手段^[57-58]。

FERREIRA A A 等^[59]研究了基材预热对镍基合金熔覆层的影响,发现在基板预热 300 °C 时对镍基合金熔覆层和基材界面区域有较大影响,减少了熔覆层中有害 Laves 相的形成,使涂层组织更加均匀。GONG F B 等^[60]采用激光熔覆在 FV520B 钢表面制备了 FeCrNi 合金熔覆层,研究了热处理对镍基合金的影响,发现在 1 073 ~ 1 273 K 的热处理过程中,二次淬火的作用使基体材料的晶粒得到细化,并使熔覆层与基体结合的硬度软区得到了有效去除;当热处理温度为 1 073 K 时,熔覆层获得了最大的抗拉强度,但也在一定程度影响了其耐磨性。DURGE G 等^[61]在 AISI410 不锈钢表面熔覆了 NiCrBSi 合金涂层,并在 898 K 下热处理了 1.5 h,

发现热处理后的 NiCrBSi 熔覆层硬度提升约 1/3,并且热处理过程中涂层内形成了额外的硼化物、碳化物沉淀,其耐磨性也有明显的提高。

YAO F P 等^[62]为了在不增加强化相的情况下使镍基合金熔覆层的性能优化,采用了不同频率的超声辅助对镍基合金熔覆层进行处理,并使用摩擦磨损试验机对熔覆层进行了硬度和摩擦磨损的测试。发现适度的超声频率能显著地细化熔覆层的组织,使熔覆层的硬度和耐磨性得到明显提高,且熔覆层具有良好的细晶粒。HU G F 等^[63]创新性地将电磁和超声叠加辅助处理在镍基合金熔覆层上,并采用有限元分析对熔覆场流体的辅助影响模拟(见图 4),发现声流改变了熔池的宏观运动,电磁场加剧了熔池的对流。这说明辅助场的加入细化了组织,内部元素偏析均匀,由于熔池对流加剧,元素偏析被抑制,枝晶生长被打破,进一步细化了组织,与未加辅助场的熔覆层相比,极大地提高了熔覆层硬度和耐磨性。

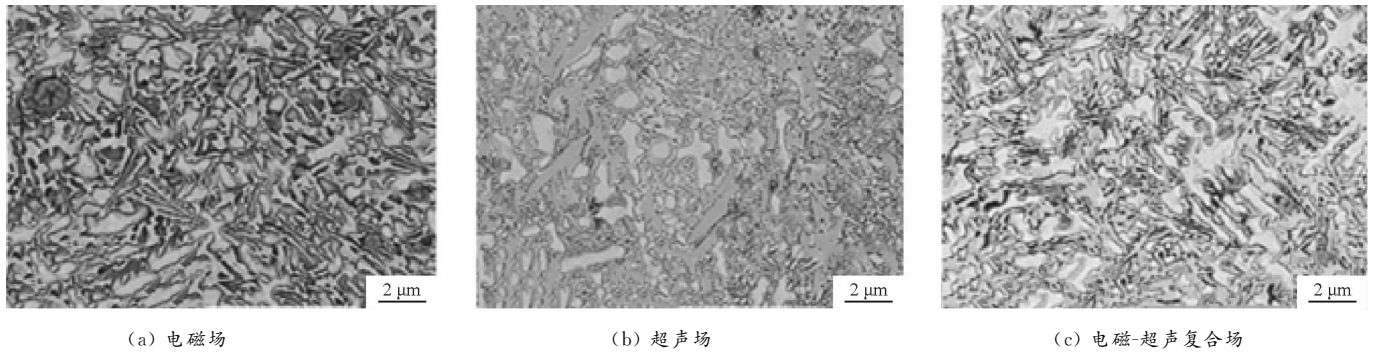


图4 复合场辅助处理镍基合金熔覆层表面微观组织^[63]

Fig.4 Surface microstructure of nickel-based alloy cladding layer assisted with different compound fields^[63]

无论是单一辅助场,还是复合场均可对镍基合金熔覆层组织性能进行调控,主要的作用机理可分为:①基板预热处理,增加冶金结合,提高熔覆层抗裂性,改善激光熔覆工艺性^[59];②后期热处理,通过退火消除应力集中,进行时效强化,改善熔覆层的组织结构,提高硬度和耐磨性^[60-61];③超声和电磁场的辅助,通过增加熔池液体对流,产生枝晶破碎使组织更加均匀,从而细化晶粒,起到增加硬度和耐磨性的作用^[62-63]。

4 结语与展望

(1)基于合金成分不同和复杂多变不可控性,激光工艺参数对镍基合金熔覆层的影响未有规范可循的参考,但可以从激光功率等参数对稀释率、熔覆层几何形状等角度对工艺参数进行调节,对于具体的影响和作用仍需大量的研究和统计学分析进行标准化。

(2)微量元素、合金成分、稀土元素对镍基合金的影

响具有相辅相成的作用,往往通过细化晶粒、枝晶偏析、固溶强化等单一或共同作用来提高熔覆层性能。稀土的加入往往不会产生新相,而合金元素加入可原位促进新的强化相和增强相来提高熔覆层耐磨性。添加相对于熔覆层的影响已相当成熟,但仍需在提高镍基合金熔覆层耐高温、高速摩擦、强腐蚀方面继续研究。

(3)自润滑相的加入改变了镍基合金熔覆层的磨损机理,在 600 ℃ 以下往往表现出优异的耐磨性,在 600 ℃ 及以上润滑相氧化和耐磨釉层分解,需要进一步优化。

(4)辅助处理对镍基合金熔覆层组织的细化和残余应力、缺陷的减少至关重要,但目前研究较少,在定性、定量使用辅助处理优化熔覆层时仍需做进一步研究。

参 考 文 献

- [1] LEE H, LIM C H J, LOW M J, et al. Lasers in additive manufacturing: A review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(3): 307-322.
- [2] CHEN Y, CHEN H, JIANG Y S, et al. Research progress in stress and deformation control in laser additive manufacturing for high-performance metals[J]. J. Mater. Eng., 2019, 47: 1-10.
- [3] ADEKANYE S A, MAHAMOOD R M, AKINLABI E T, et al. Additive manufacturing: The future of manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2017, 709: 715.
- [4] MEIER H, HABERLAND C. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2008, 39(9): 665-670.
- [5] VAYRE B, VIGNAT F, VILLENEUVE F. Metallic additive manufacturing: State-of-the-art review and prospects[J]. Mechanics & Industry, 2012, 13(2): 89-96.
- [6] SUN X, SONG W, LIANG J, et al. Research and development in materials and processes of superalloy fabricated by laser additive manufacturing[J]. Acta Metall. Sin., 2021, 57(11): 1 471-1 483.
- [7] CHUN L, WEI Z, YU Z Z, et al. Research progress of additive manufacturing of W-Ni-Fe heavy alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(8): 3 011-3 019.
- [8] SIDDIQUI A A, DUBEY A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106 619.
- [9] HU Z Q, LIU L, JIN T, et al. Development of the Ni-base single crystal superalloys[J]. Aeroengine, 2005, 31(3): 1-7.
- [10] ZHANG M H, ZHANG B C, WEN Y J, et al. Research progress on selective laser melting processing for nickel-based superalloy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(3): 369-388.
- [11] YANG J, CHEN J, YANG H, et al. Experimental study on residual stress distribution of laser rapid forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(12): 1 304-1 307.
- [12] TOMUS D, ROMETSCH P A, HEILMAIER M, et al. Effect of minor alloying elements on crack-formation characteristics of Hastelloy-X manufactured by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 16: 65-72.

- [13] MARZBAN J, GHASEMINEJAD P, AHMADZADEH M H, et al. Experimental investigation and statistical optimization of laser surface cladding parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5): 1 163-1 172.
- [14] GOODARZI D M, PEKKARINEN J, SALMINEN A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry[J]. Welding in the World, 2017, 61(5): 883-891.
- [15] NIE P, OJO O A, LI Z. Modeling analysis of laser cladding of a nickel-based superalloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258: 1 048-1 059.
- [16] YU S F, FU H G, XUE P L, et al. Effect of process parameters and niobium carbide addition on microstructure and wear resistance of laser cladding nickel-based alloy coatings[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2020, 51(1): 54-65.
- [17] CAI Z B, CUI X F, LIU Z, et al. Microstructure and wear resistance of laser clad Ni-Cr-Co-Ti-V high-entropy alloy coating after laser remelting processing[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 276-281.
- [18] LEI J B, SHI C, ZHOU S F, et al. Enhanced corrosion and wear resistance properties of carbon fiber reinforced Ni-based composite coating by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 334: 274-285.
- [19] LI R F, QIU Y, ZHU Y Y. Friction wear property of laser surface processed Ni-based amorphous alloy coatings [J]. International Journal of Modern Physics, 2019, B33: 1 940 014.
- [20] LIAN G F, YAO M P, ZHANG Y, et al. Analysis and prediction on geometric characteristics of multi-track overlapping laser cladding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5): 2 397-2 407.
- [21] ZHU S C, CHEN W L, ZHAN X H, et al. Parameter optimisation of laser cladding repair for an Invar alloy mould[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, B233(8): 1 859-1 871.
- [22] CAO Q, LIAN G F, CHEN C R, et al. Sensitivity analysis of the process parameters of laser cladding NiCrCoAlY[J]. Metallurgical Research & Technology, 2022, 119(2): 206.
- [23] 王进才,霍晓阳,李雷,等.Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 粉末激光熔凝性能研究[J].特种铸造及有色合金, 2022, 42(10): 1 256-1 262.
- [24] JIANG Z J, WANG J, CAO D M, et al. Recent progress in research and development of nickel-based single crystal superalloys [J]. Acta Metall. Sin., 2019, 55(9): 1 077-1 094.
- [25] KRELL J, RÖTTGER A, ZIESING U, et al. Influence of precipitation hardening on the high-temperature sliding wear resistance of an aluminium alloyed iron-nickel base alloy[J]. Tribology International, 2020, 148: 106 342.
- [26] CHEN Y K, ZHANG X, LIU E Z, et al. Fabrication of three-dimensional graphene/Cu composite by in-situ CVD and its strengthening mechanism [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 69-76.
- [27] 蒋智秋,陈泉志,董婉冰,等. Al 对激光熔覆镍基合金涂层组织与性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(12): 2 035-2 039.
- [28] 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, 2019, 33(9): 1 535-1 540.
- [29] DONG G, YAN B, DENG Q L, et al. Effect of niobium on the mi-

- crostructure and wear resistance of nickel-based alloy coating by laser cladding[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(6): 973-977.
- [30] 张伟, 冯秋红, 王尔亦, 等. 激光熔覆原位生成 VC 增强 Fe-Ni 基复合涂层的组织与硬度[J]. *金属热处理*, 2019, 44(7): 190-193.
- [31] 雍耀维. 激光熔覆镍基复合涂层工艺和性能的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [32] TOBAR M J, ÁLVAREZ C, AMADO J M, et al. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(22-23): 6 313-6 317.
- [33] GUO C, CHEN J M, ZHOU J S, et al. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(8-9): 2 064-2 071.
- [34] FU F X, ZHANG Y L, XIE Y X, et al. The tribology and erosion-corrosion resistance properties of Fe-Cr-Ni-Si and WC alloy coating[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2021, 219(1): 69-75.
- [35] WANG K M, FU H G, LEI Y P, et al. Microstructure and property of Ni60A/WC composite coating fabricated by fiber laser cladding[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2015, 46(12): 1 177-1 184.
- [36] 吴天安, 王文丽, 晁明举, 等. Nb₂O₅ 对镍基合金激光熔覆层组织的影响[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(1): 23-27.
- [37] CHAO M J, LIANG E J. Effect of TiO₂-doping on the microstructure and the wear properties of laser-clad nickel-based coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 179(2-3): 265-271.
- [38] SAHOO C K, MASANTA M. Microstructure and mechanical properties of TiC-Ni coating on AISI304 steel produced by TIG cladding process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 126-137.
- [39] LI Y Z, WANG C S, LI T, et al. Influence of nano-SiC particle on microstructure and properties of laser clad NiFeBSi alloy coating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1 356-1 360.
- [40] YAN L I, DAI J T, ZHANG D F, et al. Effect of Y₂O₃ on the properties of laser cladding Ni-based alloys layer[C]//. *Proceedings of 2017 2nd International Conference on Advanced Materials Science and Environment Engineering*, Sanya, Hainan, 2017.
- [41] CHENG J, LI F, ZHU S, et al. High temperature tribological properties of a nickel-alloy-based solid-lubricating composite; Effect of surface tribo-chemistry, counter part and mechanical properties[J]. *Wear*, 2017, 386: 39-48.
- [42] 孙洋, 李文生, 胡伟, 等. 镍基自润滑涂层的摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(5): 562-569.
- [43] TORRES H, VUCHKOV T, SLAWIK S, et al. Self-lubricating laser claddings for reducing friction and wear from room temperature to 600 °C[J]. *Wear*, 2018, 408: 22-33.
- [44] 马超, 王存山. 镍包石墨对激光熔覆镍基合金涂层组织和性能的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0 803 003.
- [45] LI M Y, HAN B, SONG L X, et al. Enhanced surface layers by laser cladding and ion sulfurization processing towards improved wear-resistance and self-lubrication performances[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 503: 144 226.
- [46] ZHU R Y, ZHANG P L, YU Z S, et al. Microstructure and wide temperature range self-lubricating properties of laser cladding Ni-CrAlY/Ag₂O/Ta₂O₅ composite coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 383: 125 248.
- [47] LU X L, LIU X B, YU P C, et al. Synthesis and characterization of Ni60-hBN high temperature self-lubricating anti-wear composite coatings on Ti-6Al-4V alloy by laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 87-94.
- [48] LIU X B, ZHENG C, LIU Y F, et al. A comparative study of laser cladding high temperature wear-resistant composite coating with the addition of self-lubricating WS₂ and WS₂/(Ni-P) encapsulation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(1): 51-58.
- [49] WANG K L, ZHANG Q B, SUN M L, et al. Microstructural characteristics of laser clad coatings with rare earth metal elements[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 139(1-3): 448-452.
- [50] WANG Y L, SHEN D J, LIAO B. Effect of rare earth on Ni-based spontaneous melting alloy by laser cladding[J]. *Applied Laser*, 2003, 23(3): 139-140.
- [51] NING Z, LI T, HUI G, et al. Microstructure and wear resistance of laser clad Ni-based coatings with nanometer La₂O₃ addition[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(8): 2 092-2 096.
- [52] ZHANG G Y, WANG C L, GAO Y. Mechanism of rare earth CeO₂ on the Ni-based laser cladding layer of 6063Al surface[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(4): 1 003-1 007.
- [53] WANG C L, GAO Y, WANG R, et al. Microstructure of laser-clad Ni60 cladding layers added with different amounts of rare-earth oxides on 6063 Al alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 1 099-1 107.
- [54] CAI Y C, LUO Z, CHEN Y, et al. Influence of CeO₂ on tribological behaviour of TiC/Fe-based composite coating[J]. *Surface Engineering*, 2017, 33(12): 936-943.
- [55] PAN X L, YU H Y, TU G F, et al. Effect of rare earth metals on solidification behaviour in nickel based superalloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 28(5): 560-564.
- [56] LI Q L, ZHANG H R, GAO M, et al. Mechanisms of reactive element Y on the purification of K4169 superalloy during vacuum induction melting[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2018, 25(6): 696-703.
- [57] CHEN J, WANG S H, XUE L. On the development of microstructures and residual stresses during laser cladding and post-heat treatments[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(2): 779-792.
- [58] 刘卫东, 米国发, 李雷, 等. 辅助处理对激光熔覆层组织性能影响的研究进展[J]. *材料导报*, 2023(15): 1-14.
- [59] FERREIRA A A, AMARAL R L, ROMIO P C, et al. Deposition of nickel-based superalloy claddings on low alloy structural steel by direct laser deposition[J]. *Metals*, 2021, 11(8): 1 326.
- [60] GONG F B, JUN S, GAO R H, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of FeCrNi coating produced by laser cladding[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(8): 2 117-2 125.
- [61] DURGE G, CHANDAK A, JAISWAL A K, et al. Effect of heat treatment on the hardness and wear characteristics of NiCrBSi laser clad deposited on AISI410 stainless steel[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 086 524.

SiC_p/Mg-6Zn-3Al 复合材料力学行为有限元建模研究

白淑英¹ 王 冲¹ 郭恩宇^{1,2} 陈宗宁^{1,2} 康慧君^{1,2} 王同敏^{1,2}

(1.大连理工大学材料科学与工程学院辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室;2.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 针对 SiC_p/Mg-6Zn-3Al 镁基复合材料,建立了基于真实微观组织的二维有限元力学分析模型,采用模拟和试验相结合的方法深入研究了复合材料的变形和断裂行为,以及颗粒尺寸对材料力学性能的影响。结果表明,随着颗粒尺寸增加,复合材料的强度、塑性及加工硬化率均有下降。模拟分析表明,平面应变加载下模拟曲线与试验结果较吻合,拉伸过程中应力集中多发生在颗粒尖角及凹陷处;应力和应变均沿与拉伸方向呈 45°“X”状分布,中心处应力或应变的叠加会导致其成为裂纹源的形核位置。裂纹沿着高应力或应变区域扩展,导致局部区域应力的释放。颗粒尺寸的增加导致材料性能降低的本质在于大尺寸颗粒的载荷传递效果大幅降低。

关键词 镁基复合材料;力学性能;有限元模拟;平面应力;平面应变

中图分类号 TB331;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite Element Modelling of Mechanical Behavior of SiC_p/Mg-6Zn-3Al Composites

Bai Shuying¹, Wang Chong¹, Guo Enyu^{1,2}, Chen Zongning^{1,2}, Kang Huijun^{1,2}, Wang Tongmin^{1,2}

[1.Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology(Liaoning Province),
School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology;
2.Ningbo Institute of Dalian University of Technology]

Abstract: A two-dimensional finite element mechanical analysis model based on real microstructures was established for SiC_p/Mg-6Zn-3Al magnesium matrix composites. The deformation and fracture behavior of the composites and the influence of grain size on mechanical properties were investigated intensively by combining simulation and experiment. The results indicate that the strength, plasticity and work hardening rate of the composites are all decreased with the increase of grain size. The simulation analysis reveals that the simulation curve under plane strain loading is in consistent with the experimental ones, and stress concentration often occurs in the sharp corners and depressions of grain during the tensile process. The stress and strain are distributed in an “X” shape along 45 ° from the tensile direction, and the superposition of the stress or strain at the center become the nucleation location of crack source. The crack is propagated along the high stress or strain area, leading to the release of local regional stress. The essence of grain size increase resulting in the property reduction is the great decline of load transfer effect of large grain.

Key Words: Mg Matrix Composites, Mechanical Property, Finite Element Simulation, Plane Stress, Plane Strain

镁合金是目前工业应用中最轻的金属结构材料,具有高比强度、比刚度、良好的成形性及生物相容性等特点,在航空、航天、医疗和交通等领域具有良好的应用前景^[1-2]。但是其强度低、韧性差、高温性能不足等缺点限制了其更广泛应用^[3]。向镁合金中加入各类增强相以制备出性能优异的复合材料成为近年来镁合金领域的

收稿日期:2022-12-23;修改稿收到日期:2023-02-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974058,52022017,U22A20174,51927801)
第一作者简介:白淑英,女,1998 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail: DUT_bsy@163.com
通信作者:郭恩宇,男,1985 年出生,教授,辽宁大连(116024),E-mail: eyguo@dlut.edu.cn
引用格式:白淑英,王冲,郭恩宇,等. SiC_p/Mg-6Zn-3Al 复合材料力学行为有限元建模研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 620-1 627.
BAI S Y, WANG C, GUO E Y, et al. Finite element modelling of mechanical behavior of SiC_p/Mg-6Zn-3Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 620-1 627.

[62] YAO F P, LI J H, FANG L J, et al. Effect of ultrasonic vibration frequency on Ni-based alloy cladding layer[J]. Coatings, 2022, 12 (9): 1 305.
[63] HU G F, YANG Y, SUN R, et al. Microstructure and properties of laser cladding NiCrBSi coating assisted by electromagnetic-ultrasonic compound field[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404: 126 469.

(编辑:彭瑾)