

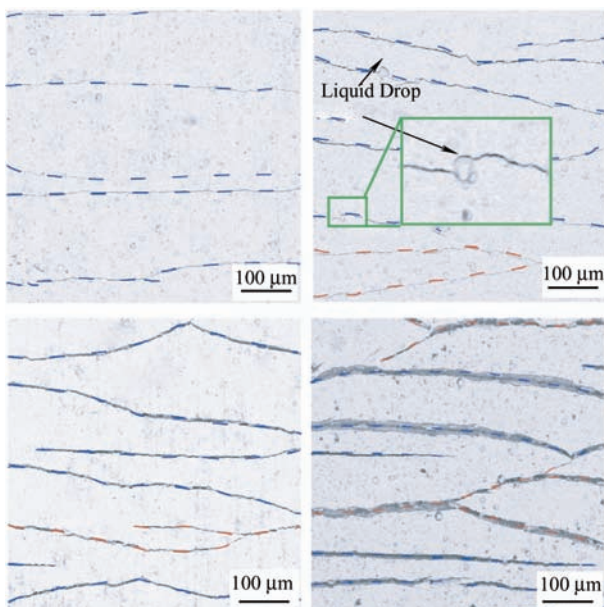
核材料及装备表面技术专栏

客座主编：蔡振兵 张瑞谦

核材料及装备表面技术专栏序言

1 锆合金 Cr 涂层包壳管在环向压缩作用下的裂纹行为

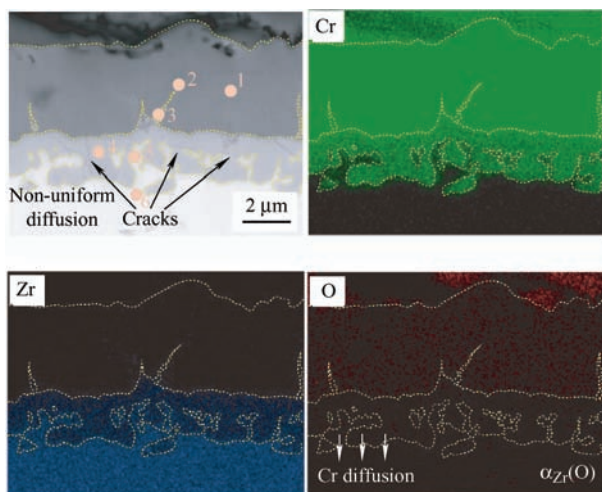
岳雅楠 陈 寰 余施佳 周 腾 张瑞谦 蔡振兵



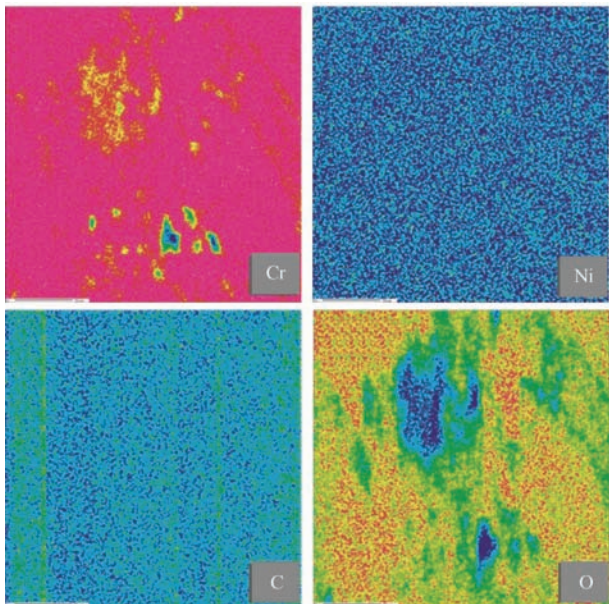
摘要：金属 Cr 涂层是事故容错燃料 (ATF) 包壳候选涂层之一，在各方面具有优异的性能。在实际工况下，包壳管会受到环向外压力的作用而导致涂层破裂，研究锆合金 Cr 涂层膜基界面裂纹萌生和扩展行为很有意义。使用多弧离子镀技术在锆合金基体表面制备 Cr 涂层，利用电子力学试验机对锆合金 Cr 涂层包壳管进行不同变形量的环向压缩试验。采用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDX)、XRD 和纳米压痕仪等测试设备对锆合金 Cr 涂层试样的微观组织进行表征，研究并分析 Cr 涂层表界面裂纹的微观行为。结果表明，试样的变形分为弹性变形-裂纹萌生阶段和塑性变形-裂纹扩展阶段两个阶段，发现锆合金 Cr 试样界面裂纹的产生有两种形式：① 裂纹从膜基界面处萌生，原因是 Cr 涂层和锆合金基体材料的不同使得膜基界面发生涂层应力集中；② 表面萌生裂纹，由于 Cr 涂层存在微缺陷。没有发现涂层的剥落现象，说明其界面结合性能较佳。采用多个变形量研究锆合金 Cr 涂层包壳管膜基界面裂纹的萌生与扩展过程，为 ATF 包壳涂层结构完整性和稳定性提供试验依据。

10 锆合金表面 Cr 涂层的循环热冲击行为

余施佳 赵庆敏 杜沛南 虞靖义 张瑞谦 蔡振兵

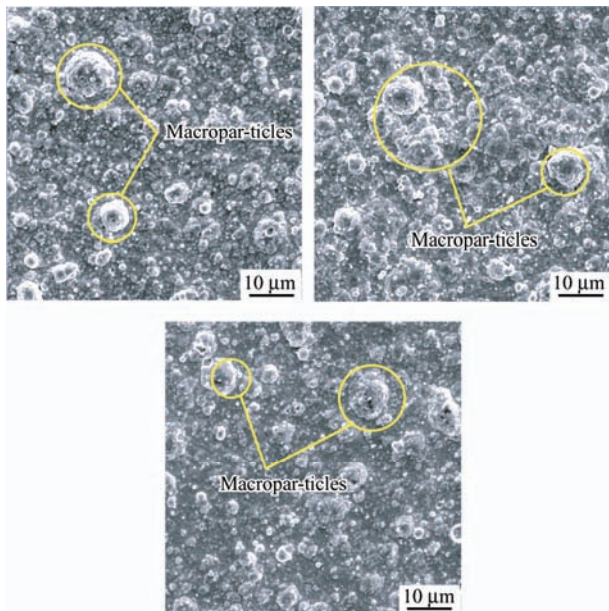


摘要：为了研究锆合金表面 Cr 涂层的循环热冲击行为，使用自研的热冲击设备模拟循环热冲击环境，针对多弧离子镀技术制备的 Cr 涂层进行不同循环次数的热冲击试验。通过 X 射线衍射仪 (XRD) 和显微硬度计分别分析热冲击前后的物相变化和硬度变化，采用扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 探究 Cr 涂层的表面破坏行为。循环热冲击过程中，Cr 涂层生成的氧化层有“自愈”效果，可以有效阻挡 O 进入锆合金基体，同时诱发 Cr-Zr 中间层的非均匀扩散。大量 Cr 元素的内部扩散会促使 α -Zr(O) 的生成。热冲击生成的裂纹大量分布于外部氧化层、非均匀扩散的中间层以及 α -Zr(O) 层。经过 $N=24$ 次循环热冲击后，残余的 Cr 涂层仍然可以有效保护锆合金基体，避免 Zr 与大量 O 反应。通过将锆合金表面 Cr 涂层的循环热冲击行为分为三个阶段，进一步揭示了循环热冲击作用下锆合金 Cr 涂层的组织结构和抗热冲击性能的演变规律。



摘要：磨损是核电厂燃料元件失效的主要形式之一。燃料棒与定位格架磨损可能导致包壳破损和裂变产物泄露，引起一回路剂量超标，影响核电厂安全运行。在实际工况中，流体湍流引起格架和燃料棒之间的相对运动，其界面发生的位移可能是往复滑动，间歇冲击或数个运动的组合，即冲击-滑动摩擦磨损。涂层锆合金是事故容错燃料最有应用潜质的候选包壳，其磨损研究尚不够系统和全面。采用新型可控能量冲击-滑动磨损试验机，研究冲击能量和循环次数对锆合金 Cr 涂层磨蚀损伤行为的影响，并且对试验后试样进行白光干涉仪、扫描电镜（SEM）及电子探针（EPMA）等的表征，阐述锆合金 Cr 涂层磨蚀损伤的行为规律。结果表明：试样磨损随着循环次数的增加而增大，但随着冲击能量的增大而减小；Cr 涂层提高了界面的接触刚度和接触正压力值，并且减少了冲击过程中的接触时间，从而减小了包壳管材料的磨损。关注锆合金 Cr 涂层在低速高频模式下的耐磨损性能，可以为材料的工程应用提供试验数据。

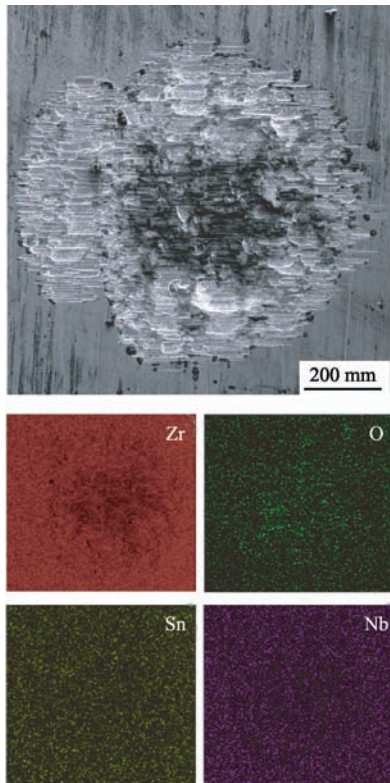
30 锆合金表面 Cr 涂层在高温压缩下的界面开裂行为



摘要：在事故条件下核反应堆的核心部件镀 Cr 锆合金包壳管容易受到挤压发生变形，导致 Cr 涂层产生裂纹影响涂层的保护性能，因此研究镀 Cr 锆合金在高温压缩下的裂纹扩展行为十分有必要。采用环向压缩试验研究不同厚度 Cr 涂层锆合金在不同温度下的开裂行为，通过扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射仪（XRD）和维氏硬度计等测试设备研究不同压缩试验温度下的镀 Cr 锆合金包壳管表截面裂纹微观形貌，并统计表截面裂纹密度及截面裂纹最大宽度。分析包壳材料的载荷-位移曲线和裂纹扩展行为，评价温度和涂层厚度对镀 Cr 锆合金包壳管力学性能的影响。研究结果表明：镀 Cr 锆合金包壳管在高温工况下，抗压强度会下降，断裂韧性增加；当涂层厚度增加时，表截面裂纹密度减少，裂纹张开尺寸增大；裂纹首先在表面产生，然后逐渐向基体扩展，并随着变形量的增加逐渐向基体扩展，最终在膜基结合处停止；试样变形量从 10% 压缩到 50% 时，截面裂纹的新增主要来自表面主裂纹分叉，且在压缩过程中 Cr 涂层并不会剥落，Cr 涂层与锆基体结合性能良好。研究不同厚度锆合金 Cr 涂层包壳管在高温压缩下的膜基界面裂纹的扩展行为，可为锆合金包壳管的涂层制备提供数据支持。

41 锆合金包壳在微动磨蚀环境下的界面损伤行为

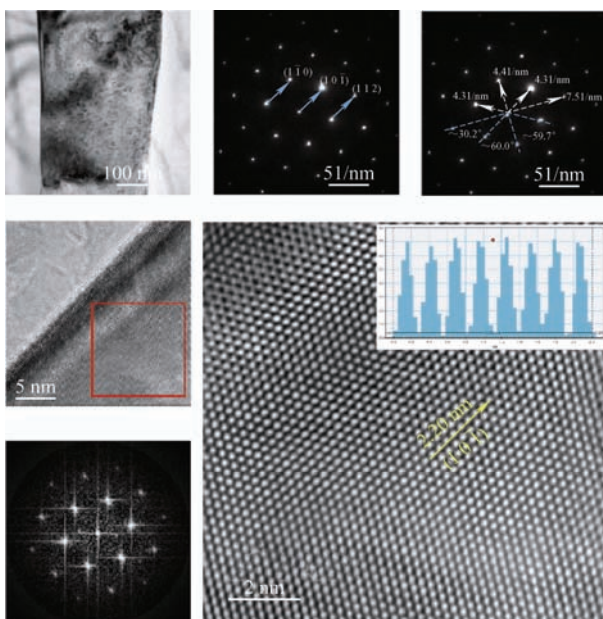
焦拥军 李正阳 蒲曾坪 任全耀 郑美银 巫英伟 秋穗正



摘要: 锆合金燃料棒包壳在反应堆内会由于流致振动与定位格架发生微动磨蚀, 现有研究并未考虑高温水环境下燃料棒包壳与格架之间的腐蚀加速磨损现象。通过微动磨损试验设备结合电化学工作站, 研究不同外加电位 (-0.8 V 、 -0.4 V 、 0 V 、 0.4 V 和 0.8 V) 下锆合金包壳的微动磨蚀行为。采用 SEM、EDX、XPS、EPMA 和三维光学显微镜对磨痕表面的微观形貌和化学成分等进行分析, 探究不同外加电位下锆合金的摩擦氧化行为及微动损伤机理。结果表明: 随着电位的增加, 微动过程中的腐蚀电流增加, 加速磨损过程中锆合金的氧化腐蚀, 锆合金的微动损伤加剧。不同外加电位下磨痕表面均存在明显的犁沟及氧化物颗粒堆积, 主要磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。随着外加电位的增加, 锆合金的磨损深度和磨损率增加, 这是因为电位的增加使得腐蚀加剧, 从而磨损与腐蚀交互作用增强导致磨损率的增加。揭示了电位对锆合金包壳磨痕形貌、磨损量和摩擦腐蚀交互作用的影响规律, 阐明了不同电位条件下锆合金的磨损机制, 为锆合金包壳在长周期服役过程中磨损行为的分析和预测提供理论支撑。

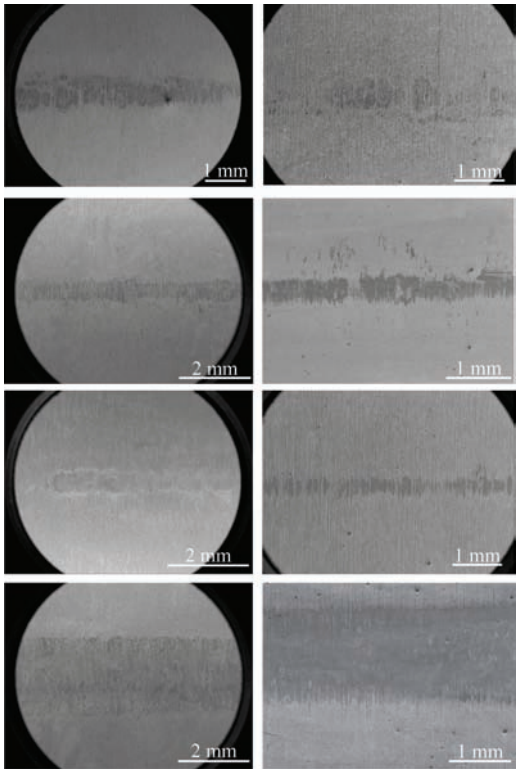
50 高温湿空气中 FeCrAl-ODS 包壳材料氧化层的显微组织

李 青 黎振华 宋 鹏 张瑞谦 龙弟均 黄太红



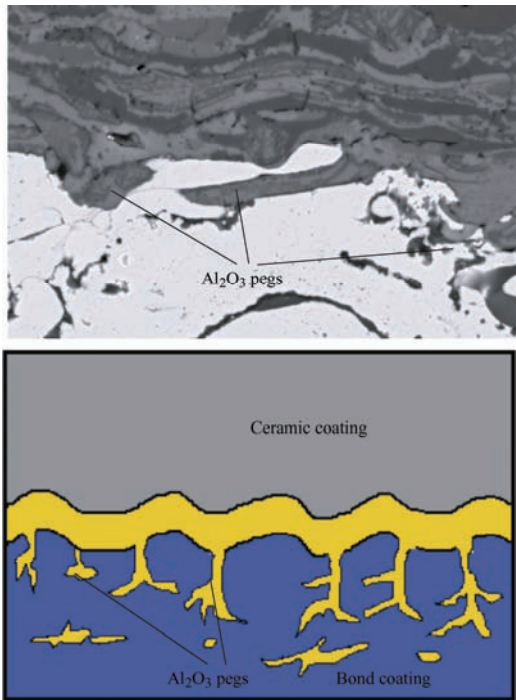
摘要: 为了提高核燃料包壳材料的抗高温氧化性能, 采用粉末冶金技术制备 FeCrAl 基氧化物弥散强化合金 (FeCrAl-ODS), 在高达 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温湿空气中氧化不同时间, 采用 SEM、XRD、EDS 和 TEM 等多种分析技术对 FeCrAl-ODS 合金氧化试样进行显微组织定性和定量分析。FeCrAl-ODS 合金在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的增重比在 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的快, 但是氧化动力学曲线的增长趋势是一致的, 最初几小时氧化增重都很快, 然后随着保护性氧化物的形成而减慢。由于氧势梯度的存在, 氧化层表面有富 Al-Y-Ti-Zr-O 的析出物, 随着氧化时间的延长, 析出物相更加明显, 致密规则的氧化层很好地黏附在合金材料上。FeCrAl-ODS 合金在高达 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温湿空气中, 合金表面形成致密规则的氧化层提高了合金的抗高温氧化性能, 能够有效提高核燃料元件的寿命和安全可靠性。通过研究高温湿空气中 FeCrAl-ODS 包壳材料氧化层的显微组织, 可对该合金的开发、制备和应用提供一定的理论指导和技术支持。

郑 会 庄文华 杨双亮 郭相龙 张乐福

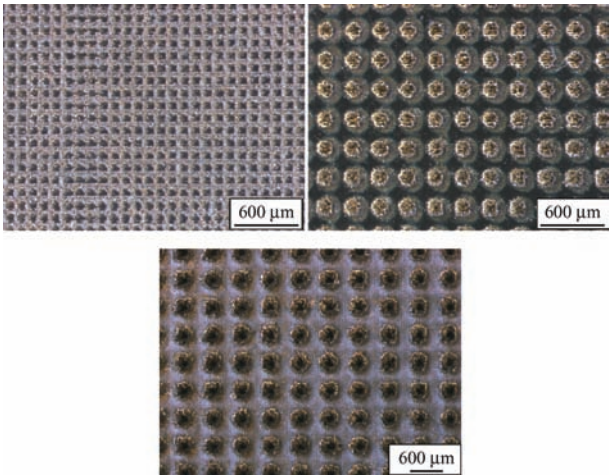


摘要: 由于试验装置的限制,在模拟工程服役环境的高温高压水环境下对三代核电用 690 合金管 / 405 不锈钢抗振条 (AVB) 的高频微动磨损研究存在不足,影响了对核电厂蒸汽发生器传热管结构完整性评价的有效性。在模拟压水堆核电厂二回路高温高压水环境下,以 690 合金传热管为研究对象,开展高频切向微动磨损试验。试验研究不同位移幅值 ($D=20、30、40、80、120\text{ }\mu\text{m}$) 对 690 合金管微动磨损行为的影响。试验结束后,借助扫描电子显微镜、能谱仪和三维形貌仪对磨损区域进行形貌表征、能谱分析和磨损体积计算。试验结果表明:随着位移幅值的增加,磨损接触面积增大,磨损深度和磨损体积均增加,磨损加剧。当位移幅值较小时 ($D=20、30、40\text{ }\mu\text{m}$),磨屑不易排出接触面,多黏着在磨痕中心,磨损机制主要是黏着磨损;当位移幅值增加至 $80、120\text{ }\mu\text{m}$ 时,磨屑分布均匀,磨损机制向剥层磨损转变。随着磨损机制的转变,磨损率呈现先增加后降低的趋势,在 $D=80\text{ }\mu\text{m}$ 时,磨损率最大。通过更符合工程实际的高温高压水环境试验,对比了不同位移幅值下的传热管微动磨损性能,给出了磨损率随位移幅值变化的趋势,初步阐明了磨损机制,有利于核电装备的摩擦学性能提升,对核电厂 690 传热管的结构完整性评价有较好的指导作用。

杨毕肖 宋 鹏 黄太红 翟瑞雄 马 涛 何 洋 周会会

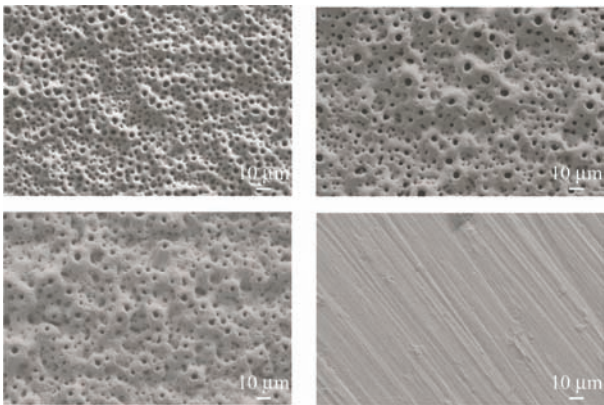


摘要: AT40 陶瓷涂层与黏结层界面裂纹萌生、扩展是导致涂层失效的主要原因,制备多层陶瓷 / 金属低应力涂层为陶瓷涂层增韧的方法之一。利用 APS (大气等离子喷涂) 在 Q235 上制备 AT40-NiAl-AT40-NiAl 四层复合多层涂层并对复合多层进行热处理。使用 SEM、EPMA、3PB 等表征手段研究热处理对四层复合金属-陶瓷涂层的微观结构及涂层断裂韧性的影响。结果表明,热处理过程中陶瓷层-黏结层界面、陶瓷层富 Al 相富 Ti 相界面均发生了元素扩散;热处理后陶瓷层硬度增加 30%,复合涂层断裂韧性提高。热处理过程中元素扩散形成的氧化物一方面在黏结层与陶瓷层之间形成钉扎效应增强黏结性,另一方面填充涂层中的孔隙、裂纹等缺陷提高涂层的硬度,降低裂纹扩展的面积从而提升涂层的断裂韧性。多层金属陶瓷沉积形成的复合陶瓷涂层及对其使用热处理的方法能有效提升 AT40 等陶瓷涂层的断裂韧性,对解决铁基零部件表面耐磨陶瓷容易脆断失效和扩展陶瓷涂层的应用范围提供了新的思路。

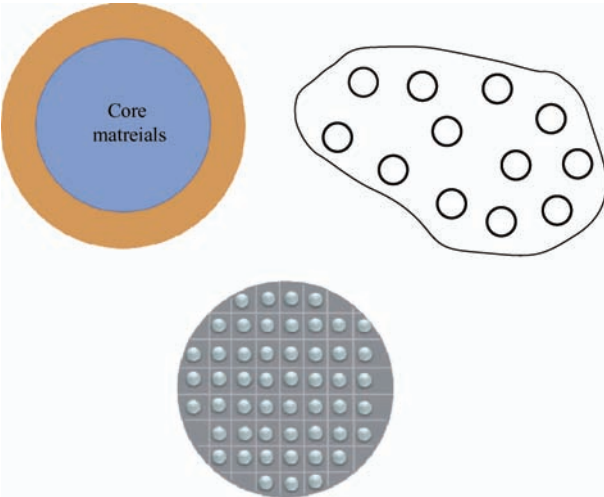


摘要：目前针对石墨烯 / 铜基复合材料的研究主要集中在复合材料的制备工艺对材料性能的影响上，对石墨烯 / 铜基复合材料表面摩擦特性影响还缺乏深入探究。采用热压烧结法制备石墨烯 / 铜基复合材料，并利用激光在复合材料表面完成不同尺寸和形态的微织构加工，探究织构化和石墨烯对复合材料表面摩擦特性的影响。测试结果发现：当石墨烯含量为 0.5% 时，该复合材料存在一个硬度峰值为 140 HV_{0.1}，比铜合金基体的硬度提高了近 27%。同时具有凹坑织构的复合材料表面摩擦因数及磨痕宽度随表面织构直径的增加而呈现“下降-上升”趋势，其中凹坑直径为 200 μm 时，各项指标达到最小，摩擦因数为 0.377，磨痕宽度为 231 μm，可以看出合适的织构形状、尺寸以及适当的石墨烯含量使得石墨烯 / 铜基复合材料在减磨性和耐磨性方面有所提高。将激光表面织构化技术与粉末冶金技术相结合，为改善零部件表面摩擦磨损性能提供了一种新的工艺。

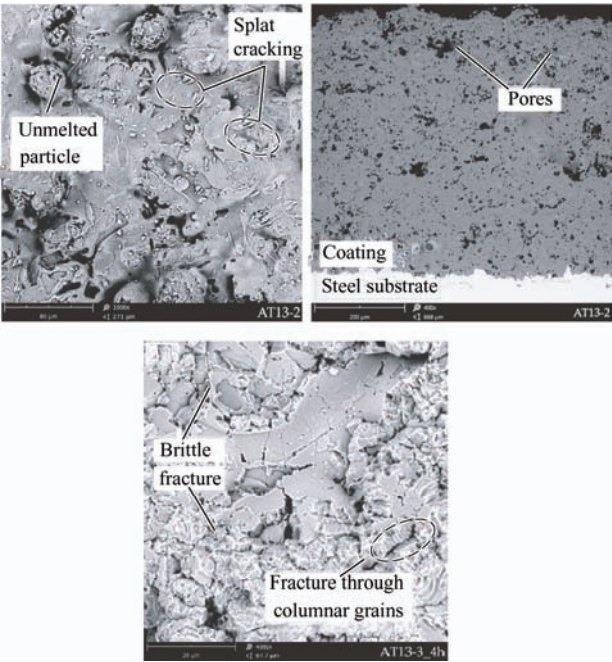
/// 综 述 论 文 ///



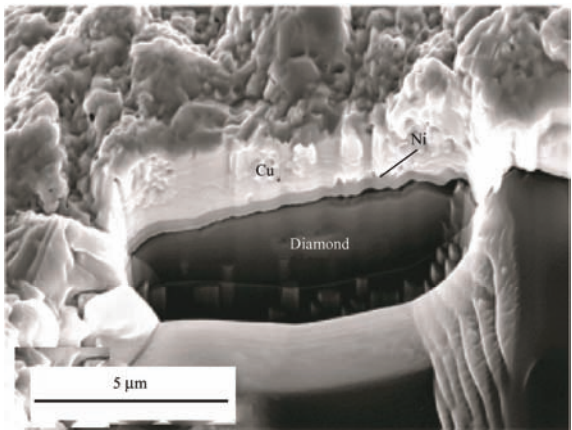
摘要：生物医用钛植入体的表面微观形貌及化学组成作为影响植入体生物相容性的重要因素，决定了植入的稳定性和使用寿命，得到广泛研究，对钛植入体的表面改性研究现状进行系统梳理变得极为重要。针对钛植入体表面微纳米复合结构的构建及添加典型生物活性离子的研究现状进行综述，以及二者的结合对促进细胞黏附、增殖、分化和促进动物体内成骨的协同效应，简述微纳米复合结构对细胞行为的内在调控机制。结果表明，钛植入体表面的微纳米复合结构及生物活性离子对细胞的行为均表现出积极作用，兼具二者的植入体能够更好地促进细胞的黏附、增殖及分化，植入动物体内后更有利于植入体与周围组织的骨性整合。最后，根据当前生物医用钛植入体表面改性研究中存在的抗菌性能较差、对细胞的影响机制不明确等问题，提出植入体在表面改性领域的研究趋势。提出了钛植入体表面改性领域微纳结构构建和生物活性离子添加的研究现状和未来的发展方向，填补了钛植入体表面改性领域目前缺少综述文章来引领的空白，可为未来钛植入体的表面改性的发展提供借鉴。



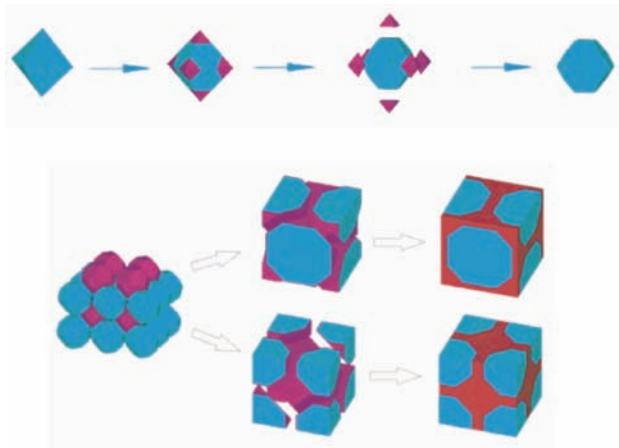
摘要: 超疏水涂层在自清洁、防腐蚀、抗凝冰、减阻等领域具有广阔的应用前景,但其耐久性还有待提高。由于微胶囊在修复剂的封装、制备等方面具备独特优势,利用微胶囊技术将修复剂封装,均匀分散于超疏水涂层后,涂层可同时具有疏水性和自修复性,但目前对微胶囊技术与超疏水涂层结合并进行归纳总结的文献较少。总结了微胶囊技术在超疏水材料自修复领域的研究现状,归纳了微胶囊超疏水涂层自修复的修复机理与常用制备方法,对不同刺激响应方式下微胶囊超疏水涂层的性能(响应速度、自修复效果、耐久性、耐磨性)进行对比。结果表明,以紫外光照射为修复手段的涂层机械耐久性较好,近红光刺激响应是微胶囊超疏水自修复涂层中响应修复效率最快、修复效果最好的修复方式,并且以紫外光和近红光双重刺激响应的超疏水涂层的耐久性、耐化学腐蚀性远超过单一刺激响应型超疏水自修复涂层。最后,提出当前基于微胶囊技术的超疏水自修复涂层存在的问题并对该涂层的应用前景进行展望。



摘要: 当今世界各国对高速舰船、绿色水电设施以及先进飞行器的需求愈发迫切,但动力核心部件-推进器、水轮机和航空发动机无一例外存在严重的空蚀损坏问题,亟需利用对部件尺寸适应性好的热喷涂技术在其表面制备抗空蚀涂层进行防护。针对现役过流部件常用金属材料在不同液体介质中易空蚀损坏的本质问题,分类详述热喷涂技术制备的金属、陶瓷和金属陶瓷三大类抗空蚀涂层的优势和研究现状,着重介绍其抗空蚀机理,并基于热喷涂涂层空蚀损坏的共性难题,论述多种行之有效的改性技术。通过与常用金属材料的空蚀性能对比,指出在不同工况环境下分别最有潜力获得应用的涂层种类。提出未来应从研制新材料和发展实用性更强的改性技术两个方面共同设计构筑性能更为优异的抗空蚀涂层,更好地推动其应用并解决装备的空蚀损伤问题。



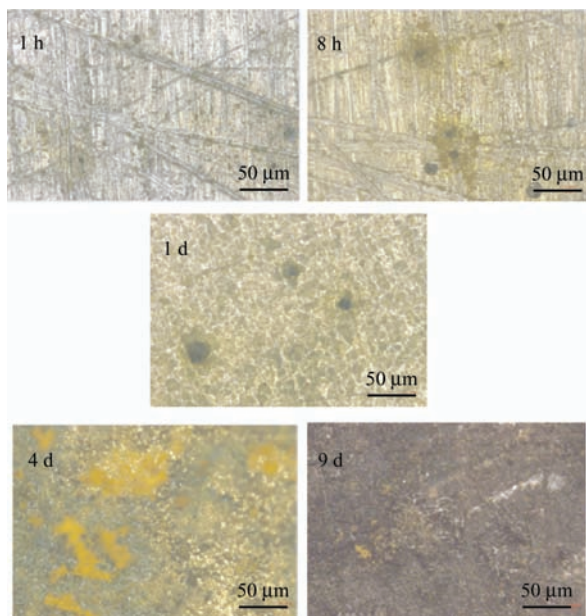
摘要：冷喷涂是近年来发展起来的一种固态材料沉积技术，具有沉积温度低、沉积速度大、沉积效率高等特点，在金属材料尤其是温度敏感的金属材料固态喷涂成型方面具有明显优势。冷喷涂中，喷涂粉末的状态（包括形状、尺寸和含氧量等）对整个涂层的影响较大，对冷喷涂粉末进行改性和合理设计显得十分重要。阅读和整理近年来冷喷涂研究领域喷涂粉末的前处理技术，主要包括粉末预热和热处理以及粉末复合技术，粉末复合技术的主要方法有机械混合法、球磨法、造粒法和包覆法等。总结整理了各种技术的优缺点，可为冷喷涂过程中粉末处理技术的选择提供参考。



摘要：金刚石 / 铜复合材料兼具低密度、高导热率和可调热膨胀系数等优点，近年来成为新一代热管理材料的研究重点。通过理论、试验及模拟三个方向对金刚石 / 铜复合材料进行综述。回顾金刚石 / 铜复合材料的发展历程，总结金刚石 / 铜复合材料重要的颗粒混合理论模型及“三明治”复合结构经验公式，研究影响热导率和热膨胀系数等两大热学性能指标的重要因素，简述有限元模拟在金刚石 / 铜复合材料中的相关应用。其中，重点分析界面改性（活性改性元素种类和改性层厚度）对金刚石 / 铜复合材料导热性的影响。结果表明，通过界面改性、增加接触面积以及在较高温度和压力机制驱动下制备的金刚石 / 铜复合材料具有优异的热物理性能。最后由所得结论提出双峰金刚石、渗碳、大尺寸金刚石自支撑膜表面织构化等方法，可用来提升金刚石 / 铜复合材料界面结合强度和散热性能。

151 耐候钢锈层的稳定化处理及锈层的生长机制

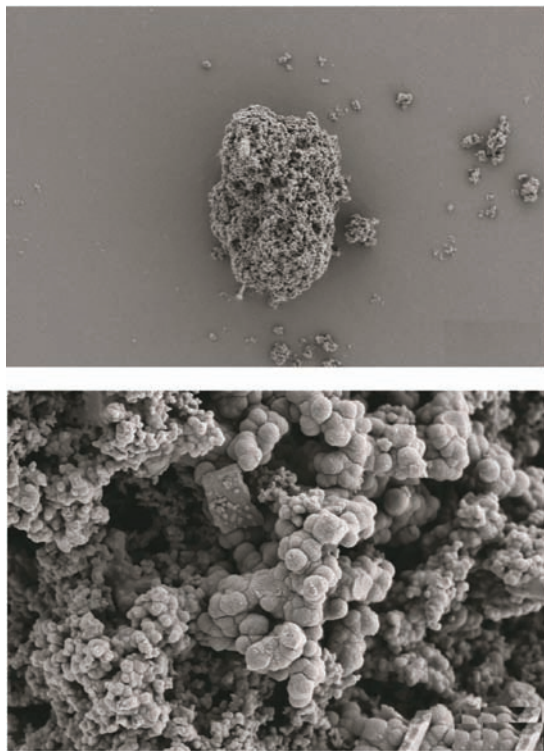
马菱薇 卢桃丽 张达威 卢琳



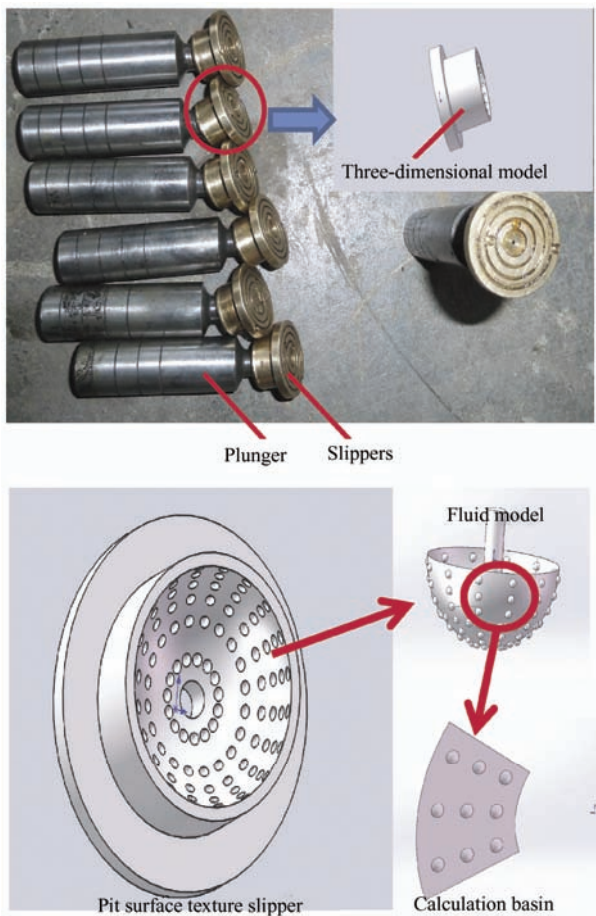
摘要: 开发一种新型耐候钢表面锈层稳定化处理剂, 促进锈层的快速生长和稳定。以 Q420NH 耐候钢为基材, 水性丙烯酸树脂为成膜物, 加入两类添加剂——稳定剂(钼酸钠、磷酸钾、硝酸钠)和羟基氧化铁, 制备出稳定化处理剂, 涂刷于耐候钢的表面, 在盐雾环境中研究锈层的生成过程。结果表明, 水性丙烯酸树脂具有一定的氧气和水渗透性, 适合作为稳定化处理的成膜物。在 90 d 的盐雾试验中, 锈层厚度随盐雾时间的增长而不断增加, 并且稳定化处理后试样的锈层厚度大于裸钢的锈层厚度。XRD 结果显示, 稳定化处理不改变耐候钢锈层的成分, Q420NH 裸钢和稳定化处理的耐候钢的锈层均主要由 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 组成。SEM 和截面 Raman 光谱结果表明, 稳定化处理的试样锈层中保护性的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 相分布更加广泛。EDS 结果证明 Cr、Cu 合金元素在锈层中富集, 电化学阻抗谱说明稳定化处理后试样具有更佳的耐腐蚀性能。稳定化处理技术促进了耐候钢表面保护性锈层的生长, 缩短了稳定化进程, 提高了锈层的保护性能。

161 BTA@SPANI-POSS 环氧涂层的制备及防腐性能

欧宝立 汪雨微 段俊 郭艳 支倩



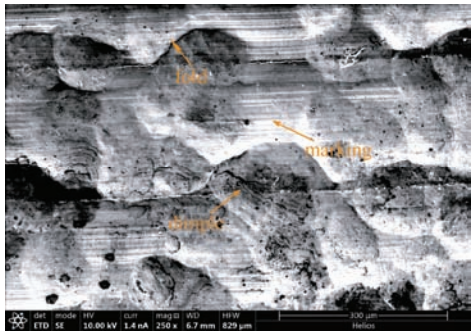
摘要: 为提高环氧涂层在腐蚀环境下的防腐性和持久性, 合成一种负载有缓蚀剂苯并三唑(BTA)的苯并三唑@磺化聚苯胺功能化倍半硅氧烷(BTA@SPANI-POSS), 随后将 BTA@SPANI-POSS 与环氧树脂共混得到 BTA@SPANI-POSS 环氧涂料, 最后在 Q235 碳钢上制备数种复合环氧涂层。通过红外光谱、紫外可见光谱、扫描电子显微镜对 BTA@SPANI-POSS 的结构、缓蚀性能、表面形貌进行表征, 利用接触角测量仪、电化学工作站研究所制备涂层的疏水性能和防腐性能。研究表明, 随着 SPANI-POSS 的添加, 涂层沾湿性能降低。电化学阻抗谱(EIS)和塔菲尔极化曲线测试结果表明, 与 SPANI-POSS 环氧涂层相比, 负载有 BTA 的 BTA@SPANI-POSS 环氧涂层对金属基底具有更高和更持久的保护能力, 其中试样 $\text{EB}_{1.5\%}$ 的腐蚀电流密度 i_{corr} 为 $16.67 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 其极化电阻 R_p 为 $2.467 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 具有较低的腐蚀动态速率。在 3.5 wt.% NaCl 溶液中浸泡 15 d 后环氧涂层仍具有良好的防腐蚀效果, 其阻抗值 $Z_{0.01\text{Hz}}$ 仍保留有第 1 d 时的 26.89%, 表现出优异的长期稳定性和防腐性能。归因于 SPANI-POSS 与 BTA 之间的协同作用, 所制备的 BTA@SPANI-POSS 环氧涂层在浸泡过程中与碳钢基底发生络合反应, 从而起到长时间的保护作用。



摘要: 针对高水基球铰副由于在较恶劣工况下存在倾侧偏载效应凸显、磨损和机械效率损失加剧等使其难以满足高压大流量轴向柱塞泵液压力需求的问题,以球铰副为研究对象,将不同的凹坑布置在滑靴球凹表面,结合理论计算结果并采用 CFD (计算流体力学) 方法,对球铰副在高水基乳化液中的润滑模型进行数值模拟,通过分析油膜上表面的压力分布、凹坑截面的速度分布,寻求不同表面织构的减磨机理及凹坑几何参数对承载力的影响规律。最后通过试验分析摩擦磨损情况,并与仿真进行对比。研究表明:油膜上的压力沿着凹坑的分度圆逐渐减小;乳化液在凹坑中流动时速度最大(位于前半凹坑内);工况参数和几何参数对油膜承载力的影响顺序为坑形>转速>面积率>深径比>高水基乳化液浓度>膜厚;膜厚 $4.5\ \mu\text{m}$ 、转速 $1\ 500\ \text{r/min}$ 、高水基乳化液浓度 3%、深径比 0.1、面积率 10% 的圆柱坑为最优水平组合;3 种凹坑的承载力由大到小为圆柱坑>圆锥坑>圆球坑;高水基乳化液浓度 3% 的摩擦因数最小,在 0.2 左右。仿真和试验结果均表明,高水基乳化液介质环境下具有凹坑形表面织构的球铰副减阻降摩效果较普通光滑表面突出。获得了高水基球铰副表面织构化对其润滑性能的影响规律,可为提高轴向柱塞泵润滑性能和机械效率提供参考。

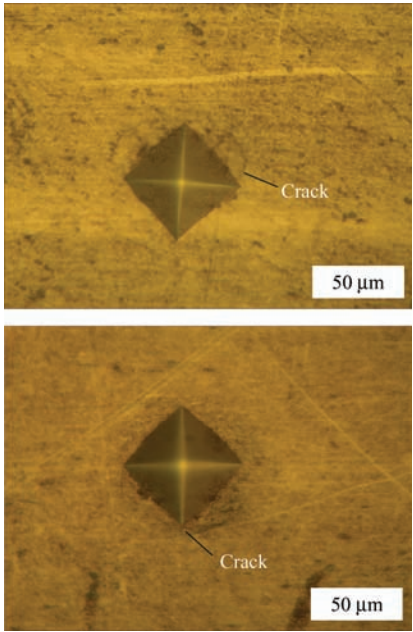
187 7B50-T7751 铝合金喷丸强化表面形态衍化及其对疲劳性能的影响

高国强 陈金祥 薛红前 张贤杰 杨 辉



摘要: 采用陶瓷弹丸对 7B50-T7751 铝合金进行不同覆盖率(100%、300%、600%、1 000%)的表面喷丸强化处理,探究了 7B50-T7751 铝合金表面粗糙度、表面微观组织以及残余应力场等表面形态因素在不同喷丸覆盖率作用下的衍化规律。通过应力比 $R=0.06$ 的轴向加载疲劳试验,分析表面形态改变对疲劳强度的影响。结果表明,不同覆盖率的喷丸强化处理均能改善该材料的疲劳性能,其中在 100%~300% 喷丸覆盖率下,疲劳强化增益效果最为明显,其机理是试件在喷丸处理后表面形态得以改善,同时表层形成较高水平的残余压应力,这两种效应的共同作用使疲劳裂纹源从材料表面缺陷处向内迁移到材料内部容易产生应力集中的夹杂处。

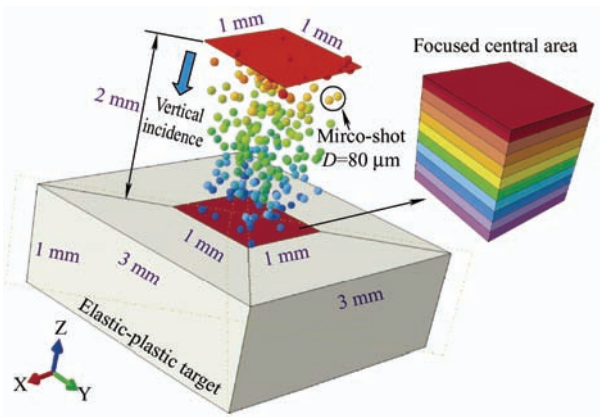
刘东静 由 园 闫牧夫 陈宏涛 王超会 李 芮 洪 霖 韩廷杰



摘要: 为探索不同气氛对渗氮层组织和性能的影响,采用温度为 520 ℃,时间为 4 h、8 h 和 12 h,气氛分别为氨气或氨气+氮气混合气氛条件对 38CrMoAl 钢进行等离子体渗氮。利用金相显微镜、显微硬度计、X 射线衍射仪、扫描电镜和电化学工作站,对改性层的截面显微组织、显微硬度、渗层脆性、相组成、形貌成分以及耐蚀性等进行表征。氨气渗氮后,渗层厚度平均为 249.4 μm,平均增质量 2.30 mg / cm²,4 h 后硬度达到最大 990.5 HV_{0.05}。氨氮混合气氛渗氮后,渗层厚度平均为 294.8 μm,平均增质量 2.39 mg / cm²,4 h 后硬度达到最大 1 000.2 HV_{0.05}。氨气渗氮层主要相为 γ'-Fe₄N,次要相为 ε-Fe₂₋₃N;氨氮混合气氛渗氮层中主要相变为 ε-Fe₂₋₃N,次要相为 γ'-Fe₄N。氨氮混合气氛渗氮 4 h 后,改性层腐蚀速率最小 (108.05 μm / a),电流密度下降到最低 (9.19 μA / cm²)。

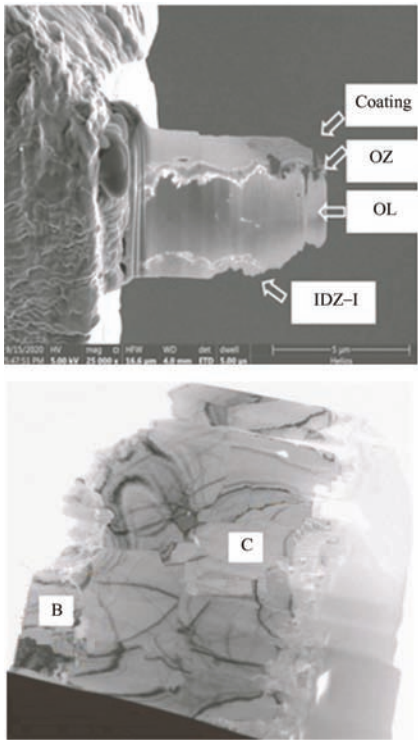
204 基于 DEM-FEM 的微粒喷丸仿真分析

张博宇 刘怀举 魏沛堂 朱加赞



摘要: 微粒喷丸作为一种新兴的喷丸工艺,由于工艺试验数据与仿真技术的缺失,其作用机理尚未探明。基于 ABAQUS 二次开发,采用离散元与有限元 (DEM-FEM) 相结合的方法,构建考虑初始残余应力与硬化层梯度的随机多弹丸微粒喷丸弹塑性模型,探究微粒喷丸的喷射速度与覆盖率对残余应力分布和表面粗糙度的影响规律。发现随着微粒喷丸喷射速度的增加,靶体表面粗糙度的算术平均偏差 Sa 线性增加;覆盖率达到 100%后,覆盖率大小对 Sa 与残余压应力分布影响不大;喷射速度对于微粒喷丸的最大残余压应力值影响不大,但对残余应力层的厚度有显著影响。通过 DEM-FEM 耦合方法对微粒喷丸机理进行探究,为工艺参数的制定提供理论支撑。

黄春林 朱 明 鲁金涛 黄子敬 黄锦阳 周永莉 袁 勇



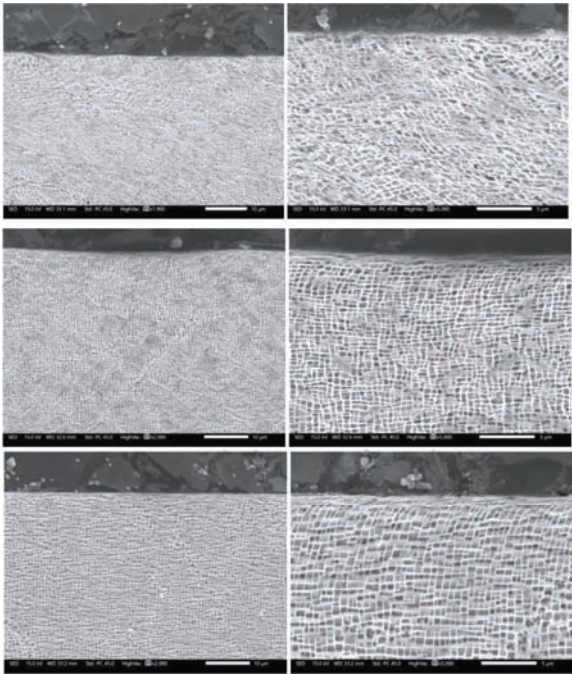
摘要：在高温下长时间暴露，钢材表面的渗铝层与母材之间容易发生元素互扩散，对母材组织产生影响，影响母材的力学性能。为研究超超临界机组用 T92 钢表面铝化物涂层的抗蒸汽氧化性能及组织演化特性，采用低温粉末包埋渗铝法在 T92 钢锅炉管内壁制备铝化物涂层，并在 650 °C 饱和蒸汽环境中进行热暴露试验，结合扫描电镜（SEM）、透射电镜（TEM）观察及 X 射线衍射分析，研究铝化物涂层的氧化行为以及 T92 基体与铝化物涂层之间的扩散退化行为。研究表明：低温粉末包埋渗铝可在 T92 锅炉管内壁制备厚度约 30.4 μm 的双层结构铝化物涂层，各层结构连续均匀且组织稳定，与母材呈冶金结合。在 650 °C、3 000 h 饱和蒸汽氧化过程中，涂层表面生长厚度约 0.3 μm 的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 氧化膜。650 °C 长时热暴露过程中，Fe-Al 金属间化合物始终是涂层的主要物相，但涂层由 FeAl 相向 FeAl_2 相退化。铝化物涂层经长时间热暴露后组织退化，但仍具有优异的抗氧化性能，能够对 T92 钢提供很好的保护。

/// 技术 应用 ///

肖 燕 陈明智 卢 轶 吴二柯 张 艳 孙桂芳

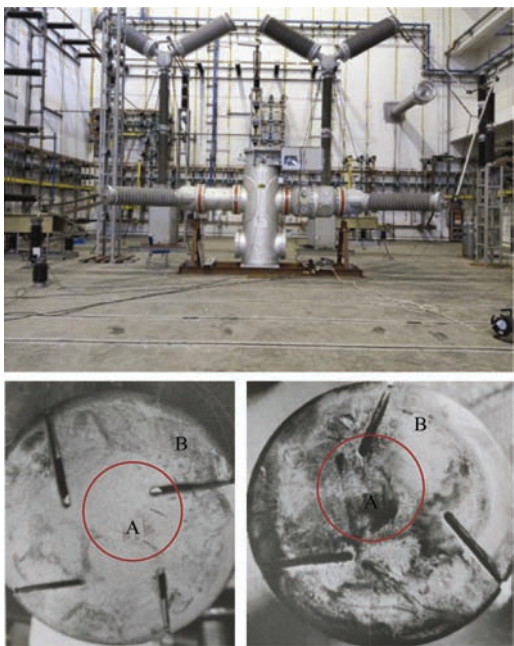


摘要：航空光电雷达电机换向器部位使用的纯铜材料在服役中容易发生表面损伤，传统红外激光沉积纯铜材料过程中激光吸收率较低。采用蓝光激光器对纯铜电机换向器失效部位进行送粉式激光沉积修复（所用粉末为 Cu-15Sn），研究蓝色激光工艺参数对修复形貌及修复区组织性能的影响。采用光学显微镜、扫描电镜及附带能谱仪、显微硬度计、微型摩擦磨损试验仪表征和测试修复区的微观组织、显微硬度及耐磨性能。结果表明：蓝光激光可以在较宽的工艺参数窗口范围获得良好的修复层。修复层为典型的枝晶结构，由铜固溶体枝晶和铜锡金属间化合物共晶组成；平均显微硬度为铜基体硬度的 2.24 倍，修复区相对耐磨性为基体的 2.37 倍。修复区相对于基体硬度和耐磨性提升的原因在于快速凝固条件下形成的细小非均匀枝晶结构（固溶体和金属间化合物的混合结构）和固溶强化效应。铜基体和修复区磨损机制均为磨粒磨损、氧化磨损及黏着磨损。其中修复区主要为粘着磨损和氧化磨损，铜基体为粘着磨损和轻微氧化磨损。研究结果能够为电机换向器部位纯铜材料的高效修复提供数据支撑和理论基础，推进蓝色激光沉积再制造技术在有色金属加工领域的应用。

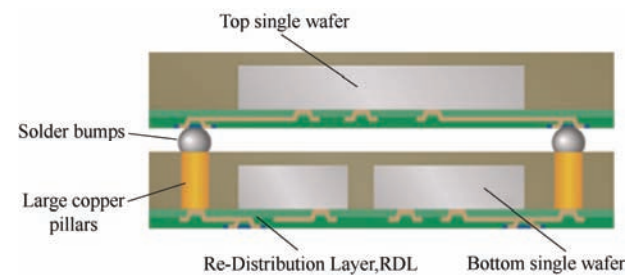


摘要：单晶合金零件喷丸后的工序里存在中温时效过程，将对喷丸表层组织和性能产生影响。采用扫描电镜、截面硬度梯度等方法研究一种中温时效方法对 DD5 单晶合金组织状态的影响，对比原始、喷丸和喷丸+中温时效后单晶合金旋转弯曲疲劳性能。结果表明，喷丸使得 DD5 单晶合金的立方化组织发生剧烈形变，中温时效后剧烈形变组织发生一定的回复，但仍保留了喷丸形变组织特征，原先喷丸硬化层深度由喷丸状态的 270 μm 减小到 180 μm ，表面硬度略上升 3.9%。喷丸+中温时效后，相比磨削状态 DD5 单晶缺口旋弯试样 500 MPa / 650 $^{\circ}\text{C}$ 中值疲劳寿命估计量提高 8.29 倍，最短寿命 (3.58×10^5 周次) 高于原始试样的最长寿命 (2.84×10^5 周次)，仍然实现强化，但疲劳寿命分散度增大，同时喷丸+中温时效后试样疲劳极限较磨削提高 11.2%。

238 磁控溅射 CuCrMo 薄膜耐 126 kV 20 kA 电弧烧蚀性能



摘要：提升真空断路器 CuCr 触头的抗电弧烧蚀能力是决定其能否应用于高压真空灭弧室的核心关键，尚未见有效触头材料或表面涂层改性技术使 CuCr 触头应用于 126 kV 以上真空灭弧室的报道。基于 CuCrMo 薄膜的优异电气性能，对沉积 CuCrMo 薄膜的真空灭弧室触头进行 126 kV 下的抗电弧烧蚀研究，并进行开断寿命的工程验证。采用磁控溅射技术在 CuCr50 真空触头片表面沉积 5 μm 厚的 CuCrMo 薄膜，对其进行 126 kV 20 kA 电流下 23 次的电寿命试验。利用 XRD、SEM 和 3D 共聚焦显微镜研究电弧烧蚀后表面形貌。研究结果表明：沉积 CuCrMo 薄膜的触头片，在纵向磁场和 126 kV 20 kA 条件下可有效分散电弧，较未镀膜触头片有更小电弧电流密度；经过 23 次电寿命试验后，表面烧蚀程度比未镀膜的触头片轻，表面粗糙度降低，提高了触头的开断寿命。为表面改性真空断路器 CuCr 触头在高电压大电流真空灭弧室的应用提供了有效工程依据。



摘要：集成电路制造也称芯片制造，在整个工业产业链中越来越重要，而电化学沉积（电镀）等表面技术起到非常关键的作用。介绍芯片制造中用到的电化学沉积、物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）、抛光等表面技术的基本情况和特点，探讨铜互连电镀、化学机械抛光（CMP）、硅通孔（TSV）垂直互连电镀铜填充、芯片表面再布线（RDL）电镀铜工艺、键合凸点（Bump）电镀铜/锡工艺、集成电路引线框架/封装基板的电化学蚀刻工艺等，通过总结电化学沉积等表面技术的发展，深入分析传统电镀技术在集成电路制造中的新特点，推动集成电路制造技术的进步。

CONTENTS

- 1 **Crack Behavior of Cr Coating Zircaloy Cladding Tubes under Ring Compression**
YUE Yanan CHEN Huan YU Shijia ZHOU Teng ZHANG Ruiqian CAI Zhenbing
- 10 **Cyclic Thermal Shock Behavior of Cr Coating on Zirconium Alloy**
YU Shijia ZHAO Qingmin DU Peinan TUO Jingyi ZHANG Ruiqian CAI Zhenbing
- 21 **Impact-sliding Wear Behavior of Cr-coated Zirconium Alloy**
ZHANG Qiang LI Sigong ZHOU Teng ZHU Liting
- 30 **Interface Cracking Behavior of Cr Coating on Zirconium Alloy under High Temperature Compression**
CHEN Huan LI Chunlin YUE Yanan ZHANG Ruiqian WANG Yu YANG Hongyan
WEI Tianguo CAI Zhenbing
- 41 **Interface Damage Behavior of Zirconium Alloy Cladding Under Fretting Corrosion Environment**
JIAO Yongjun LI Zhengyang PU Zengping REN Quanyao ZHENG Meiyin WU Yingwei
QIU Suizheng
- 50 **Microstructure of Oxide Scale Formed on FeCrAl-ODS Cladding Material under High-Temperature Moist Air**
LI Qing LI Zhenhua SONG Peng ZHANG Ruiqian LONG Dijun HUANG Taihong
- 57 **Effect of Displacement Amplitude on Tangential Fretting Wear of Alloy 690 Tube in High Temperature and High Pressure Water**
ZHENG Hui ZHUANG Wenhua YANG Shuangliang GUO Xianglong ZHANG Lefu
- 65 **Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Multilayer Composite Toughened Coatings**
YANG Bixiao SONG Peng HUANG Taihong ZHAI Ruixiong MA Tao HE Yang ZHOU Huihui
- 75 **Friction Characteristics of Textured Surface of Graphene / copper Matrix Composites**
XU Linhong YANG Hao KANG Hongmei HOU Yucheng
- 84 **Review on the Influence of Surface Micro-nano Structure and Bioactive Ions of Biomedical Titanium Implants on Biocompatibility**
JI Zhenbing WAN Yi ZHAO Zihe WANG Hongwei FAN Shiyuan LIU Zhanqiang
- 102 **Research Progress of Superhydrophobic and Self-healing Coating Based on Microencapsulation Technology**
GE Qianqian LU Zhenzhen LIANG Yang WEI Peng

- 113 **Research Progress of Thermal Spraying Anti-cavitation Erosion Coatings and Modification Technologies**
MA Junkai HOU Guoliang AN Yulong ZHAO Xiaoqin ZHOU Huidi CHEN Jianmin DUAN Wenshan
- 128 **Research Progress of Powder Processing and Compositing Technology in Cold Spraying**
ZHOU Hongxia LI Xueting JIANG Shengwei WANG You
- 140 **Research Progress of Diamond / Cu Composites for Thermal Management**
LI Mingjun MA Yong GAO Jie MAO Yamei ZHOU Bing YU Shengwang
- 151 **Stabilization Treatment and Growth Mechanism of Rust Layers on Weathering Steel Surface**
MA Lingwei LU Taoli ZHANG Dawei LU Lin
- 161 **Preparation and Anticorrosive Performance of BTA@SPANI-POSS Epoxy Coating**
OU Baoli WANG Yuwei DUAN Jun GUO Yan ZHI Qian
- 172 **Effect of Pit Surface Texture on Lubrication Performance of High Water-based Ball Joint**
KOU Baofu LI Zhenshun ZHANG Zhang LI Ruiqing
- 187 **Surface Morphology Evolution Together with Its Effect on Fatigue Properties in Shot Peening of Aluminum Alloy 7B50-T7751**
GAO Guoqiang CHEN Jinxiang XUE Hongqian ZHANG Xianjie YANG Hui
- 196 **Characterization of Plasma Nitrided Layer at Different Atmosphere Conditions on 38CrMoAl Steel at 520 °C**
LIU Dongjing YOU Yuan YAN Mufu CHEN Hongtao WANG Chaohui LI Rui HONG Lin HAN Tingjie
- 204 **Simulation Analysis of Micro-shot Peening Based on DEM-FEM Method**
ZHANG Boyu LIU Huaiju WEI Peitang ZHU Jiazan
- 213 **Microstructure Evolution of Aluminide Coating on T92 Steel**
HUANG Chunlin ZHU Ming LU Jintao HUANG Zijing HUANG Jinyang ZHOU Yongli YUAN Yong
- 223 **Remanufacturing of the Aviation Photoelectric Radar Motor Commutator by Laser Deposition**
XIAO Yan CHEN Mingzhi LU Yi WU Erke ZHANG Yan SUN Guifang
- 232 **Effects of Medium Temperature Aging on Microstructure and Fatigue Property of Shot Peened Single Crystal Superalloy**
WANG Xin XU Chunling HU Yisong MA Shicheng TANG Zhihui
- 238 **126 kV 20 kA Arc Erosion Resistance of CuCrMo Film Prepared by Magnetron Sputtering**
MIAO Xiaojun FAN Yanyan QIAN Dan LI Yanhuai SONG Zhongxiao PANG Yajuan HAO Liucheng
- 248 **Role of Surface Technology Such as Electrodeposition in Integrated Circuit Manufacturing**
ZHU Jing ZHUO Hongjun ZHU Liqun

核材料及装备表面技术专栏 序言

核能也称原子能，是原子核结构发生变化时释放出来的巨大能量，包括裂变能和聚变能两种主要形式。核能装备长期在强腐蚀、强辐射、高温、高流速等极端环境下运行，多因素耦合损伤极易导致关键部件服役性能的急剧退化直至失效，一旦部件性能失效将可能引起灾难性事故。例如，2011 年日本福岛核事故中，反应堆堆芯中的锆合金包壳与高温水蒸气剧烈反应，最终造成堆芯熔化和氢气爆炸，对社会和环境造成了巨大的负面影响。此后，满足更高安全裕量的核材料和技术提升成为研究热点。国内外的学者、企业围着核能装备对安全运营的更高要求，在新材料体系、涂层技术和表面改性技术开展了持续的研究和开发，取得了一系列重要成果。

《中国表面工程》核材料及装备表面技术专栏邀请了国内多个长期从事核材料表面技术和基础研究团队报道了他们在核材料领域服役行为、表面技术、涂层薄膜性能等研究领域的最新研究成果。该专栏包括 Zr 合金涂层、FeCrAl-ODS 包壳材料、多层复合增韧涂层、蒸汽发生器传热管材料在制备方法、组织结构、模拟服役性能等方面的研究内容和最新的分析方法，包含微动磨损、微动腐蚀、冲-切复合磨损热冲击、膜/基界面开裂行为等多种表界面损伤形式。整个专栏报道了我国科研人员在核能材料表面技术的最新成果，为核能装备安全服役、后续的科技创新提供参考。

客座主编：蔡振兵、张瑞谦

蔡振兵（1981—），湖北黄冈人，博士。现任西南交通大学研究员、博士生导师、摩擦学研究所所长、先进驱动节能技术教育部工程研究中心副主任。四川省杰出青年科技人才（2022 年）、第十五届四川省青年科技奖获得者（2020 年）、四川省青年科技创新团队负责人（2017 年—）。主要从事装备（高铁、核电、航空、能源动力）关键机械部件和材料在极端环境下服役行为、摩擦学与表面工程等研究领域研究工作。是《机械工程学报》英文版、《中国表面工程》、《摩擦学学报》、《中国测试》等 9 个期刊的编委/青年编委。主持国家级课题 5 项，发表学术论文 280 余篇，获得发明专利 10 余项，出版学术专（编）著 3 部。获得包括教育部自然一等奖、教育部发明二等奖在内的省部级奖励 4 项。



张瑞谦（1981—），四川南充人，博士。现任中国核动力研究设计院研究员、反应堆燃料及材料重点实验室管理办公室副主任、中国核学会铀系物理与化学分会理事、四川省核学会核燃料与材料专委会副主任委员、国家生态环境部台山核电燃料专项工作组外聘专家。主要从事核燃料元件及反应堆材料相关领域的研究工作。研究方向有耐事故核燃料元件及材料、先进反应堆用特种高温材料、反应堆复杂工况环境下材料服役行为评价方法及材料性能研究。近年承担了国家自然科学基金重点支持项目、国家科技部重点研发计划课题等近 20 余项国家级以及中核集团科研项目。近年发表学术论文 92 篇，授权专利 37 项；获得四川省科技进步三等奖 1 项，中核集团科技进步三等奖 1 项。

