

激光熔覆陶瓷涂层的研究进展

牟永强¹ 刘金铭² 谭欣荣² 刘 阳²

(1 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

(2 湖南科技大学材料科学与工程学院, 湘潭 411201)

文 摘 激光熔覆技术是一种优异的表面改性方法,能够在基体表面生成致密的陶瓷涂层,还能够实现对磨损、腐蚀等损伤的现场修复,使零部件在无须更换的情况下保持服役状态,极大程度上降低了维修成本。本文首先对激光熔覆技术和激光熔覆陶瓷涂层分类情况进行了介绍,然后对激光熔覆陶瓷涂层的数值模拟以及性能优化方法进行了阐述,最后概括了激光熔覆陶瓷涂层的应用研究方向,针对研发、工业生产中出现的问题和改进措施进行了展望。

关键词 激光熔覆,陶瓷涂层,数值模拟,性能优化,应用

中图分类号:TB34

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.002

Research Progress of Laser Cladding Ceramic Coatings

MOU Yongqiang¹ LIU Jinming² TAN Xinrong² LIU Yang²

(1 Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

(2 School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract Laser cladding technology is an excellent surface modification method, which can generate dense ceramic coatings on the surface of the substrate and also achieve on-site repair of wear, corrosion and other damages, so that the parts can be kept in service without replacement, which greatly reduces the maintenance cost. This paper first introduces the classification of laser cladding technology and the laser cladding ceramic coatings, then elaborates on the numerical simulation and the performance optimization method of laser cladding ceramic coating, finally summarizes the research direction of laser cladding ceramic coating and looks forward to the problems and improvement measures in research and development and industrial production.

Key words Laser cladding, Ceramic coatings, Numerical simulation, Performance optimisation, Applications

0 引言

随着工业技术的不断发展,涡轮叶片和高温轴承等机械零件,不仅要承受高温氧化,而且还要应对严重的磨损和腐蚀,在多种外力侵蚀的协同作用下,零件的可靠性会受到严重破坏,严重影响机器的安全性。虽然金属的腐蚀和磨损无法避免,但可以通过在表面添加涂层来保持其机械性能,显著延长其使用寿命并降低维护成本。其中陶瓷涂层由于具有与基材界面良好的湿润性、高温稳定性和生物相容性,在机械、化工、航空航天、生物医学等领域得到广泛应用^[1-4]。

在航空航天领域,飞行器的涡轮叶片、轴承、翼梁、接头等零部件在高海拔、高温或潮湿环境下经过

长时间的服役,会遭受氧化和腐蚀疲劳,影响其强度和可靠性。通过激光熔覆技术将高能量激光束聚焦在工件表面的特定区域,使得陶瓷粉末材料瞬间熔化并喷射到基材表面,获得高强度的耐磨、耐蚀陶瓷涂层。这不仅可以对新型飞行器的关键部件进行强化延长使用寿命,降低故障率,还可以对废旧装备进行再制造修复,符合可持续发展战略,引起了国内外广泛的关注^[5-7],但目前在实际应用中该项技术仍面临一定的挑战,如涂层材料的选择、熔覆工艺的优化。此外,相对于其他涂层制备方法,如电镀、化学镀等,激光熔覆设备较为昂贵,且耗材(如激光器、靶材等)成本较高,这也在一定程度上限制了其在航空航天领域的广泛应用。

收稿日期:2024-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52105334,52205150);湖南省教育厅资助科研项目(21B0472)

第一作者简介:牟永强,1980年出生,硕士,主要从事空间材料与结构、空间特殊环境的研究工作。E-mail:mouyongqiang511@163.com

通信作者:刘阳,1988年出生,博士/副教授,主要从事激光增材制造技术及应用的研究工作。E-mail:liuyang7740038@163.com

在庞大的市场需求和应用前景下,针对激光熔覆陶瓷涂层体系的研发和性能优化是众多科研工作者的关注重点。本文将激光熔覆技术为切入点,激光熔覆陶瓷涂层的分类及数值模拟研究进展为导向,对性能优化、应用领域等方面的研究现状进行分析,并对相关发展方向进行探讨。

1 激光熔覆技术

1.1 激光熔覆工艺方法

激光熔覆是用于制造具有改善表面性能的涂层或通过在基材上形成高抗性梯度涂层来修复表面缺陷的表面改性技术,因其具有高能量密度和冷却速度的特点使其适用于加工诸多材料。激光熔覆的主要工艺方法可分为同步送粉法^[8-10]和粉末预置法^[11-13]两种类型。

1.1.1 同步送粉法

同步送粉法^[8],其原理是当载气将粉末从进料喷嘴喷出时,激光束照射基材形成熔池,在粉末与激光束相互作用下,送粉喷嘴与激光束同步精确地移动,粉末颗粒被熔化,在基材表面形成一层均匀的熔覆层,如图1所示。

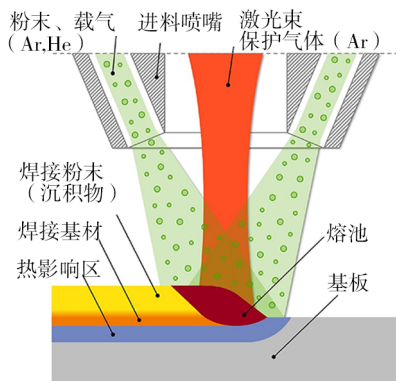


图1 同步送粉法^[8]

Fig. 1 Coaxial feeding method^[8]

1.1.2 粉末预置法

粉末预置法^[11],原理是将涂层材料粉末预置在待涂覆的基板表面上,随着激光束在预制粉末层上移动,粉末逐渐被熔化并形成均匀的熔覆层(图2)。

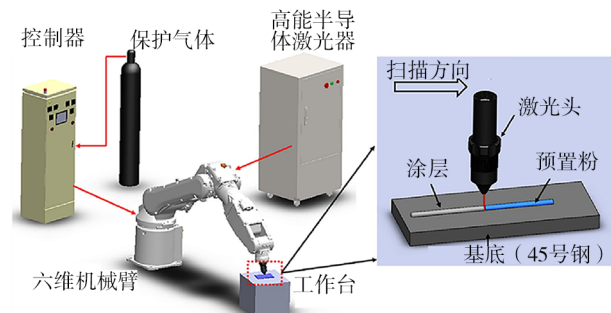


图2 粉末预置法^[11]

Fig. 2 Powder prefabrication^[11]

一般情况下,同步送粉法^[8,10]通过载气粉末直接送入激光熔池,粉末与激光的相互作用更紧密,因此激光的能量利用率相对较高,值得注意的是,该方式需要精确控制粉末的送入速度、激光的功率和扫描速度等多个参数,对设备的精度和稳定性要求较高。粉末预置法^[11-12]由于粉末在熔化前就已经被预置在基材上,因此可以更好地控制熔覆层的形状和厚度,质量相对较好。但由于粉末层的厚度固定,激光熔化时,渗透深度可能会因为激光功率、扫描速度等因素的变化而难以精确控制^[13-14]。

在实际应用中,选择哪种送粉方法往往取决于具体的应用需求、成本预算和操作的复杂性等因素,对于一些对熔覆层质量要求较高的场合,可能会选择预置送粉体系;而对于需要高效率 and 较高精度的应用,同轴粉末系统可能更为合适。

1.2 国内外权威单位

德国 TRUMPF^[15]成立于1923年,作为全球领先的激光技术制造商,在激光熔覆技术方面拥有领先的技术和设备,它为全球的客户提供专业的固体激光器及光纤激光器,此外,TRUMPF还为汽车工业、工业制造、医疗技术等行业提供激光光学元件和部件,产品包括用于金属加工的激光切割机、激光焊接机等,在市场上声誉良好,得到了广泛的认可和应用。

美国 General Electric^[16](简称GE),成立于1892年,在激光熔覆领域的成就体现于其在航空发动机和能源设备制造方面的技术领导地位。GE通过其子公司和研发机构,如GE Additive,积极利用激光熔覆技术来制造和修复航空发动机的高应力部件,其生产的发动机广泛应用于民用和军用飞机。

中国航发沈阳发动机研究所^[17],简称“中国航发动力所”,创建于1961年8月6日,隶属于中国航空发动机集团有限公司,是中国大中型涡喷、涡扇航空发动机及燃气轮机的研发基地。在航空发动机零部件修复和强化方面表现出色,所利用的激光熔覆技术可在叶片表面制备高效的冷却涂层,有效降低了叶片的表面温度,提高了发动机的工作效率和可靠性,同时具有一套完整的表面工程解决方案,包括表面预处理、激光熔覆涂层的制备、涂层的后处理等环节,能够实现对航空发动机零部件的全面修复和强化。

2 激光熔覆陶瓷涂层分类

以激光为热源来熔化陶瓷粉末制备陶瓷涂层的技术在航空航天、能源、汽车等领域获得广泛应用^[18]。目前,用于基材表面防护和修复的激光熔覆陶瓷涂层按合成机理和性能特点大致可分为:单相陶瓷涂层、复相陶瓷涂层、金属-陶瓷复合涂层等。

2.1 单相陶瓷涂层

通过物化反应从基体材料或预先涂敷在基体上的物质以化合物沉积的形式形成陶瓷涂层,由于高温瞬间熔融和冷却,产生的陶瓷相颗粒能够在基材表面形成致密和均匀的结构,同时具有较好的结合力和耐磨性。

为提高钛合金表面耐磨性能,王培等人^[19]采用激光熔覆在 TC4 钛合金表面制备 hBN 固体自润滑涂层,探究了熔覆工艺参数对耐磨性能的影响规律。在低激光功率下,熔覆材料上浮、流失严重并伴有裂纹产生,而在高激光功率下,先熔化的基体金属因具有较好的流动性,可对高熔点的润滑相颗粒进行包裹,这对润滑膜的生成是有利的,同时还能降低后续凝固过程中热应力的释放,缓解裂纹等缺陷的产生。

单相陶瓷涂层通常具有很高的硬度,但有很高的脆性,在受到冲击或振动时,易产生裂纹,温度波动较大时,因纯陶瓷涂层与基材热膨胀系数不匹配等因素而产生的热应力会导致涂层开裂或脱落^[20-21],因此,激光直接熔覆纯陶瓷涂层应用并不广泛。

2.2 复相陶瓷涂层

由于单相陶瓷涂层与基材一般具有不同的热膨

胀系数,在冷却过程中涂层可能会出现裂纹,这可能是由于基体表面处理不当、涂层制备工艺不合理等因素造成的。因此,研究人员开发了多种阴离子化合物的激光熔覆复相陶瓷涂层(如 TiN-Si₃N₄、SiC-TiC、Al₂O₃-ZrO₂、TiB₂-HfB₂),复相陶瓷涂层通常由两个或多个不同成分的陶瓷相组成,其中一些相具有高硬度和耐磨性,而其他一些相则具有高抗腐蚀性能,这种结构可以使涂层同时具有多种优良性能^[22-25]。适用于需要高耐磨、耐腐蚀和耐高温性能的航天工业领域,已经成为当前研究热点。YU 等人^[26]用激光熔覆技术在靶轴零件上制备了 Ti/B4C/dr40 复合涂层,发现析出的硬相减弱了凝固过程中的温度梯度,对胞状枝晶的细化和 45# 钢基体承载能力的增加起着关键作用,显微硬度最高可达基体的 2.53 倍,耐磨性提高了 50%,具有良好的可加工性。

CUI 等人^[27]对前驱体粉末中不同 B/C 比对激光熔覆过程中原位合成的 TiC-TiB₂ 的耐磨性能的影响进行了探究,如图 3 所示。镀镍石墨增加了涂层中陶瓷颗粒的尺寸,陶瓷颗粒在磨损过程中不易从涂层中脱离,同时 TiC-TiB₂ 的原位添加降低了涂层的黏着磨损,增加了涂层的磨料磨损,于是便出现了随着 TiC-TiB₂ 陶瓷相尺寸的增大,复合涂层的磨损体积逐

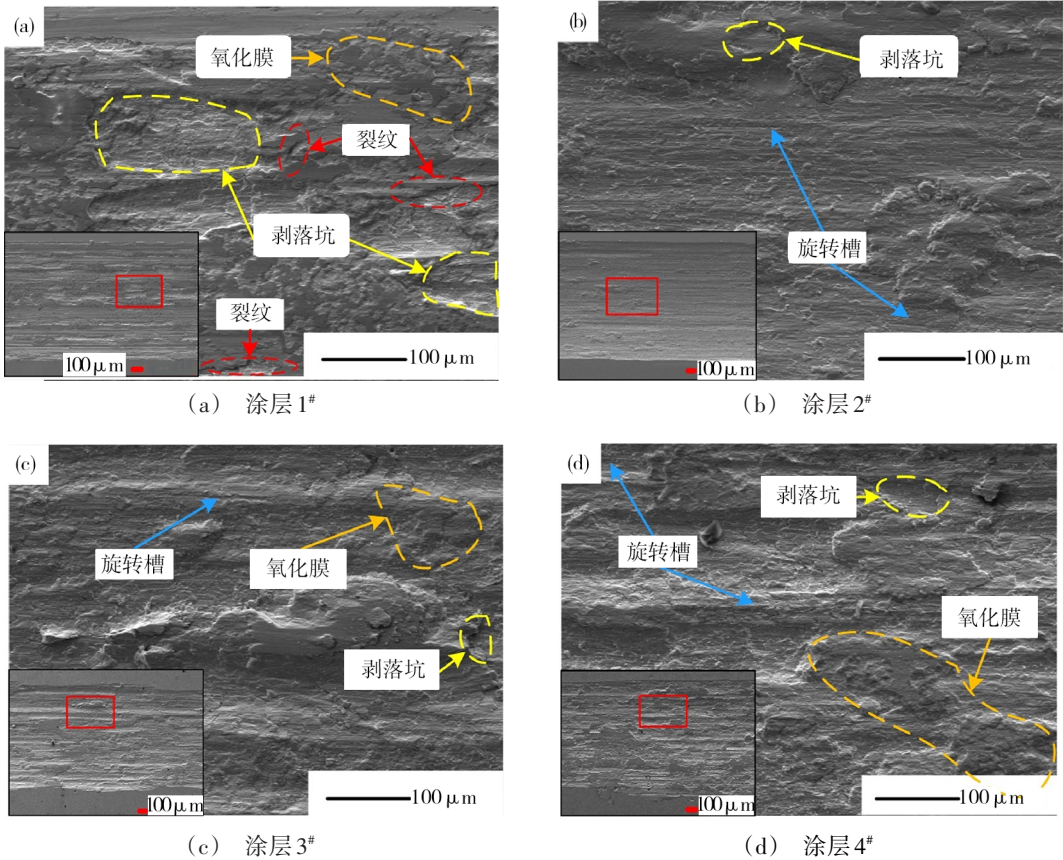


图3 不同涂层的SEM磨损形貌^[27]

Fig. 3 SEM wear morphology of different coatings^[27]

渐减小的现象,涂层4#(B/C原子比1:1)的磨损形貌与涂层2#(对照组)相比,磨损表面的沟槽较少,但是这些大的陶瓷颗粒一旦脱离涂层,就会产生比涂层2#更深的凹槽。

不同种类的陶瓷在涂层中有着不同的性能表现,例如氧化铝具有良好的耐磨性和耐蚀性,氮化硅具有更高的硬度,氧化锆则具有较高的热稳定性等。通过合理设计涂层结构,包括复合相的选择和比例、相互间的分布、形态以及界面结合方式,以提高复相陶瓷涂层的稳定性。

2.3 金属陶瓷复合涂层

金属陶瓷复合涂层的机理是通过将金属和陶瓷材料进行融合、共析或化学反应,形成具有金属和陶瓷两种材料特性的复合涂层。涂层中的陶瓷相具有较高的硬度和抵抗磨损及腐蚀的能力,与金属基体相结合后,实现了优良的性能互补。与此同时,在激

光熔覆过程中,通过精细地控制陶瓷相和金属粉末的比例和分布,可以实现金属陶瓷复合涂层的优化设计,并且激光束的加热速度很快,可以使熔覆层内的晶粒结构细化,减少缺陷^[28]。

XU等人^[29]为提高IN718的显微硬度和摩擦学性能,他们采用激光熔覆法在IN718表面添加WC-12Co颗粒,深入探究了WC-12Co含量与金属基复合材料微观结构和性能之间的关系,如图4所示,随着WC-12Co的加入抑制了柱状晶的生长和 γ -Ni的(200)生长方向,白色析出相增多,柱状晶粒长度和初生枝晶臂距减小,等轴晶逐渐占主导地位,细化了晶粒和微观结构。后续研究发现随着WC-12Co含量的增加,起初的黏着磨损机理开始向磨粒磨损和氧化磨损转变,当WC-12Co含量达到30%时,涂层的磨损程度最小,耐磨性最好。

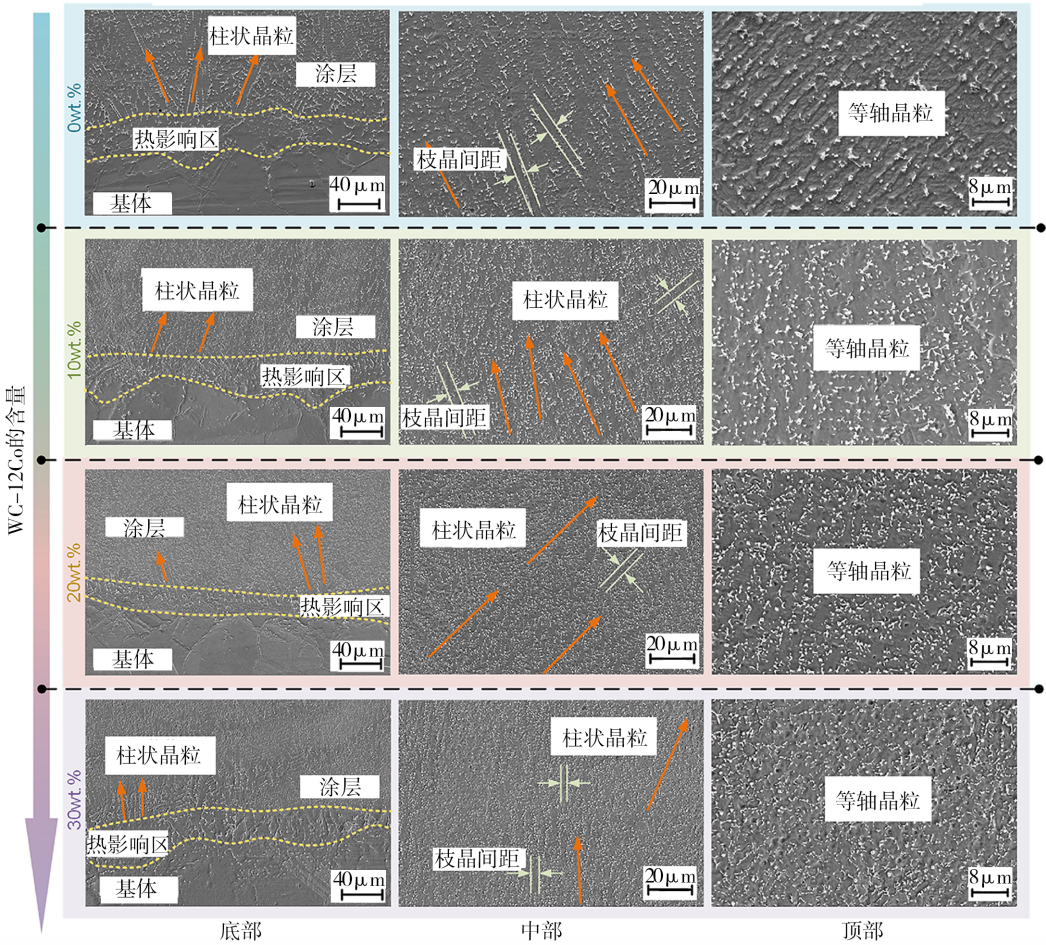


图4 WC-12Co含量对显微组织的影响^[29]

Fig. 4 Effect of WC-12Co content on microstructure^[29]

金属陶瓷复合涂层的性能受到多种因素的影响^[30],对于基体材料来说,不同的金属基体与陶瓷材料的兼容性和润湿性不同,这将影响复合涂层的界面结合强度和整体性能,另外,陶瓷相虽然可以提高宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第3期

涂层的综合机械性能,但过高的陶瓷相体积分数可能会降低涂层的韧性和可塑性。复合涂层的界面结合强度和性能受金属基体与陶瓷材料之间的界面反应的影响,提高复合涂层性能的关键是控制并实现

良好的界面结合^[31]。

3 激光熔覆陶瓷涂层数值模拟研究进展

激光熔覆过程中的涂层生长机制、熔池形态、温度场分布等现象较为复杂,传统的实验研究方法难以全面揭示。数值模拟技术作为一种强大的工具,可以对复杂的反应过程进行模拟分析,为优化激光熔覆工艺参数提供理论依据。

3.1 激光熔覆数值模拟方法

通过激光熔覆模拟,可以在短时间内得到熔覆过程中的关键工艺参数,如温度分布、熔池形状等,为工艺优化和材料研发提供数据支持。这有助于缩短研发周期,降低试验成本,还可以预测实际加工过程中可能出现的问题,如熔池温度过热、熔池不稳定等,从而指导工程师调整和优化工艺参数,确保加工质量。有限体积法(FVM)^[32-33]和有限元法(FEM)^[33-34]获得较多研究。

FVM是一种数值求解偏微分方程(PDE)的离散方法,基于守恒定律和积分平衡,采用有限体积单元划分计算域,通过计算界面上的通量来考虑物理量变化,限制物理量在边界上的行为,最终通过不断迭代求解时间步骤可以获得全局解。FVM适用于各种物理模拟,具有处理复杂几何和边界条件的能力,以及良好的守恒性和稳定性。目前基于FVM求解的商业软件有Fluent、Phonecis和Open MPI等。

FEM是将连续的弹性体离散为若干个小的、简单的部分,然后用有限元单元来近似表示它们,从而将复杂的物理问题转化为求解一组线性或非线性方程组,然后使用加权余量法(Weighted Residual Method, WRM)等方法来求解方程,得到物理问题的近似解。目前基于有限元求解的商业软件有Siemens NX Nastran、ABAQUS和HyperWorks等。对FEM计算中有可能遇到的复杂因素,有必要对一些环节进行简化处理,有利于后续的模拟实验。SCHOINCHORITIS等^[35]提出以下建议:(1)将粉末的复杂微观结构视为一个均匀的连续体,这样的简化可以忽略粉末内部微观层面的温度梯度和变化,更专注于整体热传导和热容特性;(2)假设激光热源在空间上的分布均匀,不考虑激光在瞬时冷却过程中的空间变化;(3)通过有限体积法耦合熔池动力学来更真实地反映激光熔覆过程中的温度场分布和熔池形态,为优化激光熔覆工艺参数和提高成形质量提供有效的数值分析手段。

3.2 激光熔覆陶瓷涂层温度场模拟现状

由于陶瓷具有较高的熔点和脆性,用激光熔覆制备无裂纹陶瓷涂层试样还较为困难。温度场对裂纹的形成有重要的影响,激光熔覆需要快速加热(温

度变化速率高达 10^6 K/s),因此很难直接测量激光熔覆过程中的温度场和热力学特征,数值模拟被认为是研究激光熔覆热行为的有效方法^[36]。

目前,研究者们对金属粉末熔覆过程中的温度场进行了一定的数值模拟^[37-38],但对陶瓷涂层的研究还很有限。由于激光加工过程中会产生热效应,特别是对硬脆材料容易产生裂纹和损伤。

LIU等人^[39]通过COMSOL Multiphysics仿真软件建立了激光烧蚀 Al_2O_3 陶瓷涂层的二维有限元模型,如图5所示,并针对激光烧蚀对氧化铝涂层的损伤机制及热力学演化规律开展探究。研究发现,激光辐照中心区域形成高温核心区,流体速度呈中心向外递减的梯度分布,进一步应力场分析表明,激光热应力(3.5~10 GPa)远超材料拉伸强度(350~500 MPa),导致涂层的脆性断裂,该结论与实验中观测到的表面微裂纹形貌相互验证,揭示了热应力主导的脆性破坏机制。

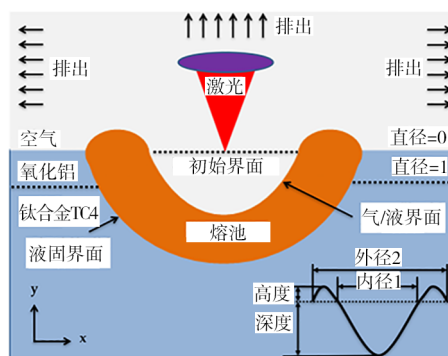


图5 激光烧蚀的原理图仿真模型^[39]

Fig. 5 The schematic of simulation model for laser ablation^[39]

通过数值模拟,可以研究不同工艺参数对温度场和最终产品成形的影响,为新材料的研发和工艺改进提供一种快速、有效的手段。由于材料的机械行为和性质受温度变化的密切影响,需要考虑的因素主要有:(1)激光参数,包括波长、光斑直径、发散角等;(2)热源模型,需要建立相应的激光热源模型,以描述激光束在材料表面的热传输过程,一般会采用高斯型热源、高斯积分热源等来进行模拟;(3)材料属性,材料在加热和冷却过程中发生相变等^[40-41]。

虽然很多研究工作通过建立有限元模型或数学模型,对激光熔覆过程中熔池的几何形状、温度分布和演化进行了数值模拟,获得了陶瓷涂层的较高加工质量和优良的力学性能,减少了实验次数,但仍存在预测误差大、物理机理分析不足等缺点。

4 激光熔覆陶瓷涂层性能优化研究进展

4.1 工艺参数优化

陶瓷涂层想要获得长久的服役寿命、优异的机

械性能以及化学稳定性与工艺参数的协调密不可分,例如熔覆速率、送粉率、激光焦点位置等。熔覆速率过高过低都会影响涂层与基材之间的结合强度,熔覆距离过大或过小可能导致激光能量无法适当聚焦和传递,而扫描速度过快或过慢可能会影响陶瓷涂层的晶体取向、颗粒分布和显微硬度。因此,通过系统化调控工艺参数间的交互耦合关系,实现涂层致密性、界面结合强度及残余应力的协同优化,是抑制缺陷生成并保障涂层长效服役性能的核心策略。

CHEN 等人^[42]采用田口方法设计了以 TiC 纳米粉末为起始材料的陶瓷涂层激光熔覆实验,研究了不同工艺参数下熔覆层质量特性,并通过建立熔覆层特性的预测模型,如图 6 所示,对熔覆层的各个特征进行了预测。经对比发现,各个特征的预测值与实验值非常接近,证实了该模型具有精准的适用性,而后他们对激光功率、送粉率等工艺参数进行进一步优化,获得了高质量的复合陶瓷涂层。

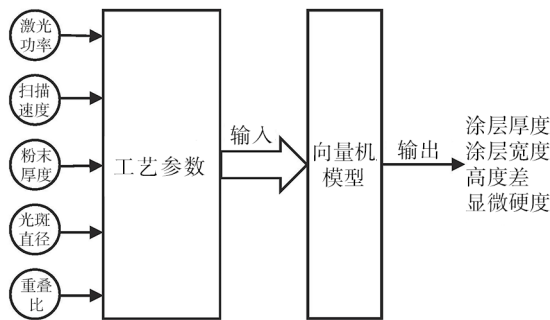


图 6 基于向量机的预测模型框架^[42]
Fig. 6 A framework for predictive modeling based on support vector machine^[42]

4.2 陶瓷涂层材料体系优化

优化材料体系可以提升陶瓷涂层的性能以满足特定服役条件下的使用要求,提高陶瓷涂层与基底材料之间的附着力,确保涂层在使用过程中不易剥离或脱落,延长其使用寿命。研究人员可以将铁、钴、镍等金属元素进行复合,制备出具有较高硬度和耐磨性的陶瓷涂层材料。此外,稀土元素的添加可以通过晶粒再结晶、相变抑制等机制来改善熔覆材料的性能。

WANG 等^[43]采用激光熔覆方法在 Ti6Al4V 合金表面添加不同比例的 Ti₃SiC₂ 陶瓷,成功制备了可以提升其耐磨性能的 Ni60 基自润滑复合涂层,并分析了不同温度下润滑过程的演变,如图 7 所示。结果显示,当添加 15wt% 的 Ti₃SiC₂ 时,涂层的耐磨性最好,且由于涂层的底部没有因缺陷而产生熔合线,证实了涂层与基材的结合性良好。同时,这项作为 Ti6Al4V 合金在高温运动部件中的细粉末成分设计

和进一步拓展其商业应用提供了必要的参考。

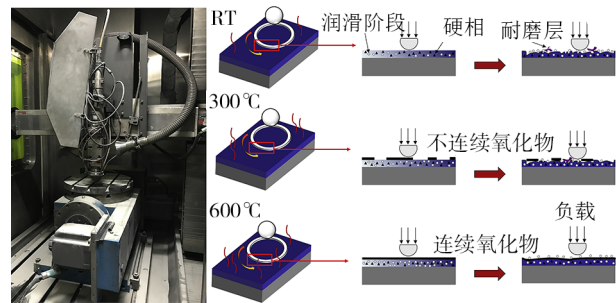


图 7 RC-LDM8060 送粉 3D 打印设备和不同实验温度下的自润滑原理图^[43]

Fig. 7 RC-LDM8060 powder feeding 3D printing equipment and Schematic diagram of the self-lubrication under different experimental temperatures^[43]

稀土元素可以吸附在晶界附近,形成稳定的化学键,改善界面相互作用,并抑制晶界的迁移和重结晶过程,这会限制晶粒的生长,从而导致涂层中形成更细小的晶粒,晶界能降低,也有利于陶瓷涂层的附着力和稳定性,提高了陶瓷涂层的抗开裂性能^[44-46]。LIU 等^[47]采用激光熔覆技术在 Ti811 钛合金表面制备了 TiC+Ti₂Ni 增强 Ti 基复合涂层,研究了不同比例的 CeO₂ 对陶瓷涂层的显微硬度和磨损性能方面的作用机理。当体系中加入 2wt% CeO₂ 后,陶瓷涂层的综合性能达到最佳,有效地消除了“人字”裂纹的形成,但是过量 CeO₂ 的加入会降低陶瓷涂层的显微硬度和增强相的数量,导致在磨损过程中增强相剥落而产生进一步开裂,最终使陶瓷涂层的耐磨性略有降低。

具体的优化方法应根据涂层性能和应用要求,对涂层材料进行调整和实验。在进行材料体系优化时,可以借助实验以及材料性能测试和分析等手段,比较和评估不同配方的性能,从而确定最佳的涂层材料体系。

4.3 多种工艺辅助成形

由于激光熔覆过程中加热和冷却速度都很快,陶瓷涂层在冷却时会因为体积收缩产生很大的热应力,容易导致裂纹的产生,通过优化工艺参数可以一定程度上减少裂纹的产生,但这种方法仍具有局限性。引入辅助能量场,如高温预热、电磁场辅助、超声波振动等,这些方法的主要设计理念在于使材料在激光加工过程中的温度变化更加均匀,促进热应力的释放,从而降低了裂纹和其他缺陷的产生,在提高激光加工质量和效率方面起到了重要作用^[48-52]。

高温预热是最有效的止裂措施见图 8(a),高温预热可以使整个工件达到一个相对均匀的温度,减小各部分之间的温度差异,这有助于降低热应力和冷却收缩应力,减少材料的损伤和裂纹的产生。此

外,在冷却阶段体积收缩常会有凝固缺陷的产生见图8(b),通过增加激光功率和降低扫描速率借此提高液体的进料速度是抑制缩孔形成的有效方法。同时,高温预热也有利于填充液体进入涂层裂纹中,促进裂纹的自愈,提高涂层的质量和性能^[51,53-56]。

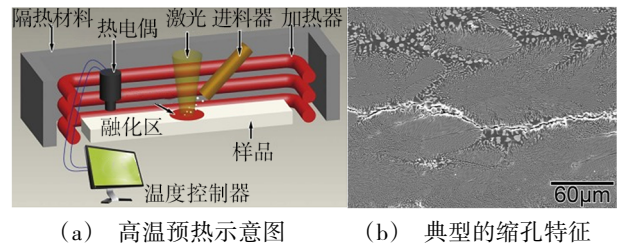


图8 感应预热示意图及材料缩孔特征形貌^[51]
Fig. 8 Schematic diagram of induction preheating and characteristic morphology of material shrinkage hole^[51]

陶瓷涂层电磁辅助激光熔覆技术是通过施加电磁场,改变熔池内的热流分布,影响涂层的生长和凝固过程,实现调节熔池热流运动的作用,使熔池内的熔体流动更加稳定,有助于减少涂层内部的孔洞、裂纹等缺陷。

HU 等人^[52]通过在激光熔覆系统中耦合电磁复合场(Electromagnetic Compound Field, ECF)见图9,借此提升激光熔覆熔池中孔隙的逃逸能力。它通过电源将稳定的电流施加到待加工的基材上形成一个稳定的电磁场,促进熔池的液态流动,并且产生的磁场会对熔融的金属熔池施加一个向下的洛伦兹力,这使熔池的流动状态和几何形状发生显著变化,有效地提高了熔池中的气孔逸出速度,使得制备的熔覆层更加致密,孔隙率降低显著。

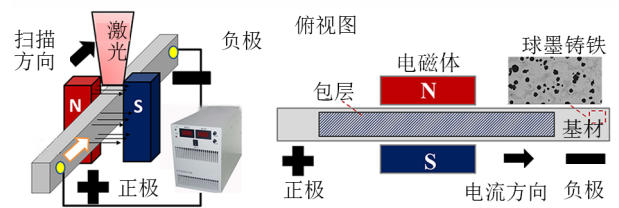


图9 ECF激光熔覆设备组件示意图^[52]
Fig. 9 Schematic diagram of ECF laser cladding equipment components^[52]

5 激光熔覆陶瓷涂层的应用研究进展

在航天工业生产中,激光熔覆陶瓷涂层技术具有巨大的潜力,可用于机械零部件的耐磨性和抗疲劳性能提升,从而降低设备维修成本^[53-56]。在生物医疗领域,该技术也有广阔的应用场景,例如,在人工关节、牙科种植体等医疗器械上涂覆陶瓷涂层,可以提高器械的生物相容性、提高患者的生活质量。

5.1 激光熔覆陶瓷涂层在耐磨领域的进展

在先进的燃气轮机、能源加工乃至生物应用领域中,如果部件长时间在恶劣工况(高温、高压、高粉尘)下高速运转或者频繁的启停都会加速部件的磨损,改变原来的应力状态,影响机器的工作精度,这需要有抗磨损和自润滑性能的组合材料以应对复杂工况,在表面制备高温自润滑耐磨陶瓷涂层是解决这一问题的最有效和最经济的方法之一且不限基体的整体机械性能。如部分研究人员常在涂层中加入TiC、WC、Al₂O₃等陶瓷颗粒来形成硬质相,显著提高了涂层的耐磨性^[6,57-64]。

CHEN 等人^[64]采用激光熔覆法在Ti6Al4V基体表面预埋TiC纳米陶瓷粉末,由于TiC纳米陶瓷粉末在高能激光束的作用下完全熔化并形成了树枝状TiC陶瓷涂层,其致密且均匀的结构配合TiC涂层的高硬度减弱了对磨球对涂层表面的犁削作用,能够有效抵抗外部磨损,其中图10(a)、图10(c)为无润滑剂(simulated body fluid, SBF)下的磨损形貌,图10(b)、图10(d)为含有润滑剂下的磨损形貌,在保持基体与陶瓷涂层良好界面结构相容性的同时,在润滑剂的作用下耐磨性提升至Ti6Al4V基材的3倍。

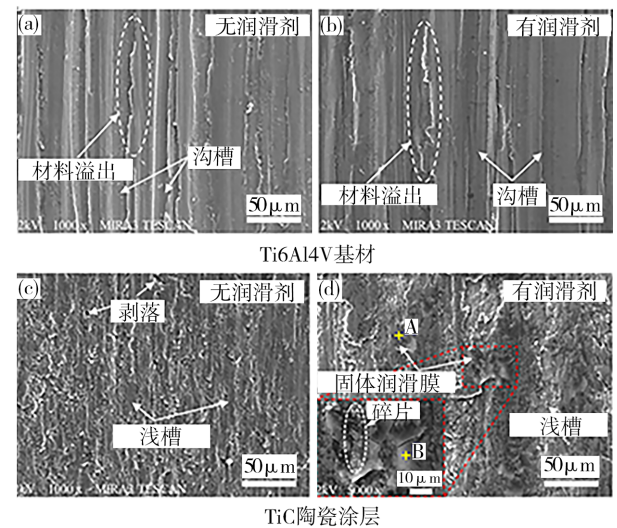


图10 不同磨损条件下的磨损表面形貌^[64]
Fig. 10 Wear surface morphologies of the samples under different wear conditions^[64]

5.2 激光熔覆陶瓷涂层在耐腐蚀领域的进展

很多工程器械长期在船舶制造、石油钻井平台、化工厂等环境中服役,这使得海水盐雾、酸、碱、霉菌等腐蚀介质对金属表面的直接分解或通过电化学反应导致的腐蚀现象特别严重,进而引发结构失效等问题。防腐涂层的研究一直是可持续耐用材料发展的重中之重,在不影响材料本体性能的前提下,为提高材料的耐久性发挥了重要作用。因此,开发具有

优异耐腐蚀性能的涂层对于实现再制造和保护在复杂工作条件下运行的机械设备至关重要^[65]。

钛及其合金在某些环境中会被腐蚀,特别是在含有氯离子的环境中,腐蚀破坏严重^[66]。因此,为了提高其表面耐腐蚀性能,需要在钛合金表面进行涂层处理,并在3.5NaCl溶液中添加不同CeO₂含量样品进行腐蚀实验。YE等人^[67]采用激光熔覆技术在TC4钛合金表面制备了添加CeO₂的镍基涂层,结果发现适量添加(2wt%~3wt%)CeO₂能够起到细化晶粒,减少激光熔覆过程中产生的裂纹数量的作用,这对耐腐蚀性能的提升是有利的(图11),但当加入量超过临界值时,细化效果会恶化,晶粒变粗,晶界的腐蚀倾向升高。

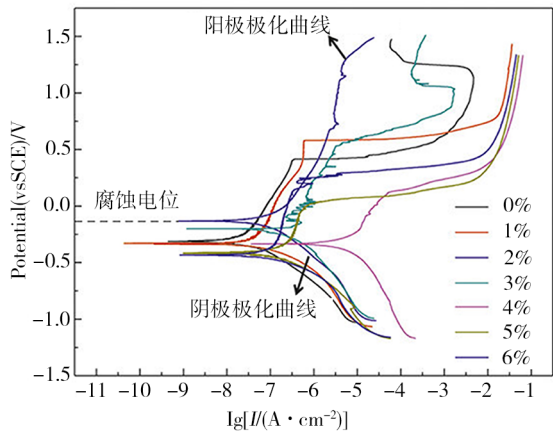


图 11 不同CeO₂含量样品的动电位极化曲线^[67]
Fig. 11 Potentiodynamic polarization curves of samples with different CeO₂ content^[67]

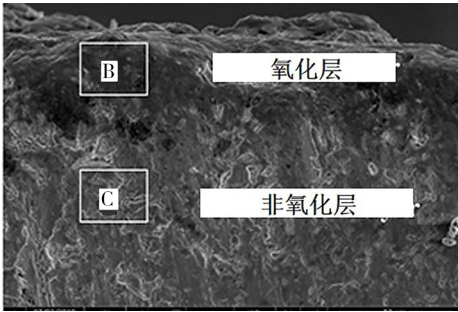
5.3 激光熔覆陶瓷涂层在航空航天领域的进展

随着航空领域的飞速进步,飞行器的设计和性能要求也日益提高,这直接推动了航空发动机和涡轮叶片等

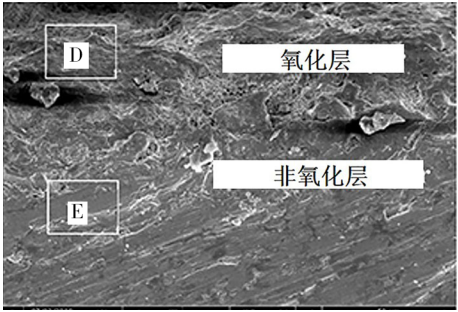
关键部件技术的不断创新^[68]。这些高负荷零部件在使用过程中面临着严重的磨损和高温工况问题,传统的材料和涂层技术往往难以满足这些极端条件下的性能需求,激光熔覆陶瓷涂层因具有高耐磨、抗氧化以及高附着力等优点,这被认为是一种非常有效地提高航空零部件性能的技术手段,能够提高零部件(如发动机)的热效率8%以上^[69-71]。

镍基高温合金在航天领域中被广泛应用于各种关键零部件,以保证航天器在极端的高温、高压和高速工作环境中正常运行,为延长其服役年限, HUANG等^[72]采用激光熔覆技术在镍基高温合金表面制备了无黏结涂层的La₂Zr₂O₇陶瓷涂层,如图12所示。由于La₂Zr₂O₇的氧空位迁移率和氧离子电导率都很低,并且La₂Zr₂O₇是一种透氧率极低的陶瓷材料,因而涂层的氧化增重率小于镍基高温合金基材

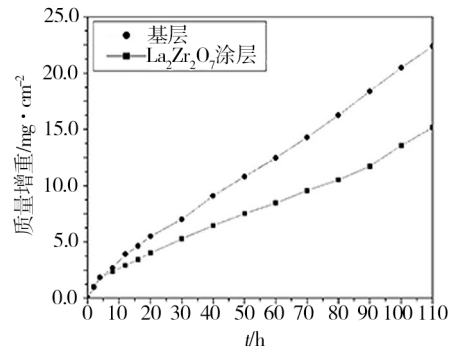
如图12(c)所示,与基材相比,其具有更优良的耐高温氧化性。



(a) 基材



(b) 涂层



(c) 样品在1 100 °C不同时间的氧化增重率
图 12 1 100 °C 氧化 110 h 后的横截面形态^[72]

Fig. 12 Cross-sectional morphology after oxidation at 1 100 °C for 110 hours^[72]

6 结语

表面涂层技术以其高柔性和经济性的特点,已成为零件表面强化和表面修复的最重要和最基本的方法之一。激光熔覆技术可以在较短时间内完成工件表面的强化和修复,大大缩短了生产周期,提高了生产效率,在机械关键部件表层性能强化及损伤再制造领域具有广泛应用,但仍面临若干技术瓶颈:涂层的附着力、成分均匀性及微观组织调控等核心参数,因其对性能的显著影响,亟需通过多尺度机理研究与工艺协同优化实现突破。

(1)激光熔覆技术作为一种先进的表面修复和增材制造技术,在工业应用中的可行性是毋庸置疑的,但现阶段仍存在涂层与基体之间的热应力不易消除、涂层组织不均匀和涂层开裂的问题,技术人员

应采取与超声、感应加热等技术相结合的方式以改变晶粒生长模式,减小涂层与基体之间的热应力,进而提高涂层的结合强度,减少开裂的可能性。

(2)扩大激光熔覆技术的应用领域,根据不同行业的具体需求,提供定制化的解决方案,增强技术的市场竞争力和认可度。通过自动化控制系统,不断优化工艺参数,提高工艺的稳定性,降低废品率,实现熔覆头和工件的自动定位和夹紧,提高生产线的自动化水平,简化操作界面,减少生产过程中的等待时间和人力成本。

(3)对关键设备进行针对性设计,激光装置可选用光斑小、能量转换率高、可靠性好、材料吸收率高、能量密度大的近红外半导体或光纤激光器,并对喷嘴进行优化,促进粉末与激光的耦合。送粉器的给粉机需采用转盘式或刮板式结构,给粉机应采用转盘式或刮板式,使得供粉稳定、准确、易于控制。引入智能监控和故障诊断系统,实时监控设备状态和熔覆过程,减少故障停机时间。

(4)激光熔覆技术可以适用多种材料,但这些材料并非全是为激光熔覆工艺量身定制的,陶瓷涂层的激光吸收特性与熔覆层-基体结合强度通常未经针对性设计与工艺优化,对粉末与基体之间相互作用机制的理解还不够深入,需要进一步研究粉末粒径、成分、形态等对涂层形成和性能的影响。

参考文献

[1] MCENTIRE B J, BAL B S, RAHAMAN M N, et al. Ceramics and ceramic coatings in orthopaedics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(16): 4327-4369.

[2] BAINO F, MONTEALEGRE M A, ORLYGSSON G, et al. Bioactive glass coatings fabricated by laser cladding on ceramic acetabular cups: A proof-of-concept study[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(15): 9115-9128.

[3] DAS A K. Effect of rare earth oxide additive in coating deposited by laser cladding: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 52(3): 1558-1564.

[4] FU Z, PANG A, LUO H, et al. Research progress of ceramic matrix composites for high temperature stealth technology based on multi-scale collaborative design[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18(5-6): 2770-2783.

[5] LIU Y, GU X, LOU C, et al. Influence of WC ceramic particles on structures and properties of laser cladding Ni50-WC coatings[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26(9/10): 14-21.

[6] LI Z, WEI M, XIAO K, et al. Microhardness and wear resistance of Al_2O_3 - TiB_2 -TiC ceramic coatings on carbon steel fabricated by laser cladding[J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 115-121.

[7] WANG X H, LIU A M. Microstructure and abrasive-

wear behavior under high temperature of laser clad Ni-based WC ceramic coating[J]. Physics Procedia, 2013, 50: 145-149.

[8] WIRTH F, WEGENER K. A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22(8): 307-319.

[9] LEI D, SHI S, FU G. Research on inside-laser powder feeding nozzle for broadband laser cladding[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(22): 3076.

[10] WANG H, Shin K H, Kim H S. Development and characterization of Ni60 alloy and SiC ceramic reinforced metal matrix composite coating on Ti-6Al-4V using laser cladding with coaxial powder feeding system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(5-6): 2705-2718.

[11] LI Q, ZHANG Y L, ZHANG L, et al. Effect of boron on the microstructural evolution and wear resistance of high-hardness Fe-based alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 458: 129342.

[12] GHORBANI H, KHORRAMI M S, GERANMAYEH A, et al. In-situ synthesis of TiC/Ti alloyed layer via pulsed Nd: YAG laser melting of Ti-6Al-4V titanium with preplaced carbon-based powder[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 172(1): 107864.

[13] LIU J, YU H, CHEN C, et al. Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: A review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93(6): 195-210.

[14] ZHU L, XUE P, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138(3): 106915.

[15] 丁雪生. TRUMPF集团——欧洲最大的成形机床制造企业[J]. 世界制造技术与装备市场, 2003(1): 70-72.

DING X S. TRUMPF group—Europe's largest manufacturer of forming machines[J]. World Market for Manufacturing Technology and Equipment, 2003(1): 70-72.

[16] OCASIO W, JOSEPH J. Rise and fall—or transformation: The evolution of strategic planning at the general electric company, 1940-2006[J]. Long Range Planning, 2008, 41(3): 248-272.

[17] 尹泽勇. 中国航发沈阳发动机研究所建所60周年专刊序[J]. 航空发动机, 2021, 47(4): 3.

YIN Z Y. Brief introduction of shenyang engine research institute of China aerospace development[J]. Aeroengine, 2021, 47(4): 3.

[18] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(6): 849-867.

[19] 王培, 叶源盛. 钛合金表面激光熔覆h-BN固体润滑涂层[J]. 表面技术, 2015, 32(4): 44(8): 8-12.

WANG P, YE Y S. Laser melting of h-BN solid lubrication coating on titanium alloy surface[J]. Surface Technology, 2015, 32(4): 44(8): 8-12.

- [20] ZHAO G L, ZOU Y, ZOU Z D, et al. Research on in situ synthesised (Ti, V)C/Fe composite coating by laser cladding[J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31(11): 1329–1334.
- [21] YANG C, CHENG X, TANG H, et al. Influence of microstructures and wear behaviors of the microalloyed coatings on TC11 alloy surface using laser cladding technique[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 337: 97–103.
- [22] TRITREMEL C, DANIEL R, LECHTHALER M, et al. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al–Cr–B–N thin films [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 213: 1–7.
- [23] ZHANG X, QIU Y, TAN Z, et al. Effect of Al content on structure and properties of TiAlCN coatings prepared by magnetron sputtering [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 617: 81–85.
- [24] SUN D, CAI Y, ZHU L, et al. High-temperature oxidation and wear properties of TiC-reinforced CrMnFeCoNi high entropy alloy composite coatings produced by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 438: 128407.
- [25] XIONG J, SUN D, DONG N, et al. Oxidation mechanism of TiC reinforced CrMnFeCoNi composite coatings by laser cladding at 600°C/750°C/900°C[J]. *Materials Letters*, 2022, 324: 132710.
- [26] YU J, CHEN J, HO H. Effect of laser cladding Ti/B₄C/dr40-based composite coatings for the surface strengthening of shaft part[J]. *Optics&Laser Technology*, 2023, 157: 108721.
- [27] CUI W Q, LI Y L, LI F Y, et al. Wear and corrosion properties of in-situ TiC–TiB₂ modified Ni-based composite coatings with different B/C ratios prepared by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(1, Part B): 2424–2435.
- [28] FAN P, ZHANG G. Study on process optimization of WC–Co50 cermet composite coating by laser cladding [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, 87: 105133.
- [29] XU P, ZHU L, XUE P, et al. Microstructure and properties of IN718/WC–12Co composite coating by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(7): 9218–9228.
- [30] KIM K W, KIM Y K, PARK S H, et al. Laser cladding of WC/T–800 Cermet T: fabrication, microstructure and wear properties [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2021, 66(3): 713–717.
- [31] ALAM M S, DAS A K. Advancement in cermet based coating on steel substrate: A review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 805–810.
- [32] ZHENG X, SEAID M, PISANÒ F, et al. A material point/finite volume method for coupled shallow water flows and large dynamic deformations in seabeds [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 162: 105673.
- [33] LI X, CHENG K, HUANG T, et al. Research on neutron diffusion equation and nuclear thermal coupling method based on gradient updating finite volume method [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, 195: 110158.
- [34] LI H, MING P. An asymptotic-preserving finite element method for a fourth order singular perturbation problem with boundary layers [J]. *Applied Mathematics Letters*, 2024, 149: 108923.
- [35] SCHOINORITIS B, CHANTZIS D, SALONITIS K. Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2017, 231(1): 96–117.
- [36] LOPEZ–BOTELLO O, MARTINEZ–HERNANDEZ U, RAMÍREZ J, et al. Two-dimensional simulation of grain structure growth within selective laser melted AA–2024 [J]. *Materials & Design*, 2017, 113: 369–376.
- [37] LIU H, LI M, QIN X, et al. Numerical simulation and experimental analysis of wide-beam laser cladding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100: 237–249.
- [38] ZHANG W, LIU Y, HU D, et al. Experimental and numerical simulation studies of the flow characteristics and temperature field of Fe-based powders in extreme high-speed laser cladding [J]. *Optics&Laser Technology*, 2024, 170(000): 110317.
- [39] LIU S, TIAN Z, SHEN L, et al. Numerical simulation and experimental investigation of laser ablation of Al₂O₃ ceramic coating [J]. *Materials*, 2020, 13(23): 5502.
- [40] 王虎, 赵琳, 彭云, 等. 增材制造 TiAl 基合金的研究进展 [J]. *粉末冶金技术*, 2022, 40(2): 110–117.
- WANG H, ZHAO L, PENG Y, et al. Research progress of TiAl-based alloys fabricated by additive manufacturing [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2022, 40(2): 110–117.
- [41] WENG F, CHEN C, YU H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review [J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 412–425.
- [42] CHEN T, WU W, LI W, et al. Laser cladding of nanoparticle TiC ceramic powder: effects of process parameters on the quality characteristics of the coatings and its prediction model [J]. *Optics&Laser Technology*, 2019, 116: 345–355.
- [43] WANG Y, LIU X B, LIU Y F, et al. Microstructure and tribological performance of Ni60-based composite coatings on Ti6Al4V alloy with different Ti₃SiC₂ ceramic additions by laser cladding [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(18): 28996–29010.
- [44] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A, et al. Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: A review [J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34(6): 549–564.
- [45] WANG C, GAO Y, ZENG Z, et al. Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 727: 278–285.
- [46] ALIMARDANI M, FALLAH V, KHAJEPOUR A, et al. The effect of localized dynamic surface preheating in laser cladding of stellite 1 [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204(23):

3911–3919.

[47] LIU Y N, SUN R L, WEI N, et al. Effects of CeO_2 on microstructure and properties of TiC/Ti₂Ni reinforced Ti-based laser cladding composite coatings[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 120: 84–94.

[48] BIDRON G, DOGHRI A, MALOT T, et al. Reduction of the hot cracking sensitivity of CM–247LC superalloy processed by laser cladding using induction preheating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116461.

[49] 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.

[50] LI M, ZHANG Q, HAN B, et al. Microstructure and property of Ni/WC/La₂O₃ coatings by ultrasonic vibration-assisted laser cladding treatment[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 125: 105848.

[51] LIU Z, SONG K, GAO B, et al. Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃/ZrO₂ directionally solidified eutectic ceramic prepared by laser 3D printing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 320–325.

[52] HU Y, WANG L, YAO J, et al. Effects of electromagnetic compound field on the escape behavior of pores in molten pool during laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 383: 125198.

[53] ZHANG X, ZHOU Y, HAN Y, et al. Dendritic growth pattern and dendritic network distortion in the platform of a Ni-based superalloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(3): 223–228.

[54] LIU Q, DANLOS Y, SONG B, et al. Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 61–74.

[55] WANG Z G, OUYANG J H, WANG Y J, et al. Microstructural characterization of nanostructured Al₂O₃–ZrO₂ eutectic layer by laser rapid solidification method[J]. Applied Surface Science, 2019, 476: 335–341.

[56] WU D J, SHI L F, MA G Y, et al. Stress distribution and crack propagation behavior of solid Al₂O₃–ZrO₂ (Y₂O₃) eutectics prepared by laser engineered net shaping[C]. Proceedings of the 38th International MATADOR Conference, 2022: 3–21.

[57] GUO C, ZHOU J, CHEN J, et al. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC–Ni composite coatings[J]. Wear, 2011, 270(7/8): 492–498.

[58] XU Z, WANG Z, CHEN J, et al. Effect of rare earth oxides on microstructure and corrosion behavior of laser-cladding coating on 316l stainless steel[J]. Coatings, 2019, 9(10): 636.

[59] 张蕾涛, 刘德鑫, 张伟楠, 等. 钛合金表面激光熔覆涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 97–104.

ZHANG L T, LIU D X, ZHANG W Q. Research progress of

laser cladding coating on titanium alloy surface[J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 97–104.

[60] DIAO Y, ZHANG K. Microstructure and corrosion resistance of TC₂ Ti alloy by laser cladding with Ti/TiC/TiB₂ powders[J]. Applied Surface Science, 2015, 352: 163–168.

[61] SOLEIMANIPOUR Z, BAGHSHAHI S, SHOJA–RAZAVI R, et al. Hot corrosion behavior of Al₂O₃ laser clad plasma sprayed ysz thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2016, 42(15): 17698–17705.

[62] ZHANG Z, YU T, Kovacevic R. Erosion and corrosion resistance of laser clad aisi 420 stainless steel reinforced with VC[J]. Applied Surface Science, 2017, 410: 225–240.

[63] ABIOYE T E, FARAYIBI P K, MCCARTNEY D G, et al. Effect of carbide dissolution on the corrosion performance of tungsten carbide reinforced Inconel 625 wire laser coating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 89–99.

[64] CHEN T, DENG Z, LIU D, et al. Bioinert TiC ceramic coating prepared by laser cladding: Microstructures, wear resistance, and cytocompatibility of the coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 423(7): 127635.

[65] DENG Z X, LIU D F, LIU G, et al. Study on the corrosion resistance of SiC particle-reinforced hydroxyapatite-silver gradient bioactive ceramic coatings prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 467: 129734.

[66] HE X, SONG R G, KONG D J. Microstructure and corrosion behaviour of laser-cladding Al–Ni–TiC–CeO₂ composite coatings on S355 offshore steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 770: 771–783.

[67] YE F, SHAO W, YE X, et al. Microstructure and corrosion behavior of laser-cladding CeO₂-doped Ni-based composite coatings on TC4[J]. Journal of Chemistry, 2020, 2020: 1–10.

[68] 姬梅梅, 朱时珍, 马壮. 航空航天用金属表面热防护涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 253–266.

HAN M M, ZHU S Z, MA Z. Research progress on thermal protective coatings on metal surfaces for aerospace applications[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 253–266.

[69] WANG Y, BAI Y, LIU G H, et al. Wide-velocity range high-energy plasma sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coating—part II: structural defects and thermal-bonding properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 476: 130203.

[70] LI H, LUO X, HUANG S, et al. Potential thermal barrier coating material: High entropy ceramic (Ca_{0.5}Sr_{0.5})(5RE)₂O₄ with enhanced thermophysical properties[J]. Ceramics International, 2023, 49(23): 39627–39631.

[71] YANG X, ZHANG J, LU Z, et al. Removal and repair techniques for thermal barrier coatings: A review[J]. Transactions of the IMF, 2020, 98(3): 121–128.

[72] HUANG K, LI W, PAN K, et al. High temperature oxidation and thermal shock properties of la₂zr₂o₇ thermal barrier coatings deposited on nickel-based superalloy by laser-cladding[J]. Coatings, 2020, 10(4): 370.