

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.010

冷喷涂技术在钛合金表面改性中的应用

杨海彧, 项嘉义, 姬寿长

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要:为探讨冷喷涂技术在钛合金表面改性中的应用效果,针对钛合金的表面高活性和难加工性的问题展开研究,对冷喷涂沉积工艺进行优化,并提出钛合金表面改性的新方案。阐述冷喷涂技术在钛合金涂层制备、性能提升以及复合技术方面的研究成果,并展望其未来发展方向。

关键词:冷喷涂;钛合金;表面改性;涂层

中图分类号:TG441.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0042-05

Application of Cold Spray Technology in Surface Modification of Titanium Alloys

YANG Haiyu, XIANG Jiayi, JI Shouchang

(Northwest Institute of Non-Ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: This review discusses the application of cold spray technology in the surface modification of titanium alloys, studies the high reactivity and processing difficulties of titanium alloy surface, optimizes the cold spray coating process, and proposes a new solution for surface modification of titanium alloys. The research progress in the preparation of coatings, performance enhancement, and composite technologies on titanium alloys using cold spray technology are elaborated and their future development directions are prospected as well.

Keywords: cold spraying; titanium alloys; surface modification; coating

0 引言

钛合金因其优异的力学性能、耐蚀性、生物相容性以及高温下的良好比强度而在航空航天、医疗和化工等领域得到了广泛应用^[1-3]。但是钛合金在大气中活性高,很容易形成一层致密氧化层,所以不能用常规的表面处理方法进行表面改性。常规表面改性手段目前主要有 PVD、激光、热喷涂、电镀等,但都不可避免对钛合金基材的性能造成影响,例如 PVD、激光以及热喷涂的高温会使钛合金晶粒增大,降低其力学性能,电镀会加大氢脆风险等。与前述相比,冷喷涂技术就有了优势^[4-7]。

1 冷喷涂技术概述

1.1 分类

喷涂作为一种新型的实用工程技术,目前尚无标准的分类方法。按照加热喷涂材料的热源种类,分为火焰喷涂、等离子喷涂、电弧喷涂、冷喷涂等。冷喷涂依靠高速气体将粉末粒子加速到超声

速,使粒子在完全固态下撞击基体表面,通过塑性变形形成涂层。冷喷涂的工作温度通常在室温至 600℃ 之间。冷喷涂相对其他喷涂类型,喷涂工作温度较低。与传统的其他热喷涂相比,冷喷涂技术的优势在于其低温过程,这有助于保持材料的原始微观结构和性能,同时减少了热影响区和热应力。冷喷涂技术的应用范围广泛,从航空航天领域的轻质高强度涂层到生物医学领域的植入物涂层。研究者们还在探索冷喷涂技术在增材制造领域的应用,例如通过逐层构建来生产复杂形状的零件^[8]。为了提高冷喷涂涂层的质量,可以对喷涂参数进行优化、改变喷嘴设计、选择不同的粉末材料以及后处理工艺。此外,冷喷涂技术与其他先进制造技术的结合,如激光辅助冷喷涂和等离子体辅助冷喷涂^[9-11],也在提高沉积效率和涂层性能方面显示出巨大潜力。

1.2 基本原理

冷喷涂过程中,粉末颗粒在撞击基体时不熔化,保持固态,避免了高温引起的材料退化、氧化和相变。粉末颗粒的高速撞击产生塑性变形,颗

基金项目:陕西省自然基金面上项目(2023-JC-YB-318)

第一作者简介:杨海彧(1984—),男,陕西西安人,高级工程师,硕士,研究方向为稀有金属的表面处理, yanghaiyu@c-nin.com。

粒与颗粒之间、颗粒与基体之间通过物理结合、化学结合以及部分冶金结合形成牢固的界面。由于喷涂过程中温度较低,涂层内部残余应力小,且主要为压应力,有利于涂层的附着和性能。

1.3 工艺流程

工艺流程为准备阶段—设备设置—喷涂过程—气体加热—粉末输送—颗粒加速—撞击沉积—后处理。

1.4 图示说明

冷喷涂设备通常包括气体压缩机、加热器、喷嘴、送粉器和控制系统,如图1所示。

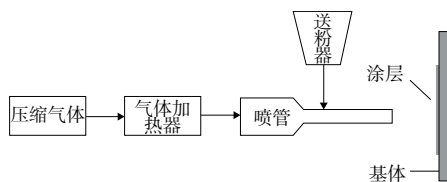


图1 冷喷涂原理示意图

图1展示了冷喷涂设备的主要组成部分及其相互连接方式。在实际应用中,这些组件会根据具体的喷涂需求和技术规格有所不同。喷涂过程中,粉末颗粒在喷嘴处被加速,形成高速气固双相流。颗粒撞击基体时,发生塑性变形,颗粒间和颗粒与基体间形成结合界面。沉积层逐渐增厚,形成所需的涂层或修复层。

2 影响冷喷涂效果的关键因素

2.1 载气压力

冷喷涂技术中,载气压力是一个关键的工艺参数。载气压力影响粉末颗粒的加速效果和飞行速度,进而影响涂层的致密度及相关性能^[12]。冷喷涂技术使用的载气通常是压缩空气或氮气,喷涂气体的压力通常在3 MPa~8 MPa,提高喷涂气体的压力可以增加粉末粒子的速度和变形能力,从而提高沉积效率和涂层质量。靳磊等^[13]发现相同气体温度条件下,采用氮气制备的涂层较氮气更加致密,涂层硬度更高,粉末利用率也更高。在实际应用中,载气压力的具体数值可能会根据所使用的设备、粉末材料、喷嘴设计以及其他工艺参数进行调整。通常,这些参数需要通过实验优化来确定,以达到最佳的喷涂效果。

2.2 喷涂速度

根据载气压力的不同,喷涂速度也不同。较高的气体压力可以产生更快的颗粒速度,从而提

高沉积效率和涂层的致密性。喷涂速度和送粉速率需要相匹配,以确保涂层的连续性和均匀性^[14]。石仲川等^[15]总结了冷喷涂中常见金属粉末颗粒的临界速度,如表1所示。

表1 不同金属粉末颗粒的临界速度

种类	临界速度/(m/s)
Cu	560~580
Ni	620~640
Fe	620~640
Al	680~700

冷喷涂过程中使用的载气压力达到一定的高压水平,就会产生超音速气流。马春春等^[16]提出载气加速微小颗粒形成超音速(300 m/s~1 200 m/s)气固双相流,使得喷涂温度更低、涂层对基体热影响小、送粉速度更快、涂层孔隙率显著减小。

2.3 载气温度

在冷喷涂增材制造中,载气温度是影响颗粒速度、颗粒温度和涂层质量的关键参数之一,精确控制气体温度对气体加热效率、沉积效率的稳定性以及涂层的微观结构具有重要意义。气体温度通常在室温至300℃之间,但某些情况下,为了提高喷涂效率和沉积质量,喷涂气体的温度可以提高到600℃。静态压痕实验表明,与块材比较,涂层平均显微硬度增加。胶粘拉伸试验表明,锌、铝结合强度较高,涂层本身的结合强度大于涂层与基体界面的结合强度^[17]。郑悠等^[18]采用ANSYS FLUENT建立数值模型,发现采用PID策略时,气体温度的稳定时间和过冲都有大幅优化,随着稳定时间和过冲率减小,对气体温度控制的精确度增加。气体温度的提高,其直接效果是气流速度的提高,对粉末粒子的加速效果也更好,同时减缓粉末粒子通过喷嘴喉部后的降温过程,保证较高的沉积温度^[19]。

2.4 喷嘴设计

冷喷涂喷嘴设计是冷喷涂技术中的关键组成部分,它直接影响到喷涂过程中金属颗粒的加速效果、涂层的均匀性和最终的沉积质量。冷喷涂喷嘴通常采用拉瓦尔(Laval)喷嘴设计^[20]。喷嘴设计包括喉部直径、扩张角度、喷嘴长度以及出口形状等^[21]。除了拉瓦尔喷嘴,还有圆形截面喷嘴、矩形截面喷嘴和椭圆形截面喷嘴等。王晓放

等^[22]通过对冷喷涂设流场的数值模拟,对比了不同喷嘴截面形状的流场特点,试验表明:制备面积较大的均匀涂层时应选用截面形状为矩形的喷嘴,性能更优。邢龙森等^[23]利用 CFD 软件优化计算,针对不同尺寸的喷嘴进行模拟计算并优化。当喉部直径一定,喷嘴的缩放比约为 4 时,喷嘴内外部气流速度平稳,无明显的激波产生,而较大的出口直径会产生明显的激波。

2.5 喷涂距离

冷喷涂喷涂距离是指喷嘴出口到被喷涂基体表面之间的距离。喷涂距离越短,颗粒撞击基体的速度越高,形成的涂层越致密。但如果距离过短,可能会导致基体过度加热或损伤。相反,喷涂距离过长可能会导致颗粒速度下降,影响涂层的形成和结合强度。这个距离需要根据喷涂材料和所需的涂层特性进行调整^[24]。喷涂距离根据喷涂粉末的不同,通常在 10 mm~50 mm 之间是较为合适的范围。

2.6 粉末特性

冷喷涂工艺中粉末材料的物理性能对成形质量具有一定的影响^[25],如粉末材料的粒度、形貌、氧含量等因素,冷喷涂工艺常用的粉末粒度范围为 5 μm ~45 μm 。粉末颗粒大小取决于喷涂条件、喷嘴规格和喷涂距离等多种因素。其次,粉末颗粒形貌是另一个关键因素。在低能量喷涂条件下,树枝状等不规则形态会导致孔隙率降低,而在高能量喷涂条件下,球形粉末会带来更强的效果。金属粉末的氧含量也对沉积效率产生一定的影响,低氧含量的粉末更容易沉积,粒子表面的薄氧化膜更容易形成强结合。

2.7 预处理

冷喷涂预处理是冷喷涂技术中的一个重要环节,它对提高涂层的性能和质量起着至关重要的作用,其包括基体预处理和粉末预处理。基体的清洁度、表面粗糙度及预热等都会影响涂层的结合强度和强度^[26],所以一般用新鲜表面,喷砂处理后待用。粉末预处理主要包括粉末预热、热处理以及烘干等^[27]。有时还可以通过机械混合、球磨法、造粒法和包覆法等方法制备复合粉末,在涂层中引入第二相,如陶瓷颗粒,以改善涂层耐磨性、耐腐蚀性等性能。

3 冷喷涂技术在钛合金性能提升中的应用

冷喷涂技术通过在钛合金表面沉积高性能涂

层,可以有效改善其耐磨性、抗疲劳性和生物相容性。

3.1 耐磨性

冷喷涂可以在钛合金表面沉积硬度较高的材料,如陶瓷颗粒或硬质合金,形成一层耐磨涂层。这种涂层能够抵抗磨损,延长钛合金部件的使用寿命。JIANG 等^[28]发现 Al/Al₂O₃ 复合涂层涂层的表面粗糙度可以达到 9.02 μm ,孔隙率达到 2.07%。邵若男等^[29]发现相较于 30% Al₂O₃-70% Ni 涂层,70% Al₂O₃-30% Ni 涂层的摩擦因数降低了 13%,磨损率降低了 66.7%。葛洁洁等^[30]发现与 Ti6Al4V 基体的磨损率(4.06 $\times 10^{-7}$ mm³/Nm)相比,Ti/WC 复合涂层的磨损率降低了一个数量级,表现出优异的耐磨性。冷喷涂技术在提升钛合金的耐磨性方面具有广泛的应用前景,尤其是在航空航天、医疗和高性能机械等领域。

3.2 抗疲劳性

冷喷涂涂层可以减少钛合金表面的应力集中,降低疲劳裂纹的萌生和扩展。此外,涂层的残余压应力状态有助于提高钛合金的疲劳强度^[31]。GHELICHI 等^[32]研究冷喷涂 Al5052 涂层发现,涂层的疲劳寿命与涂层的微观结构密切相关,优化的涂层结构可以提高材料的疲劳寿命。卜嘉利等^[33]发现在 740 MPa 和 840 MPa 应力水平下,试样疲劳寿命分别提升 4.5 倍与 7.5 倍。疲劳寿命提升归因于试样表层晶粒细化、高密度位错组织及残余压应力对疲劳裂纹萌生与扩展的抑制作用。

3.3 生物相容性

冷喷涂技术可以在钛合金表面沉积生物活性材料,如羟基磷灰石(HA)、钽(Ta)等,这些材料能够促进细胞附着和生长,提高植入体与宿主骨的结合^[34]。LIU 等^[35]讨论了冷喷涂技术在生物医学领域的应用,并指出了未来研究的方向。贾利等^[36]研究了 TC4 钛合金表面冷喷涂制备多孔 Ta 涂层的生物相容性,发现在 TC4 钛合金表面制备钽涂层后,钽涂层具有更好的防止血小板粘附与变形的性能。在细胞增殖实验中,细胞在钽涂层表面的增殖能力高于 TC4 钛合金。多孔钽涂层的弹性模量相对钽块降低了 22%。其生物活性高于 TC4 钛合金基体。李矛等^[37]对 Ta 涂层、Ti 涂层和 Ha 涂层的研究表明:Ta 涂层表面细胞黏附数量明显高于 Ti 涂层($P<0.05$),与 HA 涂层无统计学差异($P>0.05$),说明 Ta 涂层与 Ti 涂层

表面相比,更适合细胞的粘附和生长。冷喷涂技术有改善钛合金生物相容性方面的潜力。在医疗植入物等领域具有更广泛的应用前景。

4 冷喷涂复合技术对涂层性能的影响

冷喷涂复合技术将冷喷涂技术与其他加工技术相结合,旨在提高冷喷涂沉积体的塑性、强度、耐磨性等性能以及扩展冷喷涂的应用范围。以下是冷喷涂复合技术与其他加工技术结合的几个方面。

4.1 热处理

热处理可以提高涂层的硬度、强度和塑性,减少孔隙率,从而提高涂层的耐磨性和耐腐蚀性^[38]。对冷喷涂沉积体进行后续的热处理,可以改善涂层的微观结构,降低残余应力,提高涂层的力学性能。宁先进等^[39]发现经过 600℃ 以上热处理后,涂层与钛合金基体的相容性及其对涂层结合性能的提高,涂层内的 cBN 颗粒主要分布于镍粒子边界处,较大尺寸的 cBN (W14) 在涂层中分布更为均匀,涂层结合强度大于 82 MPa,涂层/基体界面处出现 Ti-Ni 金属间化合物。李文亚等^[40]对所制备多孔钛与钛合金块材进行热处理后发现,热处理态的气孔率代表了冷喷涂制备块材的实际气孔率,热处理后粒子间接触界面通过扩散达到冶金结合,多孔块材的结合强度均明显增加(超过 55 MPa)。冯立等^[41]以 Cu-Zn 混合粉末作为喷涂粉体,在不同退火温度下对复合涂层进行退火热处理,发现铜锌复合涂层结构致密,涂层与基体结合紧密;铜锌复合涂层在 200℃ ~ 300℃ 间退火时,涂层中金属颗粒间界面明显,涂层内部形成 β (CuZn)、 γ (Cu₅Zn₈) 等金属间化合物。退火温度为 200℃ 时,铜锌复合涂层的硬度 (HV (0.2)) 达到最高 (1 578 MPa),结合强度达到最低 (7.5 MPa);铜锌复合涂层在 350℃ ~ 450℃ 间退火时,涂层中金属颗粒间部分界面不明显;当退火温度为 450℃ 时,铜锌复合涂层硬度达到最低 (1 024 MPa),结合强度达到最高 (13.9 MPa)。

4.2 激光辅助处理

激光可以提高喷涂颗粒的温度和变形能力,从而提高涂层的沉积效率和致密度^[42]。激光辅助处理还可以改善涂层的界面结合,减少孔隙率,提高涂层的力学性能。刘博等^[43]等采用激光辅助低压冷喷涂技术在 Cu 基体上制备石墨/Cu 复

合涂层,石墨/Cu 复合涂层中颗粒之间结合良好,具有较好的致密性。CS-Cu 涂层的热导率和电导率分别从 66.2 W/(m·K) 和 7.12 MS/m 提升至 136.6 W/(m·K) 和 14.65 MS/m。涂层中添加质量分数 5% 的石墨时,复合涂层的热导率可进一步提升至 209.8 W/(m·K)。陈正涵等^[44]使用激光重熔加冷喷涂复合工艺在镍铝青铜 9442 合金上制备了 Cu₄O₂F 涂层,冷喷涂涂层厚度约为 300 μm,经过激光重熔后涂层使质量减少了 43.86%。36 d 后表面可以形成十分稳定并且具有一定厚度的钝化膜,耐海水腐蚀性能大幅提高。

4.3 搅拌摩擦处理

搅拌摩擦处理是一种固相焊接技术,冷喷涂可以作为搅拌摩擦处理的预处理步骤,通过在基板上沉积一层材料,可以改善搅拌摩擦处理过程中的材料流动和接头质量。冷喷涂层也可以作为焊接过程中的中间层,提高焊接接头的强度和耐腐蚀性^[45]。刘志浩等^[46]采用搅拌摩擦加工对冷喷涂 6061 铝合金涂层进行表面改性,改性后的 6061 铝合金涂层颗粒边界消失,缺陷基本消除,晶粒显著细化,平均晶粒尺寸为 3.1 μm,极限抗拉强度和伸长率分别上升 19% 和 1 730%。RALLS 等^[47]采用搅拌摩擦处理提高冷喷涂增材制造的 316L 不锈钢的耐微动腐蚀性能,降低孔隙率,提高了表面刚度,从而产生几乎全黏的微动状态。微动磨损轨迹内存在大量的镍,降低了表面加速腐蚀的倾向。搅拌摩擦处理实现的原子相变化也有助于提高耐微动腐蚀性能。

5 结语

冷喷涂技术的研究有助于推动钛合金材料的加工和应用技术的发展,特别是在提高涂层性能和降低加工成本方面。通过研究冷喷涂与钛合金的结合,可以更好地理解涂层与基底之间的结合机制,为设计更高性能的涂层提供理论基础。冷喷涂技术的研究还可以促进跨学科领域的合作,如材料科学、机械工程和表面工程,推动新技术和新材料的开发。钛合金与冷喷涂结合的研究不仅具有重要的工业应用价值,而且对于推动相关领域的科技进步和创新具有深远的意义。随着技术的不断发展和优化,这种结合将在更多领域展现出其巨大的潜力。冷喷涂技术在钛合金表面改性中的应用展现出巨大潜力。未来的研究将继续探索冷喷涂技术的新应用以及如何克服当前的挑战。

冷喷涂过程中的工艺参数,如气体压力、温度、喷涂速度等,对涂层质量有显著影响,通过优化工艺参数,可以提升钛合金的性能,扩大钛合金的应用领域和场景。冷喷涂技术还需要针对不同的沉积材料特性进行优化,以确保涂层与钛合金基材之间的良好结合。对于某些特殊材料,如高温合金、复合材料等,实现高质量的冷喷涂沉积仍然是一个挑战。

参考文献:

- [1] 张绪虎,单群,陈永来,等.钛合金在航天飞行器上的应用和发展[J].中国材料进展,2011,30(6):28-32,63.
- [2] 黄旭.航空用钛合金发展概述[J].军民两用技术与产品,2012(7):12-14,8.
- [3] 宣宏林.激光冲击强化钛合金材料数值模拟[J].机械制造与自动化,2023,52(6):116-118.
- [4] CESCINI L. TiN, (Ti, Al)N and CrN/NbN coatings on Ti-6Al-4V by PVD: microstructure, mechanical and tribological properties [J]. Surface and Coatings Technology, 2011,205(14):3948-3955.
- [5] GRÖGLER M. Diamond-like carbon coatings on titanium alloys by CVD [J]. Diamond and Related Materials, 1998,7(2/3/4/5):1000-1003.
- [6] HUANG J Q, MA J, WU L, et al. Microstructure and wear resistance of WS₂/W composite coating on TC4 titanium alloy surface [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,1885(3):032046.
- [7] SUN R L, LEI Y W, NIU W. Laser clad TiC reinforced NiCrBSi composite coatings on Ti - 6Al - 4V alloy using a CW CO₂ laser [J]. Surface and Coatings Technology, 2009,203(10/11):1395-1399.
- [8] 熊天英,王吉强.中国科学院金属研究所冷喷涂技术研究进展[J].金属学报,2023,59(4):537-546.
- [9] 黄煊杰,吴丽娟,李波,等.超音速激光沉积 WC/Cu 复合涂层的微观结构及耐磨性能表征[J].机械工程学报,2020,56(10):78-85.
- [10] 姚建华,吴丽娟,李波,等.超音速激光沉积技术:研究现状及发展趋势[J].中国激光,2019,46(3):9-19.
- [11] 刘吉宇,张帆,陈阳,等.低温等离子体辅助加工综述[J].航空学报,2021,42(10):524754.
- [12] PAPRYIN A. Cold spray technology [J]. Advanced Materials & Processes, 2001,159(9):49-51.
- [13] 靳磊,彭徽,李文亚,等.冷喷涂工艺参数对 TC4 涂层性能的影响[J].宇航材料工艺,2018,48(1):62-66.
- [14] LI W Y, CAO C C, YIN S. Solid-state cold spraying of Ti and its alloys: a literature review [J]. Progress in Materials Science, 2020,110:100633.
- [15] 石仲川,刘德鑫,张晓云,等.冷喷涂技术的研究现状及在航空工业领域内的应用[J].材料导报,2012,26(17):70-74.
- [16] 马春春,于月光,章德铭,等.高压冷喷涂技术特点及应用概述[J].热喷涂技术,2020,12(2):11-16.
- [17] 王佳杰.冷喷涂工艺及涂层性能研究(D).哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [18] 郑悠,方丹丹,高建红,等.基于 PID 控制的冷喷涂气体温度精确控制研究[J].材料保护,2023,56(6):123-127,136.
- [19] ASSADI H, KREYE H, GÄRTNER F, et al. Cold spraying - a materials perspective [J]. Acta Materialia, 2016,116:382-407.
- [20] 易灿,李根生.喷嘴结构对高压射流特性影响研究[J].石油钻采工艺,2005,27(1):16-19,80.
- [21] MORIDI A, HASSANI-GANGARAJ S M, GUAGLIANO M, et al. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives [J]. Surface Engineering, 2014,30(6):369-395.
- [22] 王晓放,李芳,赵爱娃,等.喷嘴出口截面形状对冷喷涂涂层性能影响的数值分析[J].机械工程材料,2006,30(12):84-86.
- [23] 邢龙森,郭学平,朱海彬.基于 FLUENT 的冷喷涂 Laval 喷嘴优化设计[J].造船技术,2017,45(5):80-84.
- [24] YIN S, CAVALIERE P, ALDWELL B, et al. Cold spray additive manufacturing and repair: fundamentals and applications [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 628-650.
- [25] HUANG R, FUKANUMA H. Future trends in cold spray techniques [M]//Future Development of Thermal Spray Coatings. Amsterdam: Elsevier, 2015:143-162.
- [26] LIENHARD J, CROOK C, AZAR M Z, et al. Surface oxide and hydroxide effects on aluminum microparticle impact bonding [J]. Acta Materialia, 2020,197:28-39.
- [27] 黄春杰,殷硕,李文亚,等.冷喷涂技术及其系统的研究现状与展望[J].表面技术,2021,50(7):1-23.
- [28] JIANG W, SHEN X, WANG Z Y, et al. Effect of Al₂O₃ on microstructure and corrosion characteristics of Al/Al₂O₃ composite coatings prepared by cold spraying [J]. Metals, 2024,14(2):179.
- [29] 邵若男,贺甜甜,杜三明,等.铝合金表面 Al₂O₃-Ni 涂层的制备及耐磨性研究 [J]. 表面技术, 2020, 49(4):173-179.
- [30] 葛洁洁,徐雅欣,李文亚.冷喷涂 Ti/WC 复合涂层的组织与耐磨性研究[J].中国材料进展,2024,43(2):96-101,123.
- [31] GÄRTNER F, STOLTENHOFF T, VOYER J, et al. Mechanical properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2006,200(24):6770-6782.

(下转第 62 页)

- parameter on void content of glass fibre composite laminate[J]. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2022, 53(3): 308-315.
- [4] 刘津廷,董志刚,康仁科,等. 石英纤维增强聚酰亚胺材料超声辅助磨削[C]//第16届全国特种加工学术会议论文集(下). 厦门:中国机械工程学会特种加工分会, 2015, 457-461.
- [5] 宋宇翔,袁向东,林雨斌,等. 硬质合金刀具铣削 GFRP 材料加工特性的研究[J]. *林业机械与木工设备*, 2023, 51(2): 43-49.
- [6] 孙雷. 石英纤维增强聚酰亚胺超声辅助磨削技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [7] KAVIMANI V, GOPAL P M, STALIN B, et al. Influence of reduced graphene oxide addition on kerf width in abrasive water jet machining of nanofiller added epoxy-glass fibre composite [J]. *PLoS One*, 2022, 17(8): e0270505.
- [8] 汪长松. 玻璃纤维增强复合材料激光切割工艺研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2021.
- [9] MANNA A, NARANG V. An experimental investigation during micro machining of E-glass-fibre-epoxy composite on developed electrochemical spark machining setup [J]. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 2012, 2(2): 46-60.
- [10] 舒磊. 碳纤维增强复合材料低温铣削基础试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- [11] RICE B, QUINZI J, LUND L, et al. Measurement of Young's modulus and damping of fibers at cryogenic temperatures[J]. *Cryogenics*, 2014, 63: 43-48.
- [12] ZHANG Y H, FU S Y, LI R K Y, et al. Investigation of polyimide-mica hybrid films for cryogenic applications[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(11/12): 1743-1748.
- [13] ZHANG Y H, LI Y, FU S Y, et al. Synthesis and cryogenic properties of polyimide-silica hybrid films by sol-gel process [J]. *Polymer*, 2005, 46(19): 8373-8378.

收稿日期: 2023-05-22

(上接第 46 页)

- [32] GHELICHI R, MACDONALD D, BAGHERIFARD S, et al. Microstructure and fatigue behavior of cold spray coated Al5052 [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(19): 6555-6561.
- [33] 卜嘉利,吕扬,刘博志,等. 不同喷丸强度对 TC17 钛合金抗疲劳性能影响[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(6): 1225-1233.
- [34] 粟志伟,周艳文,郭诚,等. 冷喷涂 Cu(Ag) 涂层对 TB10 钛合金的生物污损防护[J]. *材料保护*, 2022, 55(9): 1-9.
- [35] LIU Y, SUO X K, HUANG J, et al. A review of cold sprayed coatings for biological applications[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(9): 25-31.
- [36] 贾利,崔焱,刘光,等. 冷喷涂制备多孔 Ta 涂层及生物相容性[J]. *表面技术*, 2024, 53(8): 184-190.
- [37] 李矛,段永宏,尹大宇,等. 等离子喷涂钽涂层人工假体生物相容性研究[J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(4): 320-324.
- [38] LI W, CHEN L, YU M, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of cold sprayed iron coating [J]. *China Surface Engineering*, 2010, 5372(10): 60130.
- [39] 宁先进,王全胜,杨晋智,等. 冷喷涂 Ni-cBN 防钛火涂层及其摩擦磨损性能[J]. *新技术新工艺*, 2018(4): 11-14.
- [40] 李文亚, CODDET C. 基于冷喷涂的多孔钛与钛合金的制备与表征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(增刊3): 260-263.
- [41] 冯力,王雄,安国升,等. 退火热处理对低压冷喷涂 Cu-Zn 复合涂层性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(7): 2444-2450.
- [42] 杨理京,李争显,黄春良,等. 激光辅助冷喷涂制备高硬度材料涂层的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(3): 412-417, 426.
- [43] 刘博,邹洪森,田凯,等. 激光辅助低压冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的微观特性及导热/导电性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 206-212.
- [44] 陈正涵,孙晓峰,李占明,等. 激光重熔与冷喷涂复合工艺制备的镍铝青铜基涂层耐腐蚀性能研究[J]. *表面工程与再制造*, 2017, 17(5): 23-27.
- [45] JI G, LIU H, YANG G J, et al. Effect of friction stir spot processing on microstructure and mechanical properties of cold-sprayed Al coating on Ti substrate[J]. *Surface and coatings Technology*, 2021: 127352.
- [46] 刘志浩,王文,韩鹏,等. 搅拌摩擦加工改性冷喷涂 6061 铝合金涂层的断裂行为[J]. *塑性工程学报*, 2023, 30(3): 190-196.
- [47] RALLS A M, MENEZES P L. Revealing the fretting corrosion degradation mechanisms of friction stir processed cold spray additively manufactured stainless steel [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130(5): 2855-2876.

收稿日期: 2024-08-30