

# 高熵合金耐极端环境涂层应用与失效机理研究

薛昊宇

盐城工学院材料科学与工程学院 江苏盐城 224051

**摘要：**高熵合金耐极端环境涂层作为极端工况下材料防护的关键技术，其研究涵盖制备技术、性能表征与应用、失效机理及优化策略四大维度。制备上，物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）和热喷涂技术各有优劣，分别在涂层均匀性、成分可控性和沉积效率上表现突出；性能表征聚焦耐高温、耐腐蚀、耐磨损，对应航空航天、海洋工程等多领域应用；失效源于高温氧化、电化学腐蚀、磨损及多环境协同作用；优化可通过成分设计、工艺调整、结构调控与界面改性实现。该涂层为极端环境下设备寿命延长提供重要支撑。

**关键词：**高熵合金；耐极端环境涂层；制备技术；性能表征；失效机理

## 引言：

在航空航天、海洋工程、机械制造等领域，设备常面临高温、强腐蚀、剧烈磨损等极端环境，基体材料易失效，严重影响设备可靠性与寿命。传统防护涂层因成分单一、性能局限，难以满足复杂极端工况需求。高熵合金凭借高熵效应、迟滞扩散效应等独特优势，形成的涂层在耐极端环境性能上显著优于传统涂层。本文围绕高熵合金耐极端环境涂层的制备技术、性能表征与应用、失效机理及优化策略展开阐述，为该涂层的研发与工程应用提供参考。

## 1. 高熵合金耐极端环境涂层的制备技术

### 1.1 物理气相沉积技术（PVD）制备高熵合金涂层

通过物理方法使原材料离解为气态粒子，如溅射法中，氩离子轰击阴极靶材，靶材原子被溅射至基体表面沉积成膜。像磁控溅射，能提高沉积速率，使涂层均匀致密、膜基结合好。脉冲激光沉积则利用高功率激光脉冲烧蚀靶材，蒸发出等离子体沉积形成涂层，制备的涂层致密光滑，如在硅衬底上沉积的 CoCrFeNiAl0.3 高熵合金涂层，在 NaCl 溶液中比 316L 不锈钢耐腐蚀。

### 1.2 化学气相沉积技术（CVD）制备高熵合金涂层

让气态物质在基体表面发生化学反应并沉积成膜。该技术可精确控制涂层成分与结构，能在复杂形状基体上获得均匀涂层。比如，在特定反应气体氛围下，通过调节反应温度、压力等参数，使金属卤化物、有机金属化合物等气态前驱体在高温基体表面反应，形成高熵合金涂层。不过，其设备复杂，反应条件苛刻，成本较高。

### 1.3 热喷涂技术制备高熵合金涂层

将固态涂层材料加热至熔融或半熔融状态，高速喷射到基体表面形成涂层。可选用火焰喷涂、等离子喷涂等方式。如等离子喷涂，利用等离子弧将高熵合金粉末加热熔化后喷涂，涂层结合强度较高，能显著提高基体的耐磨、耐腐蚀等性能，在航空航天等领域用于部件表面防护，但涂层孔隙率相对较高，需后续处理提高致密度。

## 2. 高熵合金耐极端环境涂层的性能表征与应用场景

### 2.1 耐高温性能表征与高温环境应用

在耐高温性能表征方面，主要通过热重分析（TGA）监测涂层在 500–1200℃ 区间的质量变化，评估氧化增重速率；借助差示扫描量热法（DSC）捕捉涂层相变温度与热稳定性临界点；通过高温硬度计测试不同温度下涂层硬度保留率，判断高温力学性能衰减程度。应用场景集中在航空航天领域，如航空发动机燃烧室内壁涂层，可承受 1100℃ 以上高温燃气冲刷，降低基体氧化损耗；也用于工业窑炉衬里，延长窑炉使用寿命 30% 以上。

### 2.2 耐腐蚀性能表征与腐蚀环境应用

耐腐蚀性能表征依赖电化学工作站开展动电位极化测试，通过腐蚀电流密度、极化电阻量化耐蚀性；采用中性盐雾试验（NSS）模拟海洋环境，记录涂层出现锈蚀的时间（通常需超过 1000 小时）；利用 X 射线光电子能谱（XPS）分析腐蚀后表面钝化膜成分，验证耐蚀机制。该涂层在海洋工程中应用广泛，如船舶螺旋桨表面涂层，可抵御海水氯离子侵蚀；也用于化工储罐内壁，防止酸碱介质对碳钢基体的腐

蚀渗透。

### 2.3 耐磨损性能表征与磨损环境应用

耐磨损性能通过销盘摩擦磨损试验机测定涂层摩擦系数（优质涂层摩擦系数可低至 0.2 以下）与体积磨损率；借助扫描电子显微镜（SEM）观察磨损表面形貌，分析磨粒磨损、粘着磨损等失效形式；通过纳米压痕仪测试涂层结合强度，避免磨损过程中涂层脱落。应用场景涵盖机械制造领域，如盾构机刀盘涂层，可在岩石研磨环境下提升耐磨性 5 倍；也用于轴承表面，减少机械运转中的磨损损耗。

## 3. 高熵合金耐极端环境涂层的失效机理

### 3.1 高温下涂层的氧化失效机理

在高温环境中，高熵合金涂层的氧化失效主要源于元素的选择性氧化与氧化膜的结构破坏。一方面，涂层中高活性元素（如 Al、Cr 等）优先与氧气反应，生成初始氧化膜（如  $Al_2O_3$ 、 $Cr_2O_3$ ），若膜层致密可暂时阻碍氧化；但随温度升高，涂层内部原子扩散速率加快，低熔点元素（如 Cu、Ni）易向表面迁移，破坏氧化膜连续性。另一方面，高温导致涂层与基体的热膨胀系数差异凸显，冷热循环中氧化膜反复承受拉应力与压应力，最终产生开裂或剥落，失去保护作用。

### 3.2 腐蚀环境中涂层的电化学腐蚀失效机理

腐蚀环境中，涂层的失效核心是电化学腐蚀引发的“局部破坏 – 整体失效”连锁反应。高熵合金虽因成分均匀性具备一定耐蚀性，但涂层表面不可避免存在微孔、缺陷或杂质，成为腐蚀介质（如  $Cl^-$ 、 $H^+$ ）的渗透通道。当腐蚀介质接触涂层与基体界面时，会形成微电池：涂层作为阴极，基体作为阳极发生溶解，产生的腐蚀产物（如金属离子）堆积在界面，破坏涂层与基体的结合力。同时，涂层内部不同元素的电极电位差异（如 Cr 与 Cu 的电位差）会引发局部电偶腐蚀，导致电位较低的元素优先溶解，形成蚀坑，随时间推移蚀坑扩展，最终造成涂层穿孔或脱落<sup>[1]</sup>。

### 3.3 磨损条件下涂层的磨损失效机理

磨损条件下，涂层失效主要分为磨粒磨损与粘着磨损两类。磨粒磨损中，外界硬质颗粒（如石英砂、金属碎屑）与涂层表面滑动或滚动时，会对涂层产生切削作用，破坏表面致密层，形成犁沟状损伤；若涂层硬度不足或结合力较弱，磨粒还可能嵌入涂层内部，引发局部剥落。粘着磨损则常见于涂层与金属部件高速接触场景，高温高压下二者表面原子发生扩散，形成粘着点，随后相对运动导致粘

着点断裂，造成涂层表面材料流失，严重时会暴露基体，引发进一步磨损<sup>[2]</sup>。

### 3.4 多极端环境耦合作用下的协同失效机理

多极端环境（如高温 + 腐蚀、腐蚀 + 磨损）的耦合会产生“1+1>2”的协同失效效应。例如，高温环境会加速腐蚀介质的渗透速率，同时降低涂层的力学性能，使涂层在磨损作用下更易产生裂纹；而腐蚀形成的蚀坑会成为应力集中点，在磨损过程中进一步扩展，导致涂层剥落速度加快。此外，高温与腐蚀的协同作用还会改变涂层的微观结构，如使氧化膜从致密变为疏松，失去保护能力，同时腐蚀产物会削弱涂层与基体的结合强度，使磨损引发的失效更难控制（图 1）<sup>[3]</sup>。这种协同效应会大幅缩短涂层的使用寿命，是极端环境下涂层失效的主要难点。

涂层失效机理逻辑构架图

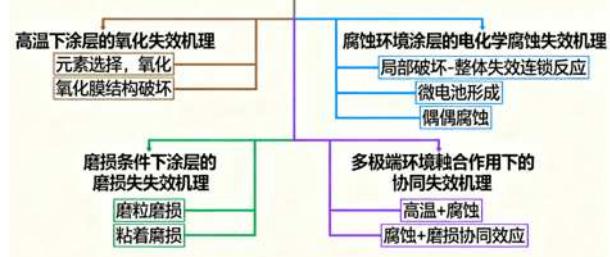


图 1 涂层失效机理的逻辑构架图

## 4. 高熵合金耐极端环境涂层性能优化策略

### 4.1 成分设计优化对涂层性能的提升

通过调控高熵合金的元素配比，可针对性增强涂层耐极端环境能力。例如，引入 Cr、Al 等易形成致密氧化膜的元素，能提升涂层在高温氧化环境下的稳定性；添加 Mo、Nb 等元素可增强涂层的高温强度与耐磨性，减少极端工况下的磨损失效。同时，合理控制元素含量避免脆性相析出，平衡涂层的强度与韧性，确保其在冷热循环等极端条件下不易开裂。

### 4.2 制备工艺参数调整对涂层性能的改善

不同制备工艺（如等离子喷涂、磁控溅射、激光熔覆）的参数优化，直接影响涂层质量。以等离子喷涂为例，调整喷涂功率、送粉速率与喷涂距离，可减少涂层内部孔隙与未熔颗粒，提升致密度，降低极端环境下腐蚀介质的渗透风险；磁控溅射中优化靶材功率与沉积气压，能细化涂层晶粒，增强涂层的硬度与结合力，改善其耐冲击性能。

### 4.3 涂层结构调控优化策略

采用多层结构或梯度结构设计, 可解决单一涂层性能短板。多层结构通过交替堆叠不同成分的高熵合金层, 利用层间界面阻碍裂纹扩展, 提升涂层抗疲劳性能; 梯度结构则通过成分或性能的渐变, 消除涂层与基体间的热膨胀系数差异, 减少高温环境下的热应力, 避免涂层剥落。例如, 梯度涂层从基体侧到表面侧, Cr 含量逐渐增加, 既保证界面结合力, 又增强表面抗氧化性。

### 4.4 界面改性对涂层结合力及耐失效性能的增强

通过界面预处理(如喷砂、酸洗)或引入过渡层, 可改善涂层与基体的结合状态。喷砂处理能增大基体表面粗糙度, 增强机械结合力; 引入金属过渡层(如 Ni、Ti 层)可缓解涂层与基体的化学相容性差异, 减少界面应力集中。此外, 界面热处理可促进元素扩散, 形成牢固的冶金结合界面, 进一步提升涂层在极端环境下的抗剥落能力。

结语: 高熵合金耐极端环境涂层在极端工况防护中展现出巨大潜力, 其制备技术的多元化为不同场景应用提供选择, 性能表征明确了涂层适用范围, 失效机理分析为性能优

化指明方向, 多维度优化策略有效提升了涂层稳定性与耐久性。但目前该涂层仍存在制备成本较高、多极端环境协同防护性能待提升等问题。未来需进一步优化制备工艺、深化失效机制研究, 推动高熵合金耐极端环境涂层在更多高端装备领域实现产业化应用, 助力极端环境下设备防护技术升级。

### 参考文献:

- [1] 李阳, 刘敏, 周科朝.  $\text{Cl}^-$  环境中  $\text{CoCrFeMnNi}$  高熵合金涂层的微电偶腐蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(1):1–8.
- [2] 陈宇翔, 王毅, 李国爱.  $\text{AlCoCrFeNiTi}$  高熵合金涂层的高温磨损性能及失效机制 [J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4):512–520.
- [3] 刘思达, 黄继华, 王磊. 高温腐蚀–磨损耦合作用下高熵合金涂层协同失效机制 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(3):673–684.

作者简介: 薛昊宇(2001.6-), 男, 汉族, 山东德州人, 大学本科, 盐城工学院材料科学与工程学院, 专业方向: 金属材料工程