

引用格式:刘妍汝,范吉林,张远应,等.冷喷涂工艺参数对CuNiIn涂层显微组织及微动磨损性能的影响[J].材料工程,2026,54(2):277-284.

LIU Yanru, FAN Jilin, ZHANG Yuanying, et al. Effect of cold sprayed processing parameters on microstructure and fretting wear performance of CuNiIn coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(2): 277-284.

冷喷涂工艺参数对CuNiIn涂层显微组织及微动磨损性能的影响

刘妍汝¹, 范吉林², 张远应³, 徐濯清³, 马鑫³, 刘若愚³,
黄春杰¹, 徐雅欣¹, 李文亚^{1*}

(1 西北工业大学 陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072; 2 长沙五七一二飞机工业有限责任公司, 长沙 410113; 3 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘要:采用冷喷涂技术在TC4钛合金表面制备CuNiIn涂层,研究气体种类(氦气、氮气)及气体预热温度(500、700℃)对涂层显微组织、显微硬度、结合强度及微动磨损性能的影响。结果表明:在相同气体预热温度下,氦气喷涂涂层的孔隙率低于氮气喷涂,显微硬度、结合强度及耐磨性均优于氮气喷涂。气体预热温度由500℃升高至700℃,两种气体喷涂涂层的孔隙率均显著降低(氦气:1.4%降至0.05%,氮气:1.7%降至0.5%);氦气喷涂涂层硬度由213HV增至292HV,而氮气喷涂涂层硬度由275HV降至237HV;气体预热温度升高对涂层结合强度的影响并不显著,但气体种类对涂层结合强度有显著影响,氦气喷涂涂层的平均结合强度(70 MPa)较氮气喷涂涂层(40 MPa)提高30 MPa;磨损率随气体预热温度升高而降低(氦气:1.8%降至1.41%,氮气:2.21%降至1.51%)。随微动位移幅值的增加,优化参数下的涂层磨损形式由黏着磨损过渡为磨粒磨损。

关键词:冷喷涂;CuNiIn涂层;工艺参数;微观组织;显微硬度;结合强度;微动磨损

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000060 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000060

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)02-0277-08

Effect of cold sprayed processing parameters on microstructure and fretting wear performance of CuNiIn coating

LIU Yanru¹, FAN Jilin², ZHANG Yuanying³, XU Zhuoqing³, MA Xin³, LIU Ruoyu³,
HUANG Chunjie¹, XU Yaxin¹, LI Wenya^{1*}

(1 Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2 Changsha 5712 Aircraft Industry Co., Ltd., Changsha 410113, China; 3 AECC South Industry Company Limited, Zhuzhou 412002, Hunan, China)

Abstract: CuNiIn coatings are prepared on the surface of TC4 titanium alloy using cold spray technology, and the effects of gas types (helium, nitrogen) and preheating temperatures (500, 700 °C) on the microstructure, microhardness, bonding strength, and gas fretting wear performance of the coatings are investigated. The results show that under the same gas preheating temperature, the porosity of coatings sprayed with helium is lower than that of coatings sprayed with nitrogen, and microhardness, bonding strength, and wear resistance are all superior to those of coatings sprayed with nitrogen. When the gas preheating temperature increases from 500 °C to 700 °C, the porosity of the coatings sprayed with both gases decreases significantly (helium: from 1.4% to 0.05%, nitrogen: from 1.7% to 0.5%). The hardness of coatings sprayed with helium increases from 213HV to 292HV, while that of coatings sprayed with nitrogen decreases from 275HV to 237HV. The increase in gas preheating temperature has no significant effect on the bonding strength of the coatings, but the type of gas has a significant effect on the bonding

strength of the coatings, the average bonding strength of sprayed coatings with helium (70 MPa) is 30 MPa higher than that of sprayed coatings with nitrogen (40 MPa). The wear rate of coatings sprayed with helium and coatings sprayed with nitrogen decreases with the increase of gas preheating temperature (helium: from 1.8% to 1.41%, nitrogen: from 2.21% to 1.51%). With the increase of fretting displacement amplitude, the wear form of the coatings under optimized parameters changes from adhesive wear to abrasive wear.

Key words: cold spraying; CuNiIn coating; process parameter; microstructure; microhardness; bonding strength; fretting wear

钛及钛合金因具备较高的比强度、良好的耐腐蚀性及热稳定性等优势,被广泛应用于航空航天、海洋及化工等结构件^[1]。其中TC4钛合金被广泛用于航空发动机的叶盘和叶片的制造^[2-3]。在发动机的服役过程中,榫头与榫槽连接处产生的微米级相对滑动($<200\ \mu\text{m}$)会引发微动磨损,造成的裂纹萌生导致叶片过早断裂失效^[4-5]。研究表明,航空结构破坏中约有90%的损伤与微动损伤有关^[6],其中航空发动机榫头与榫槽连接处的微动损伤占航空发动机故障的20%^[7]。因此,提高钛合金的微动损伤性能已成为提升航空发动机可靠性的一个重要研究方向,解决这一问题对国民经济和国防安全具有深远的意义。铜镍铟(CuNiIn)涂层作为一种典型固体润滑涂层,因具有较低的硬度、良好的耐腐蚀性和抗高温性能等特点,常被用作航空发动机抗微动磨损涂层^[8-13]。传统热喷涂方法如大气等离子喷涂(air plasma spraying, APS)、超音速火焰喷涂(high velocity oxygen fuel spraying, HVOF)、电弧喷涂(arc spraying, AS)等^[14-16]虽能有效制备CuNiIn涂层,但高温熔融过程会导致基体热损伤,影响叶片的固有性能。为解决这一问题,需要对其进行封胶等保护措施,这就造成了企业成本的增加。因此,探索一种经济高效且不损害叶片性能的CuNiIn涂层制备方法显得尤为重要。相较于热喷涂,冷喷涂通过固态粒子高速撞击实现沉积,避免了相变与氧化等热影响问题^[17]。冷喷涂技术能够在大气环境下实现无氧化涂层的快速沉积,在航空修复领域展现出独特的优势,这一特性使其在高质量涂层制备、零件修复、增材制造等领域具有巨大的应用潜力^[18-21]。在冷喷涂制备CuNiIn涂层的研究中, Li等^[22]发现,采用冷喷涂技术制备的CuNiIn涂层孔隙率显著低于热喷涂工艺制备的涂层,初步证实了冷喷涂技术制备CuNiIn涂层的可行性。李海升等^[23]通过参数优化(氮气、500℃/3 MPa的喷涂条件)制备出孔隙率仅2.8%的CuNiIn涂层,这一结果不仅进一步验证了冷喷涂技术在控制涂层孔隙率方面的优越性,而且展示了通过精确控制工艺参数来优化涂层性能的可能性。此外,该研究还观察到涂层在不同微动位移下的磨损行为,为

理解涂层的微动磨损机制提供了实验数据。然而关于详细的冷喷涂工艺参数对CuNiIn涂层组织性能及微动磨损性能的影响鲜见报道。

本工作探讨冷喷涂工艺参数(包括气体种类和气体预热温度)对CuNiIn涂层显微组织、显微硬度、结合强度及微动磨损性能的影响,对比分析不同工艺参数下CuNiIn涂层的性能差异,为抗微动磨损涂层的设计与应用提供重要理论和实验依据,以期推动冷喷涂技术在航空发动机等关键部件防护涂层领域的应用。

1 实验材料与方法

1.1 冷喷涂实验

本工作选择2 mm厚Ti-6Al-4V(TC4)钛合金板为基体材料,冷喷涂所用粉末为Amdry 500F CuNiIn粉。CuNiIn粉末形貌及粒径分布如图1所示,可以看出粉末球形度较高。图1(c)为粉末颗粒经5 mL FeCl_3 +10 mL HCl +100 mL H_2O 腐蚀液腐蚀后的截面形貌,可知粉末内部主要以细小的树枝晶为主。图1(d)为采用Winner2000ZDE激光粒度仪测试的粉末粒径分布结果。冷喷涂实验在西北工业大学自主搭建的冷喷涂系统上完成。喷枪固定于冷喷涂系统平台,将基板夹持在ABB机械手端,通过机械臂的移动设置喷涂路径。借鉴课题组前期的研究结果^[23],分别使用氮气和氦气两种加速气体进行冷喷涂实验,气体预热温度分别为500℃与700℃,气体压力选择送粉器可用的最高压力4 MPa,喷涂过程中喷枪与基体的距离为20 mm,基板的移动速度为100 mm/s,送粉器的送粉速率为1 r/min。进行冷喷涂前,使用酒精对基板进行超声清洗,并采用60目的刚玉砂砾对基板进行喷砂处理,以去除表面氧化膜和活化表面。

1.2 涂层组织与性能表征

使用电火花线切割对制备的CuNiIn涂层截取横截面,经镶嵌、研磨、抛光后用Keyence VHX-5000光学显微镜(OM)观察涂层的宏观和微观组织形貌以及涂层与基体界面的结合情况;使用Image-Pro图像处

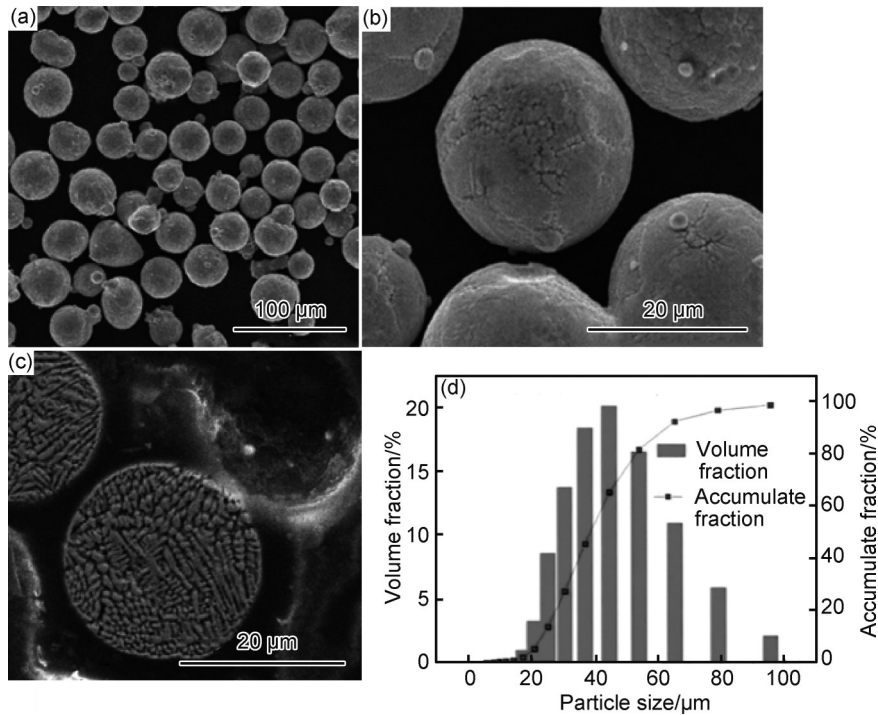


图1 CuNiIn粉末形貌及粒径分布

(a)低倍SEM图;(b)高倍SEM图;(c)高倍截面SEM图;(d)粒径分布

Fig.1 Morphologies and particle size distribution of CuNiIn powder

(a)low-magnification SEM image;(b)high-magnification SEM image;

(c)high-magnification cross-sectional SEM image;(d)particle size distribution

理软件对涂层的孔隙率进行统计分析,取平均值为涂层整体孔隙率测量值;使用Leco-AMH43显微硬度计,对涂层的显微硬度进行测量,载荷为5 N,保压时间为15 s。在涂层靠近基体的位置取平行于界面的直线,在直线上均匀选取10个点进行测量,沿厚度方向每隔100 μm 取1条直线,共取3条直线,最后根据测量值计算涂层平均硬度。

使用GB/T 8642—2002涂层结合强度测试方法进行涂层结合强度测定。将基体试样加工成尾部带有内螺纹的短棒状,使用E-7高温结构胶粘接涂层试样和没有涂层的对偶试样,将高温结构胶的A、B两种组分按质量比10:1混合,均匀涂抹在涂层试样与对偶试样之间,在120 $^{\circ}\text{C}$ 下保温120 min即可完成固化。固化后E-7胶的结合强度可达70 MPa,能够满足本实验对涂层与基体结合强度测试的要求。将粘接好的试样固定在万能电子拉伸试验机两端开始拉伸,观察拉伸试样断裂后的位置,判断涂层的结合强度大小。每组参数选取3个试样进行测量,取结合强度测量值的平均值作为该参数下涂层与基体的结合强度。

微动磨损实验使用MFC-01多功能微动磨损试验机,接触方式为球/平面,摩擦副为直径10 mm的TC4

球体,实验参数为:室温,径向载荷100 N,频率10 Hz,微动位移幅值分别为50、100、150 μm ,时长120 min。为确保实验条件下试块状态尽可能接近钛合金零件服役时的光滑无杂质状态,对试块进行打磨,并采用1.5 μm 金刚石抛光膏抛光。实验前,将试样置于无水乙醇中超声清洗处理5 min,以去除表面油污及杂质;磨损实验后,重复上述清洗步骤,确保磨屑及残留物彻底清除。使用激光共聚焦显微镜对磨痕轮廓形貌及深度进行观察测量。

2 结果与分析

2.1 CuNiIn涂层显微组织

图2为以氮气和氩气为工作气体时,不同气体预热温度下冷喷涂CuNiIn涂层的横截面组织形貌。可见以氮气为工作气体时,500 $^{\circ}\text{C}$ 条件下制备的涂层组织致密但不均匀,靠近表面处有明显的孔隙,涂层内部更致密,表面呈现多孔特性。随着气体预热温度从500 $^{\circ}\text{C}$ 升高到700 $^{\circ}\text{C}$,两种气体制备的涂层与基体之间界面处的结合弱区显著减少,涂层孔隙率从表面到基体界面呈逐渐下降的趋势,这是由于后续沉积颗粒对已沉积涂层表面的夯实作用所致^[24]。对制备的

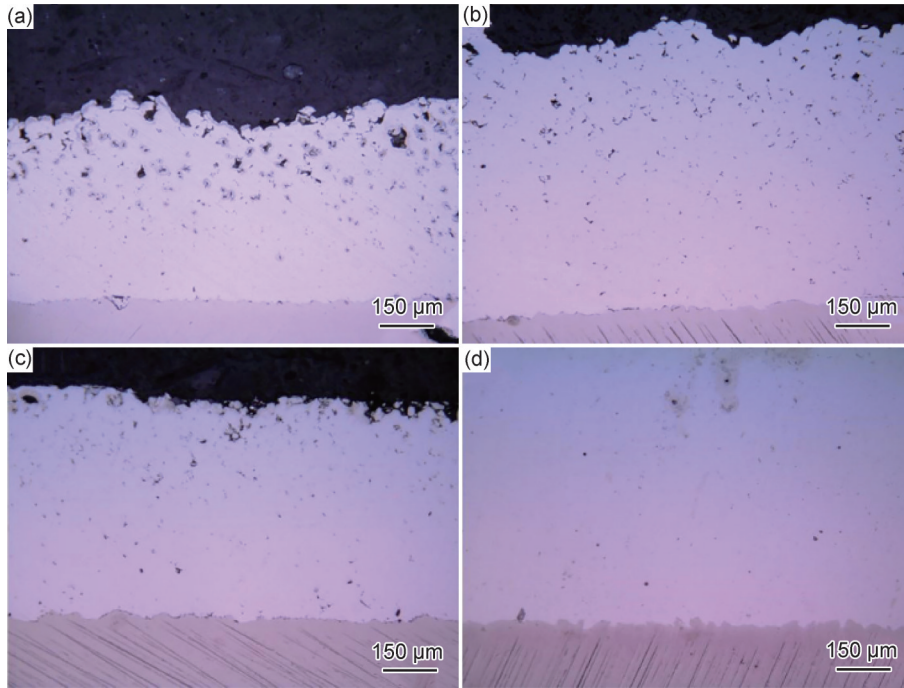


图2 不同参数下冷喷涂CuNiIn涂层截面OM微观形貌
(a)N₂-500 °C;(b)N₂-700 °C;(c)He-500 °C;(d)He-700 °C

Fig.2 Cross sectional OM micrographs of cold sprayed CuNiIn coatings with different process parameters
(a)N₂-500 °C;(b)N₂-700 °C;(c)He-500 °C;(d)He-700 °C

CuNiIn涂层孔隙率进行统计分析,发现同等参数下氦气制备的涂层孔隙率显著低于氮气制备的涂层;随气体预热温度的升高,两种气体制备的涂层孔隙率均下降,如图3所示。

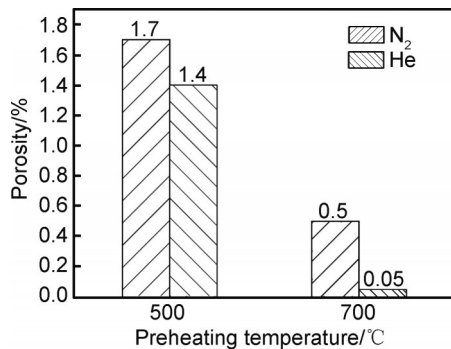


图3 不同参数下冷喷涂CuNiIn涂层孔隙率
Fig.3 Porosity of cold sprayed CuNiIn coatings with different process parameters

同等参数下氦气与氮气制备涂层的差别,主要是因为氦气在同等条件下具有更高的流动速度。根据空气动力学原理^[25],喷嘴内某点的气体流动速度V_g为:

$$V_g = Ma \sqrt{\frac{\gamma RT}{W}} \quad (1)$$

式中:Ma为马赫数;γ为气体比热容比;R为通用气体

常数;T为气体温度;W为分子量。氦气与氮气的比热比分别为1.66和1.40,分子量分别为4和28,因此同等条件下氦气流动速度高于氮气,可使粉末颗粒获得更高的运动速度,沉积效果更佳。

2.2 CuNiIn涂层显微硬度

氦气和氮气在不同气体预热温度下冷喷涂制备的CuNiIn涂层显微硬度如图4所示。可见,500 °C时,氦气制备涂层的显微硬度为213HV,氮气制备涂层的显微硬度为275HV。500 °C时氦气制备涂层的显微硬度低于氮气制备的涂层,因为500 °C时喷涂颗粒的速度和气体预热温度较低,氮气的沉积效率显著低于氦气,导致反弹颗粒的冲击夯实效应明显增加,故氮气

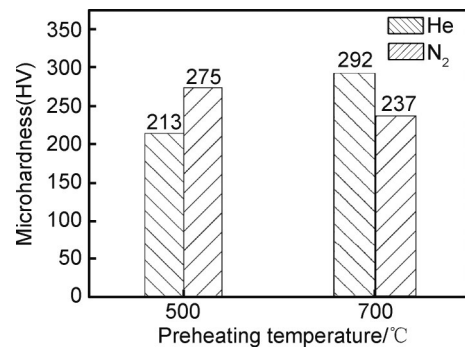


图4 不同参数下冷喷涂CuNiIn涂层显微硬度
Fig.4 Microhardness of cold sprayed CuNiIn coatings with different process parameters

制备涂层的显微硬度大于氦气。700 °C 时, 氦气制备涂层的显微硬度为 292HV, 氮气制备涂层的显微硬度为 237HV。气体预热温度升高使氮气条件下喷涂颗粒的速度和温度均提高, 沉积效率显著增加, 反弹颗粒的冲击夯实效应显著减弱。此外, 气体预热温度升高会导致喷涂颗粒热软化, 其热软化作用抵消部分加工硬化效应, 导致氮气制备的涂层硬度下降。

2.3 CuNiIn 涂层与基体的结合强度

图 5 为不同气体预热温度下使用氮气和氦气制备的涂层与基体的结合强度。可见温度对涂层与基体的结合强度影响并不明显, 但在相同的喷涂参数下, 使用氦气相较于氮气喷涂时结合强度显著增大。图 6 为氦气条件下不同气体预热温度制备的涂层拉伸试样宏观断口形貌。可以看出, 涂层拉伸断裂位置均位于胶层之间, 表明涂层与基体之间的结合强度优于胶层的断裂强度, 胶体断裂强度约为 70 MPa。

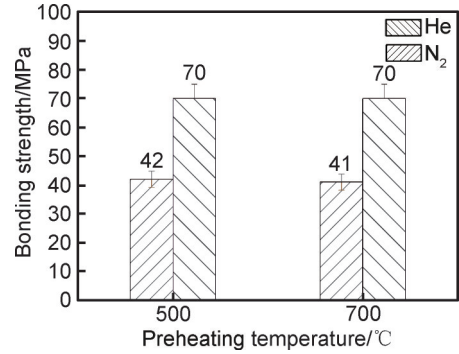


图 5 不同参数下冷喷涂 CuNiIn 涂层与基体结合强度

Fig.5 Bonding strength of cold sprayed CuNiIn coatings to substrates with different process parameters

因此, 500 °C 和 700 °C 下氦气制备的涂层结合强度均大于 70 MPa。若要测试涂层与基体的真实结合强度, 需采用结合性能更优的胶黏材料进行拉伸实验。

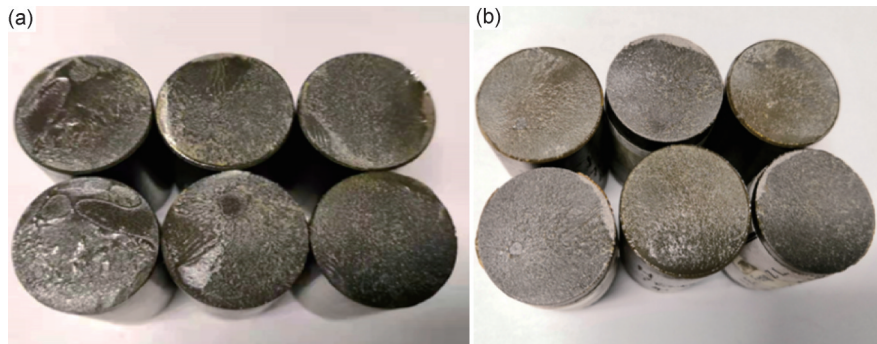


图 6 氦气条件下冷喷涂 CuNiIn 涂层拉伸试样宏观断口照片

(a)500 °C; (b)700 °C

Fig.6 Macroscopic fracture photos of cold sprayed CuNiIn coatings after tensile test under He condition

(a)500 °C; (b)700 °C

2.4 CuNiIn 涂层微动磨损性能

图 7 为氮气和氦气制备的 CuNiIn 涂层的微动磨损率。可见随气体预热温度升高, 两种气体制备的涂层磨损率均下降, 相同参数下氦气制备的涂层磨损率

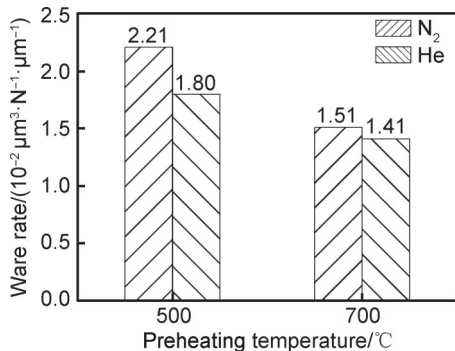


图 7 不同参数下冷喷涂 CuNiIn 涂层磨损率

Fig.7 Wear rate of cold sprayed CuNiIn coatings with different process parameters

低于氮气制备的涂层。700 °C 下采用氦气制备的 CuNiIn 涂层, 其孔隙率、显微硬度及结合强度均显著提升, 更有利于涂层抵御微动磨损, 选择此优化参数下制备的涂层进行微动磨损分析。摩擦因数 (coefficient of friction, COF) 是反映磨损过程的重要指标之一。图 8 为氦气条件下制备的涂层 COF 随微动位移幅值 D 的变化曲线。可知, 随着微动位移幅值的增大, 涂层的 COF 逐渐升高。 $D=50 \mu\text{m}$ 时, 涂层的 COF 为 0.42, 曲线平直几乎无波动, 表明涂层的微动磨损状态为部分滑移, 只经历微弱的黏着磨损, 此时涂层通过接触表面的塑性变形抵抗微动载荷。 $D=100 \mu\text{m}$ 时, 涂层的 COF 升高至 0.83, 曲线仍处于较为稳定的直线状态, 涂层对载荷的塑性变形协调能力有限, 接触表面微凸体的机械阻碍作用增加使得 COF 增大。机械阻碍作用是由接触表面微凸体塑性变形引

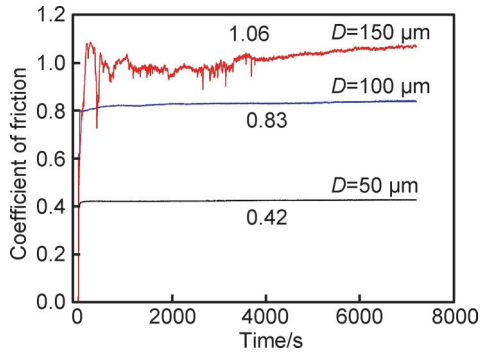


图8 氦气条件下冷喷涂 CuNiIn 涂层在不同微动位移幅值下的摩擦因数曲线

Fig.8 COF curves of cold sprayed CuNiIn coatings under He conditions at different fretting displacement amplitudes

起的,是导致接触表面发生破坏的重要因素。 $D=150\ \mu\text{m}$ 时,涂层的微动磨损处于完全滑移状态,COF 出现明显峰值,这是因为涂层表面的氧化膜在载荷作用下发生破碎,露出新鲜金属表面后出现黏着点,此时摩擦本体之间的分子吸附作用仍是 COF 的主要来源^[26]。随磨损进行,材料表面黏着点增加,黏着点饱和时 COF 达到峰值。随后接触部位的黏着点在持续摩擦作用下发生加工硬化形成硬化层,黏着点被破坏,COF 开始降低,硬化层产生应力集中,对微动载荷承受能力较弱,容易破碎形成磨屑。磨屑作为第三体,改变摩擦本体的接触形式,使 COF 急剧降低。然而,磨屑在持续摩擦作用下又发生进一步破碎、细化并溢出磨损区域,磨损区域从中心向四周蔓延,直至磨屑的产生与溢出达到动态平衡,COF 变化也进入动态稳定阶段,COF 稳定在 1.06。该条件下涂层摩擦因数波动时间较长,表明涂层进入磨屑动态稳定阶段的时间较长,抵抗磨损能力较强,磨损区域需要更长时间才能蔓延至整个位移覆盖区域。

图 9 为氦气条件下冷喷涂 CuNiIn 涂层在不同微动位移幅值下的 XRD 谱图。可见所有样品的特征峰相同,表明不同微动位移幅值下涂层的物相结构一致,未发生显著变化,具有良好的结构稳定性。

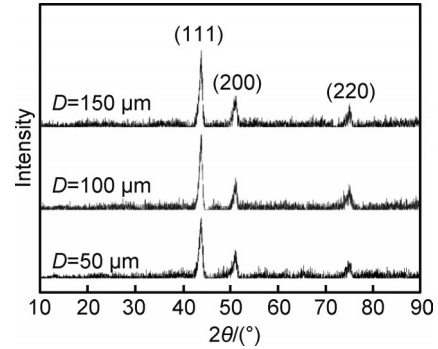


图9 氦气条件下冷喷涂 CuNiIn 涂层在不同微动位移幅值下的 XRD 谱图

Fig.9 XRD patterns of cold sprayed CuNiIn coatings under He conditions at different fretting displacement amplitudes

图 10 为氦气条件下不同微动位移幅值下磨痕三维形貌。可见同一参数条件下制备的涂层,随着微动位移幅值的增大,磨痕轮廓由不规则的椭圆形逐渐过渡为规则的圆形,这是不同微动位移幅值对涂层磨损形式影响的结果。 $D=50\ \mu\text{m}$ 时,涂层主要表现为黏着磨损,磨痕最深不足 $2\ \mu\text{m}$,抗磨损性能较好,磨痕高度变化较为均匀,说明涂层对微动载荷的变形调节能力较强。 $D=100\ \mu\text{m}$ 时,磨屑堆积形成的凸起位于磨痕中心,涂层中心黏着磨损较严重,靠近磨痕边缘则磨粒磨损较严重,磨屑产生较多,并在微动碾压作用下不断细化溢出。 $D=150\ \mu\text{m}$ 时,涂层磨痕仍表现为中心区域因黏着作用产生磨屑堆积,边缘处因磨粒磨损导致涂层破坏较严重。

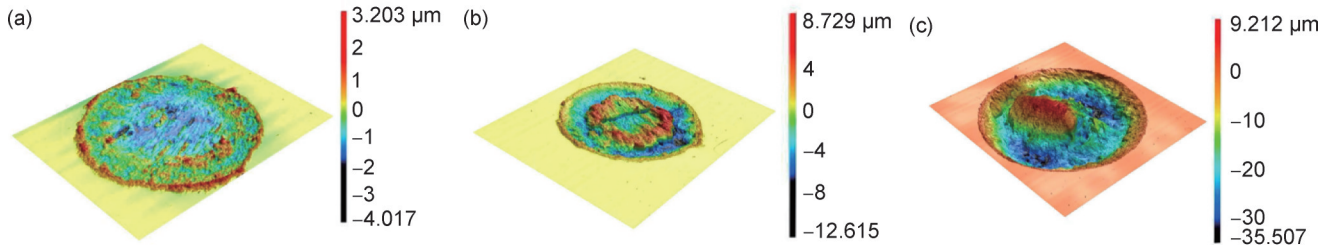


图10 氦气条件下冷喷涂 CuNiIn 涂层在不同微动位移幅值下的磨痕三维形貌

(a) $D=50\ \mu\text{m}$; (b) $D=100\ \mu\text{m}$; (c) $D=150\ \mu\text{m}$

Fig.10 3D morphologies of wear tracks of cold sprayed CuNiIn coatings under He conditions at different fretting displacement amplitudes

(a) $D=50\ \mu\text{m}$; (b) $D=100\ \mu\text{m}$; (c) $D=150\ \mu\text{m}$

3 结论

(1) 在 $500\ ^\circ\text{C}$ 和 $700\ ^\circ\text{C}$ 下,氦气冷喷涂制备的

CuNiIn 涂层孔隙率、结合性能及磨损均显著优于氦气制备的涂层。气体种类对涂层结合强度的影响尤为明显,氦气喷涂涂层的平均结合强度($70\ \text{MPa}$)较氮气

喷涂涂层的平均结合强度(40 MPa)提高30 MPa。

(2)提高气体预热温度可以改善喷涂颗粒的加速效果,对涂层孔隙率、显微硬度及磨损率影响显著,但对结合强度影响不大。随气体预热温度从500℃升高至700℃,氮气喷涂的涂层孔隙率由1.7%降至0.5%,显微硬度由275HV降至237HV,磨损率由2.21%降至1.51%,氦气喷涂的涂层孔隙率由1.4%降至0.05%,显微硬度由213HV增至292HV,磨损率由1.8%降至1.41%。

(3)采用氦气在优化参数下制备的CuNiIn涂层,在不同微动位移幅值下磨损特性存在差异。随微动位移幅值的增加,涂层磨损形式由黏着磨损过渡为磨粒磨损。

参考文献

- [1] 苏宇,李文亚,王新宇,等.钛合金线性摩擦焊研究现状及展望[J].中国材料进展,2017,36(11):852-859.
SU Y, LI W Y, WANG X Y, et al. Linear friction welding of titanium alloys: state-of-the-art and perspectives[J]. Materials China, 2017, 36(11): 852-859.
- [2] 孙震,陈少俊,赵振华,等.压气机钛合金叶片外物损伤试验[J/OL].航空发动机,1-7[2025-01-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1359.v.20241225.2003.012.html>
SUN Z, CHEN S J, ZHAO Z H, et al. Test of foreign object damage on compressor titanium alloy blades [J/OL]. Aeroengine, 1-7 [2025-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1359.v.20241225.2003.012.html>
- [3] 王亚辉,黄亮,刘翔,等.基于增材制造和锻造复合成形的TC4钛合金组织和性能研究[J].稀有金属,2021,45(8):897-904.
WANG Y H, HUANG L, LIU X, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 alloy formed by additive manufacturing combined with forging[J]. Rare Metals, 2021, 45(8): 897-904.
- [4] 刘汉青,何超,黄志勇,等.TC17合金超高周疲劳裂纹萌生机理[J].金属学报,2017,53(9):1047-1054.
LIU H Q, HE C, HUANG Z Y, et al. Very high cycle fatigue failure mechanism of TC17 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(9): 1047-1054.
- [5] 周仲荣.关于微动磨损与微动疲劳的研究[J].中国机械工程,2000,11(10):1146-1150.
ZHOU Z R. Research on micromotion wear and micromotion fatigue[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(10): 1146-1150.
- [6] 刘道新,刘元辅,刘双梅,等.航空钛合金结构的几种典型损伤形式及控制[J].航空工程与维修,2000(4):22-23.
LIU D X, LIU Y Y, LIU S M, et al. Several typical damage forms and control of aerospace titanium alloy structures [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2000(4): 22-23.
- [7] 邓瑞刚,毛小南,杨冠军,等.钛合金疲劳行为研究现状[J].热加工工艺,2011,40(8):1-4.
DENG R G, MAO X N, YANG G J, et al. Research status of fatigue behavior of titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(8): 1-4.
- [8] MARY C, FOUVRY S, MARTIN J M, et al. Pressure and temperature effects on fretting wear damage of a Cu-Ni-In plasma coating versus Ti17 titanium alloy contact [J]. Wear, 2011, 272(1): 18-37.
- [9] HAGER C H Jr, SANDERS J, SHARMA S, et al. Gross slip fretting wear of CrCN, TiAlN, Ni, and CuNiIn coatings on Ti6Al4V interfaces[J]. Wear, 2007, 263(1/6): 430-443.
- [10] FRIDRICI V, FOUVRY S, KAPSA P. Fretting wear behavior of a Cu-Ni-In plasma coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163: 429-434.
- [11] 崔慧然,李宏然,崔启政,等.航空发动机及燃气轮机叶片涂层概述[J].热喷涂技术,2019,11(1):82-94.
CUI H R, LI H R, CUI Q Z, et al. Summary of blade coatings for aero-engine and gas turbine [J]. Thermal Spray Technology, 2019, 11(1): 82-94.
- [12] 史周琨,徐丽萍,张吉阜,等.铝合金机匣抗微动磨损涂层材料及其制备工艺研究进展[J].材料研究与应用,2021,15(1):60-70.
SHI Z K, XU L P, ZHANG J F, et al. Research progress of anti-fretting wear coating materials for aluminum alloy casing and its preparation process [J]. Materials Research and Application, 2021, 15(1): 60-70.
- [13] 靳磊,崔向中,马国佳,等.CuNiIn微动磨损涂层失效机理研究[J].装备环境工程,2016,13(3):70-75.
JIN L, CUI X Z, MA G J, et al. Failure mechanism of CuNiIn fretting wear coatings [J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 70-75.
- [14] 陈雄伟,牟治国,陈利刚,等.离子喷涂CuNiIn涂层性能研究[J].材料研究与应用,2019,13(3):207-210.
CHEN X W, MOU Z G, CHEN L G. Investigation on the performance of plasma spray CuNiIn coating [J]. Materials Research and Application, 2019, 13(3): 207-210.
- [15] 吴轩璇,黄建云,柏林,等.HVOF制备CuNiIn涂层对TC4-DT钛合金抗微动磨损的改善[J].航空制造技术,2016(14):41-46.
WU X X, HUANG J Y, BAI L, et al. Improvement of fretting wear resistance of TC4-DT titanium alloy with CuNiIn coating by HVOF [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(14): 41-46.
- [16] 郭志宏,王辉,张淑婷,等.电弧喷涂CuNiIn抗微动磨损涂层性能研究[J].热喷涂技术,2013,5(4):33-38.
GUO Z H, WANG H, ZHANG S T, et al. Study on the properties of arc sprayed CuNiIn coating [J]. Thermal Spray Technology, 2013, 5(4): 33-38.
- [17] 李长久.先进冷喷涂金属固态沉积技术:理论与应用[M].北京:科学出版社,2023.
LI C J. Advanced cold spraying metal solid deposition technology: theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [18] 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.
HUANG C J, YIN S, LI W Y, et al. Cold spray technology and its system: research status and prospect [J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 1-23.
- [19] WAN W P, LI W Y, WU D, et al. New insights into the effects of

- powder injector inner diameter and overhang length on particle accelerating behavior in cold spray additive manufacturing by numerical simulation [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2022, 444:128670.
- [20] WAN W P, LI W Y, WU D, et al. 3D analysis of gas flow behavior and particle acceleration characteristics in cold spray additive manufacturing based on non-axisymmetric numerical models [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 1335-1349.
- [21] 李文亚, 黄春杰, 余敏, 等. 冷喷涂制备复合材料涂层研究现状 [J]. *材料工程*, 2013(8): 1-10.
LI W Y, HUANG C J, YU M, et al. State-of-the-art of cold spraying composite coatings [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013(8): 1-10.
- [22] LI W Y, LIAO H, LI J L, et al. Microstructure and microhardness of cold-sprayed CuNiIn coating [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2008, 10(8): 746-749.
- [23] 李海升, 刘坤, 李文亚, 等. TC4钛合金表面冷喷涂制备CuNiIn涂层组织及其微动磨损性能研究 [J]. *材料保护*, 2022, 55(1): 22-26.
LI H S, LIU K, LI W Y, et al. Microstructure and fretting wear properties of CuNiIn coating prepared by cold spraying on surface of TC4 titanium alloy [J]. *Materials Protection*, 2022, 55 (1) : 22-26.
- [24] WEI Y K, LUO X T, CHU X, et al. Solid-state additive manufacturing high performance aluminum alloy 6061 enabled by an *in-situ* micro-forging assisted cold spray [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 776: 139024.
- [25] 张创. 高压冷喷涂中送粉气流对粒子流撞击特性的影响 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHANG C. Effect of the powder carrier gas on powder stream impact characteristics in high-pressure cold spray [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [26] 杨启. TC4钛合金榫结构的微动疲劳损伤及喷丸防护机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
YANG Q. Investigation of fretting fatigue damage and shot-peening palliative mechanisms of TC4 alloy dovetail joints [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
-
- 基金项目:** 中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2023CXY023); 凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)自主研究课题资助项目(2021-TZ-01)
- 收稿日期:** 2025-02-08; **录用日期:** 2025-04-26
- 通讯作者:** 李文亚(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为冷喷涂及摩擦焊接技术, 联系地址: 陕西省西安市友谊西路127号西北工业大学材料学院(710072), E-mail: liwy@nwpu.edu.cn

(本文责编: 王 晶)