CN 11-3903/TG

CMES
中国机械工程学会

中国表面工程

CHINA SURFACE ENGINEERING

专　　栏：面向航空发动机应用的表面涂层及其高温摩擦磨损性能

客座主编：邵天敏　李永健

35卷 3 期 双月刊
2022年6月

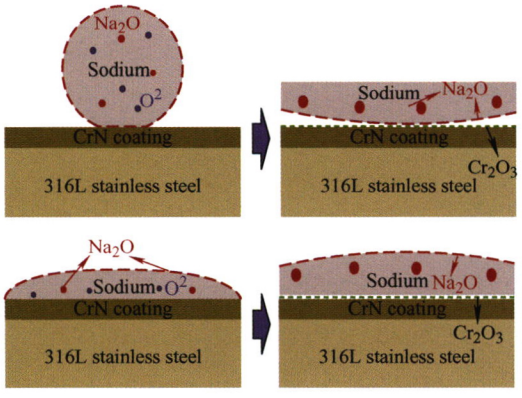
中国表面工程
ZHONGGUO BIAOMIAN GONGCHENG

目 次

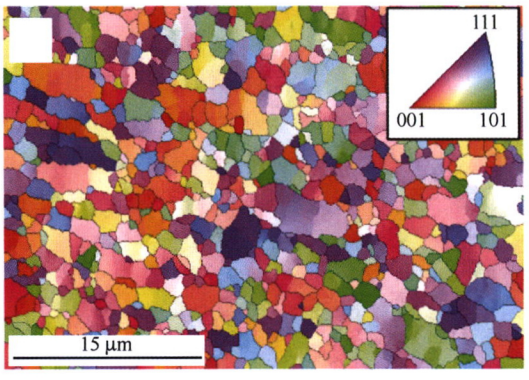
2022 年 第 35 卷 第 3 期 6 月 23 日出版

面向航空发动机应用的表面涂层及其高温摩擦磨损性能专栏

客座主编：邵天敏 教授 李永健 副教授



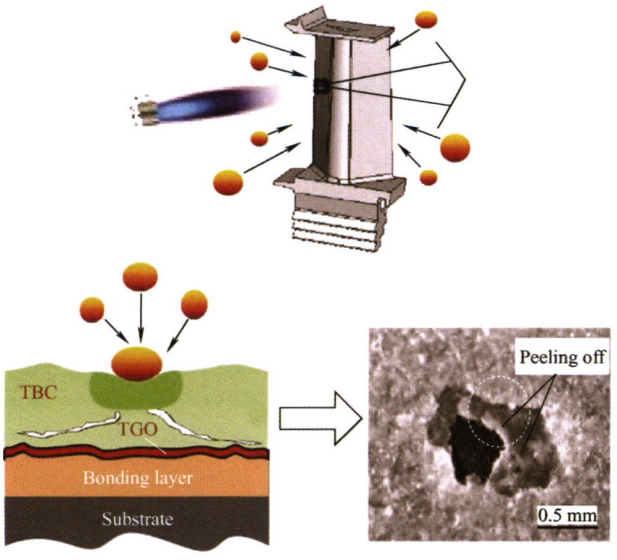
摘要：减摩耐磨涂层是高端装备中传动机构可靠运行的关键材料。在温度变化较大的工况条件下如何降低运动副的摩擦磨损，一直制约着高端装备技术的发展，探究宽温域低摩擦涂层对高速发展的现代工业技术具有迫切需求。简述目前宽温域低摩擦涂层的研究现状，归纳和评述金属复合基涂层、氧化物基涂层和氮化物基涂层等三类宽温域低摩擦涂层的组成、结构、摩擦学性能以及减摩机理等，得到单一结构的固体润滑涂层很难实现发展的需求。提出制备多层涂层、预处理（织构化、预氧化等）等技术路线去实现运动副良好的摩擦学性能，解决常规固体润滑涂层温度敏感性问题，为宽温域低摩擦涂层的相关研究发展提供新思路。



摘要：界面作为颗粒增强金属基复合材料中硬质颗粒和金属基体之间连接的纽带，直接影响复合材料的力学和摩擦性能，为了更好地揭示界面特性与复合材料整体性能之间的耦合关系，需要对界面展开微观研究。综述近年来对颗粒增强金属基复合材料界面的研究进展。主要分为三个方面：界面结构显微表征，即通过一系列电子显微镜和能谱分析，得到界面形貌、反应产物以及取向关系等信息；微观力学性能测试，即表征界面在微观尺度下的形变和失效过程，进而得到结合强度、断裂韧性等信息；模拟计算，在常规试验达不到的尺度，分析界面的结合能、电荷分布和电子结构，以及模拟界面的变形和失效过程。界面的微观研究对于界面改性和进一步提高颗粒增强金属基复合材料性能具有一定的指导意义。

31 航空发动机冲蚀损伤及防护涂层研究进展

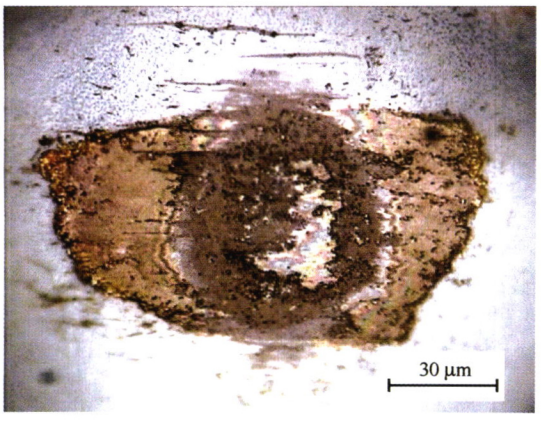
刘雨菲　崔秀芳　房永超　温　鑫　陈皓晖　金　国



摘要：航空发动机高速发展，其服役工况日渐严苛。飞机在高低空飞行、起飞和降落过程中,空气中的沙粒、火山灰、雨水和冰晶等在高速气流作用下不可避免地被吸入发动机内，与燃烧室等热端部件工作过程中产生的高温多相冲蚀流体共同作用，造成各类冲蚀损伤并严重影响航空发动机服役期间的安全性。开发有效的航空发动机冲蚀防护技术及高性能冲蚀防护涂层已成为航空发动机安全服役的必要保障，但目前系统介绍航空发动机冷热端部件冲蚀损伤形式的文献极少。针对航空发动机服役环境下冷热端部件的主要冲蚀形式及产生原因进行归纳，分析航空发动机服役工况特点与冲蚀破坏机理。对航空发动机用抗冲蚀涂层体系进行归类，并对其研究进展及性能进行阐述，归纳航空发动机冲蚀防护领域的测试方法和国内外各学术团队的探索性研究。总结当前研究成果并作以展望，为航空发动机冲蚀损伤的研究和新型防护涂层的设计提供参考。

48 金属氮化物涂层的高温摩擦学研究进展

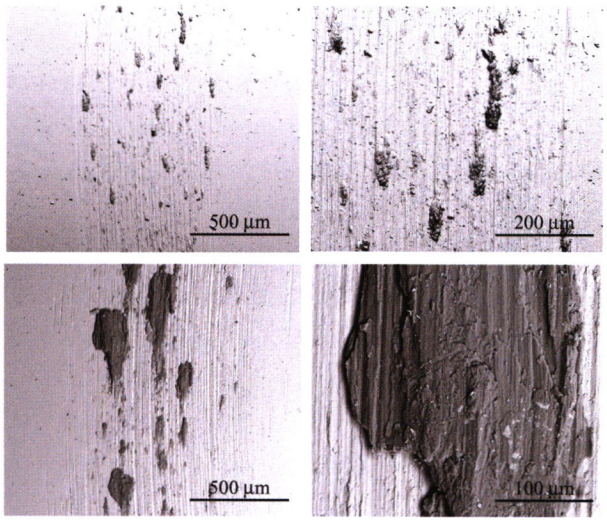
赖振国　贾　倩　唐诗琪　高凯雄　张　斌



摘要：高温润滑是核工业、航空、船舶和钢铁领域的难题之一。涂层材料可以在不改变原有基材的基础上，极大地提升材料的高温服役性能。氮化物涂层因其耐温性能好、摩擦因数低、耐磨性好等特性，成为该领域的研究热点。从材料的构成和设计出发，对单元氮化物涂层、二元氮化物涂层、三元氮化物涂层、多层氮化物涂层和高熵合金涂层等方面进行综述。对氮化物涂层在高温润滑领域的发展进行展望，认为发展非氮化物金属和氮化物金属多元组涂层和高熵合金氮化物涂层建立氮化物涂层数据库将成为新的研究热点，对氮化物涂层在高温润滑与耐磨条件的应用与服役有一定指导意义。

64 钛合金表面 TiB_2 涂层与纯铝的高温黏着磨损行为

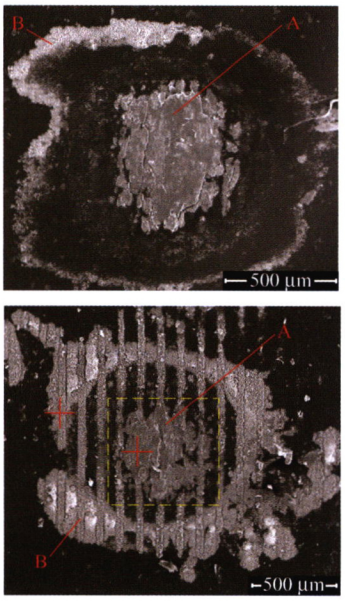
吴 彼 高禩洋 薛伟海 段德莉 李 曙



摘要：航空发动机低压气机机匣内表面 Al 基封严涂层的使用，可以通过其自身的磨耗实现保护 TC4 叶尖的目的，但同时 Al 基封严涂层中以 Al 为主的基体材料易于大量黏着转移至 TC4 叶尖表面，使叶尖长度增加，影响发动机运行稳定性。采用直流脉冲磁控溅射工艺在钛合金表面沉积 TiB_2 涂层，以期实现抗 Al 黏着磨损目的。具有致密结构的 TiB_2 涂层在钛合金表面膜基结合临界载荷（L_{C4}）达 85.4 N。在高温销-盘摩擦磨损试验机上评价钛合金表面 TiB_2 涂层与纯铝销对摩（室温至 450 ℃）的抗 Al 黏着磨损性能。与 TC4 基体相比较，TiB_2 涂层可有效抑制 Al 的黏着转移。对摩铝销磨斑具有拖尾特征和剪切舌特征。铝销向 TiB_2 涂层表面的机械涂抹和铝销对 Al 黏着转移层的剪切去除作用相互竞争，共同控制 Al 的黏着转移行为。TiB_2 涂层磨痕内保持低表面粗糙度可减小高温软化铝销的机械涂抹倾向。同时 TiB_2 涂层与 Al 黏着转移层间优异的化学稳定性可阻碍界面反应进行，降低界面结合强度，进而促进铝销对 Al 黏着转移层的剪切去除作用。钛合金表面 TiB_2 涂层通过抑制铝销机械涂抹并增强铝销对 Al 黏着转移层的剪切去除而获得优异的抗 Al 黏着磨损性能。

73 表面织构下钛合金不同周次的微动磨损行为

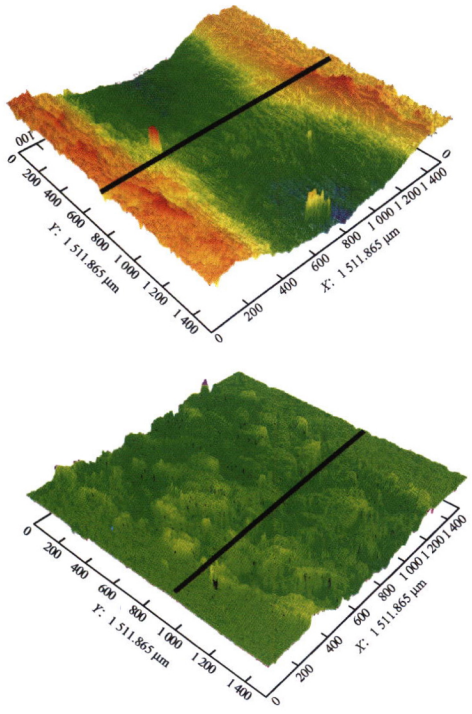
王剑飞 薛伟海 高禩洋 段德莉 李 曙



摘要：在航空发动机中，钛合金零部件的微动磨损不可避免。表面织构能在一定程度上减缓微动磨损，然而目前对表面织构下钛合金不同周次微动磨损行为的认识尚有不足。在 TC4 钛合金表面通过激光加工制备不同方向的沟槽状表面织构，随后进行不同周次的微动磨损试验。试验结果表明，在磨损的初期，有垂直方向表面织构的样品微动循环图更“瘦长”；随着磨损的进行，磨屑的分布状态发生了改变，其微动循环图变的和平行织构的样品以及无织构的样品相同。整个磨损过程随微动周次增加，分为黏着阶段和稳定阶段，垂直织构的样品上，黏着阶段又可被细分为黏着区域分散的阶段和黏着区域成片的阶段。随周次增加，磨屑的演变是由大块的磨屑层经不断被碾碎、氧化，转换成小块的磨屑，并且最终转换成细小的颗粒磨屑，被排出到磨损区域之外。研究结果对认识微动磨损行为中不同周次下表面织构的作用及磨屑的演化具有一定理论意义。

84 激光辅助热喷涂 NiCoCrAlYTa / ZrO_2 / BaF_2 • CaF_2 涂层的组织及性能

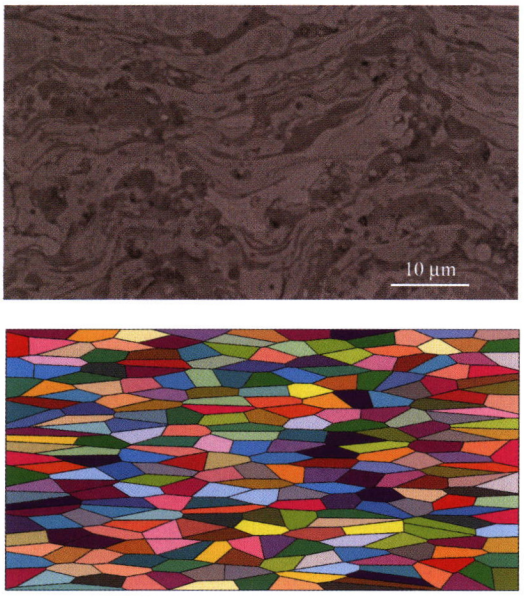
王长亮　陈皓晖　张　梅　杨胶溪　张　昂　梁帅帅



摘要：高温耐磨涂层是航空发动机关键摩擦副可靠使用的重要保障，鉴于其服役环境日益严苛复杂，进一步提高涂层的高温耐磨性能是十分必要的。利用激光辅助热喷涂技术制备 NiCoCrAlYTa / ZrO_2 / BaF_2 • CaF_2 高温耐磨涂层，利用 SEM、EDS 分析高温耐磨涂层的横截面微观组织及化学成分，研究 ZrO_2 / BaF_2 • CaF_2 质量分数、激光功率及扫描速度对耐磨涂层微观组织、力学性能及高温耐磨性能的影响。结果表明：激光辅助处理可以诱导耐磨涂层表面形成具有树枝状结构的 ZrO_2 陶瓷层；当激光功率为 80 W，扫描速度为 8 mm / s，喷涂粉末为 75 wt.% NiCoCrAlYTa+25 wt.% ZrO_2 / BaF_2 • CaF_2 时，制备涂层的微观组织、综合力学性能及高温耐磨性能达到最好；在此工艺参数下，涂层顶部的 ZrO_2 陶瓷层最为致密均匀，其平均纳米硬度为 13.6 GPa，平均弹性模量为 182.5 GPa，800 ℃时的磨损率为 2.7×10^{-5} $mm^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$。将高温耐磨涂层的组分设计与激光辅助热喷涂工艺相结合，可为提高涂层综合性能的提供解决途径。

96 基于晶体微观有限元方法的多相复合涂层高温摩擦应力场模拟

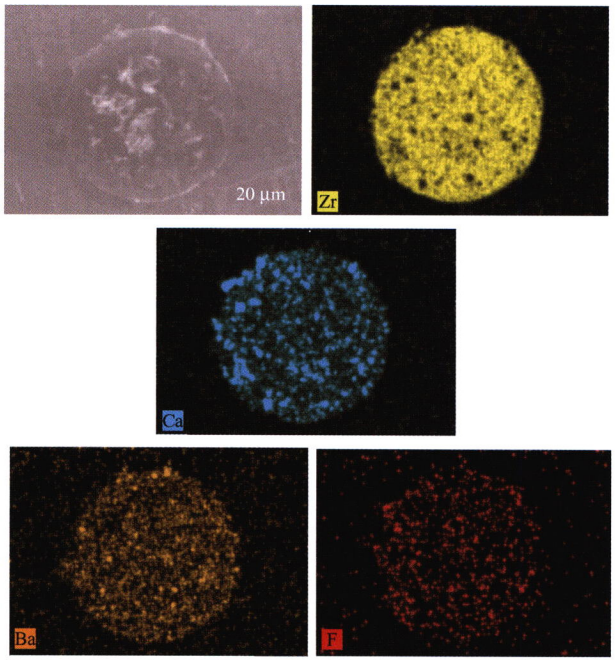
黄　啸　翟傲霜　张凤娇　王俊煜　邵天敏



摘要：对高温摩擦磨损工况下多相复合涂层的热-力耦合应力场的模拟研究尚不充分。基于 Voronoi 多边形建立 NiCr-Cr_3C_2-CaF_2 / BaF_2 多相复合涂层的晶体微观有限元模型，模拟复合涂层中各相的占比、分布形态和热-力学参数，求解得到热-力耦合工况下的 von Mises 应力和第一主应力分布。结果表明：在高温摩擦工况下，多相复合涂层的应力显著高于均匀涂层，尤其是在硬质相尖端附近易产生局部高应力区域，改善相的形态将锐角钝化能够有效缓解局部高应力现象；热-力耦合应力场与黏结相和硬质相的弹性模量密切相关，通过调节各相模量能够有效调控复合涂层的 Mises 应力和拉应力值。基于微观有限元方法的热-力耦合应力场模拟可为高温摩擦磨损工况下多相复合涂层的优化设计提供理论依据。

104 NiCr-Cr_3C_2-ZrO_2-BaF_2 • CaF_2 涂层高温摩擦磨损性能

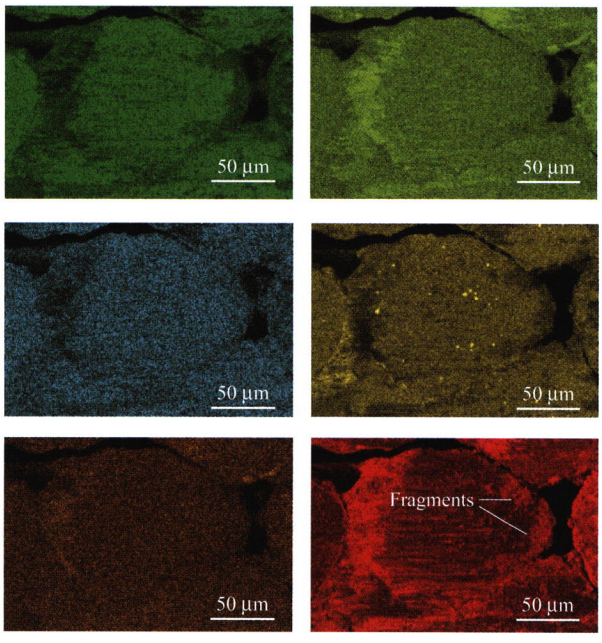
祁 斌 于海博 梁帅帅 李 疆 陈皓生



摘要：为提高 NiCr-Cr_3C_2-BaF_2 • CaF_2 涂层高温耐摩擦磨损性能，减少热喷涂过程中润滑相 BaF_2 • CaF_2 火焰烧蚀，采用溶胶凝胶方法将 BaF_2 • CaF_2 粉体以弥散形式包覆于抗烧蚀陶瓷相 ZrO_2 内，形成 ZrO_2-BaF_2 • CaF_2 抗烧蚀包覆型粉体，将粉体与 NiCr-Cr_3C_2 混合后爆炸喷涂以提高涂层内 BaF_2 • CaF_2 含量，并表征涂层微观组织和高温耐磨损性能。结果表明：ZrO_2 包覆型粉体中 BaF_2 • CaF_2 呈弥散式分布，制备的 NiCr-Cr_3C_2-ZrO_2-BaF_2 • CaF_2 涂层相比传统 NiCr-Cr_3C_2-BaF_2 • CaF_2 涂层，Ca、Ba 元素含量均提升 1 倍以上，两涂层显微硬度分别为 1 041 HV 和 690 HV，这说明 ZrO_2 陶瓷包覆能有效减少 BaF_2 • CaF_2 在喷涂过程中的高温烧蚀，且大幅提升了涂层硬度。高温摩擦磨损试验结果显示，NiCr-Cr_3C_2-ZrO_2-BaF_2 • CaF_2 涂层在 600 ℃、700 ℃和 800 ℃时的平均摩擦因数分别为 0.25、0.17 和 0.18，与 NiCr-Cr_3C_2-BaF_2 • CaF_2 涂层相比分别降低了 16.7%、39.3% 和 5.3%；NiCr-Cr_3C_2-ZrO_2-BaF_2 • CaF_2 涂层磨损率为 5.47×10^{-6} $mm^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$，较 NiCr-$Cr_3C_2$-$BaF_2$ • CaF_2 涂层降低了 38.6%。对磨球表面的微观表征显示，涂层中润滑相含量提升使 NiCr-Cr_3C_2-ZrO_2-BaF_2 • CaF_2 涂层在对磨球表面形成更为完整的润滑转移膜，这将有利于涂层的高温润滑性、稳定性和耐磨损性能。研究结果对热喷涂粉体中易烧蚀物相的热防护和高温自润滑耐磨涂层性能的提升具有借鉴意义。

114 刷式密封高温摩擦磨损行为

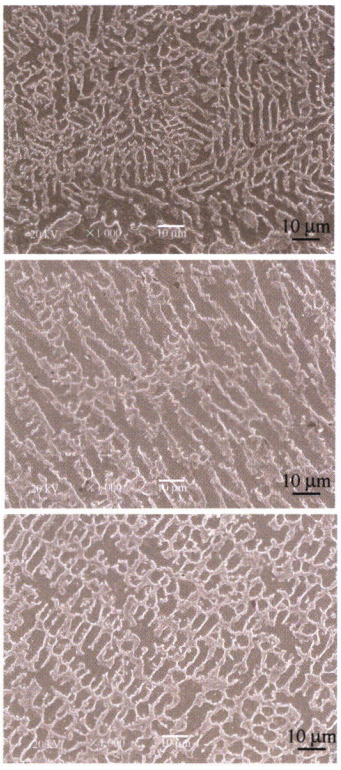
徐乙人 祁志浩 李永健 赵炬颖 马 婷



摘要：刷式密封能够提升各类透平机械的性能，近年来航空发动机对刷式密封提出了更高的工作温度要求。为研究高温条件下跑道对刷丝尖端的磨损作用，针对性地研制基于电磁加热原理的刷式密封高温磨损试验设备，并成功完成 GH5605 材料的刷封试样与转子跑道之间的高温高速磨损试验，试验温度达到 700 ℃，试验线速度达到 100 m / s。为研究刷丝柱面的高温摩擦磨损行为，基于 SRV 摩擦磨损试验机开展刷丝柱面模拟磨损试验。研究结果表明：刷丝尖端与跑道耐磨涂层之间的磨损机理以磨粒磨损为主，随着跑道温度升高，刷丝尖端附着的氧化物增加，并可使刷丝柱面产生粗糙氧化层；温度对刷丝柱面的磨损行为有显著影响，常温条件下刷丝柱面呈现出显著的黏着磨损特征，在 300 ℃和 700 ℃的试验温度条件下，氧化现象削弱了刷丝柱面的黏着磨损作用，并使其摩擦因数和磨损速率降低。研究结果揭示了刷式密封的磨损机理及高温条件对其磨损行为的影响，可为提升刷式密封的磨损性能提供理论指导。

122 球墨铸铁表面激光熔覆 Ni-Co 复合涂层的耐腐蚀及高温摩擦学性能

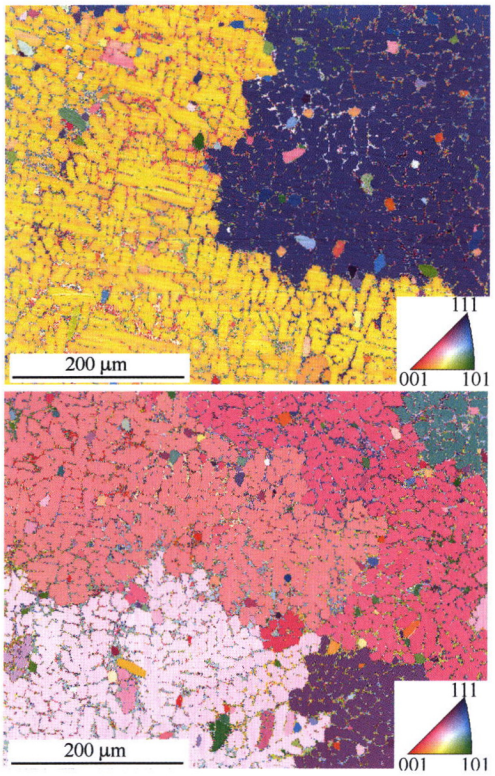
路世盛　周健松　王凌倩　梁　军



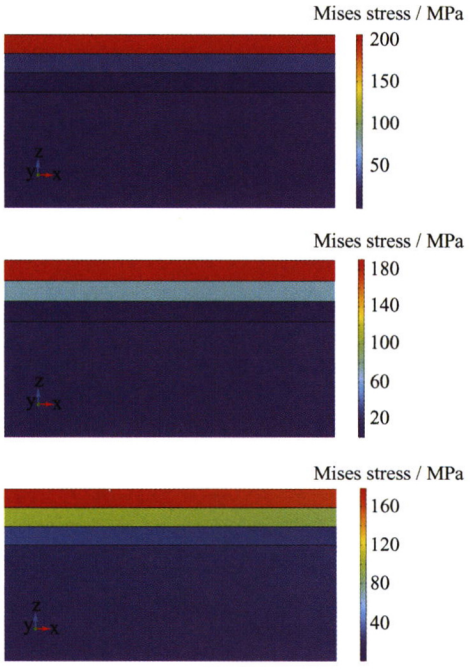
摘要：为降低球墨铸铁激光熔覆过程中白口组织的含量，改善其高温摩擦学性能和耐腐蚀性能，采用激光熔覆技术，通过添加 Ni 基过渡层在球墨铸铁表面制备 Co 基涂层。利用 XRD、SEM、EDS 表征不同熔覆层的物相组成、微观结构。采用高温摩擦磨损试验机测试不同温度下 Co 基涂层与球墨铸铁的摩擦磨损性能，分析 Co 基涂层在不同温度下的磨损机理。利用电化学工作站测试 Co 基涂层与球墨铸铁的耐腐蚀性能。结果表明：Ni 基过渡层的物相为 γ-Ni 固溶体和 Ni_3Si 陶瓷相。Co 基涂层主要由 γ-Co 固溶体和 Cr_7C_3 陶瓷相构成。Ni 基过渡层的添加抑制了基材中 C 元素扩散，降低了结合界面处白口化趋势。由于 Cr_7C_3 陶瓷相的强化作用，Co 基涂层的显微硬度为球墨铸铁基材的 2.1 倍。与球墨铸铁基材相比，当温度高于 200 ℃时，Co 基涂层在与 Si_3N_4 配副对磨时表现出较低的平均摩擦因数与磨损率。在中低温条件下 Co 基涂层与 Si_3N_4 配副对磨时的磨损机制为黏着磨损与磨粒磨损，高温条件下的磨损机制为形成连续光滑的氧化层起到减摩抗磨的作用。Co 基涂层表现出更高的自腐蚀电位（−362.36 mV）和更低的自腐蚀电流密度（13.95 nA •cm^{-2}）。所制备的 Ni-Co 复合涂层能有效提高球墨铸铁表面的高温摩擦学性能和耐腐蚀性能，在发动机领域具有较好的应用前景。

132 基于相平衡计算的 Hf 掺杂 NiCoCrAlY 高温涂层设计及强化机理

王晓明　韩国峰　尹轶川　朱　胜

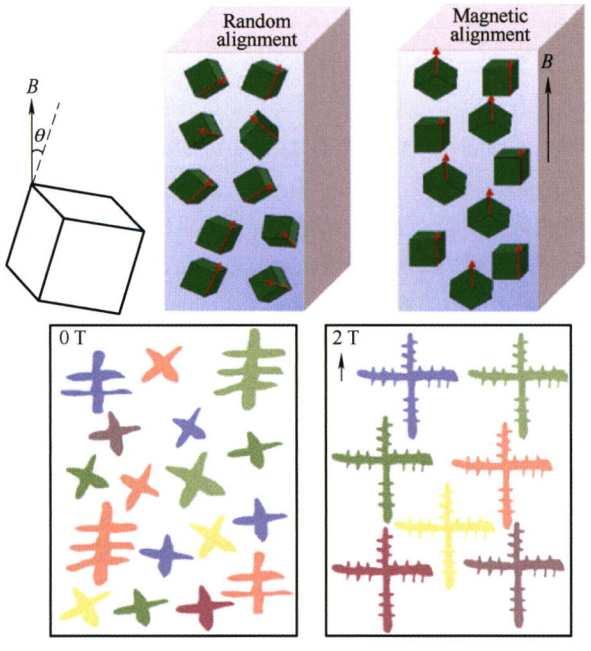


摘要：MCrAlY 涂层以其优异的高温抗氧化性能和力学性能，成为燃气轮机高温防护部件不可或缺的一部分，但涂层、基体和环境之间的复杂相互作用，使得某些合金元素的单一添加无法满足现有 MCrAlY 涂层的使役要求。采用真空悬浮熔炼法制备块状 NiCoCrAlY 合金，使用 Thermo calc 软件计算掺杂元素后 NiCoCrAlY 合金的相平衡，利用 X 射线衍射仪（XRD）对 NiCoCrAlY 合金进行物相检测，利用扫描电子显微镜（SEM）和电子背散射衍射（EBSD）研究合金的微观结构和晶粒取向，通过显微硬度、纳米压痕和压缩试验来表征其力学性能。选用优选出的合金成分制备粉体，利用 HVAF 喷涂技术制备涂层试样，与商用 NiCoCrAlY 涂层在相组成、显微组织、力学性能和耐磨性能上做对比研究。结果表明，随着 Hf 含量的增加，合金中晶粒尺寸增大；当 Hf 含量为 1 wt.%时，合金的抗压强度和抗压应力得到提高；Hf 含量为 4 wt.%时，合金具有较高的塑性。掺杂改性后的 NiCoCrAlYNbMoHfTa 涂层中主相为 β 相；涂层显微硬度显著提高，且有着和商用 NiCoCrAlY 涂层相近的结合强度；相较于商用 NiCoCrAlY 涂层，NiCoCrAlYNbMoHfTa 涂层表现出更加优异的磨损防护性能。对传统的 MCrAlY 材料进行掺杂，探明 Hf 掺杂对 NiCoCrAlY 合金的力学性能影响及强化机制，所制备的涂层具有良好的力学性能和摩擦学性能。

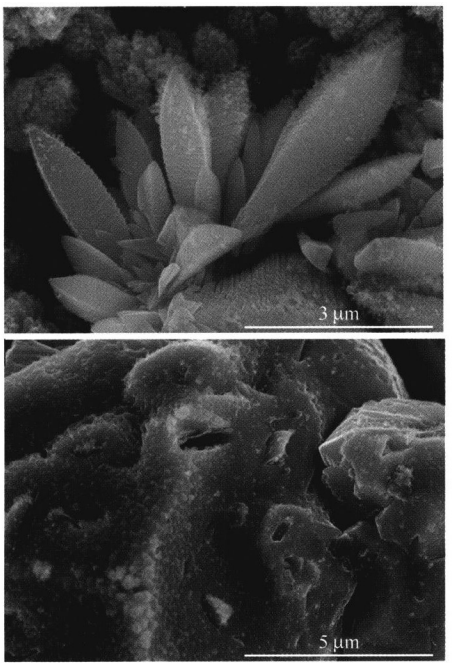


摘要：针对复合涂层的现有仿真方法多基于单一物理场的影响，不能反映多物理场耦合作用等实际工况下的力学性能。以航空发动机附件机匣的典型工况环境为背景，建立描述流-固-热耦合作用下梯度复合涂层各物理参数变化的数学模型，计算涂层不同分布方式下其内部的 von Mises 应力分布。结果表明，过渡层材料组分的渐变方式对涂层热应变和层内 von Mises 应力分布有较大影响，以航空发动机附件机匣中某型花键副为例，在施加实际工况下的载荷和温度条件后，温度场引起的热应力较载荷-润滑引起的应力更大，在润滑、热场和载荷的耦合作用下，三种分布方式的涂层最大应力均位于表层，随梯度的增大逐渐向基体扩散；梯度增大的过渡方式在涂层内可以获得最小的最大 von Mises 应力。在所关注的温度范围内，与梯度减小的过渡方式相比，使用梯度增大的过渡方式可使最大 von Mises 应力减小 14.5%。所建立的仿真方法可模拟近似实际工况，研究结果可用于指导梯度复合涂层的设计和制备。

综 述 论 文

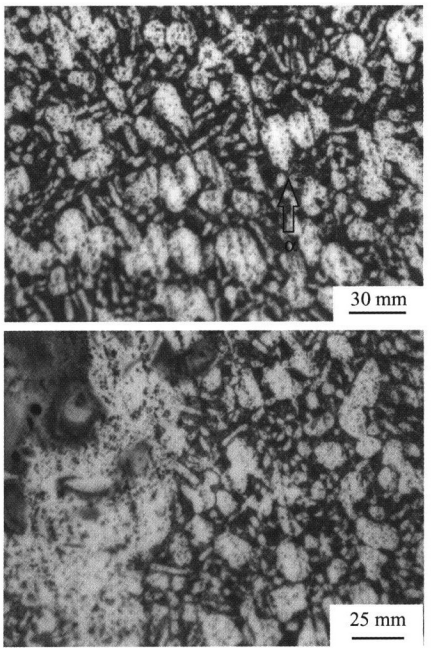


摘要：利用磁场辅助金属凝固，不仅可以细化晶粒、改善凝固组织的力学性能，同时由于磁场和熔融态金属是非直接接触，还可以避免缺陷的引入，进而已成为研究热点。针对磁场作用下的金属熔体形核和晶核生长特点，对金属凝固过程进行深入分析，从磁场对金属凝固的影响原理和仪器设备两个方面进行总结，综述磁场作用下金属凝固的研究进展；分别从铁磁性、顺磁性、抗磁性三种磁性金属在磁场作用下试验研究进行梳理分析。结果表明：磁场引发的洛伦兹力、热电磁力、磁转矩及磁取向等作用通过影响金属熔体的形核和晶核生长，最终改善凝固组织性能；磁场设备利用永磁铁或者电磁铁产生磁场环境；三种磁性金属在磁场环境下凝固后的性能改善体现在力学性能、导电性能、磁性能等方面。最后归纳磁场辅助金属凝固过程中所存在的问题，并展望未来的发展趋势。



摘要：MAX / 金属基自润滑复合涂层具有优异的力学性能和摩擦学性能，MAX 相的加入拓宽了金属基复合涂层的研究和应用范围。首先分析 MAX / 金属基复合涂层在摩擦磨损过程中自润滑特性是如何起作用的，分别从 MAX 相的本质结构说明自润滑性能的存在，摩擦过程中润滑膜的生成说明提高减摩润滑性能的原因。随后阐述近年常见几种 MAX 相涂层以及 MAX / 金属基复合涂层的制备和特性，包括 Ti_2AlC、Cr_2AlC 涂层、高低温金属基体下的 MAX 复合涂层。最后归纳总结 MAX / 金属基复合涂层常见应用领域和表面防护效果，并对 MAX / 金属基复合涂层目前存在的问题和涂层质量的提升进行展望，为 MAX / 金属基自润滑复合涂层的推广应用提供参考。

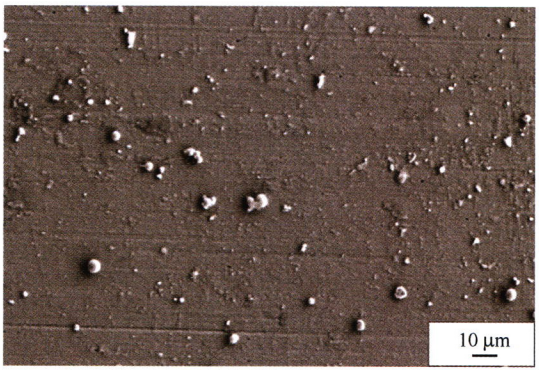
研 究 论 文



摘要：为实现激光冲击强化技术在航空发动机风扇 / 发动机叶片上的有效应用，针对强化后钛合金抗外物损伤能力研究不够深入的问题，先后开展 TC11 钛合金的激光冲击强化试验以及外物损伤试验。首先对 TC11 钛合金平板试验件进行激光冲击强化试验，分别测试强化与未强化试验件材料硬度和残余应力。测试结果表明激光冲击强化显著提高了试验件 0～0.2 mm 深度的显微硬度以及 0～0.8 mm 深度的残余压应力。使用空气炮法对强化与未强化的试验件进行外物损伤试验，测量损伤的宏观尺寸，并观测试验件的金相组织。测试结果表明：激光冲击强化有效地减小损伤凹坑的深度；经过外物冲击后，晶粒发生明显的破碎现象；激光冲击强化能显著提高试验件表面与近表层的残余压应力，且激光冲击强化会细化试验件表面组织，从而提升基体材料的显微硬度，有效减少外物冲击带来的损伤。研究了激光冲击强化对外物损伤宏观的影响规律，并且从损伤的微观特征来解释强化对 TC11 材料抗外物损伤能力的提升。

191 超高速激光熔覆成形 M2 涂层

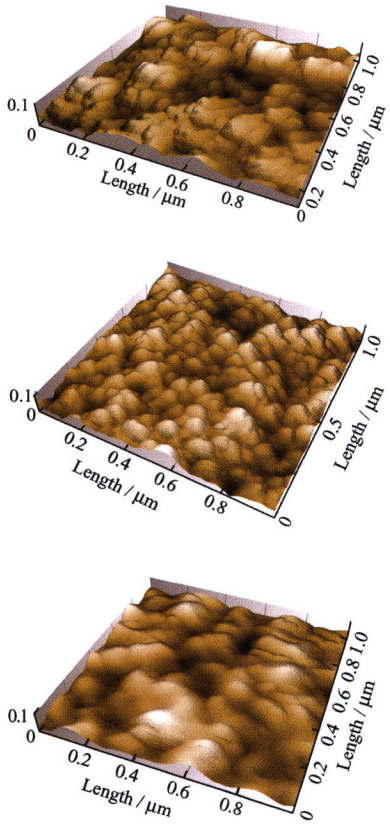
郑红彬　王淼辉　乔培新　葛学元　王　欣



摘要：为修复受损轧辊、提高轧辊使用寿命，利用超高速激光熔覆技术，在 9Cr2Mo 钢表面熔覆成形 M2 高速钢制备的涂层。为提高熔覆层质量，设计正交试验与对比试验，并借助光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度计，对不同扫描速度、激光功率、道次间距条件下熔覆层的宏观形貌、微观组织、显微硬度进行研究分析。结果表明，扫描速度对宏观平整度影响最大，提高扫描速度、降低激光功率、增大道次间距可提高涂层平整度；确定最优工艺参数为：激光功率 1.5 kW，扫描速度 35 m / min，道次间距 0.30 mm 的组合和激光功率 1.7 kW，扫描速度 35 m / min，道次间距 0.35 mm 的组合；熔覆层组织细小、成分均匀，主要为等轴晶，晶粒边界出现网状碳化物；熔合线处晶粒尺寸较为细小，熔覆道中部组织相对较大，道次间熔合线下方组织粗化明显；制备的 M2 涂层显微硬度整体高于基体，且具有较好的耐磨性。

203 高功率脉冲磁控溅射技术制备纳米级 ZrO_2 薄膜的高耐腐蚀性

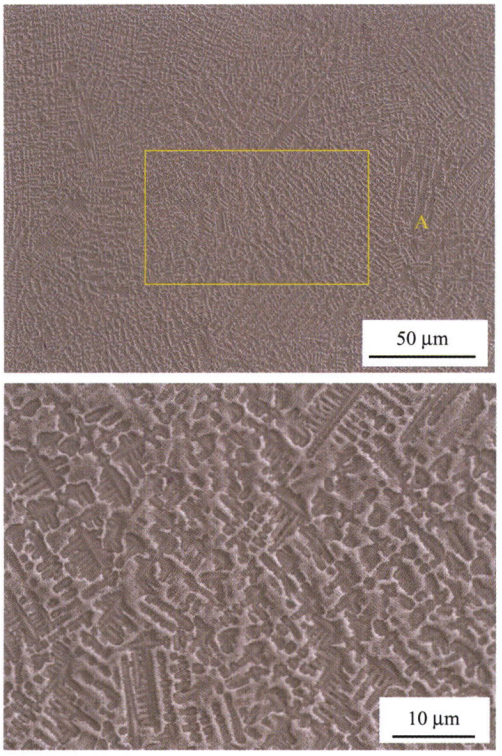
孙　丽　蒋　琴　张志强　李　倩　廖　斌　欧阳晓平



摘要：高质量的金属氧化物薄膜在航天航空、海洋船舶等极端环境下的关键部件有着广泛的应用需求，但传统制备技术易导致薄膜疏松多孔，产生空隙裂纹等缺陷，高功率脉冲磁控溅射技术（HiPIMS）已被证明是一种有效制备无空洞和无弧滴致密薄膜的有效方法。通过 HiPIMS 技术在不锈钢表面制备超薄致密 ZrO_2 薄膜，重点研究不同 O_2 流量下耐腐蚀性能的调控规律。通过扫描电子显微镜（SEM）、光电子能谱仪(XPS)、X 射线衍射仪（XRD）、原子力显微镜（AFM）、纳米压痕仪（Nano Test P3）、电化学设备（CS300）等对 ZrO_2 薄膜的表面形貌、物相结构、力学性能、耐腐蚀性能等方面进行研究。研究结果显示，在 O_2 流量为 40 mL/ min 时，ZrO_2 薄膜的纳米硬度 H 最高为 26.38 GPa，弹性模量 E 为 290.9 GPa；同时，在电化学腐蚀试验中，其自腐蚀电流密度 I_{corr} 达到 45.802 pA / cm^2，与 304L 不锈钢相比降低了 4 个数量级；电化学阻抗谱(EIS)显示，随 O_2 流量的增加，容抗弧半径、低频区阻抗值和相角均随之不断增大，进一步表明 O_2 流量为 40 min / mL 制备薄膜的耐腐蚀性能最优。通过 HiPIMS 技术能够制备出高质量的 ZrO_2 薄膜，其高耐腐蚀性对基体起到了强效的防护作用，对防腐薄膜的研究和应用具有一定参考价值。

214 功率对激光熔覆$(Fe_{0.25}Co_{0.25}Ni_{0.25}Cr_{0.125}Mo_{0.125})_{86}B_{14}$涂层组织均质性及磨损性能的影响

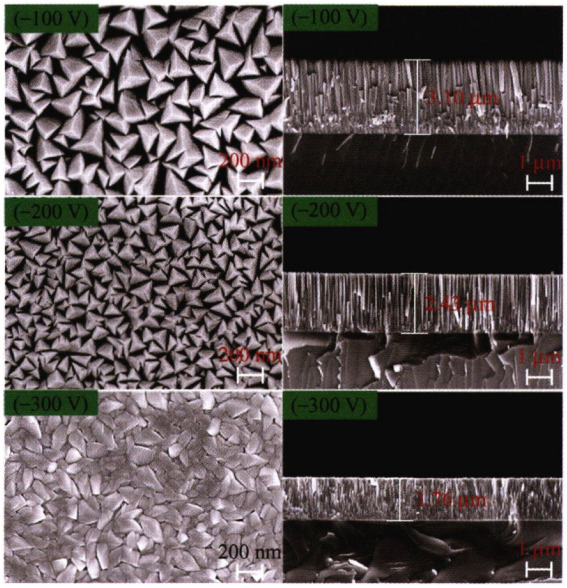
张国松　侯怀志　殷强浩　刘　涛　王文超　玄纪元　崔洪芝



摘要：目前激光熔覆缺少对涂层组织、相结构纵向均质性与性能关联的研究。采用激光熔覆技术，选取不同的激光功率，制备$(Fe_{0.25}Co_{0.25}Ni_{0.25}Cr_{0.125}Mo_{0.125})_{86}B_{14}$高熵合金涂层；借助电子探针（EPMA）、扫描电子显微镜（SEM）、能谱仪（EDS）和 X 射线衍射仪（XRD）等观察涂层微观组织与物相纵向分布，利用显微硬度计和摩擦磨损试验机测试涂层不同深度部位显微硬度及磨损性能，分析激光功率对熔覆$(Fe_{0.25}Co_{0.25}Ni_{0.25}Cr_{0.125}Mo_{0.125})_{86}B_{14}$涂层纵向组织、物相分布影响规律及磨损性能。结果表明：三种功率下，涂层均由 BCC+FCC 相、硬质相 Mo_2B 组成，Mo_2B 在枝晶间富集。随着功率的增加，涂层中底部显微组织由细枝晶向粗大的柱状晶转变。三种涂层硬度均由表及里先增加后降低，摩擦因数先降低后增加；但是当激光功率为 1.6 kW 时，涂层呈现以 1.6 kW BCC 相为主的 FCC+BCC 双相结构，且由表及里 BCC 相含量不断增加、Mo_2B 含量逐渐减少，涂层组织均质化最高，摩擦因数变化梯度最小，耐磨损性能最佳。激光功率会影响熔覆高熵合金耐磨涂层均质性，进而影响摩擦性能的稳定性。

226 同步脉冲偏压对 HiPIMS 技术低温沉积 CrN 涂层结构及性能影响

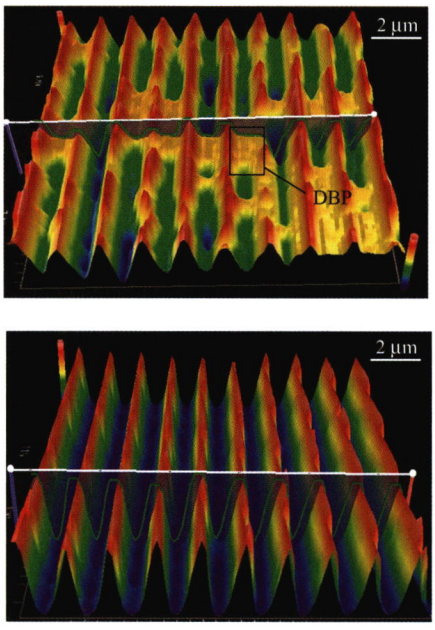
贵宾华　周　晖　张腾飞　马占吉　杨拉毛草　张延帅



摘要：针对高性能 CrN 涂层无法实现低温可控制备的技术瓶颈，利用具备高溅射材料离化率的高功率脉冲磁控溅射技术，调控同步脉冲偏压，改善涂层生长动力学条件，实现 CrN 涂层的低温可控沉积。开展同步脉冲偏压与涂层化学组成、组织结构、力学、摩擦学及耐腐蚀性能间关联关系研究。同步脉冲偏压在提升沉积离子束流迁移能的同时可显著降低荷能 Ar^+对成膜表面的持续轰击作用，达到改善涂层致密性及膜基结合力的目的。此外，沉积 CrN 涂层晶粒细化显著，硬度及弹性模量明显升高，最高可达 13.8 GPa、236.7 GPa。涂层力学性能优化及致密性提升显著改善了摩擦学与耐腐蚀性能，涂层磨损率最低可达 2.49×10^{-15} $m^3/(N\cdot m)$，同时涂层可耐受 120 h 中性盐雾腐蚀环境考核。为实现高性能 CrN 涂层的低温可控制备，扩展其在温度敏感基体领域的适用范围提供了新的设计思路与技术支撑。

235 镀铝衍射光栅表面有机污染物的等离子体清洗技术

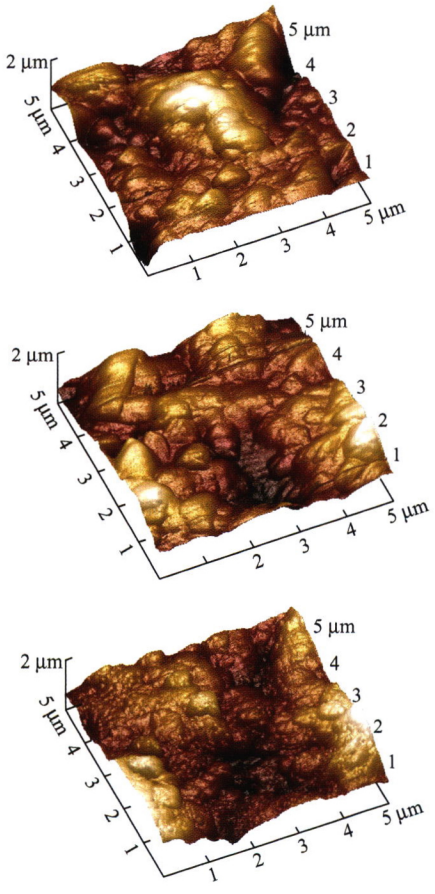
孙 浩 白清顺 李玉海 张 鹏 杜云龙



摘要：高能量激光装置中衍射光栅吸附的有机污染物是导致衍射光栅损伤的关键因素之一，采用等离子体清洗技术可以实现衍射光栅表面污染物的在线去除。通过有限元方法分析等离子体清洗范围，获得等离子体清洗半径随着清洗距离下降而增加的规律。研究等离子体清洗工艺参数与表面有机污染物去除效果间关系，结果表明随着清洗距离以及工艺气体中氧气含量的上升，镀铝衍射光栅表面自由能的极性部分和色散部分都会增加，其中极性部分的增加起主导作用。等离子体清洗后的镀铝衍射光栅表面呈现洁净状态的周期性锯齿形结构，并且 C1s（285.0 eV）峰值由 6.65×10^4 降低至 2.86×10^4。研究等离子体清洗镀铝衍射光栅后表面自由能变化情况，结果表明镀铝衍射光栅表面的极性基团会吸附空气中的碳氢化合物，出现表面自由能下降的陈化现象。研究结果可为镀铝衍射光栅表面有机物污染物的等离子体在线去除提供新的途径。

245 纳米 Al_2O_3 / TiO_2 多层涂层的低温制备及其性能

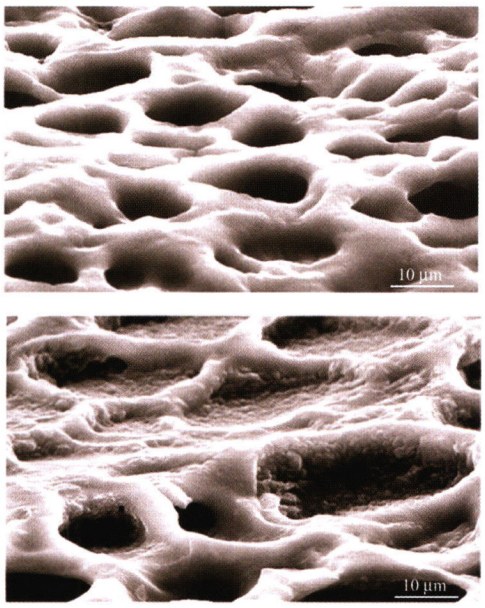
卞 凯 唐思文 王 睿 杨植富 张 浩 刘 骞 刘德顺



摘要：采用原子层沉积技术（ALD）在 200 ℃低温条件下将纳米 Al_2O_3 / TiO_2 多层涂层沉积在硬质合金刀具表面。利用扫描电镜 SEM、划痕测试仪和三向测力仪以及数控机床等设备，对不同形式的纳米 Al_2O_3 / TiO_2 多层涂层刀具的涂层-基体结合力和切削性能等进行研究。结果表明，基于原子层沉积技术低温制备的纳米多层涂层刀具的涂层-基体结合强度高；涂层层数、涂层沉积顺序及涂层层厚比对纳米多层涂层刀具的切削力有不同程度的影响；纳米多层涂层刀具更适合高速切削，当切削速度大于 2.33 m / s 时，纳米多层涂层刀具的切削力和摩擦因数呈下降趋势，表现出良好的切削性能，其中双层纳米涂层刀具的切削性能更好；在高速切削时，纳米多层涂层刀具表面摩擦因数比普通未涂层硬质合金刀具低，纳米 Al_2O_3 / TiO_2 多层涂层能够有效改善刀具的黏结磨损，减少刀-屑粘黏现象和烫伤现象，能够改善刀具表面的耐磨损性能。

254 氧化锌掺杂压电水凝胶的制备及其抗菌机理

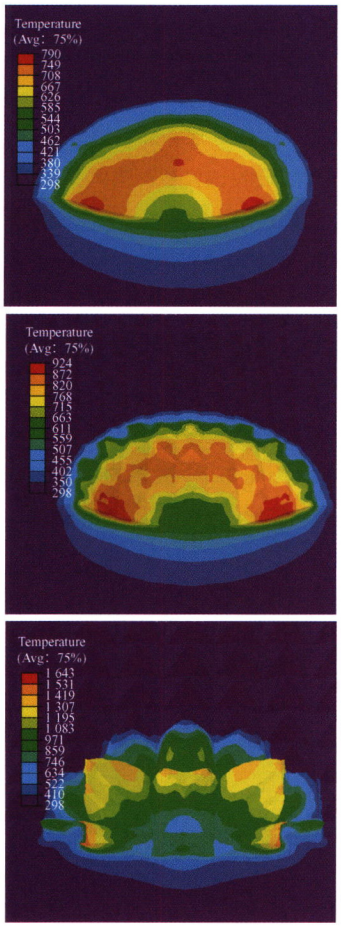
邓伟成　谭帼馨　田　雨　梁泽辉　管幼钧　周正难



摘要：氧化锌纳米颗粒（ZnO NPs）因其优异的压电特性在生物医学领域中得到广泛应用。通过对 ZnO 进行硅烷化改性使其表面接枝氨基，并将其掺杂在甲基丙烯酸酐化明胶、N, N-二甲基丙烯酰胺和α-甲基丙烯酸共聚交联的水凝胶中，通过傅里叶红外光谱（FTIR）、核磁共振氢谱（1HNMR）、扫描电镜（SEM）、流变学试验、电学表征、电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）及抗菌试验，对水凝胶的成分、形貌、力学性能、压电性能、Zn^{2+}释放量和抗菌性能进行分析。研究结果表明，掺杂不同浓度的改性氧化锌（KH550-ZnO）后，水凝胶储存模量均高于损耗模量且维持在 1.8～2.5 kPa；在 5 N 动态压力作用下，随着 KH550-ZnO 掺杂量的增加，材料产生的电压从 1.7 mV 上升到 30.5 mV。此外，对压电水凝胶的抗菌机理进行初步探讨，当 KH550-ZnO 的掺杂量大于 0.1% g / mL 时，水凝胶对大肠杆菌的抗菌率达到 98%以上，并证实了压电材料的压电性能可增强其抗菌性能。

262 基体表面粗糙度对冷喷涂 Ti6Al4V 界面结合的数值模拟

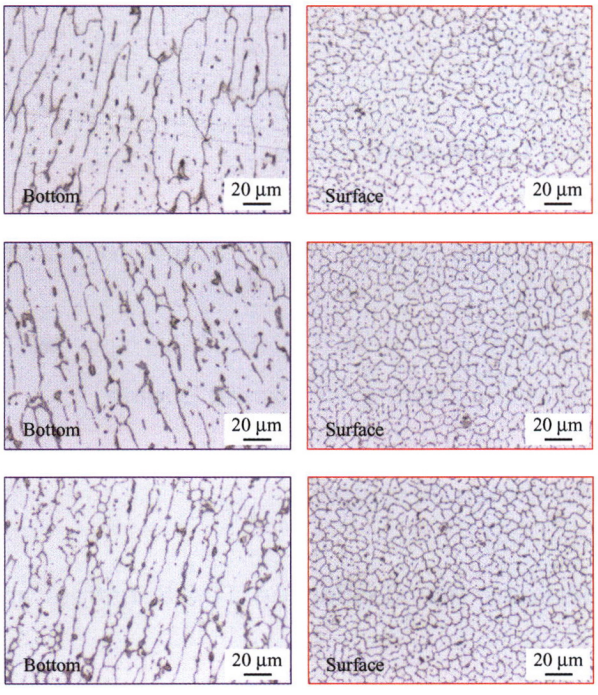
蒋圣威　周红霞　李雪婷　王　铀



摘要：在冷喷涂过程中，基体的表面粗糙度会影响涂层和基体之间的结合，目前对该问题关注还不够，且存在一定争议。以冷喷涂修复 Ti6Al4V 钛合金（TC4）过程为研究对象，利用有限元模拟手段，建立二维和三维单粒子在不同表面粗糙度基体上的撞击模型。通过分析粒子在撞击到光滑表面、研磨表面和喷砂表面三种情况下界面的温度、等效塑性应变及系统能量的变化，得出以下结论：随着基体表面粗糙度的增加，粒子的等效塑性应变和扁平率逐渐减小。界面温度和等效塑性应变在基体“波峰”处较高，在“波谷”处较低，在高的表面粗糙度下，粒子的塑性变形减弱，反弹趋势增强。研究结果表明，对冷喷涂 TC4 修复过程而言，基体的粗糙化不利于涂层与基体的结合。研究结果 nT 可为冷喷涂修复钛合金过程中基体预处理方式的选择提供理论指导。

273 激光熔化沉积制备 2A50 锻造铝合金组织性能

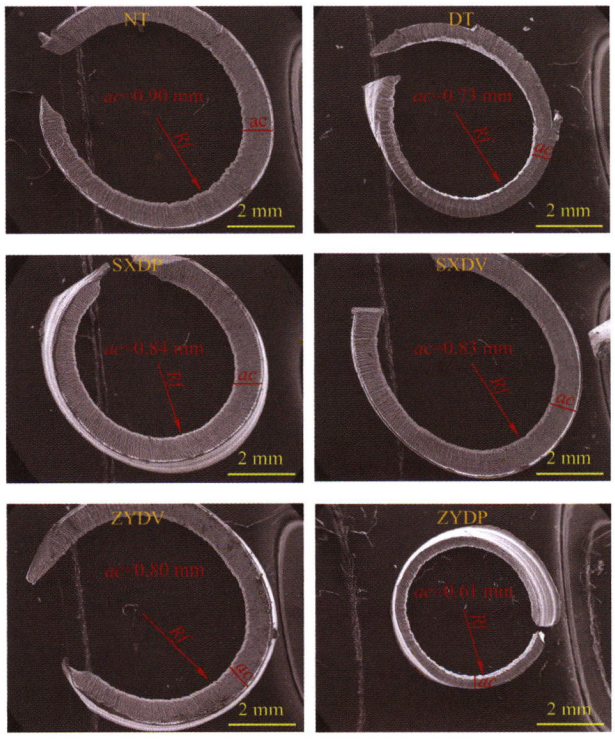
赵宇辉　孙力博　赵吉宾　王志国　何振丰　贺　晨



摘要：工艺参数的协同调控决定了沉积工件的组织与性能，在锻造铝合金零件激光增材修复工程应用方面具有重要研究价值。采用 OM、SEM、XRD 等试验方法，研究能量密度对激光沉积成形 2A50 铝合金构件组织与性能的影响规律。结果表明：当能量密度低于 200 J / mm^2 时，成形效果较差且产生粉末球化、未熔合等凝固缺陷；随着能量密度的提高，沉积试样底部和顶部一次枝晶间距均明显缩短、平均硬度由 85.7 HV 提高至 92.1 HV；过高的能量密度输入会导致熔池内部分低熔点合金元素蒸发形成气孔缺陷、同时削弱了合金元素的固溶强化效果。在优化的能量密度（333 J / mm^2）条件下，激光沉积成形 2A50 锻造铝合金构件获得了较优的综合力学性能，其屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 85 MPa、207 MPa 和 14%。为航空重大装备关键零部件的激光增材修复探索出一条行之有效的技术途径。

281 复合织构刀具切削铝合金的性能

周　云　何玉洋　杨泽檀　杨　杰　符永宏



摘要：基于铝合金材料切削的现状和需求，针对单一织构刀具存在的抗黏减摩性能不足的问题，将不同织构应用于刀-屑接触区域，提出刀具前刀面分区异构的思想。利用皮秒激光在刀具黏结区与滑移区分别加工凹坑和沟槽，并调整沟槽的取向（平行 / 垂直于主切削刃），得到上下型（SXDV 和 SXDP）和左右型（ZYDV 和 ZYDP）四种复合织构刀具。对 6061 铝合金进行湿切削试验，研究不同区域内添加不同织构对刀-屑接触表面摩擦状态的影响。研究结果表明，对比无织构和单一织构刀具，ZYDP 复合织构刀具展现了更好的切削性能。具体表现如下：与无织构刀具相比，ZYDP 刀具的主切削力降低 30.7%，刀面黏结面积减少 63.9%，切屑卷曲半径减少 27.4%。合理的复合织构方案可以明显改善刀具切削过程中的黏结磨损问题，延长了刀具寿命。复合织构方案的提出以及相应的激光加工过程可为织构刀具的设计及实际应用提供新思路。

CHINA SURFACE ENGINEERING

Vol. 35 No. 3 Jun. 2022

CONTENTS

《中国表面工程》第六届编委会

ISSN 1007-9289