

# 无机非金属新材料的耐高温性能研究与改进

张韶栋

3622041990\*\*\*\*8439

**摘要:** 无机非金属新材料的耐高温性能研究与改进围绕评价体系、影响因素、改进技术、应用场景及发展趋势展开。明确耐高温性能的核心评价指标、高温环境下的性能测试方法、性能衰减规律的表征体系等评价体系,分析材料化学组成与耐高温特性的关联、微观结构对高温稳定性的影响、外界环境因素的干扰机制等影响因素,阐述成分优化与掺杂改性技术、微观结构调控与致密化工艺、表面涂层与复合增强技术等改进技术,探究在冶金与高温冶炼、能源转化与高温动力设备、航空航天与极端环境等领域的应用,展望高性能复合体系的设计与开发、耐高温机理的多尺度模拟与解析、智能化与功能集成的耐高温材料设计等趋势,为提升其耐高温性能提供思路。

**关键词:** 无机非金属新材料; 耐高温性能; 性能研究; 性能改进

**DOI:** 10. 69979/3029-2727. 25. 10. 026

## 引言

无机非金属材料作为一种新型建材,涉及许多种类,能够满足不同的工业需求。因为无机非金属材料具有晶体特性、高强度、光电效应等特性,所以其可以有效保存与发展自身的特殊性。无机非金属新材料在高温工业领域中不可或缺,其耐高温性能直接决定了设备的运行效率与使用寿命。随着工业技术的升级,极端高温环境对材料的耐受极限提出了更高要求。传统无机非金属材料在长期高温作用下,易出现强度下降、结构破损等问题,难以满足高端装备的需求。研究无机非金属新材料的耐高温性能及改进方法,对突破工业高温技术瓶颈、推动相关产业升级具有重要意义,是材料科学与工程领域的关键研究方向。

## 1 无机非金属新材料耐高温性能的评价体系

### 1.1 耐高温性能的核心评价指标

耐高温性能的核心评价指标是衡量材料高温耐受能力的关键参数,涵盖多个维度。熔点是基础指标,反映材料抵抗熔化的临界温度,但实际应用中更关注高温下的力学性能,如高温抗压强度、抗折强度,这些指标体现材料在高温负载下的结构稳定性。抗氧化性是另一重要指标,评估材料在高温氧化环境中抵抗氧化腐蚀的能力,通常以氧化增重速率或氧化层厚度变化来体现。此外,热震稳定性反映材料在温度急剧变化时抵抗开裂的能力,而高温蠕变性能则表示材料在长期高温应力下的变形趋势。

### 1.2 高温环境下的性能测试方法

高温环境下的性能测试方法需模拟实际工况以确保数据的可靠性。静态高温测试通过将材料置于马弗炉等设备中,在恒定高温下保温一定时间,随后测定其力学性能变化,如高温抗折强度测试需在特定温度下实时加载。动态测试则针对温度波动场景,如热震测试采用水淬或空气冷却的方式,反复交替改变材料温度,记录其出现裂纹或断裂时的循环次数。抗氧化性能测试通常将材料置于高温氧化气氛中,定期称量其质量变化或分析氧化层成分。

### 1.3 性能衰减规律的表征体系

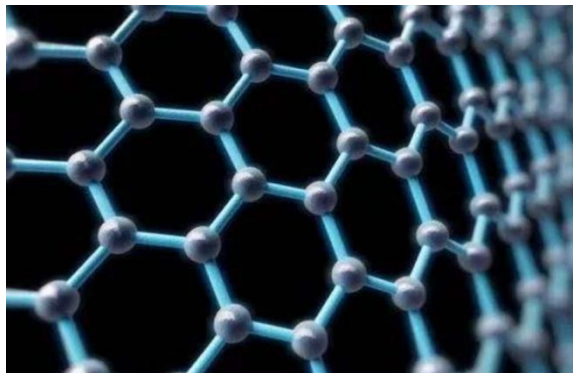
性能衰减规律的表征体系用于追踪材料在高温作用下的性能退化过程。时间维度上,通过在不同高温保温时长后检测材料性能,建立性能随时间变化的曲线,分析衰减速率与温度的关联,如高温蠕变试验中记录应变随时间的增长规律。微观结构表征是核心手段,利用扫描电镜观察材料在高温后的晶粒长大、孔隙变化或裂纹萌生情况,通过 X 射线衍射分析物相转变,判断是否生成低熔点相或脆性相。化学组成分析则检测元素扩散或氧化产物的分布,揭示性能衰减的化学机理。

## 2 影响无机非金属新材料耐高温性能的关键因素

### 2.1 材料化学组成与耐高温特性的关联

材料化学组成是决定其耐高温特性的内在因素,不同元素的结合方式直接影响材料的高温稳定性。共价键为主的材料(如碳化硅、氮化硅)通常具有较高的键能,不易在高温下断裂,因此熔点高且高温强度保持性好。

氧化物材料（如氧化铝、氧化锆）的耐高温性能与其晶格结构相关，稳定的立方结构或四方结构能在高温下保持稳定，而易形成玻璃相的成分（如硅酸盐）则可能高温下软化，降低材料整体性能。此外，杂质元素的存在可能引入低熔点共晶相，导致材料在高温下出现液相，破坏结构完整性，因此高纯度原料的选择对提升耐高温性能至关重要。



## 2.2 微观结构对高温稳定性的影响

微观结构通过影响材料内部的应力分布与扩散行为，作用于高温稳定性。晶粒尺寸是重要参数，细晶结构因晶界数量多，可阻碍位错运动，提升高温强度，但晶界在过高温度下可能成为扩散通道，加速原子迁移导致材料软化；粗晶结构则在长期高温下更易保持稳定，但室温脆性可能增加。孔隙率与分布同样关键，封闭孔隙可减少高温介质的渗透，而连通孔隙则可能成为氧化气体或熔融物的扩散路径，降低材料的抗氧化性与力学性能。

## 2.3 外界环境因素的干扰机制

外界环境因素通过物理或化学作用干扰材料的耐高温性能。高温气氛的成分影响显著，氧化性气氛中材料易形成氧化层，若氧化层致密可阻止进一步氧化，反之则加速腐蚀；还原性气氛可能导致材料中的氧化物分解，破坏结构。温度梯度产生的热应力是另一重要因素，材料不同部位的温度差异会引发不均匀膨胀或收缩，长期作用下产生裂纹，尤其在反复加热冷却的工况中更为明显。此外，高温介质的冲刷或侵蚀（如熔融金属、炉渣）会通过机械磨损与化学反应共同作用，加剧材料的损耗，如在冶金炉衬中，熔融 slag 可能与材料发生反应生成低熔点化合物，导致衬体剥落。这些环境因素的协同作用，会加速材料性能的退化。

# 3 无机非金属新材料耐高温性能的改进技术

## 3.1 成分优化与掺杂改性技术

成分优化与掺杂改性技术通过调整材料的化学组成提升耐高温性能。成分优化聚焦于主成分的配比，如通过提高氧化铝在陶瓷中的含量，增强材料的高温结构稳定性；调整碳化硅与氮化硅的比例，平衡材料的抗氧化性与力学性能。掺杂改性则引入少量异质元素或化合物，形成固溶体或第二相，如在氧化锆中掺杂氧化钇，稳定其高温四方相结构，抑制相变开裂；在碳化硅中掺杂硼、碳等元素，促进晶粒间的结合，提升高温强度。此外，通过引入稀土元素，可细化晶粒、净化晶界，减少低熔点相的生成，延缓材料在高温下的软化与氧化，从而拓展其耐高温极限。

## 3.2 微观结构调控与致密化工艺

微观结构调控与致密化工艺通过优化材料的内部结构提升高温性能。热压烧结工艺在高温高压下促进颗粒扩散与烧结，减少孔隙率，形成致密结构，显著提升材料的高温强度与抗渗性；反应烧结法则通过原料间的化学反应生成新相，同时实现材料的致密化，适用于制备复杂形状的耐高温构件。晶粒尺寸调控可通过控制烧结温度与时间实现，如采用低温快速烧结获得细晶结构，提升材料的高温抗蠕变能力；或通过添加晶粒生长抑制剂，抑制高温下的晶粒异常长大，保持结构稳定性。

## 3.3 表面涂层与复合增强技术

表面涂层与复合增强技术通过构建防护层或多相结构提升材料的耐高温性能。表面涂层形成物理屏障，如在碳化硅材料表面制备硅化物涂层，增强其在高温氧化环境中的抗氧化能力；在陶瓷表面涂覆金属陶瓷涂层，结合陶瓷的耐高温性与金属的延展性，提升材料的抗热震性能。复合增强技术则通过不同材料的协同作用优化性能，如纤维增强陶瓷基复合材料，利用纤维的桥联与拔出效应吸收能量，显著提升材料的高温韧性与抗裂纹扩展能力；颗粒增强复合材料通过引入高硬度、高熔点的颗粒（如碳化钨颗粒），提高材料的高温耐磨性与强度。这些技术可在不改变基体材料主要性能的前提下，针对性提升其耐高温薄弱环节。

# 4 耐高温无机非金属新材料的应用场景

## 4.1 冶金与高温冶炼领域的应用

冶金与高温冶炼领域是耐高温无机非金属新材料的重要应用场景，主要用于高温炉体与内衬。在钢铁冶炼中，氧化锆增韧氧化铝材料因其良好的抗渣侵蚀性与高温稳定性，被用作连铸结晶器的内衬，延长设备使用寿命；碳化硅质材料则因其高热导性与抗氧化性，用于

高炉热风炉的蓄热体,提升热交换效率。有色金属冶炼中,氮化硅结合碳化硅材料可耐受熔融铝、铜的侵蚀,适用于电解槽的侧壁与底部衬体,减少金属渗透导致的设备损坏。

## 4.2 能源转化与高温动力设备中的应用

能源转化与高温动力设备中,耐高温无机非金属新材料用于提升能量转换效率与设备可靠性。在太阳能发电领域,碳化硅陶瓷因其耐高温与高热稳定性,被用作吸热器的核心部件,直接吸收聚焦的太阳光并将其转化为热能,驱动发电机组运行;熔融盐储热系统中,高纯度氧化铝材料作为储热罐的内衬,耐受高温熔融盐的腐蚀与冲刷。燃气轮机与内燃机中,陶瓷基复合材料(如碳化硅纤维增强碳化硅)用于叶片与燃烧室,可承受更高的工作温度,减少冷却系统能耗,提升燃油效率。

## 4.3 航空航天与极端环境中的应用

航空航天与极端环境对耐高温材料的性能要求最为严苛,无机非金属新材料在此领域发挥关键作用。火箭发动机的喷管与燃烧室需要耐受数千度的高温燃气冲刷,碳化硅/碳化硅复合材料因其优异的高温强度与抗热震性,成为理想的结构材料,减轻发动机重量的同时提升推力。航天器的热防护系统采用陶瓷隔热瓦,如氧化锆纤维增强陶瓷,通过多孔结构与低热导率,阻隔大气层再入时产生的高温,保护舱体结构。

# 5 无机非金属新材料耐高温性能研究的发展趋势

## 5.1 高性能复合体系的设计与开发

高性能复合体系的设计与开发是提升材料耐高温性能的主要趋势,通过多相协同实现性能突破。未来将更注重梯度复合材料的研发,如从表层到芯部设计成分与结构的渐变,使材料表层具有优异的抗氧化与耐磨性能,芯部保持良好的力学强度与韧性,适应复杂高温环境的多重需求。多功能复合体系也是重点方向,如将耐高温与导电、导热等功能结合,开发可用于高温传感的陶瓷复合材料;或引入自修复机制,通过材料内部的化学反应在高温下修复微裂纹,延长材料服役寿命。

## 5.2 耐高温机理的多尺度模拟与解析

耐高温机理的多尺度模拟与解析将深化对材料高温行为的理解,为性能改进提供理论支撑。原子尺度模拟通过第一性原理计算,分析高温下原子扩散、键合断裂的微观过程,揭示材料熔化与氧化的本质机理;介观

尺度模拟则关注晶粒长大、孔隙演变等结构变化,建立微观结构与宏观性能的关联模型;宏观尺度模拟结合传热学与力学理论,预测材料在实际工况中的温度分布与应力状态,评估其长期服役可靠性。

## 5.3 智能化与功能集成的耐高温材料设计

智能化与功能集成的耐高温材料设计将赋予材料主动响应与适配环境的能力。智能耐高温材料可通过引入敏感相,在温度变化时产生可逆的性能调整,如热致变色涂层可实时指示材料表面温度,便于监测高温设备的运行状态;形状记忆陶瓷在高温下可自行恢复因热应力产生的变形,提升结构稳定性。功能集成设计则将耐高温性能与其他功能(如高温过滤、催化反应)结合,如在高温烟气处理中,采用多孔陶瓷过滤材料,既能耐受高温烟气腐蚀,又能吸附有害污染物,实现“耐高温+净化”的一体化功能,简化工业设备结构,提升综合效益。

## 6 结论

无机非金属新材料的耐高温性能研究与改进,通过构建科学的评价体系,明确了性能指标与测试方法;从化学组成、微观结构及外界环境等方面解析了影响因素;并通过成分优化、结构调控、表面涂层等技术实现了性能提升。其在冶金、能源、航空航天等领域的应用,推动了相关产业的技术进步。未来,随着高性能复合体系、多尺度机理解析及智能化设计等方向的发展,无机非金属新材料的耐高温性能将进一步突破,为极端高温工业领域的创新提供更坚实的材料支撑。

## 参考文献

- [1] 王晓琴,张世明,周群,等. 碳化硅砂对混凝土力学性能及耐高温性能的影响[J]. 混凝土,2025,(02):84-89.
- [2] 冀光,张杏芝,赵奕安. 聚乙烯/聚丙烯纤维混凝土耐高温性能测试研究[J]. 粘接,2023,50(09):1-3.
- [3] 曹淑凤,于灏君,张津溥. 无机非金属材料领域高质量期刊分级与学科热点分析——基于中国期刊发展现状的思考[J]. 科技传播,2025,17(11):59-63.
- [4] 李蕾蕾,王璟,张安杰,等. 无机非金属材料物理性能课程教学改革浅析[J]. 化工设计通讯,2025,51(06):83-85.
- [5] 王发洲,麦立强. 无机非金属材料创新助力“双碳”目标[J]. 硅酸盐学报,2023,51(09):2126-2127.