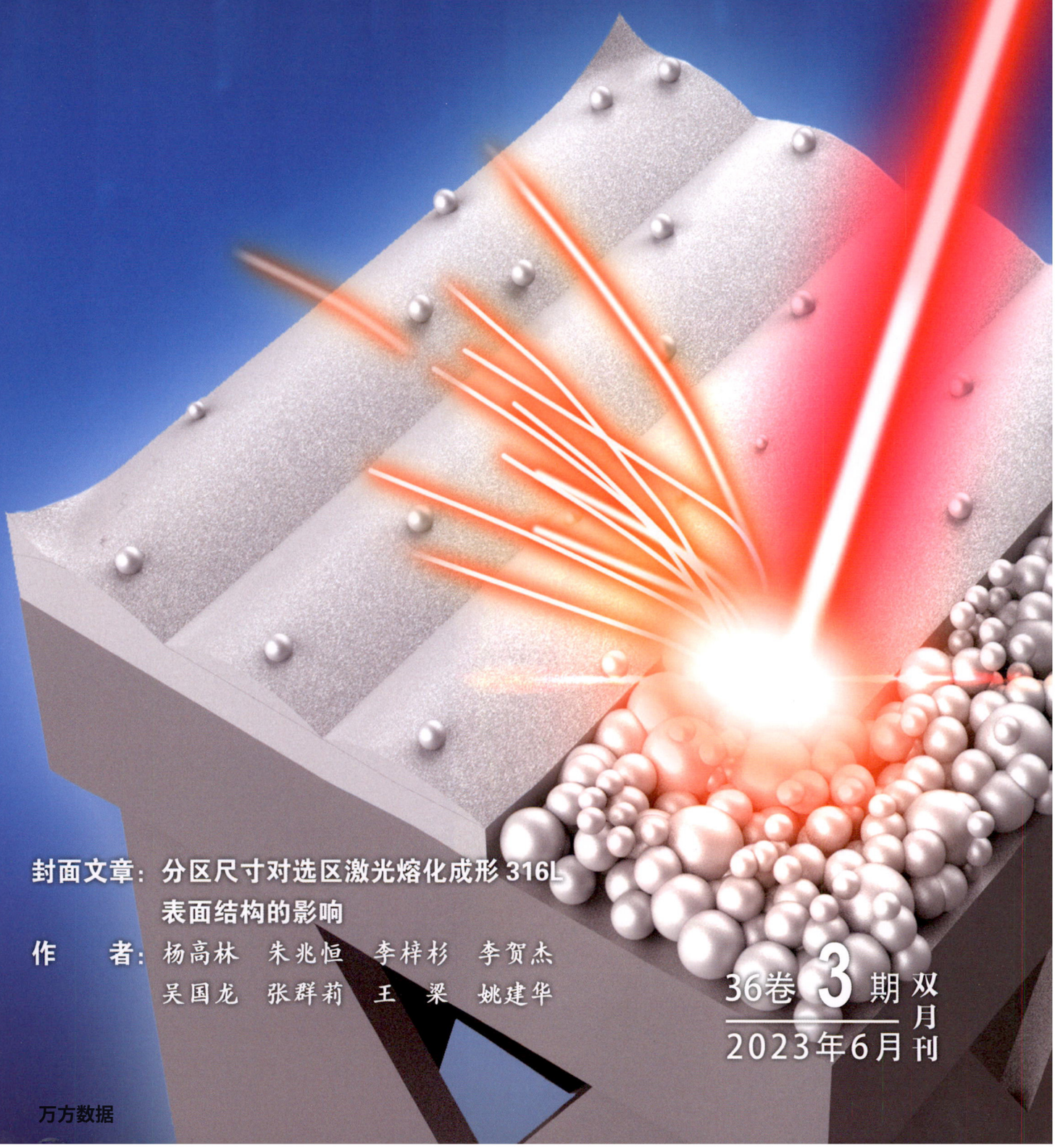
CMES
中国机械工程学会

中国表面工程

CHINA SURFACE ENGINEERING



封面文章：分区尺寸对选区激光熔化成形 316L 表面结构的影响

作　　者：杨高林　朱兆恒　李梓杉　李贺杰　吴国龙　张群莉　王　梁　姚建华

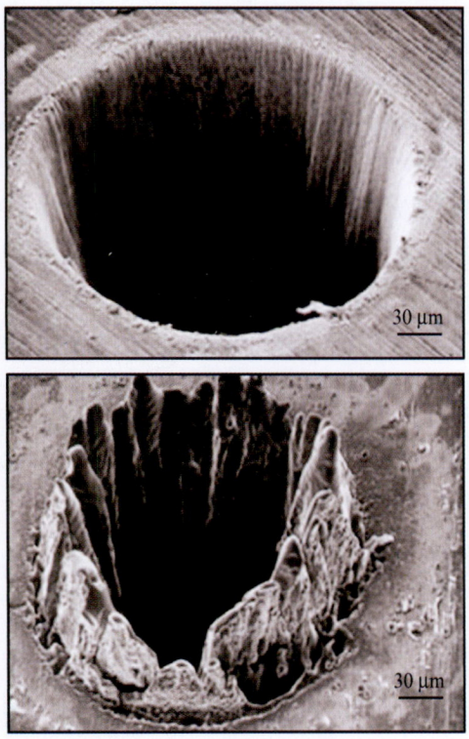
36卷 3 期 双月刊
2023年6月

中国表面工程
ZHONGGUO BIAOMIAN GONGCHENG

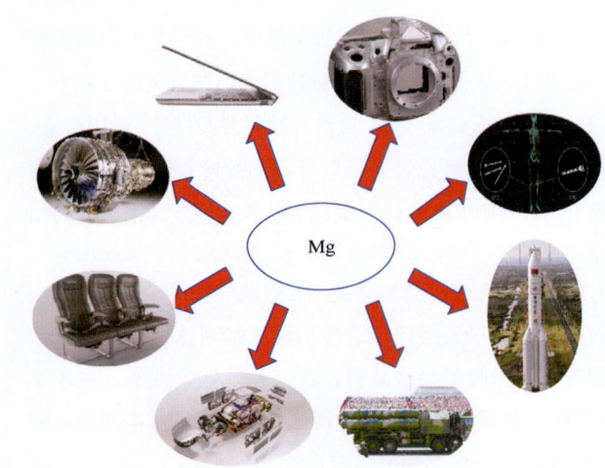
目次

2023 年　第 36 卷　第 3 期　6 月 23 日出版

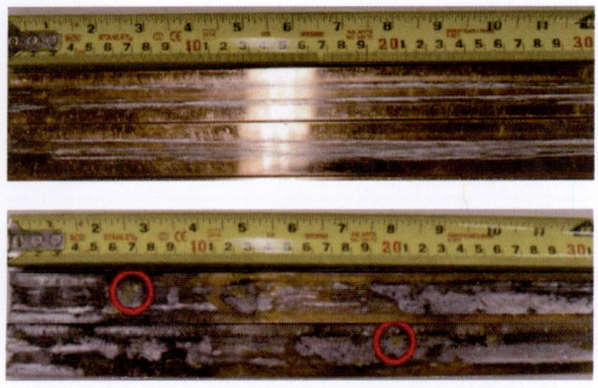
综述论文



摘要：织构化可使零件或设备表面实现降低磨损、改变润湿性并提高抗反射性的效果，在医疗、机械、航空和海洋等领域展现出强大活力。为提升织构效果，表面织构技术引入仿生设计，通过在材料表面加工出类似生物表层的微 / 纳结构以达到特种表面需求。超快激光织构化是目前较为先进且重要的一种织构加工技术，针对超快激光制备仿生织构表面进行系统总结十分必要。对激光加工原理，以及制备耐磨性、润湿性、抗反射性三类特种表面的研究现状进行综述，简述三类织构表面的作用原理、仿生设计与优化。结果表明，超快激光可在材料表面制备出低热源损伤、高表面性能的精细仿生织构，通过仿生自然界中的生物表面结构，织构表面能够实现降低表面摩擦因数，获得超亲 / 疏水表面以及优异的抗反射性能。但超快激光无法准确烧蚀出所需织构尺寸结构，需要对激光加工进一步研究，将设计与加工紧密联系，构建超快激光织构化体系，实现未来超快激光织构化生产应用。

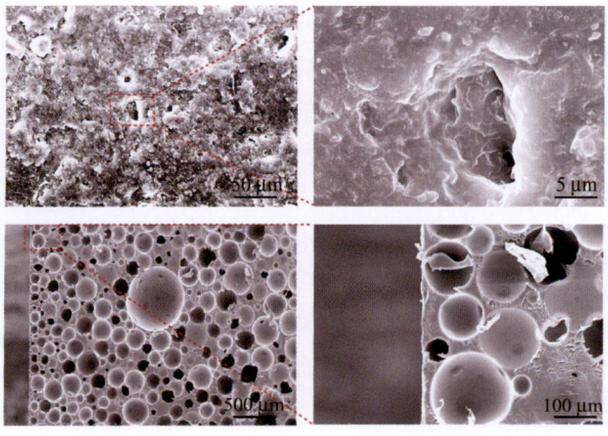


摘要：作为最轻的金属结构材料之一的镁合金，其较差的耐磨蚀性和低硬度限制了在工业中更为广阔的应用。激光熔覆涂层因具有稀释度小、组织致密、涂层与基体结合好等优点，可显著提高镁合金表面硬度和耐磨蚀性，获得密切关注，然而此方面缺乏系统的综述研究。以镁合金涂层材料的设计原则为出发点，首次从二元合金涂层、复合性增强涂层、非晶态合金涂层、高熵合金涂层、功能梯度涂层以及医用材料涂层 6 个方面，综述镁合金表面激光熔覆涂层材料设计体系，并分析每种涂层材料体系的性能特点。对镁合金在激光熔覆领域应用亟待解决的问题及未来发展方向进行展望，提出未来应结合超声振动技术、电磁搅拌技术、高频微锻造技术和等离子喷涂技术等辅助技术，协同高通量材料计算模拟，开发用于镁合金激光熔覆的新型高性能合金，为镁合金表面激光熔覆的涂层设计提供参考。



摘要：电磁轨道发射是实现超高速电磁发射的优选方案，发射环境极其恶劣，轨道表面会产生一系列损伤。其中沉积层作为覆盖全轨道表面以及全发射过程的典型损伤形式，会显著影响运动电枢与固定轨道的接触特性。综述近年电磁轨道炮轨道表面熔凝沉积层的研究进展，阐述沉积层的形成机制及形成过程，归纳沉积层的特点，梳理影响沉积层形成的因素，探讨沉积层对于电磁发射行为的影响规律。电磁发射轨道表面沉积层具有多孔典型分布特性，其微观形貌及厚度随电枢发射在轨道长度方向和径向上有着明显的时空演化特性；沉积层的形成受到轨道材料及其结构设计、电枢材料及其电枢结构设计、电枢与轨道接触特性、表面处理以及发射电流参数等多种因素的影响。沉积层的存在一方面形成金属液化层，降低枢轨间摩擦因数，另一方面沉积在轨道表面，恶化枢轨接触状态。由于电磁发射轨道表面沉积层的形成条件极端苛刻，现有研究尚未能形成系统性和通用性的演化规律，在带沉积层轨道材料物性测试以及基于沉积层的枢轨接触特性的评价方面仍有待进一步深入研究。对沉积层未来的研究方向及提高电磁发射轨道性能具有一定参考意义。

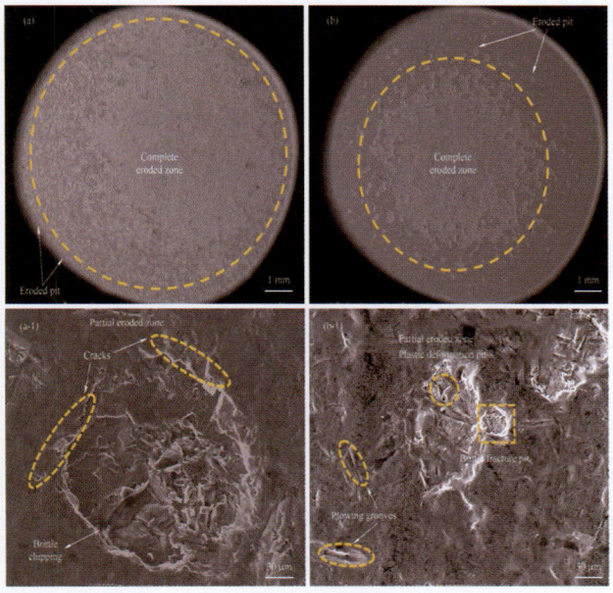
技术基础



摘要：硬质聚氨酯泡沫（RPUF）的吸湿特性导致泡沫塑化、溶胀变形，影响其服役安全性及稳定性。但目前针对这种亲水性多孔界面的阻湿研究鲜有报道。通过表面改性的方法引入阻湿层是一种非常有效的解决方法，聚对二甲苯（Parylene C）可在室温沉积条件下形成致密薄膜，具有优异的阻湿性能。在 RPUF 表面沉积 Parylene C 薄膜，然后利用全氟小分子组装进行界面疏水改性。通过一维和二维红外、低场核磁、微观形貌和元素组成等表征以及不同厚度镀膜试样吸湿曲线等分析，阐明 RPUF 的吸湿机理及复合涂层体系阻湿的相关规律。结果表明：当 Parylene C 镀膜达到一定厚度后，RPUF 表面的孔缺陷会被覆盖，其阻湿性能可提高 73.6%，同时全氟小分子表面疏水改性后聚氨酯泡沫表面和水分子的相互作用和吸附会被减弱，进一步降低吸湿率。揭示了 RPUF 吸湿机理和 Parylene C 薄膜界面阻湿的基本规律，有望用于解决硬质聚氨酯泡沫的长效阻湿问题。

65 复合 zigzag 结构 CrN 涂层的设计制备及冲蚀性能

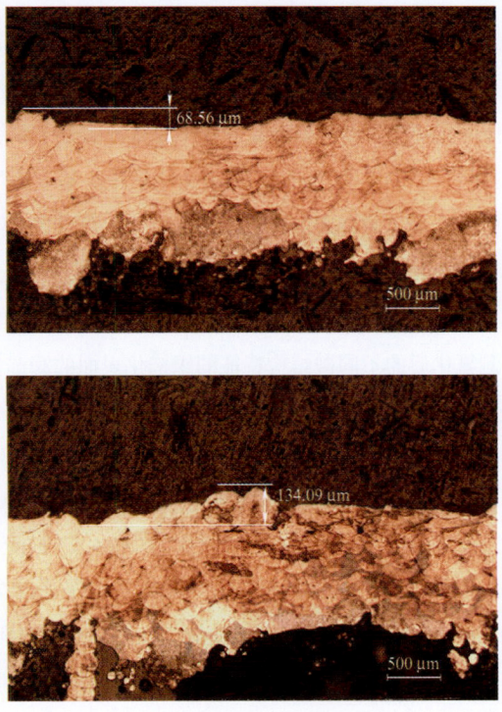
王　丽　王振玉　陈仁德　柯培玲　汪爱英



摘要：飞机在沙漠等恶劣环境中服役，空气中的固体颗粒在高速气流作用下对叶片表面产生高速冲击，为提高钛合金叶片的抗冲蚀性能，采用掠角磁控溅射技术制备复合 zigzag 结构 CrN 涂层（简称 CrN-zigzag），并利用掠角 X 射线衍射仪（GIXRD）、扫描电子显微镜 CSEM）、划痕测试系统（CSM Revetest）、白光干涉仪、纳米压痕仪、冲蚀设备等表征涂层的成分、组织结构、力学性能和冲蚀性能。研究结果表明，CrN-zigzag 涂层组织致密呈现柱状结构，厚度约为 3.7 μm，纳米硬度达到（19.2±2）GPa，具有良好的膜基结合强度（>48 N）。相比于常规 CrN 涂层，CrN-zigzag 涂层在 90° 冲蚀角度下的抗冲蚀性能提高了 57.67%。CrN 涂层表现为明显的脆性失效特征，CrN-zigzag 涂层表现为明显的脆性和韧性失效双特征，符合变形磨损理论和二次冲蚀理论。CrN-zigzag 涂层在砂砾冲蚀试验中表现出良好的抗冲蚀性能主要归因于其特有的 zigzag 晶界取向设计，提高了材料的损伤容限。

74 分区尺寸对选区激光熔化成形 316L 表面结构的影响

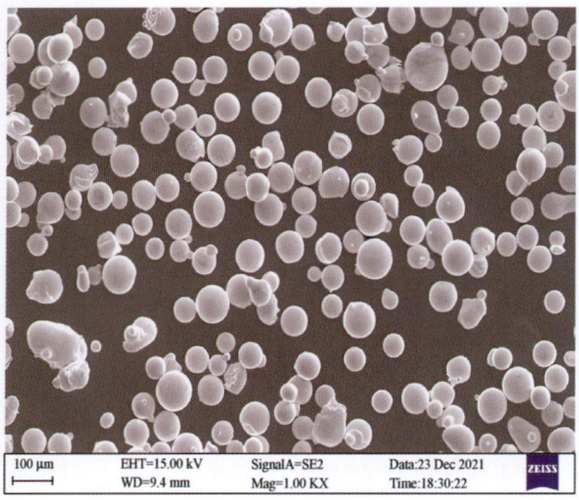
杨高林　朱兆恒　李梓杉　李贺杰　吴国龙　张群莉　王　梁　姚建华



摘要：分区扫描策略对选区激光熔化成形件的表面质量有重要影响，而目前分区尺寸对成形件表面结构的影响规律尚不清晰。为进一步提高选区激光熔化成形带支撑悬垂结构的表面质量及尺寸精度，以带支撑方形悬垂结构为研究对象，结合数值模拟与成形试验从表面原始轮廓的形状误差、波纹度与表面粗糙度三个不同波距的表面结构进行研究。研究结果表明：随着分区尺寸的减小，成形件表面边缘的翘曲高度逐渐降低，但相邻分区之间的轮廓起伏程度逐渐增加，成形件截面轮廓的形状误差与表面粗糙度得到改善，波纹度呈现出增大趋势，使成形表面形貌呈先改善后降低趋势。形状误差、波纹度与表面粗糙度随分区尺寸的减小变化趋势并不一致，分区尺寸过小会导致热累积现象明显，波纹度增加。在减小分区尺寸的同时适当降低激光能量输入，能有效改善表面形貌。为提高 SLM 成形带支撑悬垂结构的尺寸精度和表面形貌提供了理论基础。

87 基于 NSGA-II 算法的激光熔覆单道成形工艺参数多目标优化

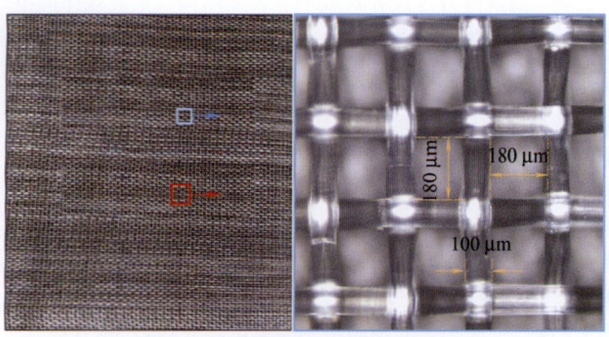
郭星星　帅美荣　王建梅　李亚杰　马承睿

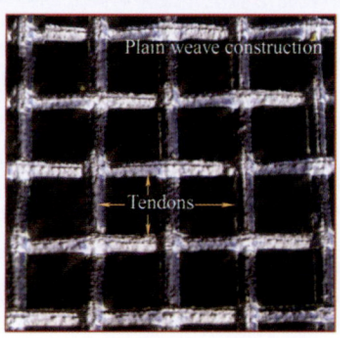


摘要：激光熔覆参数设计和产品成形质量评估是多输入多输出耦合控制，但关于各参数权重配分以及多目标协同优化研究鲜有报道。设计 L16（4^3）激光单道熔覆正交试验方案，研究 27SiMn 钢表面熔覆 GS-Fe01 铁基合金粉末的最优工艺参数；通过建立以激光功率、扫描速度和送粉速率关键参数表征的优化变量，构建以熔覆层性能评估为指标的目标响应非线性数学模型；探究优化变量及其权重排序对覆层性能的影响规律。基于快速非支配排序遗传算法（NSGA-II）多目标优化的 Pareto 解集，寻求最佳参数。结果表明：在激光功率 744 W，扫描速度 233 mm / min，送粉速率 1.2 r / min 工况下，熔覆层稀释率 19.9%，宽高比 3.001，显微硬度 747.15 $HV_{0.5}$ 时，目标响应值匹配最佳。沿激光熔覆凝固方向，熔覆界面微观组织形貌逐步由树枝晶和柱状晶组织转换为体积小、数量多的非定向等轴晶粒。研究结果可为激光熔覆多目标工艺参数优化及复合涂层质量控制提供理论支撑。

101 旋带掩模电解织构化圆柱表面及其润湿性分析

申继文　明平美　薛宝龙　张新民　张云燕　陈月涛

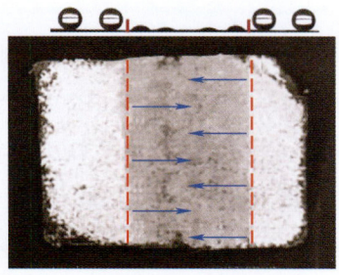


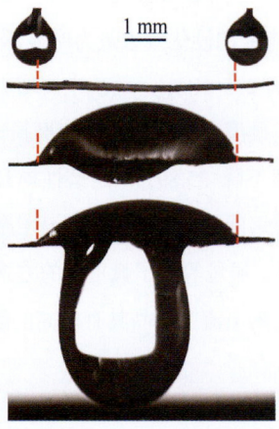


摘要：在圆柱面工件上高效、低成本地创制功能化极端润湿性表面仍面临重大技术挑战。对此提出旋带掩模电解织构技术。该技术直接选用市售带状柔性电绝缘多孔高分子编织布为活动掩模，以中性盐 $NaNO_3$ 溶液为电解液，基于旋带电解印制方式对金属圆柱表面进行织构化处理。介绍其工作原理，分析圆柱表面微织构形貌与几何廓形的演化过程，试验探究极间电压、旋带速度、加工次数等对表面织构特征的影响，评测氟化后的不同微结构特征的织构化表面的润湿性。结果表明：圆柱表面织构特征显著受加工次数的影响，随加工次数的增加，圆柱表面经历“反复复制”掩模印制阵列凹凸微结构、阵列凹凸微结构叠错-细化、微纳米分级结构分级化等表面微织构化演化过程；用时仅需 249 s 制备的外径 49 cm、长 50 cm 的 SUS304 圆柱面（氟化后）微-纳米分级结构表面对水 / 甘油 / 十六烷的接触角分别为 160.4°、158.5°、153.6°、滚动角分别为 2.1°、5.6°、8.6°；呈现优异的超双疏极端润湿性且机械耐久性好。旋带掩模电解织构技术在圆柱面工件制取机械耐久性极端润湿性功能表面方面呈现高效、低成本、便于实施等优势。

113 梯度润湿性 ZnOHF 薄膜上液滴定向铺展行为

伊文静　王春莹　刘长松　栗心明

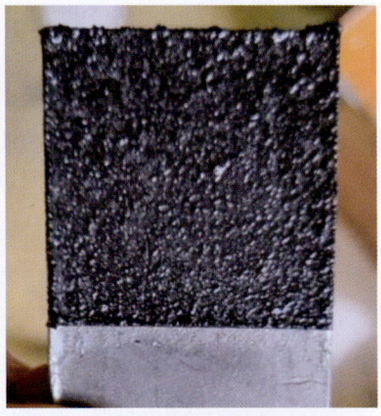


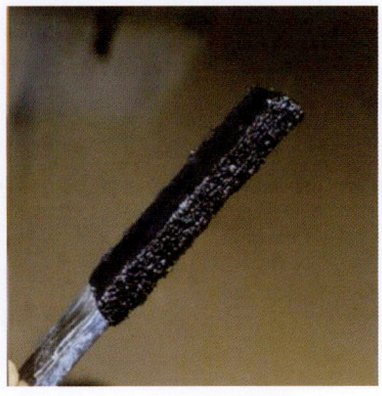


摘要：目前对 ZnOHF 的润湿性相关的研究较少。借助 ZnOHF 的光响应润湿性转变特性制备梯度润湿性表面，研究该表面上的液滴定向铺展行为，验证应用该表面可提高潮湿环境中的集水量。通过水热法制备花状 ZnOHF 薄膜，基于其光响应特性对 ZnOHF 薄膜进行不同时间的紫外光照制备单侧梯度润湿性表面，研究液滴在梯度表面上的定向铺展行为。采用 XRD 和 SEM 表征产物的物相组成和微观结构，使用 FT-IR 表征紫外光照前后 ZnOHF 薄膜的—OH 基团变化，使用接触角测量仪表征 ZnOHF 薄膜的润湿性，记录液滴的铺展行为。结果表明，在紫外光照射下，薄膜的接触角变化速度先快后慢，3 h 即可由 152° 转化为 0°。在梯度表面上水滴以 7.42 mm / s 的速度从光照起始线向超亲水端定向铺展 4.08 mm，与均匀表面（1.16 mm / s）相比铺展速度更快，距离（3.82 mm）更远；梯度表面上的液滴可以克服重力铺展，其速度（3.84 mm / s）依然大于均匀表面。液滴在梯度表面定向铺展的主要驱动力为不平衡的表面张力，不同体积的液滴铺展到光照分界线处均出现加速现象。双侧梯度表面可以使小液滴汇聚于亲水区域，当液滴累积到一定体积时会向下渗透，达到集水的效果。模拟潮湿环境测试其集水性能，双侧梯度表面的集水量与原始表面相比提高 31%。通过控制紫外光照制备梯度润湿性 ZnOHF 薄膜，研究液滴在梯度润湿性表面上的定向铺展行为，并验证了双侧梯度表面在集水方面的应用。

121 聚苯胺纳米线复合材料的制备与储能性分析

王　彪　陈鼎智　马安宁　郑　渝　邓姝皓

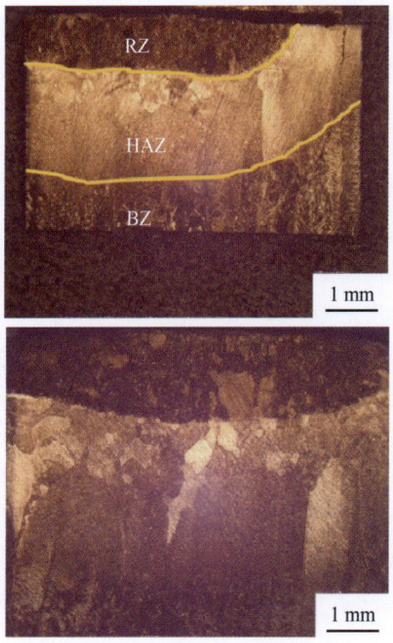




摘要：针对软、硬模板法制备纳米线的缺陷，提出一种步骤简单、快速且低成本的方法来获得直径均匀的 PANI 纳米线复合材料，并对所制备出的 PANI 纳米线复合材料进行表征和电化学性能研究。首先，采用阳极氧化剥离法，分别在硝酸体系、磷酸还原体系及硫酸体系中对表面光滑的石墨板进行电化学剥离处理。随后，在经过电化学剥离后的粗糙石墨表面上进行电聚合，从而得到 PANI 纳米线复合材料。表征分析发现，经电化学剥离处理的石墨纸表面分别生成具有大量活性点的石墨烯和氧化石墨烯，与 PANI 结合显著提高了 PANI 的导电性。其中硝酸体系制备的聚苯胺复合材料（PANI / GO）微观为纳米线组成的三维网状结构；磷酸还原体系制备的聚苯胺复合材料（PANI / GR1）微观是纳米线和纳米片层混合结构；硫酸体系制备的聚苯胺复合材料(PANI / GR2)的微观结构介于二者之间。以镁合金和上述三种 PANI 复合材料为电极，制备出简易的海水电池。使其在电流密度为 3.75 mA • cm^{-2} 下放电至 0.9 V 时止。三种电池的比能量分别为 540、228 和 363 mWh • g^{-1}，结果表明 PANI / GO 的储能性最优。随后进行的 Tafel 曲线分析和交流阻抗分析表明，PANI / GO 复合电极的导电性和稳定性优异、比表面积大，有利于与电解液充分接触，促进离子在其上的传输和扩散，因而电池反应的极化小，电化学性能最优，有望应用于电池正极材料。

132 等离子弧重熔对 TiZr 基合金微观组织及摩擦学性能的影响

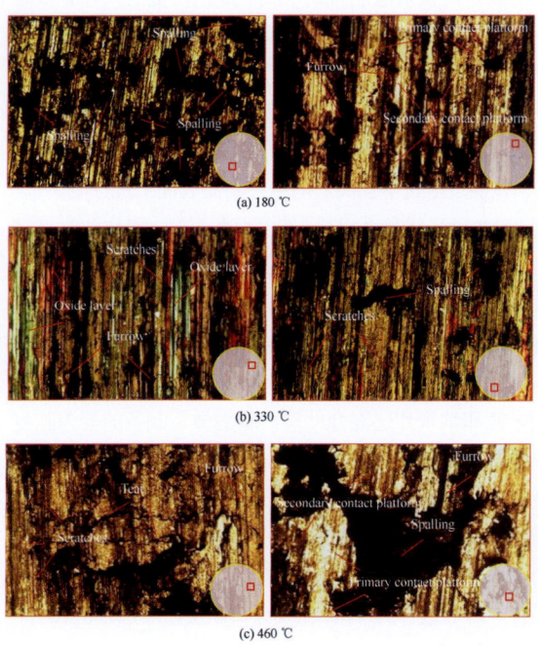
杜志浩　岳　赟　吕源远　杜三明　张永振



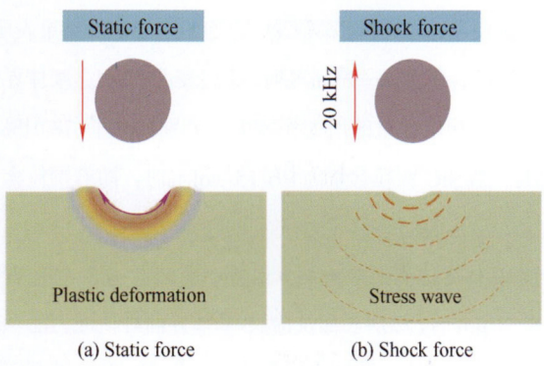
摘要：常见的钛合金表面改性常具备成本高、周期长、改性层薄的缺点。为改善新型钛锆基合金 Ti-20Zr-6.5Al-4V 的耐磨性能，采用不同等离子弧重熔电流对 T20Z 合金重熔试验。使用扫描电子显微镜（SEM）和 X 射线衍射仪（XRD）、显微维氏硬度计、UMT-2 摩擦磨损试验机及三维形貌仪对等离子弧重熔后合金的组织、物相、硬度及摩擦磨损性能进行分析和测试。结果表明，不同重熔电流均使 T20Z 表层组织细化，硬度提升，低电流的硬化效果最为明显，硬度最高达 600 $HV_{0.2}$，较基体提高 225 $HV_{0.2}$。随着电流增大，重熔区与热影响区逐渐增大，硬度有所降低。摩擦磨损试验显示，80A 重熔电流下磨损率下降 25.89%，耐磨性提升最为明显。不同电流等离子弧重熔的 T20Z 合金在室温干摩擦条件下磨损机制均为磨粒磨损。通过等离子弧重熔的方式可获得较厚的重熔区，且在低重熔电流下样品具有较高的耐磨性提升。

142 考虑摩擦升温的铁路列车制动摩擦块高温磨损机制演变

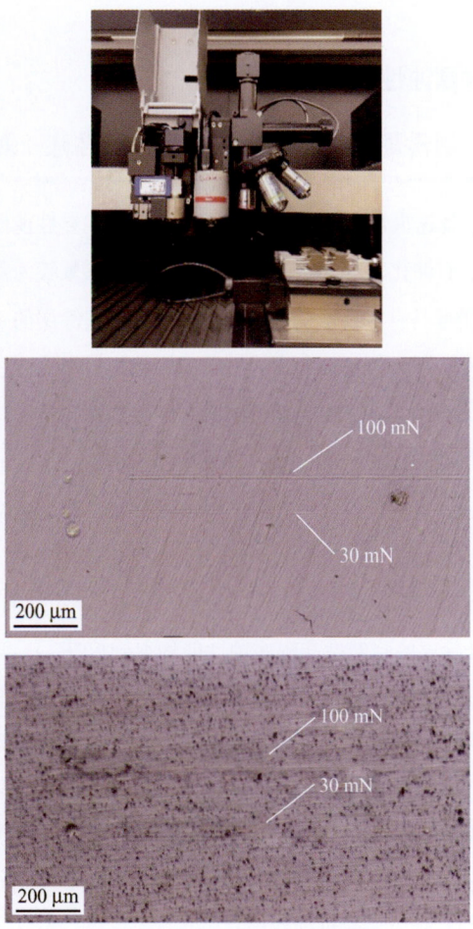
陈孝婷　卢　纯　莫继良　张庆贺　赵　婧



摘要：铁路列车制动摩擦块的高温磨损对列车制动安全影响显著，现有对于制动摩擦块高温磨损的研究一般通过环境温度控制来模拟制动界面高温条件，而在摩擦生热条件下对制动摩擦块高温磨损机理及演变规律的研究较少。在多模式制动性能试验台上进行摩擦拖曳制动试验，利用显微特征观测仪器、界面几何特征测量设备等，对制动摩擦块的高温磨损机理和演变进行分析探讨。结果表明，在摩擦生热条件下，当制动界面温度从室温上升至 460 ℃时，摩擦块的主要磨损机制依次为磨粒磨损、氧化磨损和黏着磨损。当磨损机制以磨粒磨损为主时，摩擦块表面的缺陷数量多但尺寸小，摩擦因数与常温下接近；当氧化磨损占主导时，形成的氧化膜会提高耐磨性，摩擦块表面损伤较轻。此时，界面接触状态较好，摩擦因数较高，制动性能有所提高；当高温导致摩擦块材料发生软化和塑性流动时，摩擦块接触平台尺寸较大且极为平整，软化的材料充当润滑剂使摩擦因数下降、制动性能降低。同时，塑性流动会造成材料延展性能耗尽和表面材料撕裂，摩擦块表面严重的局部损伤导致接触界面状态较差，磨损机制以黏着磨损为主。在更接近于真实制动工况的条件下进行研究，揭示了摩擦升温过程中铁路列车制动摩擦块高温磨损机制的演变过程，可为保障制动安全提供必要的理论支撑。



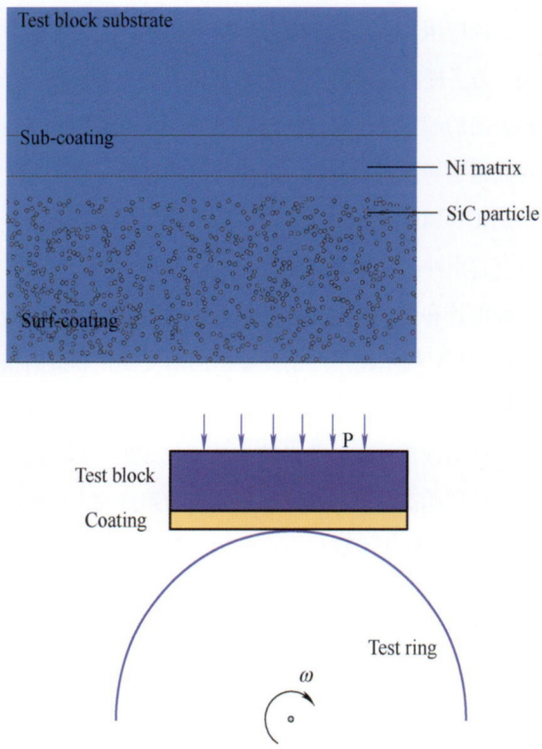
摘要：高锰钢优异的形变硬化行为使其在强冲击磨损工况下具有广泛的应用，但是在低应力磨损下高锰钢的硬化能力有待提高。为了提高高锰钢在低应力磨损下的力学性能，提出高锰钢表面的超声冲击强化方法。首先，采用超声冲击强化技术对高锰钢表面进行处理，并进行磨损试验，通过三维轮廓仪、XRD、SEM 和 EDS 等对显微组织、表面磨痕进行测试，研究超声冲击前后高锰钢表面的抗磨损性能。然后，通过维氏硬度计和 SEM 进行磨损前后亚表面维氏硬度测量和显微组织分析，揭示超声冲击高锰钢的形变硬化和抗磨损机理。研究发现，超声冲击高锰钢由于高应变率冲击和动态霍尔佩奇效应的双重作用，获得较大的硬化效果，其硬度远高于磨损前后原始高锰钢。揭示了高锰钢的超声冲击强化和抗磨损机理，可为低应力磨损下高锰钢的超声硬化处理提供技术基础。



摘要：在润滑油中添加纳米颗粒可以有效减少摩擦磨损，大多数研究只集中在纳米颗粒的性质对摩擦性能的影响，很少考虑到颗粒粒径与表面粗糙度对摩擦性能的耦合作用。采用分子动力学（MD）模拟和试验的方法研究纳米铜颗粒添加剂粒径对润滑油摩擦性能的影响。建立具有凸峰和凹槽的粗糙壁面边界润滑 MD 模型，模拟 300 MPa 下两固体壁面相对剪切速度为 5 m / s 时，5 种粒径的纳米 Cu 颗粒分别在不同粗糙度壁面下的力学性能。定量计算出摩擦表面的应力、磨损量、摩擦力、正压力和摩擦热。同时，采用微纳米划痕仪测量含纳米 Cu 颗粒润滑油的摩擦因数。结果表明，颗粒的粒径和壁面粗糙度对润滑油的摩擦性能具有耦合作用；在剪切过程中纳米颗粒会填充壁面凹坑、形成保护膜、减少摩擦磨损、提高承载能力和降低壁面摩擦热。当壁面粗糙度较小、处于边界润滑状态时，Cu 颗粒添加剂会增大体系的摩擦力；当壁面粗糙度较大、处于混合润滑状态时，Cu 颗粒添加剂会减小体系的摩擦力；当颗粒粒径与壁面凹槽深度的比值 D/h 在 1.05～1.12 范围内，即颗粒直径略大于凹槽深度时，润滑油的摩擦性能最优，摩擦力和磨损量较小、油膜承载能力最大。分子动力学模拟和试验相结合，建立微纳观结构和宏观特性之间的联系，探究壁面粗糙度与颗粒粒径对润滑油摩擦性能的影响机理，为预测和开发高性能新型润滑剂提供理论基础。

171 SiC 颗粒对轧辊表面镀层应力影响的有限元分析

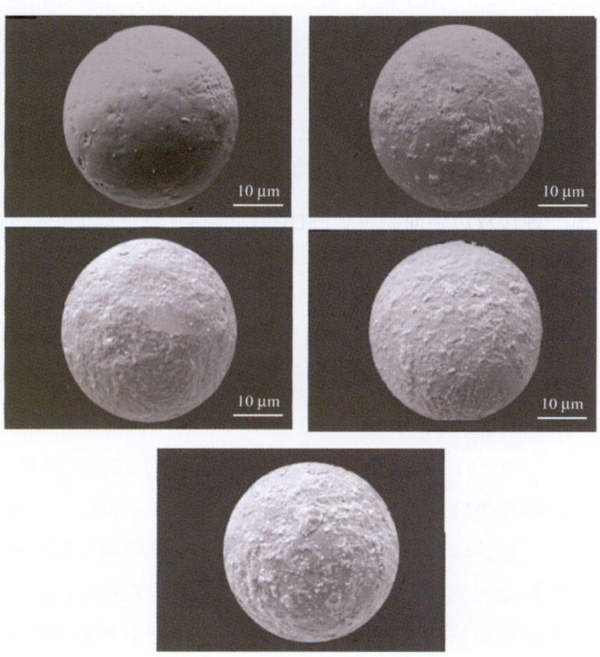
孙 伟 张淑婷 杜开平 欧阳佩旋 杨谨赫



摘要：目前针对多颗粒复合镀层有限元模型的建立尚不准确。以轧辊的服役工况为背景，利用 Python 语言和 ABAQUS 软件建立试块底面带有 SiC 颗粒增强 Ni 基复合镀层的环-块滑动摩擦有限元模型，系统研究 SiC 颗粒含量和尺寸对涂层表面及涂层-基体界面峰值等效应力的影响规律。结果表明：当 SiC 颗粒含量为 3～9 vol.%时，涂层表面和涂层-基体界面峰值应力随颗粒含量的增大而增大，分别增大了 78.01%和 32.06%；当 SiC 颗粒含量为 9～15 vol.%时，随着颗粒含量的增大，涂层表面峰值应力呈下降趋势，降低了 13.02%，而涂层-基体界面峰值应力基本保持不变；当 SiC 颗粒直径为 0.8～1 μm 时，涂层表面及涂层-基体界面峰值应力随颗粒尺寸的减小而增大，分别增大了 51.5%和 32.6%；当 SiC 颗粒直径为 0.3～0.8 μm 时，涂层表面及涂层-基体界面峰值应力基本保持不变。综合考虑轧辊表面镀层的性能需求以及实际复合电镀工艺，依据界面应力与镀层结合状态之间的关系，SiC 颗粒含量以 9 vol.%左右为宜，SiC 颗粒直径以 0.8 μm 左右为宜。所建立的多颗粒随机分布涂层基体的有限元模型更接近于实际复合镀层结构，研究结果可为复合镀层的设计与制备提供参考。

180 超音速火焰喷涂 Ni-CeO_2 复合涂层的数值模拟及耐磨耐腐蚀性能

刘思思 杨正航 武云文 廖君慧 刘金刚

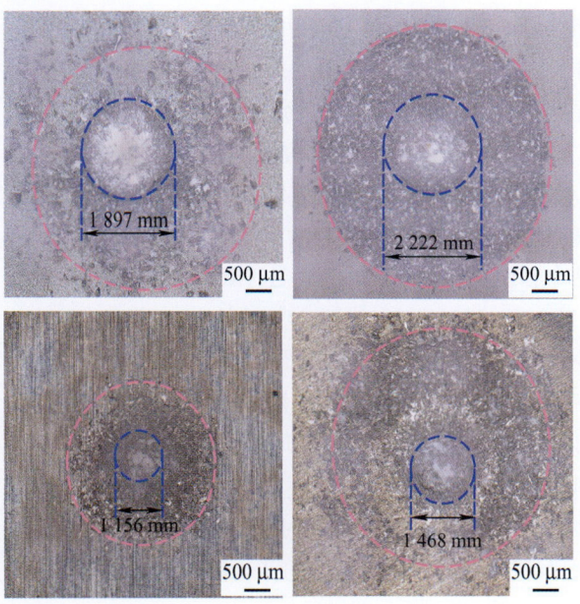


摘要：超音速火焰喷涂因其制备的涂层具有优异性能而被航空航天、石油化工等领域广泛使用，其工艺参数较为复杂且对涂层质量具有重要影响，但对其制备 Ni 基涂层的工艺参数选择及涂层性能研究相对较少。采用数值模拟的方法对超音速火焰喷涂 Ni 基涂层进行模拟，并对焰流与粒子特性进行分析；利用模拟指导试验，在 316L 不锈钢基体上成功制备 Ni-CeO_2 复合涂层；对复合涂层组织形貌及耐磨耐腐蚀性能做进一步研究。研究结果表明：当氧气煤油比等于 3，注入颗粒粒径在 20～80 μm 时，喷涂工艺最优；在添加 CeO_2 后，复合涂层的耐磨性能耐腐蚀性能均得到提升，且当 CeO_2 含量为 1 wt.%时，涂层硬度最大，摩擦因数最低，其摩擦因数相较于基体降低了 39.8 %，相较于 Ni 基涂层降低了 22.2 %，其耐磨性能相较于 Ni 基涂层提升了 62.5%。探究了超音速火焰喷涂工艺参数对喷涂系统状态的影响，分析了添加 CeO_2 在复合涂层中的作用，对超音速火焰喷涂 Ni-CeO_2 复合涂层具有引领与推动作用。

工 程 应 用

193 CoCrWSi 涂层高温冲击磨粒磨损行为

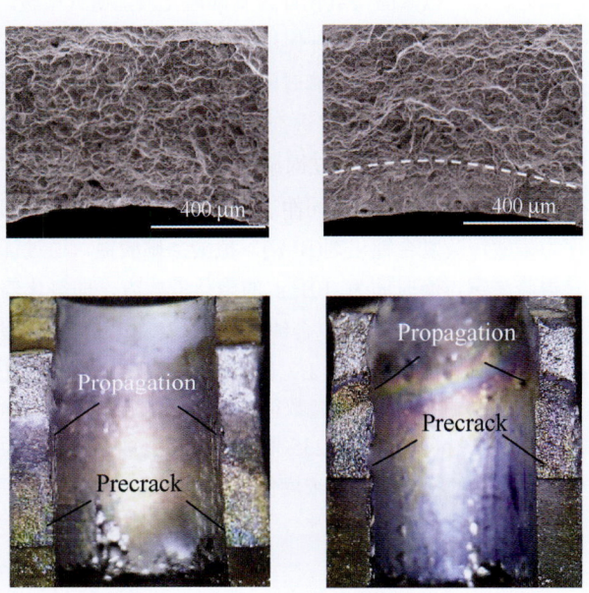
王浩宇　曹晓英　李定骏　方修洋　蔡振兵



摘要：CoCrWSi 涂层由于其优异的耐高温氧化性能，有望成为汽轮机零部件的防护涂层之一。但是关于该涂层在汽轮机真实服役环境中的高温冲击磨粒磨损行为却鲜有报道。以汽轮机阀门部件材料 SA-182F92 为基体，制备 CoCrWSi 防护涂层。利用自研的高温沙粒冲击试验机，研究 CoCrWSi 涂层在沙蚀环境中的高温冲击磨损行为，通过冲击动力学响应和磨痕形貌来评价该涂层的耐冲击磨粒磨损性能。结果表明：CoCrWSi 涂层具有耐高温冲击磨粒磨损性能，具体表现为相同冲击次数下，CoCrWSi 涂层样品的磨损面积、磨损体积和最大磨痕深度比基体样品小数倍，CoCrWSi 涂层样品的能量吸收量和吸收率均小于基体样品。在高温沙粒环境下，冲击的过程中会有大量的沙粒嵌入磨痕表面，沙粒具有的不规则棱角会切削磨痕表面，进而磨痕表面可以观察到大量犁沟。在高温沙粒环境下，基体与涂层的磨损机理为塑性变形和磨粒磨损。不同的是，软化的基体在冲击区域边缘有明显的隆起，发生更严重的塑性变形；而涂层在冲击过程中虽没有完全剥落，但涂层内部萌生了微裂纹，磨痕表面也有部分涂层剥落。研究结果是在模拟汽轮机真实服役状况下得出的，试验参数如加热温度、沙粒（杂质）、摩擦副材料等均依据汽轮机涂层应用的实际工况进行选择，对 CoCrWSi 涂层在汽轮机零部件上的应用有一定指导意义。

205 内壁强化对 TA16 钛合金传热管断裂韧度的影响

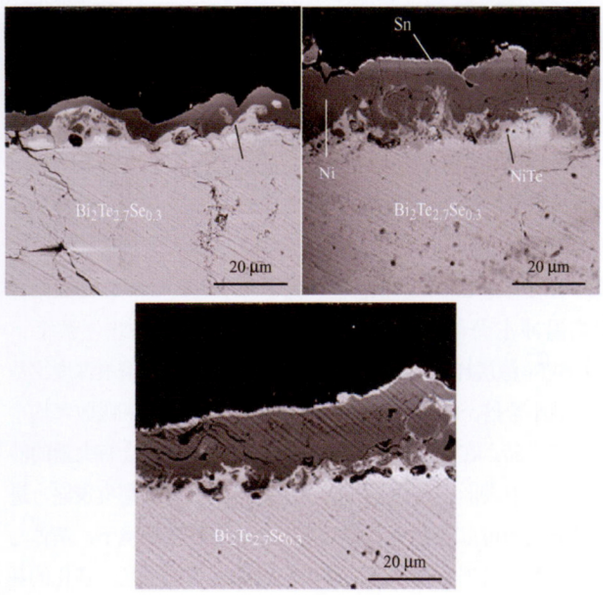
刘　肖　王　理　孙永铎　舒　茗　吴　军



摘要：采用 TA16 传热管制备的直流蒸汽发生器是新一代核动力装置的核心部件。为提高管材的内壁质量，目前采用内绞、喷砂等数道表面加工程序，生产成本大幅升高。为简化工艺流程，降低生产成本，开展针对 TA16 管材的内壁强化技术研究。同时为了确定内壁强化对管材断裂韧性的影响，提出一种含双边轴向裂纹管（DEAT）试样，通过弹塑性有限元分析建立 DEAT 试样的应力强度因子 K 和 J 积分的计算表达式，通过建立的试验方法完成内壁强化前后 TA16 传热管的 J-R 曲线测试，获得内壁强化前后 TA16 传热管的断裂韧性参数。试验后采用 SEM、EBSD、TEM 及纳米压痕分析内壁强化对管材微观组织和性能的影响。研究结果表明：强化后 TA16 管内壁从表面沿径向形成 100～200 μm 的纳米超细晶区和孪晶变形区，显著提高了管材的内壁质量，但由于表层的硬度升高，导致传热管的断裂韧度整体水平有所下降。研究结果可为 TA16 管材的质量提升、安全性评价及性能退化评估奠定技术基础。

214 热喷涂制 Ni 阻挡层在碲化铋热电器件中的应用

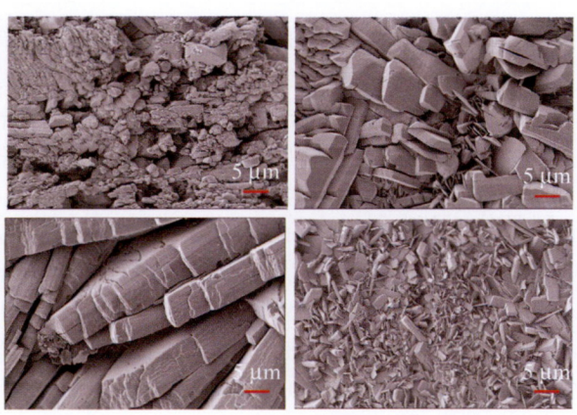
马　燕　况志祥　韩学武　胡晓明　李亚伟　樊希安



摘要：在碲化铋热电制冷器件的服役过程中，焊料与热电材料间的元素扩散将严重制约器件的正常使用，目前最常用在两者间加 Ni 阻挡层的方法来改善这种问题，以往采用电镀、等离子烧结等制备 Ni 镀层的方法会产生界面镀层厚度不易控制、镀层易氧化的问题，而热喷涂由于其镀速快、镀层厚度易控制和镀后表面较平整、耐氧化、结合强度高等优点，可作为制备 Ni 阻挡层的更好选择。采用热喷涂技术制备不同厚度的 Ni 阻挡层，并对其分别进行 200 ℃下 24、72 和 144 h 的退火试验。首先探究不同 Ni 层厚度的 p 型（$Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$）和 n 型（$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$）碲化铋材料退火前后对镀层硬度和防扩散效果的影响，并将不同 Ni 层厚度的 p、n 型碲化铋材料制备成热电器件进行服役性能测试。结果表明：退火对 p 型材料镀 Ni 层硬度影响较小，其值变化在 10% 以内，但对 n 型材料镀 Ni 层的硬度影响较大，其最大硬度值下降 56.36%；Ni 是 p 型碲化铋材料较好的扩散阻挡层，能显著减少 $Bi_{0.4}Sb_{1.6}Te_3$ 中所有元素的扩散，但其对于 n 型材料的阻挡效果不明显，仅能较弱地阻挡 $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ 中除 Te 之外的元素扩散；正常工作时，镀 Ni 器件在热循环 2.5 万次后，内阻变化小于 5%，相较于无镀 Ni 器件，其服役寿命得到显著提高。

223 响应面分析法在绿色快速磷化工艺研发中的应用

石西尧　朱志平　曹　洁　汤　甜　武梦婷



摘要：长期处于户外的输电杆塔容易遭受锈蚀而受损，传统的涂料涂覆处理无法起到同时除锈和防腐的作用，因此亟须探索一种适合输电杆塔的绿色磷化处理工艺。基于电化学与响应面分析法，以磷酸与氧化锌为基础磷化液，研究植酸、复合钝化剂 BM_1、硝酸锰三种促进剂的浓度对锌系磷化膜成膜质量的影响，以硫酸铜点滴时间评判其耐蚀性。采用扫描电子显微镜观察添加不同促进剂的磷化液所形成磷化膜的表面形貌。通过响应面分析法对磷化液的成膜耐腐蚀效果进行优化，得到硫酸铜点滴时间的二次响应方程。各因素影响次序为硝酸锌＞复合钝化剂(BM_1)＞植酸＞硝酸锰，通过优化获得硫酸铜点滴时间为 101 s 的磷化液配方，即氧化锌 15 g / L、磷酸 100 g / L、复合钝化剂 BM_1 1.7 g / L、植酸 11.7 mL / L、硝酸锌 52.4 g / L、硝酸锰 5.9 g / L、OP-10 乳化剂适量。通过响应面优化参数得到的磷化液配方在具有除锈功能的同时能有效提高 Q235 低碳钢的耐腐蚀性能，可为磷化液新配方的性能预测和浓度优化提供方法与理论指导。

CHINA SURFACE ENGINEERING

Vol. 36 No. 3 Jun. 2023

CONTENTS

《中国表面工程》第六届编委会

ISSN 1007-9289