

中国表面工程

CHINA SURFACE ENGINEERING

封面文章：等离子-物理气相沉积 (PS-PVD)
的材料输运行为与沉积机理研究进展

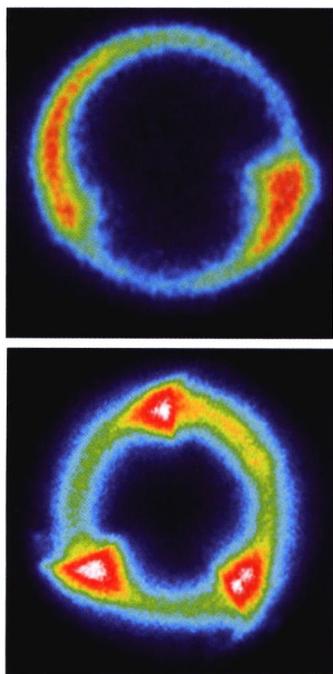
作者：黄璐 刘梅军 杨冠军

35卷 **1** 期 双
月刊
2022年2月 刊

// 综述论文 //

1 高功率脉冲磁控溅射轮辐特征等离子体研究综述

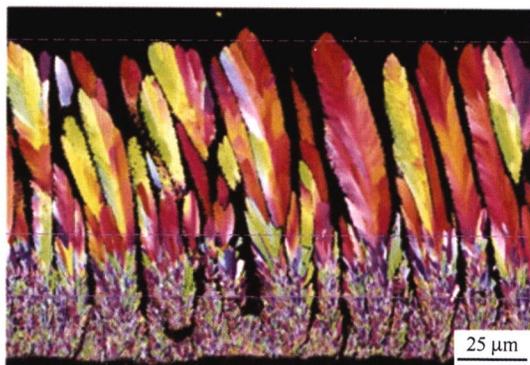
李玉阁 刘伟阳 雷明凯



摘要: 高功率脉冲磁控溅射技术 (HiPIMS) 是最新一代磁控溅射技术, 高度离化的脉冲等离子体是 HiPIMS 技术的核心特征。针对 HiPIMS 放电轮辐特征, 评述特征放电下 HiPIMS 等离子体测量、模拟及对薄膜生长作用的最新研究进展。较之常规磁控溅射技术, HiPIMS 溅射靶材粒子高度离化, 等离子体阻抗显著降低。等离子体在靶材表面形成以千米每秒速度旋转漂移的致密等离子体结构, 存在局域化和自组织特征, 可显著影响沉积粒子输运行为, 为沉积薄膜生长提供一个新的控制维度。HiPIMS 放电轮辐一般呈现扩散形和三角形两种形态, 通过介绍轮辐变化规律、形成机制的进展, 明确靶材溅射产额也对其形态有影响。另一方面, HiPIMS 轮辐结构结合其脉冲放电特点, 可控制薄膜沉积通量输运特征, 进而影响沉积薄膜的微结构、表面粗糙度等表面完整性参数。具有微秒到毫秒跨尺度多级脉冲调节能力的高功率调制脉冲磁控溅射 (MPPMS) 和高功率深振荡脉冲磁控溅射 (DOMS), 脉冲控制跨时间尺度特性带来的轮辐特征可剪裁性, 为在更大时间和空间维度上薄膜生长控制提供了可能性。

10 等离子-物理气相沉积 (PS-PVD) 的材料输运行为与沉积机理研究进展

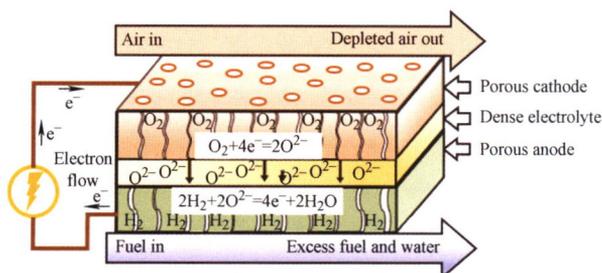
黄璐 刘梅军 杨冠军



摘要: 等离子-物理气相沉积 (PS-PVD) 具有制备层柱等多结构可控涂层的优异特性, 但针对 PS-PVD 涂层结构调控的研究多局限于试错性试验, 缺乏对涂层沉积与调控理论的研究, 因此亟需对现有研究结果进行归纳、总结, 以对 PS-PVD 沉积原理与涂层结构调控的进一步研究提供理论参考。针对 PS-PVD 所特有的涂层材料长距离输运、气液固多相态沉积过程, 从涂层结构特征出发, 综述 PS-PVD 沉积单元在经历喷枪内瞬时蒸发和喷枪外持续蒸发行为后, 所进行的长距离输运行为与沉积行为的完整过程。此外, 结合输运行为与沉积行为分析参数调控对沉积单元以及涂层结构的影响规律, 并对 PS-PVD 柱状结构涂层沉积机理的研究及涂层制备技术的发展进行展望。

25 等离子喷涂制备固体氧化物燃料电池电解质涂层研究进展

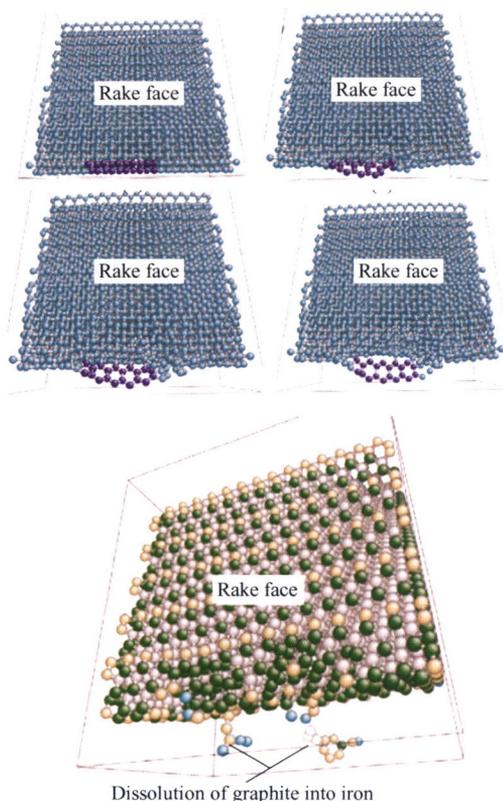
杜柯 宋琛 余敏 刘太楷 杨成浩 刘敏



摘要: 等离子喷涂作为一种高性价比的涂层沉积工艺,在固体氧化物燃料电池(SOFC)电解质制备方面比传统方式更灵活、高效,尤其在大面积电解质快速成形上,表现出良好的发展潜力。介绍 SOFC 的工作原理和研究趋势,综述电解质材料及等离子喷涂制备工艺的研究进展,指明等离子喷涂制备 SOFC 电解质涂层的发展方向。研究表明:氧化钇、氧化铈稳定的氧化锆是目前商业化应用最广泛的电解质材料,其他如氧化铈基及氧化铋基电解质还须解决还原气氛下价态变化问题,而镧锶镁氧化物和硅酸盐电解质则需解决成分和结构稳定性问题。在制备方面,传统湿化学法的高温烧结过程难以制备金属支撑型 SOFC,磁控溅射和气相沉积等镀膜技术成本高、效率低,不适合电解质大规模生产。而等离子喷涂技术具有沉积效率高,对基体热输入小,可灵活调控涂层微观结构等优势。等离子喷涂 SOFC 电解质还存在较大探索空间,基于前期相关工作为后续中低温电解质制备及优化提供思路,随着电解质粉末成本下降及喷涂设备迭代升级,等离子喷涂技术有望在未来成为大规模高效制备 SOFC 电解质涂层的重要手段。

34 黑色金属的金刚石刀具加工技术研究进展

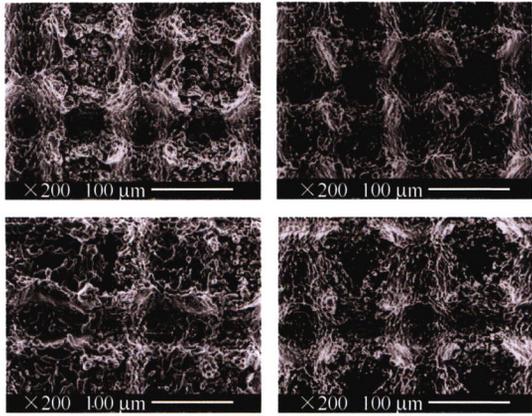
赵香港 郝秀清 岳彩旭 安庆龙 李亮 何宁



摘要: 金刚石刀具是超精密加工最理想的刀具之一,但在黑色金属超精密加工领域“石墨化”导致刀具快速磨损,其应用极大地受到了限制。首先,针对金刚石刀具的磨损机理进行介绍。然后,综述金刚石刀具切削黑色金属的几种常见方法,如刀具表面改性、工件表面改性、低温辅助切削、超声振动辅助切削等,通过研究实例来分析各方法的应用效果和存在问题,并从技术层面分析影响金刚石刀具在黑色金属加工领域发展的关键因素。最后,对金刚石刀具切削黑色金属未来的发展趋势进行探讨。总结金刚石刀具在黑色金属领域的加工方法,分析加工黑色金属时抑制金刚石刀具磨损的核心技术,对黑色金属的精密超精密加工具有重要的引领和推动作用。

53 超疏水表面激光加工技术研究进展

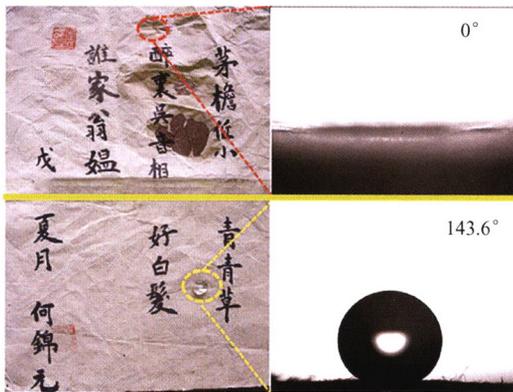
孙晓雨 孙树峰 王 津 王 茜 张丰云 张丽丽 姜明明 王萍萍 王海涛 陈希章



摘要: 超疏水表面作为最具代表性的功能性表面得到广泛的应用, 激光加工技术凭借超高加工精度和高度可控等特性, 成为制备超疏水表面微纳尺度结构的有利工具。已有大量相关试验研究, 但鲜有对加工机理和方法等进行归纳总结。从润湿理论出发, 分析超疏水表面激光加工技术研究现状。按照微纳结构成型方式, 归纳总结增材和减材激光加工制备超疏水表面的成型机理。基于成型机理系统梳理超疏水表面制备的研究进展。分析制备过程中影响材料表面超疏水性的因素。针对超疏水表面机械稳定性问题, 梳理改善和提高表面机械稳定性的方法。简述超疏水表面研究中存在的问题及其发展趋势, 指出试验研究结果的规律性总结的局限。与仅论述激光减材制备超疏水表面的综述类文章不同, 从增材和减材两个方面论述激光加工制备超疏水表面的机理, 详细分析激光减材制备超疏水表面的制备方法和表面疏水性影响因素, 对未来激光加工制备超疏水表面更深层次的研究具有指导意义。

72 超疏水材料应用于文物表面封护研究进展

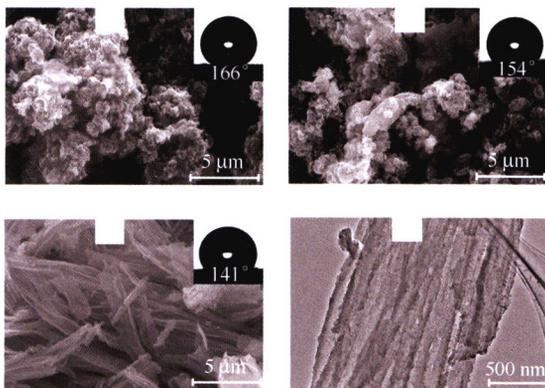
何文博 欧军飞



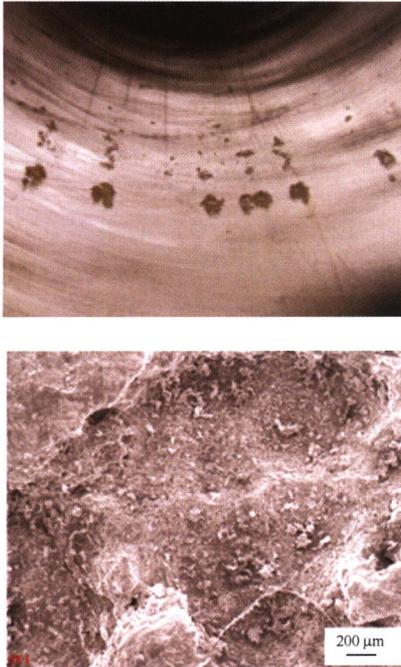
摘要: 文物是人类宝贵的历史文化遗产, 具有非常丰富的文化内涵, 但在水汽、微生物等因素作用下受损严重, 对文物保护就显得极为重要。仿生超疏水材料具有优异的疏水性及自清洁性能, 可以有效防止水汽、微生物等对于文物的侵害, 开始应用于文物保护。综述超疏水材料在文物保护领域的研究进展。介绍我国文物保护的基本原则及面临的问题, 并且对超疏水表面的润湿机理进行阐述, 归纳总结当前超疏水材料在不同类型文物保护方面的应用实例及存在的问题。最后分析影响涂层透光性、耐久性的关键技术问题, 提出超疏水封护材料的发展前景, 填补了超疏水材料应用于文物保护领域的综述空白。

86 改性聚苯胺在防腐涂层中的研究进展

周志祥 肖旭贤 孙超远 汪 伟 王玉江 魏世丞



摘要: 聚苯胺因其可逆的氧化还原特性在金属腐蚀与防护领域具有广阔的应用前景, 目前有关改性聚苯胺对涂层附着力、阻隔性能以及钝化机理的研究比较零散, 缺乏系统总结。通过对单一聚苯胺分散性差、疏水性弱等缺陷的分析, 报道近年来改性聚苯胺在防腐涂层领域中的研究思路和研究进展, 比较不同条件下改性的策略的优劣, 归纳聚苯胺结构与涂层耐腐蚀性之间存在的联系。进一步论证柔性、疏水基团取代聚苯胺有利于提升涂层抗渗性, 改变掺杂剂以及纳米氧化物、石墨烯等原位聚合制备复合填料也是提升涂层防腐性能的有效途径。展望该行业未来研究和发展的趋势, 可为今后聚苯胺的改性工作提供理论指导。

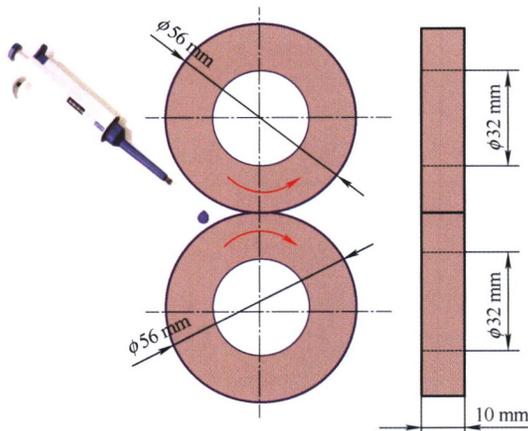


摘要:煤矿综采液压支架是控制采煤工作面矿山压力的大型核心装备,是现代采煤作业安全防护、作业空间扩大和采煤效率提高的关键,主要由液压件(立柱、千斤顶)、承载结构件(顶梁、掩护梁和底座等)、推移装置、控制系统和其他辅助装置组成,往往在极其恶劣复杂的矿井环境中服役,局部容易发生变形损伤、疲劳和腐蚀。对其关键部件进行失效分析及剩余寿命评估,是推动整机再制造和促进绿色循环经济发展的基本前提条件。对顶梁、底座、连杆、立柱等关键部件的失效形式及原因进行综述与分析,指出结构件的失效原因分析需要受到更多关注。总结支架寿命评估的研究现状,指出目前的研究集中在设计阶段的强度校核和寿命预估上,而关于服役了一段时间的支架的剩余寿命研究仍是空白。最后提出基于断裂力学利用有限元模拟进行剩余寿命评估的发展趋势。

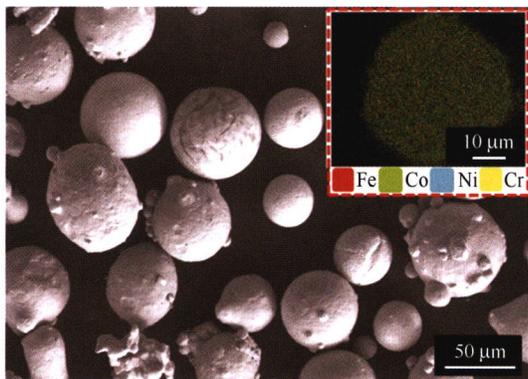
// 研究论文 //

107 水基摩擦调节剂作用下轮轨黏着恢复过程

李 群 丁昊昊 师陆冰 张沐玥 李佳辛 王文健 刘启跃



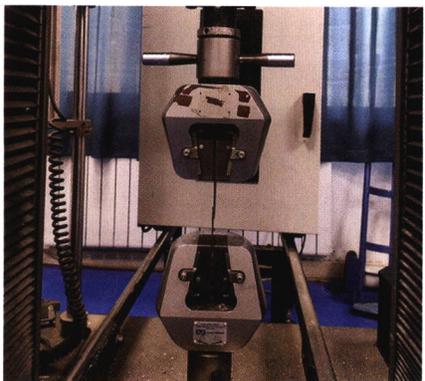
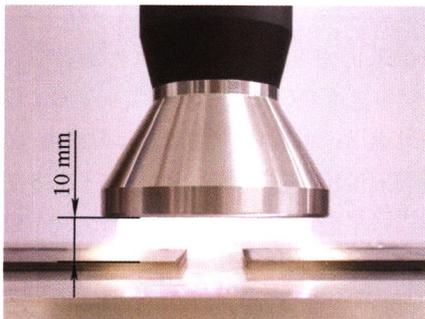
摘要:摩擦调节剂(FM)在轮轨界面黏着行为调控方面具有广阔的应用前景,但目前针对其作用下的恢复过程研究开展较少。在MJP-30A轮轨滚动磨损与接触疲劳试验机上进行FM及基本液体组分水和丙三醇溶液不同加入量工况下的轮轨黏着恢复试验,获得不同加入量工况下黏着系数随循环转数恢复过程的完整曲线,分析三种液体恢复时间及润滑状态。结果表明:不同液体介质下的轮轨黏着恢复过程曲线有较大差异,与干态相比,水、丙三醇溶液、FM界面状态使黏着系数明显降低,且水、丙三醇溶液工况下黏着系数出现二次减小后逐渐恢复增加至稳定水平;随FM加入量的增加,恢复时间逐渐增加直至趋于为稳定,加入足量FM后,恢复过程润滑状态先后经历弹性流体润滑、混合润滑、边界润滑,直至最后干摩擦;FM加入量为200 μL时,出现黏着系数降低至0.1以下现象,试验工况下FM极限加入量为200 μL;随循环转数的增加,FM的流变指数逐渐减小,FM承担压力逐渐减小,固体微凸体承担压力逐渐增加,流变指数由1减小至0.75时固体承载率由1%增加至46%。研究揭示了水基FM作用下轮轨黏着恢复机理,可为其在实际现场应用提供参考依据。



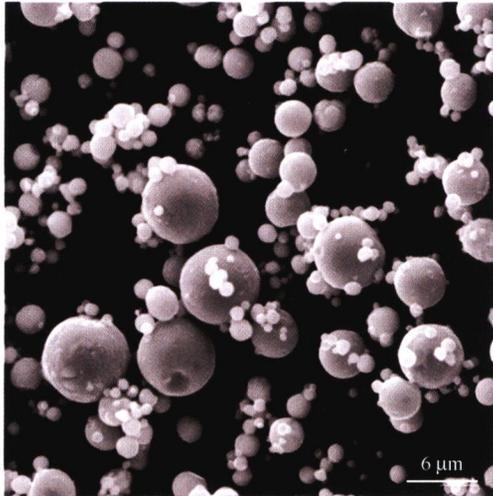
摘要: 针对激光熔覆高熵合金涂层的成分设计已有较多探究,但激光工艺参数对涂层结构与性能的影响尚缺乏系统研究。采用激光熔覆技术在 316L 不锈钢基体表面制备 FeCoNiCr 高熵合金涂层,系统探究激光功率(1.2 ~2.0 kW)对 FeCoNiCr 高熵合金涂层的组织结构以及耐腐蚀性能的影响规律。不同激光功率制备的 FeCoNiCr 涂层均由典型的单一面心立方结构(FCC)组成,但随着激光功率的增大,涂层逐渐出现择优取向。FeCoNiCr 涂层呈现典型的双层组织结构特征,底部为柱状晶,顶部为等轴晶,但随着激光功率增加,顶部等轴晶逐渐向柱状晶转变。随着激光功率的增加,FeCoNiCr 涂层混合焓值逐渐下降。FeCoNiCr 涂层具有优异的耐腐蚀性能,但随激光功率的增加而逐渐减弱。其中,当功率为 1.2 kW 时,涂层的自腐蚀电流密度最小,自腐蚀电压最大且涂层表面无腐蚀坑,具有最佳的耐腐蚀性能,优于 316L 基体以及 Stellite6 和 Ni60 等常规激光熔覆涂层。通过优化激光功率获得具有良好耐腐蚀性能的激光熔覆 FeCoNiCr 高熵合金涂层,可对该类涂层的开发、制备和应用提供一定的理论指导和技术支持。

125 等离子体表面处理对碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)胶接性能及表面特性的影响

邹田春 刘志浩 李晔 巨乐章



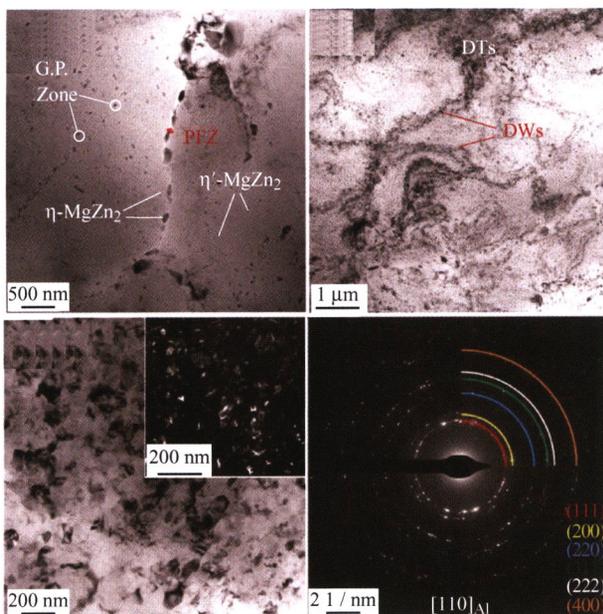
摘要: 为改善碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)表面润湿性能及表面活性,提高其胶接强度,采用旋喷式空气等离子体处理设备对 CFRP 进行表面处理,通过拉伸试验探究等离子体表面处理距离、处理速度对 CFRP 胶接性能的影响,并利用接触角测量仪、原子力显微镜(AFM)、X 射线光电子能谱分析仪(XPS)等测试技术,探究等离子体处理对 CFRP 表面润湿性、表面形貌、表面化学组分等表面特性的影响。结果表明:CFRP 表面经等离子体处理后,胶接强度逐渐提高,处理距离 h 为 10 mm,处理速度 v 为 2 mm/s 时,接头强度最大。接头破坏模式从界面破坏转变为混合破坏模式。随等离子体处理距离及速度的降低,复合材料表面水接触角降低,表面自由能及极性分量增加,表面润湿性及吸附性能提高。经等离子体处理后,CFRP 表面产生微米级沟壑,表面积增加,但当处理距离较近时,部分表面树脂因等离子体热响应产生损伤,不利于胶接性能的进一步提升。复合材料基体与等离子体中活性粒子相互作用后,表面含氧基团增多,并产生 C—O/C—O、C=O/O—C=O 等较为活泼的含氧基团,有利于复合材料与胶粘剂形成牢固的化学键合。等离子体处理可以显著提高复合材料表面润湿性、表面活性及胶接性能。



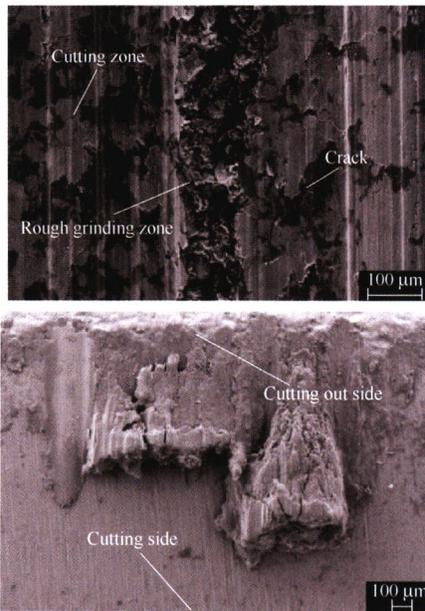
摘要: 为改善传统渗锌层组织结构及腐蚀性能,采用甲酸镍和锌粉作为渗剂金属,通过机械能助渗法在 Q235 钢表面制备 Zn-Ni 合金渗层。结合扫描电镜 (SEM)、EDS 能谱和 X 射线衍射仪 (XRD),分析 Zn-Ni 合金渗层的表面、截面和断面形貌;利用极化曲线和电化学阻抗谱 (EIS),表征 Zn-Ni 合金渗层在 3.5%NaCl 溶液中的电化学行为;通过中性盐雾试验测试 Zn-Ni 合金渗层的耐腐蚀性能。结果表明:制备得到 Zn-Ni 合金渗层的厚度为 153 μm;渗层主要由 $\Gamma(\text{Fe}_{11}\text{Zn}_{40})$ 相、 $\zeta(\text{FeZn}_{15})$ 相和 $\text{Ni}_2\text{Zn}_{11}$ 金属间化合物组成,渗层结合方式属于冶金结合;Zn-Ni 渗层中性盐雾试验出现红锈的时间相比渗锌层延长 240 h,自腐蚀电位从 -1.222 V 正移至 -0.957 V,渗层电阻提高 $352 \Omega \cdot \text{cm}^2$;Ni 对改善渗层表面组织状态和提高渗层耐腐蚀性具有显著价值。通过添加甲酸镍制备的 Zn-Ni 合金渗层相比渗锌层组织结构和腐蚀性能得到明显改善。

144 超声滚压对 7075 铝合金耐腐蚀性能的影响

李波 孙清 刘卓毅 樊磊 何锦航 杨明



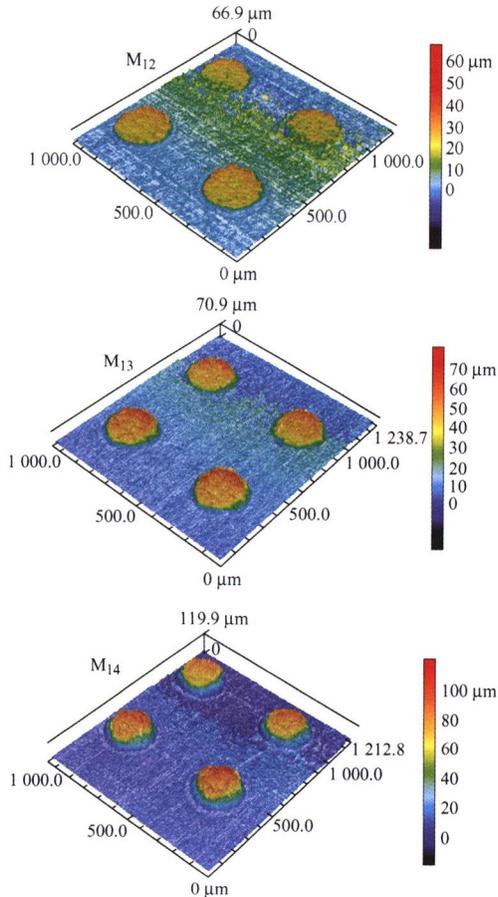
摘要: 表面纳米化处理是一种有效改善耐腐蚀性能的手段,但受表面粗糙度和残余应力等因素的影响,其相关机制并不清晰。运用透射电镜 (TEM) 和扫描电镜 (SEM) 研究经超声表面滚压工艺 (USR) 处理后 7075 铝合金的组织性能。结果表明:经 1 道次和 15 道次 USRP 处理后,7075 铝合金表面粗糙度减小并且引入了残余压应力。滚压 15 个道次的试样表面能获得平均晶粒尺寸为 52 nm 的纳米晶。相较于未处理试样,经 1 道次和 15 道次 USRP 处理后试样的耐腐蚀性能均显著提高。其中,滚压 15 个道次试样的耐腐蚀性能提升更为显著。这主要是因为纳米晶可以使材料表面形成更加致密的钝化膜,导致其耐腐蚀性能显著提高,而表面粗糙度降低和引入残余压应力是提升耐腐蚀性能的次要因素。对比分析残余应力、表面粗糙度和表面纳米晶对 7075 铝合金耐腐蚀性能的影响,揭示了 7075 铝合金经表面纳米化处理后的耐腐蚀性能提升的机制。



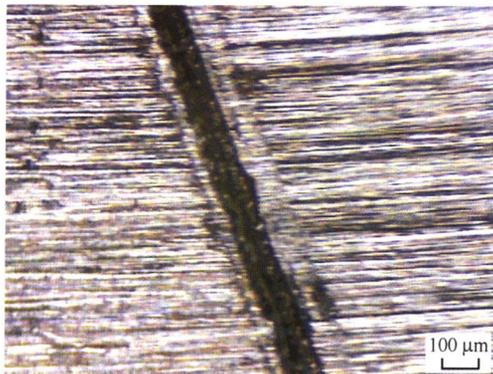
摘要: 为了探究航空发动机可磨耗封严涂层与叶片在高速刮磨过程中磨损和黏附情况,使用大气等离子喷涂方法制备 AISi-PHB 中低温封严涂层,对其进行高速刮磨试验,并对涂层和叶尖形貌和黏附形态进行研究。通过高速转子试验台测得刮磨过程中径向力和切向力并拟合刮磨温度曲线。采用共聚焦显微镜和扫描电镜设备获取涂层和叶尖表截面形貌、EDS 面扫描能谱以及涂层表面粗糙度,采用高精度电子秤测得涂层和叶尖失重量并计算失重速率,进一步佐证刮磨温度变化趋势。结果表明:高速刮磨时的单次切削量影响涂层失重速率,且产生不同的刮磨温度,刮磨温度影响叶尖黏附物状态;叶尖黏附物形态进一步影响刮磨后的涂层表面形貌,最终影响涂层封严性能。对高速刮磨过程中涂层刮磨形貌和叶尖黏附形态进行定性和定量分析,可为判断不同刮磨形态对涂层使用性能影响提供参考。

162 微观凸织构及润湿性对橡胶滑动接触界面摩擦特性的影响

裴 宁 刘小君 季佳伟 张 涛 王兆长 焦云龙 刘 焜



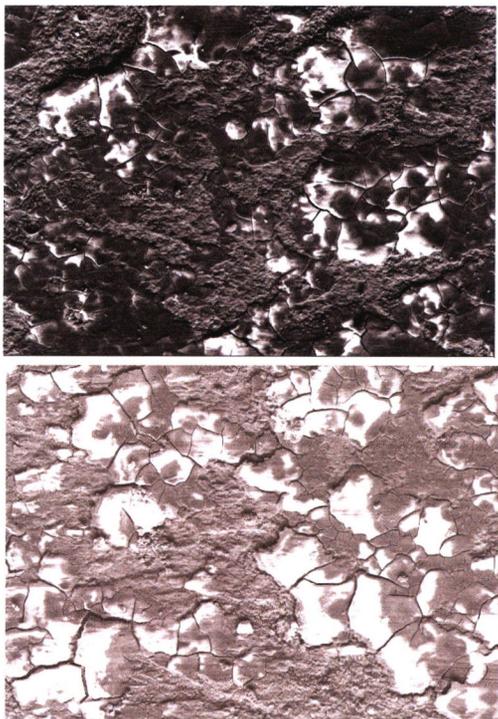
摘要: 橡胶材料在日常生活和工业发展中有着广泛的应用,现有研究主要针对橡胶材料的黏弹特性、表面改性等方面展开,而固体表面微观织构对橡胶滑动接触界面摩擦特性的影响研究较少。针对橡胶滑动接触界面,在往复摩擦试验机上以钢球和 PDMS 橡胶块组成摩擦副进行往复摩擦试验,通过改变织构类型和形貌参数来对不同表面形貌下的橡胶滑动摩擦特性进行相关探究,同时还考虑表面润湿性对界面摩擦因数的影响。试验研究表明:润滑状态下橡胶表面添加适当凸织构会降低滑动摩擦因数,微织构形状、面积占有率、高度和直径对橡胶表面滑动摩擦因数和接触角大小都有影响,尤其对于长槽织构,其摩擦因数和接触角大小呈现出方向性。结合摩擦因数和润湿性规律发现,一定范围内增大凸织构直径,橡胶表面润湿性变好,摩擦因数减小;增大凸织构面积占有率、高度时橡胶表面润湿性变差,摩擦因数反而减小。研究橡胶表面微观凸织构及其诱发的润湿性变化对橡胶滑动接触界面摩擦特性的影响,可为橡胶材料表面的摩擦学设计提供理论基础。



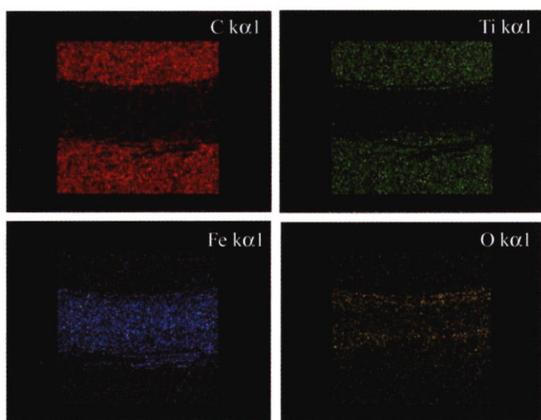
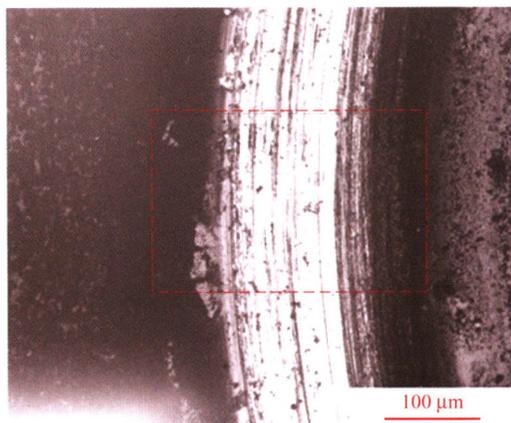
摘要: 目前对表面织构润滑减摩机理的认识还不够完善。为研究不同织构类型所适用的最佳工况, 以内燃机活塞-缸套摩擦副为研究对象, 采用时均雷诺方程及周期边界条件, 建立织构条件下平面摩擦副润滑油膜的控制方程。通过试验测试结合流场分析, 明确表面均布凹坑型微织构和斜槽型微织构的润滑减摩机制。进一步对比坑-槽复合型织构和槽-槽耦合对摩时摩擦因数的变化规律, 从转速和载荷的角度明确适合各织构类型的最优工况。研究发现: 斜槽型织构具有更优的减摩效果, 并在负载 100 N 时摩擦因数最优, 转速对摩擦因数的影响较小; 凹坑型织构和复合型织构在 80 N 载荷下减摩效果最佳, 在 350 r/min 时摩擦因数达到最小值; 耦合槽型织构在低承载时摩擦因数低于单斜槽织构(最大相差 10.2%), 转速对摩擦因数的影响较小。针对几种织构类型所适应的最优工况进行研究, 明确了不同工况下的织构类型的选择和优化。

183 不同纳米 WS_2 含量 Ni-P-TiN- WS_2 复合化学镀层的制备及其摩擦学性能

杨芳儿 兰翔刘斌 沈淑康 黄寅迪 郑晓华



摘要: Ni-P-TiN 化学复合镀层具有比 Ni-P 镀层更高的硬度和耐磨性, 但其表面粗糙度大, 与对偶件之间的摩擦因数高, 应用潜力受到限制。通过在化学镀液中添加不同用量的纳米 WS_2 颗粒和固定用量的 TiN 颗粒, 在低碳钢表面制备 Ni-P-TiN- WS_2 复合镀层。采用 X 射线能谱仪 (EDS)、扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 对镀层的化学成分 (质量分数)、表面形貌及微观结构进行表征, 并利用球盘式摩擦磨损试验机测试复合镀层的摩擦磨损性能。结果表明: 纳米 WS_2 颗粒与纳米 TiN 颗粒的共沉积可使镀层表面更加致密、平整。随着镀液中纳米 WS_2 用量的增加, 复合镀层的硬度先减小后增大, 与氮化硅陶瓷球的摩擦因数则先升后降, 磨损率显著下降, 耐磨性增强。镀液中纳米 WS_2 粉末的用量为 2.5 g/L 时复合镀层的摩擦学性能最佳。纳米 WS_2 颗粒的加入及用量优化可显著改善复合镀层的综合性能, 可为发展高耐磨低摩擦因数的先进涂层提供 借鉴。

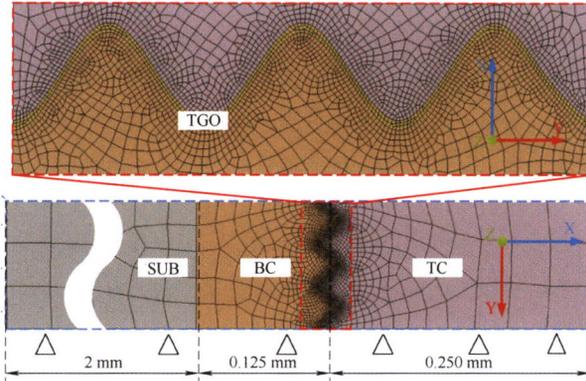


摘要: 针对非晶碳基薄膜高内应力和低膜基结合强度的问题,采用闭合场非平衡磁控溅射系统在 316L 不锈钢基体上制备多层结构掺杂类石墨薄膜 (GLC),探究载荷、摩擦副和介质环境对薄膜摩擦学行为的影响。结果表明,制备得到的多层结构 GLC 薄膜结构致密均匀,膜基之间没有明显缺陷,且力学性能良好。薄膜在干摩擦条件下的摩擦因数曲线呈明显的三阶段特征,分别对应于轻微的磨粒磨损、薄膜的剥离以及对磨球上碳质转移膜的形成。薄膜的平均摩擦因数随载荷的增加而显著提高,磨损率呈先减小后增大的趋势。相对于 ZrO_2 陶瓷球, Si_3N_4 陶瓷球因其较高的黏着倾向和较大的赫兹接触半径导致其较高的摩擦因数和磨损率。GCr15 金属球因其较低的硬度,导致碳质转移膜随金属磨削的剥离而脱落,造成相对较高的摩擦因数和磨损率。相对于室温空气环境下, GLC 薄膜在 NaCl 溶液中由于受到水溶液的冲洗和腐蚀介质 Cl^- 的侵蚀,导致薄膜从基体的快速剥离,造成更高的摩擦因数和磨损率。研究成果可为提高非晶碳基薄膜在不同工作环境下的服役寿命和使用效率提供理论指导。

201 温度梯度下石墨烯薄片定向运动的分子动力学模拟

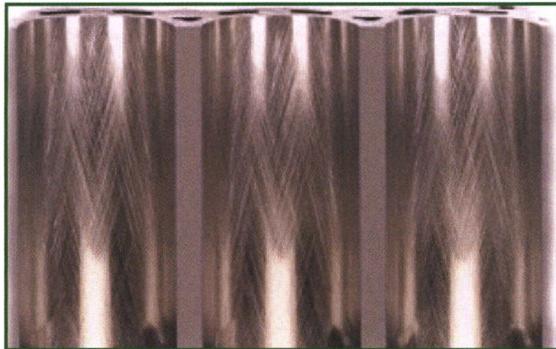


摘要: 固体在具有温度梯度的表面会从高温区向低温区定向迁移。为解明这种热驱运动的机理及影响因素,采用分子动力学模拟方法研究不同温度梯度下石墨烯薄片在单层石墨烯表面上的定向运动,分析石墨烯薄片在运动过程中的速度、能量变化。研究观察到,在不同温度梯度下石墨烯薄片的定向运动,即从石墨烯表面的热端运动到冷端,温度梯度越高,石墨烯薄片的运动距离越远,运动速度越快,且石墨烯薄片的运动速度与当前接触表面的温度相关。最后,从功和自由能的角度对这种热驱运动的机理进行分析。研究发现,系统对石墨烯薄片做正功,并且随着温度梯度的增大,石墨烯薄片所受力做的功越大;石墨烯薄片在运动过程中自由能不断减小,且向着系统能量低的方向运动。



摘要: 热障涂层寿命受到界面波长和幅值等微观因素的影响, 但对其影响机制并不清楚。首先, 基于 Manson-Coffin 公式和累计损伤理论, 建立热障涂层寿命预测模型, 并将拟合问题转化为优化问题, 采用遗传算法求解寿命模型中的系数。然后, 基于涂层试验数据建立热障涂层二维轴对称有限元模型, 研究并确定可用于准确预测涂层寿命的应力应变信息类型。最后, 采用响应面法选取陶瓷层厚度、黏结层厚度、界面波长和幅值作为影响因素, 开展涂层寿命的微观影响因素研究。结果表明, 使用循环等效应变范围进行涂层寿命预测的最大误差和平均误差最小, 分别为 50% 和 21%; 涂层寿命随陶瓷层厚度的增加略微上升, 随黏结层厚度的增加先下降后上升, 随界面波长的增加先上升后下降, 随界面幅值的增加而下降, 且界面幅值对涂层寿命的影响最大; 最优组合的涂层寿命为 947 次循环, 与初始值相比提高了 163.1%。给出不同涂层厚度下使涂层寿命达到极值的波长与幅值选择公式, 研究成果可为热障涂层的寿命预测和结构优化设计提供方法与理论指导。

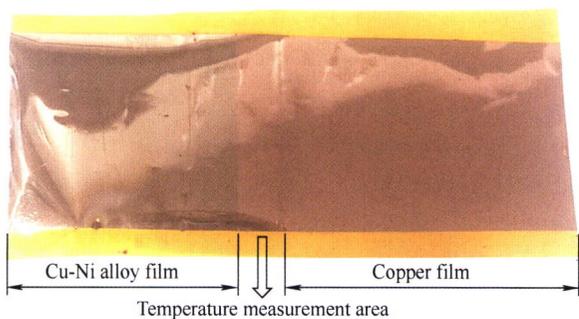
220 基于分块迭代函数系统的缸套表面织构的分形表征



摘要: 表面织构的物理特征是影响活塞组件-缸套系统摩擦学特性和织构减摩效应的关键因素。为了准确有效地描述活塞组件-缸套系统减摩织构的物理特征, 提出一种基于曲波变换和分块迭代函数系统 (Partitioned iterated function system, PIFS) 的减摩织构物理特征的定量表征方法。从活塞组件-缸套系统减摩织构表面的灰度图像出发, 运用离散曲波变换方法对减摩织构表面的灰度图像在各个方向上进行多尺度分离。研究与减摩织构物理特征相关的灰度图像信息的分块迭代函数系统分形描述方法, 通过计算减摩织构物理特征的分形维数, 并与差分盒维数 (differential box-counting, DBC) 方法计算得到的分形维数进行对比, 验证 PIFS 方法的有效性。结果表明, 与差分盒维数方法计算得到的分形维数相比, 针对不同网纹织构和不同形状组合、截面尺寸以及深度的凹坑织构, PIFS 方法计算得到的分形维数能够更为敏感和有效地反映减摩织构物理特征的变化。

231 磁控溅射法制备 T 型柔性薄膜热电偶

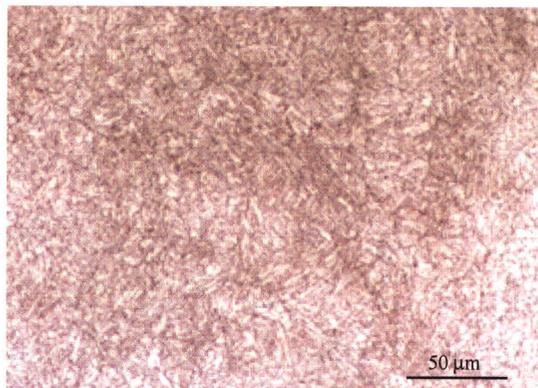
熊智淳 张哲娟 凌彦萃



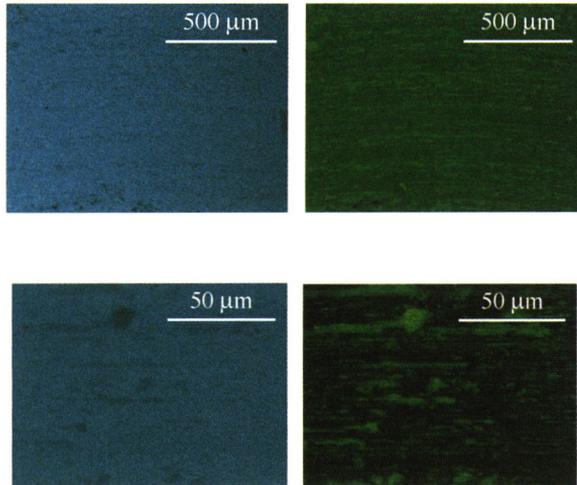
摘要: 为解决测温元器件薄而不柔的问题, 适应柔性测温技术需求, 采用真空卷绕磁控溅射技术制备 T 型柔性薄膜热电偶。通过对制备过程中溅射功率和时间的研究, 系统分析制备条件对柔性薄膜热电偶的薄膜厚度及表面电阻的影响, 将 T 型柔性薄膜热电偶进行校准测试后, 确定最佳制备条件。结果表明, 80 W 直流溅射 40 min 制得阳极铜膜; 150 W 直流溅射 40 min 制得阴极铜镍合金 (康铜) 膜, 组合而成的柔性热电偶测温性能最佳。磁控溅射工艺制备厚度为 0.05 mm、长度为 130 mm 以上的 T 型柔性薄膜热电偶, 其温度测量范围可达 $-50.0 \sim 150.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度最大偏差仅为 $\pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 具有良好的灵敏度及测温能力。T 型柔性薄膜热电偶的可控制备, 实现 T 型热电偶既柔又薄, 减少传统测量方式引起的误差, 为其大规模生产应用奠定了基础。

237 激光相变强化工艺参数对 40CrNiMo 钢组织与耐磨性的影响

聂翔宇 汤海波 刘澜涛 何蓓 刘栋



摘要: 航空发动机传动部件服役过程易磨损失效, 为提高其寿命和可靠性需进行表面强化。在 40CrNiMo 合金钢表面进行激光相变强化处理, 通过调控扫描速度获得不同激光相变强化区组织, 对其显微硬度和摩擦磨损性能进行表征。结果表明, 随扫描速度降低, 硬化层宽度和深度增大, 显微组织变粗, 马氏体含量增加。不同扫描速度下, 硬化层表面显微硬差异小, 为 77~789 HV, 相比基材(330 HV)提升 135%以上。激光相变强化处理后, 试样耐磨性大幅提升, 硬化区组织为孪晶马氏体+回火索氏体的试样耐磨性最优, 摩擦因数相比基材降低 24.9%, 磨损体积减少 94.3%。研究表明, 由高强的细小孪晶马氏体和韧性较好的细小回火索氏体组成的复相组织, 能有效阻碍裂纹形成和扩展, 显著提升耐磨性能。调控激光相变强化工艺参数, 获得高强马氏体+韧性相的复相组织, 能获得优异的耐磨性能。



摘要: 重载条件下机械装备螺栓联结界面摩擦性能不足极易导致失效行为。为探究表面处理对螺栓联结界面摩擦与抗滑移性能的作用效果,提高界面摩擦性能,首先观测分析喷砂、喷砂喷漆、不同尺寸波浪纹织构的表面参数,然后采用摩擦磨损试验分析不同表面的摩擦磨损规律,并对其滑移过程进行仿真分析。结果表明:喷砂表面的摩擦因数最大,抗滑移性能最好,但耐磨性不如波浪纹织构表面;喷砂喷漆表面主要由固化剂与锌粉颗粒组成,硬度极低,且表面存在大量微裂纹,导致耐磨性较差;波浪纹织构表面的耐磨性较好,且其摩擦因数可达到与喷砂喷漆表面相近的水平。因此,在存在重载、循环载荷的应用场合,可考虑用波浪纹织构对联结界面进行处理,在保证其摩擦因数的同时增加耐磨性。提出一种耐磨、摩擦因数大的波浪纹织构表面,对增强螺栓联结界面摩擦性能具有指导意义。

257 铸铁表面摩擦涂覆和感应加热扩散渗铝方法

贺庆强 许智彬 尹德聪 魏晓旋 汤 硕 杨博雅



摘要: 为了改善铸铁在恶劣环境下的腐蚀问题,采用涂覆渗铝的表面改性技术在铸铁表面进行铝涂层制备。以 HT150 为研究对象,对其进行摩擦涂覆渗铝处理,随后对涂层进行高频感应加热扩散和普通加热扩散处理。通过正交试验研究滚花量、扩散处理温度及保温时间对渗层厚度的影响,采用 SEM 和 EDS 定量分析渗层厚度变化。结果表明:滚花处理后进行摩擦涂覆可制备较大厚度的纯铝层,显著影响扩散处理后的渗铝层厚度;两种扩散退火处理均促使渗层厚度明显增大,但相同加热温度下,高频感应加热扩散比普通加热扩散的效率更高、效果更好。采用前者,铸铁试样在 2~6 min 内渗层厚 20~160 μm。采用滚花预处理与感应扩散相结合的涂覆方式制备的渗层厚度较常规涂覆方式明显增加,采用该方式可制备腐蚀性能较好的渗铝层。

CONTENTS

- 1 Research Review of the Plasma with Spoke Characteristic for High Power Impulse Magnetron Sputtering**
LI Yuge LIU Weiyang LEI Mingkai
- 10 Research Progress on Material Transportation Behavior and Deposition Mechanism of Plasma Spray-physical Vapor Deposition (PS-PVD)**
HUANG Lu LIU Meijun YANG Guanjun
- 25 Research Status of Preparation of Solid Oxide Fuel Cell Electrolyte by Plasma Spray**
DU Ke SONG Chen YU Min LIU Taikai YANG Chenghao LIU Min
- 34 Research Progress of Diamond Tool Machining Technology for Ferrous Metals**
ZHAO Xianggang HAO Xiuqing YUE Caixu An Qinglong LI Liang HE Ning
- 53 Research Progress of Laser Processing Technology for Superhydrophobic Surface**
SUN Xiaoyu SUN Shufeng WANG Jin WANG Xi ZHANG Fengyun ZHANG Lili
JIANG Mingming WANG Pingping WANG Haitao CHEN Xizhang
- 72 Research Progress Superhydrophobic Sealing Materials Used in Cultural Relics Protection**
HE Wenbo OU Junfei
- 86 Research Progress of Modified Polyaniline in Anticorrosive Coatings**
ZHOU Zhixiang XIAO Xuxian SUN Chaoyuan WANG Wei WANG Yujiang WEI Shicheng
- 97 Research Progress on Failure Analysis and Life Assessment of Key Components in Hydraulic Supports**
XIAO Kunyu XU Tong SU Chengming ZHANG Peng MA Fei
- 107 Recovery Process of Wheel / rail Adhesion under the Action of Water-based Friction Modifier**
LI Qun DING Haohao SHI Lubing Zhang Shuyue LI Jiabin WANG Wenjian LIU Qiyue
- 116 Effects of Laser Power on Microstructure and Corrosion Property of Laser Cladding FeCoNiCr High Entropy Alloy Coatings**
MA Qing ZHANG Yanmei LU Bingwen WANG Yueliang YAN Xingchen MA Rucheng
LIU Min
- 125 Effect of Plasma Surface Treatment on Bonding Properties and Surface Properties of CFRP**
ZOU Tianchun LIU Zhihao LI Ye JU Yuezhong
- 135 Microstructure and Corrosion Properties of Zn-Ni Co-cementation Layer**
XU Penghui WANG Shengmin LE Linjiang ZHAO Xiaojun GAO Kai

- 144 Influence of Ultrasonic Rolling on Corrosion Resistance of 7075 Aluminum Alloy**
LI Bo SUN Qing LIU Zhuoyi FAN Lei HE Jinhang YANG Ming
- 155 Scraping Morphology and Adhesion Morphology Analysis of Sealing Coating Based on Scraping Temperature**
ZOU Hui SUN Mingyang WANG Lulu DONG Zhongshen DING Kunying
- 162 Effect of Micro-convex Texture and Wettability on Friction Characteristics of Rubber Sliding Contact Interface**
PEI Ning LIU Xiaojun JI Jiawei ZHANG Tao WANG Zhaochang JIAO Yunlong LIU Kun
- 173 Analysis of Influence of Surface Texture Type on Lubrication and Friction Reduction Performance of Friction Pair**
ZHAO Zhangxing LONG Wei REN Pu LEI Jilin
- 183 Preparation and Tribological Properties of Ni-P-TiN-WS₂ Electroless Composite Coatings with Various Contents of Nano-WS₂**
YANG Fanger LAN Xiangliubin SHEN Shukang HUANG Yindi ZHENG Xiaohua
- 191 Effect of Load, Friction Pair and Medium Environment on the Tribological Behavior of Multilayer Ti-doped Graphite-like Carbon Films**
SHI Xiangru SHI Yunjia ZHANG Xin ZHOU Zehua WANG Zehua CHEN Jian
- 201 Directed Motion of a Graphene Flake under Temperature Gradient: A Molecular Dynamics Study**
MA Yufeng WANG Jingqiu DAI Qingwen HUANG Wei WANG Xiaolei
- 207 Microscopic Factors Influencing the Lifetime of Thermal Barrier Coatings Based on Genetic Algorithms**
YAO Yudong AI Yanting GUAN Peng TIAN Jing BAO Tiannan
- 220 Fractal Characterization on Surface Texture of Cylinder Liner Based on Partitioned Iterated Function System**
ZHANG Yongfang LIU Cheng JIANG Cheng LI Pengzhou XING Zhiguo LÜ Yanjun
- 231 Preparation of T-type Flexible Thin Film Thermocouple by Magnetron Sputtering**
XIONG Zhichun ZHANG Zhejuan LING Yancui
- 237 Effects of Process Parameters on Microstructure and Wear Properties of 40CrNiMo Steel by Laser Transformation Hardening**
NIE Xiangyu TANG Haibo LIU Lantao HE Bei LIU Dong
- 247 Influence of Surface Treatment on Friction Performance of Bolt Connection Interface**
WANG Jianmei CHEN Mingda NING Ke
- 257 Method of Friction Coating and Induction Heating Aluminizing on Cast Iron Surface**
HE Qingqiang XU Zhibin YIN Decong WEI Xiaoxuan TANG Shuo YANG Boya

《中国表面工程》第六届编委会

荣誉主任：徐滨士*

荣誉委员：

丁传贤* 王玉明* 左铁镛* 任露泉* 关桥* 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*
潘际銮*

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	王彦	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)	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)

