

烧结助剂对无压烧结碳化硅陶瓷微观结构与力学性能的影响

段春雷

宁夏机械研究院股份有限公司 宁夏 银川 750011

摘要: 烧结助剂在无压烧结碳化硅陶瓷制备中作用关键。本文先介绍氧化物、非氧化物及复合烧结助剂类型与作用机制, 阐述其作用路径。接着分析烧结助剂对陶瓷微观结构, 如晶粒形貌、致密度等方面的影响。随后探讨对力学性能, 包括硬度、断裂韧性等的作用。最后指出烧结助剂添加方式、配伍比例及与无压烧结工艺参数协同影响是调控陶瓷性能的关键因素。

关键词: 烧结助剂; 无压烧结; 碳化硅陶瓷; 微观结构; 力学性能

引言: 无压烧结碳化硅陶瓷凭借高硬度、高强度、耐高温等优异性能, 在航空航天、机械制造等领域应用前景广阔。然而, 碳化硅自身烧结困难, 需借助烧结助剂降低烧结温度、促进致密化。不同类型烧结助剂作用机制各异, 对陶瓷微观结构与力学性能影响复杂。深入探究烧结助剂的作用, 明确其调控陶瓷性能的关键因素, 对优化无压烧结碳化硅陶瓷制备工艺、提升材料性能具有重要意义。

1 无压烧结碳化硅陶瓷用烧结助剂的类型与作用机制

1.1 氧化物类烧结助剂

氧化物类烧结助剂在无压烧结碳化硅陶瓷制备中占据重要地位。常见如氧化铝、氧化钇等金属氧化物, 这类物质在高温环境下能与碳化硅表面自然形成的氧化硅层发生化学反应, 生成低熔点液相。该液相具备良好流动性, 在烧结过程中可充分填充碳化硅颗粒间隙, 促进颗粒重排与紧密堆积, 进而降低烧结温度。同时, 液相在晶界处分布, 可降低晶界活化能, 加速物质传输过程, 使晶粒生长更为均匀, 减少内部缺陷, 提升材料致密度^[1]。氧化铝作为典型代表, 其与氧化硅反应生成的铝硅酸盐液相, 能有效改善碳化硅颗粒间结合状态, 增强界面结合强度, 为陶瓷材料力学性能提升奠定基础。氧化钇则凭借自身高熔点特性, 在高温烧结时稳定存在, 通过调控液相黏度, 精确控制晶粒生长速率, 避免晶粒异常长大, 保障材料微观结构均匀性。

1.2 非氧化物类烧结助剂

非氧化物类烧结助剂为无压烧结碳化硅陶瓷性能优化提供新途径。氮化物如氮化镁、氮化铝等, 在烧结过程中可与碳化硅表面杂质发生反应, 净化颗粒表面, 提升表面能, 增强烧结驱动力。氮化镁分解产生的镁元素, 还

能与碳化硅中微量杂质元素结合, 形成稳定化合物, 减少杂质对烧结过程干扰。硼化物如碳化硼, 具有独特电子结构, 在烧结时可降低碳化硅晶界能, 促进晶界迁移, 加速致密化进程。此外, 碳化硼还能与碳化硅形成固溶体, 改变晶格常数, 产生晶格畸变, 增加位错运动阻力, 进而提升材料硬度与强度。

1.3 复合烧结助剂

复合烧结助剂结合多种组分优势, 实现烧结性能协同优化。将氧化物与非氧化物按特定比例复合, 可综合二者特性, 发挥更大作用。例如, 氧化铝与氮化铝复合, 氧化铝提供液相促进颗粒重排, 氮化铝净化表面并调控晶界行为, 二者协同作用, 在降低烧结温度同时, 优化晶粒尺寸与分布, 提升材料综合性能。不同组分间相互作用, 还可形成新相, 进一步改善材料微观结构, 增强界面结合, 为无压烧结碳化硅陶瓷性能突破提供可能。

1.4 各类烧结助剂的作用路径

不同类型烧结助剂作用路径各有特点。氧化物类主要通过液相形成与晶界调控发挥作用, 从颗粒表面反应开始, 逐步影响颗粒间结合与晶粒生长。非氧化物类侧重于表面净化与晶界能改变, 直接作用于颗粒表面与晶界, 影响物质传输与晶界迁移。复合烧结助剂则融合多种路径, 通过多组分间复杂相互作用, 实现微观结构多维度调控, 从颗粒重排、晶界行为到新相形成, 全方位优化烧结过程, 提升材料性能。

2 烧结助剂对无压烧结碳化硅陶瓷微观结构的影响

2.1 对碳化硅晶粒形貌的作用

烧结助剂在无压烧结过程中对碳化硅晶粒形貌塑造起着关键作用。不同种类烧结助剂会引发各异晶粒生长模式^[2]。部分金属氧化物类烧结助剂, 在高温下与碳化硅

表面物质反应生成液相,液相包裹晶粒表面,降低晶粒生长各向异性,促使晶粒趋于等轴状生长。这种等轴晶粒结构能均匀分散应力,减少因晶粒取向差异导致的局部应力集中,提升材料整体稳定性。而一些非氧化物类烧结助剂,如特定氮化物,会选择性地吸附在晶粒特定晶面,抑制该晶面生长速度,导致晶粒沿特定方向伸长,形成柱状或板状晶粒。这种特殊形貌晶粒在材料中相互交织,可增强晶粒间机械咬合作用,提高材料抗剪切能力,赋予陶瓷独特力学性能。

2.2 对陶瓷致密度的作用

烧结助剂对陶瓷致密度提升具有显著影响。在无压烧结时,烧结助剂形成液相填充碳化硅颗粒间隙,为颗粒重排提供润滑介质,加速颗粒移动与紧密堆积,有效减少孔隙数量与尺寸。随着孔隙的减少,陶瓷材料的内部结构变得更加紧密,从而提高了致密度。随着烧结进程推进,液相进一步促进物质传输,使颗粒间结合更紧密,孔隙逐渐缩小直至消失,大幅提升陶瓷致密度。某些复合烧结助剂通过多组分协同作用,在不同温度阶段发挥不同功能,前期促进颗粒重排,后期调控晶界迁移,全方位优化致密化过程,使陶瓷达到更高致密状态,为高性能陶瓷制备奠定基础。

2.3 对晶界结构的作用

烧结助剂深刻改变晶界结构。液相形成后,在晶界处富集,降低晶界能,促进晶界迁移与物质扩散。晶界能的降低使得晶界处的原子具有更高的活动性,有利于物质的扩散和晶界的迁移。不同烧结助剂在晶界处形成不同组成与结构晶界相,影响晶界结合强度与稳定性。一些烧结助剂形成连续晶界相,增强晶界间连接,提高材料整体强度;而另一些则形成孤立晶界相,在晶界处形成应力缓冲区域,减少裂纹沿晶界扩展倾向,提升材料断裂韧性。烧结助剂还可通过调控晶界相成分与分布,优化晶界电学、热学性能,满足不同应用场景需求。

2.4 对微观缺陷形成的作用

烧结助剂对微观缺陷形成与演化具有复杂影响。合理选择烧结助剂可抑制微观缺陷产生。液相填充颗粒间隙,减少孔隙形成,降低因孔隙导致应力集中引发裂纹风险。孔隙的减少能够有效降低材料内部的应力集中程度,从而减少裂纹的产生^[3]。部分烧结助剂还能与碳化硅中杂质元素反应,形成稳定化合物,减少杂质诱发缺陷。然而,若烧结助剂选择不当或添加量不合适,可能引入新缺陷。过量烧结助剂残留可能形成脆性第二相,在受力时成为裂纹源;不均匀分布烧结助剂导致局部应力差异,促使微观缺陷萌生与扩展。因此,精准调控烧结助

剂种类与用量对控制微观缺陷至关重要。

3 烧结助剂对无压烧结碳化硅陶瓷力学性能的影响

3.1 对硬度的作用

烧结助剂对无压烧结碳化硅陶瓷硬度有着显著影响。氧化物类烧结助剂如氧化铝,在烧结过程中与碳化硅表面氧化层反应生成液相。此液相填充颗粒间隙,促进颗粒紧密排列,减少内部孔隙。随着孔隙率降低,材料内部结构更为致密,在外力作用下,抵抗变形能力增强,硬度得以提升。非氧化物类烧结助剂如氮化硼,能净化碳化硅颗粒表面,去除吸附杂质,提升表面能。表面能增加促使颗粒间结合更紧密,晶界结合强度提高,进而阻碍位错运动,使材料在受力时更难发生塑性变形,硬度随之增大。复合烧结助剂结合多种成分优势,综合调控微观结构,从多个层面优化颗粒排列与晶界状态,为硬度提升创造更有利条件。

3.2 对断裂韧性的作用

烧结助剂对断裂韧性改善作用明显。部分烧结助剂在烧结后形成特定晶界相,这些晶界相可改变裂纹扩展路径。当裂纹遇到晶界相时,会发生偏转、分叉,消耗更多能量,阻止裂纹快速扩展,从而提高断裂韧性。裂纹扩展路径的改变使得裂纹在传播过程中需要克服更多的阻力,从而提高了材料的断裂韧性。例如某些含稀土元素的烧结助剂,能在晶界处形成高韧性相,有效缓冲裂纹尖端应力集中。此外,烧结助剂调控晶粒尺寸,细小均匀晶粒可增加裂纹扩展阻力,使裂纹需绕过更多晶粒,延长扩展路径,提升材料断裂韧性。

3.3 对抗弯强度的作用

烧结助剂对抗弯强度的提升作用显著。合适的烧结助剂能够降低烧结温度,减少高温对碳化硅晶粒的损伤,保持晶粒的完整性。完整的晶粒在受力时能够更好地传递应力,避免应力集中导致的破坏。完整的晶粒在受力时能够更好地承担应力,避免因晶粒破损导致的应力集中。同时,烧结助剂促进颗粒间的充分结合,增强界面结合强度。在受到弯曲载荷时,良好的界面结合能有效传递应力,防止局部区域因应力过大而发生破坏,从而提高陶瓷的抗弯能力。

3.4 对耐磨性的作用

烧结助剂从多个方面影响陶瓷的耐磨性。一方面,硬度的提升使得陶瓷表面更难被磨粒划伤,减少了磨损过程中材料的损失。硬度的提高使得陶瓷在摩擦过程中能够更好地抵抗磨粒的切削作用,从而降低磨损率。另一方面,优化后的微观结构使材料内部应力分布更加均匀,降低了因应力集中产生微裂纹的几率^[4]。在磨损过程中,微

裂纹的减少意味着材料不易发生剥落,从而延长了陶瓷的使用寿命。此外,某些烧结助剂形成的高硬度晶界相,能够保护晶粒免受磨损,进一步提升陶瓷整体的耐磨性能。

4 烧结助剂调控无压烧结碳化硅陶瓷性能的关键因素

4.1 烧结助剂的添加方式

烧结助剂添加方式对无压烧结碳化硅陶瓷性能调控意义重大。机械混合添加时,借助球磨等设备将烧结助剂与碳化硅粉末充分混合。此方式操作简便,但混合均匀程度受球磨时间、转速等因素影响。若球磨时间不足,烧结助剂分布不均,局部区域烧结助剂浓度过高或过低,导致烧结过程中液相形成不均匀,影响颗粒重排与致密化进程,进而使陶瓷性能出现波动。化学共沉淀添加则利用化学反应使烧结助剂与碳化硅前驱体在溶液中共同沉淀。这种方式能实现原子级别混合,烧结助剂在碳化硅基体中分布极为均匀,可精准调控烧结过程中液相形成与分布,为陶瓷性能均匀性提升提供保障。溶胶-凝胶法添加通过溶胶向凝胶转变过程,将烧结助剂均匀包裹在碳化硅颗粒表面或嵌入其内部。该方法能形成高度均匀微观结构,在烧结时促进物质传输与晶界迁移,优化陶瓷微观组织,提升力学、热学等综合性能。

4.2 烧结助剂的配比

烧结助剂配比是影响陶瓷性能的关键因素。不同烧结助剂在烧结过程中发挥不同作用,合理配比可实现性能协同优化。当氧化物类烧结助剂与非氧化物类烧结助剂按特定比例复合时,氧化物类助剂形成液相促进颗粒重排,非氧化物类助剂净化表面、调控晶界。若氧化物类助剂比例过高,液相量过多,可能导致晶粒异常长大,降低材料强度;非氧化物类助剂比例过高,则可能无法形成足够液相,影响致密化进程。复合烧结助剂中各组分比例也需精确控制。各组分间相互作用复杂,比例失调会破坏协同效应,无法形成理想微观结构。通过大量实验与理论分析,确定最佳配比,可使烧结助剂充分发挥作用,提升陶瓷致密度、硬度、断裂韧性等性能。

4.3 无压烧结工艺参数的协同影响

无压烧结工艺参数与烧结助剂协同作用对陶瓷性能

调控至关重要。烧结温度影响烧结助剂活性与液相形成。温度过低,烧结助剂活性不足,无法形成足够液相,颗粒重排困难,致密化程度低;温度过高,液相黏度过低,晶粒生长过快,易出现异常长大,降低材料性能。升温速率同样关键,快速升温可能导致烧结助剂反应不充分,液相分布不均;缓慢升温则使烧结周期延长,增加生产成本^[5]。保温时间影响物质传输与晶界迁移程度。保温时间不足,物质传输不充分,晶界结合不牢固;保温时间过长,晶粒继续长大,可能产生过烧现象。烧结助剂与工艺参数相互配合,通过精确控制温度、升温速率与保温时间,优化烧结过程,实现陶瓷性能精准调控。

结束语

烧结助剂对无压烧结碳化硅陶瓷微观结构与力学性能影响显著。通过合理选择烧结助剂类型、优化添加方式与配比,并结合无压烧结工艺参数精准调控,可有效改善陶瓷微观结构,提升力学性能。这为高性能无压烧结碳化硅陶瓷的制备提供了理论依据与实践指导,有助于推动在更多领域的应用与发展,满足不同行业对高性能陶瓷材料的需求。

参考文献

- [1]王少锋,汪长安,孙加林,等.烧结助剂对高气孔率SiC陶瓷结构和性能的影响[J].中国有色金属学报,2011,21(2): 430-435.
- [2]李建保,张立明,王红洁.氧化物烧结助剂对无压烧结SiC陶瓷显微结构的影响[J].材料科学与工程学报,2008, 26(3):361-364.
- [3]张磊,王秀芳,李勇.碳化硼烧结助剂对无压烧结SiC陶瓷微观结构与力学性能的影响[J].陶瓷学报,2020,41(4): 521-526.
- [4]赵春霞,王丽,陈明.烧结助剂种类及添加方式对无压烧结SiC陶瓷性能的影响[J].硅酸盐学报,2016,44(8):1129-1134.
- [5]杨新领,郑奔,李志强,等.烧结温度对无压烧结碳化硅陶瓷微观结构及性能的影响[J].科技创新导报,2016(3): 54-56.