

多元添加助剂对烧结 AlN 陶瓷 显微结构与性能的影响*

齐于杰, 葛帅, 汪亮, 赵哲

广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

摘要: 采用 Al-Y₂O₃-Sm₂O₃ 三元烧结助剂, 对氮化铝 (AlN) 陶瓷进行了低温烧结实验。在掺 Al 含量不变的情况下, 重点研究了 Y₂O₃ 和 Sm₂O₃ 添加量对 AlN 陶瓷的微观结构和热力学性能的影响。实验表明, 添加三元烧结助剂的 AlN 陶瓷在 1 750 °C 可以烧结致密, 相比于未添加烧结助剂的常规 AlN 陶瓷, 达到烧结致密的温度降低了 150 °C, 且弯曲强度达到了 (474±25) MPa, 热导率为 181.12 W/(m·K)。同时, 研究了烧结助剂对 AlN 陶瓷晶界相的影响。结果表明, 少量的 Sm₂O₃ 有利细化 AlN 的晶粒并且净化晶格氧, 因此同时提高了 AlN 陶瓷的热力学性能。

关键词: 氮化铝; 多元烧结助剂; 热导率; 弯曲强度; 微观结构

中图分类号: TQ174.75 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2025)06-0095-07

Effects of multiple additives on the microstructure and properties of sintered AlN ceramics

QI Yujie, GE Shuai, WANG Liang, ZHAO Zhe

School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: The Al-Y₂O₃-Sm₂O₃ ternary sintering additive was used to conduct low-temperature sintering experiments on AlN ceramics. The effects of Y₂O₃ and Sm₂O₃ additive amounts on the microstructure, thermodynamic properties of AlN ceramics were studied, when the amount of aluminum is fixed. The experiments indicate that adding the ternary sintering additive allows AlN ceramics to achieve densification at 1 750 °C, which is reduced by 150 °C compared to AlN ceramics without sintering additives. Also the bending strength reaches (474±25) MPa, and the thermal conductivity is 181.12 W/(m·K). Additionally, this study also investigates the influence of the sintering additives on the metallography of AlN ceramics, with results showing that a small amount of Sm₂O₃ is beneficial for refining the grain size of AlN and purifying lattice oxygen, thereby simultaneously enhancing the thermodynamic properties of AlN ceramics.

Key words: AlN; multifunctional sintering additives; thermal conductivity; bending strength; microstructure

* 收稿日期: 2025-07-26

录用日期: 2025-08-25

网络首发日期: 2025-09-30

基金项目: 广东省珠江本土创新团队项目 (2017BT01C169);

佛山市科技创新团队项目 (FS0AA-KJ919-4402-002)

作者简介: 齐于杰 (1999 年生), 男; 研究方向: AlN 陶瓷成型与烧结; E-mail: 994164258@qq.com

通信作者: 赵哲 (1988 年生), 男; 研究方向: 难加工材料的增材制造; E-mail: zhezhaog@gdut.edu.cn

全文阅读



ZR202500141

氮化铝(AlN)陶瓷因其独特的物理和化学性能,如高热导率、低介电常数、优异的绝缘性能以及与硅的热膨胀系数匹配等,已经成为现代电子、航空航天和新能源领域不可或缺的高性能陶瓷材料(Li et al., 2016; Tummala et al., 1991; Huang et al., 2019)。然而,AlN陶瓷的高熔点(约2200 °C)和高键合能导致其烧结过程极为困难,通常需要在高温(>1900 °C)或高压(如热压烧结)的条件下才能实现致密化(Jiang et al., 2019; Han et al., 2015)。这种高温烧结工艺不仅能耗高,还容易引入杂质和缺陷,影响陶瓷的性能和抗热震性。因此,低温烧结(<1800 °C)以制备高性能AlN陶瓷,对于降低生产成本、提高材料性能和拓展应用领域具有重要意义。

烧结助剂的引入是实现AlN陶瓷低温烧结的关键策略之一。稀土氧化物因其独特的化学性质和与AlN基体的良好相容性,被认为是一类极具潜力的烧结助剂(盛鹏飞等, 2020)。其中,氧化钇(Y₂O₃)和氧化钐(Sm₂O₃)作为稀土氧化物的典型代表,已被广泛研究用于改善AlN陶瓷的烧结性能。Y₂O₃具有良好的热稳定性和化学惰性,能够有效降低AlN陶瓷的烧结温度,同时减少晶界杂质的积累,从而提高陶瓷的致密化程度。由于Sm₂O₃的Sm³⁺离子半径较大,在与AlN接触时能够调节晶界相的晶体化学环境。同时,其C型立方bixbyite结构赋予了较高的结构稳定性,在烧结过程中Sm₂O₃能够与AlN基体形成稳定的界面结构,这不仅有助于抑制晶界缺陷的形成,还能促进晶粒间的均匀结合,从而改善陶瓷的显微组织和力学性能(Kohlmann, 2019)。Lin et al.(2022)发现,Al和AlN之间有良好的化学润湿性,少量掺入Al金属粉末能促进晶界相的孤立且均匀分布,强化晶界并提高微观均匀性,并且对AlN陶瓷的介电性能无负面影响。此外,在烧结过程中,Al会部分氧化生成Al₂O₃或与AlN表面反应生成液相,降低烧结温度。

然而,单一稀土氧化物助剂往往难以同时满足低温烧结和高性能的要求。因此,研究者们开始探索多种稀土氧化物的协同作用。Lee et al.(2015)以传统熔融法制备的MgO-CaO-Al₂O₃-SiO₂(MCAS)玻璃氧化物为烧结添加剂,在较低温度下制备致密AlN陶瓷,并采用X射线衍射分析和场发射扫描电镜显微结构观察等方法研究了AlN掺杂玻璃的烧结行为。除了玻璃粉外,CaO或CaF₂也被认定是传统的低温烧结助剂体系(王超等, 2009; 乔梁等,

2003; 黄小丽等, 2006)。钙和氮的化合物是一种低熔点物质,可以在较低温时形成液相,通过液相填充促进AlN陶瓷的致密化过程,但是Ca-N在长时间的高温烧结过程中的挥发会影响AlN陶瓷的液相组成和数量(王超等, 2009)。乔梁等(2003)采用CaF₂-Y₂O₃-Li₂CO₃做添加剂,在1650 °C下保温4 h制备出了致密的氮化铝陶瓷,这主要依靠钙铝酸盐相的重新分布提高AlN陶瓷的致密度。

然而,以玻璃相体系作为烧结助剂引入过多的氧杂质严重影响氮化铝陶瓷的导热性能,以Ca化合物体系作为烧结助剂制备出来的氮化铝陶瓷的力学性能较差。因此,本文聚焦于Al-Y₂O₃-Sm₂O₃助剂体系,通过研究该体系的组成、添加量以及烧结工艺参数对AlN陶瓷性能的影响,并通过低温烧结制备出一种强度与热导率性能均衡的氮化铝陶瓷,为开发高性能AlN陶瓷材料提供了理论依据。

1 实验过程

1.1 样品制备

使用东洋JC级AlN粉末($D_{50}=1.2\ \mu\text{m}$)为原料,选择稀土氧化物Y₂O₃与Sm₂O₃为烧结助剂,Al粉末为增强相。表1是AlN原料和烧结助剂的组成比例,共设置5组实验。其中,Al粉末以外掺的形式加入,即每组样品都额外加质量分数为1%的Al粉末。5组实验中,以5Y0S作为对比组。

表1 AlN粉体和烧结助剂的质量分数¹⁾

组别	AlN	Y ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Al (extra)
5Y0S	95	5	—	1
4Y1S	95	4	1	1
3Y2S	95	3	2	1
2.5Y2.5S	95	2.5	2.5	1
1Y4S	95	1	4	1

1) —代表无数字。

将AlN粉体与一定比例的烧结助剂、无水乙醇、ZrO₂球在行星球磨机上球磨混合6 h,球磨机转速为350 r/min。球磨均匀后对浆料进行60~65 °C的旋蒸烘干,获得分散均匀的复合粉体,将其经过100目的筛网得到颗粒均匀、流动性较好的复合粉体。复合粉体在钢制模具中承受4~6 MPa的压力预压成型后,再进行200 MPa、300 s的冷等静压处理得到AlN块状生坯。冷等静压前后,AlN坯体的致密度提高,体积收缩大约为5~15%,这有利于后续

的烧结致密。

最后,将 AlN 坯体放入氮化硼坩埚中,在气氛烧结炉中烧结。以流动氮气为烧结气氛,氮气流量 0.5 L/min,气压控制在 1~6 KPa。在 1 700~1 850 °C 下烧结 4 h 后,得到 AlN 陶瓷样品。

1.2 性能测试

采用 Archimedes 排水法,测量 AlN 陶瓷样品的实际体积密度,并且与理论密度比较测定其致密度。采用 X 射线衍射仪(D8 advance)对 AlN 陶瓷样品物相进行测定。采用激光导热仪(LFA447)测试 AlN 陶瓷样品在室温下的热扩散系数。以三点弯曲法在万能试验机(AGS-X-50KND)上测得 AlN 陶瓷样品的弯曲强度。并且,采用聚焦离子束场发射扫描电子显微镜(Lyra 3 XMU)对 AlN 陶瓷样品断面形貌进行表征。

2 结果与讨论

2.1 Al-Y₂O₃-Sm₂O₃ 对 AlN 陶瓷致密度和物相的影响

图 1 是 1 700~1 850 °C 烧结温度下 5 组 AlN 陶瓷样品的致密度。可以观察到,1 700 °C 的烧结温度下 5 组试样的致密度均低于 92%,即可认定为烧结不致密。在 1 700 °C 烧结时,添加 Sm₂O₃ 有助于烧结活性的提高,未添加 Sm₂O₃ 的 5Y0S 样品的致密度最低,为 88.70%,其余样品的致密度在 90%~92%。当烧结温度提高至 1 750 °C 及以上时,仅 1 750 °C 烧结的 1Y4S 样品的致密度为 98.63%;而其余的 AlN 陶瓷样品的致密度都达到 99% 以上,均可认定为烧结致密。

为了分析 AlN 陶瓷的烧结致密化过程中的物

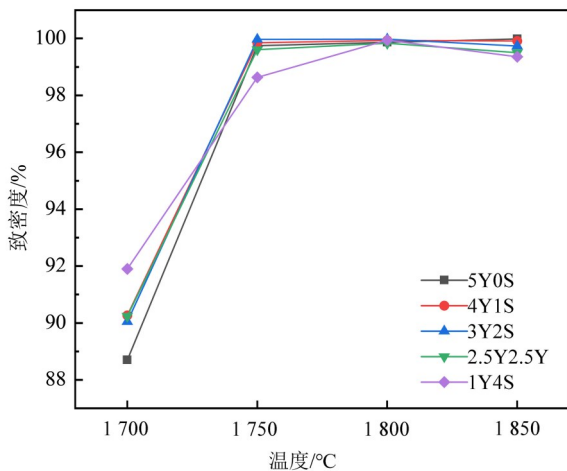
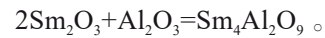
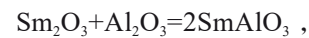
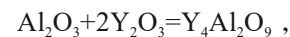
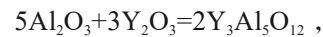
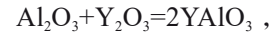


图 1 不同烧结温度下烧结样品的致密度

Fig. 1 Relative density of sintered samples at different sintering temperatures

相变化,对烧结后的 AlN 陶瓷进行 X 射线衍射(XRD)检测。图 2 和图 3 分别为 1 700 °C 的不致密烧结和 1 750 °C 的致密烧结的 XRD 图谱。可以发现,所有样品均含有 AlN 主相。在 1 700 °C 的不致密烧结中,每组样品中均含有 Al₂O₃ 相,这是因为在 AlN 表面形成了氧化层。在 Y₂O₃ 助剂质量分数大于 1% 的实验组中,检测出未反应完全的 Y₂O₃ 衍射峰。在 1Y4S 样品中,检测出未反应完全的 Sm₂O₃ 衍射峰。此外,由于已达到液相反应温度,在前面 4 组样品中可以观察到有钇铝酸盐(YAlO₃、Y₃Al₅O₁₂、Y₄Al₂O₉)第二相生成,在第 5 组 1Y4S 样品中有钐铝酸盐(SmAlO₃、Sm₄Al₂O₉)第二相生成,各反应式如下(Zhao et al., 2013; Matsubara et al., 2000; Lin et al., 2023; Watari et al., 1992; 齐于杰等, 2025):



在 1 750 °C 的致密烧结中,可以观察到 Al₂O₃ 衍射峰数量明显减少,如图 3 所示。并且,Al₂O₃ 和 Y₂O₃/Sm₂O₃ 的衍射峰信号减弱,烧结过程中 Y₂O₃、Sm₂O₃ 与 AlN 颗粒表面的 Al₂O₃ 层反应形成液相填补孔隙;同时,这些液相也促进了烧结过程中的物质传输和扩散,从而有效地促进了 AlN 陶瓷的致密化。因此,这也导致了第二相的衍射峰信号增强。

2.2 Al-Y₂O₃-Sm₂O₃ 对 AlN 陶瓷显微结构的影响

图 4 为在 1 750 °C 烧结后 AlN 陶瓷样品在低倍

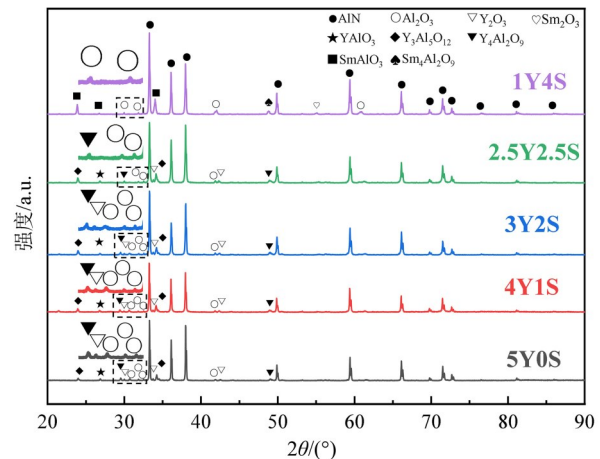


图 2 烧结样品的 XRD 图谱(1 700 °C)

Fig. 2 XRD patterns of the sintered samples(1 700 °C)

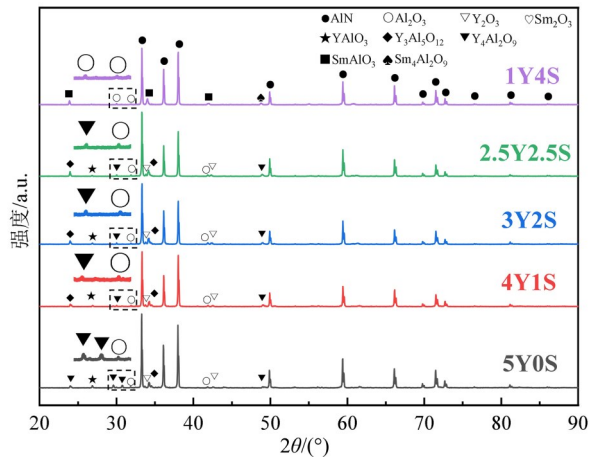


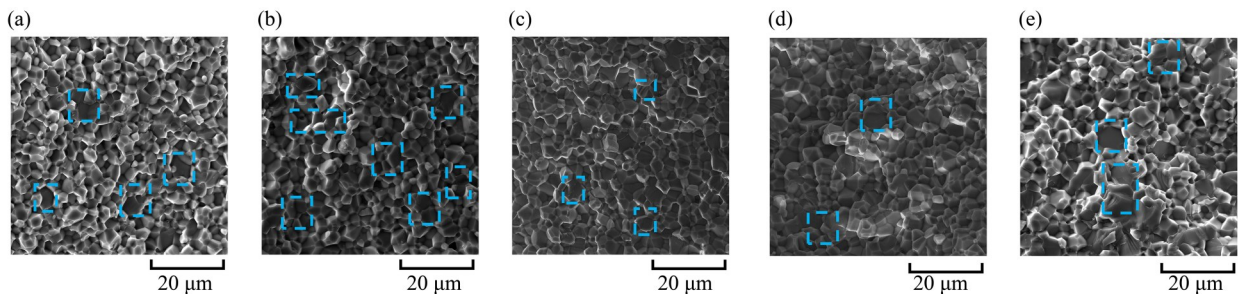
图3 烧结样品的XRD图谱(1750 °C)

Fig. 3 XRD patterns of the sintered samples(1750 °C)

数下的SEM图像。图4中,5组AlN陶瓷样品的SEM图像没有明显的孔洞、裂缝等缺陷,即烧结致密化程度较高。陶瓷样品的断裂方式主要分为穿晶断裂和沿晶断裂,穿晶断裂发生在单个晶粒内部,而沿晶断裂是在多个晶粒的接触处剥落的断裂方式。样品的断裂方式可以反映陶瓷晶界间的结

合强度,穿晶断裂相较于沿晶断裂会消耗更多的能量。因此,越多的穿晶断裂,越有利于提高陶瓷的力学性能(Du et al., 2020; Liu et al., 2017)。

图4(b)中,4Y1S样品的穿晶断裂区域较多且分布较广,少量的 Sm_2O_3 不仅能够细化晶粒,使微观组织更加均匀,同时它能够强化晶界和晶界相,引起更多的穿晶断裂(Yasuda et al., 2001)。图4(e)的1Y4S样品虽然也存在穿晶断裂,但穿晶断裂多数发生在不均匀的大尺寸晶粒处,且整体而言其组织的均匀性较差。进一步分析可知,对于1Y4S样品,AlN陶瓷的第二相主要为钐铝酸盐相(SmAlO_3 、 $\text{Sm}_4\text{Al}_2\text{O}_9$),它晶界强化能力/晶界结合能力相较于钇铝酸盐相(YAlO_3 、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$)可能更弱。此外,图4(a)中5Y0S样品的第二相颗粒较大,其他掺有 Sm_2O_3 助剂样品的第二相更加细小、分散。由此可见,1750 °C烧结时添加少量(比如质量分数为1%)的 Sm_2O_3 ,第二相中钇铝酸盐相多于钐铝酸盐相,通过第二相引入压应力强化晶界,从而诱发AlN晶粒以穿晶断裂的形式断裂,达到了提高弯曲强度的目的。



(a~e 依次为5Y0S, 4Y1S, 3Y2S, 2.5Y2.5S, 1Y4S样品; 蓝色虚线框标记为穿晶断裂区域)

图4 1750 °C烧结样品断口的SEM图像

Fig. 4 SEM images of fracture morphologies of samples sintered at 1750 °C

图5中,AlN陶瓷断口在高倍数下的SEM图像进一步揭示了AlN样品中第二相的形貌和分布。可以观察到,5组样品的第二相较为分散,并没有出现明显的连结,这得益于少量的Al粉末促进了晶界相的孤立和均匀分布(Lin et al., 2022)。图5(a)和5(b)是5Y0S和4Y1S样品的SEM断面图,高亮的白色颗粒即为第二相颗粒。当继续添加 Sm_2O_3 时,第二相呈细小且孤立状分布,如图5(c)-5(e)所示。图5(f)-5(j)是5Y0S、4Y1S、3Y2S、2.5Y2.5S、1Y4S的晶粒尺寸分布图,它们的平均晶粒尺寸分别为 (6.85 ± 1.49) 、 (6.14 ± 1.64) 、 (5.81 ± 1.22) 、 (5.86 ± 1.60) 和 (5.39 ± 1.59) μm 。随着 Sm_2O_3 助剂含量的增多,AlN平均晶粒尺寸逐渐减小;当 Sm_2O_3 质量分

数大于2.5%时,尺寸为2~3 μm 的晶粒逐渐增多,这是因为 SmAlO_3 和 $\text{Sm}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ 相具有一定的钉扎效果,能够抑制AlN晶粒的长大,起到细化陶瓷晶粒的作用(Wang et al., 2023; Nie et al., 2021)。

2.3 Al-Y₂O₃-Sm₂O₃对AlN陶瓷力学性能的影响

图6是不同烧结温度下AlN陶瓷样品的弯曲强度。可以观察到,除了1Y4S样品,其他4组样品的弯曲强度随着烧结温度的升高而降低。在1750 °C烧结温度下,4Y1S显示出最优的力学性能,弯曲强度为 (474 ± 25) MPa;而1Y4S的弯曲强度最低,仅为 (434 ± 23) MPa。图5中1Y4S样品的平均晶粒尺寸最小,但在1750 °C烧结时其弯曲强度是5组样品中最低的。图1中,1Y4S虽然烧结致密,但是其致

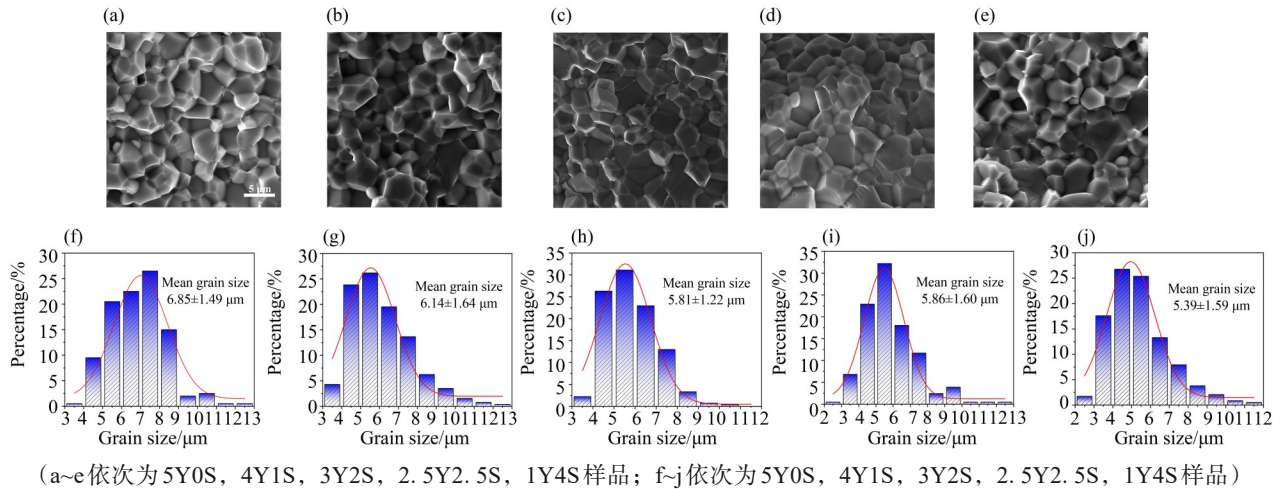


图5 1750 °C 烧结样品的高倍数SEM图像与晶粒尺寸分布

Fig. 5 SEM images at high magnification and grain size distribution of sintered samples at 1750 °C

密度为98%左右,这意味着存在着一些烧结缺陷,这些缺陷不论对力学性能还是热导率都有一定的负面影响。此外,1Y4S的第二相较少,然而孤立且均匀的第二相会引入压应力,强化AlN晶界,引发更多的穿晶断裂从而提高陶瓷的力学性能(Lin et al., 2022)。

另一方面,1Y4S的第二相主要为SmAlO₃和Sm₄Al₂O₉,在低温下它们的“钉扎”作用并不明显,此时更多地依靠AlN晶界间的结合强度实现力学性能提高。1750 °C 烧结时,添加Sm₂O₃的4组试验中,随着Sm₂O₃添加量的增多,弯曲强度呈现下降的趋势。当烧结温度为1800和1850 °C时,1Y4S样品在5组样品中的弯曲强度最高,因为高温烧结的晶粒细化作用更能决定陶瓷样品的力学性能;同时,随着Sm₂O₃添加量的增多,AlN陶瓷的弯曲强度也相应增大。在1800和1850 °C 烧结时,Sm₂O₃的晶粒细化作用明显,其“钉扎”作用抑制AlN晶粒异常长大,有利于提高组织均匀性和弯曲强度。

2.4 Al-Y₂O₃-Sm₂O₃对AlN陶瓷热导率的影响

不同烧结温度下AlN陶瓷烧结样品的热导率如图7所示。在各烧结温度下,5组样品中4Y1S的热导率最高,然后依次为3Y2S、5Y0S、2.5Y2.5S、1Y4S;并且3组不同温度下4Y1S样品的热导率相差很小,可以认为其不受烧结温度的影响。

AlN陶瓷的热导率受致密度、晶粒尺寸、第二相分布、组织均匀性、烧结助剂驱氧能力等因素的影响。Y₂O₃相较于Sm₂O₃具有更强的驱氧能力,可以更有效地净化晶格氧,从而提升热导率(Chen et al., 2025)。加入少量的Sm₂O₃可以使AlN的第二相更加分散均匀,并且其晶粒大小适中,不会引入过多

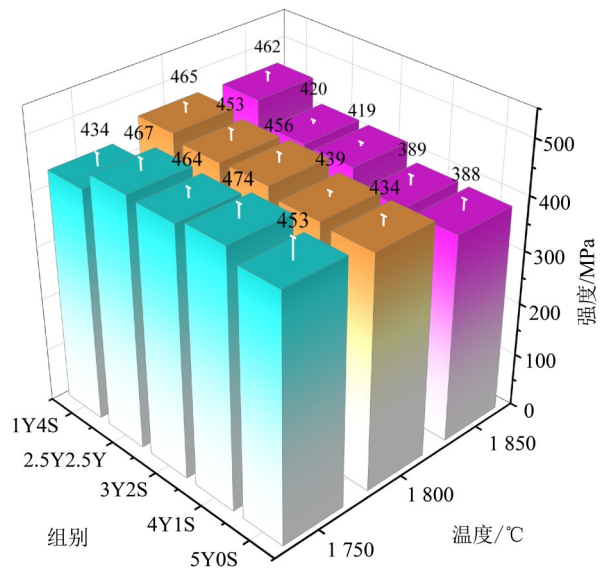


图6 不同烧结温度下烧结样品的弯曲强度

Fig. 6 Bending strength of sintered samples at different sintering temperatures

的界面热阻,从而降低AlN陶瓷的热导率。由于第二相的热导率远低于AlN,第二相尺寸越小、越分散,更有利于AlN晶粒之间的热传导,进而获得更高的导热率。在1750 °C下,4Y1S的热导率为181 W/(m·K),1Y4S的热导率仅有129 W/(m·K)。当烧结温度达到1850 °C时,4Y1S的热导率基本不变,而1Y4S的热导率提高至154 W/(m·K)。考虑到第二相的分布以及种类对AlN陶瓷的热导率影响较大,Sm₂O₃的含量并不是越多越好,少量添加Sm₂O₃反而可以获得更高的热导率。

由图8可知,本研究采用Al-Y₂O₃-Sm₂O₃复合添加剂在1750 °C制备出的AlN陶瓷的抗弯强度和热

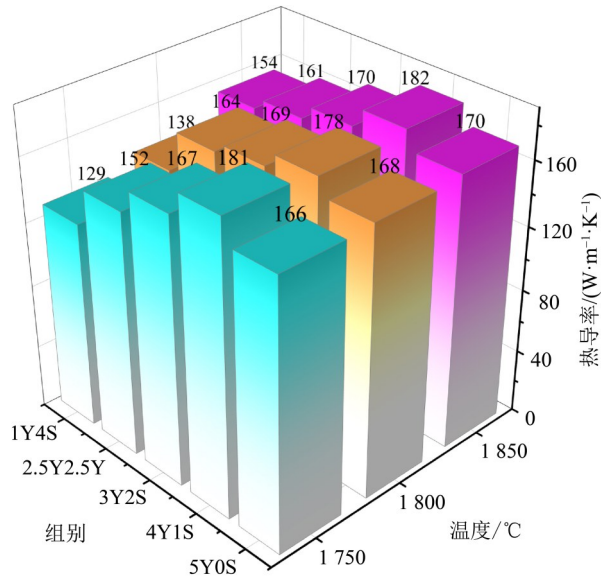


图7 不同烧结温度下烧结样品的热导率

Fig. 7 Thermal conductivity of sintered samples at different sintering temperatures

导率与前人以更高烧结温度制备的 AlN 陶瓷相比较更加具有优势。

3 结论

本文研究采用 Al-Y₂O₃-Sm₂O₃ 复合添加剂, 利用了 Al、Y₂O₃、Sm₂O₃ 良好的低温促烧性能, 研究它们的添加量对低温烧结 AlN 陶瓷的热力学性能、物相组成和微观结构的影响。研究发现, 在添加质量分数为 1% 的 Al 的基础上, 以 Y₂O₃ 为主要的烧结助剂, 添加少量的 Sm₂O₃ 有利于 AlN 陶瓷低温烧结的致密化、细化 AlN 的晶粒并且净化晶格氧, 提高 AlN 陶瓷的热力学性能。主要结论如下:

参考文献:

- 黄小丽, 胡晓青, 2006. 氮化铝陶瓷的低温烧结研究[J]. 兵器材料科学与工程, 29(4): 15-17.
- 齐于杰, 林坤吉, 赵哲, 等, 2025. Sm₂O₃-SmF₃ 烧结助剂对无压烧结 AlN 陶瓷性能的影响[J]. 热加工工艺, 54(13): 93-98+105.
- 乔梁, 周和平, 王少洪, 2003. 低温烧结 AlN 陶瓷的微观结构和热导率[J]. 材料工程, 31(2): 23-26.
- 盛鹏飞, 聂光前, 黎业华, 等, 2020. 高导热氮化铝陶瓷成型技术的研究进展[J]. 陶瓷学报, 41(6): 771-782.
- 王超, 彭超群, 王日初, 等, 2009. 低温烧结氮化铝陶瓷烧结助剂的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 27(1): 62-66.
- 赵世泽, 林坤吉, 张文铎, 等, 2024. 烧结工艺对掺 Al 增强

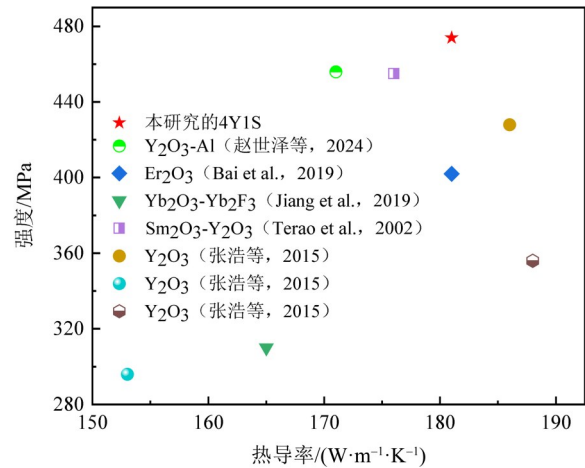


图8 制备的 AlN 样品性能对比

Fig. 8 Performance comparison between AlN samples prepared in this work and previous studies

1) 本文采用的三元烧结助剂极大的提高了 AlN 陶瓷的烧结活性, 在 1750 °C 下烧结致密, 其中 1% Al-4% Y₂O₃-1% Sm₂O₃ 的 AlN 陶瓷弯曲强度达到了 (474±25) MPa, 热导率为 181.12 W/(m·K), 两者均为最高值, 即该组分设计下同时获得了优异的弯曲强度和热导率。

2) Y₂O₃ 与 AlN 之间有良好的润湿性, 生成的液相促进了 AlN 的致密化过程。另一方面, 少量的 Sm₂O₃ 不仅能够细化晶粒, 使微观组织更加均匀, 且它能够强化晶界和晶界相, 从而提升了 AlN 陶瓷的弯曲强度, 在断裂试验时表现出更多的穿晶断裂。同时, 少量的 Sm₂O₃ 使晶界相孤立且均匀分布, 生成的第二相 (钇铝酸盐相) 净化晶格氧的能力较强, 提升了 AlN 陶瓷的热导率。

氮化铝陶瓷基板的显微结构和性能的影响[J]. 热加工工艺, 53(24): 85-91.

张浩, 郭军, 党军杰, 等, 2015. 烧结温度对氮化铝陶瓷结构与性能的影响[J]. 中国陶瓷, 51(7): 54-58.

BAI H B, ZHANG X H, WU Y G, et al, 2019. Effect of Er₂O₃ on the properties of AlN ceramics by tape casting [C]//20th International Conference on Electronic Packaging Technology. Hong Kong, China: 1-3.

CHEN Z Q, WANG L, DU P, et al, 2025. Effects of different sintering additives Re₂O₃ (Re=Y, Nd, Gd, Sm, and Yb) on the thermal conductivity, mechanical properties and dielectric properties of AlN ceramics [J].

- J Alloy Compd, 1023:180180.
- DU W, AI Y, HE W, et al, 2020. Formation and control of “intragranular” ZrO₂ strengthened and toughened Al₂O₃ ceramics[J]. Ceram Int, 46(6): 8452–8461.
- HAN Y, ZHOU H, LI S, et al, 2015. Facile and effective aluminium nitride anti-oxidation coating for carbon nanotubes[J]. Surf Coat Technol, 276: 502–506.
- HUANG D, LIU Z, HARRIS J, et al, 2019. High thermal conductive AlN substrate for heat dissipation in high-power LEDs[J]. Ceram Int, 45(1): 1412–1415.
- JIANG H, WANG X H, LEI W, et al, 2019. Effects of two-step sintering on thermal and mechanical properties of aluminum nitride ceramics by impedance spectroscopy analysis[J]. J Eur Ceram Soc, 39(2/3): 249–254.
- KOHLMANN H, 2019. The crystal structure of cubic C-type samarium sesquioxide, Sm₂O₃ [J]. Zeitschrift Fur Naturforschung Section B–A Journal of Chemical Sciences, 74 (5): 433–435.
- LEE H J, KIM S W, RYU S S, 2015. Sintering behavior of aluminum nitride ceramics with MgO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ glass additive [J]. Int J Refract Met Hard Mater, 53: 46–50.
- LI D, LI W, WANG R, et al, 2016. Influence of thermal shock damage on the flexure strength of alumina ceramic at different temperatures[J]. Mater Lett, 173: 91–94.
- LIN K, NIE G, SHENG P, et al, 2022. Effects of doping Al-metal powder on thermal, mechanical and dielectric properties of AlN ceramics [J]. Ceram Int, 48 (24) : 36210–36217.
- LIN K, ZONG X, SHENG P, et al, 2023. Effects of SmF₃ addition on aluminum nitride ceramics *via* pressureless sintering[J]. J Eur Ceram Soc, 43(15):6804–6814.
- LIU C, GUO W M, SUN S K, et al, 2017. Texture, microstructures, and mechanical properties of AlN-based ceramics with Si₃N₄–Y₂O₃ additives [J]. J Am Ceram Soc, 100(8):3380–3384.
- MATSUBARA I, PARANTHAMAN M, ALLISON S W, et al, 2000. Preparation of Cr-doped Y₃Al₅O₁₂ phosphors by heterogeneous precipitation methods and their luminescent properties [J]. Mater Res Bull, 35 (2) : 217–224.
- NIE G, LI Y, SHENG P, et al, 2021. Microstructure refinement-homogenization and flexural strength improvement of Al₂O₃ ceramics fabricated by DLP-stereolithography integrated with chemical precipitation coating process[J]. J Adv Ceram, 10(4): 790–808.
- TERAO R, TATAMI J, MEGURO T, et al, 2002. Fracture behavior of AlN ceramics with rare earth oxides[J]. J Eur Ceram Soc, 22(7):1051–1059.
- TUMMALA R R, 1991. Ceramic and glass-ceramic packaging in the 1990s [J]. J Am Ceram Soc, 74 (5) : 895–908.
- WANG L, GUO W M, SHENG P F, et al, 2023. Effects of YH₂ addition on pressureless sintered AlN ceramics [J]. J Eur Ceram Soc, 43(3):862–870.
- WATARI K, TSUZUKI A, TORII Y, 1992. Effect of rare-earth oxide addition on the thermal conductivity of sintered aluminium nitride[J]. J Mater Sci Lett, 11(22) : 1508–1510.
- YASUDA H, OHNAKA I, MIZUTANI Y, et al, 2001. Selection of eutectic systems in Al₂O₃–Y₂O₃ ceramics [J]. Sci Technol Adv Mater, 2(1):67–71.
- ZHAO D, COYLE T W, CHIEN K, 2013. Phase composition and microstructure of yttrium aluminum garnet (YAG) coatings prepared by suspension plasma spraying of Y₂O₃–Al₂O₃ powders [J]. Surf Coat Technol, 235: 303–309.

(责任编辑 王海蓉)