

钛合金表面激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层研究进展与展望

王宇航^{1,2,3}, 朱丽娜^{1,2,3,4*}, 贺世伟^{1,2,3}, 赵 阳⁵

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 3. 深钻装备国际联合研究中心, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)郑州研究院, 河南 郑州 450001; 5. 陆军兵种大学装备再制造技术全国重点实验室, 北京 100072)

摘要: 钛合金凭借低密度、高比强度与优良耐蚀性,在深地钻探装备领域应用潜力巨大,但其硬度偏低、耐磨性能不足、高温易氧化等短板,极大限制了井下工程规模化应用。采用激光熔覆制备陶瓷颗粒增强钛基复合涂层是提升钛合金表面性能的关键改性技术。本文系统梳理激光熔覆改性钛合金的相关研究进展:阐述激光熔覆基本原理与工艺参数对涂层组织及性能的调控规律,对比传统试验设计、智能优化算法两类参数优化方法的优劣与适用工况;梳理陶瓷增强相分类与选材原则,从耐磨、耐蚀、高温抗氧化三个维度归纳钛基复合涂层研究成果;现有研究多仅针对单一性能开展测试,针对深地井下“高温-磨损-腐蚀”多场耦合环境的涂层失效机理研究尚不充分。后续需重点开展熔覆粉末体系智能设计、复合辅助熔覆工艺开发与多场耦合失效机制研究,为深地钻探钛合金钻具延寿设计与服役可靠性评价提供理论依据。

关键词: 激光熔覆; 钛合金; 钛基复合涂层; 陶瓷颗粒; 耐磨性; 耐腐蚀性; 工艺优化; 深地钻探

中图分类号: P634.4; TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0053-13

Progress and prospects of ceramic particle-reinforced titanium matrix composite coatings by laser cladding on titanium alloy surfaces

WANG Yuhang^{1,2,3}, ZHU Lina^{1,2,3,4*}, HE Shiwei^{1,2,3}, ZHAO Yang⁵

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. National International Joint Research Center of Deep Geodrilling Equipment, Beijing 100083, China; 4. Zhengzhou Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou Henan 450001, China; 5. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Arms University of PLA, Beijing 100072, China)

Abstract: Titanium alloys exhibit great application potential in deep-earth drilling equipment owing to their low density, high specific strength, and excellent corrosion resistance. However, their inherent drawbacks-such as low hardness, insufficient wear resistance, and susceptibility to high-temperature oxidation-severely restrict large-scale engineering applications downhole. Laser cladding of ceramic particle-reinforced titanium matrix composite coatings is a key surface modification technology to enhance the surface performance of titanium alloys. This paper systematically reviews the research progress on laser cladding modification of titanium alloys. The fundamental principles of laser

收稿日期: 2026-04-10; 修回日期: 2026-05-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.006

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000902)

第一作者: 王宇航, 男, 汉族, 2000年生, 硕士研究生, 机械工程专业, 主要研究方向为激光熔覆钛基涂层, 北京市海淀区学院路29号, wangyuhang2280@163.com

通信作者: 朱丽娜, 女, 汉族, 1984年生, 副教授, 博士生导师, 机械工程专业, 博士, 主要研究方向为表面工程、摩擦学和再制造工程, 北京市海淀区学院路29号, zhulina@cugb.edu.cn。

引用格式: 王宇航, 朱丽娜, 贺世伟, 等. 钛合金表面激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层研究进展与展望[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 53-65.

WANG Yuhang, ZHU Lina, HE Shiwei, et al. Progress and prospects of ceramic particle-reinforced titanium matrix composite coatings by laser cladding on titanium alloy surfaces[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 53-65.

cladding and the governing effects of process parameters on coating microstructure and properties are elucidated, and the advantages, disadvantages, and applicable conditions of two types of parameter optimization methods-traditional experimental design and intelligent optimization algorithms-are compared. Furthermore, the classification and material selection criteria of ceramic reinforcing phases are systematically reviewed, and research achievements on titanium matrix composite coatings are summarized from three dimensions: wear resistance, corrosion resistance, and high-temperature oxidation resistance. Most existing studies have focused only on single performance tests, while research on coating failure mechanisms under the multi-field coupled environment of "high temperature-wear-corrosion" in deep downhole conditions remains insufficient. Future efforts should be directed toward the intelligent design of cladding powder systems, the development of hybrid auxiliary cladding processes, and the investigation of multi-field coupled failure mechanisms, so as to provide a theoretical basis for the life extension design and service reliability evaluation of titanium alloy drilling tools in deep-earth drilling.

Key words: laser cladding; titanium alloy; titanium matrix composite coating; ceramic particle; wear resistance; corrosion resistance; process optimization; deep-earth drilling

0 引言

钛元素因综合性能优异,被称为“第三金属”,以其为基体的钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀的特点,在深地钻探等领域展现出良好的应用前景^[1-2]。然而,深地钻探面临着极其复杂的环境,对钛合金提出了更严苛的要求。钛合金硬度不高、耐磨性差且高温易氧化等缺陷,严重限制了其在工程应用中的进一步发展^[3-4]。渗碳、渗氮、电镀、热喷涂、PVD/CVD等表面改性技术可以在基体表面制备涂层,提高表面硬度,改善摩擦磨损性能^[5-6],但仍存在诸多问题。例如,热喷涂涂层结合强度弱,组织分布不均匀;PVD/CVD涂层较薄,沉积效率低;电镀易产生环境污染;渗碳、渗氮处理温度高且时间长,工件变形风险大^[7-8]。

与上述表面处理技术相比,激光熔覆技术通过高能激光束的作用实现基体与涂层的冶金结合,涂层厚且致密,具有良好的结合强度,加工过程速度快,热影响区小,绿色清洁无污染,可有效克服传统表面改性技术的缺陷^[9-10]。基于上述优势,激光熔覆技术已成为表面改性技术的热点研究方向。

根据复合强化理论,引入增强相可以通过弥散强化等机制显著提高涂层性能。因此,高弹性模量、高硬度的陶瓷颗粒成为激光熔覆理想的增强相材料^[11-12]。近年来,已有综述对陶瓷颗粒增强钛基复合涂层进行了总结,但研究多从特定陶瓷增强相展开,且性能评价侧重于耐磨性等单一指标,同时对工艺参数优化方法的介绍多为传统试验设计法,缺乏对智能优化算法的介绍与对比分析,对工艺-组织-性能之间的内在联系分析不足。

针对这些问题,本文首先介绍激光熔覆技术与工艺参数对涂层性能的影响,重点分析激光熔覆工艺参数的优化方法,包括传统试验设计法与智能优化算法,总结了不同优化方法的优缺点及适用对象。其次,探讨了陶瓷颗粒增强相的种类与选择依据,从耐磨性、耐腐蚀性和高温抗氧化性三个方面介绍陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的研究进展。最后对激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的开发应用进行了总结与展望。

1 激光熔覆技术的研究现状

1.1 激光熔覆技术

激光熔覆技术是指在高能激光束的作用下,将熔覆材料与基体形成冶金结合,实现表面改性的工艺,其原理如图1^[13]所示,根据送料方式的不同,分为预置法与同步法两大类。预置法是指在激光熔覆前,将熔覆材料预置在工件的表面后进行激光处理。熔覆材料通常使用粉末或是特定形状与厚度的薄片。同步法是指熔覆过程激光加工与熔覆材料供给同步进行。激光束照射基材表面形成熔池,利用送粉系统将熔覆材料送入熔池中与基体形成牢固的冶金结合层。根据熔覆材料不同,分为同步送粉法(包括同轴送粉与侧向送粉)与同步送丝法两种^[13-14]。

1.2 激光熔覆工艺参数的影响

在激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的过程中,参数控制不当容易出现裂纹、气孔、剥落、塌陷等缺陷,因此工艺参数的选择对于熔覆层的表面质量、微观组织与综合性能有着极其重要的影响。主要工艺参数包括激光功率、扫描速度、送粉量、搭

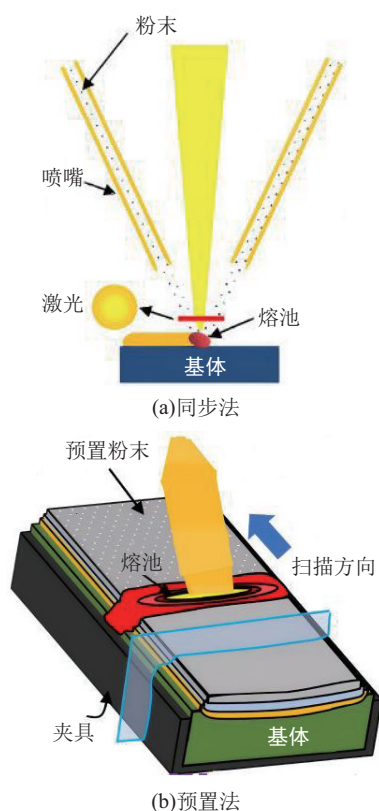
图1 激光熔覆工艺^[13]

Fig.1 Laser cladding process

接率等^[15]。

Nabhani等^[16]采用线性回归分析的方法研究工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉量)与涂层几何形貌的关系,发现:熔覆层高度主要取决于激光功率与扫描速度,送粉量影响较小,熔宽由扫描速度与送粉量控制,熔深与激光功率和扫描速度成正比,与送粉量成反比,稀释率受扫描速度和送粉量影响,与激光功率无关,润湿角由激光功率、扫描速度、送粉量的组合参数控制。Li等^[17]研究了激光功率(1000~2200 W)对涂层耐腐蚀性的影响:当激光功率在1400 W时,熔覆层的自腐蚀电位与极化电阻最大,腐蚀电流最低,耐腐蚀性能最好。杨广峰等^[18]研究了激光功率对涂层的耐磨性与耐腐蚀性的影响,发现:当功率在一定区间内逐渐增大时,熔池内的强烈对流与Marangoni流促进颗粒的均匀分布,涂层组织开展方向更加规整且组织数量与密度降低,但功率过高时可能导致熔池剧烈波动,出现颗粒团聚与偏析,产生烧蚀现象,涂层的耐磨性和耐腐蚀性先提高后降低。Xu等^[19]在TC4表面制备质量分数90%TiC+10%Ni60复合涂层,研究了扫

描速度对涂层微观结构与耐磨性的影响(图2^[19]),结果表明:熔覆体积随着扫描速度的增加而减小,耐磨性逐渐降低,在低的扫描速度下热输入增大,延长增强相的形核与生长时间,形成发达的枝晶,涂层显微组织为网状结构与被网状结构包覆的TiC颗粒,热输入降低冷却速率增加,增强相形核率增大但生长受到抑制,组织转变为棒状与细小颗粒,随着扫描速度的增加逐渐出现棒状与颗粒状TiC。

由于激光熔覆过程中各工艺参数并非单一独立作用,而是由多系统耦合交互的复杂过程,因此,对工艺参数的研究从传统的单因素影响逐渐深化为多因素耦合对涂层组织及性能的协同调控机制。然而,由于多参数耦合的情况复杂,仍需要通过大量的试验进行参数优化,如何高效准确地得到综合性性能最优的工艺参数组合成为研究的重点。

1.3 激光熔覆工艺参数的优化方法

通过经验积累或单因素试验得到的激光熔覆工艺参数往往难以实现多性能指标的协同调控优化。因此,建立系统化的激光熔覆工艺参数优化方法,实现从经验试错到智能决策的转变,成为制备高性能涂层的关键路径。目前,根据模型构建方式不同,激光熔覆工艺参数优化方法分为传统试验设计法与智能优化算法,不同方法的对比如表1所示。

1.3.1 传统试验设计法

传统试验设计法是工艺参数优化中最广泛、最基础的优化方法。该方法的原理是基于先验假设的统计模型,通过假定工艺参数与响应指标之间存在某种可能的函数关系,设计结构化试验,对试验结果采用统计学的方法拟合出模型参数,从而实现参数优化。常见的试验方法有正交试验法、田口法和响应面法(RSM)。

正交试验法是通过设计正交表,选取具有代表性的试验点,进行多因素多水平的试验,在保证结果可靠的基础上减少试验次数,通过对试验结果进行极差分析与方差分析,确定最优工艺参数组合。陈涛等^[20]在TC4基体上熔覆TiC涂层,通过正交试验研究了激光功率、扫描速度与TiC粉末直径对TiC涂层表面形貌和显微硬度的影响,将优化后的参数进行组织及耐磨性分析,试验表明,采用优化后的工艺参数得到的TiC涂层组织致密,TiC晶粒细化且分布均匀,与基体相比耐磨性提升37.47%,明显优于其他涂层。正交试验法的优点是可以直

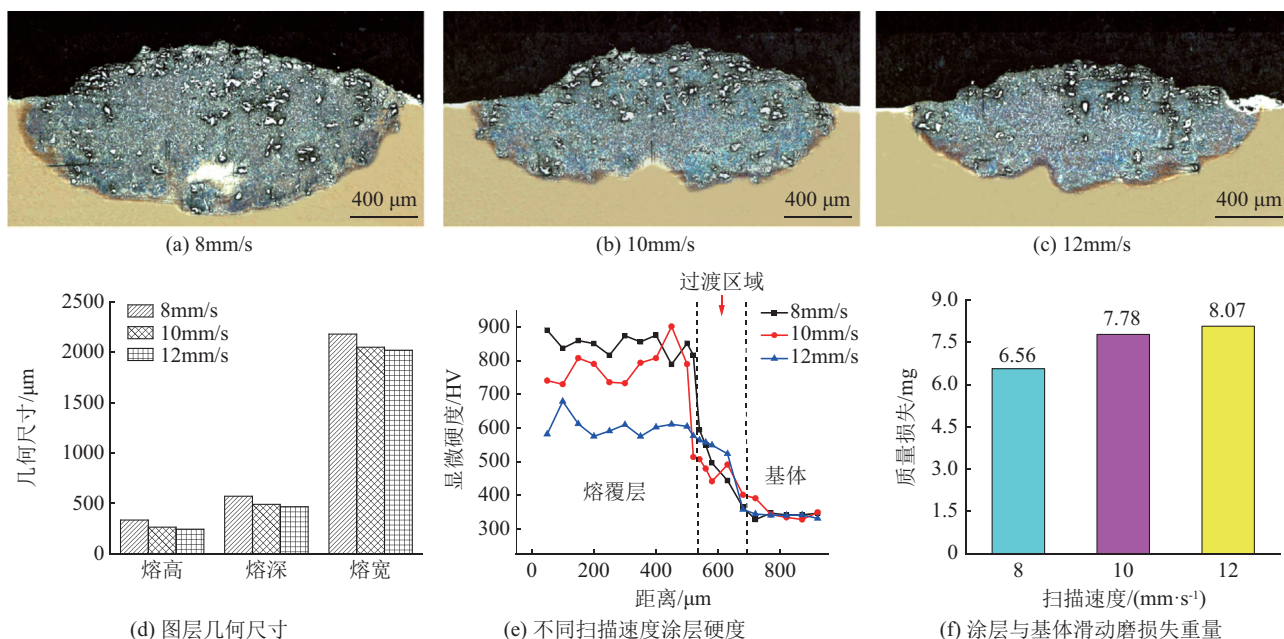
图2 扫描速度对涂层形貌、硬度及耐磨性影响^[19]

Fig.2 The influence of scanning speed on coating morphology, hardness, and wear resistance

表1 激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的工艺参数优化方法

Table 1 Optimization method for process parameters of laser cladding ceramic particle reinforced titanium-based composite coating

优 化 方 法	优 点	局 限 性	适 用 对 象
正交试验法	可分析各因素主效应与交互作用	无法建立连续数学模型	多因素多水平快速筛选
传统试验田口法设计法	稳健性好,有效降低噪声因素影响	交互作用分析较差	工艺稳定性要求高的场合
响应面法	建立连续模型,能有效分析各因素交互作用	难以处理高维(≥ 5)参数	低维非线性优化
智能优化搜索(GA、PSO等)	适合全局寻优,不依赖梯度信息	对参数设置敏感,试验成本高	多目标、高维参数寻优
智能优化机器学习(ANN、SVM等)算法	可处理高维多源数据	依赖高质量数据,模型可解释性差	需高精度预测涂层性能场合
机器学习+混合优化	将高精度预测与高效寻优结合,可优化多矛盾目标	技术门槛高,流程复杂	复杂多目标协同优化场合

观得到各因素的影响趋势,尤其适用于多因素多水平的初步工艺选择,但正交试验法主要侧重单因素对试验结果的独立主效应,忽略了各因素之间的关系。同时优化参数仅在正交表中筛选,无法确定是否为连续空间内全局最优解,且线性模型拟合精度有限,难以解释激光熔覆各参数对涂层性能的影响。

田口法与正交试验法最大的区别是采用信噪比(式1)作为评价指标,通过内表(可控参数)与外表(不可控参数)的交叉设计,降低随机因素的影

响,将信噪比最大作为优化目标,实现工艺参数的稳健性设计。Farayibi等^[21]在TC4表面制备WC-WC₂复合涂层,将激光功率、扫描速度、送粉量、WC/WC₂粉末比例作为内表,多次试验处理噪声,得到最优参数组合。试验结果表明,激光功率1800 W、扫描速度300 mm/min、送粉量30 g/min、增强相质量分数76%±1%的工艺参数具有最大信噪比(37.67),同实际数据建立的多元线性回归模型相比预测精度高。田口法的优点是保证工艺参数的稳

健性,激光熔覆过程复杂且对噪声变化敏感,可以提高工艺参数的可靠性。但田口法的优化结果依然仅限于离散空间,同时对于噪声因素的选取极大依赖个人经验,且处理相互冲突的目标时优化效果差。

$$S/N = -10 \lg MSD \quad (1)$$

式中: S/N ——信噪比; MSD ——均方差。

RSM是一种将数学建模和统计学相结合的设计方法,通过建立响应曲面来分析连续参数空间中各影响因素与各响应指标之间的复杂关系^[22]。分析流程通常包括试验设计(CCD/BBD)、模型拟合评估与最优求解验证三个步骤。相比于正交试验法与田口法只能在离散水平选择参数的不足,RSM可以通过二次模型进行局部逼近,从而获得全局最优解,更适合激光熔覆过程中的工艺优化问题。Huang等^[23]采用CCD方法对激光熔覆 B_4C 增强Ti64涂层进行工艺优化,选取激光功率、扫描速度、送粉量为影响因素,以宽高比(AR)、润湿角(CA)、稀释率(DR)及显微硬度(HV)为响应指标,建立二阶回归模型。模型拟合结果 $p < 0.0001$, $R^2 > 0.96$,变异系数 $< 4\%$,信噪比 > 16 ,拟合效果良好;将优化后工艺参数与验证试验分析对比,预测误差在8%以内(图3^[23]),证明模型可靠,优化后 B_4C -Ti64复合涂层硬度较基体提高67.6%,磨损率下降23.1%。Chen等^[24]采用BBD方法建立协同优化模型,分析激光功率、扫描速度及搭接率对涂层厚度、宽度及硬度的影响。验证试验表明,涂层厚度、宽度及硬度误差为6.04%、0.98%及3.20%,优化后涂层硬度为1064.87 HV0.2,摩擦系数降低56.97%,耐磨性较基体显著提高。虽然RSM可以较好地解决激光熔覆中的非线性工艺优化,但由于响应面试验次数随影响因素增加呈指数增长,在处理高维参数空间时试验成本显著上升,同时试验的可靠性依赖模型拟合精度,当实际过程过于复杂时可能出现模型失拟等问题。

1.3.2 智能优化算法

随着激光熔覆工艺研究的不断深化,传统试验设计法在处理高维参数空间时普遍存在试验成本急剧上升、参数交互影响难以有效分析和无法处理复杂非线性映射等问题。为弥补上述不足,研究者引入智能优化搜索的方法。其核心思想是模拟生物群体进化与社会行为机制,不依赖预设函数形

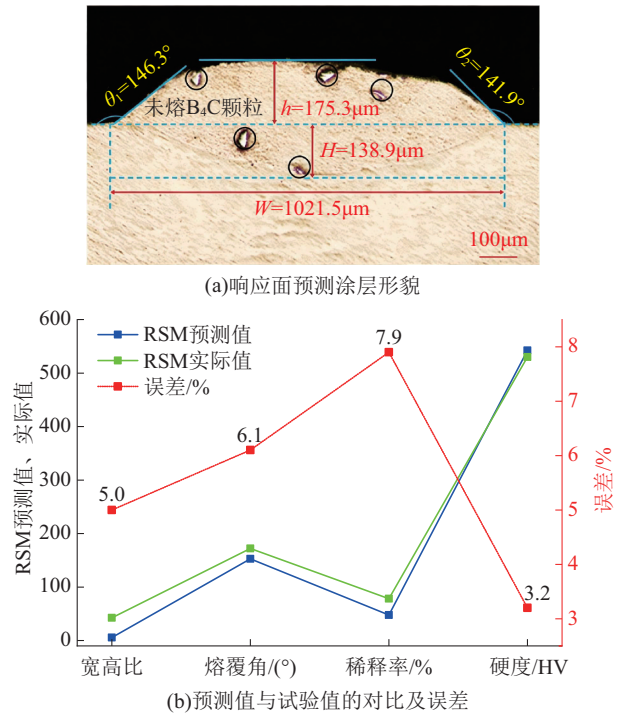


图3 基于RSM的 B_4C -Ti64涂层预测^[23]

Fig.3 Prediction of B_4C -Ti64 coating based on RSM

式,而是采用数据驱动方法实现全局搜索寻优。

常见的智能优化搜索方法有遗传算法(GA)^[25]、粒子群算法(PSO)^[26]、蚁群算法(ACO)^[27]、模拟退火(SA)^[28]等。崔宝磊等^[29]以裂纹数量为响应指标,采用响应面与遗传算法对工艺参数进行对比优化分析,结果表明,在两种优化方法得到的工艺参数下,采用遗传算法优化制备的涂层无裂纹,采用响应面优化制备的涂层有裂纹产生。Shu等^[30]在RSM优化基础上采用NSGA-II进行多目标优化,优化后涂层硬度提升10.1%,摩擦系数降低27.6%,显著优于初始最优样本。

尽管智能优化算法可以有效处理非线性耦合关系,但此类算法对惯性权重和加速常数的设置敏感性高,十分依赖代理模型的精度,而构建高质量的代理模型受限于试验样本与空间分布等因素。

近年来,随着人工智能的发展,将机器学习与智能优化搜索相结合,利用机器学习建立高精度模型预测工艺参数与涂层性能的复杂映射关系,成为解决问题的新方法。基本思想是利用机器学习算法自主学习探索工艺参数与涂层性能的关联性,从而构建高性能模型,降低试验样本与空间分布的影响,在此基础上与智能优化搜索相结合,完成全局

高效寻优的目标^[31]。其基本流程是通过试验获得样本数据,采用机器学习建立代理模型,在此基础上使用智能优化搜索对模型进行迭代分析,最后将获得的工艺参数组合进行试验验证得到最优组合。

常见的机器学习根据模型架构与原理包括线性模型(LR、LDA、Lasso)、懒惰学习(KNN)、树模型或规则模型(DT、RF、XGBoost)、支持向量机(SVM)、神经网络(ANN、BPNN、CNN)与集成学习等。Chen等^[32]选用SLM方法制备TiC涂层,以激光功率、扫描速度、铺粉厚度、光斑尺寸及搭接率为自变量,研究其对涂层形貌及显微硬度的影响,基于S/N及ANOVA建立了SVM模型,结果表明,模型的相关系数(CC)与拟合优度(R^2)均大于0.9。泰尔不等系数(TIC)均小于0.025(表2^[32])。预测值与试验值对比见图4^[32],验证了在小样本条件下SVM可以得到较高的预测精度。Deng等^[33]选用质量分数80%TiCN+20%SiO₂复合粉末在TC4表面制备Ti(C,N)陶瓷涂层,将反向传播(BPNN)与量子行为粒子群优化算法(QPSO)相结合构建BPNN-QPSO预测模型,研究激光熔覆工艺参数与涂层显微硬度的关系。模型预测结果与实际值最大相对误差为9.12%,同BPNN模型相比,预测精度显著提升。

表2 基于SVM的预测模型关键参数^[32]
Table 2 Key parameters of the prediction model based on SVM

模型	调试参数			指 数		
	惩罚参数	核参数	期望模型精度	相关系数	拟合优度	泰尔不等系数
SVM _T	2	0.020	0.001	0.9927	0.9836	0.0187
SVM _w	40	0.010	0.023	0.9980	0.9702	0.0223
SVM _{HD}	245	0.001	0.006	0.9419	0.7040	0.0765
SVM _{MH}	180	0.001	0.020	0.9631	0.9019	0.0109

综上所述,激光熔覆技术作为钛合金表面改性的重要方法,工艺参数的选择直接影响涂层的综合性能,传统设计方法在高维度多目标处理方面存在局限性。人工智能+智能优化算法为实现工艺参数优化提供了新手段,但研究仍处在探索阶段,对于工艺参数的优化缺乏完整的工艺-组织-性能理论模型,涂层组织演化与性能调控的机制不明。如何建立系统化的工艺参数模型,阐明工艺参数对性

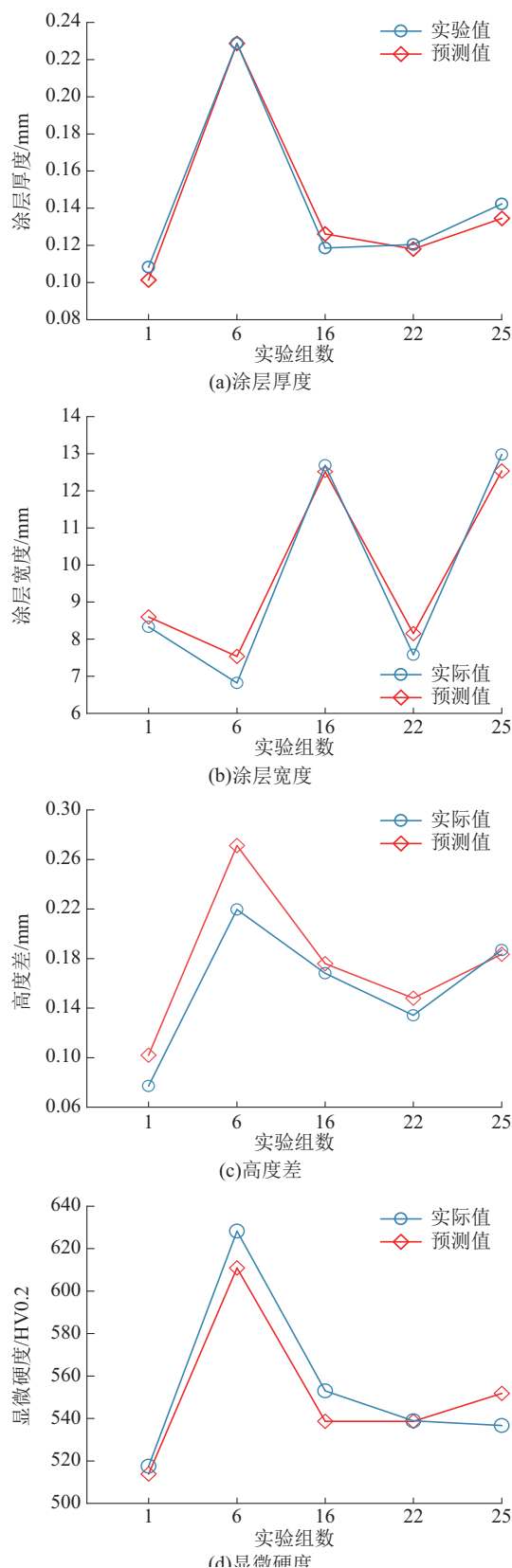


图4 预测结果与相应试验值^[32]

Fig.4 Predicted results and corresponding experimental values

能的调控机制,降低试验成本,仍是需要突破的关键问题。

2 陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的研究现状

2.1 陶瓷颗粒增强相的选择

陶瓷颗粒的选择对涂层的性能有着决定性的影响,一般情况下,需要考虑涂层的使用需要、涂层与基体的结合强度、涂层的高温稳定性。常见的陶瓷颗粒根据化学组成不同分为碳化物陶瓷颗粒、氧化物陶瓷颗粒、硅化物陶瓷颗粒、氮化物陶瓷颗粒和硼化物陶瓷颗粒。碳化物陶瓷颗粒(TiC、WC、SiC等)具有较高的熔点与硬度,部分增强相(如TiC)与钛基体的相容性极佳,是提高涂层耐磨性最常用、最普遍的选择^[34-35]。氧化物陶瓷颗粒(Al_2O_3 、 Y_2O_3 、 ZrO_2 等)具有良好的高温抗氧化性与耐腐蚀性,但与基体的结合强度差,易出现剥落开裂等问题,通常作为次要相用于细化晶粒。硅化物陶瓷颗粒(MoSi_2 、 Ti_5Si_3 等)在高温条件下生成性能优异的 SiO_2 抗氧化膜,但在室温下脆性大,且熔覆过程会与基体发生反应,对工艺参数的要求较高。氮化物陶瓷颗粒(TiN、BN、AlN等)与基体相容性好,其中BN有着良好的高温抗氧化性与耐磨性。硼化物陶瓷颗粒(TiB、 TiB_2 、 ZrB_2 等)则具有良好的耐磨性与抗高温蠕变性能。

陶瓷颗粒的引入方式同样是影响涂层质量的关键,根据制备方式的不同分为外加法与原位生成法两种。外加法是将陶瓷颗粒直接添加到熔覆层中,优点是工艺简单,但可能存在陶瓷颗粒分布不均的问题。原位生成法是在熔覆过程中利用化学反应直接生成陶瓷颗粒相,相较于外加法可以获得分布均匀、结合强度好的涂层,但对工艺参数选取与反应体系设计的要求较高。

2.2 陶瓷颗粒增强钛基功能涂层

根据实际使用需要,激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层主要分为耐磨涂层、耐腐蚀涂层与高温抗氧化涂层三类。

2.2.1 耐磨涂层

耐磨涂层是目前激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层最主要的研究与应用方向之一。摩擦工况下钛合金表面易发生黏着磨损与磨粒磨损,通过引入高硬度的陶瓷颗粒增强相,可以显著提高涂层硬度,抑制磨粒磨损,同时通过细晶强化、固溶强化

等机制提高涂层的耐磨性,通过调控合适的工艺参数,可以促进组织细化,形成细小弥散的组织结构,进一步提高涂层的耐磨性能。

Chen等^[24]在激光功率853.09 W、扫描速度8.18 mm/s的优化工艺下,在TC4表面制备Ti(C, N)复合涂层,研究发现:在该工艺参数下热输入适中,熔池温度场稳定,冷却速率适中,有利于抑制增强相的粗大生长,涂层主要由细小的 $\text{TiC}_{0.3}\text{N}_{0.7}$ 等轴晶粒组成,磨损体积从 $5.35 \times 10^8 \mu\text{m}^3$ 降低到 $4.44 \times 10^6 \mu\text{m}^3$,耐磨性能显著提升,磨损类型为氧化磨损。Li等^[36]系统研究 TiB_2 质量分数(5%~35%)对耐磨性的影响,图5^[36]为不同 TiB_2 含量的TMC涂层磨损机制:低含量下仅生成纳米共晶 TiB_w ,磨损类型以磨粒磨损为主,随 TiB_2 含量增加,反应生成的TiB形核增大起到骨架承载作用;当 TiB_2 进一步增加,未熔 TiB_2 出现在熔覆层中,在磨损时成为硬质突起,有效阻挡磨粒切入,从而减轻磨损。Zhao等^[37]制备的 TiO_2 涂层硬度达到1582 HV,磨损率为基体的27%, TiO_2 主要通过细晶强化与第二相强化机制提升耐磨性。近年来,制备多相复合涂层获得更优异性能成为研究热点。Dey等^[38]在TC4表面制备 Al_2O_3 - TiB_2 -TiN-BN复合涂层,并对强化机制进行分析: Al_2O_3 、 TiB_2 、TiN陶瓷颗粒分布在涂层中对晶界产生钉扎效应,同时作为异质形核点起到晶粒细化与第二相强化的作用;Ti和Al反应形成 Ti_3Al 、TiAl等金属间化合物,N、B固溶于Ti晶格中,通过固溶强化增强涂层性能;未熔的BN具有良好的润滑性,摩擦工况下形成的润滑膜有效降低摩擦系数。Murmu等^[39]在TC4表面原位合成的TiC/ TiB_2 / TiO_2 / ZrB_2 多相复合涂层硬度达到1582.4 HV,摩擦系数较基体降低66.7%,磨损深度减少87.5%。Ke等^[40]在TA2表面制备 WS_2 /TiC/Ti多相复合涂层,500℃环境下摩擦系数为0.339,磨损率降低53.2%,涂层在高温情况下仍保持优异的耐磨性。

表3^[24,36,38,40-47]为近年来不同陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的相组成、强化机制及耐磨性能。多相复合涂层通过选用润滑相或多种硬质相实现了硬度与磨损率的良好平衡,综合性能普遍优于单一涂层体系。

2.2.2 耐腐蚀涂层

钛合金在空气中或弱腐蚀环境中表面生成的

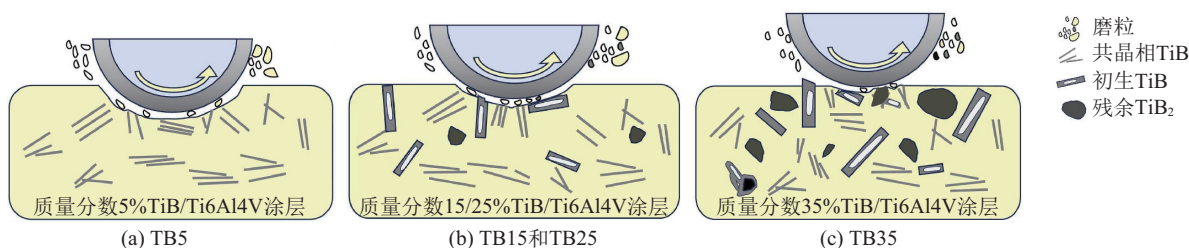
图5 不同TiB₂含量TMC涂层磨损机制示意^[36]Fig.5 Schematic diagram of wear mechanisms of TMC coatings with different TiB₂ contents

表3 不同陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的相组成、强化机制及耐磨性能

Table 3 Phase composition, strengthening mechanism, and wear resistance of titanium matrix composite coatings reinforced with different ceramic particles

相	硬 度	强化机制	磨损率/磨损量	摩擦系数
TiC _{0.3} N _{0.7} 、Ti ₃ Al、α-Ti ^[24]	1064.87 HV0.2	GRS、SSS	$4.44 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$	0.1557
α-Ti、Al ₂ O ₃ 、TiB ₂ 、TiN、BN、Ti ₃ Al、TiAl ^[38]	1052.19 HV0.05	SL、DPS、GRS	$3.76 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.19
α-Ti、TiS、Ti ₂ SC、(Ti, W)C _{1-x} ^[40]	1005.4 HV0.5	DPS、GRS、SL	$4.87 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.339
α-Ti、Ti ₂ AlC、TiC、Ti ₃ Al ^[41]	382.92 HV0.5	SL、DPS、GRS	$8.87 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.382
TiC、Ti ₃ Al、α-Ti ^[42]		GRS、DPS、SSS	25%	
WC、W ₂ C、TiC、VC、Co ₃ W ₃ C、W ^[43]	959 HV	DPS、LTS	33%	0.19
TiC、Ti ₃ Al、Ti ₅ Si ₃ 、Ti ₃ AlC ₂ 、(Ti, Nb)C ^[44]	1024 HV0.2	DPS、GRS、SSS	4.5 mg	0.375
α-Al ₂ O ₃ 、TiO ₂ 、Ti ₅ Si ₃ 、TiAl、Ti ₃ Al、Ti ₃ AlC ₂ ^[45]	770 HV0.3	DPS、GRS	6.3 mg	0.435
TiC、TiB、B ₄ C、α-Ti ^[46]	582.7 HV0.3	DPS、GRS、LTS	0.98 mg/min	
α-Ti、β-Ti、TiB、TiB ₂ ^[36]	747.1 HV0.2	DPS、LTS、GRS	0.216 mg/min	
TiAl、Ti ₃ Al、Ti ₅ Si ₃ 、TiAl ₃ ^[47]	820.83 HV	DPS、GRS	0.14 mg/min	0.412

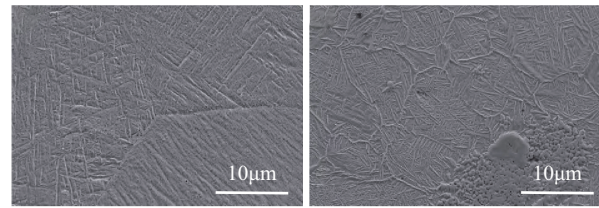
注:SSS—固溶强化;DPS—弥散强化;LTS—载荷传递强化;SL—自润滑;GRS—细晶强化。

TiO₂钝化膜可以较好地防止基体与外界腐蚀介质的接触,但在地质钻探井下高温高压强腐蚀性的环境中,TiO₂钝化膜易因磨损或点蚀而被频繁破坏,且难以自修复,最终加速基体的腐蚀失效^[48]。采用陶瓷颗粒制备钛基复合涂层可以有效提高涂层的耐腐蚀性:陶瓷颗粒作为硬质相可以提高涂层的硬度及耐磨性,降低因摩擦导致的基体暴露;陶瓷颗粒在凝固过程中作为异质形核核心提供更多形核位点,起到细化晶粒、提高涂层致密度、抑制腐蚀通道形成的作用;增强相在腐蚀介质中起到微阴极的作用,加速阳极区的钝化反应,有效抑制点蚀的萌生;在腐蚀过程中,涂层优先钝化,从而对基体起到保护作用。

刘文荣等^[49]采用激光直接沉积技术(LDED),在激光功率 2100 W、扫描速度 20 mm/s、送粉量 23.3 g/min 的工艺参数下制备 Nano-TiN 涂层,并在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 10 d,研究涂层的耐腐蚀性,

结果表明:在该工艺参数下熔池温度较高,完全熔化的纳米 TiN 在 Marangoni 对流作用下弥散分布,二次析出的 Ti₃N 作为形核位点促使晶粒转变为细小的等轴晶,腐蚀电流密度较基体降低 94.8%,极化电阻为基体的 13.7 倍;Nano-TiN 中析出的 Ti₃N 在涂层中均匀分布,在腐蚀介质中作为阴极形成更稳定的钝化膜,同时纳米 TiN 的加入可显著细化晶粒(图 6^[49]),细晶组织增加有利于在晶界形成致密的钝化膜,进一步提高涂层的耐腐蚀性。Fan 等^[50]分别制备 TiC 与 WC 增强钛基涂层,在相同工艺参数下对比分析涂层的耐腐蚀性,试验表明:WC 与 TiC 涂层的耐腐蚀性均强于基体,相同含量下 TiC 涂层的耐腐蚀性能优于 WC 涂层,随着含量的上升差异更加明显,在质量分数为 20% 时 TiC 的腐蚀电流密度为 WC 涂层的 14.3%,腐蚀速率仅为 WC 的 19.6%;WC 对于基体的耐腐蚀性提升效果有限,在选定的工艺参数下,TiC 在熔池中均匀分布,形状为

花瓣或颗粒状,涂层与基体的结合情况良好,由于WC密度较大,在相同工艺参数下存在较多未熔融颗粒沉积在涂层中下部,随着比例增加,Wc未熔颗粒与基体间隙成为腐蚀通道,出现局部点蚀与涂层剥离,降低涂层的耐腐蚀性。Zhang等^[51]选用SiC陶瓷颗粒制备SiC/TC4复合涂层,发现在高温环境下SiC分解生成TiC与Ti₅Si₃,在腐蚀过程中增强相作为微阴极加速阳极溶解与[TiCl₆]²⁻络合物生成,促进均匀致密的TiO₂形成。Li等^[52]制备不同Nb含量的钛基复合涂层,研究高Cl⁻环境下涂层的磨损-腐蚀耦合服役性能,结果表明:涂层中Laves相(NbCr₂)与基体形成的异质结构有效提高了涂层的硬度;涂层在摩擦过程中磨屑氧化与界面接触形成致密氧化物润滑层,在降低摩擦系数的同时阻止腐蚀介质侵入,耐腐蚀性能优于传统陶瓷涂层,有效抑制磨损-腐蚀协同损伤。



(a) Nano-TiN

(b) 涂层

图6 微观组织^[49]

Fig.6 Comparison of microstructures

表4^[49-55]为陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的工艺参数、相组成及耐腐蚀性能,可以发现,涂层的耐腐蚀性并非由单一因素决定,而是受增强相种类与工艺参数的共同影响。在极端服役环境下,应选用界面结合性能良好的陶瓷颗粒,同时调节工艺参数,抑制未熔颗粒沉积,减少气孔、裂纹及团聚等缺陷,从而提高涂层的耐腐蚀性。

表4 陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的工艺参数、相组成及耐腐蚀性能

Table 4 Processing parameters, phase composition, and corrosion resistance of ceramic particle-reinforced titanium matrix composite coatings

材 料	工 艺 参 数	相	腐蚀电位/ V	腐蚀电流密度/ (A·cm ⁻²)	极化电阻/ (Ω·cm ²)
TiN ^[49]	$P=2100\text{ W}, v=20\text{ mm/s}$	Ti ₃ N、TiO ₂	-0.383	1.482×10^{-8}	2.7×10^6
TiC ^[50]	$P=2500\text{ W}, v=5\text{ mm/s}$	TiC	-0.326	4.2×10^{-7}	1.44×10^5
WC ^[50]	$P=2500\text{ W}, v=5\text{ mm/s}$	TiC、WC、W ₂ C、(Ti, W)C _{1-x}	-0.341	2.93×10^{-6}	5.13×10^4
SiC ^[51]	$P=500\text{ W}, v=16\text{ g/min}$	TiC、Ti ₅ Si ₃	-0.220	2.77×10^{-8}	
B ₄ C、Cr、Nb ^[52]	$P=800\text{ W}, v=8\text{ mm/s}$	NbCr ₂ 、TiC、Cr ₇ C ₃ 、NbC	-0.33	1.18×10^{-8}	3.97×10^5
TaC ^[53]	$P=3000\text{ W}, v=5\text{ mm/s}$	TaC、TiC	-0.348	$1 \times 10^{-6.9}$	
Cr ₃ C ₂ ^[54]	$P=2000\text{ W}, v=15\text{ mm/s}$	TiC、Cr ₃ C ₂	-0.286	9×10^{-7}	4.55×10^5
WC、CeO ₂ ^[55]	$P=3000\text{ W}, v=6\text{ mm/s}$	TiC、WC、W ₂ C、CeO ₂ 、CeC ₂	0.404	4.09×10^{-7}	2.84×10^5

2.2.3 高温抗氧化涂层

钛合金表面形成的氧化膜可以有效隔绝氧气,因此在常温环境中具有良好的抗氧化性。但在井下高温环境中,氧化动力学规律发生转变,氧化膜致密性下降,由单层结构转变为多层交替结构,无法阻挡氧气向内扩散,使得高温抗氧化性显著降低。引入陶瓷颗粒增强相可以通过钉扎晶界、细化晶粒等方式促进氧化膜的形成,同时生成的氧化物可以填充孔隙,抑制多层交替结构的转变,从而提高钛合金在高温环境下的抗氧化性能。常见的高温抗氧化陶瓷颗粒有碳化物、硼化物与硅化物。Lv等^[56]通过在TC4表面制备TiNi涂层,研究TaC含

量对涂层高温抗氧化性的影响,发现TaC在高温氧化过程中形成Ta₂O₅,有效阻止氧向内扩散,随着TaC含量增加高温抗氧化性逐渐增强,质量分数40%TaC增重1.69 mg/cm²,较基体减少74.8%(图7^[56])。

Li等^[57]研究SiC含量对涂层抗氧化性的影响,发现SiC质量分数10%时氧化增重最低(0.191 mg/cm²),适当比例的SiC可以促进Al₂O₃的形成,但过量SiC导致TiC生成增加,从而降低涂层的高温抗氧化性。Yin等^[58]在TC4表面制备TiC/TiB_x+yLaB₆涂层,研究表明:LaB₆在涂层中分解为La₂O₃,并分布在晶界附近,阻止氧的进一步扩散,同时抑

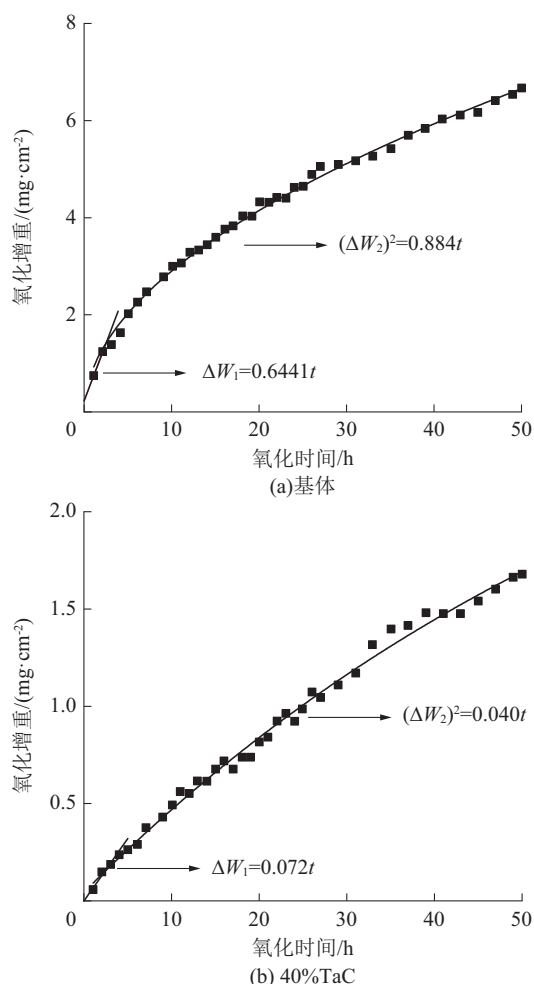
图7 800 °C下氧化增重拟合曲线^[56]

Fig.7 Oxidation weight fitting curve at 800 °C

制 TiB_2 等相粗化,减少裂纹产生;氧化动力学曲线从直线转变为抛物线;质量分数 2% LaB_6 涂层增重 0.87 mg/cm^2 ,高温抗氧化性能最佳。Feng 等^[59]在

TC4 表面原位合成 $(\text{Ti}_3\text{Al}+\text{TiB})/\text{Ti}$ 复合涂层,研究涂层的高温磨损行为发现:高温环境下涂层增重仅为基体的 20%;涂层表面形成致密的 $\text{TiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ 混合氧化层,且生成的 Al_2O_3 集中在界面附近;高温环境下涂层的磨损表面犁沟更浅,耐磨性能较基体更优,原位合成的 Ti_3Al 和 TiB 通过优化氧化层结构与促进转移膜形成,协同提高涂层的高温抗氧化性与耐磨性能。

表 5^[56-64] 为陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的工艺参数、相组成及高温抗氧化性能。

综上所述,陶瓷颗粒增强钛基复合涂层在耐磨损、耐腐蚀与高温抗氧化三个方面均展现出较好的性能,然而目前研究多将性能评价停留在室温磨损、单独腐蚀或静态高温氧化等单一因素,对地质钻探“高温-磨损-腐蚀”多因素耦合环境下的研究极少,对氧化、磨损与腐蚀协同作用下涂层失效的微观机制仍不明晰,尚未形成面向耐磨-耐蚀-抗氧化多目标协同的设计准则。

3 总结与展望

与传统表面强化技术相比,激光熔覆涂层技术为解决钛合金钻杆在井下磨损、腐蚀、高温环境下性能不稳定问题的有效途径。但目前实际工程应用较少,因此,对钛合金表面激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的研究可从以下方面开展。

(1)激光熔覆材料体系的智能化设计。当前陶瓷颗粒增强相的选择多依赖于经验,各种元素对涂层性能影响与强化机理尚未明确,随着人工智能、智能优化算法与大数据平台的发展,未来应对激光

表 5 陶瓷颗粒增强钛基复合涂层的工艺参数、相组成及高温抗氧化性能

Table 5 Process parameters, phase composition, and high-temperature oxidation resistance of ceramic particle-reinforced titanium matrix composite coatings

材 料	工 艺 参 数	相	氧 化 增 重	氧化动力学
TaC ^[56]	$P=3000 \text{ W}, v=5 \text{ mm/s}$	$\text{TaC}, \text{TiC}, \text{TiB}_2, \text{TiB}$	$1.69 \text{ mg/cm}^2 (800^\circ\text{C}, 50 \text{ h})$	抛物线
$\text{Ti}/\text{Al}/\text{Si}/\text{SiC}$ ^[57]	$P=1500 \text{ W}, v=10 \text{ mm/s}$	$\text{TiC}, \text{Ti}_3\text{Al}, \text{TiAl}_3, \text{Ti}_5\text{Si}_3$	$0.191 \text{ mg/cm}^2 (800^\circ\text{C}, 200 \text{ h})$	抛物线
$\text{LaB}_6/\text{B}_4\text{C}$ ^[58]	$P=2000 \text{ W}, v=6 \text{ mm/s}$	$\text{TiC}, \text{TiB}, \text{TiB}_2, \text{La}_2\text{O}_3$	$0.87 \text{ mg/cm}^2 (600^\circ\text{C}, 50 \text{ h})$	抛物线
Ti/AlB_2 ^[59]	$P=1500 \text{ W}, v=2 \text{ mm/s}$	$\text{TiB}, \text{Ti}_3\text{Al}$	$2.1 \text{ mg/cm}^2 (650^\circ\text{C}, 60 \text{ h})$	抛物线
$\text{Y}/\text{Mo}/\text{Nb}/\text{Ti}$ ^[60]	$P=3000 \text{ W}, v=5 \text{ mm/s}$	Y_2O_3	$3.112 \text{ mg/cm}^2 (800^\circ\text{C}, 50 \text{ h})$	先线性后抛物线
$\text{Ti}/\text{Al}/\text{Si}$ ^[61]	$P=3500 \text{ W}, v=5.83 \text{ mm/s}$	$\text{Ti}_3\text{Al}, \text{Ti}_5\text{Si}_3, \text{Ti}_7\text{Al}_5\text{Si}_{12}$	$2.8 \text{ mg/cm}^2 (800^\circ\text{C}, 120 \text{ h})$	抛物线
TiC ^[62]	$P=1400 \text{ W}, v=4 \text{ mm/s}$	$\text{TiC}, \text{M}_{23}\text{C}_6, \text{Cr}_7\text{C}_3$	$7.32 \text{ mg/cm}^2 (800^\circ\text{C}, 100 \text{ h})$	幂函数
TiAl/B ^[63]	$P=4000 \text{ W}, v=6.77 \text{ mm/s}$	$\text{TiB}, \text{Ti}_3\text{Al}, \text{Al}_2\text{O}_3$	$5.3 \text{ mg/cm}^2 (800^\circ\text{C}, 120 \text{ h})$	抛物线
AlN ^[64]	$P=1800 \text{ W}, v=2 \text{ mm/s}$	$\text{Ti}_2\text{AlN}, \text{TiN}$	$511.44 \text{ }\mu\text{m} (1000^\circ\text{C}, 50 \text{ h})$	抛物线

熔覆涂层进行综合分析,建立面向地质钻探的钛合金功能涂层的相关数据库,从服役环境出发,确定涂层所需的性能指标,通过选取合适的工艺参数与粉末,调控微观组织性能,完成服役环境-工艺材料-组织-性能的闭环,实现从经验试错到数据驱动的智能设计。

(2)激光熔覆辅助工艺的研发。激光熔覆层质量与涂层的性能有密切关系,目前激光熔覆技术仍存在气孔、裂纹、应力分布不均等缺陷,国内外学者采用磁场、电场、超声振动等辅助技术来提高熔覆层质量。磁场辅助工艺能够有效细化晶粒,降低残余应力,但成本较高,且对材料导磁性有较高要求;电场辅助工艺设备简单,适用于薄壁件处理,但存在弧光放电现象且能耗较高;超声振动可促进增强相均匀分布,然而难以适用于高速运动或复杂表面工况。未来研究应聚焦于开发复合辅助工艺,研发高效可行、成本可控的辅助方法,实现高效稳定低成本工业应用。

(3)复杂环境涂层失效机制研究。目前对于涂层的性能评价多局限于某一单一条件(耐磨、耐腐蚀、高温抗氧化),对于地质钻探过程中高温、磨损、腐蚀共存的复杂环境下涂层的失效机理研究不足。未来应系统研究“高温-磨损-腐蚀”协同作用下的涂层损伤规律,构建多因素耦合环境下的试验方法与评价体系,揭示各因素之间的影响与主控机制,探索面向地质钻探的涂层性能预测模型,为钛合金钻具在复杂井下的延寿设计与可靠性评估提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] Lan X D, Wu H, Liu Y, et al. Microstructures and tribological properties of laser clad Ti-based metallic glass composite coatings[J]. *Materials Characterization*, 2016, 120: 82-89.
- [2] 崔春娟, 乌彤超, 王志聪, 等. 钛合金钻杆的研究现状及进展[J]. *稀有金属*, 2025, 49(4): 540-552.
CUI Chunjuan, WU Tongchao, WANG Zhicong, et al. Research status and progress of titanium alloy drill pipe[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2025, 49(4): 540-552.
- [3] Veiga C, Davim J P, Loureiro A J R. Properties and applications of titanium alloys: a brief review[J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2012, 32: 133-148.
- [4] Liu R Y, Yuan S, Lin N M, et al. Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: a mini review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11: 351-377.
- [5] 许俊杰, 苏娟, 康嘉杰, 等. 激光织构对Fe基非晶合金涂层润湿性的影响研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(4): 21-28.
XU Junjie, SU Juan, KANG Jiajie, et al. Effect of laser texture on wettability of Fe-based amorphous alloy coating[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4): 21-28.
- [6] 周永宽, 康嘉杰, 岳文, 等. 超音速火焰喷涂金属陶瓷复合涂层的耐磨性能研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(4): 72-79.
ZHOU Yongkuan, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Study on wear resistance of HVOF metal ceramic composite coating[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(4): 72-79.
- [7] Wei Z Y, Meng G H, Chen L, et al. Progress in ceramic materials and structure design toward advanced thermal barrier coatings[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, 11(7): 985-1068.
- [8] Yang N, Shan M J, Shi G Y, et al. Physicochemical state classification of heat-treated TC4 samples based on laser induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. *Atomic Spectroscopy*, 2024, 45(4): 324-335.
- [9] Yuan W Y, Li R F, Chen Z H, et al. A comparative study on microstructure and properties of traditional laser cladding and high-speed laser cladding of Ni45 alloy coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126582.
- [10] Li X B, Li T, Shi B W, et al. The influence of substrate tilt angle on the morphology of laser cladding layer[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 391: 125706.
- [11] 张志强, 杨凡, 张天刚, 等. 激光熔覆碳化钛增强钛基复合涂层研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(10): 138-151, 168.
ZHANG Zhiqiang, YANG Fan, ZHANG Tiangang, et al. Research progress of laser cladding titanium carbide reinforced titanium-based composite coating[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 138-151, 168.
- [12] 陈赞聪, 陈文刚, 张继豪, 等. 激光熔覆碳化物增强钛基硬质合金涂层的性能研究进展[J]. *表面技术*, 2025, 54(18): 1-15.
CHEN Zancong, CHEN Wengang, ZHANG Jihao, et al. Research progress on laser cladding of carbide reinforced titanium based cemented carbide coatings[J]. *Surface Technology*, 2025, 54(18): 1-15.
- [13] Wang K X, Tong Y G, Chen Y X, et al. Powder stream performance of a novel annular laser direct metal deposition with inside-laser coaxial powder feeding nozzle: simulation and experimental perspectives[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110723.
- [14] Zhang K, Li B H, Liu C W, et al. Influences of multi-dimensional energy density on multi-scale characteristics of TC4 alloy by laser powder bed fusion[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 136: 83-122.
- [15] 贺世伟, 朱丽娜, 张志强, 等. 激光电弧复合增材制造铝合金的组织性能研究[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(10): 152-163.
HE Shiwei, ZHU Lina, ZHANG Zhiqiang, et al. Study on the microstructure and properties of laser-arc hybrid additive manufacturing of aluminum alloys[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(10): 152-163.
- [16] Nabhani M, Razavi R S, Barekat M. An empirical-statistical model for laser cladding of Ti-6Al-4V powder on Ti-6Al-4V

- substrate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100:265-271.
- [17] Li X L, Zhao S, Zhang K L, et al. Effect of laser power on the corrosion and wear resistance of laser cladding TC4 alloy[J]. *Materials*, 2025, 18(24):5609.
- [18] 杨广峰, 郜峰, 崔静. 激光功率对 TC4 熔覆涂层组织及性能的影响[J]. *表面技术*, 2023, 52(1):346-353.
YANG Guangfeng, GAO Feng, CUI Jing. Effect of laser power on microstructure and properties of TC4 coated coating[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(1):346-353.
- [19] Xu S Y, Cai Q, Li G, et al. Effect of scanning speed on microstructure and properties of TiC/Ni60 composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 154:108309.
- [20] 陈涛, 宋逸昕, 王海波, 等. 激光熔覆制备 TiC 陶瓷涂层工艺优化及性能研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2026, 46(1):47-54.
CHEN Tao, SONG Yixin, WANG Haizhou, et al. Process optimization and properties of TiC ceramic coatings prepared by laser cladding[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2026, 46(1):47-54.
- [21] Farayibi P K, Abioye T E, Clare A T. A parametric study on laser cladding of Ti-6Al-4V wire and WC/W₂C powder[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9):3349-3358.
- [22] 靳子昂, 刘明, 朱丽娜, 等. 超音速等离子转移弧喷涂铝涂层的响应曲面法工艺优化[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(3):111-118.
JIN Ziang, LIU Ming, ZHU Lina, et al. Process optimization of supersonic plasma transfer arc spraying aluminum coating by response surface method[J]. *China Surface Engineering*, 2020, 33(3):111-118.
- [23] Huang G L, Liu Y. Laser cladding of B₄C-Ti64 composite coating: multi-objective process optimization, and investigation on microstructure, microhardness, and wear behavior[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2026, 520:133001.
- [24] Chen T, Song Y X, Wu W N, et al. Multi-objective process optimization and properties of Ti(C, N) ceramic coatings prepared by laser cladding[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2025, 34(7):2501-2520.
- [25] 郭星星, 帅美荣, 王建梅, 等. 基于 NSGA-II 算法的激光熔覆单道成形工艺参数多目标优化[J]. *中国表面工程*, 2023, 36(3):87-100.
GUO Xingxing, SHUAI Meirong, WANG Jianmei, et al. Multi-objective optimization of laser cladding single-pass forming process parameters based on NSGA-II algorithm[J]. *China Surface Engineering*, 2023, 36(3):87-100.
- [26] 张伟, 林莉, 樊俊铃, 等. 基于 PSO-SVR 的非均质涂层组织均匀性超声表征[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(6):222-231.
ZHANG Wei, LIN Li, FAN Junling, et al. Ultrasonic quantitative characterization of heterogeneous coating microstructure uniformity based on PSO-SVR[J]. *China Surface Engineering*, 2022, 35(6):222-231.
- [27] Wang M J, Heidari A A, Chen M X, et al. Exploratory differential ant lion-based optimization[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 159:113548.
- [28] Luo G Y, Zou L, Wang Z L, et al. A novel kinematic parameters calibration method for industrial robot based on levenberg-marquardt and differential evolution hybrid algorithm[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 71:102165.
- [29] 崔宝磊, 刘伟军, 卞宏友. 基于响应面法的 TiAl 合金激光增材制造工艺参数优化[J]. *应用激光*, 2024, 44(3):13-21.
CUI Baolei, LIU Weijun, BIAN Hongyou. Optimization of process parameters for laser additive manufacturing of TiAl alloy based on the response surface method[J]. *Applied Laser*, 2024, 44(3):13-21.
- [30] Shu L S, Li J H, Wu H, et al. Optimization of multi-track laser cladding process of titanium alloy based on RSM and NSGA-II algorithm[J]. *Coatings*, 2022, 12(9):1301.
- [31] 田根, 朱甫宏, 王文宇, 等. 基于机器学习的传感器监测在金属激光增材制造中的应用[J]. *材料导报*, 2025, 39(2):175-190.
TIAN Gen, ZHU Fuhong, WANG Wenyu, et al. Application of sensor monitoring based on machine learning in metal laser additive manufacturing[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(2):175-190.
- [32] Chen T, Wu W N, Li W P, 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.
- [33] Deng Z X, Chen T, Wang H J, et al. Process parameter optimization when preparing Ti(C, N) ceramic coatings using laser cladding based on a neural network and quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18):6331.
- [34] Weng F, Yu H J, Liu J L, et al. Microstructure and wear property of the Ti₅Si₃/TiC reinforced Co-based coatings fabricated by laser cladding on Ti-6Al-4V[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92:156-162.
- [35] Setti D, Sinha M K, Ghosh S, et al. Performance evaluation of Ti-6Al-4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 88:237-248.
- [36] Li N L, He D Y, Liu D, et al. In-situ TiB reinforced titanium matrix composite coatings prepared by laser cladding: effect of TiB₂ content on microstructure, hardness and wear properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010:178215.
- [37] Zhao Y T, Lu M Y, Fan Z Q, et al. Microstructures and mechanical properties of wear-resistant titanium oxide coatings deposited on Ti-6Al-4V alloy using laser cladding[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(3):798-810.
- [38] Dey D, Bal K S, Khan I, et al. Study of tribo-mechanical properties of laser clad Al₂O₃-TiB₂-TiN-BN // Ti-6Al-4V alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 150:107982.
- [39] Murmu A M, Parida S K, Das A K. Evaluation of in-situ synthesised titania-zirconia-boron carbide composite cladding on Ti6Al4V substrate using continuous wave fibre laser[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 296:127177.
- [40] Ke J, Liu X B, Wang M, et al. Investigation of wear behaviors from room temperature to 500°C of in-situ synthesized ceramics reinforced composite coating on TA2 alloy by laser cladding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9

- (3):6397-6408.
- [41] Hua S W, Pang M, Chen J, et al. Microstructure and tribological performance of laser cladding Ti_2AlC particle reinforced coatings on Ti6Al4V[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023,32(18):8452-8466.
- [42] Chen T, Deng Z X, Liu D F, et al. Bioinert TiC ceramic coating prepared by laser cladding: microstructures, wear resistance, and cytocompatibility of the coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021,423:127635.
- [43] Yang L J, Wang S P, Wang P, et al. Microstructural evolution and abrasive resistance of WC7Co ceramic particle-reinforced Ti6Al4V composite coating prepared by pulse laser cladding[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020,27(2):228-237.
- [44] Wang J Q, Li C G, Zeng M, et al. Microstructural evolution and wear behaviors of NbC-reinforced Ti-based composite coating[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020,107(5):2397-2407.
- [45] Li C G, Zeng M, Liu C M, et al. Microstructure and tribological behavior of laser cladding TiAlSi composite coatings reinforced by alumina-titania ceramics on Ti-6Al-4V alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020,240:122271.
- [46] Liu D, He D Y, Li H L, et al. Multi-ceramic phases synergistically reinforced titanium matrix composite coating deposited by laser cladding: effect of B_4C content on the microstructure and wear properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2025,496:131648.
- [47] Wang Z D, Zhao H T, Liu L J, et al. Microstructural evolution and properties of in situ synthesized ceramic phase reinforced Ti-Al composite coatings fabricated by coaxial powder feeding laser cladding[J]. Coatings, 2025,15(11):1297.
- [48] Obadele B A, Andrews A, Olubambi P A, et al. Tribocorrosion behaviour of laser clad biomedical grade titanium alloy[J]. Materials and Corrosion, 2015,66(10):1133-1139.
- [49] 刘文荣,胡怡宁,陈思宇,等.纳米TiN强化钛合金微观组织及耐腐蚀性能研究[J].表面技术,2025,54(8):126-135.
LIU Wenrong, HU Yining, CHEN Siyu, et al. Microstructure and corrosion resistance of titanium alloy reinforced with Nano-TiN[J]. Surface Technology, 2025,54(8):126-135.
- [50] Fan Z Z, Ren W B, Zuo W H, et al. Comparative study on the reinforcement effects of WC and TiC in the laser cladding layer of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025,134:589-602.
- [51] Zhang H J, Miao L, Han Y. The influence of SiC cermet on the microstructure and corrosion performance of titanium alloy components produced by arc additive manufacturing[J]. Advanced Engineering Materials, 2026,28(3):e202501932.
- [52] Li P, Cai Z B, Zhong X Y, et al. Laves phase tailored heterostructures for excellent tribocorrosion resistance in a laser cladding Ti-based composite coating[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026,42:8468-8482.
- [53] Hu L F, Li J, Lv Y H, et al. Corrosion behavior of laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V with different contents of TaC addition[J]. Rare Metals, 2020,39(4):436-447.
- [54] Chen H, Yu D T, Mao J T, et al. Microstructure and tribo-corrosion behavior of TC4 composites reinforced by in situ synthesized TiC ceramics particles through laser cladding[J]. Ceramics International, 2025,51(20 Part B):31719-31733.
- [55] Ren W B, Zuo W H, Fan Z Z, et al. Synergistic optimization of mechanical and corrosion properties of laser cladding layer on TC4 alloy for Marine applications via nano-WC and CeO_2 addition[J]. Materials Today Communications, 2025,48:113673.
- [56] Lv Y H, Li J, Tao Y F, et al. Oxidation behaviors of the Ti-Ni/ Ti_2Ni matrix composite coatings with different contents of TaC addition fabricated on Ti6Al4V by laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016,679:202-212.
- [57] Li J, Cui X F, Guan Y J, et al. Analysis of oxidation behavior of laser cladding SiC-Ti based composite strengthening coating[J]. Materials Characterization, 2023,204:113210.
- [58] Yin X Y, Liang J, Gao Y F, et al. Effects of LaB_6 on the high-temperature oxidation behavior of TiC+ TiB_x reinforced titanium matrix composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021,421:127445.
- [59] Feng Y Q, Feng K, Yao C W, et al. High temperature oxidation and wear resistance of in situ synthesized $(\text{Ti}_3\text{Al} + \text{TiB})/\text{Ti}$ composites by laser cladding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019,50(7):3414-3428.
- [60] Ye Z J, Li J, Ding R, et al. Microhardness, fracture and oxidation behavior of MoNbTiZr and Yttrium composite coatings on Ti6Al4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025,1048:185149.
- [61] Wang Y Y, Hao X H, Liu Y X, et al. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of in-situ synthesized Ti-Al-Si composite coating by laser cladding[J]. Physica Scripta, 2024,99(9):095306.
- [62] Niu J J, Liu X B, Xie X M, et al. Microstructure, tribological performance and oxidation behavior of laser cladding TiC/ Ni_3Ti reinforced MMC coatings[J]. Tribology International, 2026,213:111097.
- [63] 刘洪喜,陈菊,杨琛,等.激光熔覆原位自生Ti-Al-B功能涂层的结构特征及其高温抗氧化性能[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2024,49(3):42-54.
LIU Hongxi, CHEN Ju, YANG Chen, et al. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of In-situ Ti-Al-B functional coatings by laser cladding[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024,49(3):42-54.
- [64] Zhu L D, Xiao H Q, Ren L R, et al. Microstructural characteristics and high-temperature oxidation behavior of Ti-Al-N MAX phase composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2026,520:133043.

(编辑 王跃伟)