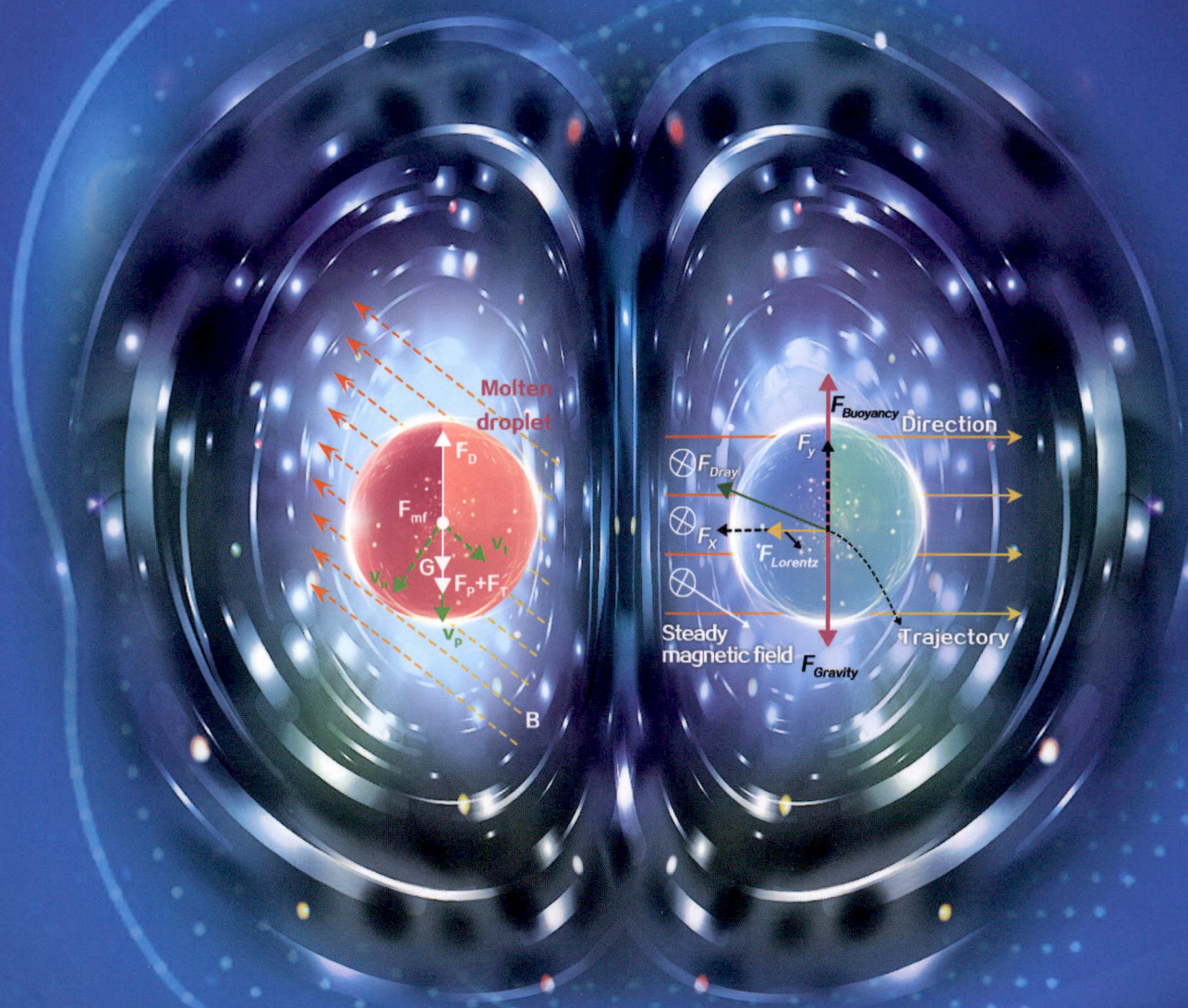


中国表面工程

CHINA SURFACE ENGINEERING



封面文章：磁场类型对金属凝固机理的影响研究综述

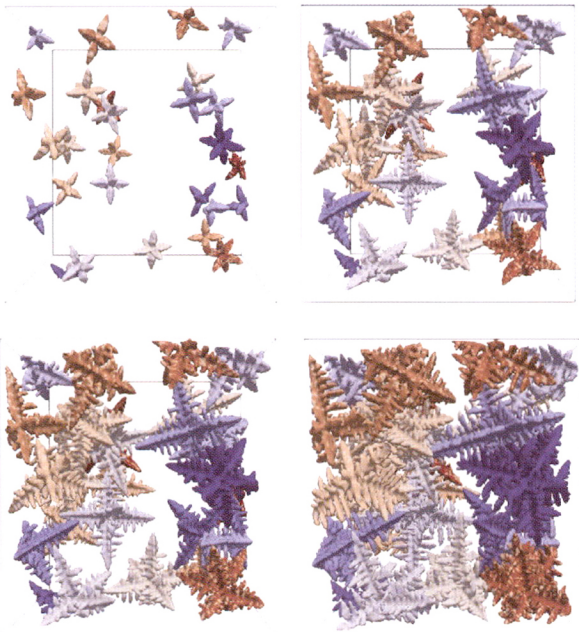
作者：宋佳鑫 郭伟玲 邢志国 李志雄
王海斗 张磊 黄艳斐

36卷 **4** 期 双
月刊
2023年8月刊

综述论文

1 磁场类型对金属凝固机理的影响研究综述

宋佳鑫 郭伟玲 邢志国 李志雄 王海斗 张 磊 黄艳斐



摘要：利用磁场辅助制备的合金综合性能优异，广泛应用于工业生产、交通运输、航空航天等领域。不同磁场参数环境下合金硬度、耐磨性等服役性能有所差异，作用机理复杂多变。对新工艺驱动下不同磁场对金属凝固过程的作用规律进行总结，弥补目前磁场辅助金属表面加工方法的研究短板，对金属表面工程发展有重大意义。归纳科研人员在不同磁场环境对金属表面加工的研究探索，分析对比金属材料在不同类型磁场环境下的晶核形核和生长过程差异，总结金属凝固过程在不同磁场下的变化规律，如晶界形貌改善、形核率提高、晶粒细化等。从晶粒微观形貌和合金宏观性能表现两方面出发，分析磁场作用下熔体内部传热传质变化，揭示稳恒磁场、脉冲磁场和交变磁场对金属凝固影响的作用机理，讨论不同参数的磁场对熔体作用效果差异，如磁场对熔池内部流动扰动、熔体内带电粒子受到的洛伦兹力等。综上，晶粒细化、合金性能提高是磁场作用下熔池传热传质变化和磁场作用力的综合体现。综合研究对比稳恒磁场、脉冲磁场和交变磁场对金属凝固的作用特点和作用机理，综述金属凝固领域当前热点问题，有助于统一磁场环境下金属凝固机理的争论，填补磁场环境下金属表面加工工艺的空白，对推进高性能金属表面制备研究有借鉴意义。

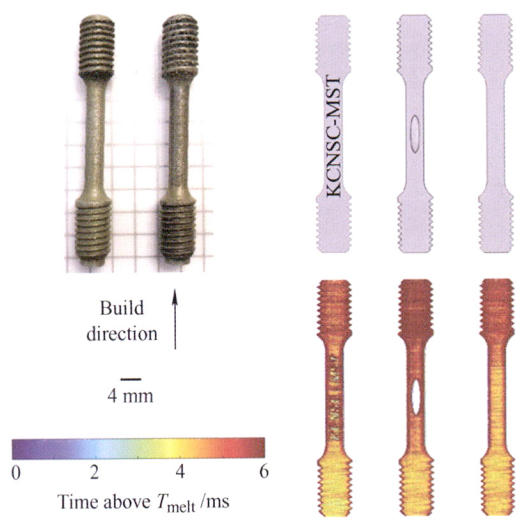
21 银涂层保护技术在航空发动机紧固件中的应用研究进展

刘 燕 李国政 贾 丹 詹胜鹏 李文轩 段海涛



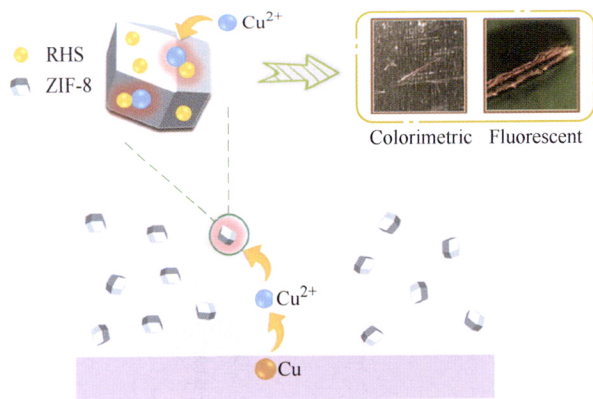
摘要：在大力发展航空业的新形势下，航空发动机紧固件的咬死失效问题逐渐成为航空领域的关注焦点。但是由于航空紧固件面临应力、高温、微动等苛刻工况，在工作过程中，表面银润滑涂层会出现形变、剥落等失效形式，这是提高航空发动机发展水平必须要解决的难题。系统阐述苛刻工况下航空发动机紧固件中存在的微动磨损、磨粒磨损、氧化磨损、粘着磨损 4 种主要磨损失效形式，对未涂覆保护涂层的螺栓表面以及对涂覆银润滑涂层的涂层表面产生的影响，对比电镀工艺和磁控溅射工艺制备的高温环境用银涂层在硬度、结合力等方面的不同，简述几种可以提高银涂层润滑能力的复合增强涂层制备技术，综述用于高温环境中紧固件保护的高硬度特性和高温特种氧化替代涂层。总结现用航空发动机失效紧固件上银涂层失效分析和现有研究结论，得出实际使用过程中银涂层软化和银的高扩散率是导致涂层失效的主要原因，对涂层保护技术在航空发动机紧固件中的应用提出建议与展望。主要提出了高温下银涂层失效问题的可能解决方法。

周 安 刘秀波 刘庆帅 朱刚贤 张世宏



摘要: 选区激光熔化 (SLM) 作为现代工业构件制造的一种主流技术, 广泛应用于汽车、航空航天及医学等领域, 对 SLM 工艺的监测及闭环控制方式进行系统梳理变得极为重要。针对 SLM 技术原理及熔池变化, 从 SLM 成形过程中的熔池温度和形貌特征综述选区激光熔化监测技术发展进程及不足, 分析闭环反馈技术的研究现状。研究表明: SLM 加工过程中熔池的变化状态是影响成形质量的重要因素, 通过光信号、声信号或多信号传感器可对熔池状态进行有效监测, 而闭环控制需要算法分析、机器学习及传感器的协同配合才能实现实时反馈及控制。根据当前监测技术的实时性较差及系统反馈控制不够完善等问题, 提出未来智能监测技术与实时闭环控制等发展方向, 为未来 SLM 成形高质量零件提供参考借鉴。

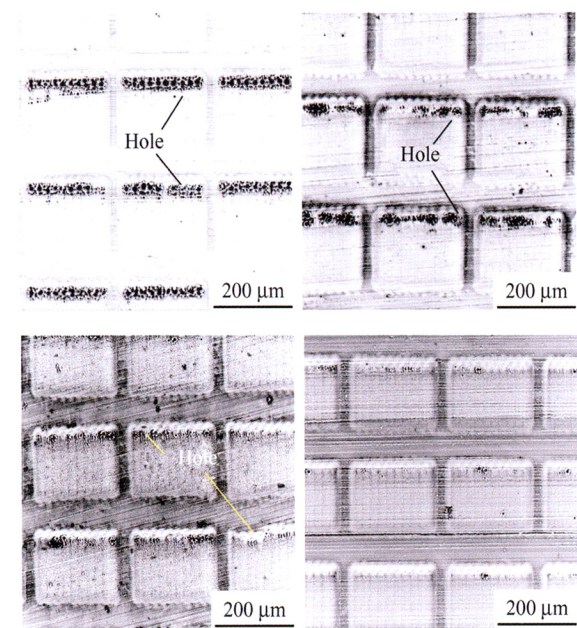
孔文泉 魏 凯 袁钰婕 刘文会 张 优



摘要: 金属有机框架材料是由金属离子和有机配体自组装而成的多孔配位聚合物, 具有大比表面积、结构功能可调、高孔隙率、高表面活性等优势, 金属有机框架材料在金属防腐领域表现出巨大的应用潜力, 然而还少有相关的研究综述, 有必要对目前金属有机框架材料在金属表面防腐涂层领域的研究成果进行综述。系统总结近年来该领域的相关研究成果, 以金属有机框架材料的自身特性和防腐机理为出发点, 分类概述金属有机框架材料功能性填料在防腐涂层中的应用以及防腐转化膜材料的最新研究。相关研究结果表明: 金属有机框架材料作防腐涂层的功能性填料或防腐转化膜能极大增强对金属的防腐保护, 金属有机框架材料功能性填料可改善涂层的致密度与相容性, 作为理想容器负载活性剂实现了涂层的自修复、腐蚀自预警等功能性; 另外, 直接在金属表面制备金属有机框架材料防腐转化膜实现了涂层的主动防护 (物理阻隔效应) 和被动防护 (响应释放缓蚀剂), 将金属有机框架材料应用在防腐涂层中增强了对金属的防护性能, 延长了金属基体的使用寿命。讨论了金属有机框架材料在应用过程中存在的问题并提出可行的解决途径, 对金属有机框架材料在金属防腐涂层领域的应用前景和发展方向进行展望。

65 飞秒激光与电沉积复合工艺制备不锈钢超疏水表面及减阻性能

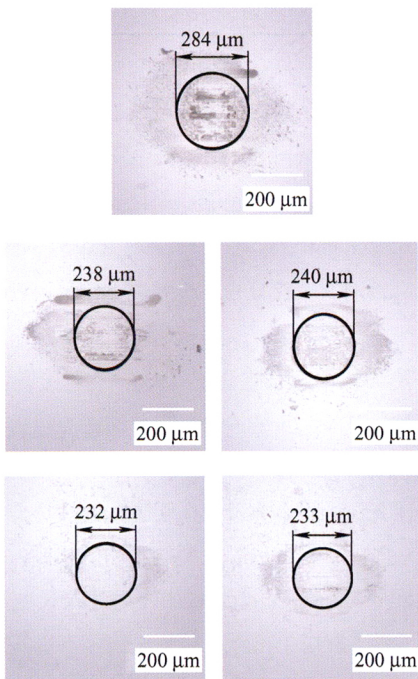
刘 浩 赵运才 底月兰 王海斗 黄艳斐



摘要：在远程管道运输过程中，固液间摩擦阻力是一个不容忽视的问题，类鲨鱼结构减阻效率低且制备困难。基于荷叶表面仿生思想，构筑微结构制备超疏水表面，减小摩擦阻力。采用飞秒激光刻蚀与电沉积复合工艺，在不锈钢表面构筑框-锥多级结构，经自组装氟硅烷制备超疏水表面，讨论复合工艺参数对微结构形貌及润湿性能的影响，探究框-锥多级结构超疏水表面减阻。结果表明，利用飞秒激光可获得周期性分布的框结构，随着激光功率的增加，微米框结构内部形成不规则沟壑金属堆积物，且关光延时的增长会产生单侧分布微孔结构，损伤基体整体强度；通过电沉积工艺制备亚微米尖锥结构镍镀层，随着电流密度的增加，镀层微结构形态发生变化，形成亚微米尖锥石结构，表面由疏水转变为超疏水。与激光刻蚀 10 次自组装氟硅烷涂层试样相比，激光刻蚀与电沉积复合工艺自组装氟硅烷涂层的试样表面接触角由 138.6°提高到 156.7°，对水和 30 wt.%甘油的减阻率分别由 8.17%、14.38%提高到 27.74%、23.69%。将激光刻蚀与电沉积相结合，构筑微纳结构经自组装制备超疏水表面，可为降低管道运输中固液间摩擦阻力提供新的技术途径。

7 HiPIMS 占空比对 Al 合金表面 Ti / DLC 涂层力学和摩擦性能的影响

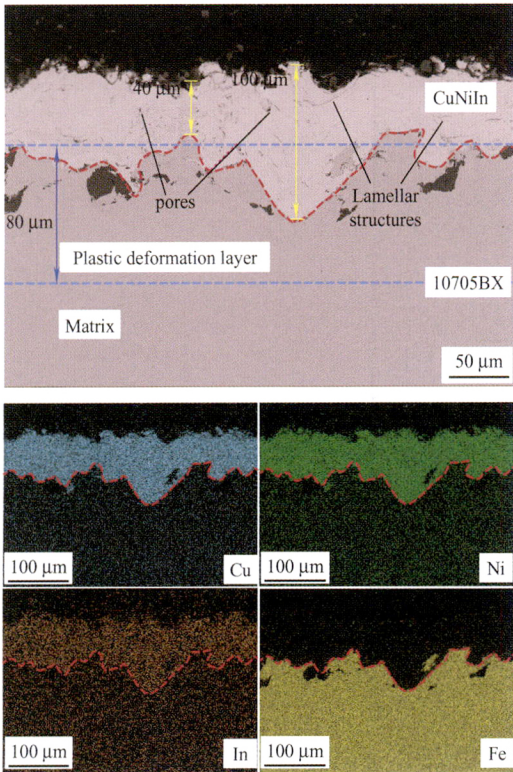
魏晨阳 白 琴 郭 鹏 柯培玲 王振玉 李 昊 汪爱英



摘要：类金刚石涂层（DLC）兼具高硬度、耐摩擦磨损和高化学惰性等优点，是理想的 Al 合金零部件耐磨防护材料之一。然而受限于 Al 合金与 DLC 间力学性能差异大，摩擦工况下承受复杂的耦合载荷作用，易导致涂层剥落失效。通过改变高功率脉冲磁控溅射技术（HiPIMS）的电源占空比（2%~10%），设计具有不同结构的 Ti 过渡层，系统研究 Al 合金基体上不同过渡层界面结构对 DLC 力学及摩擦性能的影响。结果表明，随 HiPIMS 占空比增加，所有 Ti 过渡层取向从（100）向（002）转变。相比直流磁控溅射 Ti 过渡层，HiPIMS 技术可以降低晶粒尺寸以及提高 Ti 层致密性，令 Ti 过渡层具备更强的承载能力，涂层摩擦寿命提升了约 4.5 倍。沉积具有低（100）择优取向和致密结构的 Ti 过渡层是实现 Al 合金表面高性能 Ti / DLC 涂层的关键，对解决 Al 合金零部件表面硬质涂层易剥落失效等问题提供了新思路。

89 喷丸与 CuNiIn 涂层复合处理对高温合金棒试样微动疲劳性能的影响

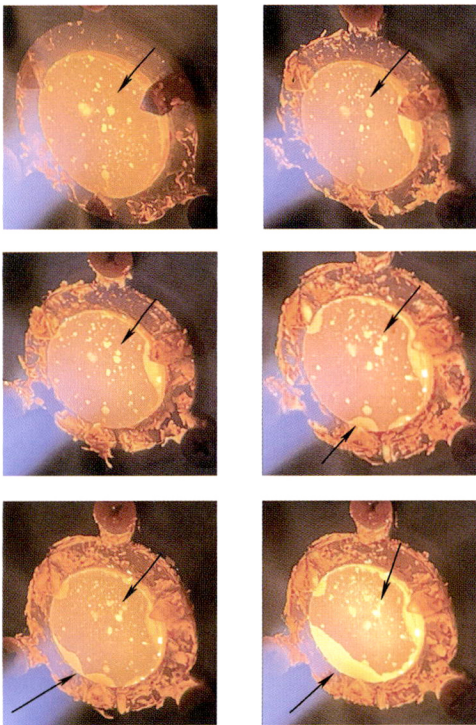
方修洋 官健恩 曹晓英 俞延庆 李定骏 蔡振兵



摘要：汽轮机叶片榫结构接触部位易发生微动疲劳失效，但行业内仍缺乏有效解决措施，因此开展了不同载荷下不同表面改性技术处理后 10705BX 铁基高温合金榫结构微动疲劳试验研究。分别对原始未处理（AS）、喷丸处理（SP）及喷丸与 CuNiIn 涂层复合处理（SC）的 10705BX 铁基高温合金榫结构试样的微动疲劳性能进行测试分析，在微动疲劳试验前后，对原始、喷丸处理及复合处理后的 10705BX 铁基高温合金的表截面形貌、断口形貌及力学性能进行表征分析。结果表明：原始、喷丸处理和复合处理试样表面粗糙度 S_a 分别为 0.08、3.38 和 13.65 μm 。喷丸处理后表面硬度提高了 16%，加工硬化层深度约为 80 μm ，微动疲劳寿命相较原始试样提高了 7.8 倍。复合处理的涂层平均厚度约为 50 μm ，微动疲劳寿命相较原始试样提高了 4.2 倍，相比较喷丸处理来说，复合处理后材料的微动疲劳寿命提升较弱。原始、喷丸处理和复合处理试样的裂纹均为多疲劳源萌生，但是喷丸和复合处理后的裂纹源数量明显减少。喷丸处理和复合处理后裂纹的扩展速率均显著提高。喷丸后试样表层获得加工硬化层并且引入残余压应力，主要提升了裂纹萌生寿命。喷丸处理及喷丸与 CuNiIn 涂层复合处理方法有望成为提升汽轮机叶片服役寿命的重要备选途径。

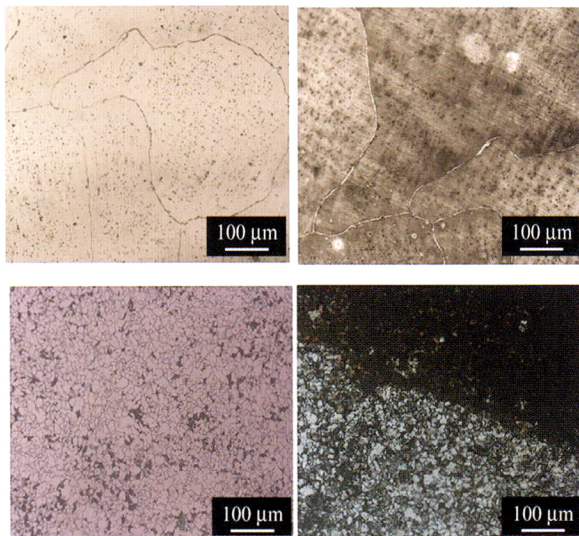
98 热障涂层脱粘裂纹缺陷的高温表征方法与演变规律

韦 峰 张从杨 刘长波 董 会 雒晓涛 邓 元 李长久



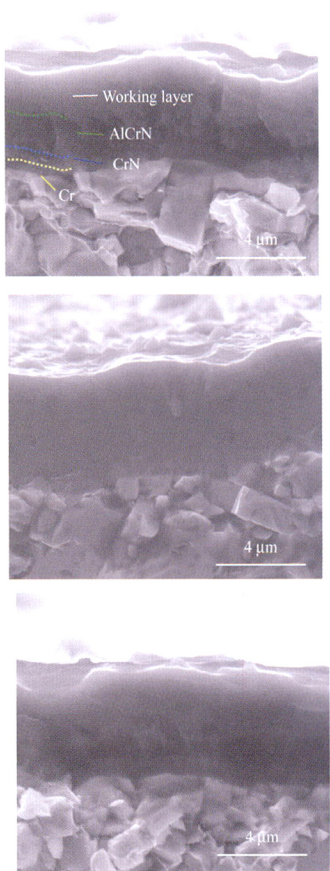
摘要：热障涂层在服役过程中相邻区域脱粘裂纹的扩展合并是造成陶瓷层最终剥落的重要原因，然而缺乏简单有效的无损测试方法。提出利用空腔高热阻在陶瓷层表面局部热积累，形成表面亮斑的特点，通过亮斑反向跟踪脱粘缺陷的新方法。结果表明，在界面处制备水溶性盐斑，继续喷涂陶瓷层后用水浴溶解的方式可在 YSZ 与金属粘结层界面有效预制特定外形与尺寸的人造脱粘裂纹缺陷；预制脱粘裂纹与表面高温亮斑尺寸呈正相关，且近似呈现为比例系数为 1.031 的线性关系，当预制裂纹直径大于 0.4 mm 时，可在涂层表面观测到亮斑，当预制裂纹直径大于 0.7 mm 时，用亮斑尺寸预测裂纹尺寸的相对误差低于 15%；在梯度热冲击循环下，热障涂层随热冲击次数的增加，表面首先出现亮斑，随后亮斑长大、合并，在 2 500 次左右热循环时合并速度加快，最终陶瓷层在亮斑处局部剥落。基于脱粘裂纹对于纵向热流的阻碍作用，提出一种人造脱粘裂纹缺陷的预制方法，并确立一种通过测量表面亮斑尺寸估计内部裂纹尺寸的热障涂层无损测量方法。解决了热障涂层高温缺陷难以实时观测的问题，并进一步研究了其高温演变规律，可为热障涂层的寿命预测提供数据支持。

王兴涛 吴一凡 孙金峰 孟永强 刘宏伟

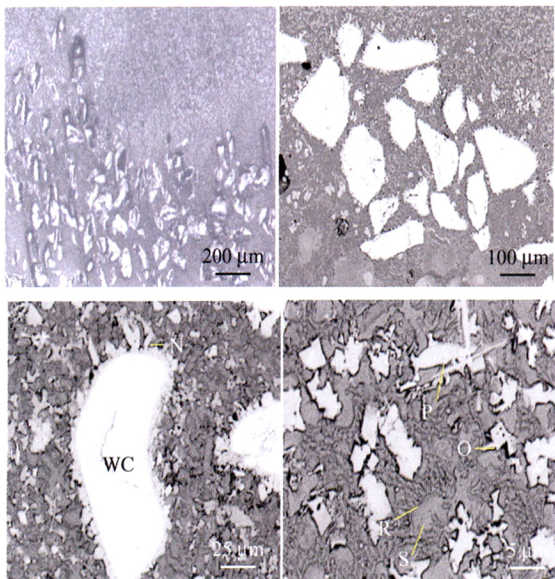


摘要: 对高熵合金涂层的成分设计已有较多探究,但针对无 Co 系高熵合金涂层研究较少。采用等离子熔覆技术在 E32 钢上制备 AlCrFeMnNi 高熵合金涂层,利用金相显微镜、SEM、EDS、XRD 等对涂层的组织形貌、相结构及元素分布等进行观察分析,采用显微硬度计、电化学工作站、XPS 表征涂层的硬度分布及耐腐蚀性能。结果表明,等离子熔覆制备的高熵合金涂层无裂纹、气孔等宏观缺陷,涂层为 BCC 结构;涂层平均硬度为 411.6 HV_{0.5},为基体硬度的 2 倍以上;在质量分数 3.5%的 NaCl 溶液中涂层的自腐蚀电位为 -0.35 V,自腐蚀电流密度为 507 nA/cm²,基体的自腐蚀电位为 -0.92 V,自腐蚀电流密度为 256 μA/cm²,涂层的自腐蚀电位和极化电流密度较基体有大幅度提升,涂层的固溶强化作用和晶格畸变作用以及 BCC 结构的螺旋位错强化是提升涂层硬度的原因,均匀的元素分布和致密的钝化膜是其耐蚀性好的主要原因。通过等离子熔覆技术得到高强度、耐腐蚀性好无 Co 系高熵合金的涂层,可对易制备、低成本的高熵合金涂层的开发、制备和应用提供一定的技术支持。

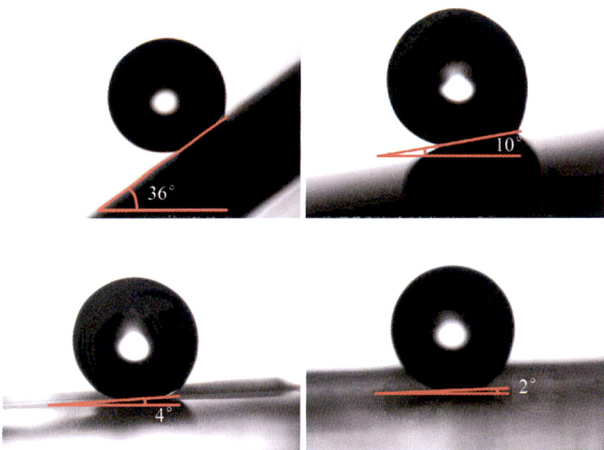
薛海鹏 房磊琦 蔡 飞 李明喜



摘要: 针对 AlCrSiN 涂层难以满足高速干式切削加工的需求,通过添加 B 元素,利用多弧离子镀技术在硬质合金刀具表面制备高速干式切削性能优异的 AlCrBSiN 涂层。采用 X 射线衍射仪、扫描电镜、高温退火炉、测力仪以及数控机床表征涂层的结构、高温性能及高速干式切削性能。结果表明,不同 B 含量 (0 at.%, 0.64 at.% 和 1.03 at.%) 的 AlCrBSiN 涂层中的相结构均为固溶的 (Al, Cr) N 相, B 和 Si 元素主要以非晶 Si₃N₄ 和 BN 的形式存在, B 和 Si 元素均能够起到细化晶粒的作用; B5 涂层 (0.64 at.%) 显示出较好的结合强度 (L_{c2} 值为 52.8 N), 而 B10 涂层 (1.03 at.%) 的硬度最高 (3 618 ± 71 HK_{0.05}); 高温退火试验显示 B5 涂层具有最佳的高温稳定性能,而高速干式车削结果进一步表明 B5 涂层车刀切削力最小,切削寿命最高 (17 min),与未添加 B 的 AlCrSiN 相比提高了 21%。涂层刀具后刀面的主要磨损机理为磨粒磨损和粘结磨损,前刀面的主要磨损机理为氧化磨损、磨粒磨损和粘结磨损。B 元素可以提高 AlCrBSiN 涂层刀具的高温稳定性能和高速干式切削性能。所制备的 AlCrBSiN 涂层能有效提高刀具表面的高温和抗切削磨损性能,在高速干式切削领域具有较好的应用情景。

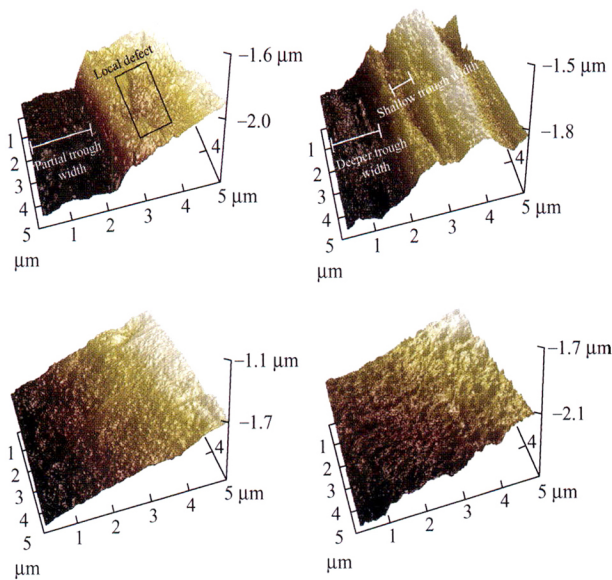


摘要：WC 沉底现象使 WC 涂层表面易于磨损，为提高其耐磨损性能须改善涂层增强相的分布不均。采用等离子熔覆技术快速制备复合碳化物增强涂层，对比研究不同原位自生碳化物 TiC、VC 和 NbC 对 WC / Ni 涂层物相组成、微观组织和干滑动摩擦磨损性能的影响。结果表明：利用 MC (M=Ti, V, Nb) 与 WC 的密度差异，实现了涂层中碳化物颗粒增强相的均匀分布。与 Nb 不同，Ti 和 V 参与未熔 WC 周边凝固组织的形成，使其形貌由矩形块状分别转变为弥散环绕颗粒和放射状圆润柱晶。原位自生 MC 中固溶 W 生成(M, W)C，当 M 为 Ti、V 或 Nb 时，分别呈现出八面体、球状和四方柱 3 种不同的晶体形态。碳化物增强 Ni 基涂层的磨损体积比基材 Q235 的大幅减小；MC 与 WC 复合增强涂层的耐磨性优于 WC 单一增强涂层，增强颗粒呈球状的原位自生 VC 对 WC / Ni 涂层耐磨性能的提升效果最佳。利用不同碳化物之间的密度互补，制备出增强相均匀分布的原位自生 MC 与 WC 复合增强涂层，获得涂层耐磨损性能的提高。



摘要：超疏水表面在防污减阻、油水分离、生物医用等领域应用广泛，在摩擦发电蓝色能源收集领域展现出新的应用前景，但其大面积制造及结构形貌的精确调控仍充满挑战。提出光刻和模塑成形相结合的微纳多级表面的可控制造工艺，分别以光刻工艺制造的微米孔和 V 形孔阳极氧化铝纳米孔为微米尺度和纳米尺度模板，采用一步模塑成形工艺实现微纳多级表面的构建，并通过改变模板尺寸简易并精确调控微纳多级表面的形貌和结构尺寸。通过接触角测量仪分析发现，相比单级纳米表面和单级微米表面，构建的微纳多级表面疏水性能显著提升，并实现超疏水，静态接触角最高达 158°，滚动角仅为 2°。最后开展超疏水微纳多级表面在水能收集方面的应用研究，采用搭建的固-液摩擦纳米发电测试装置分析表面结构对摩擦电输出性能的影响。结果表明：相比平膜和单级微米表面，微纳多级表面由于摩擦面面积增加和疏水性能增强产生更加优异的电输出信号。当水流速度为 8 mL / s 时，微纳多级表面的输出电压峰值最高为 46 V，短路电流峰值最高为 6.3 μA。提出了一步模塑成形工艺，实现了超疏水微纳多级表面的大面积、可调控制造，基于微纳多级表面构建的固-液摩擦纳米发电机有望应用于水能收集、自驱动传感等领域。

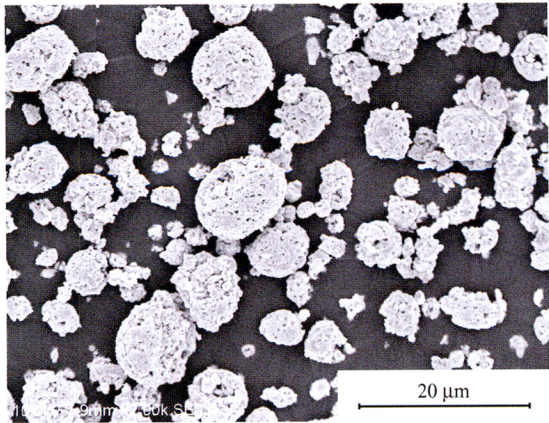
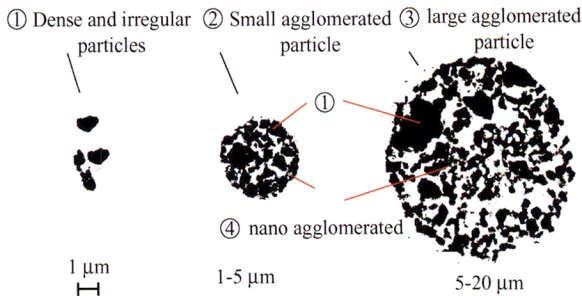
庞桂兵 闫兆彬 张智信 王满富 樊双蛟



摘要：探究脉冲电化学光整（PECF）加工过程中表面形貌变化特性及其工艺能力。在能实现表面良好加工效果的参数范围内，对 304 不锈钢车削与磨削表面进行脉冲电化学光整加工，通过对加工前后表面微观形貌变化规律的对比分析，研究脉冲电化学光整加工工艺对不同表面的整平能力。试验结果表明：脉冲电化学光整加工车削和磨削表面所能获得的最终表面粗糙度大体相当，加工后两种表面粗糙度 Ra 、 R_z 和 R_{sm} 值处于同一量级，分别达到 0.09、0.7、50 μm 左右。表面微观形貌趋于一致，表面完整性良好，表面特征指标不具有显著差异性。脉冲电化学光整加工车削和磨削表面的形貌变化过程有所差别，车削表面存在由原始表面形貌向脉冲电化学光整加工表面形貌转变的一段中间过程，磨削表面形貌则在短时间内迅速转变为脉冲电化学光整加工表面形貌。对原始表面较为粗糙的零件或者难以采用磨削加工的薄壁件，PECF 加工是一种具有实际应用价值的加工方式，且对于一些具有特殊要求的功能性表面形貌，车削后进行 PECF 加工可能成为一种新的加工方法。

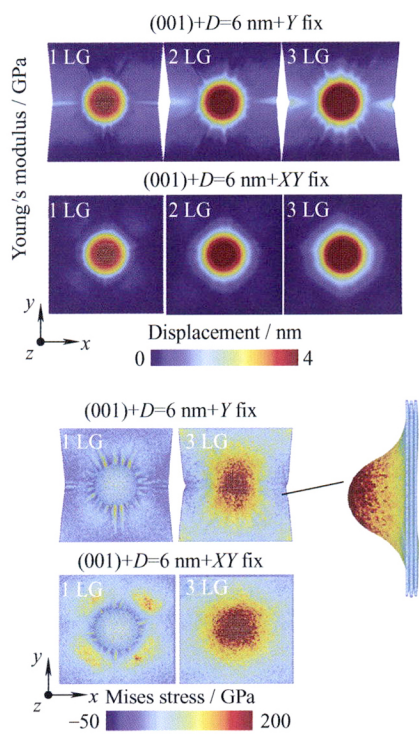
161 细团聚球形粉体的等离子物理气相沉积工艺适配性

何 箐 邹 晗 由晓明 张雨生 赵 乾



摘要：等离子物理气相沉积（PS-PVD）技术由于可实现涂层组织结构柔性调控及高沉积效率和高隔热、长寿命热障涂层制备而被广泛关注，但其粉体制备技术及工艺适配性研究进展较为缓慢。开展 PS-PVD 粉体材料工艺适配性研究，通过粉体成分及结构的有效控制，设计并制得一种采用化学共沉淀原料的 1~20 μm 的“双相”结构松散球形团聚 8YSZ 粉体，粉体具有高开孔率和一定自流动性。为了提高粉体的工艺适配性，系统研究 PS-PVD 工艺中不同喷涂距离、喷涂功率和偏离等离子射流中心不同位置的粉体沉积行为，发现通过粉体成分 / 结构的有效控制，在低喷涂功率、长喷涂距离和距离等离子射流中心的不同位置，均可实现良好的工艺适配效果及涂层气相沉积效果。通过粉体材料的优化控制可以降低气化过程中的耗能，提高粉体气相沉积效果和拓宽 PS-PVD 喷涂沉积适配的工艺窗口，实现在高能、高速等离子体中的高气相比比例沉积。在 PS-PVD 用高工艺适配性粉体及其可控制备技术等方面取得了突破，系统地开展了该工艺用粉体制备及性能调控、粉体工艺适配性规律等的研究。

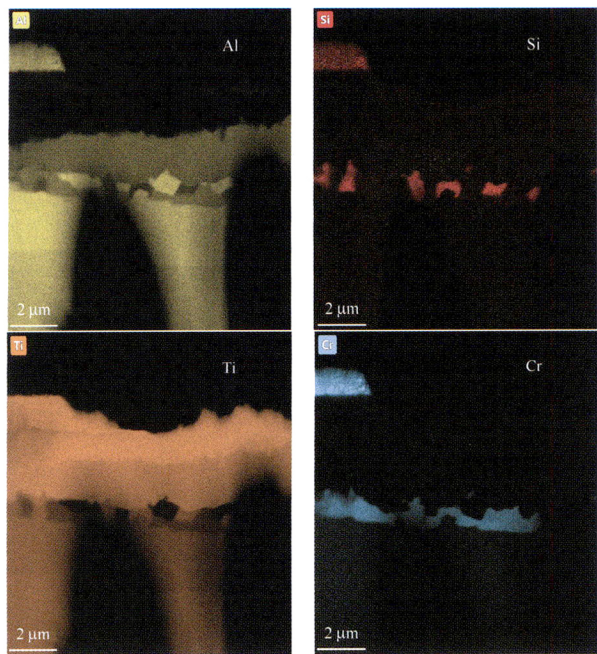
陈晶晶 占慧敏 杨 旭 李 柯 张 铜 邹小莲 刘 莹 李 凯



摘要：对铜 / 石墨烯塑性变形行为与强化性能分析对膜-基界面耦合提升金属材料服役性能起促进作用，也为纳米铜强韧机制理解提供有益参鉴价值。基于纳米压痕法对石墨烯膜-单晶铜基底的接触特性展开全原子模拟。分析基底表面有无石墨烯、覆石墨烯层数、基底晶面不同的塑性变形行为与力学强化性能，探讨石墨烯边界效应的褶皱对界面接触质量与强化性能的影响。研究表明：对铜 / 石墨烯而言，纳米压痕时的载荷与位移曲线保持线性关系，主要源于石墨烯面内弹性变形呈均匀化；相比纯铜，铜表面覆石墨烯的承载性更高，其弹性模量与硬度随覆石墨烯层数增加而线性增大。结果指出：铜表面覆三层石墨烯的硬度与弹性模量比纯铜提高约 7.4 倍，其强化效应源自石墨烯受载产生的面内均匀弹性变形与压头-膜基界面接触质量的协同作用；石墨烯褶皱处的应力集中易诱驱铜上表面产生类褶皱波纹的塑性变形痕迹。相比双边界固定的石墨烯而言，单边界固定的石墨烯褶皱变形更大，界面接触质量有所增加，而强化效果相比却降低 28%。当覆石墨烯层数相同时，不同晶面铜 / 石墨烯的力学性能和膜-基界面塑性变形有着显著各向异性特征。研究结果对微机电系统金属器件力学性能提升有重要作用。

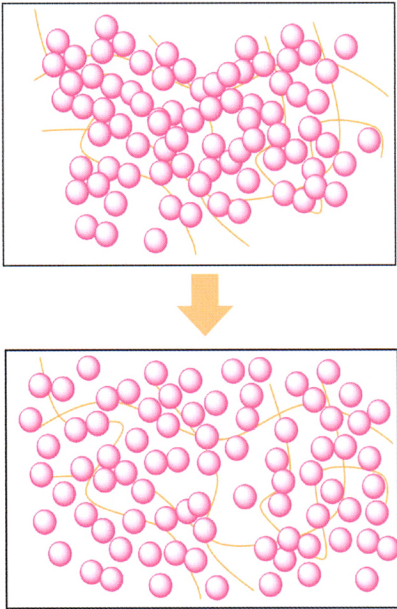
// 工 程 应 用 //

章 凯 辛 丽 程玉贤 彭 新 王 博



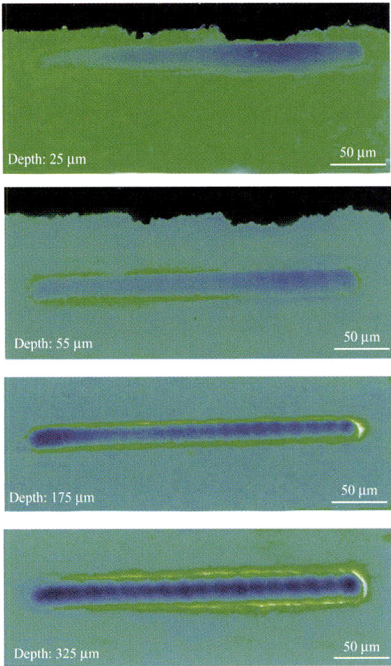
摘要：TiAl 合金作为新型高温结构材料在航空航天和汽车工业领域已获应用，然而在 850 °C 及以上温度服役时抗氧化性不足，施加氮化物涂层在提高 TiAl 合金抗氧化性和耐磨性等综合性能方面独具优势，目前关于氮化物涂层对 TiAl 基合金抗氧化性影响的研究有限。采用多弧离子镀方法在 TiAl 合金表面分别制备 AlCrN 涂层、AlCrSiN 涂层、CrAlN 涂层和 CrAlSiN 涂层，研究涂层对 TiAl 合金 900 °C 循环氧化行为的影响。XRD 结果表明，AlCrN 和 AlCrSiN 涂层主要呈现 AlN 结构，而 CrAlN 和 CrAlSiN 涂层为 CrN 结构。在 AlCrSiN 和 CrAlSiN 涂层中，Si 可能固溶于晶格中形成(Al, Cr, Si)N 和(Cr, Al, Si)N 固溶体。在 900 °C 经过 300 个周期的循环氧化，AlCrN 和 AlCrSiN 涂层表面氧化膜主要由 Al₂O₃ 组成，热循环过程中涂层中形成大量裂纹。CrAlN 和 CrAlSiN 涂层表面氧化膜主要由 Cr₂O₃ 组成，连续致密，无开裂剥落。其中 CrAlN 涂层表面 Cr₂O₃ 膜下面形成了 Al 的内氧化物，其氧化增重高于 CrAlSiN 涂层。此外，CrAlN 和 CrAlSiN 涂层均与 TiAl 合金发生较严重的互扩散，在 CrAlN / TiAl 界面和 CrAlSiN / TiAl 界面处形成较厚的互扩散层。可见，CrAlN 和 CrAlSiN 涂层显著提高了 TiAl 合金的抗高温氧化性能，而涂层中 Si 的添加使得涂层抗氧化性得到进一步的提升。研究结果可为 TiAl 合金施加氮化物涂层高温防护提供潜在可能。

李 婷 刘剑锋 郭家胜 陈 曦 高 旭 叶 辉 贺 晨 曾一兵



摘要：箭体外表面防静电涂层通常既需承受一定的温度又需防静电性能，此时涂层的表面电阻率变化规律即温度-电阻效应，对防静电涂层的研制、开发及应用有着重要的意义。以有机硅改性丙烯酸为成膜物，通过选取典型的非金属导电填料—导电炭黑和金属导电填料—镍粉和银粉，制备一系列不同导电填料含量的防静电涂层，研究导电填料的种类和含量对防静电涂层温度电阻效应的影响。研究结果表明：导电填料的种类及含量对防静电涂层的温度-电阻效应影响显著。基于体积膨胀理论，导电炭黑涂层体系随温度升高而体积膨胀，导电网络被阻断，表面电阻率随温度的升高而增大，但其正温度系数（PTC）效应不显著，PTC 强度仅为 1.24，且导电炭黑含量与其 PTC 强度呈负相关；镍粉涂层体系的 PTC 效应显著，PCT 强度高达 10^6 ，且镍粉含量与其 PTC 强度也呈负相关；银粉涂层体系则在渗流阈值前 PTC 效应显著，PTC 强度为 4.58，而渗流阈值后则几乎不表现 PTC 效应。制备了含导电炭黑和镍粉的复合导电填料涂层体系，其 PTC 强度较纯镍粉涂层体系大大降低，可为箭体外表面防静电涂料的设计提供新的思路。

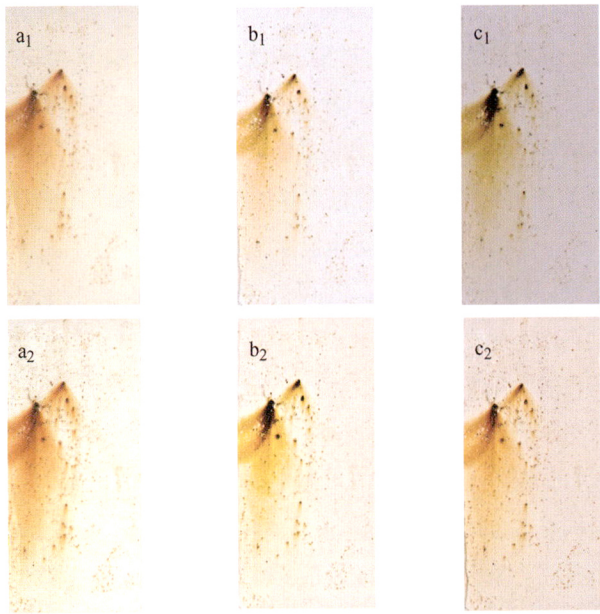
周震伟 杨 磊 马新元 徐震霖 赵 海 何宜柱



摘要：随着客运铁路高速化，列车制动盘的磨损日益加剧，严重威胁列车服役的安全性。为了提高低碳马氏体钢制动盘的耐磨性，采用表面机械研磨处理（SMAT）技术在材料表面制备梯度组织，进而延长材料的服役寿命。结果表明：经 SMAT 处理后，样品表面形成厚约 180 μm 的梯度应变层，切应变沿深度呈梯度分布。板条马氏体被挤压成塑性流线，在最表层形成亚微米晶和条状结构。微米划痕试验发现，样品表层材料的硬化率和摩擦性能随着深度呈梯度变化，耐磨性相比基体增强了 1.2 倍。在循环应力作用下，靠近样品表面的马氏体晶粒被细化，最表层材料的位错密度比基体提高了 14.6 倍，从而提高了制动盘钢的表面硬度和耐磨性。此外，与其他铁路耐磨材料相比，样品表现出较高的应变硬化速率。研究成果可为制动盘梯度应变层的工程应用提供参考。

217 基于 HSV（色相-饱和度-明度）与形状特征的涂层锈点图像识别

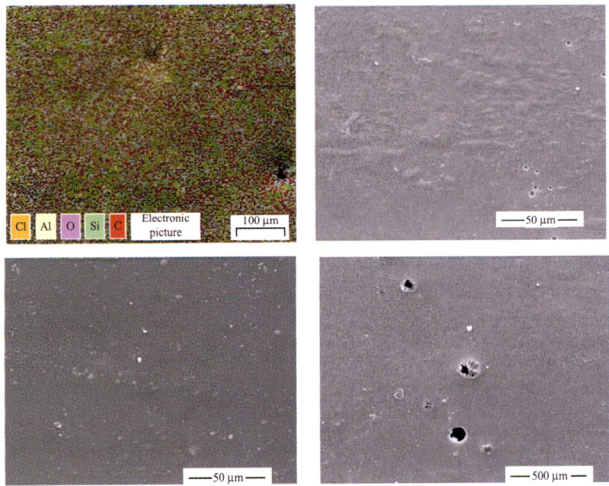
刘 佳 唐鎰磊 林 冰 王 丹 郑宏鹏 王莹莹 李 平 钟文胜



摘要：图像识别技术广泛应用于涂层领域，图像特征的选择是提升识别率的重要因素，而形状特征在涂层锈点的图像识别中未见报道。基于涂层锈点的颜色和形状特征，结合机器学习对其进行图像识别。通过采集 3 种常见自然光照强度下的 90 张涂层锈点图像，使用同态滤波对图像进行预处理，利用 HSV（色相-饱和度-明度）颜色空间来区分锈点与无锈点区域。然后提取锈点的 8 种形状特征对锈点区域进一步细化，用 Pearson 相关系数对形状特征进行筛选，将颜色特征、单一形状特征、8 种组合形状特征、筛选后的组合形状特征、颜色特征与筛选后组合形状特征的融合特征分别作为参量输入 Linear 核函数、RBF 核函数、Polynomial 核函数和 Sigmoid 核函数 4 种核函数的支持向量机（SVM）对锈点进行识别。研究结果表明：联合 SVM 与颜色、形状特征参量构建的图像识别算法能较准确地识别涂层锈点，其中基于颜色特征与筛选后形状特征的融合特征的准确识别率最高可达 93.33%。形状特征可作为另一种特征信息来提高锈点图像识别的精确度，可为涂层锈点的图像识别技术研究提供参考依据。

229 基于多因素灰色模型和遗传算法的管道内修复涂层设计

严洲宇 赵 弘 董潇潇



摘要：近年来管道内腐蚀引起的安全事故频繁发生，现在主流的修复材料是只用一种或两种刚性粒子进行改性的环氧树脂，在应对复杂管内环境时经常会在硬度和疏水性方面表现出不足，从而易导致二次事故的发生。为提升修复材料的硬度和疏水性且为不同环境提供最合适的材料配比，设计一种用于管道内修复的新型刚性纳米粒子改性环氧树脂修复涂层。这种涂层以石墨烯改性双酚 A 型环氧树脂为基材，加入不同比例的纳米 Al_2O_3 、纳米 TiO_2 、纳米 SiO_2 ，通过超声波分散处理进行制备。通过正交试验法设计试验方案，分别对涂层的 SEM 形貌、水接触角和硬度进行测试，建立关于接触角和硬度的多因素灰色模型，采用遗传算法获取涂层材料的最佳配比。试验结果表明，用灰色模型可以准确地建立涂层性能与刚性粒子之间的关系，该涂层最佳配比可以有效提高石墨烯改性双酚 A 型环氧树脂的硬度和疏水性，且平均误差在 4% 以内，可为管内修复材料的制备提供基础。

CONTENTS

- 1 Review of the Effect of Different Magnetic Field on Metal Solidification**
SONG Jiaxin GUO Weiling XING Zhiguo LI Zhixiong WANG Haidou ZHANG Lei
HUANG Yanfei
- 21 Progress in the Application of Silver Coating Protection Technology for Aero-engine Fasteners**
LIU Yan LI Guozheng JIA Dan ZHAN Shengpeng LI Wenxuan DUAN Haitao
- 36 Progress of In-process Monitoring Techniques for Selective Laser Melting**
ZHOU An LIU Xiubo LIU Qingshuai ZHU Gangxian ZHANG Shihong
- 51 Research Progress of Metal-organic Frameworks in Anti-corrosion Coatings**
KONG Wenquan WEI Kai YUAN Yujie LIU Wenhui ZHANG You
- 65 Combined Femtosecond Laser and Electrodeposition Process to Prepare Stainless-steel Superhydrophobic Surfaces with Reduced Drag**
LIU Hao ZHAO Yuncai DI Yuelan WANG Haidou HUANG Yanfei
- 77 Effect of Duty Ratio on Structure, Mechanical and Frictional Properties of Ti / DLC Coatings on Al Alloy via HiPIMS**
WEI Chenyang BAI Qin GUO Peng KE Peiling WANG Zhenyu LI Hao WANG Aiyong
- 89 Effect of Shot Peening and CuNiIn Coating Composite Treatment on Fretting Fatigue Properties of Superalloy Tenon Specimens**
FANG Xiuyang GONG Jianen CAO Xiaoying YU Yanqing LI Dingjun CAI Zhenbing
- 98 High Temperature Characterization and Evolution of Delamination Crack in Thermal Barrier Coating**
WEI Zheng ZHANG Congyang LIU Changbo DONG Hui LUO Xiaotao DENG Yuan
LI Changjiu
- 107 Microstructure and Properties of an AlCrFeMnNi High-entropy Alloy Coating Prepared Using Plasma Cladding**
WANG Xingtao WU Yifan SUN Jinfeng MENG Yongqiang LIU Hongwei

118 Deposition and High-speed Dry Cutting Performance of AlCrBSiN-coated Cutters
XUE Haipeng FANG Leiqi CAI Fei LI Mingxi

129 In-situ MC (M=Ti, V, Nb) and WC Composite Reinforcement Ni Based Coatings
CHI Jing LI Min WANG Shufeng WU Jie

140 Controllable Fabrication of Superhydrophobic Micro / nano Hierarchical Surface and Its Application for Energy Harvesting
GUO Meiling XU Zhentao WANG Cheng YANG Zhenchao YANG Mingshun LI Yan

150 Experimental on Surface Micro Morphology of Pulse Electrochemical Finishing
PANG Guibing YAN Zhaobin ZHANG Zhixin WANG Manfu FAN Shuangjiao

161 Process Suitability of Plasma Spray-physical Vapor Deposition with Fine Spherical Agglomerated Powders
HE Qing ZOU Han YOU Xiaoming ZHANG Yusheng ZHAO Qian

174 Atomic Simulation of Plastic Deformation Behavior and Mechanics Strengthening Property for Cu / graphene Material
CHEN Jingjing ZHAN Huimin YANG Xu LI Ke ZHANG Tong ZOU Xiaolian LIU Ying
LI Kai

185 Influence of AlCr(Si)N and CrAl(Si)N Coatings on the Cyclic Oxidation of TiAl Alloys at 900 °C
ZHANG Kai XIN Li CHENG Yuxian PENG Xin WANG Bo

196 Influence of Different Conductive Fillers on the Temperature-resistance Effect of Antistatic Coatings
LI Ting LIU Jianfeng GUO Jiashen CHEN Xi GAO Xu YE Hui HE Chen ZENG Yibing

206 Wear Resistance of High-speed Railway Brake Disc Reinforced via Prefabricated Surface Gradient Strain Layer
ZHOU Tingwei YANG Lei MA Xinyuan XU Zhenlin ZHAO Hai HE Yizhu

217 Rust Spot Image Recognition of Coatings Based on HSV and Shape Feature
LIU Jia TANG Junlei LIN Bing WANG Dan ZHENG Hongpeng WANG Yingying LI Ping
ZHONG Wensheng

229 Design of Pipeline Repair Coating Based on Multi-factor Grey Model and Genetic Algorithm
YAN Zhouyu ZHAO Hong DONG Xiaoxiao

《中国表面工程》第六届编委会

荣誉委员：

丁传贤* 王玉明* 左铁镛* 任露泉* 杜正恭 李 健 吴 林 宋天虎 张嗣伟
周 廉* 赵连城* 柯 伟* 钟群鹏* 海锦涛 黄先祥* 曹春晓* 臧克茂*

主 任：薛群基*

常务副主任：邵天敏

副 主 任：朱 胜 陈建敏 陈超志 王国彪 周仲荣 雷明凯

国内委员：

王 为	王立平	王钻开	王 铀	王海斗	王 维	王福会	邓春明	甘晓华*
卢 柯*	叶福兴	史玉升	史佩京	史铁林	白秀琴	朴钟宇	朱旻昊	朱嘉琦
乔培新	向 巧*	庄大明	刘志峰	刘秀波	刘宣勇	刘 敏	刘维民*	刘道新
安茂忠	孙冬柏	孙德恩	严新平*	李长久	李文亚	李争显	李志伟	李晓刚
李晓延	李铸国	李 曙	杨华勇*	杨冠军	吴忠振	吴 渊	邱长军	何丹农
何 实	冷永祥	汪久根	汪爱英	张 平	张永振	张 伟	张晨辉	陆 峰
陈华伟	陈华辉	陈守刚	陈 坚	陈学东*	陈 茜	范多旺	范志超	林 安
林忠钦*	林健凉	岳 文	金 国	周克崧*	周 峰	周留成	庞晓露	单际国
单忠德*	单 磊	孟庆实	赵景茂	段金弟	段海涛	段德莉	姜传海	宫声凯*
姚建华	姚萍屏	贺定勇	袁成清	顾卡丽	徐大可	徐久军	徐可为	高玉魁
高金吉*	涂江平	涂善东*	黄卫东	黄 峰	黄 巍	曹华军	康嘉杰	葛世荣*
董超芳	韩志武	鲁金忠	蒲吉斌	解国新	蔡振兵	蔺 增	雒建斌*	谭 俊
戴振东	鞠鹏飞							

国际委员：

Carsten Gachot (奥地利)	Dongying Ju (日本)	Duc Truong Pham (英国)
Hanlin Liao (法国)	Hanshan Dong (英国)	Hong Liang (美国)
Jacek Senkara (波兰)	Kai Cheng (英国)	Nabil Z. Nasr (美国)
Ping Xiao (英国)	Rolf Steinhilper (德国)	Ronghua Wei (美国)
Sik-Chol Kwon (韩国)	Tomasz Chmielewski (波兰)	William Schwarck (英国)
Winifred Ijomah (英国)	Yan Wang (英国)	Zhenqi Zhu (美国)
Zhong Chen (新加坡)		

(注：带*号的为中国科学院或中国工程院院士)

