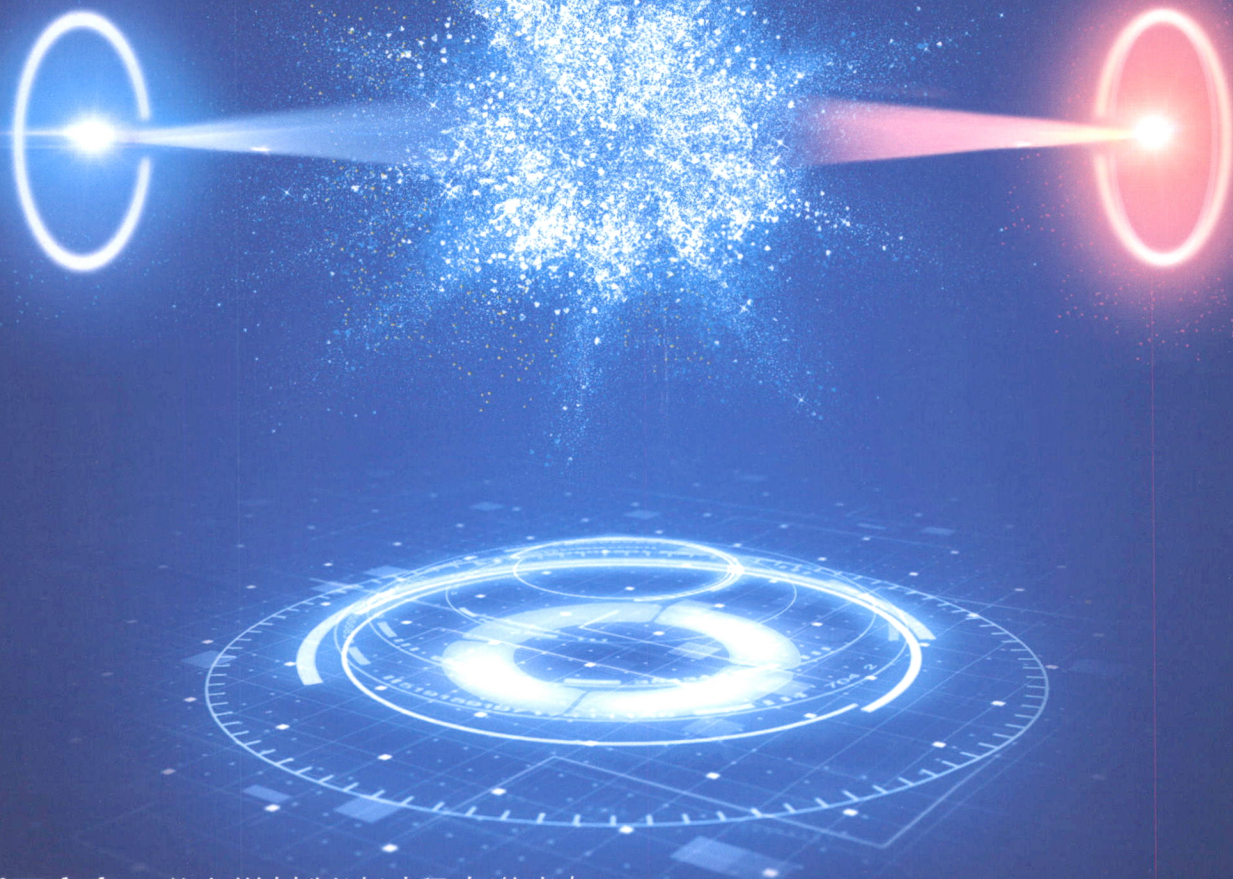


中国表面工程

CHINA SURFACE ENGINEERING



封面文章：激光增材制造过程中激光与
粉末的相互作用研究现状

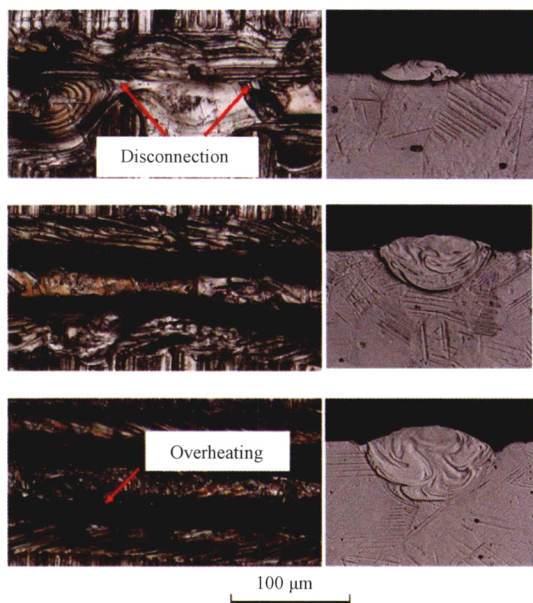
作者：叶福兴 王永辉 娄智

34卷 **2** 期 双
月刊
2021年4月刊

/// 综述论文 ///

1 激光增材制造过程中激光与粉末的相互作用研究现状

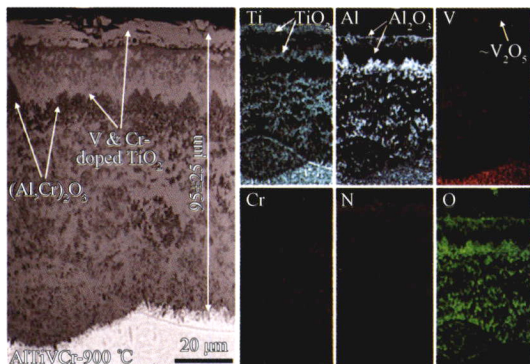
叶福兴 王永辉 娄智



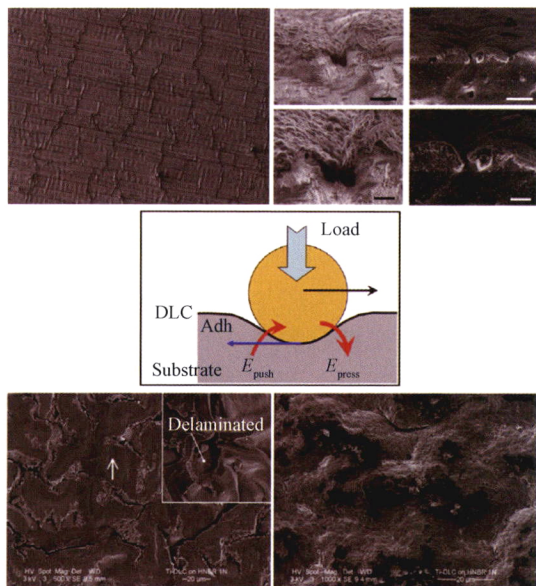
摘要: 激光增材制造是通过激光加热熔化粉末或丝材并逐层叠加而形成所需工件的一种增量制造技术。该技术涉及非常复杂的非平衡物理和化学冶金过程,在加工过程中易产生非平衡组织和晶粒取向。激光与粉末的相互作用过程是整个加工过程中最为重要的部分,系统总结激光与粉末的相互作用对于增进对激光增材制造技术的理解,进而提升工件性能具有重要的意义。按照送粉式与铺粉式激光增材制造两种加工方式,分析了激光能量的衰减、粉末颗粒温度的上升以及激光-粉末-熔池的相互作用,综述了激光与粉末相互作用的研究现状。

13 轻质高熵合金的研究进展

周鹏远 刘洪喜 张晓伟 郝轩弘 王悦怡 陈林



摘要: 目前以一种或两种金属元素为主元的传统轻质合金在工业应用上有诸多局限性,如铝合金室温强度低、镁合金室温塑性和耐腐蚀性差且不易加工等。2004年叶均蔚首次正式提出高熵合金概念。高熵合金概念的提出为轻质合金的发展提供了新方向。区别于传统轻质合金,轻质高熵合金具有多种主元元素且混合熵较高,往往倾向于生成简单固溶体相。且轻质高熵合金表现出四大显著效应,即热力学上的高熵效应、动力学上的缓慢扩散效应、结构上的晶格畸变效应及性能上的“鸡尾酒”效应。独特的晶体结构和特性,使得轻质高熵合金具有传统轻质合金无法比拟的优点,如高强度、高硬度、优良的高温抗氧化性和耐腐蚀性能等。综述了轻质高熵合金的研究现状,阐述了轻质高熵合金的组元设计、制备方法、微观结构及合金性能,分析了轻质高熵合金现存的问题,并对轻质高熵合金未来的发展趋势进行了展望。

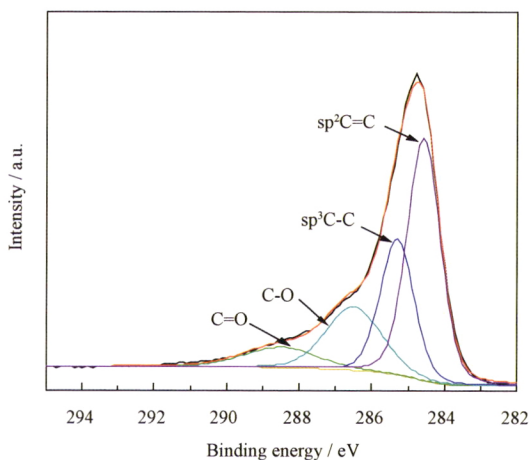


摘要: 橡胶具有良好的压缩性和回弹性及良好的气密性、耐溶剂性等性能,是航空航天、石油化工、汽车工业等领域必不可少的密封材料。然而,实际服役中其因摩擦因数极高(≥ 1)而易磨损失效,进而引发密封介质泄漏,严重影响设备安全性及服役寿命。类金刚石碳基薄膜由于其高硬度、化学惰性、低摩擦磨损特性等被认为是最有前景的橡胶表面耐磨改性涂层。一方面,通过调整薄膜沉积参数可以控制薄膜灵活度和沉积温度,足够的灵活度要求薄膜能够适应橡胶软基底形变而不会发生崩落,而低的沉积温度可以避免降解或破坏橡胶基底;另一方面,碳基薄膜的化学成分(主要包括碳和氢)与橡胶展现出极好的相容性,可以确保其良好的结合强度。综述了近 20 年来橡胶表面碳基薄膜耐磨改性研究的重要结果和最新进展,总结了目前研究中尚未解决的问题及未来的研究方向。

/// 研究论文 ///

35 调制比对 HiPIMS 制备多层 DLC 薄膜耐腐蚀性能的影响

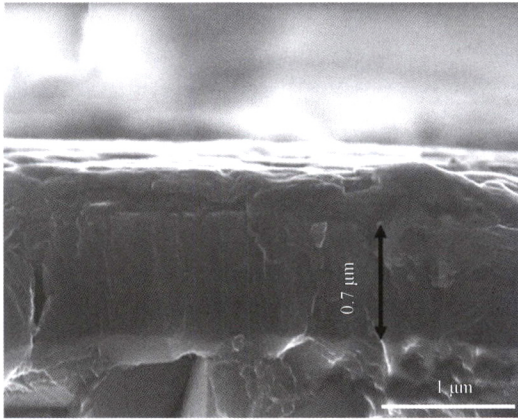
贾昆鹏 王雪 徐锋 施莉莉 赵延超 左敦稳



摘要: 为获得具备优异耐腐蚀性能的一类金刚石(DLC)涂层,采用高功率脉冲磁控溅射技术(HiPIMS)在硅片表面制备软(低 sp^3 含量)硬(高 sp^3 含量)交替多层类金刚石薄膜,探究调制比对薄膜耐腐蚀性能的影响。采用XPS、四探针电阻仪、轮廓仪对薄膜成分、电阻率、残余应力进行检测分析,通过电化学测试获得多层DLC薄膜的极化曲线。结果表明:相较于低衬底偏压(-25 V)下沉积的纯软DLC薄膜,高衬底偏压(-75 V)下沉积的纯硬DLC薄膜 sp^3 含量明显升高;纯软薄膜电阻率为 $100.53 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$,纯硬DLC薄膜电阻率高达 $1585.21 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$,电阻率随着硬膜厚度的增加而增加;薄膜中残余应力随着调制比(软:硬)的减小而上升,纯硬DLC薄膜残余应力为 0.943 GPa ,而纯软薄膜残余应力仅为 0.095 GPa 。电化学试验结果显示,调制比为1:2的多层DLC薄膜自腐蚀电位为 -0.014 V ,自腐蚀电流密度为 $36.6 \text{ nA}/\text{cm}^2$,具有相对最佳的耐腐蚀性能。

41 过渡层 TiAlN 的力学性能与微观结构对 AlCrSiN 涂层宏观力学性能的影响

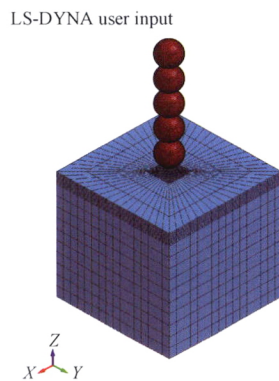
李加林 赵学书 宋宏甲 钟向丽 王金斌



摘要: AlCrSiN 多元硬质涂层具有优异的力学性能,在刀具领域有广泛应用前景。然而,如何在基底上制备出力学性能优异的 AlCrSiN 涂层有待进一步研究。基于电弧离子镀技术,在硬质合金基底上沉积了不同 Ti/Al 原子比的 TiAlN 过渡层,并在其上沉积了 AlCrSiN 涂层,研究了过渡层 TiAlN 的微观结构(晶面取向、晶粒尺寸、致密度等)对功能层 AlCrSiN 力学性能的影响。Ti-Al-N 固溶相的择优取向为(200)。随着 Ti 含量的增加,(200)衍射峰宽化,晶粒细化,致密程度提高,硬度增加。Ti/Al 原子比为 2.75 时,TiAlN 晶粒尺寸为 9.549 nm,其上制备的 AlCrSiN 硬度值达到 3 139.6 HV,并且涂层与基底间的结合力高达 92 N。细化(200)取向的 TiAlN 过渡层晶粒可以有效提高其上 AlCrSiN 涂层的硬度以及涂层与硬质合金基底的结合力。研究成果对提高功能层 AlCrSiN 的力学性能及涂层刀具的寿命有一定的指导意义。

49 喷丸处理 Q235 钢中晶粒尺寸与残余应力的关系预测

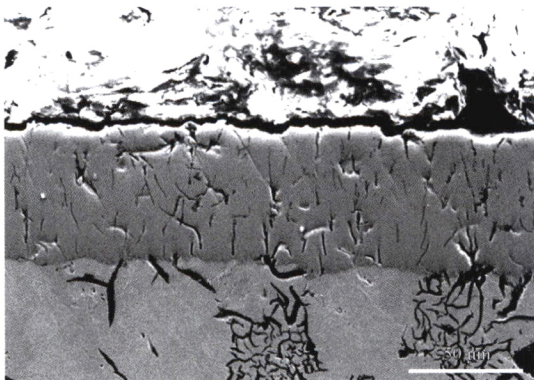
何浩然 刘峰 李恒智 张晖辉



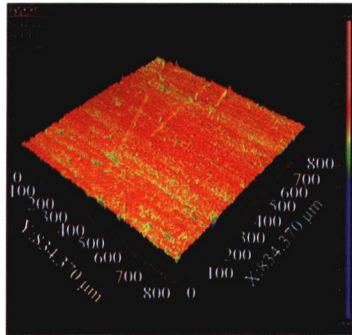
摘要: 作为优异的表面处理工艺,喷丸表面处理能够提高金属表面性能,被广泛应用于航天航空领域。为了研究喷丸表面强化的内在物理机理,建立了喷丸冲击的力学模型,应用 DYNA 软件研究弹丸速度、半径和弹丸数量等因素对残余应力的影响。进一步利用 Zener-Hollomon 参数模型和动态再结晶公式计算出理论晶粒尺寸,并讨论残余应力与晶粒尺寸的演化规律。分析结果发现:弹丸速度、半径和弹丸数量的增大会使残余应力变大而晶粒尺寸相对变小。但并未发现残余应力与晶粒尺寸之间存在定量关系,表明这两种强化机制相互独立。

59 CKS 活塞环表面微织构几何形貌及排布方式对摩擦学性能的影响

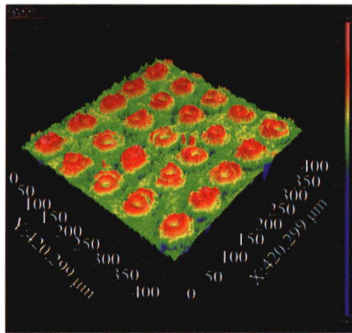
赫冬 韩晓光 陈广聪 汪哲宇 陈文滨 徐久军



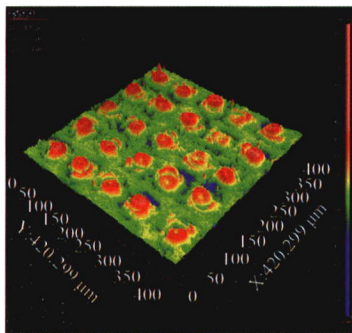
摘要: 以 CKS(铬基陶瓷复合镀)活塞环-硼磷合金铸铁气缸套摩擦副为对象,采用 Nd-YAG 激光器在 CKS 活塞环上进行微织构化处理,在对置往复摩擦磨损试验机上进行摩擦学试验,研究激光微织构几何形貌及排布方式对摩擦副减摩耐磨的作用。采用激光共聚焦扫描显微镜利用台阶法测量磨损量,采用扫描电子显微镜观察样品表面磨损形貌。发现当织构深度 30 μm 、直径 130 μm 、排布角度 0°、面积占有率 5%时,摩擦副获得最佳的摩擦磨损性能,摩擦因数最低可达 0.086,与未织构化的摩擦副相比,摩擦因数降低约 0.013,降低约 13%;活塞环磨损率下降约 41%,气缸套磨损率下降约 46%。活塞环表面微织构可改善摩擦磨损性能的作用机制为,微织构具有储存润滑油、收集磨屑以及减小摩擦副接触面积的作用。



(a) 06Cr19Ni10 alloy



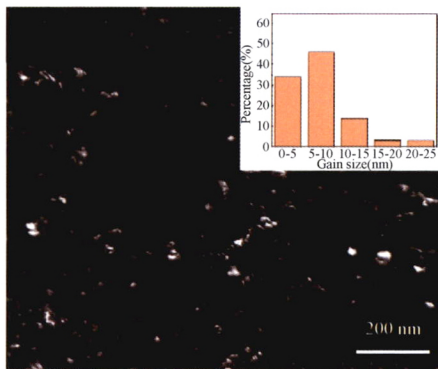
(b) Texture structure



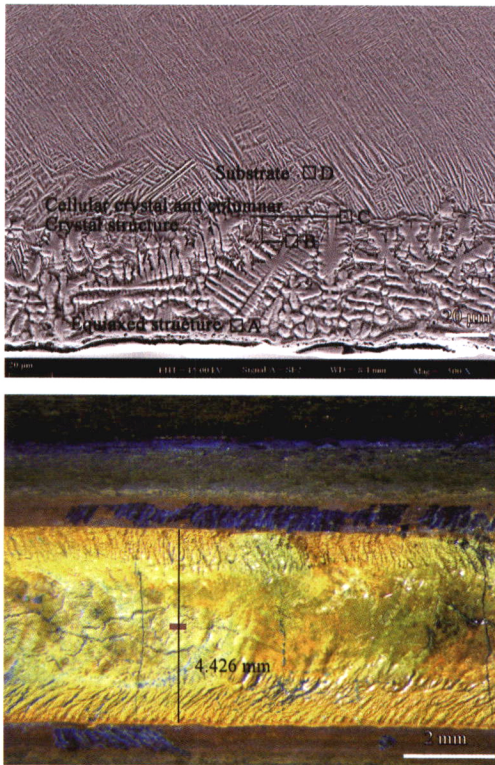
(c) Textured Cr-DLC film

摘要: 研究在食品机械面带压延辊用 06Cr19Ni10 合金表面制备织构化铬掺杂类金刚石 (Cr-DLC) 薄膜对高加水量面带黏附性能的影响。在 06Cr19Ni10 合金试样表面采用皮秒激光加工织构结构,并在优化的织构结构表面采用离子源辅助非平衡磁控溅射方法制备 Cr-DLC 薄膜;利用三维白光干涉表面形貌仪测试试样表面形貌和表面粗糙度;利用黏附测试平台分析加水量 55% 的面带在织构化铬掺杂类金刚石 (Cr-DLC) 薄膜表面的黏附性能;利用滴定法测量试样表面水滴、乙二醇液滴的接触角并分析表面能。结果表明,高含水量的面带在织构结构表面的黏附能力随着织构间距增大和深度增加而降低,间距 85 μm 、深度 5 μm 的试样抗黏附能力最优,与 06Cr19Ni10 合金基体相比面带的黏附能力降低了 39.8%;面带在织构化 Cr-DLC 薄膜表面的黏附能力为 98 J/m^2 ,与 06Cr19Ni10 合金基体试样相比降低 68.3%;面带在接触表面的黏附能力随着表面能色散分量与极性分量差值的增大呈线性递减规律。分析认为,所制备的“碗口”型特征的织构结构、Cr-DLC 薄膜均具有降低表面能极性分量,增大色散分量的作用;织构结构和 Cr-DLC 薄膜的协同作用提高了 06Cr19Ni10 合金试样表面的抗黏附性能。针对高加水量 55% 的面带,制备间距 85 μm 、深度 5 μm 的织构化 Cr-DLC 薄膜具有最佳的抗黏附功能。

76 疲劳试验温度对 TC11 钛合金表面纳米化后的组织和性能的影响



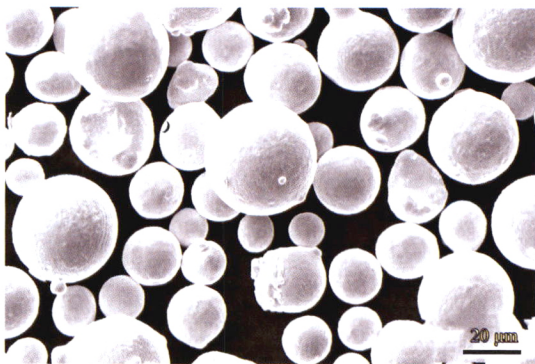
摘要: 在不同温度 (-30 $^{\circ}\text{C}$, 25 $^{\circ}\text{C}$, 150 $^{\circ}\text{C}$) 下对超音速微粒轰击 (SFPB) 表面强化后的 TC11 钛合金进行高周疲劳试验,并借助扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 等试验手段研究了不同疲劳试验温度下的断口及断口附近的微观组织。结果表明:超音速微粒轰击后,TC11 钛合金构件表层形成晶粒尺寸约为 10 nm、层厚为 30~50 μm 的梯度纳米组织;不同温度下高周疲劳试验后,钛合金构件表层组织的晶粒尺寸仍处于纳米量级,平均尺寸与疲劳加载前相当;超音速微粒轰击强化使得钛合金构件疲劳裂纹源萌生位置由表层移至次表层,不同温度下的疲劳断口均由疲劳源区、裂纹扩展区、瞬断区三部分组成,疲劳条带宽度随着试验温度的升高而增大。



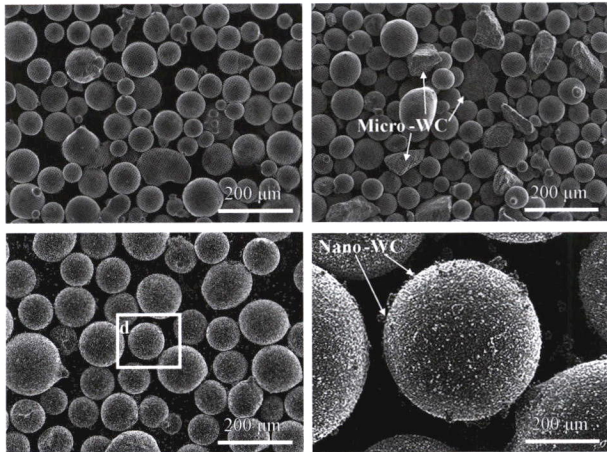
摘要: 以等离子熔覆方式在 TC4 钛合金表面制备 Ni60 熔覆层,通过 X 射线衍射、扫描电镜和显微硬度测试等方法分析 Ni60 熔覆层凝固组织、成分及硬度的关系。结果表明:在 Ni60 粉末熔覆层中,由基底依次凝固生长柱晶、枝晶、等轴晶和共晶组织,在柱晶及枝晶主干等部位,Ti 优先选择固溶 N/O 元素,将其他合金元素排挤到后凝固的等轴晶区,在最后凝固区形成富含 Ni 的共晶组织。熔覆层中先凝固的柱晶及枝晶区,一次时效(600 ℃/1 h)后获得的强化效果最佳;而后凝固的等轴晶区与共晶区,富含多种合金元素,经三次时效后,表面等轴晶区硬度强化效果依次递增,最终硬度可达 800 HV。与 TC4 钛合金相比,Ni60 熔覆层具有更优异的耐磨性和耐蚀性,三次时效后的 Ni60 涂层磨损失重从 0.057 4 g 降至 0.017 1 g,耐磨性提高约 3 倍。

94 激光熔覆 Ni625/WC 涂层的减振降噪和摩擦磨损性能

王书文 廖玉红 王腾迪



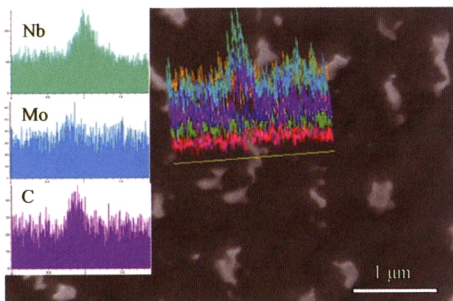
摘要: 为了提高汽车和高铁制动盘的耐磨性和减振降噪性能,对激光熔覆 Ni625 和 WC 复合涂层的减振降噪和摩擦磨损性能进行研究,其中粉末配比和熔覆加工工艺参数方案采用均匀分布法设计。利用 UMT-Tribolab 摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验,并分析摩擦因数的稳定性;在摩擦磨损试验的同时,利用北京东方振动噪声研究所开发的数据采集分析系统,采集并分析处理振动和噪声信号;通过白光干涉仪表征熔覆层磨损形貌及磨损量;在对摩擦磨损和振动噪声试验结果分析的基础上,建立模糊综合评价模型,并确定出最优激光熔覆工艺参数为:激光功率 2 kW、进给速度 600 mm/min、送粉盘转速 4.5 r/min、保护气体流量 15.1 L/min、送粉气体流量 5.4 L/min、WC 的质量占比 10%。研究成果对汽车和高铁铸铁制动盘的表面改性具有重要意义。



摘要: 激光熔覆 Ni 基合金涂层具有良好的综合性能,但耐磨与耐冲击性能仍有待提高。分别采用含微米与纳米 WC 颗粒的 Ni 基粉末激光熔覆制备 WC/Ni 涂层,研究两种 WC 颗粒对 Ni 基涂层组织及耐磨耐冲击性的影响。利用 SEM 与 XRD 对涂层进行微观组织分析,利用高速摄像机分析熔覆过程中的熔池形态。采用磨损试验机、夏比冲击试验机对涂层进行耐磨性与耐冲击性测试。纳米 WC 对熔池流动的促进作用强于微米 WC,并使涂层组织得到更显著的细化。由于微米 WC 与 Ni45 涂层结合紧密,磨损试验中能有效抵抗配零件微凸体的切削,最终显著增强涂层耐磨性,磨损率较 Ni45 涂层降低 88.38%。但微米 WC 的高脆性不利于涂层耐冲击性的提高,冲击韧性仅为 Ni45 涂层的 91.28%。由于纳米 WC 在细化晶粒的同时会弥散分布于晶界与共晶区,在磨损过程中阻碍位错运动,抑制晶粒塑性变形,进而减弱配零件对涂层的切削,提高涂层耐磨性,磨损率较 Ni45 涂层降低 53.43%。由于在晶界与共晶区的纳米 WC 会阻碍裂纹扩展并改变扩展方向,进而提高形成贯穿裂纹的能量,增加涂层断裂所需的冲击功,使涂层耐冲击性得到显著提高,冲击韧性较 Ni45 涂层提高 13.37%。通过有限元分析可知,在冲击过程中涂层中的高脆性微米 WC 会形成高应力集中,证明其对涂层耐冲击性具有不利影响。而纳米 WC 能降低位错的不均匀滑移,缓解位错堆积,进而有效分散涂层在冲击过程中形成的应力集中,证明其能显著提高复合涂层的耐冲击性能。研究证明,纳米 WC 能够实现涂层耐磨性与耐冲击性的同步提升。

114 固溶处理对选区激光熔化 Inconel 718 合金组织与硬度的影响

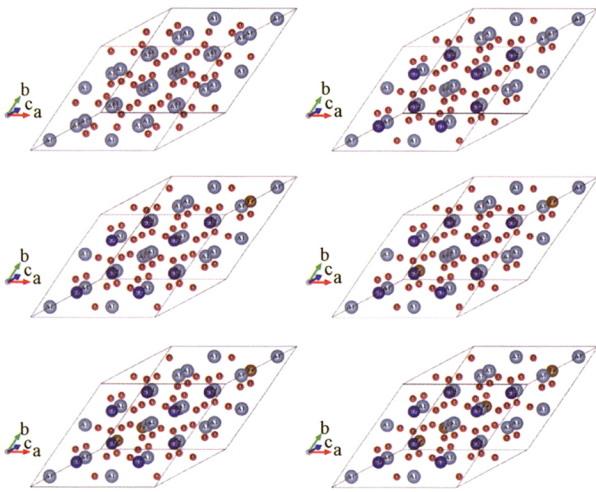
郭宇豪 赵学平 白朴存 曹宇 侯小虎 刘飞



摘要: 利用选区激光熔化技术制备 Inconel 718 合金,对其在不同温度、时间和冷却条件下进行热处理。采用扫描电子显微镜、电子背散射衍射仪和显微硬度计研究不同热处理工艺条件下 Inconel 718 合金的微观组织与硬度。结果表明:当热处理温度为 1 080 ℃时,沉积态合金中的束状亚结构消失、第二相含量减少,随着保温时间的延长,晶粒开始由非均匀柱状晶转变为再结晶晶粒,残余应力集中区和小角度晶界逐渐减少,并且形成<111>60°退火孪晶,硬度从 292 HV 降低至 253 HV;当热处理温度为 1 130 ℃时,沉积态合金中的非平衡组织全部发生再结晶,残余应力集中区基本消失,晶粒内部出现均匀的退火孪晶,硬度保持在 220 HV 左右;对于 1 080 ℃/60 min 热处理试样,随炉冷却方式的硬度高达 431 HV,其较高的硬度主要与随炉冷却形成大量的亚结构和析出相有关。

122 α -(Al, Cr, Fe)₂O₃ 相稳定性和力学性能的第一性原理计算

刘浩 施杰 张泽 鲜广 赵海波 杜昊

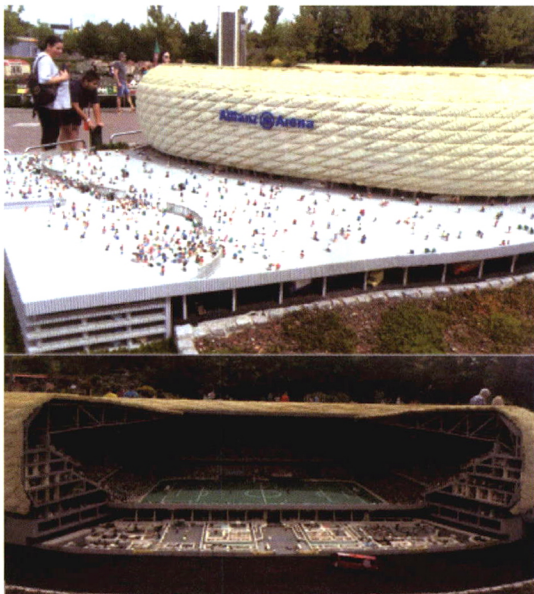


摘要: 采用第一性原理分别对 α -Al₂O₃、 α -(Al_{0.75}Cr_{0.25})₂O₃、 α -(Al_{0.75-x}Cr_{0.25}Fe_x)₂O₃ 和 α -(Al_{0.75}Cr_{0.25-x}Fe_x)₂O₃ 相晶胞体积、结合能、态密度和力学性能的变化进行计算。研究表明： α -(Al_{0.75-x}Cr_{0.25}Fe_x)₂O₃ 四元相的晶胞体积随着 Fe 原子置换数量的增加而缓慢增大， α -(Al_{0.75}Cr_{0.25-x}Fe_x)₂O₃ 四元相晶胞的体积随着 Fe 原子数量的增加而迅速减小；相结合能结果显示， α -Al₂O₃、 α -(Al_{0.75}Cr_{0.25})₂O₃、 α -(Al_{0.75-x}Cr_{0.25}Fe_x)₂O₃ 和 α -(Al_{0.75}Cr_{0.25-x}Fe_x)₂O₃ 相均为稳定结构，其中 α -Al₂O₃ 相的结合能最低，随着置换原子种类和数量的增加，结合能增大，相稳定性下降；当 Fe 元素原子数量占金属元素总原子数 0~3 at.% 时， α -(Al_{0.75-x}Cr_{0.25}Fe_x)₂O₃ 和 α -(Al_{0.75}Cr_{0.25-x}Fe_x)₂O₃ 四元相的硬度、H/E 和 H³/E*² 较 α -(Al_{0.75}Cr_{0.25})₂O₃ 相有明显提升，但均低于 α -Al₂O₃ 相，仅 α -(Al_{0.63}Cr_{0.25}Fe_{0.12})₂O₃ 相的 H/E 和 H³/E*² 值高于 α -Al₂O₃ 相。

/// 技术应用 ///

131 由彩色 3D 打印路径实现乐高模型体素化

周波 赵宇辉 赵吉宾 田同同



摘要: 介绍了一种从 3D 彩色打印轨迹转换为大型乐高模型体素化的算法。首先，考虑三维模型的颜色可能非常多，但并不是任何颜色乐高颗粒都能提供，因此对乐高模型的颜色进行精简。其次，由路径穿过乐高单元块所包围的面积及单元块内的路径长度，确定单元块的有效位置及颜色。进而，通过角度判断方法，对层与层之间的空隙进行填充，以实现乐高模型体素化的“水密性”特征。最后，提供复杂的模型来证明所提方法的有效性：与传统体素法相比，所提出的算法仅消耗接近 20% 的计算时间。所提出的方法突破了传统体素法需要在模型上采样大量点进行颜色计算，且模型内外结构的判断存在计算量大等缺陷，仅通过彩色打印轨迹就实现了模型体素化的快速转换，针对大型模型的快速体素化需求具有良好的应用前景。

CONTENTS

- 1 Current Research Status of the Interaction between Laser and Powder in Laser Additive Manufacturing**
YE Fuxing WANG Yonghui LOU Zhi
- 13 Research Progress of Light-weight High-entropy Alloy**
ZHOU Pengyuan LIU Hongxi ZHANG Xiaowei HAO Xuanhong WANG Yueyi CHEN Lin
- 25 Research Progress on Wear Resistance Modification of Carbon-based Film on Rubber**
QIANG Li ZHANG Bin YU Yuanlie ZHANG Junyan
- 35 Effects of Modulation Ratio on Corrosion Resistance of Multilayer DLC Films Prepared by HiPIMS**
JIA Kunpeng WANG Xue XU Feng SHI Lili ZHAO Yanchao ZUO Dunwen
- 41 Effect of Mechanical Properties and Microstructure of Interlayer TiAlN on Macroscopic Mechanical Properties of AlCrSiN Coating**
LI Jialin ZHAO Xueshu SONG Hongjia ZHONG Xiangli WANG Jinbin
- 49 Prediction of Relationship Between Grain Size and Residual Stress in Shot Peening Q235 Steel**
HE Haoran LIU Feng LI Hengzhi ZHANG Huihui
- 59 Effect of Geometrical Morphology and Arrangement of Micro-texture on Friction Property of CKS Piston Ring**
HE Dong HAN Xiaoguang CHEN Guangcong WANG Zheyu CHEN Wenbin XU Jiujun
- 70 Effects of Textured Cr-DLC Film on Adhesion Properties of Dough Sheet with High Water Content**
ZHANG Xuege ZHAN Hua WANG Yiqi WANG Ruijun
- 76 Effect of Fatigue Test Temperature on Microstructure and Properties of TC11 Titanium Alloy after Surface Nanocrystallization**
ZHANG Xin XIONG Yi CHENG Zhengge YUE Yun WU Yongli REN Fengzhang

- 86 Properties of Plasma Cladding Ni60 Coating on TC4 Titanium Alloy Surface**
ZHANG Yuan LEI Min CHENG Chen ZHANG Shengwei
- 94 Properties of Vibration and Noise Reduction and Friction/Wear Performance of Laser Cladded Ni625/WC Coatings**
WANG Shuwen LIAO Yuhong WANG Tengdi
- 104 Effect of WC on Microstructure, Wear Resistance and Impact Resistance of Laser Cladding Layer**
LI Yunfeng SHI Yan
- 114 Effects of Solution Treatment on Microstructure and Hardness of Inconel 718 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting**
GUO Yuhao ZHAO Xueping BAI Pucun CAO Yu HOU Xiaohu LIU Fei
- 122 Phase Stability and Mechanical Properties of α -(Al, Cr, Fe)₂O₃ Phase by First-principles Calculation**
LIU Hao SHI Jie ZHANG Ze XIAN Guang ZHAO Haibo DU Hao
- 131 Voxel Generation Method of LEGO Model by 3D Color Printing Path**
ZHOU Bo ZHAO Yuhui ZHAO Jibin TIAN Tongtong

《中国表面工程》第五届编委会

荣誉委员:

王仁智 王至尧 王建曾 左铁镛* 卢柯* 朱诚 关桥* 李健 李克让
李基森 吴林 宋天虎 张嗣伟 周廉* 赵连城* 柯伟* 钟群鹏* 姜晓霞
徐航 海锦涛 黄石生 黄先祥* 曹春晓* 屠振密 臧克茂* 潘际奎*

主任委员: 徐滨士*

副主任委员: 马世宁 陈建敏 朱胜

国内编委:

丁传贤* 马世宁 马胜利 王为 王彦 王铀 王维 王立平 王海斗
王福会 甘晓华* 左铁钊 叶福兴 冯吉才 吕反修 朱胜 朱旻昊 朱嘉琦
乔培新 向巧* 刘敏 刘宣勇 刘维民* 安茂忠 孙冬柏 杜善义* 李骏*
李曙 李长久 李金桂 李晓刚 李晓延 何实 何丹农 张平 张帆
张伟 张永振 张晨辉 陈坚 陈华辉 陈建敏 陈超志 邵天敏 范多旺
林安 林健凉 周仲荣 周克崧* 单际国 单忠德* 段金弟 顾卡丽 徐久军
徐可为 徐滨士* 高玉魁 高金吉* 郭东明* 黄峰 梅金虎 曹华军 葛世荣
游光荣 雷明凯 蔺增 雒建斌* 薛群基*

国际编委:

Dongying Ju (日本)	Hanlin Liao (法国)	Hanshan Dong (英国)
Jacek Senkara (波兰)	Joseph Buhagiar (马耳他)	Nabil Z. Nasr (美国)
Ping Xiao (英国)	Rolf Steinhilper (德国)	Ronghua Wei (美国)
Sik-Chol Kwon (韩国)	Tadeusz Wierzchoń (波兰)	William Schwarck (英国)
Winifred Ijomah (英国)	Wolfgang Tillmann (德国)	Zhenqi Zhu (美国)
Zhong Chen (新加坡)		

(注: 带*号的为中国科学院、中国工程院院士)

ISSN 1007-9289



9 771007 928215