

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202601004

耐烧蚀高熵涂层制备、评估与优化设计 研究进展

李慧东, 袁晓静*, 刘浩宇, 姜楠, 张敏, 许东升, 罗伟蓬
(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘 要: 航天装备关键部件须经受高温高载及复杂环境的严苛考验, 其热端部件的可靠服役性能一直是航天领域研究的热点问题之一。超高温高速气流冲刷、高能武器威胁造成的烧蚀等极端条件下, 热防护涂层须具备稳定的高温服役能力。近年来, 高熵材料凭借优异的机械性能、热稳定性和化学稳定性, 备受航天材料领域关注。针对高超音速飞行器在长航时飞行中对典型结构件的耐烧蚀需求, 分析了耐烧蚀高熵涂层设计、制备与评估进展; 重点分析了多组元高熵材料的组分优选策略和热防护涂层的先进制备工艺, 并探讨了其性能调控机制, 为高性能耐烧蚀高熵涂层的制备与性能提升提供了参考。

关键词: 高熵材料; 制备方法; 耐烧蚀性能; 优化设计

中图分类号: TB34

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)01-0032-14



听语音
与作者互动
聊科研

航空航天装备快速跨越式发展, 在航时、速度、突防等方面面临的要求不断提高。高速运行状态下, 装备典型结构的热防护问题, 以及对抗高能武器时的防护需求, 使得先进材料面临供不应求的现实难题。

自 2004 年叶均蔚教授提出高熵材料 (high-entropy materials, HEMs) 概念以来, 包含 5 种及以上元素等摩尔比的多主元设计赋予其高熵效应、晶格畸变和缓慢扩散特性, 使其在高温强度保持、耐腐蚀性及抗辐照性能上表现优异^[1-3]。独特的协同效应以及多主元成分的高熵效应赋予其优异的物理、化学和机械性能。此外, 高熵材料具有优异的机械强度、耐高温性能和良好的抗氧化能力, 使其在航空航天、能源存储与转换以及极端环境等多个领域展现出广阔的应用前景。其中, 高熵陶瓷因具有高硬度和多元化学稳定性, 成为高温和高载荷环境中的理想选择材料, 但也存在材料成本高、比密度偏高, 难以适应装备典型结构的

运用难题^[4-5]。

近年来, 表面涂层技术得到长足发展, 已经从维修领域深度融入装备典型结构设计领域, 以热防护涂层、耐高载荷为典型代表^[6-8]。Wen 等^[9]通过多尺度结构设计制备兼具超强力学强度和高隔热的高熵硼化物陶瓷材料, 在 50% 气孔率下, 实现了 337 MPa 的压缩强度以及 $0.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的热导率, 为高性能耐烧蚀高熵涂层制备和研究提供了参考。

1 高熵材料体系

高熵材料包含一个重要概念——混合熵^[10-11]。根据统计热力学, 玻尔兹曼方程得出系统的混合熵为

$$\Delta S_{\text{conf}} = k_B \ln \omega \quad (1)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数; ω 为可用能量在系统中的粒子之间混合或共享方式的数量。对于随机的 n

收稿日期: 2025-07-28

修回日期: 2025-08-28

录用日期: 2025-09-02

第一作者: 李慧东 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事高熵材料耐烧蚀性能方面研究。E-mail: 850045792@qq.com

***通信作者:** 袁晓静 (1979—), 男, 教授, 主要从事机械、摩擦磨损、难熔高熵合金研究。E-mail: yuanxj2003@163.com

引用格式: 李慧东, 袁晓静, 刘浩宇, 等. 耐烧蚀高熵涂层制备、评估与优化设计研究进展[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (1): 32-45. LI Huidong, YUAN Xiaojing, LIU Haoyu, et al. Research progress on the preparation, evaluation, and optimal design of ablation-resistant high-entropy coatings[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (1): 32-45.

组分固溶体, 其中第 i 组分具有摩尔分数 X_i , 其每摩尔的理想构型熵为

$$\Delta S_{\text{conf}} = -R \sum_{i=1}^n X_i \ln X_i \quad (2)$$

式中: R 为气体常数, 为 $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ 。

上述公式体现了高熵材料的组元设计规律: 当体系包含 5 种及以上等摩尔 (或近等摩尔) 组元时, $\sum_{i=1}^n X_i \ln X_i$ 的绝对值显著增大, 混合熵随之达到较高水平 (通常高于 $1.5 R$), 这种高熵状态会通过热力学作用抑制第二相析出, 使体系形成稳定的单相固溶体结构, 这也是高端材料具备优异力学性能与极端环境适应性的热力学基础。

2015 年, 美国北卡罗莱纳州立大学的 Rost 等^[12]报道了岩盐结构的熵稳定氧化物陶瓷, 具有热力学的高熵效应、结构的晶格畸变效应、动力学的迟滞扩散效应和组元的协同增效等特点。多组元固溶体陶瓷包括氧化物固溶体陶瓷、硼化物固溶体陶瓷和氮化物固溶体耐烧蚀高熵材料。越来越多的高熵陶瓷成为研究热点^[13]。

近年来, 高熵材料已发展至多种材料体系, 主要包括高熵合金、高熵陶瓷、高熵二维材料、高熵非晶材料以及高熵聚合物/复合材料, 如图 1 所示。

1.1 高熵合金

难熔高熵合金 (refractory high-entropy alloys,

RHEAs) 作为高温结构材料领域的革命性体系, 通过 5 种及以上难熔金属元素 (如 W、Mo、Ta、Nb、V、Hf、Zr、Ti 等) 的近等摩尔比合金化设计, 依托高熵效应与晶格畸变效应, 在极端高温及烧蚀环境中展现出超越传统合金的性能。其核心优势在于: 多主元固溶体结构显著抑制原子扩散, 延缓高温下晶界迁移和晶粒粗化; 同时, 通过严重的晶格畸变强化基体, 使合金在超过 800°C 时仍保持优异的强度、抗蠕变性和结构稳定性。典型抗烧蚀体系 W-Mo-Ta-Nb-V 系, 如 MoNbVTa_x ($x=0, 0.3, 0.5, 0.7, 1$) 系难熔高熵合金, 在 800°C 大气环境下, 随着 Ta 含量增加, 合金的缓慢扩散效应增强, 抑制了氧元素在基体中的扩散, 减少了易气化元素的氧化区域, 从而提高了氧化层的致密性与稳定性。Ta 氧化物的高化学稳定性降低了氧化层的开裂倾向, 显著提升了合金的高温抗氧化性能^[14]。Hf-Zr-Ti-Ta-Nb 系和 Mo-Ta-W-Re 系则进一步将高温抗氧化性、抗热震性与抗烧蚀性能相结合, 其微观组织在高温热循环下仍保持稳定, 避免了因相变或组分偏析导致的性能退化^[15-16]。其他成分高熵合金也展现出极端温度下的优异性能, 如 CrMnFeCoNi 高熵合金, 在寒冷条件下拥有优异的韧性、塑形能力和强度, 而 CrMoNbV 高熵合金在高温环境中则显示出优异的抗热软化特性^[17]。难熔高熵合金的抗烧蚀机制可归结为多尺度多机制的协同作用: 一

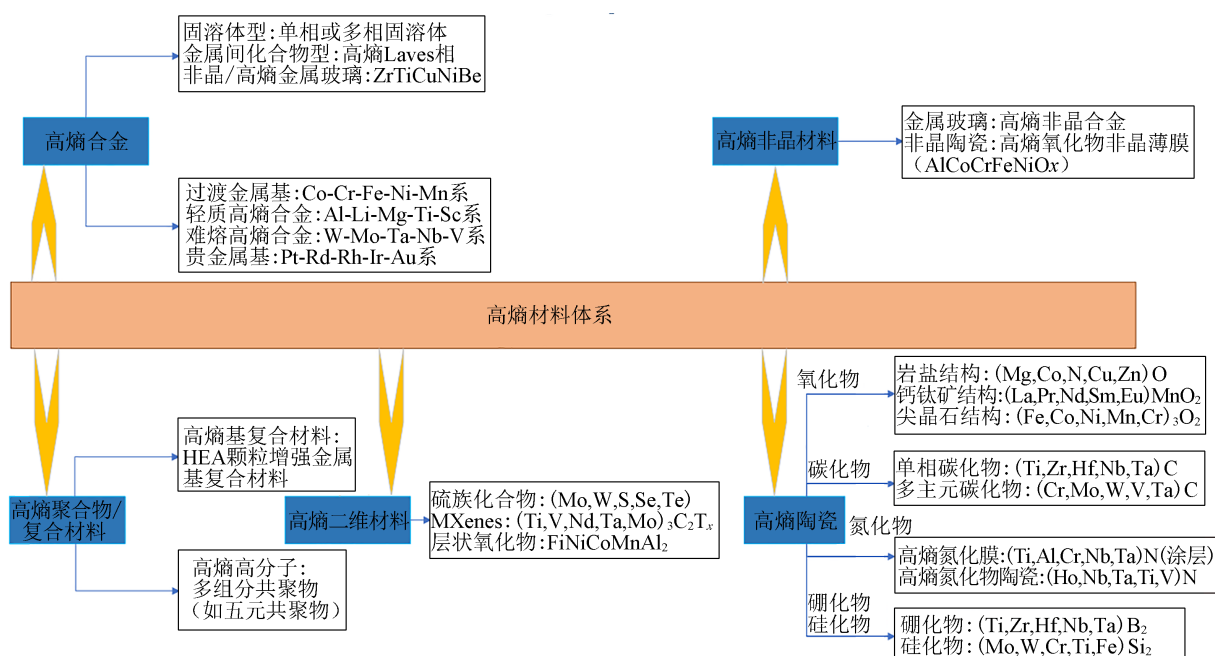


图 1 高熵材料家族

Fig. 1 High-entropy material family

方面,严重晶格畸变和多组元交互作用显著提高原子扩散激活能,降低氧化动力学速率;另一方面,高温氧化过程中,多元金属元素共同参与成膜,形成具有自愈合能力的复杂氧化物屏障层,该层兼具低氧渗透率、高熔点和优良的抗热震匹配性^[18-19]。

此外,高熵合金还展现出优异的抗辐照性能,如 W-Nb-Mo-Ta-V 和 W-Mo-Nb-Ta-Ti 等体系在高温离子辐照下表现出极低的肿胀率和缺陷聚集倾向, NiCoFeCrMn 高熵合金在高温 He 离子辐照下仅产生微小的孔洞,显示出更优越的抗辐照能力^[20]。这源于晶界与高密度晶体缺陷对辐照缺陷的高效吸收与复合能力,使其成为高超声速飞行器热防护系统、航天推进部件及先进核能系统等极端环境下极具前景的抗烧蚀材料。

1.2 高熵陶瓷

高熵碳化物陶瓷 (high-entropy carbide ceramics, HECs) 通过将 5 种或更多的金属或非金属元素以接近等摩尔比例混合固溶于一个晶格中,产生显著的熵稳定效应,形成新型陶瓷体系。以难熔金属碳化物,如 Hf、Zr、Ta 基碳化物等组成的单相碳化物 (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta) C 为例,其硬度大于 30 GPa,熔点大于 3 500 °C。以 (Cr, Mo, W, V, Ta) C 为代表的多主元碳化物^[21-22],具备耐超高温、高导热和高强度特性,抗氧化性优异,其抗烧蚀机理的关键在于高温下表面能自发形成致密碳氧化层,如 SiO₂、Cr₂O₃,该层能有效阻隔氧向内扩散并抑制材料的进一步升华和受侵蚀。

高熵硼化物/氮化物陶瓷主要包括硼化物体系和氮化物体系,如 (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta) B₂,其熔点大于 3 000 °C 且热导率低,适用于热障涂层^[23]; (Cr, Mo, W, V, Ta) B 则具备抗高温氧化和热化学腐蚀性能,其在高温氧化环境中会生成一层硼硅酸盐类的玻璃态保护膜,能流动并覆盖表面缺陷,实现自愈合式的抗烧蚀保护。氮化物体系,如 (Ti, Al, Cr, Nb, Ta) N,制备形成的高熵氮化膜,硬度大于 40 GPa,其抗烧蚀能力源于高温服役时表面形成的稳定、能反射热辐射的氮氧化物表层,该层结构致密,能有效抵抗热化学腐蚀和机械冲刷,常用于抗烧蚀涂层^[24],尤其是 (Hf, Zr, Ta, Nb, W) N 薄膜,能在高温下形成稳定氮氧化物保护层。

高熵氧化物陶瓷,如 (Hf, Zr, Sm, Er, Y) O_{2-δ} 和 (La, Y, Sm, Gd, Dy)₂Zr₂O₇,作为新兴体系,凭借其全氧化物成分固有的高温稳定性和

可调的热物理性能,通过熵稳定化作用,形成单一萤石或焦绿石结构,在高温下相稳定性极佳。其抗烧蚀机理主要归因于两大方面:一是在热-力-化学耦合环境下,表面能够维持完整的固溶体结构而非分解,避免了因相变导致的内聚强度下降和剥落;二是其多元组成使得形成的氧化层更致密、韧性更佳,且具有极低的高温氧扩散系数,能长时间有效保护基体。综上所述,各类高熵陶瓷通过其独特的多元组分设计,在高温下均倾向于形成具有自愈合能力、致密且稳定的复杂多元元素保护层,这是其实现优异抗烧蚀性能的共同物理化学本质。

尽管不同类型高熵陶瓷的具体性能优势存在差异,但其优异的抗烧蚀性能均源于多元组分设计。该设计能够在高温环境下形成致密、稳定且具备自愈合能力的复杂多元元素保护层,这一固有的物理化学本质使其成为下一代超高温热防护系统的关键候选材料。

1.3 高熵基复合材料

高熵基复合材料包括高熵陶瓷增强金属基以及 C/C 复合材料+高熵涂层^[25]。例如, HEA (CoCrFeNiAl) 基体+高熵碳化物颗粒 (Ti, Zr, Nb, Ta) C; 难熔 HEA (WMoNbTa) 基体+碳纤维/石墨烯,可提升导热和抗热震性能;高熵碳化物/硼化物涂层 ((Ti, Zr, Hf, Nb, Ta) C) 包覆 C/C 基体,可降低烧蚀率。对此,中国材料学家研制出了难熔金属 (W、Re、Ir 等) 及其合金 (Ir-Re 等)、金属间化合物 (MoSi₂ 等)、超高温陶瓷 (ZrB₂、HfB₂、HfC 等) 及其复合材料体系 (ZrB₂ 基、HfB₂ 基等) 和抗氧化、抗烧蚀的改性石墨基复合材料等多种材料体系,如图 2 所示^[26],有效规避了钽氧化物无法阻挡氧气渗透等难题,使得高熵材料体系可以满足更高温环境现实需求。

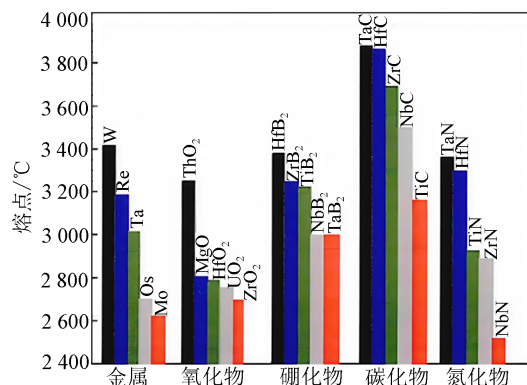


图 2 耐高温烧蚀陶瓷家族^[26]

Fig. 2 High-thermal ablation-resistant ceramic family^[26]

2 耐烧蚀高熵涂层的制备工艺

2.1 热压烧结

邵亚云^[27]的研究分析了真空热压烧结制备的CuCrFeMnNi高熵合金在不同温度退火处理后的组织演变与硬度变化机制, 采用质量分数大于99.9%、平均粒度约为75 μm 的Cu、Cr、Fe、Mn、Ni元素粉末, 按等摩尔比配比后, 用机械合金化方法制备高熵合金粉末, 再采用ZT-25-20YVHP型真空热压炉烧结, 制备高熵合金块体材料。通过精妙的实验设计, 证实了真空热压烧结制备的CuCrFeMnNi高熵合金烧结态组织面心立方(face-centered cubic, FCC)+ ρ 相的非平衡特性, 并揭示了高温退火可作为一项强大的工具, 诱导亚稳 ρ 相分解并驱动组织向单一FCC相转变, 为通过热处理设计高熵合金相组成提供了新路径, 为通过粉末冶金工艺制备高熵合金的退火方法补充了数据, 证实了烧结态合金的亚稳相(ρ 相)在高温下更易分解, 为定向调控相组成以实现韧性、耐蚀性等性能优化, 提供了新的技术方案。这一发现超越了传统铸造态合金的时效行为框架, 确立了通过“非平衡制备-后续热处理”来实现高熵合金相结构精准设计的新范式, 为获得优化韧性与耐蚀性等特定性能而设计相组成提供了全新的技术路径。

Guo等^[28]进行了分子动力学和相场模拟, 研究出的 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ 多晶高熵合金的热压烧结制备工艺展现出多方面优势, 提出新的多粒子模型, 突破传统分子动力学模型仅针对单晶合金的局限, 适用于多晶高熵合金的热压烧结。在温度和压力协同作用下, 加速颗粒接触区向指数幂蠕变区演化, 促使颈缩、孔隙填充、位错运动及颗粒重排等过程加快, 大幅提高烧结体致密度, 制备的材料力学性能表现突出。通过模拟获取最佳烧结参数, 结合粉末颗粒的形貌和尺寸, 对最终烧结样品的力学性能产生显著影响。不仅从机理上阐释了烧结致密度与力学性能得以大幅提升的根本原因, 更构建了一个“工艺参数-粉末特性-最终性能”的定量预测平台, 将工艺优化从经验试错推向科学指导的新高度。

综合而言, 这两项研究分别从试验与计算模拟两个维度, 深刻揭示了粉末冶金制备高熵合金过程中的核心问题与技术优势, 二者共同构成了对该技术“机理-工艺-性能”关联的深刻理解。未来的研究应致力于将这两种思想融合, 采用多

尺度模拟指导包含亚稳相的非平衡涂层制备, 再通过热处理精确调控其向目标稳定相转变, 为实现下一代高性能耐烧蚀高熵涂层的可控制备奠定坚实基础。

2.2 无压烧结

Smith等^[29]首次实现高熵硼化物陶瓷粉末压坯的常规无压烧结, 且无液相形成证据, 颠覆了高熵硼化物陶瓷主要依赖放电等离子烧结(spark plasma sintering, SPS)等高压工艺的传统认知。在成分设计中添加酚醛树脂作为碳源和粘结剂, 其碳化后不仅可作为粘结剂, 还可引发碳热还原反应, 有效清除硼化物粉末表面阻碍烧结的氧化物钝化层, 从而在无需液相形成和外部压力的条件下, 首次实现了高熵硼化物接近全致密的常规无压烧结。部分成分, 如(Cr, Hf, Ta, Ti, Zr) B_2 和(Hf, Ta, Ti, V, Zr) B_2 , 无压烧结后相对密度可达约100%, 且所有成分平均晶粒尺寸小于10 μm , 残留 B_4C 体积占比低于2%, 性能可媲美甚至优于SPS烧结材料, 直接挑战了SPS等先进烧结技术的统治地位。这项研究不仅提供了一种更低成本的制备方案, 还实现了通过热力学与动力学设计来调控烧结过程中的表面化学反应, 是激活无压烧结致密化驱动力的一条全新且普适性的思路。

耿畅等^[30]针对高熵锆酸盐陶瓷韧性差的瓶颈问题, 探索通过细化晶粒提升力学性能的可行性, 解决传统无压烧结中高温致密化导致晶粒快速长大的问题。区别于常规无压烧结, 1200~1500 $^{\circ}\text{C}$ 保温2 h, 采用无压两步烧结: 第一步, 在高温 T_1 (1400~1500 $^{\circ}\text{C}$)中短时保温10 min, 快速致密化; 第二步, 在低温 T_2 (1200~1350 $^{\circ}\text{C}$)中长时间保温5~8 h, 抑制晶粒长大。此方法在常压大气环境中实现了“致密化”与“晶粒长大”这两个传统上耦合过程的分离, 最终在不使用任何昂贵高压设备的前提下同步做到了高密度与超细晶粒, 为大幅提升陶瓷韧性开辟了一条工艺简单、成本低廉且易于规模化的新路径。

这两项研究共同将无压烧结从一种传统的近平衡态烧结技术, 提升为一种可通过对化学环境与烧结路径的主动设计来实现微观结构精密调控的先进制备方法, 所展现出的低成本、易放大和优异性能潜力, 为需要大面积、复杂形状制备的耐烧蚀高熵涂层提供了前所未有的工程化应用前景和基础科学研究范式。

2.3 高能束定向沉积

目前,高能束定向沉积主要包括等离子喷涂、激光定向沉积等工艺。在难熔高熵涂层的制备方面具有工艺简洁、操作方便等优势,其过程表现出多尺度、多物理场耦合的特点。

郭凌翔等^[31]针对传统过渡金属氧化物 ZrO_2 、 HfO_2 涂层开展高熵化设计,将高温固相反应与超音速大气等离子喷涂相结合,制备出 $(\text{Hf}_{0.125}\text{Zr}_{0.125}\text{Sm}_{0.25}\text{Er}_{0.25}\text{Y}_{0.25})\text{O}_{2-\delta}(\text{M1R}_3\text{O})$ 、 $\text{M}_2\text{R}_3\text{O}$ 等高熵氧化物涂层,探究稀土组元含量对高熵氧化物涂层的相结构演变规律、相稳定性以及抗烧蚀性能的影响。超越了传统热障涂层材料的改良思路,在超音速大气等离子喷涂 (supersonic atmospheric plasma spraying, SAPS) 的极端非平衡条件下成功合成了具有单一萤石结构的 $(\text{Hf}, \text{Zr}, \text{Sm}, \text{Er}, \text{Y})\text{O}_{2-\delta}$ 等高熵氧化物涂层,揭示了稀土组元的种类变化与含量差异对稳定高熵相、抑制涂层中有害相分离的关键调控作用,为设计兼具超高温相稳定性和优异抗烧蚀性能的新一代热障/抗烧蚀涂层提供了全新的材料基因库。Mu 等^[32]前瞻性地聚焦于高能束沉积的“原料”这一源头性问题,采用感应等离子球化 (induction plasma spheroidization, IPS) 技术制备出成分均匀、球形度极佳的 $(\text{Zr}_{1/4}\text{Hf}_{1/4}\text{Ta}_{1/4}\text{Ti}_{1/4})\text{B}_2$ 高熵粉末,该过程不仅消除了机械合金化可能引入的杂质与缺陷,更通过高温熔融-快速凝固实现了粉末的预合金化与致密化,从根本上保障了后续喷涂涂层成分的均匀性与显微结构的致密性,这项研究奠定了高性能涂层制备的“粉末冶金学”基础。

Zhang 等^[33]在激光定向能量沉积 (laser direct energy deposition, LDED) 研究中,通过高低温双相时效 (high-low temperature dual-phase aging, HLDA) 策略调控材料微观结构与性能。相比 LDED 样品,HLDA 处理后显微硬度从 506 HV 提升至 729 HV,提升约 44.1%,磨损率降低 24.7%,耐磨机制从粘附磨损转变为磨粒磨损。该研究独辟蹊径地从“后处理”角度切入,针对 LDED 技术制备高熵合金部件存在的典型快速凝固缺陷,创造性地提出了 HLDA 这一低成本、无需复杂设备的热处理策略。其核心机理在于通过高低温的精准配合,先后诱发纳米尺度的调幅分解与第二相的有序析出,从而实现从亚微米到纳米尺度的多级异质结构调控,最终使材料的硬度与耐磨性实现跃升。这项工作的巨大潜力在于其将增材制造与简易热处理强耦合,为增材制造高熵合金的性能优化提供低成本、易操作的新路径。

上述研究系统构建了从专用粉材制备、沉积过程多物理场协同调控,再到沉积态组织性能优化的全链条技术闭环,彰显了通过“材料设计-工艺创新-后处理优化”一体化策略解决耐超高温、抗烧蚀、耐磨损等极端服役环境应用瓶颈的显著优势,为未来实现高端装备关键表面涂层技术的自主保障提供了重要研究方向。

2.4 放电等离子烧结

Liu 等^[34]选用纯度 99.99%、粒径约 10 μm 的 W、Mo、Nb、Ta、V 金属粉末,以及 Al_2O_3 粉末作为原料,以碳化钨球为研磨介质进行球磨混合。然后,在加压状态下进行 SPS,采用 120 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 600 $^\circ\text{C}$,再以 100 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至烧结温度。通过超高升温速率与加压的协同作用,有效抑制了 W、Mo、Nb、Ta、V 等高熔点组元在常规烧结中难以避免的晶粒粗化倾向,制得的 $\text{WMoNbTaVAAl}_2\text{O}_3$ 高熵合金显微组织均匀、力学性能优异、耐磨性能良好。1 900 $^\circ\text{C}$ 烧结时,显微硬度达到 7 967.4 MPa,与其他多数通过铸造或粉末冶金制备的难熔高熵合金相比性能更优,其耐磨性能是纯 W 材料的 83 倍。这一突破性成果不仅证明了 SPS 在克服难熔金属本征脆性、协调强韧性方面的巨大潜力,更开辟了通过“高熵合金基体+陶瓷相”的复合化设计来研制新一代超耐磨、耐烧蚀涂层的全新方向。

Huang 等^[35]的研究中,巧妙地利用 SPS 过程极快的升温速率和场效应,驱动高熵碳化物粉末 $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{C}$ 、 B_4C 粉末、Si 粉末多相原位反应,采用球磨混合,然后进行放电等离子烧结,成功制得 $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{C}-(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{B}_2\text{-SiC}$ 复合材料。一次性同步完成了高熵碳化物、高熵硼化物和 SiC 三相的原位合成与致密化。该技术的精髓在于原位生成的多相界面洁净、结合强度极高,且纳米尺度的复相结构产生了显著的协同强化与韧化效应。这项研究超越了简单的粉末烧结范畴,标志着 SPS 技术已发展成为一款强大的“材料合成炉”,为设计具有多级异质结构、性能可定制的下一代耐超高温复合材料提供了迄今为止最先进和高效的制备平台。

耐烧蚀高熵涂层制备的工艺各有其研究特点与应用价值,不同工艺通过特定原料处理、参数调控等,可优化高熵材料的致密度、晶粒尺寸、力学及抗烧蚀等性能,不同制备工艺的对比如表 1 所示。

表 1 不同制备工艺特点对比^[27-35]

Table 1 Comparison of characteristics of different preparation processes^[27-35]

制备工艺	核心特点	主要优势
热压烧结	同时施加高温和压力; 依赖粉末原料; 需配合机械合金化或模拟优化参数	高效驱除粉末间气体,粉末颗粒结合紧密,材料致密度高; 显著提升强度、硬度等力学性能; 可通过温度和压力协同作用加速烧结过程; 为热处理设计相组成提供新路径(如诱导多相向单一相转变)
无压烧结	无需高压设备,常规条件即可实现; 可通过添加助剂(如酚醛树脂)促进烧结; 采用两步烧结法(高温短时致密化+低温长时抑晶粒长大)	颠覆高熵陶瓷依赖高压工艺的传统认知,拓展应用范围; 原料成本低、易获取,降低工艺门槛
高能束定向沉积	包含等离子喷涂、激光定向沉积等技术; 涉及多尺度、多物理场耦合; 可结合时效处理(如高低温双时效)优化性能	工艺优化方便、操作实施性强,适用于难熔高熵涂层制备; 激光定向沉积兼容近净成形特性,无需复杂后处理设备; 可显著提升材料硬度并降低磨损率,优化耐磨机制; 通用性强,适用于多种高熵陶瓷粉末制备
放电等离子烧结	升温速率快(如 120 °C/min); 加压状态下进行,可结合球磨混合原料支持多相复合材料原位反应制备	制得的材料显微组织均匀,力学性能优异; 耐磨性能突出; 可通过多相原位反应制备高致密度、细晶粒复合材料,揭示多相协同强化机制

3 耐烧蚀高熵涂层的性能评估

针对典型结构的模拟耐烧蚀评估,国内外研究人员基于不同热源类型开展了研究。Metco公司的9M型喷枪、F4型喷枪能量密度更集中,可形成3 000 °C以上的高温焰流,对材料进行模拟烧蚀冲刷^[36]。国内常常采用电弧、等离子加热和燃气风洞等烧蚀试验方法,考核材料耐烧蚀性能。主

要模拟温度、速度、热流密度等,对于各型风洞进行对比研究^[37]。罗磊^[38]开展了C/SiC材料在等离子风洞中的烧蚀试验。李江等^[39]开发了氧-煤油烧蚀试验技术,王金金等^[40]研究了等离子体多相流模拟烧蚀试验技术。汪辰宇^[41]的抗激光烧蚀评估试验为耐烧蚀涂层定量研究提供了评估手段参考。上述不同高熵材料耐烧蚀性能检测评估方法对比如表2所示。

表 2 不同高熵材料耐烧蚀性能检测评估方法对比^[36-41]

Table 2 Comparison of ablation-resistant testing and evaluation methods for different high-entropy materials^[36-41]

评估类型	核心热源/设备	模拟场景	典型试验系统	关键参数(温度/热流密度)	核心评估指标	代表性材料体系	主要烧蚀机制
基于火焰的烧蚀评估	氧-乙炔火焰、氧-煤油火焰	燃烧相关的高温氧化与冲刷环境	氧-乙炔烧蚀系统、氧-煤油烧蚀系统	1 500~2 500 °C	质量烧蚀率、线性烧蚀率	(Ti _{0.25} V _{0.25} Zr _{0.25} Hf _{0.25})B ₂ 涂层、(Hf _{0.36} Zr _{0.24} Ti _{0.1} Sc _{0.1} Y _{0.1} La _{0.1})C _{1-δ} (HE-C)涂层	(Ti _{0.25} V _{0.25} Zr _{0.25} Hf _{0.25})B ₂ 涂层、(Hf _{0.36} Zr _{0.24} Ti _{0.1} Sc _{0.1} Y _{0.1} La _{0.1})C _{1-δ} 涂层机械剥蚀、氧化物(如B ₂ O ₃)蒸发;高熵氧化物层保护
基于等离子风的烧蚀评估	等离子风洞、电弧/等离子加热设备	超高温气动加热环境	等离子风洞	2 000~2 430 °C 热流密度 4~5 MW/m ²	线性烧蚀率、质量烧蚀率	Cf/(Ti _{0.2} Zr _{0.2} Hf _{0.2} Nb _{0.2} Ta _{0.2})C-SiC 复合材料	高熔点氧化物骨架(如(Zr _x Hf _{1-x}) ₆ (Nb _γ Ta _{1-γ}) ₂ O ₁₇ 支撑+低熔点相(如SiO ₂)自愈合
基于高能激光的烧蚀评估	高能连续激光器	激光武器、高能束热冲击环境	高能激光烧蚀系统	激光通量聚焦,功率密度可达10 ⁶ W/cm ² 以上	烧蚀阈值、能量耐受能力	(Hf _{0.2} Zr _{0.2} Ti _{0.2} Ta _{0.2} Nb _{0.2})B ₂ (HEB)	热传导主导热响应,微观结构与成分变化影响烧蚀抗性

3.1 基于火焰的烧蚀试验评估

在等效烧蚀模拟试验中,氧-乙炔和氧-煤油烧蚀试验系统应用最广泛,能够模拟不同类型的与燃烧相关的高温烧蚀试验评估。Feltrin等^[42]以石墨为基底,采用SPS技术制备高熵(Ti_{0.25}V_{0.25}Zr_{0.25}Hf_{0.25})B₂涂层,2 200 °C烧蚀60 s,质量烧蚀

率为-0.51 mg/s,线性烧蚀率为1.38 μm/s,烧蚀机制包括机械剥蚀以及B₂O₃和轻质V-Ti氧化物蒸发。其耐烧蚀源于与基底热膨胀系数相近和表面氧化物层的保护作用。Guo等^[43]提出逆向成分设计方法制备(Hf_{0.36}Zr_{0.24}Ti_{0.1}Sc_{0.1}Y_{0.1}La_{0.1})C_{1-δ}(HE-C)涂层,在不同热流密度下抗烧蚀性能均表现优

异,烧蚀后表面氧化层更加完整致密,相稳定性好,为高熵碳化物逆向结构设计提供了理论和实验依据。

3.2 基于等离子的烧蚀试验评估

Dong 等^[44]开发的 Cf/(Ti_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2}) C-SiC 材料,在 5 MW/m² (2 430 °C) 的热通量下,线性烧蚀率约为 2.89 μm/s,质量烧蚀率约为 2.60 mg/s,抗烧蚀机制为自愈合氧化物层形成和宽温域保护能力,揭示了复合材料烧蚀过程中表面氧化层的演变规律和内在机制。该团队进一步研究了 Cf/(Ti_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2}) C-SiC 高熵陶瓷基复合材料 2 000 °C 以上的空气等离子烧蚀行为,突破了传统单组元陶瓷复合材料的研究局限^[45],聚焦高熵与 SiC 协同作用下的超高温抗烧蚀机制。采用 4 MW/m² 和 5 MW/m² 两种热流密度,模拟 2 000 °C 和 2 430 °C 极端高温环境,结合 300~3 000 s 的长时烧蚀试验,探究温度梯度和时长对烧蚀产物的影响。梳理了多组元氧化物的协同保护效应:高温下形成“高熔点氧化物骨架+低熔点填充相”的复合结构,其中高熔点相构成骨架,如 (Zr_xHf_{1-x})₆ (Nb₇Ta₁₋₇)₂O₁₇、(Hf_xZr_{1-x}) SiO₄,低熔点相填充间隙并自愈合,如 Ti (Nb_x-Ta_{1-x})₂O₇、SiO₂,能够有效阻挡氧气扩散和等离子体冲刷。

3.3 基于高能激光的烧蚀试验评估

Bin Hoque 等^[46]研究了高熵二硼化物 (Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ti_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}) B₂ (HEB) 的热性能和抗烧蚀性能,其热导率以电子传导为主,室温热导率为 27.8±2.9 W·m⁻¹·K⁻¹。激光烧蚀阈值测量发现,(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ti_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}) B₂ 和 ZrB₂ 烧蚀阈值分别为 0.018±0.005 J/cm² 和 0.023±0.009 J/cm²,二者烧蚀抗性近乎相同。不同激光通量下,材料微观结构和成分变化会影响烧蚀抗性,为高熵陶瓷在极端环境中的应用研究开拓了新方向。Jia 等^[47]研究发现,高能连续激光器所展示的优异烧蚀性能可为探索复合材料耐激光烧蚀性能提供试验支撑。

Wen 等^[48]探究了高熵碳化物在远超传统材料极限温度下的氧化行为与机理。设计并合成了 (Hf, Ta, Zr, W) C 四元高熵碳化物块体材料,自主搭建了激光加热氧化测试平台,模拟了 3 600 °C 的超高温氧化环境,其热流密度为 30 MW/m²。系统测试了材料的氧化速率,并通过第一性原理计算、扫描/透射电镜等多尺度表征,深入分析了氧化层的形成过程与微观结构。首次将高熵碳化物的抗氧化性能验证推至 3 600 °C 的极端温度,且

在此温度下,氧化速率可低至 2.7 μm/s,创造了已知超高温陶瓷抗氧化性能的新纪录,如图 3 所示。提出了通过调控组元氧吸附倾向性差异来设计自稳定氧化层的新思路,为下一代超高温抗氧化材料的设计提供了全新理论指导。

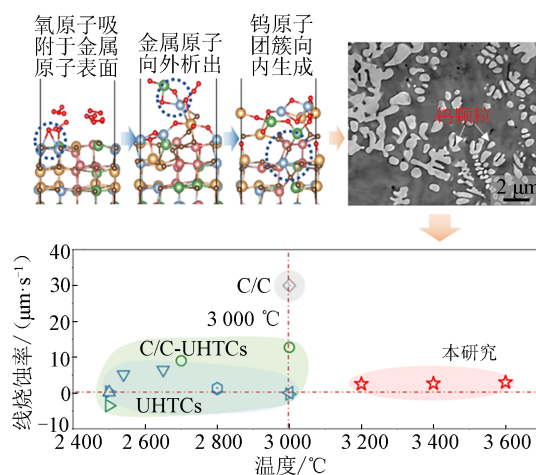


图 3 (Hf, Ta, Zr, W) C 高熵碳化物氧化产物结构表征和 3 600 °C 抗氧化性能^[48]

Fig. 3 Structural characterization of oxidation products of (Hf, Ta, Zr, W) C high-entropy carbides and their oxidation resistance performance at 3 600 °C^[48]

4 耐烧蚀高熵材料的优化设计

“高熵”理念有利于指导涂层材料的性能研制,为开发新型耐烧蚀涂层提供了新的视角和方法^[49]。廖怡君等^[50]通过试验发现,碳化物类高熵陶瓷的熵值最高,容易形成单项固溶体,成为新型高熵耐烧蚀陶瓷的典范。但业内专家学者仍期望从材料基因的角度,系统探索高熵材料体系。

4.1 基于人工智能的优化

近年来,随着深度学习方法发展成熟,研究人员发现其同样适用于材料设计,并发展了材料基因工程方法,实现了传统方法难以实现的反向材料设计,其中以人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 表现最为突出^[51],通过对海量材料数据进行训练,已能够有效预测高熵合金的相形成规律与稳定性。

此外,橡树岭国家实验室开发了基于深度学习的软件包,将深度学习应用于原子级的显微数据,可作为观察原子结构的重要工具,为理解原子构效关系提供了新途径^[52]。威斯康星大学麦迪逊分校将关键数据进行训练而获得新型材料^[53]。罗切斯特大学利用机器学习模型进行分析,对不同材料的晶体系统和空间群进行分析,从而获得

适合不同工艺的材料体系^[54], 促使人工智能与材料体系优选深度结合, 建立起工艺-结构适配的材料筛选模型。AFLOW 等高通量计算平台整合了从电子结构到宏观性能的多维度特征, 构建了量化的结构-性能映射关系, 仅依据晶体结构输入即可实现性能的快速推断。从金属/绝缘体分类、带隙能量、体积/剪切模量、德拜温度和热容等方面, 与定量材料结构-性质关系模型相结合, 以实现材料核心特性的精准预测, 该方法的普适性归因于其采用了可表征材料属性的特征片段作为描述符, 仅需最小化结构输入, 即可提炼初具有实际指导意义的材料启发式设计规则^[55-56]。2016 年, Raccuglia 等^[57]深入分析了众多实验数据, 成功预测了化学反应并促进了新化合物的生成, 这激发了机器学习在材料科学领域应用的广泛研究。Divilov 等^[58]引入无序熵-熵描述符 DEED, 捕捉了熵增益和熵成本之间的平衡, 并正确分类多组分陶瓷的功能可合成性, 通过卷积算法平衡构型熵与生成熵, 显示出强大的相预测与可合成性判断能力, 开创了卷积算法指导新单相高熵碳氮化物和硼化物的先例。近年来, 机器学习已被应用于各领域, 以实验和生产数据为基础的机器学习辅助材料设计得到广泛应用^[59]。通过对成分空间的智能搜索与生成, 为耐烧蚀高熵涂层的材料创新提供了前所未有的可能性。探索面对复杂的高维成分空间, 在人工智能背景下, 采用高通量实验与高性能计算, 如相图计算、第一性原理计算、相场模拟等相结合的数据驱动设计, 可提高新材料的研发质量, 缩短性能优化周期^[60-63]。

材料的人工智能优选范式核心在于利用机器学习技术从海量数据中挖掘成分、结构、工艺之间的隐藏规律, 从而实现目标导向的逆向设计。近年来, 深度学习方法在材料科学中的广泛应用显著推动了高熵材料的设计范式。人工智能优选方法通过融合高通量计算、实验数据库和多尺度建模, 正在构建一个集成设计、预测与优化的智能研发体系, 极大加速了新型高熵材料的发现与应用进程。

4.2 基于机器学习的性能预测

在机器学习方面, Schmidt 等^[64]融合了岭回归、随机森林、极随机树以及神经网络等算法, 构建了不包含稀有气体和镧系元素的约 25 000 m^3 的密度泛函模型。Shen 等^[65]运用多种模型进行高熵材料性能预测, 发现 XGB 模型在高熵合金相结构和硬度预测中表现最优, 运用 SHAP 框架提升

了模型可解释性, 实验验证了模型的准确性, 为高熵合金的高效设计提供了支撑。刘娟等^[66]通过训练评估选取梯度提升决策树模型, 合成了 $(Ti_{0.2}V_{0.2}Zr_{0.2}Nb_{0.2}Hf_{0.2})$ N 高熵氮化物陶瓷。Li 等^[67]在高熵合金样本中提取了 δ_r 、 Δ_x 、 VEC 、 ΔH 、 ΔS 、 T_m 、 V_m 、 K 等 8 个特征参数, 并对合金单相和非单相结构进行了预测。Nassar 等^[68]针对高熵合金样本, 提炼经验参数 δ_r 、 Δ_x 、 VEC 、 ΔH 、 ΔS 和成分, 并构建了神经网络模型。Wang 等^[69]通过开发深度学习密度泛函理论哈密顿量的通用材料模型, 对材料复杂的结构-属性关系进行计算建模, 实现高精度预测。Luo 等^[70]提出基于遗传算法 (genetic algorithm, GA) 的优化框架, 生成 HEAs 的数值描述符, 通过分类与回归模型实现性能提升, 在 HEA 相分类中, 分类准确率从 77% 提升至 97%。通过智能优化算法生成高熵合金的新型元素数值描述符, 能够显著提升机器学习模型在相分类与性能预测中的准确率。

机器学习在高熵材料性能预测领域展现出强大的能力, 通过建立成分、结构与性能之间的复杂非线性映射关系, 可显著提升材料设计的精度与效率。研究者们发展了多种机器学习方法, 并运用于关键性能的预测, 不仅能够实现高精度的性能预测, 还能通过特征选择和算法优化深化对材料构效关系的理解, 为高性能高熵材料的智能化设计提供坚实支撑。

4.3 基于高性能计算的分析

针对航空发动机热端部件的防护需求, 基于密度泛函理论 (density functional theory, DFT), 使用 Vienna Ab Initio Simulation Package (VASP) 进行计算, 是揭示微观机理的重要途径。Luo 等^[71]提出了高熵稀土双硅酸盐 $(nRE_x)_2Si_2O_7$ 环境障涂层, 并通过实验和理论计算研究了 β 相多稀土主成分二硅酸盐的成相能力和组成设计, 为环境障涂层材料的开发提供了关键理论与实践支撑。Mortazavi 等^[72]借助 DFT 第一性原理计算, 探究了类石墨烯 BCN 纳米层的不同原子构型, 显示出半金属狄拉克锥或半导体电子性质。Wang 等^[73]将第一性原理计算和机器学习相结合, 预测了双电子传输通道的最佳微观模型。结果表明, 异质结具有合适的吉布斯自由能 ($|\Delta G|$), 能够促进 CO_2 还原。Wen 等^[74]采用 (M_xN_{1-x}) B_2 类别的固溶体陶瓷, 结合第一性原理进行计算, 并通过高通量熔盐合成二硼化物粉体材料, 为机器智能分析提供数据来源。在此基础上, Tan 等^[75]采用投影增强波

(projector augmented wave, PAW) 方法和广义梯度近似 (generalized gradient approximation, GGA) 的 Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) 形式处理电子交换关联函数, 实现相稳定性调控, 提升涂层的抗烧蚀能力和热膨胀匹配性。

同时, 分子动力学也在高熵材料性能分析研究中发挥着重要作用。鲁楠等^[76]对超高温高熵陶瓷材料的力学和热物理特性进行了预测, 阐释了极端条件下的氧化腐蚀机制。熊浩智等^[77]研究了镍钴铬多主元合金在高温高压条件下的相图与相变动力学, 通过分析能量-体积空间和体积-结晶度空间中的采样点分布, 验证了采样方法的有效性, 并进行多温-多压-多伞系综模拟, 获得了不同温度和压力条件下的相图与相变过程, 如图 4 所示。

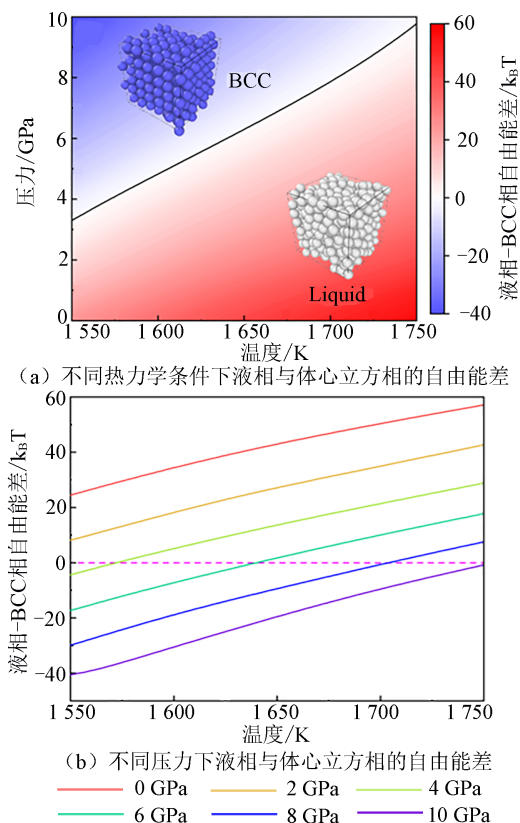


图 4 等原子比镍钴铬高温、高压相图的多温-多压-多伞模拟^[77]

Fig. 4 Multithermal-multibarc-multiumbrella simulations of the high-thermal and high-baric phase diagram of equiatomic NiCoCr^[77]

图 4 (a) 展示的相图中, 固液两相共存线用黑色实线表示。图 4 (b) 则展示了不同压力下, 固液自由能差随温度的变化趋势。可以看出, 在等温条件下, 随着压力的增加, BCC 相的稳定性

增强, 即压力促进固相向 BCC 相转变, 在等压条件下, 温度的升高不利于 BCC 相的形成, 即温度升高抑制 BCC 相的形成。

5 研究结论与展望

本研究围绕耐烧蚀高熵材料的发展以及涂层制备工艺与性能评估开展综述分析。研究发现, 耐烧蚀高熵材料对提升航天结构表面热防护能力具有优异的潜力, 在航天装备关键结构件表面领域应用前景广阔。现将未来研究方向和发展重点总结如下。

1) 基于基因工程的高熵材料体系构建。随着人工智能的深度发展、基因序列的生成与优化, 发展基于 Transformer、扩散模型等技术的生成式 AI, 可丰富高熵材料“基因库”, 为筛选高性能耐烧蚀高熵材料打牢基础。

2) 开展跨尺度高熵材料烧蚀机制研究。高熵材料在复杂环境中烧蚀的动态相变、氧化还原反应及热应力演化, 需结合原位表征技术与多尺度模拟, 整合微观原子尺度与介观/宏观性能数据, 建立多模态大模型, 以揭示复杂环境高熵材料元素扩散、熔融蒸发与氧化层动态生长的竞争机制。

3) 典型结构抗烧蚀涂层结构设计。针对长航时、高超音速等飞行中的热-力-化学耦合环境, 开展键结构表面烧蚀行为的精准调控与工程适配研究, 遴选以高熔点金属 W、Ta、Hf 为基体, 复合 Si、B、Y 等抗氧化/自愈合元素的高熵材料, 以设计抗更高能量的烧蚀涂层结构。

4) 极端环境下的烧蚀涂层结构的等效评估验证。针对航空航天装备等现实应用场景, 采用等离子、高能脉冲激光等平台, 通过跨学科合作与技术创新, 设计高一致性等效评估试验体系, 揭示高熵材料在瞬态高温下的氧化层动态生长、元素挥发与熔融蒸发机制, 解释复杂条件下高熵材料与涂层的烧蚀率、热响应稳定性及服役寿命, 支撑航天装备对材料与涂层的需求。

参考文献

- [1] ZHANG H, HE Y Z, PAN Y, et al. Synthesis and characterization of NiCoFeCrAl₃ high entropy alloy coating by laser cladding[J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101: 1408-1411.
- [2] AKRAMI S, EDALATI P, FUJI M, et al. High-entropy ceramics: review of principles, pro-

- duction and applications[J]. *Materials Science and Engineering: R-reports*, 2021, 146: 100644.
- [3] GOSSETT E, TOHER C, OSES C, et al. AFL-OW-ML: a RESTful API for machine-learning predictions of materials properties[J]. *Computational Materials Science*, 2018, 152: 134-145.
- [4] CHANG H Q, LU H, WANG H B, et al. Hardness-strength-toughness synergy of (NbMoTaW)C through TiC-TiO₂ dual-phase engineering[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2026, 255: 96-107.
- [5] LI C Y, GAO R N, OUYANG H B, et al. Hierarchical porous (Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2})C high-entropy ceramics prepared by a self-foaming method for thermal insulation[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2024, 13(7): 956-966.
- [6] YUAN X J, QIU H F, ZENG F Q, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed microplasma rapid additive manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 77: 63-74.
- [7] 汪刘应, 王汉功. 多功能微弧等离子喷涂技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-2.
- [8] 查柏林, 王汉功, 袁晓静. 超音速火焰喷涂技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 2-8.
- [9] WEN Z H, TANG Z Y, LIU Y W, et al. Ultrastrong and high thermal insulating porous high-entropy ceramics up to 2 000 °C [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(14): 2311870.
- [10] ZHOU Y J, ZHANG Y, WANG Y L, et al. Microstructure and compressive properties of multi-component Al_x (TiVCrMnFeCoNiCu)_{100-x} high-entropy alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 454: 260-265.
- [11] LUO W P, YUAN X J, ZHANG Z, et al. Effect of volumetric energy density on the mechanical properties and corrosion resistance of laser-additive-manufactured AlCoCrFeNi_{2.1} high-entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 178032.
- [12] ROST C M, SACHET E, BORMAN T, et al. Entropy-stabilized oxides[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8485.
- [13] REN J N, KUMKALE V Y, HOU H, et al. A review of high entropy materials with their unique applications[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(2): 195.
- [14] 余圣, 刘家言, 李龙丰, 等. MoNbVTa_x系难熔高熵合金的高温氧化行为与机理[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(2): 240-244.
- YU S, LIU J Y, LI L F, et al. High temperature oxidation behavior and mechanism of MoNb-VTa_x refractory high entropy alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44(2): 240-244.
- [15] 李天昕, 王书道, 卢一平, 等. 高熵合金材料研究进展与展望[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 170-181.
- LI T X, WANG S D, LU Y P, et al. Research progress and prospect of high-entropy alloy materials[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 170-181.
- [16] MISHRA S, MAITI S, RAI B. Computational property predictions of Ta-Nb-Hf-Zr high-entropy alloys[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 4815.
- [17] WEI W J, HONG Y, SHI X L, et al. Enhanced irradiation stability of MOSFET devices realized by improving nucleus density of Cr_xNbMoTaW generated by lattice shrinkage[J]. *Materials Today Physics*, 2025, 50: 101639.
- [18] SHITTU J, RIETEMA C J, JUHASZ M, et al. Microstructural, phase, and thermophysical stability of CrMoNbV refractory multi-principal element alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 977: 173349.
- [19] LI Z M, TASAN C C, SPRINGER H, et al. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 40704.
- [20] ZHOU Y D, SHI T, LI J, et al. Element-dependent evolution of chemical short-range ordering tendency of NiCoFeCrMn under irradiation[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 171: 103768.
- [21] PAVEL I, ELENA I, ALEKSANDR N, et al. Preparation of (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta)C high-entropy carbide ceramics through carbo-silicothermic reduction of oxides[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(14): 6934-6942.
- [22] ZHANG P X, YE L, CHEN F H, et al. Stability, mechanical, and thermodynamic behaviors of (TiZrHfTaM)C (M=Nb, Mo, W, V, Cr) high-entropy carbide ceramics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 903: 163868.
- [23] QI W, CHEN B, YANG X, et al. Phase stability, mechanical and thermodynamic properties of (Hf, Zr, Ta, M)B₂ (M=Nb, Ti, Cr, W) quaternary high-entropy diboride ceramics via first-principles calculations[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(20): 33255-33264.
- [24] KRETSCHMER A, MAYRHOFER P H. High-

- temperature oxidation resistance of sputtered (Al, Cr, Nb, Ta, Ti, Si)N coatings[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 176912.
- [25] 吕莎莎, 祖宇飞, 陈国清, 等. 陶瓷颗粒增强 $\text{Cr}_{0.5}\text{MoNbWTi}$ 难熔高熵合金复合材料的制备及其力学性能[J]. *无机材料学报*, 2021, 36(4): 386-392.
- LYU S S, ZU Y F, CHEN G Q, et al. Preparation and mechanical property of the ceramic-reinforced $\text{Cr}_{0.5}\text{MoNbWTi}$ refractory high-entropy alloy matrix composites[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2021, 36(4): 386-392.
- [26] FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E, TALMY I G, et al. Refractory diborides of zirconium and hafnium[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(5): 1347-1364.
- [27] 邵亚云. 真空热压烧结制备 CuCrFeMnNi 高熵合金的退火软化行为[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(7): 935-939.
- SHAO Y Y. Annealing softening behavior of CuCrFeMnNi high-entropy alloy via vacuum hot-pressing sintering[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44(7): 935-939.
- [28] GUO Q W, HOU H, WANG K L, et al. Coalescence of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ polycrystalline high-entropy alloy in hot-pressed sintering: a molecular dynamics and phase-field study[J]. *NPJ Computational Materials*, 2023, 9: 185.
- [29] SMITH S M, FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E. Pressureless sintering of high-entropy boride ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(12): 5168-5173.
- [30] 耿畅, 李玉, 李琳琳, 等. 无压两步烧结法制备超细晶 $(\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 高熵陶瓷[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(9): 2915-2924.
- GENG C, LI Y, LI L L, et al. Preparation of ultrafine-grained $(\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ high-entropy ceramics via pressureless two-step sintering[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 52(9): 2915-2924.
- [31] 郭凌翔, 唐颖, 黄世伟, 等. C/C 复合材料高熵氧化物涂层抗烧蚀性能[J]. *无机材料学报*, 2024, (1): 61-70.
- GUO L X, TANG Y, HUANG S W, et al. Ablation resistance of high-entropy oxide coatings on C/C composites[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, (1): 61-70.
- [32] MU G Y, LIU Y B, TIAN X C, et al. Study on the ablation resistance of $\text{ZrB}_2\text{-SiC-LaSi}_2$ coating prepared on the C/C composites[J]. *Corrosion Science*, 2024, 227: 111697.
- [33] ZHANG B, MU W D, CAI Y. A novel strategy to regulate the precipitation-strengthened high-entropy alloy fabricated by laser directed energy deposition[J]. *Materials Characterization*, 2024, 215: 114191.
- [34] LIU M, XU L, LI Z, et al. Microstructure and wear properties of $\text{WMoNbTaVAl}_2\text{O}_3$ high entropy alloy prepared by spark plasma sintering[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(5): 1236-1244.
- [35] HUANG Z J, CHEN J P, TIAN Y, et al. High-entropy boride-carbide based composite prepared by reactive spark plasma sintering[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(8): 5211-5215.
- [36] 靳亮, 王德, 王耀辉, 等. 热防护材料烧蚀性能测试方法研究[J]. *固体火箭技术*, 2018, 41(2): 245-250.
- JIN L, WANG D, WANG Y H, et al. Research on test method for ablation properties of ablative materials[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(2): 245-250.
- [37] 张睿, 祝文祥, 张澳, 等. 烧蚀型热防护系统概率设计与可靠性评估方法研究[J]. *计算力学学报*, 2024, 41(4): 762-768.
- ZHANG R, ZHU W X, ZHANG A, et al. Probabilistic design and reliability assessment methods for ablative thermal protection systems[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(4): 762-768.
- [38] 罗磊. C/SiC 及其改性复合材料在等离子风洞中的烧蚀行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018: 17-44.
- LUO L. Investigation on the ablation behaviors of C/SiC-based composites in plasma wind tunnel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018: 17-44.
- [39] 李江, 郭梦飞, 刘洋, 等. 固体发动机绝热材料烧蚀研究进展[J]. *宇航学报*, 2019, 40(10): 1146-1157.
- LI J, GUO M F, LIU Y, et al. Review on ablation research of insulation materials for solid rocket motors[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(10): 1146-1157.
- [40] 王金金, 查柏林, 张炜, 等. 多相流环境下绝热材料烧蚀试验方法研究[J]. *宇航学报*, 2019, 40(3): 362-368.
- WANG J J, ZHA B L, ZHANG W, et al. Experimental method research on ablation characteristics of thermal insulation material under multi-phase

- flow condition[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(3): 362-368.
- [41] 汪辰宇. 抗激光烧蚀磷酸盐复合涂层研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023: 5-53.
- WANG C Y. Research on phosphate composite coatings resistant to laser ablation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023: 5-53.
- [42] FELTRIN A C, AKHTAR F, HEDMAN D. Thermal properties and high-temperature ablation of high-entropy ($\text{Ti}_{0.25}\text{V}_{0.25}\text{Zr}_{0.25}\text{Hf}_{0.25}$) B_2 coating on graphite substrate[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2024, 13(8): 1268-1281.
- [43] GUO L X, HUANG S W, LI W, et al. Theoretical design and experimental verification of high-entropy carbide ablative resistant coating[J]. *Advanced Powder Materials*, 2024, 3(5): 100213.
- [44] DONG S M, NI D W, QIN Y Y, et al. Ablation behavior and mechanisms of $\text{Cf}/(\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2})\text{C-SiC}$ high-entropy ceramic matrix composites[J]. *Composites Part B*, 2022, 243: 110177.
- [45] DONG S M, NI D W, CAI F Y, et al. Ablation mechanism of $\text{Cf}/(\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2})\text{C-SiC}$ composite during plasma ablation above 2 000 °C [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 213: 109-117.
- [46] BIN HOQUE M S, MILICH M, AKHANDA M S, et al. Thermal and ablation properties of a high-entropy metal diboride: $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2})\text{B}_2$ [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(11): 4581-4587.
- [47] JIA X S, LUO J L, GUO C. High-energy continuous wave laser ablation of alumina ceramic[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 5389-5403.
- [48] WEN Z H, LIU Y W, YANG J, et al. Exceptional oxidation resistance of high-entropy carbides up to 3 600 °C [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(34): e2507254.
- [49] LV J, LI W, LI T, et al. Multicomponent $(\text{Hf-Zr-Ta})\text{B}_2$ coatings for carbon / carbon composites and structural optimization enabling superior ablation resistance[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 204(1): 115-126.
- [50] 廖怡君, 马艺, 冀连泽, 等. 高熵合金纳米颗粒研究进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2024, 54(7): 1211-1245.
- LIAO Y J, MA Y, JI L Z, et al. Research advances in high-entropy alloy nanoparticles[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2024, 54(7): 1211-1245.
- [51] RAO Z Y, TUNG P Y, XIE R W, et al. Machine learning enabled high-entropy alloy discovery [J]. *Science*, 2022, 378(6615): 78-85.
- [52] ZIATDIOV M, GHOSH A, WONG C Y T, et al. Atom AI framework for deep learning analysis of image and spectroscopy data in electron and scanning probe microscopy[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2022, 4: 1101-1112.
- [53] LI H, ZHENG H B, YUE T L, et al. Machine learning-accelerated discovery of heat-resistant polysulfates for electrostatic energy storage[J]. *Nature Energy*, 2025, 10: 90-100.
- [54] SUZUKI Y, HINO H, HAWAI T, et al. Symmetry prediction and knowledge discovery from X-ray diffraction patterns using an interpretable machine learning approach[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 21790.
- [55] FRIEDRICH R, CURTAROLO S. AFLOW-CCE for the thermodynamics of ionic materials[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2024, 160: 042501.
- [56] ISAYE O, OSES C, TOHER C, et al. Universal fragment descriptors for predicting properties of inorganic crystals[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15679.
- [57] RACCUGLIA P, ELBERT K C, ADLER P D F, et al. Machine-learning-assisted materials discovery using failed experiments[J]. *Nature*, 2016, 533(7601): 73-76.
- [58] DIVILOV S, ECKERT H, HICKS D, et al. Disordered enthalpy-entropy descriptor for high-entropy ceramics discovery[J]. *Nature*, 2024, 625(7993): 66-73.
- [59] 黄中庆, 彭爽, 孙德恩, 等. 机器学习辅助设计高强韧 $(\text{TiZrNbCrSi})\text{N}$ 高熵氮化物涂层[J]. *表面技术*, 2025, 54(1): 74-83.
- HUANG Z Q, PENG S, SUN D E, et al. Machine learning assisted design of high hard yet tough $(\text{TiZrNbCrSi})\text{N}$ high-entropy nitride coatings [J]. *Surface Technology*, 2025, 54(1): 74-83.
- [60] YANG S, GAO J, TRINI M, et al. Ni coarsening in Ni-yttria stabilized zirconia electrodes: three-dimensional quantitative phase-field simulations supported by exsitu ptychographic nanotomography[J]. *Acta Materialia*, 2023, 246: 118708.
- [61] MANDAL P, CHOUDHURY A, MALLICK A B, et al. Phase prediction in high entropy alloys by various machine learning modules using thermodynamic and configurational parameters[J]. *Metals and Materials International*, 2023, 29(1): 38-52.

- [62] GAO T, GAO J, ZHANG J, et al. Development of an accurate “composition-process-properties” dataset for SLMed Al-Si-(Mg) alloys and its application in alloy design[J]. *Journal of Materials Informatics*, 2023, 3(1): 6.
- [63] ZHANG Y J, ZHANG Z X, ZHANG X M, et al. Machine learning guided design and ablation behavior of ZrC-TaC-SiC ternary coatings[J]. *Corrosion Science*, 2025, 260: 113499.
- [64] SCHMIDT J, SHI J M, BORLIDO P, et al. Predicting the thermodynamic stability of solids combining density functional theory and machine learning[J]. *Chemistry of Materials*, 2018, 29: 5090-5103.
- [65] SHEN L, CHEN L, HUANG J, et al. Predicting phases and hardness of high entropy alloys based on machine learning[J]. *Intermetallics*, 2023, 162: 108030.
- [66] 刘娟, 田传进, 汪长安. 基于机器学习设计和制备高熵氮化物陶瓷[J]. *硅酸盐学报*. 2023, 51(12): 3095-3101.
- LIU J, TIAN C J, WANG C A. Design and preparation of high-entropy nitride ceramics via machine learning[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(12): 3095-3101.
- [67] LI S L, LIU R, YAN H W, et al. Machine learning phase prediction of light-weight high-entropy alloys containing aluminum, magnesium, and lithium[J]. *Metals*, 2024, 14: 268951684.
- [68] NASSAR A E, MULLIS A. Rapid screening of high-entropy alloys using neural networks and constituent elements[J]. *Computational Materials Science*, 2021, 199: 110755.
- [69] WANG Y X, LI Y, TANG Z C, et al. Universal materials model of deep-learning density functional theory Hamiltonian[J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(16): 2514-2521.
- [70] LUO Y X, SUN L C, WANG J M, et al. Elemental numerical descriptions to enhance classification and regression model performance for high-entropy alloys[J]. *NPJ Computational Materials*, 2025, 11: 75.
- [71] LUO Y X, SUN L C, WANG J M, et al. Phase formation capability and compositional design of β -phase multiple rare-earth principal component disilicates[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1275.
- [72] MORTAZAVI B, SHOJAEI F, YAGMURCU-KARDES M, et al. Anisotropic and outstanding mechanical, thermal conduction, optical, and piezoelectric responses in a novel semiconducting BCN monolayer confirmed by first-principles and machine learning[J]. *Carbon*, 2022, 200: 500-509.
- [73] WANG L J, YANG T Y, FENG B, et al. Constructing dual electron transfer channels to accelerate CO₂ photoreduction guided by machine learning and first-principles calculation[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2023, 54: 265-277.
- [74] WEN T, YE B L, LIU H H, et al. Formation criterion for binary metal diboride solid solutions established through combinatorial methods[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, 103: 3338-3348.
- [75] TAN Z Y, LIU Z Y, HU Y J, et al. Multiscale structural understanding of plasma spraying anti-ablation coating: an example of Ta-Hf-W-C ultra-high temperature ceramics[J]. *Corrosion Science*, 2024, 234: 112130.
- [76] 鲁楠, 何鹏飞, 种晓宇. 多尺度模拟计算方法在超高温高熵陶瓷材料中的应用进展[J]. *宇航材料工艺*, 2023, 53(1): 1-12.
- LU N, HE P F, CHONG X Y. Application progress of multi-scale simulation method in ultra-high-temperature high entropy ceramic materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2023, 53(1): 1-12.
- [77] 熊浩智, 王云江. 镍钴铬多主元合金高温高压相图与相变动力学模拟[J]. *物理学报*, 2025, 74 (8): 7-19.
- XIONG H Z, WANG Y J. Kinetic simulation of phase diagram and phase transitions in NiCoCr multi-principal element alloy at high temperature and high pressure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, 74 (8): 7-19.

Research Progress on the Preparation, Evaluation, and Optimal Design of Ablation-Resistant High-Entropy Coatings

LI Huidong, YUAN Xiaojing*, LIU Haoyu, JIANG Nan,
ZHANG Min, XU Dongsheng, LUO Weipeng
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The reliable service performance of hot-end components has long been a research focus in the aerospace field, as key components of aerospace equipment are subjected to rigorous tests under complex conditions involving high thermal and loads. Under extreme environments, such as high-thermal and high-speed gas flow erosion, and ablation caused by high-energy weapons, thermal protective coatings are required to maintain stable high-thermal service capabilities. In recent years, high-entropy materials, characterized by excellent mechanical properties, thermal and chemical stabilities, have attracted significant attention in the aerospace material field. Accordingly, the design, preparation, and evaluation progress of ablation-resistant high-entropy coatings were reviewed to address the need for ablation-resistant components of hypersonic vehicles in long-duration flights. The optimization strategies for multi-component high-entropy materials and advanced preparation processes for thermal protective coatings were analyzed, and the performance control mechanisms were explored, providing support for the preparation and performance enhancement of high-performance ablation-resistant high-entropy coatings.

KEYWORDS: high-entropy material; preparation method; ablation-resistant performance; optimal design

(编辑: 夏菁)