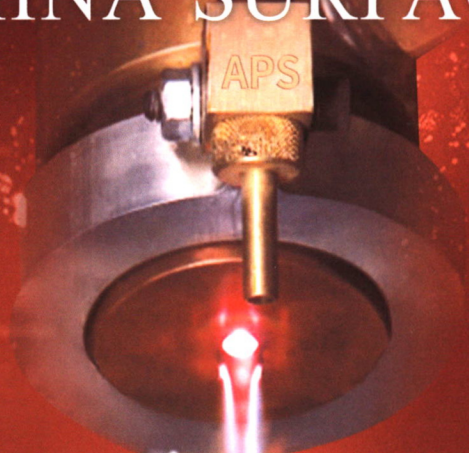


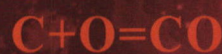
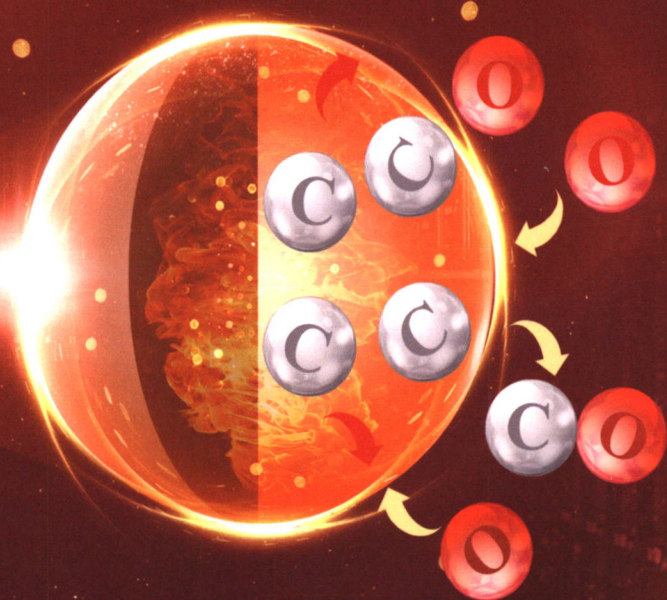
中国表面工程

CHINA SURFACE ENGINEERING



Air

Oxide-free
droplets



封面文章：粉末中 C 抑制 FeAl 熔滴氧化机制及其对等离子喷涂层组织与性能的影响

作者：周哲 张黎 董昕远 雒晓涛

MAHRUKH M

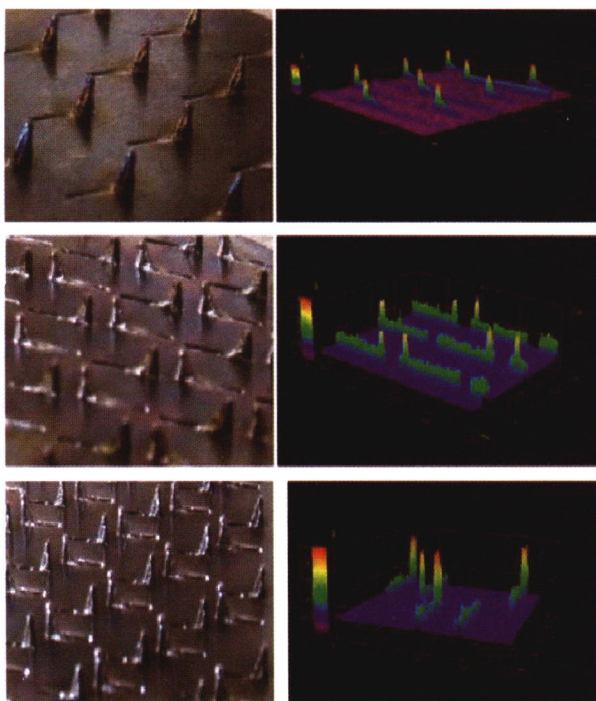
李长久

36卷 **1** 期 双月刊
2023年2月刊

// 综述论文 //

1 航空发动机机匣—叶尖封严涂层结构设计及制备研究进展

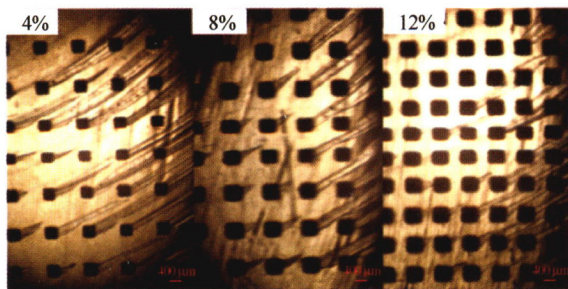
王涛 陈思宇 孟琨 刘兴宇



摘要:可磨耗封严涂层的结构特性对涂层工作性能和服役寿命有重要影响,但缺乏这方面的系统介绍。封严涂层主要用于航空发动机机匣—叶尖之间的间隙控制,提升机匣与叶尖之间的气密性,并作为牺牲涂层来保护叶片叶尖,防止在叶尖与机匣碰摩过程中发生“硬碰硬”的碰撞。综述了多层多孔结构、蜂窝-涂层复合结构和纳米结构三种结构形式的封严涂层及其相应制备技术。发现多层多孔结构目前仍然是封严涂层的主要应用结构,这种结构主要通过喷涂过程中调控涂层孔隙,达到涂层可磨耗性、结构强度、抗氧化和耐腐蚀等多种性能的平衡。结合蜂窝结构封严与可磨耗封严涂层各自的优点,设计和制备出蜂窝—涂层复合结构封严,这种结构能够提升封严的结构强度和抗氧化性。随着纳米技术的发展,设计和制备出纳米结构封严涂层,相比传统可磨耗封严涂层,纳米结构封严涂层表现出更好的综合性能。最后,提出纳米结构、仿生结构可能成为未来航空发动机可磨耗封严涂层结构设计的发展趋势,而3D打印技术的日趋成熟将能够制备出更加多样化的涂层结构。研究结果对可磨耗封严涂层的结构设计、制备和实际应用具有参考意义。

12 空化作用及气泡行为轨迹观测研究进展

王雨豪 陈文刚 吴华杰 尹红泽 井培尧 王泽霄 郝星星



摘要:随着对空化现象的不断探索,已经有较多研究结果表明空化作用对摩擦副的减摩抗磨性能有促进作用,但由于空化现象的复杂性以及难以直接观测,目前对其机理尚未取得共性结论,仍须进行深入研究。通过概述近年来对空化现象所做的相关研究,归纳气泡在溃灭过程中对壁面的空蚀损伤机理等,引出三种适用于基体表面的热门减摩方法,包括表面微织构、表面涂层和添加颗粒物。重点综述三种方法在不同结构、材料、形状、尺寸、分布方式等下对空化气泡行为轨迹的影响,以及在与其它效应相耦合下空化效应所起到的减摩效果,对相关研究进行整体归纳,并指出其中存在的问题和不足。最后提出搭建一个自动化试验装置,用于观测模拟水利机械装置工作过程中液体介质接触表面所产生的空化气泡溃灭的过程,填补该过程中气泡行为轨迹观测的欠缺,为表面空化减摩的研究奠定基础。

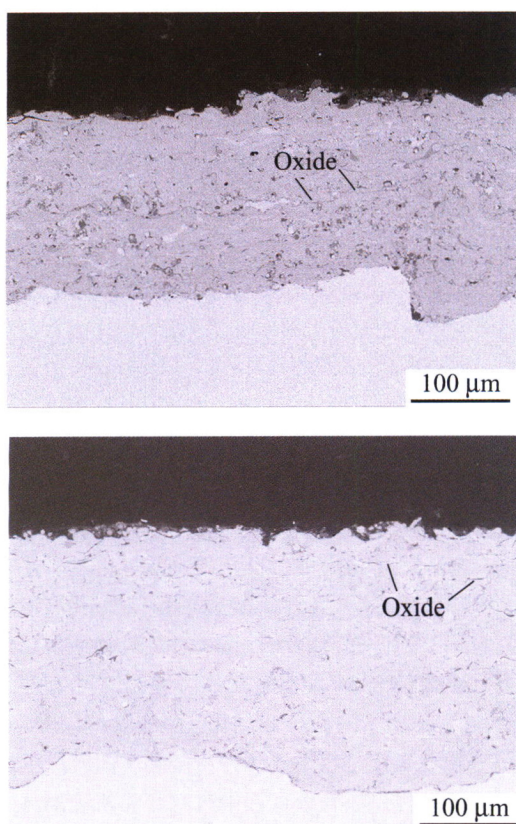


摘要: 随着风电事业的迅猛发展,风电机组关键部件磨蚀问题日益突出,而关于该问题的全面综述鲜有报道,亟须系统分析总结风电机组磨蚀问题及防治手段,为解决长期困扰风电行业的磨蚀难题提供参考和建议。首先,阐述陆上及海上风电机组金属部件腐蚀磨蚀现状,统计国内典型区域非金属部件的磨蚀现状,分析其产生磨蚀损伤的机理,指出塔筒等金属结构件腐蚀磨蚀问题突出,叠加所在地的特殊区域环境,出现加速失效;齿轮等金属零部件的磨蚀损伤是进一步失效的诱发因素,表现出与承担功能相关的特有失效形式;非金属部件以叶片前缘的磨蚀最为突出,引起持续的发电量损失和维修费用激增。其次,分别综述风电机组金属部件和非金属部件的磨蚀防护技术,指出塔筒等结构件在普遍应用传统涂层保护的基础上,仍须探索包覆技术和附加防护装置等新的防护方式;叶片本体涂料防护技术相对成熟,但涂料防护和贴膜防护均无法满足叶片前缘全周期防护的要求。最后,分析总结风电机组关键部件磨蚀防治存在的主要技术问题,对后续的研究方向进行了探讨和展望,填补了风电机组关键部件磨蚀防治领域的综述空白。

// 技术基础 //

44 粉末中 C 抑制 FeAl 熔滴氧化机制及其对等离子喷涂层组织与性能的影响

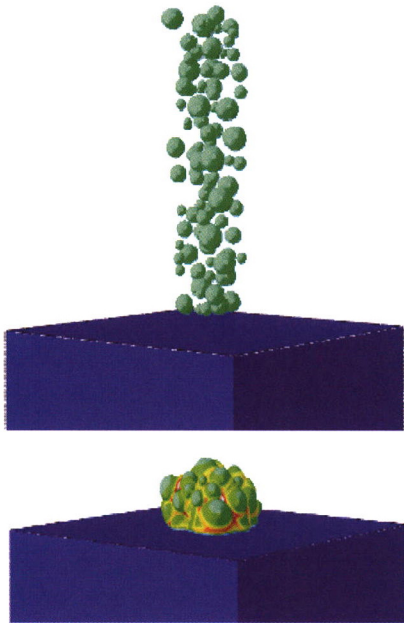
周 哲 张 黎 董昕远 维晓涛 MAHRUKH M 李长久



摘要: 大气等离子喷涂 (APS) 金属时,熔滴不可避免地发生氧化是难以获得粒子间结合充分的致密涂层的主要原因。以 FeAl 金属间化合物为例,提出一种在粉末中添加亚微米金刚石颗粒引入碳源,以期利用碳在高温下优先氧化的特性抑制等离子喷涂飞行粒子中 Fe、Al 元素的氧化,获得无氧化物的高温熔滴从而制备低氧含量(质量分数)、粒子间充分结合的 FeAl 金属间化合物涂层的新方法。采用 APS 制备 FeAl 涂层,研究金刚石的添加对涂层氧含量、碳含量、涂层内粒子间结合质量与硬度的影响规律,探讨 FeAl 熔滴飞行中的氧化行为。采用商用热喷涂粒子诊断系统测量 APS 喷涂中的粒子温度,通过 SEM 与 XRD 表征了涂层的组织结构,并表征涂层的结合强度与硬度。结果表明,在等离子射流的加热和 Fe、Al 元素放热反应的联合作用下,飞行中 FeAl 熔滴的表面温度可达 2 000 °C 以上,满足 C 原位脱氧的热力学条件。与不含碳的传统 FeAl 涂层中的氧含量随喷涂距离的增加而显著增加的规律完全不同,用 Fe/Al/2.5C 粉末喷涂时涂层中的氧含量随距离的增加而减小,表明飞行中熔滴的氧化得到抑制,实现了 C 原位脱氧抑制金属元素氧化的自清洁氧化物的效应。FeAl/2.5C 涂层氧含量由传统 FeAl 涂层的 3.67 wt.% 显著降至 0.62 wt.% 以下,涂层中有限的氧化物主要来源于粒子沉积后氧化。因 FeAl/2.5C 熔滴温度超过 2 100 °C,实现了熔滴碰撞引起同质涂层粒子表面熔化的自冶金结合效果,提升了涂层的致密性,其表现孔隙率由 2.2% 降至 0.28%; 涂层结合强度高于 59.2 MPa,且因涂层由 FeAl 相及 Fe₃AlC_x 渗碳体相组成,其硬度达到 590 HV_{0.3},约为传统 FeAl 涂层的 2 倍。

57 基于 Eulerian 法计算多颗粒冷喷涂 Ti-6Al-4V 涂层的孔隙率和残余应力

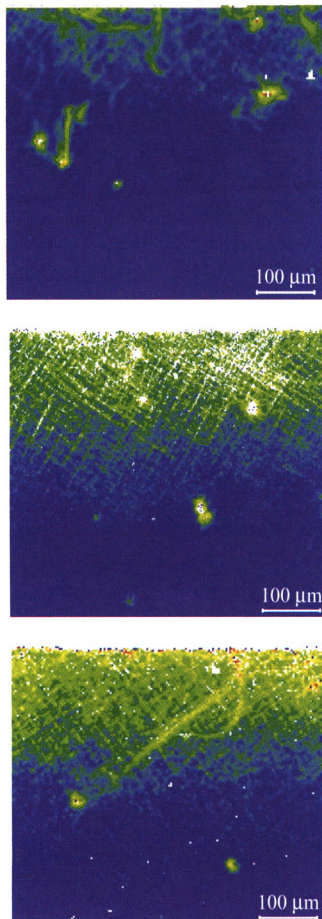
周愁庭 马玉娥 李文亚



摘要: 冷喷涂涂层具有喷涂温度低、沉积效率高和结合强度高特性,在航空航天等工业领域具有广阔的应用前景,但关于喷涂参数对涂层孔隙率和残余应力影响的研究较少。考虑送粉速度和涂层厚度的影响,建立不同颗粒密度和数量的随机分布颗粒冲击模型,采用 Eulerian 法模拟 TC4(Ti-Al-4V)涂层的孔隙率和残余应力分布规律。结果表明,此方法能够很好地预测颗粒的沉积行为,揭示颗粒的原位夯实致密化效应,获得冷喷涂涂层的孔隙率和残余应力分布规律。颗粒密度减小,孔隙率略有降低;颗粒数量增加,孔隙率减小;当颗粒温度在一定范围(523~823K)时,孔隙率随温度上升呈线性降低。同时,不同颗粒密度和数量的模型获得的残余应力分布规律相似。计算结果可为冷喷涂涂层在航空航天等工业领域中的应用提供理论和数据支持。

67 超声喷丸对不同取向单晶高温合金组织与表面性能的影响

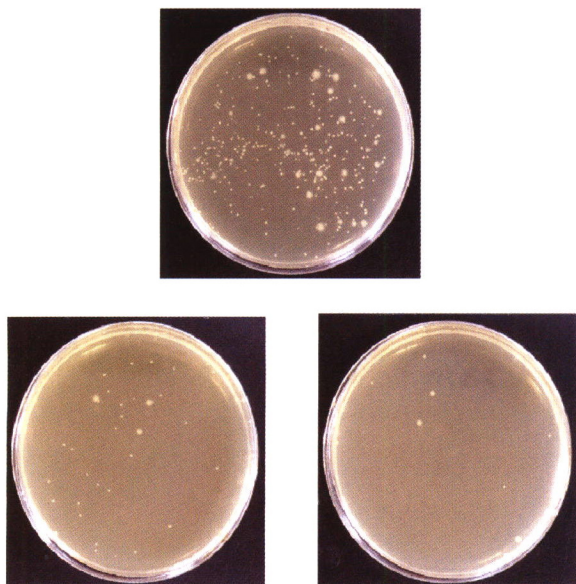
湛江涛 罗庸生 李一飞 李荣和 赵凤



摘要: 超声喷丸作为一种有效改善疲劳性能的手段在单晶材料方面得到一定研究,但喷丸振幅对不同取向镍基单晶高温合金微观组织及表面性能的影响尚不清晰。采用生长方向为 [001] 的国产第三代镍基单晶高温合金为研究对象,利用显微硬度计、SEM、TEM、XRD、EBSD 等研究超声喷丸振幅(22.5 μm、45 μm、60 μm)对不同第二取向([100]、[110])样品组织形貌及表面性能的影响。结果表明:振幅为 22.5 μm 喷丸处理后的样品保持单晶合金原有的 γ/γ' 组织形貌和原始取向,并在表面局部已经形成尺寸约为 10 nm 的纳米晶; [100] 与 [110] 取向样品近表层硬度相比基体硬度分别最大提高 75% 和 68.5%。大振幅(45 μm、60 μm)喷丸样品的 γ/γ' 组织发生严重畸变;随着振幅的增大,原始取向强度逐渐减弱并产生新的择优取向,样品近表层的取向偏转更加显著且沿滑移带附近产生大量小角晶界。通过分析两取向样品的近表层硬度及 EBSD 结果可知,在相同振幅条件下,第二取向 [100] 样品的近表层应变硬化效果优于 [110] 取向样品。研究喷丸振幅对不同第二取向单晶高温合金性能及微观组织的影响,可为生产中合理控制单晶叶片第二取向及提高单晶的疲劳性能奠定理论基础。

77 通过氢还原热处理提升 TiO₂ 薄膜的抗菌性能

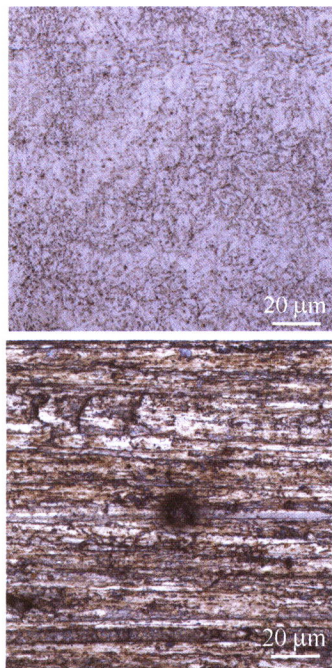
赵 云 何伟伟 许建兵 苏虹阳 刘 鹏 乐恢榕 陈 迪



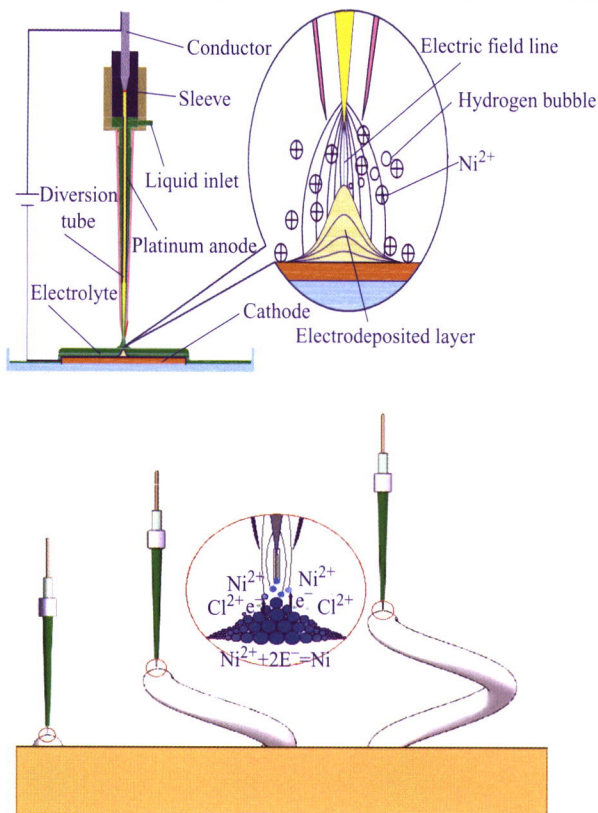
摘要: 提升在可见光区间的抗菌效率一直是二氧化钛(TiO₂)抗菌性能研究的重要方向。采用脉冲激光沉积(PLD)制备TiO₂薄膜,并通过氢还原热处理的方法提升TiO₂表面的氧空位浓度从而增强其抗菌性能。结果发现,在以单晶氧化钇稳定的氧化锆(YSZ)为衬底时,生长的TiO₂薄膜为高度择优取向的锐钛矿相。生长温度越高,锐钛矿相的XRD衍射峰越强,薄膜越致密。将在600℃下生长的350nm厚的TiO₂薄膜进行抗菌性能测试,发现其抗菌率约为86%。对样品进一步在4% H₂氛围下进行还原处理,发现其抗菌率提升到约为97%。通过XPS、UV-Visible和PL测试,发现TiO₂经过还原热处理后在其表面形成更多的氧空位,在TiO₂带隙中形成氧空位缺陷能级,导致在可见光区域吸光性能增强,使其具有更高的抗菌性能。通过氢还原过程调控材料的缺陷组成,并研究TiO₂薄膜的光催化抗菌性能及抗菌机理。这种简易的调控TiO₂光吸收的方法可为规模生长提供技术可行性。

85 铁基非晶合金和 13Cr 不锈钢在超临界 CO₂ 环境的腐蚀行为

姚 莹 杨柏俊 张锁德 邱克强



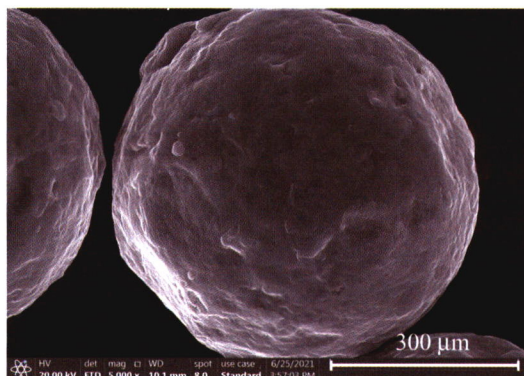
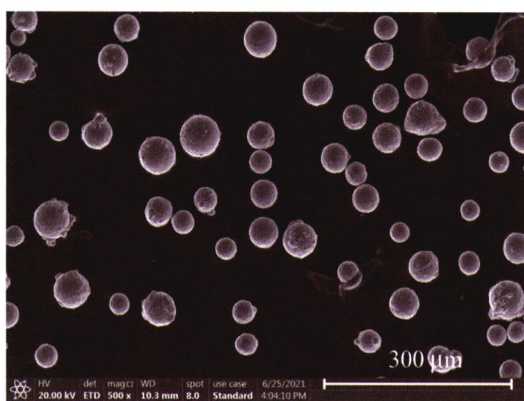
摘要: 非晶合金由于其独特的结构、优异的耐磨耐蚀性能在海洋及CO₂地质封存领域展现出广阔的应用前景,有望成为超临界CO₂环境下钢构件的耐蚀涂层材料,但关于非晶合金在该环境下的腐蚀行为鲜有报道。利用高温高压反应釜对SAM2X5铁基非晶合金与13Cr马氏体不锈钢在温度80℃,压力10MPa的模拟环境下进行腐蚀行为对比研究。通过XRD、DSC、CLSM、SEM、XPS以及电化学Mott-Schottky测试等方法对两种材料的微观结构、腐蚀形貌以及表面膜成分及结构进行了表征与分析。研究表明:在高温高压的超临界CO₂环境下进行168h腐蚀试验后,13Cr不锈钢表面发生严重的点蚀,而铁基非晶合金表面无点蚀发生;非晶合金表面膜除Fe和Cr外,富含大量的Si元素,会促进形成稳定致密的钝化膜;13Cr不锈钢表面膜为p型半导体,非晶合金表面膜为n型半导体,13Cr不锈钢钝化膜载流子密度远高于铁基非晶合金。证实了在该环境下铁基非晶合金的耐蚀性能远优于13Cr不锈钢。



摘要: 针对电化学增材制造已有较多探究, 但研究内容多为工艺参数对柱体成形质量的影响, 工艺参数对微螺旋构件的影响尚缺乏系统研究。通过单因素试验法研究极间电压、脉冲占空比和初始极间隙对微螺旋结构直径、体沉积速率和表面形貌的影响, 采用数字显微镜及扫描电镜对微螺旋构件进行检测, 得出极间电压为 4.0~4.4 V 时, 可以制备出直径均匀、形状规整的微螺旋结构, 微螺旋结构体沉积速率由 $210 \mu\text{m}^3/\text{s}$ 增长至 $5728 \mu\text{m}^3/\text{s}$; 而电压增至 4.6 V 时, 微螺旋结构出现大量瘤状沉积。当初始极间隙从 $5 \mu\text{m}$ 增加到 $20 \mu\text{m}$ 时, 微螺旋结构平均直径由 $128 \mu\text{m}$ 增长至 $163 \mu\text{m}$ 。极间电压为 4.2 V、初始极间隙为 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 时, 随着初始极间隙的增大, 微螺旋结构底部明显变粗, 直径波动较大。研究表明, 采用三轴联动控制阳极运动轨迹, 定域电化学增材制造三维微螺旋构件, 是三维金属微结构一种可行的技术方法。试验优化参数为极间电压 4.2 V、脉冲占空比 60% 和初始极间隙 $5 \mu\text{m}$ 时, 得到微观形貌质量较好、直径均匀的微螺旋构件 (圈数为 2 圈、螺距为 $400 \mu\text{m}$)。

106 选区激光熔化 TC4 钛合金表面磁力光整加工的表面质量

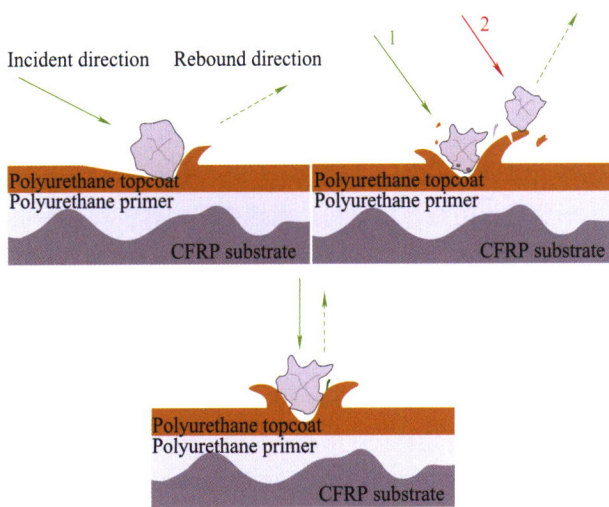
陈昊鑫 张桂香 刘宁 姜林志 朱培鑫 杜嘉静



摘要: 为了研究磁力光整加工工艺对 SLM 制备的 TC4 钛合金表面完整性的影响, 采用响应曲面法对钛合金试样进行三因素三水平的响应曲面分析试验。首先使用数控成形磨床对 SLM 制备的 TC4 钛合金试样进行磨削加工, 磨削加工将钛合金试样表面粗糙度从 $6 \mu\text{m}$ (SLM 成形后) 下降到约 $0.6 \mu\text{m}$, 使带有球状体和凹坑等缺陷的粗糙表面演化为有划痕和孔隙的细表面。然后在不同的磁力光整加工工艺参数下, 利用 XK7136C 数控铣床改造的磁力光整加工系统, 采用雾化法制备的新型 Al_2O_3 / 铁基球形磁性磨料对钛合金试样进行磁力光整加工, 分析加工后钛合金试样的粗糙度、表面形貌以及残余应力, 并确定最佳工艺参数。结果表明: 当磁力光整加工工艺参数分别为主轴转速 1000.00 r/min , 加工间隙 1.50 mm , 进给速度 15.00 mm/min 时, 磁力光整加工效果最好, 钛合金试样表面粗糙度由初始的 $0.6 \mu\text{m}$ 降低到 $0.065 \mu\text{m}$, 试样表面均匀, 划痕和表面缺陷被有效去除, 达到接近镜面效果。试样表面的残余应力由最初的拉应力 $+297.4 \text{ MPa}$ 转变为压应力 -237.8 MPa 。利用磨削加工和磁力光整加工技术对 SLM 制备的 TC4 钛合金试样进行光整加工, 可有效改善工件表面完整性, 提高工件表面质量。

116 冲蚀角对碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 蒙皮涂层去除及重涂附着力的影响

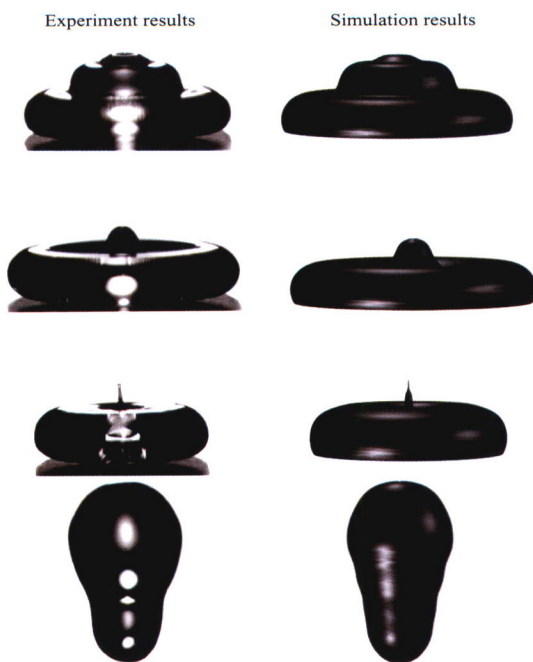
赵洋洋 卢文壮 吴泊蓓 孙玉利 左敦稳



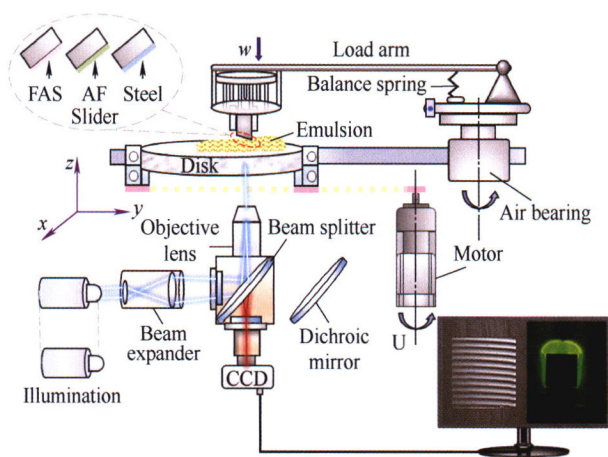
摘要: 为解决飞机 CFRP 蒙皮涂层高效去除问题, 改善重涂涂层附着力, 采用塑性磨料射流加工方法对 CFRP 蒙皮损伤涂层去除, 通过分析单颗磨料的速度和冲击力, 研究不同冲蚀角度下磨料对涂层的冲蚀行为, 探究塑性磨料射流冲蚀角对表面形貌、去除机制、材料去除率、接触角与表面自由能及重涂涂层的附着力方面的影响。结果表明: 塑性磨料对涂层的冲蚀机理为塑性变形去除, 在 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 冲蚀角下, 磨料对涂层的冲蚀模式为滑擦、耕犁和切削。随着冲蚀角的增加, 颗粒的切向分力减小, 法向分力增加, 法向冲蚀的冲蚀模式为剪切和挤压变形去除材料去除率递减。在所选冲蚀角范围内, 当冲蚀角为 30° 时, 聚氨酯涂层的材料去除率最大。随着冲蚀角的改变, 表面粗糙度、润湿性和表面自由能发生变化, 当冲蚀角为 70° 时, 重涂后的涂层附着力较好, 较初始涂层附着力提高 28% 左右。研究成果可为飞机 CFRP 蒙皮涂层的高效去除及附着力的改善提供参考。

124 黏性流体液滴撞击超疏水壁面奇异射流的试验与模拟

刘海龙 王建成 沈学峰 郑 诺 王军锋



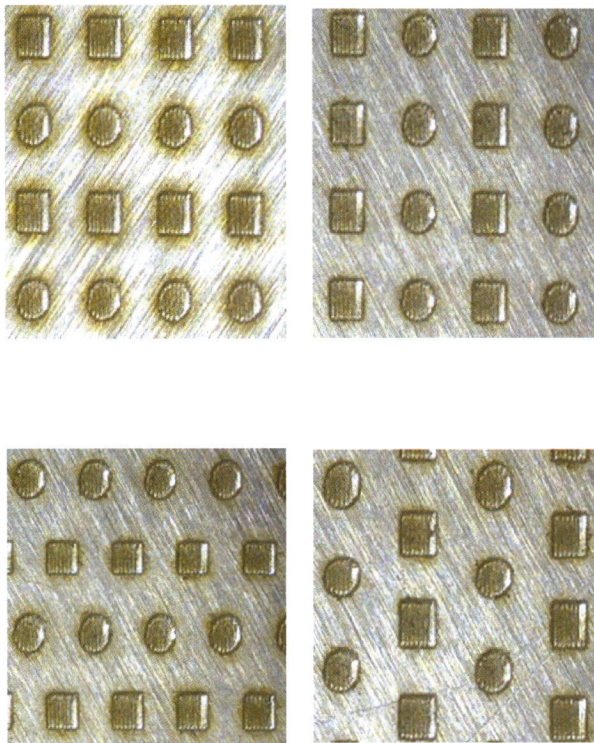
摘要: 液滴在特定条件下撞击超疏水壁面会形成奇异射流现象, 该现象产生机理及调控机理有待进一步研究。基于高速显微数码摄像技术, 研究不同黏度 ($0.9\sim 27.7\text{ mPa}\cdot\text{s}$) 牛顿流体液滴撞击超疏水壁面 (静态接触角为 158°) 的动态行为, 归纳奇异射流发生的相图。通过水平集相界面追踪法, 建立液滴撞击超疏水壁面的有限元数值模型。研究结果表明: 对于中低黏度 (甘油质量分数小于 67 wt.%) 的液滴, 奇异射流现象发生在特定的 We 数区间。随着液滴黏度的增大, 发生奇异射流的 We 数阈值提高。当液滴的黏度大于 $14.2\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 后, 即使继续提高液滴撞击速度 ($We > 100$), 奇异射流现象不再出现。奇异射流的产生与回缩阶段液滴内空腔的形成有关, 且发生射流时空腔底部有很大的压力集中区。黏度的改变会影响液滴内空腔底部气液交界处的界面形态。随着黏度增加, 空腔底部气液相界面将由上凸形转变为下凹形, 无法形成向上的射流。奇异射流主要发生于 Re 在 $700\sim 1\ 000$ 的区域, 且在该区间内奇异射流发生的 We 数区域较宽, 可为液滴动力学行为调控提供理论依据。



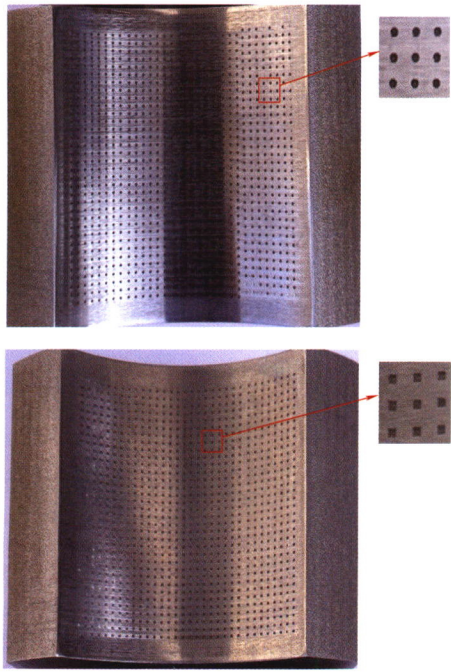
摘要: 乳化液广泛应用于机械加工装备, 在不同润湿性界面下的摩擦润滑机制亟待明晰。通过涂镀疏油层 AF(氟改性有机基团, 主要成分为 $[\text{CF}(\text{CF}_3)\text{CF}_2\text{O}]_x(\text{CF}_2\text{O})_y$) 和 FAS ($\text{C}_{13}\text{H}_{13}\text{F}_{17}\text{O}_3\text{Si}$) 对轴承钢滑块进行修饰, 采用光干涉法测量不同润湿性(AF、FAS、Steel)界面乳化液膜厚度。结果表明: 界面润湿性不同导致乳化液膜厚发生较大变化, 同卷吸速度下 AF 表面膜厚最高, Steel 表面次之, FAS 表面膜厚最低。稀释前乳化液原液成膜能力与其在入口处所受 Laplace 压力正相关; 稀释后乳化液油水两相存在竞争吸附行为, 乳化液成膜厚度受水相将油相从固体表面分离所做黏附功影响。结合光致荧光法和固水油三相黏附功共同分析界面润湿性对乳化液成膜的影响, 认为涂镀 AF 后乳化液更易进入接触区。AF 界面乳液池特性与油膜厚度的关系, 证明了疏油表面可以具有较好的成膜能力。

145 复合微结构排列方式对轴承润滑性能的影响

王丽丽 张伟 葛雪 段敬东



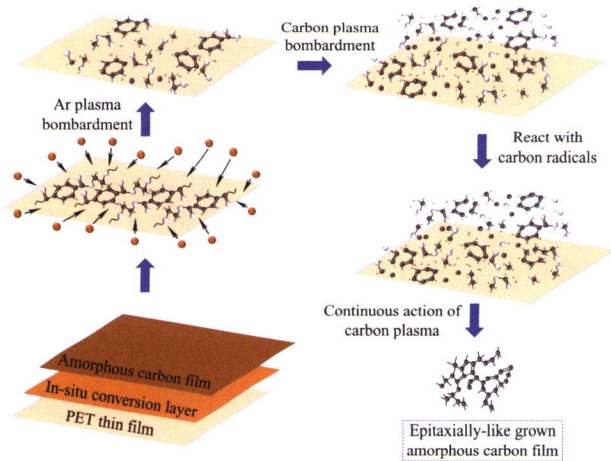
摘要: 目前对于多种结构复合表面轴承的排列方式的研究有待进一步深化。为了提升轴承承载力、降低摩擦因数和提升轴承稳定性, 数值模拟及试验研究复合微结构排列方式对滑动轴承系统的动静特性的影响, 并与单一微结构轴承及光滑轴承进行比较。利用有限差分法对轴承转子系统中油膜的 Reynolds 方程进行数值求解, 针对圆形复合矩形、三角形复合菱形及六边形复合月牙形三种复合结构, 在四种不同排列方式的条件下对轴承静特性(油膜压力、承载力、摩擦阻力和端泄量), 以及轴承动特性(刚度系数和阻尼系数)的影响进行研究, 并利用摩擦磨损试验机对摩擦副摩擦学性能进行进一步试验探究。理论及试验结果显示, 复合微结构轴承比光滑轴承和单一微结构轴承获得更大的承载力、更小的摩擦因数、更佳的动特性性能; 三角形复合菱形微结构时摩擦副性能最佳, 排列方式为周向对应平行排列时能够取得最佳的摩擦及润滑性能。研究复合结构排列方式对轴承润滑性能的影响可为复合结构在实际工况中应用提供理论参考和指导。



摘要: 为了探究表面织构对动压轴承热流体润滑特性的影响, 计入热流体耦合因素更接近轴承的实际工况。以矩形、三角形、圆形三种表面织构形式动压轴承为研究对象, 联立 Reynolds 方程、能量方程、黏温方程和不同形式织构几何特征方程, 建立织构化轴承热流体耦合模型。采用有限差分法求解得到油膜压力场分布、温度场分布及轴承特性参数, 并分析织构形状、深度、进油温度等因素对织构化轴承特性的影响。结果表明: 表面织构能够有效降低油膜温升, 改善轴承润滑性能; 不同形式织构对于轴承热流体特性影响有所差异, 低偏心时矩形织构表现出更好的润滑性能; 进油温度对于织构化轴承热流体特性有较大影响, 随着进油温度的升高, 轴承的特性参数在不断下降, 但幅度逐渐减缓。制备了织构化轴承试件并进行工况测试, 试验结果与理论计算对比分析, 趋势规律一致, 验证了结论的合理性、正确性。

168 碳等离子体诱导柔性 PET 薄膜表面原位生长非晶碳薄膜

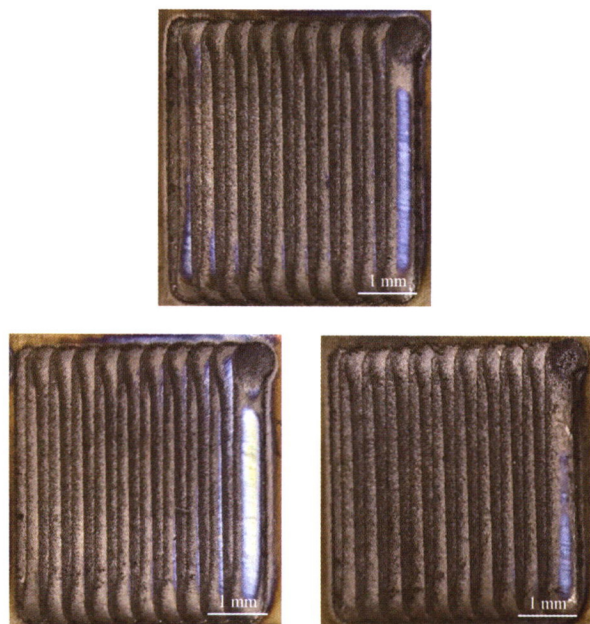
李 玥 王永欣 王 莹 吴于涛



摘要: 等离子体改性由于效果持久、环境友好而备受关注, 其中碳等离子体改性不仅具有轰击效应, 同时还具有沉积效应, 然而碳等离子体对柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜改性研究较少。柔性 PET 薄膜在使用过程中常因磨损和降解等原因, 其光学透过性能以及力学性能受到影响。研究不同碳等离子体轰击电流 (0.5 A、1.0 A、1.5 A、2.0 A) 对柔性 PET 薄膜结构及性能的影响。通过 FTIR、Raman 光谱、双光束扫描电子显微镜 (FIB-SEM)、扫描探针显微镜 (SPM)、接触角测量仪、UV-Vis、氙灯老化试验箱、多功能摩擦磨损试验机等手段对薄膜的表截面结构、润湿性能、透光性、耐老化性、耐磨防护性及柔性的变化进行表征, 并分析其生长机理。结果表明: 低电流 (0.5 A) 下碳等离子体主要起到轰击效应, 使得 PET 薄膜表面有机碳质结构发生断裂重排, 样品透光率与基底相比仅下降 0.439%, 同时该电流下制得的样品具有疏水性、耐老化性及韧性。而高电流下制得的样品的硬度显著提升, 具有良好的耐磨性能, 表面薄膜在弯曲过程中因应力的释放出现裂纹, 但薄膜并未剥落。非晶碳薄膜与柔性 PET 薄膜具有良好结合力。通过碳等离子体诱导法生长的非晶碳薄膜可以有效延缓柔性 PET 薄膜在使用过程中的降解并提高其力学性能。

179 激光熔覆 FeCrSi_xNiCoC 涂层高温耐磨性能

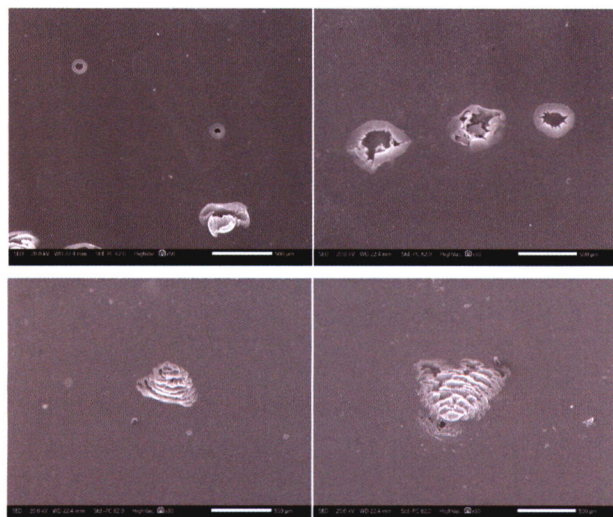
马汝成 贵永亮 龙海洋 马文有 李福海 邓朝阳 闫星辰



摘要: Si 含量对 Fe 基合金高温耐磨性能影响机理研究已有很多,但尚缺乏 Si 含量对 Fe 基涂层高温耐磨性能的研究。采用激光熔覆技术制备不同 Si 含量 (5 wt.%、10 wt.%、15 wt.%) 的 FeCrSi_xNiCoC 涂层,在温度为 500 °C 和载荷 200 N 的条件下,测试 FeCrSi_xNiCoC 涂层高温耐磨性能。结合 X 射线衍射仪 (XRD)、金相显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、能谱分析仪 (EDS) 分析涂层显微组织、相组成和磨损机理。结果表明:随着 Si 含量增加,涂层中 γ -Fe 相 (Si 以固溶方式存在于 γ -Fe 相中) 向金属硅化物 Fe₃Si 相转变,显微组织也由树枝晶向等轴晶转变,涂层硬度由 312 ± 21.7 HV_{0.5} 增加至 588 ± 31.3HV_{0.5}。在温度 500 °C 和载荷 200 N 下的摩擦磨损试验中, Si 含量为 10% 的涂层磨损率最低,高温耐磨性能最好,其磨损机理主要为黏着磨损和氧化磨损。通过优化 Fe 基合金中 Si 含量得到耐磨性能良好的涂层,可对该类涂层的开发、制备和应用提供一定的技术支持。

189 基体偏压对 316L 不锈钢表面多层 Ti-DLC 薄膜摩擦及腐蚀行为的影响

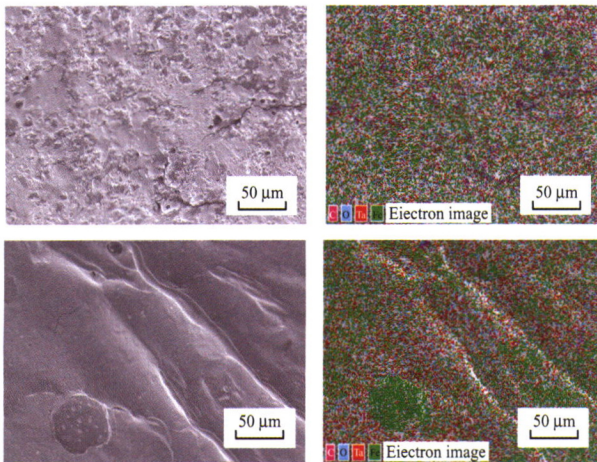
李超 马国佳 孙刚 张博威 刘星 张昊泽 吴俊升



摘要: 在严苛海洋环境下,传统单一的 Ti 掺杂类金刚石薄膜 (DLC) 无法满足减摩耐磨及耐腐蚀性能的要求,仍须进一步探索。为促进 DLC 薄膜在严苛海洋环境下的应用,采用中频磁控溅射技术在 316L 不锈钢上制备 Ti/TiN/TiCN/Ti-DLC 复合薄膜。通过 SEM、拉曼光谱、XPS、纳米压痕测试、摩擦磨损试验及电化学测试等方法,重点研究基体偏压对薄膜结构、力学性能、摩擦性能及耐腐蚀性能的影响规律。结果显示:随着基体偏压从 -60 V 到 -120 V,薄膜中 sp³-C/sp²-C 比值逐渐增大,薄膜硬度及弹性模量逐渐增大;薄膜结合力呈现先增大后减小的趋势,在 -80 V 时达到最大 24.5 N;在 7 N 的法向载荷下,薄膜磨损失效时间先增大后减小,偏压为 -80 V 时磨损寿命最长;316L 不锈钢和所有薄膜的阳极极化曲线都表现出明显的钝化现象,在偏压为 -120 V 时,薄膜的维钝电流密度比 316L 不锈钢低两个数量级,表现出优异的耐蚀性;薄膜电阻 R_f 和电荷转移电阻 R_{ct} 逐渐增大,薄膜的耐腐蚀性能逐渐增强。Ti/TiN/TiCN/Ti-DLC 复合薄膜的多层结构和元素掺杂相结合的设计有效提高了 316L 不锈钢的耐腐蚀性能和减摩耐磨性能,拓宽了类金刚石薄膜在严苛海洋服役环境下的应用范围。

200 脉冲爆炸-等离子体技术处理对 W18Cr4V 高速钢组织及性能的影响

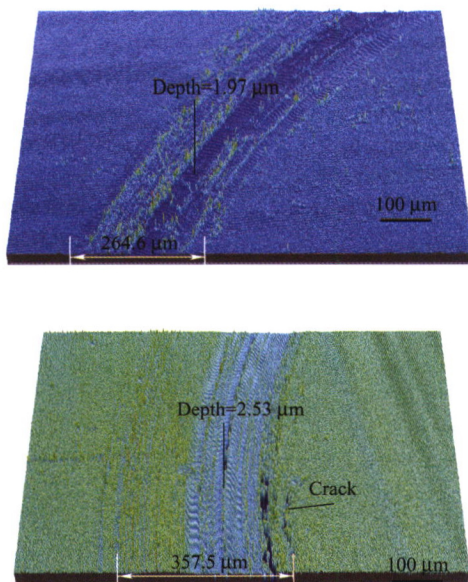
张明铭 陈乐平 陆磊 余玖明 付青峰



摘要：脉冲爆炸-等离子体技术（PDT）是一种在大气环境下进行的表面改性技术。目前对 PDT 的研究主要集中在使用 W 电极改性，对其他电极改性效果研究不足。为探究电极材料为 Ta 时，在不同电容下 PDT 技术对 W18Cr4V 高速钢改性效果和机理，使用 Ta 电极对 W18Cr4V 高速钢分别在 800 μF 与 1 040 μF 电容下进行 PDT 处理，对处理后的物相、组织与性能进行了研究。采用 X 射线衍射仪和场发射扫描电子显微镜对材料表面物相与截面组织形貌进行观察。发现经 PDT 处理后试样表面形成一层改性层，不同电容条件下，改性层厚度不同，在改性层表面形成 Fe_4N 、 Ta_5N_6 、 Ta_2O_5 等新相，改性层组织为超细晶马氏体、残余奥氏体与网状铁钨碳化物组织，Ta 元素渗入到改性层一定厚度中。经过 HX-1000SPTA 型显微维氏硬度计和 HT-1000 高温摩擦磨损试验机对试样硬度和耐磨性能进行测试，发现硬度最高提升 1.7 倍，耐磨性能最高提升 2.6 倍。使用 Ta 电极对 W18Cr4V 进行 PDT 处理后，W18Cr4V 性能得到大幅度提升。在不同电容下使用 Ta 电极对 W18Cr4V 高速钢进行 PDT 改性的效果与机理推进了对 PDT 的研究。

208 离子铝氮复合渗对渗层组织性能的影响

康前飞 魏坤霞 安旭龙 刘细良 赵芳利 胡静



摘要：为解决高温渗铝存在的基体组织粗化及离子渗氮效率低等问题，研发离子铝氮复合渗。以调质态 42CrMo 钢为材料，先采用电解硝酸铝法在工件表面沉积氢氧化铝膜，然后进行离子渗氮处理，在不影响基体组织性能的前提下，研发离子铝氮复合渗新技术。采用 SEM、光学显微镜、EDS、XRD、显微硬度计、电化学工作站、摩擦磨损试验机及三维轮廓仪等测试手段，对离子铝氮复合渗层进行测试分析。研究表明，离子铝氮复合渗处理后，试样表层高效形成多层次化合物渗层，在（520 $^{\circ}\text{C}$ / 4 h）工艺条件下，化合物层由 17.24 μm 增加到 51.23 μm ，提升约 3 倍；有效硬化层由 175 μm 增加到 1 050 μm ，提升约 6 倍。同时，化合物层中形成高硬度 AlN 及 Fe_xAl 相；表面硬度由离子渗氮 750 $\text{HV}_{0.025}$ 提高到 1250 $\text{HV}_{0.025}$ ；渗层耐蚀耐磨性比离子渗氮大幅度改善，腐蚀速率由 5.42 $\mu\text{m}/\text{a}$ 降低到 1.23 $\mu\text{m}/\text{a}$ ；摩擦因数由 5.2 降低到 2.9，磨痕明显变窄变浅，表面未有明显磨损裂纹。首次采用沉积氢氧化铝膜作为预处理，成功研发高性能离子铝氮复合渗技术。

CONTENTS

- 1 Research Progress on Structural Designs and Preparations of Sealing Coating Between Aero-engine Casing and Blade Tip**
WANG Tao CHEN Siyu MENG Kun LIU Xingyu
- 12 Research Progress of Cavitation and Bubble Behavior Trajectory Observation**
WANG Yuhao CHEN Wengang WU Huajie YIN Hongze JING Peiyao WANG Zexiao HAO Xingxing
- 30 Research Progress on the Current Situation and Prevention of Erosion of Key Components of Wind Turbines**
LI Taijiang LI Wei LIU Liying LI Jutao WANG Caixia LI Shengwen SUN Qi
- 44 Mechanism of Suppressing Oxidation of FeAl Molten Droplet by Adding C to Powder and Its Effect on Microstructure and Properties of Plasma-sprayed Coating**
ZHOU Zhe ZHANG Li DONG Xinyuan LUO Xiaotao MAHRUKH M LI Changjiu
- 57 Calculation of Porosity and Residual Stresses of Multi-particle Cold Sprayed Ti-6Al-4V Coating Based on Eulerian Method**
ZHOU Chouting MA Yu'e LI Wenya
- 67 Effect of Ultrasonic Shot Peening on Microstructure and Surface Properties of a Single Crystal Superalloy with Different Orientations**
CHEN Jiangtao LUO Yongsheng LI Yifei LI Ronghe ZHAO Su
- 77 Antibacterial Properties of TiO₂ Film Improved by Hydrogen Reduction Heat Treatment**
ZHAO Yun HE Weiwei XU Jianbing SU Hongyang LIU Peng LE Huirong CHEN Di
- 85 Corrosion Behavior of Fe-based Amorphous Alloys and 13Cr Stainless Steels under Supercritical CO₂ Environment**
YAO Ying YANG Baijun ZHANG Suode QIU Keqiang
- 95 Process for Localized Electrochemical Additive Manufacturing of Three-dimensional Micro-spiral Components**
PAN Jiabao JIA Weiping WU Menghua SU Xiaobing LIU Tao
- 106 Surface Quality of SLM TC4 Titanium Alloy Surface by MAF**
CHEN Haoxin ZHANG Guixiang LIU Ning JIANG Linzhi ZHU Peixin DU Jiajing
- 116 Effects of Erosion Angle on CFRP Skin Coating Removal and Adhesion of Recoating**
ZHAO Yangyang LU Wenzhuang WU Bojun SUN Yuli ZUO Dunwen

- 124 Experiment and Simulation of the Singular Jet of Viscous Droplets Impacting on a Superhydrophobic Surface**
LIU Hailong WANG Jiancheng SHEN Xuefeng ZHENG Nuo WANG Junfeng
- 135 Effect of Solid / liquid Interface Wettability on Film Formation of Emulsion in Conformal Contact**
LIU Yujian HAN Suli GUO Feng SHAO Jing LI Xinming
- 145 Effect of Compound Micro Texture Arrangement on Journal Bearing Lubrication Performance**
WANG Lili ZHANG Wei GE Xue DUAN Jingdong
- 156 Theoretical and Experimental Study on Thermal Fluid Characteristics of Textured Hydrodynamic Bearing**
LIU Tengfei LI Ruizhen ZHANG Shaolin XIA Yongjie
- 168 Carbon Plasma-induced In-situ Growth of Amorphous Carbon Film on the Surface of Flexible PET Film**
LI Yue WANG Yongxin WANG Ying WU Yutao
- 179 Wear Resistance of Laser Cladding FeCrSi_xNiCoC Coating at High Temperature**
MA Rucheng GUI Yongliang LONG Haiyang MA Wenyong LI Fuhai DENG Zhaoyang
YAN Xingchen
- 189 Effects of Substrate Bias Voltage on Friction and Corrosion Behavior of Multilayer Ti-DLC Film on the Surface of 316L Stainless Steel**
LI Chao MA Guojia SUN Gang ZHANG Bowei LIU Xing ZHANG Haoze WU Junsheng
- 200 Effect of Pulse Detonation-plasma Technology Treatment on Microstructure and Properties of W18Cr4V High-speed Steel**
ZHANG Mingming CHEN Leping LU Lei YU Jiuming FU Qingfeng
- 208 Effect of Plasma Aluminum-nitriding on the Microstructure and Properties**
KANG Qianfei WEI Kunxia AN Xulong LIU Xiliang ZHAO Fangli HU Jing

《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)

