

氧化铝基陶瓷复合材料增韧机制及其应用进展

邱宇翔^{1,2}, 李乔磊^{1,3}, 梁静静¹, 周亦胄¹, COLOMBO Paolo^{3,4}, 李金国¹

(1. 中国科学院金属研究所, 中国 沈阳 110016; 2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院, 中国 沈阳 110016;
3. 帕多瓦大学工业工程系, 意大利 帕多瓦 35131; 4. 宾夕法尼亚州立大学材料科学与工程系, 美国 宾夕法尼亚 16802)

摘 要: 氧化铝(Al_2O_3)陶瓷因其高硬度、高机械强度、耐化学腐蚀、耐磨及抗高温氧化等优异性能, 在高端装备、极端服役环境等领域展现出了巨大的应用潜力。然而, 由于其晶体内部极强的离子键合作用, Al_2O_3 表现出较高的脆性和抗变形能力, 严重制约了该材料更广泛地应用与发展。为突破该瓶颈, 近年来, 大量研究工作聚焦于多机制协同增韧工艺的开发, 常见方法包括颗粒增韧、晶须与纤维增韧、仿生结构增韧以及石墨烯、碳纳米管等纳米材料增韧。由此制备的 Al_2O_3 基复合材料在保持材料优异强度、硬度等力学性能的基础上, 显著提升了材料的损伤容限, 已广泛应用于国防军工、航空航天、半导体及生物医疗等先进制造领域。本文系统综述了 Al_2O_3 基陶瓷复合材料的增韧机制, 梳理了近年来的研究进展与应用现状, 分析了现有增韧技术面临的主要问题, 并对未来发展方向进行展望, 以期为该材料的进一步研究提供参考。

关键词: 氧化铝; 增韧机制; 断裂韧性; 复合材料

中图分类号: O782 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)09-3274-19

网络出版时间: 2026-08-18



作为一种化学键极强的离子化合物, Al_2O_3 具备高硬度、高机械强度、耐化学腐蚀、耐磨性好以及良好的导热性等一系列其他材料无法比拟的优异特性^[1-8], 已然成为现代工业不可或缺的重要材料。 Al_2O_3 共有 9 种晶型, 其中, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在热力学上最为稳定, 属三方晶系密排堆积结构, 这使得 O 离子与 Al 离子之间形成了极短且方向性极强的化学键, 键合能极高^[9]。从微观上看, 这种结构紧密且有序, 但也无法拥有通过位错滑移等机制进行塑性变形的能力, 导致材料断裂韧性低、对缺陷敏感、抗冲击性差, 严重限制了其在需要承受高应力、冲击载荷的关键结构部件上的应用。因此, 如何克服脆性、提升可靠性与损伤容限, 成了 Al_2O_3 陶瓷材料工程应用的关键问题。

Al_2O_3 本征脆性的核心在于缺少能量耗散机制。基于这一认识, 突破 Al_2O_3 脆性瓶颈的思路应从“阻止裂纹扩展”转向“促进能量耗散”。当前主要的增韧方法如颗粒增韧、晶须与纤维增韧、仿生结构增韧以及碳基纳米材料增韧, 本质上都是在 Al_2O_3 材料内部引入不同尺度的耗能界面或变形单元, 使裂纹扩展路径延长、偏转或通过界面摩擦消耗能量, 从而获得高强、高韧、高损伤容限的 Al_2O_3 基复合材料, 并广泛应用于高端制造、国防工业、航空航天、半导体与器件、生物医疗等领域^[5,10,11]。

本文归纳总结了 Al_2O_3 基陶瓷复合材料的主要增韧机制, 详细阐述了近年来 Al_2O_3 基陶瓷复合陶瓷的研究进展和应用现状, 分析了现阶段各种增韧方法存在的主要问题, 并展望了未来的发展方向,

收稿日期: 2026-03-10。 修订日期: 2026-03-29。

基金项目: 辽宁省科学技术计划(2024JH2/101900011); 国家自然科学基金(52402094, U234120139, U22A20129); 国家重点研发计划(2024YFB3714504, 2024YFB3714503); 国防基础科研计划(2024213B002, JCKY2022130C005); 中国博士后科学基金(2023M743571); 国家资助博士后研究人员计划(GZC20232743); 中国科学院金属研究所创新基金(2024-PY11); 高端装备铸造技术全国重点实验室开放基金(CAT2023-006); 安徽省研究生教育质量工程(2023cxcysj015)。

第一作者: 邱宇翔(1998—), 男, 博士研究生。

通信作者: 李乔磊(1993—), 男, 博士, 助理研究员。

Received date: 2026-03-10. Revised date: 2026-03-29.

First author: QIU Yuxiang (1998—), male, Doctoral candidate.

E-mail: yxqiu21s@imr.ac.cn

Correspondent author: LI Qiaolei (1993—), male, Ph.D., Assistant Researcher.

E-mail: qlli@imr.ac.cn

对今后 Al_2O_3 基陶瓷复合材料进一步的研究具有重要理论意义和工程价值。

1 氧化铝陶瓷复合材料的增韧机制

作为结构材料, Al_2O_3 的强离子键合特性导致本征脆性问题突出, 严重制约了其在关键承载部件中的可靠性与使用寿命。因此, 增韧始终是 Al_2O_3 陶瓷研究的核心课题。围绕这一目标, 研究者研发了多种增韧方法, 主要包括颗粒增韧、相变增韧、晶须与纤维增韧、仿生结构增韧、低维碳基材料增韧以及多元协同增韧等。

1.1 颗粒增韧

颗粒增韧是将第二相颗粒引入陶瓷基体, 通过改变裂纹扩展路径来消耗断裂能。根据颗粒性质的不同, 可分为金属颗粒增韧和非金属颗粒增韧。金属颗粒主要通过自身的塑性变形等延性行为耗散能量, 常见的金属颗粒主要有 Ti、Al、Ni 等^[12-15]。金属颗粒增韧 Al_2O_3 陶瓷的强度、硬度、韧性及导电导热性能很好地结合了陶瓷和金属的特点, 具有优良的综合性能, 是近年来备受关注的研究方向。

金属颗粒的增韧效果取决于颗粒的尺寸、分布及其与陶瓷基体的界面结合强度。Irshad 等^[13]在放电等离子烧结条件下制备了 Al_2O_3 -Ni 复合材料, 发现其断裂韧性随着 Ni 含量的增加而增强, 最高达到 $4.71 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。实验表明, 当裂纹扩展至陶瓷与金属界面时, 由于 Ni 颗粒与 Al_2O_3 基体的变形能力存在差异, 裂纹尖端会发生局部钝化, 而颗粒与基体之间的弱结合则会导致裂纹沿界面扩展。Shi 等^[12]采用热压烧结工艺在 1500°C 成功制备出力学性能与导电性能同步提升的 Al_2O_3 /Ti 复合材料。当 Ti 含量为 20% 时, 复合材料的断裂韧性较纯 Al_2O_3 陶瓷提高了 37%。Cui 等^[16]在研究 Al_2O_3 /(W, Ti)C 体系时, 发现过量添加强化相会导致颗粒团聚, 成为缺陷源, 说明强化相颗粒的分散至关重要。Sbaizero 等^[14]研究不同粒径的 Mo 颗粒对 Al_2O_3 陶瓷力学性能的影响, 结果表明, 相比于粒径较小的 Mo 颗粒 ($<5 \mu\text{m}$), 较大粒径的 Mo 颗粒可以增强裂纹的桥联效应, 使断裂韧性提升超过 100%。

金属颗粒的引入还能在烧结过程中抑制 Al_2O_3 晶粒的异常长大, 改善材料的微观结构。Rong 等^[17]采用颗粒稳定泡沫法制备 Al/ Al_2O_3 泡沫前驱体, 随后直接进行热压成型, 制备出断裂韧性为 $(6.3\pm0.2) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、抗弯强度为 $(725\pm34) \text{ MPa}$ 的 Al_2O_3 陶瓷。结果表明,

适量引入 Al 元素能诱导板状晶粒的形成, 进一步促进裂纹偏转与分支。YiLDiZ 等^[18]研究 Ni 对 Y_2O_3 稳定 ZrO_2 (YSZ) 增强 Al_2O_3 力学性能的影响, 发现添加 Ni 颗粒后材料的断裂韧性提高了 50%。

然而, 金属颗粒的引入通常以牺牲材料的整体硬度、高温强度和抗氧化性为代价。Ni 等^[19]通过热压烧结法制备了添加 Ni 和 Mo 的 Al_2O_3 基复合材料, 结果表明, Ni 和 Mo 可有效提高复合材料的抗弯强度和断裂韧性, 但硬度却随着金属含量的增加而持续降低。

以 NiAl 为代表的金属间化合物也是一种非常重要的第二相颗粒。与纯金属通过塑性变形桥接裂纹不同, NiAl 依靠颗粒的强度和界面效应来提升 Al_2O_3 的断裂韧性。Huang 等^[15]制备了具有裂纹自愈特性的 NiAl/ Al_2O_3 复合材料。当 NiAl 含量为 15% 时, 其断裂韧性较纯 Al_2O_3 提高了约 80%, 且观察到受压损伤的复合材料发生自愈合行为, 这与 NiAl 颗粒的氧化与晶粒扩散过程有关。

非金属颗粒则主要作为高硬度、高弹性模量的刚性粒子诱导裂纹发生偏转与分叉, 使断裂表面积增加, 从而消耗更多能量^[20-22]。常见的非金属颗粒主要有碳化物、氮化物和部分稀土氧化物^[23-31]。Grigoriev 等^[32]发现在 Al_2O_3 中加入 40% (体积分数) TiC 可同时提高复合材料的断裂韧性和硬度, 分别达到 $(7.8\pm0.4) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $(22.3\pm0.3) \text{ GPa}$, 几乎是传统陶瓷切削刀具 (K01, ISO) 的 2 倍。Wang 等^[33]发现当 BN 微米带 (BNMR) 含量为 5% 时, BNMR/ Al_2O_3 复合陶瓷的硬度、断裂韧性和抗弯强度分别达到 $(34.11\pm1.5) \text{ GPa}$ 、 $(5.42\pm0.21) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $(375\pm2.5) \text{ MPa}$, 较纯 Al_2O_3 陶瓷分别提高了 70%、35% 和 25%。Lyu 等^[34]以 Y_2O_3 为烧结助剂, 成功制备了断裂韧性为 $4.89 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的 B_4C - Al_2O_3 多相陶瓷复合材料。Li 等^[28]采用碳热还原氮化法制备出硬度达 13.9 GPa 、断裂韧性为 $8.28 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、弯曲强度达 387 MPa 的 Al_2O_3 -Ti(C, N) 陶瓷材料。研究表明, 原位形成 Ti(C, N) 相产生的残余应力场改变裂纹扩展路径, 导致裂纹发生偏转与钉扎, 是材料力学性能提升的重要原因。Zang 等^[23]通过蒙特卡罗法与有限元法分析了添加 h-BN@ Al_2O_3 后残余应力对复合陶瓷材料断裂韧性的影响。发现随着 h-BN@ Al_2O_3 含量的增加, 复合陶瓷材料的最大残余拉应力增大, 将影响复合陶瓷材料的晶粒与晶界强度, 进而影响其断裂韧性 (图 1)。

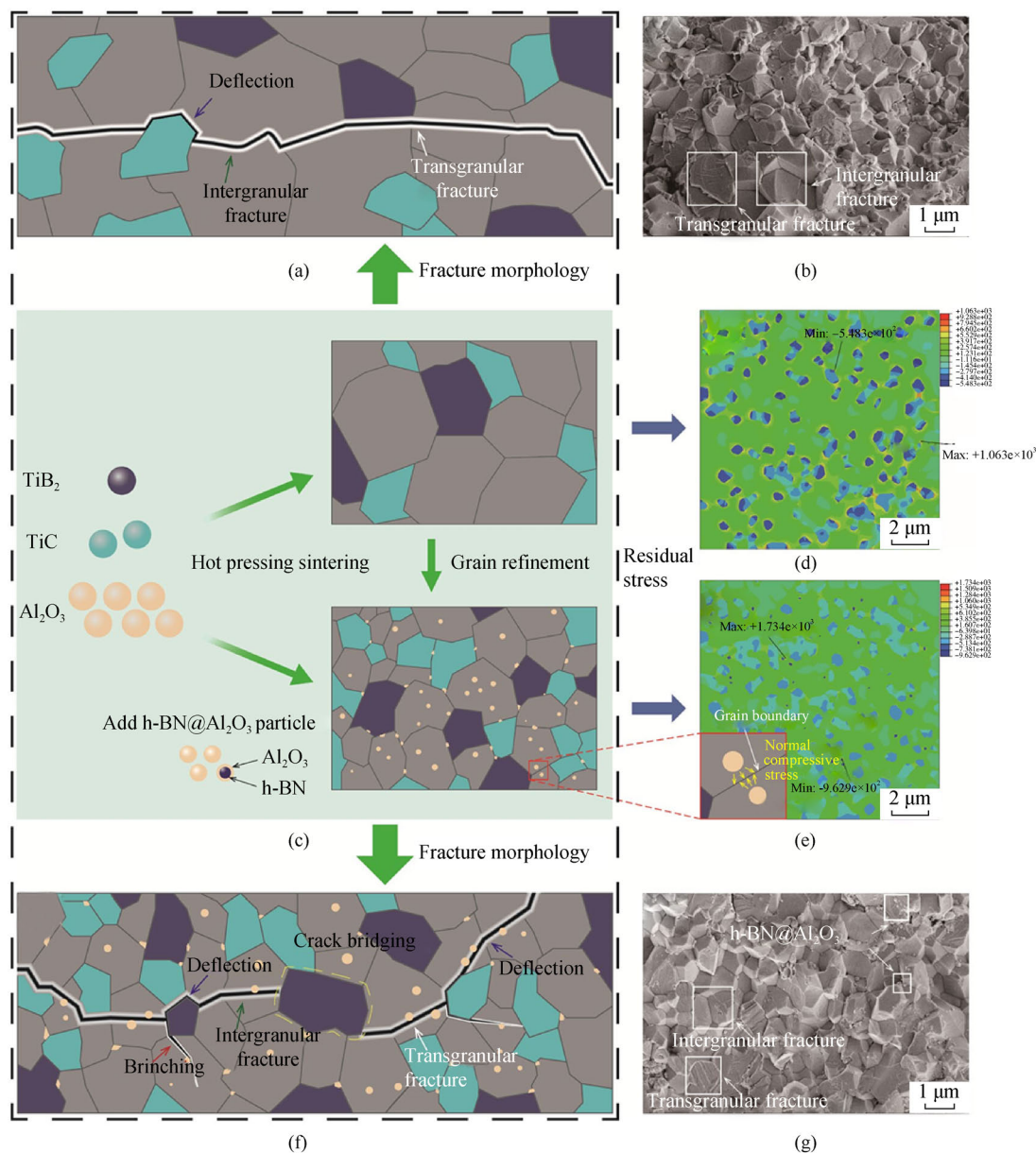


图1 向 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiB}_2$ 复合材料中添加 $\text{h-BN@Al}_2\text{O}_3$ 的增韧机制^[23]
Fig. 1 Toughening mechanism of adding $\text{h-BN@Al}_2\text{O}_3$ to $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiB}_2$ ^[23]

在断裂过程中,若颗粒与基体间的界面结合强度适中,颗粒还可能从基体中拔出,这一拔出过程因需要克服摩擦阻力而额外做功,也是增韧的有效途径。Shi 等^[26]以稀土氧化物 Sm_2O_3 作为增强相,制备了 Sm_2O_3 掺杂的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 复合材料,结果表明,添加 1.5%(摩尔分数) Sm_2O_3 的复合材料展现出最高弯曲强度(567 MPa)与断裂韧性($5.53 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$),这是由于 Al_2O_3 与 Sm_2O_3 反应形成棒状 SmAlO_3 ,并通过裂纹桥接与颗粒拔出机制显著提升韧性。He 等^[24]发现在 Al_2O_3 基体中引入 La_2O_3 和 Nb_2O_5 可以使得复合陶瓷的断裂韧性提升 116%,并且在材料内部观察到由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{LaAl}_{11}\text{O}_{18}$ 组成的柱状晶粒和单斜

晶系 LaNbO_4 组成的等轴晶粒。

1.2 相变增韧

相变增韧是利用分散在陶瓷基体中的第二相颗粒在应力场作用下发生的马氏体相变,通过消耗能量和产生体积效应来阻碍裂纹扩展^[35–40]。对于 Al_2O_3 陶瓷,引入 ZrO_2 作为第二相是实现相变增韧最主要的途径^[41,42]。纯 ZrO_2 具有单斜相 m-ZrO_2 、四方相 t-ZrO_2 以及立方相 c-ZrO_2 3 种晶体结构,而将亚稳态的 t-ZrO_2 保留至室温是实现相变增韧的关键,因此,通常需要添加 Y_2O_3 、 CeO_2 、 MgO 等稳定剂^[39,43]。这些稳定剂在基体中形成固溶体,能够降低相变的临界温度。例如, Liu 等^[43]将不同 Y_2O_3

含量的 YSZ 引入 Al_2O_3 中, 制备 ZrO_2 增加 Al_2O_3 陶瓷发现 Y_2O_3 促进了 m-ZrO_2 下向 t-ZrO_2 的相变, 所得样品的断裂韧性提高了约 50%。

ZrO_2 的相变过程需消耗能量, 这部分能量直接来源于裂纹扩展所释放的应变能, 从而增大了裂纹扩展的阻力。此外, 相变伴随的局部体积膨胀会对周围 Al_2O_3 基体及裂纹本身施加一个压应力, 该压应力可对裂纹产生挤压效果, 裂纹必须额外做功以克服压应力才能继续延伸, 从而抑制其进一步扩展, 在宏观上表现为材料断裂韧性显著提升。Murugesan 等^[44]制备了以 Al_2O_3 为基体、 B_4C 为增强相、 ZrO_2 为增韧相的复合陶瓷, 其维氏硬度达 35.6 GPa, 弯曲强度为 468 MPa, 断裂韧性为 $6.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。研究表明, 应力诱导的相变增韧主要发生在裂纹尖端前

方, 当四方相 ZrO_2 转变为单斜相时, 所产生的压应力有效阻碍了裂纹扩展。

近年来, 许多研究集中在 ZrO_2 颗粒与 Al_2O_3 基体在显微组织层面的相互作用。Fang 等^[45]通过水热法合成短棒状单斜相 ZrO_2 , 再与 Al_2O_3 进行热压烧结, 发现当 ZrO_2 质量分数为 7.5% 时复合材料力学性能最优。Liu 等^[43]则提出了一种基于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 粉末的低温烧结方法, 发现纳米 ZrO_2 的引入可使断裂模式从沿晶断裂转变为穿晶断裂, 并最终获得断裂韧性高达 $(10.3 \pm 0.53) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的高性能陶瓷。Du 等^[46]采用机械研磨分散技术, 在 Al_2O_3 基体中构建了均匀分散的 ZrO_2 超晶格结构, 且两相界面具有良好的相容性。与传统直接掺杂相比, 该方法使复合陶瓷的弯曲强度与断裂韧性分别提高了 50% 与 83%。

表 1 ZrO_2 相变增韧 Al_2O_3 陶瓷性能
Table 1 ZrO_2 phase transformation toughened Al_2O_3 ceramic properties

ZTA type	Relative density/%	Maximum fracture toughness/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	Maximum flexural strength/MPa	Maximum hardness	Reference
ZTA	99.94	5.74	1145	19.08 GPa	[38]
	99.7	8.6	850	<20HV ₁₀	[40]
		10.3	749	16.2 GPa	[43]
TiC-ZTA	100	4.6	780	1900HV ₁₀	[47]
SiC-ZTA	99.8	7.6	1027	19.5 GPa	[35]
	97.1	16	1334	19.9 GPa	[48]
SiC _w -ZTA	99.54	4.1	1173	19.4 GPa	[49]
ZrC-ZTA	99.08	6.51	722	17.30 GPa	[50]
	98.24	11.2	1121	1847HV ₁	[51]
B ₄ C-ZTA		6.8	468	35.6 GPa	[44]
TiO ₂ -ZTA	99.93	7.92	452	1752HV	[36]
BaCO ₃ -ZTA	98	6.4	325	16 GPa	[52]

1.3 晶须与纤维增韧

晶须与纤维增韧是通过在陶瓷基体中引入高强、高模的一维增强体, 借助多种物理机制抑制裂纹扩展, 从而显著提升材料断裂韧性和损伤容限的方法^[53]。根据增强体的形态与尺度, 可分为晶须增韧、短纤维增韧和连续纤维增韧三类。

晶须是直径在纳米至微米尺度、长径比大的单晶纤维, 具有接近理论值的极高强度。在复合材料中, 当裂纹扩展遇到晶须时, 会因两者弹性模量失配而发生路径偏折, 从而增加裂纹扩展表面积和能量消耗。碳化硅(SiC)晶须是研究最广泛的体系。Liu 等^[54]在 Al_2O_3 基体中同时引入 SiC 晶须(SiC_w)及 SiC 纳米颗粒(SiC_{np}), 成功研制出断裂韧性高达 $(5.6 \pm 0.6) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的新型陶瓷切削刀具。Xing 等^[55]通过陶瓷光固化 3D 打印技术结合脱脂与烧结工艺

制备的复杂形状 SiC_w/ Al_2O_3 陶瓷部件, 获得更高断裂韧性及更高的硬度, 分别达到 $(7.1 \pm 1.20) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $(17.6 \pm 0.78) \text{ GPa}$ 。

短纤维的增韧机理与晶须类似, 但由于其尺度更大, 纤维拔出是主要的增韧机制。此外, 短纤维在基体中随机分布, 能引发更显著的裂纹偏转和裂纹分叉, 使裂纹扩展路径极度曲折。Lan 等^[56]和 Chen 等^[57]通过高频感应区熔法(IHSM)制备了 ZrO_2 纤维增强型 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 定向凝固共晶陶瓷(DSEC)。结果表明, 在相同生长速率下, ZrO_2 纤维增强型 DSEC 的断裂韧性明显高于无纤维 DSEC, 并且复合材料的断裂韧性随纤维添加呈现先增后减趋势, 在 10% 纤维含量时达到 $(5.43 \pm 0.22) \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的峰值, 较无纤维共晶陶瓷高出 1.5 倍。Aoki 等^[58]发现, 具有亚微米尺度纤维状组织

的 Al_2O_3 - GdAlO_3 (钆铝钙钛矿, GAP) 共晶微柱展现出显著的塑性变形能力。即使在室温条件下也可实现高达 5% 的工程塑性应变, 而相同测试条件下的 Al_2O_3 或 GAP 单晶微柱则呈现典型脆性断裂

特征。研究表明, Al_2O_3 -GAP 共晶体系的塑性源于 Al_2O_3 相中基面滑移与次级柱面滑移的协同激活, 而这些滑移系在室温下通常被认为处于惰性状态(图 2)。

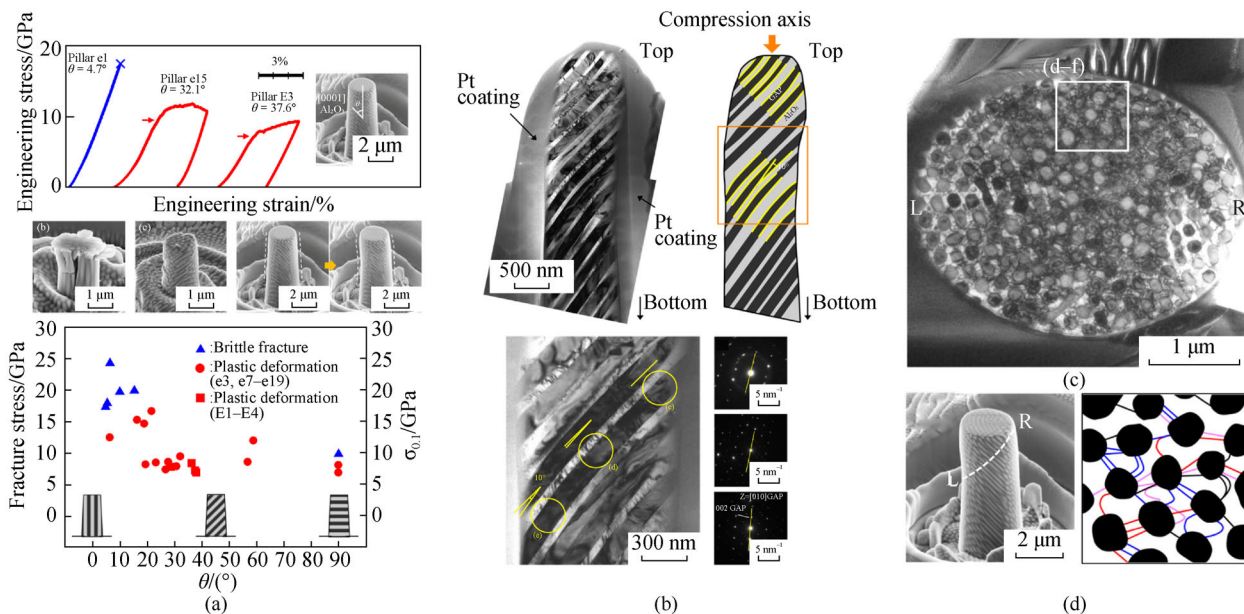


图 2 (a) Al_2O_3 -GAP 共晶微柱的变形行为; (b) E4 微柱纵截面明场 TEM 拼接照片, 标注了压缩轴方向及对应示意图; (c) E3 微柱压缩后样品的明场 TEM 照片; (d) 位错的 TEM 照片及示意图^[58]

Fig. 2 (a) Deformation behavior of the Al_2O_3 -GAP eutectic micropillars. (b) Montage bright-field TEM image of the longitudinal cross-section of Pillar E4, including the compression axis and schematic. (c) Bright-field TEM image of the specimen picked up from Pillar E3 after compression. (d) Schematic of the TEM image with observed dislocations^[58]

Jia 等^[59]制备了断裂韧性高达 $7.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 的短碳纤维增强 Al_2O_3 复合材料, 较无碳纤维的 Al_2O_3 陶瓷高出 117.4%。但碳纤维在 1500°C 热处理 1 h 后, 其拉伸强度从约 2800 MPa 骤降至约 1200 MPa, 表明短纤维增韧的核心问题在于如何防止纤维损伤或界面过强结合导致脆性断裂。

连续纤维增韧是陶瓷基复合材料(CMCs)获得损伤容限行为的根本途径^[60], 其增韧机制为多阶段协同作用过程: 基体首先在外力作用下开裂, 裂纹随后在弱结合的纤维与基体界面处发生偏转; 纤维继而在裂纹面之间形成桥联以承担载荷并最终断裂; 而断裂后的纤维从基体中被大量拔出, 此过程通过界面摩擦耗散大量能量^[61–63]。

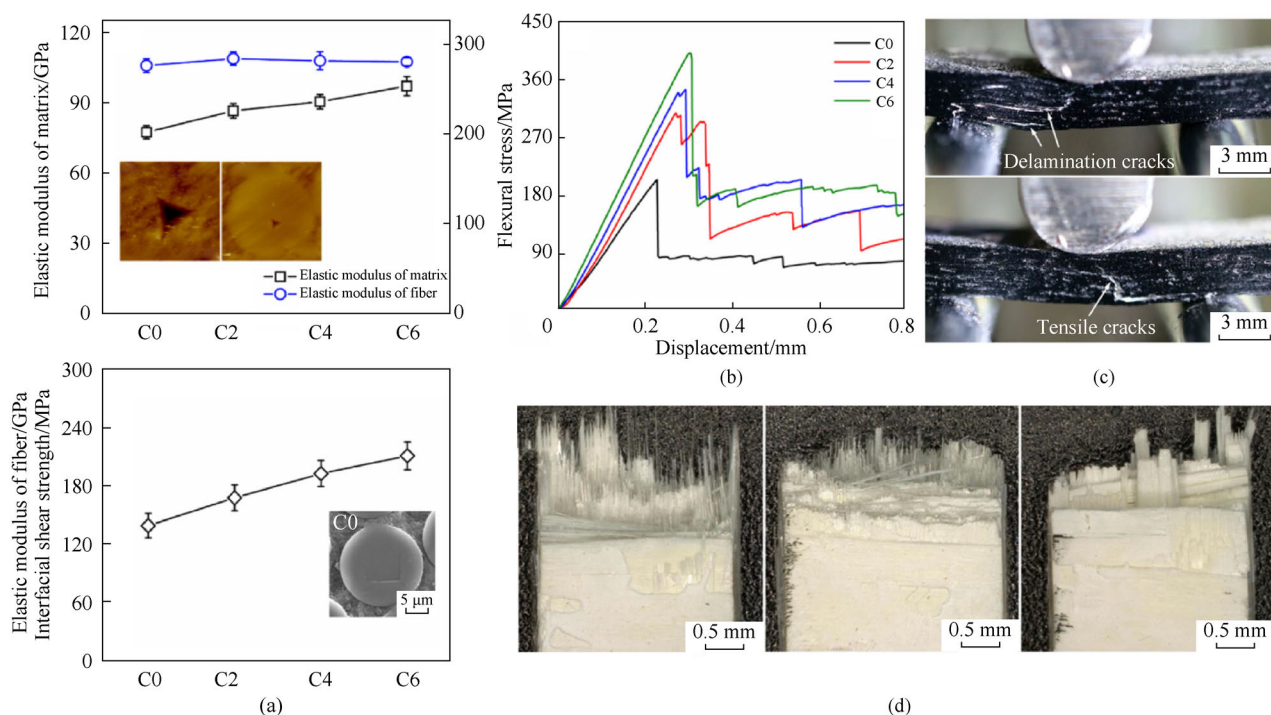
CMCs 目前的制备工艺主要为浆料浸渍(SIS)法和先驱体浸渍裂解(PIP)法^[64–67], 但分别存在烧结温度过高和需反复致密化循环而导致纤维损伤的问题^[68]。Liu 等^[69]采用 SIS 工艺对制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合材料进行致密化处理(图 3)。结果表明, 基体在 SIS 处理后得到强化, 而纤维性能保持不变。

随着 SIS 循环次数增加, 弯曲强度和层间剪切强度均呈上升趋势, 但断裂韧性逐渐降低。经 6 次 SIS 循环后性能最佳: 弯曲强度达 $(414.7 \pm 41.6) \text{ MPa}$, 断裂韧性达 $(11.0 \pm 0.3) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。该工艺有望在不牺牲损伤容限的前提下提升材料强度。Mo 等^[70]在首次浸渍中添加 Al_2O_3 粉体, 当首次裂解温度为 1000°C 且 PIP 循环次数为 3 次时, 所得复合材料表现出最高的抗弯强度, 达到 $(112.50 \pm 10.23) \text{ MPa}$, 其断裂模式为典型的非脆性断裂。

此外, 还可以通过添加烧结助剂的方式降低 CMCs 的烧结温度。Dong 等^[71]采用 MnO_2 改性 Al_2O_3 浆料浸渍法制备了 Nextel™ 610/ Al_2O_3 复合材料, 结果表明, MnO_2 的加入可有效降低复合材料的烧结温度, 当 MnO_2 掺杂量为 0.01% 时, 抗弯强度达到 405 MPa。其增强机理主要在于较低烧结温度下基体的适度致密化。

1.4 仿生结构增韧

以贝壳珍珠层、骨骼为代表的天然生物陶瓷材料以脆性成分为主, 却能在长期演变中形成兼具高

图 3 连续纤维增韧 Al_2O_3 陶瓷的应力-应变曲线及断裂特征^[69]Fig. 3 Stress-strain curves and fracture characteristics of continuous fiber-toughened Al_2O_3 ceramics^[69]

强度和韧性的多尺度结构^[72-78]。受此启发,研究者不再局限于在基体中引入单一的增韧相,而是通过先进制备技术在陶瓷内部构建仿生的非均质结构,从而引导裂纹沿预定路径耗散能量,改善陶瓷的本征脆性。类似于贝壳的“砖-泥”层状结构和“成分”梯度结构是其中最具代表性的 2 种仿生构型^[79]。

“砖-泥”层状结构模仿珍珠母的微观构型,将坚硬的陶瓷相和柔韧的界面相以软硬交替的层状结构形式复合,迫使裂纹发生偏转与桥联,可有效提升陶瓷材料的韧性^[54,80,81]。Zhang 等^[72]采用石墨烯/ Al_2O_3 复合片作为硬质砖块,同时利用 Al 层压板作为软质砂浆实现载荷分散,从而在 Al 基复合材料中实现珍珠母结构的增强效应。与纯 Al 相比,这种仿生石墨烯/ Al_2O_3 增强 Al 基复合材料的强度与韧性分别提升了 223%和 30%,各项指标甚至超越天然珍珠层。Chen 等^[82]采用 Al_2O_3 纤维设计多尺度分级结构,制备了理论损伤容限极高的仿生结构 Al_2O_3 基复合陶瓷,其理论临界裂纹尺寸与损伤容限参数较纯 Al_2O_3 分别提升 700%和 200%。Baral 等^[83]研究发现,当 Al_2O_3 与金属 Al 交替堆叠形成多层结构时,断裂韧性达到 $6.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,较纯 Al_2O_3 提升近 1 倍(图 4)。

成分梯度结构通过调控材料中不同组分的空间分布,形成弹性模量、热膨胀系数等性能平滑过渡

的区域,进而有效抑制残余应力或外部载荷引起的界面开裂。但在实际应用中,成分梯度结构的精确控制一直是该领域的难题。随着陶瓷增材制造技术的兴起,越来越多学者开始尝试将该技术应用于制备成分梯度结构。Kong 等^[84]基于光固化打印工艺提出一种新型高强度、高韧性仿生陶瓷结构制备方法。实验表明,仿生结构在韧性方面优于纯陶瓷结构,尤其当陶瓷具有梯度结构时,部件的能量吸收能力提升了 202%。另一项研究中,Li 等^[85]采用 3D 打印工艺在室温下高效制备具有成分梯度结构的 ZTA 陶瓷。研究发现,当 ZrO_2 组分比例在 10%~20% 范围内时,梯度 ZTA 样品的硬度达 9.33 GPa,最大弯曲极限载荷较非梯度棒材提升 7.96%。未来,陶瓷增材制造技术凭借其精度高、成本低、设计自由度高等优势^[3,86-93],有望在仿生结构制造领域占据主导地位。

1.5 低维碳基材料增韧

随着纳米科技的进步,以石墨烯、碳纳米管和 MXene 为代表的低维纳米材料为 Al_2O_3 陶瓷的增韧提供了新的可能^[95,96]。

均匀分散的石墨烯片(GPLs)能够作为障碍物促使裂纹发生偏转,迫使裂纹绕过片层或沿其表面扩展^[97],从而显著增加断裂表面面积与能量消耗^[98]。当裂纹贯穿石墨烯片时,片层可能发生拔出与桥联

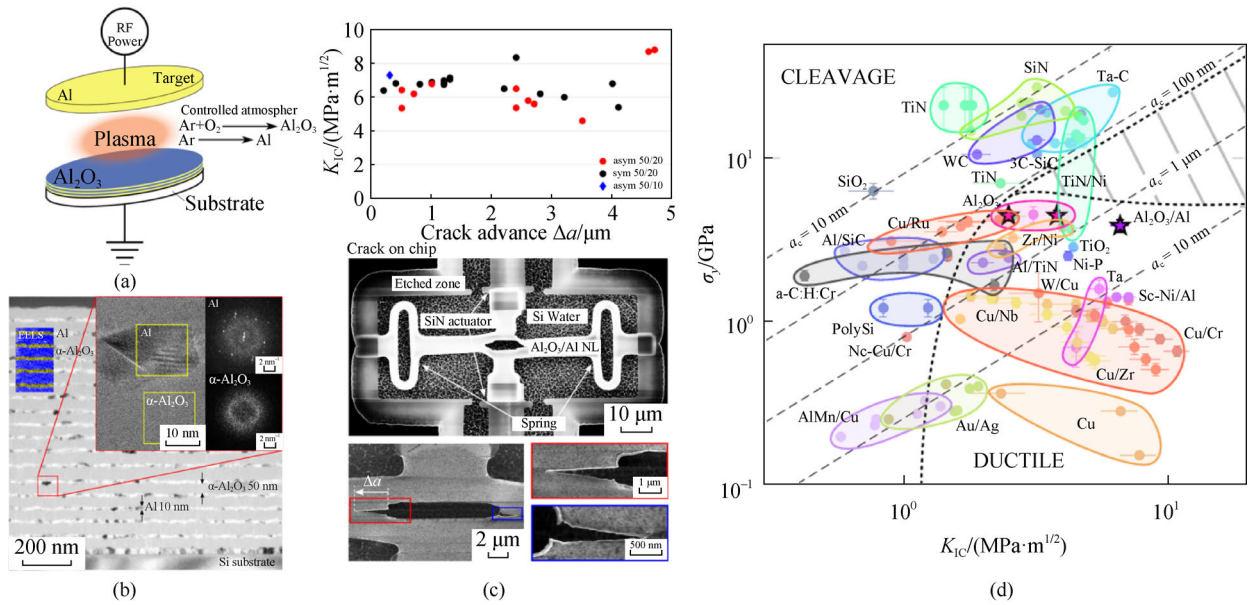


图4 (a) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 纳米层压板的沉积过程示意图; (b) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 纳米层压板的 TEM 照片; (c) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 纳米层压板通过片上裂纹测试的断裂韧性; (d) 文献中报道的单层和多层薄膜的屈服强度 σ_y 与断裂韧性 K_{IC} 的函数关系^[83]

Fig. 4 (a) Deposition of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ nanolaminates. (b) TEM characterization of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ nanolaminates. (c) Fracture toughness of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ nanolaminates through crack on chip testing. (d) Yield strength σ_y as a function of fracture toughness K_{IC} of single and multilayer thin films reported in the literature^[83]

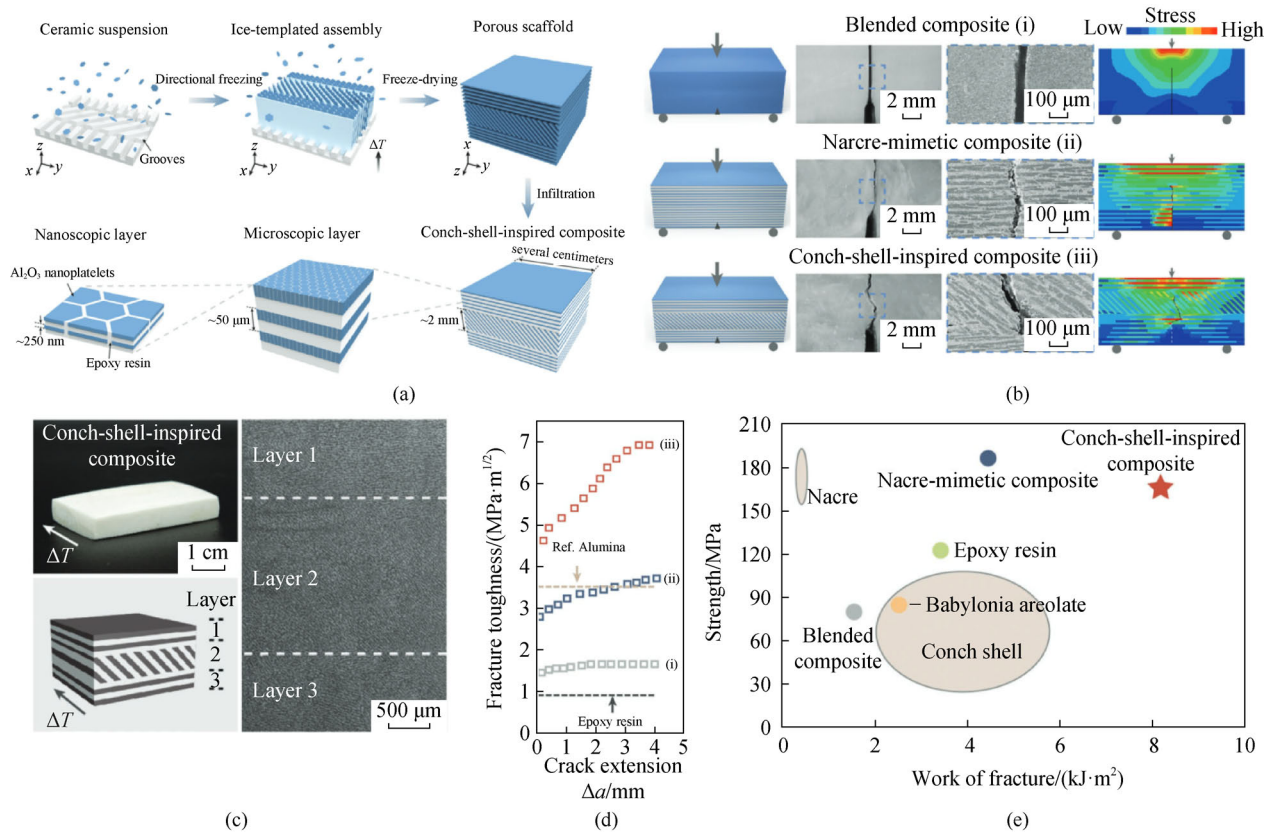


图5 仿海螺壳复合材料的分层结构示意图及与其他工程材料的性能对比图^[94]

Fig. 5 Schematic diagram of the layered structure of composite materials mimicking conch shells and performance comparison chart with other engineering materials^[94]

行为,通过界面摩擦和闭合应力进一步耗散能量^[99]。石墨烯的分散、取向及其与基体的界面结合是决定增韧效果的关键。Sun 等^[100]开发了石墨烯增强 Al_2O_3 陶瓷的三维仿真模型,系统研究了其断裂行为,揭示了包括裂纹偏转、裂纹桥联、微裂纹增韧等多种纳米尺度增韧机制。Cheng 等^[95]通过微波烧结法制备了一种以 GPLs 增强的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 复合陶瓷工具材料。与未添加 GPLs 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 基体材料相比,当 GPLs 含量为 0.2% 时, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 复合陶瓷的断裂韧性大幅提升 67.3%,而硬度仅下降 12.7%。

碳纳米管(CNTs)作为典型的一维纳米材料,其增韧机理与晶须相似,但凭借纳米级的尺寸和极高的长径比,能够在更小的尺度上实现更高效的增韧效果。此外,引入 CNTs 还能细化基体晶粒,并通过其优异的导热性缓解局部热应力,从而间接增强材料的抗损伤能力^[101,102]。早期 CNTs 增韧 Al_2O_3 的

研究面临分散困难、界面结合弱以及高温易氧化等问题。Jia 等^[103]采用溶胶-凝胶分散法制备了 CNTs 增强的 Al_2O_3 基复合材料。研究表明,随着 CNTs 含量的增加,复合材料的弯曲强度和断裂韧性较单一增强体系分别提升至 465 MPa 和 $7.08 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。Ariharan 等^[104]将 4% CNTs 引入 Al_2O_3 -YSZ 复合材料,发现 CNTs 与 3YSZ 共同作用使断裂韧性提高了 51.6%。此外,CNTs 还可促进 ZrO_2 相变,使材料性能接近理论极限(图 6)。Shi 等^[105]研究了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{TiC}$ 多相复合材料,发现 CNTs 的导电性不仅能够抑制裂纹扩展,还可通过电化学作用驱动裂纹自愈,使愈合后样品的机械强度恢复并提升 52.3%。此外,Shah 等^[106]通过火花等离子烧结工艺制备了 GPLs 与 CNTs 协同增强的 Al_2O_3 复合材料,在微观结构中观察到了裂纹桥接、偏转和分支等多种增韧机制。

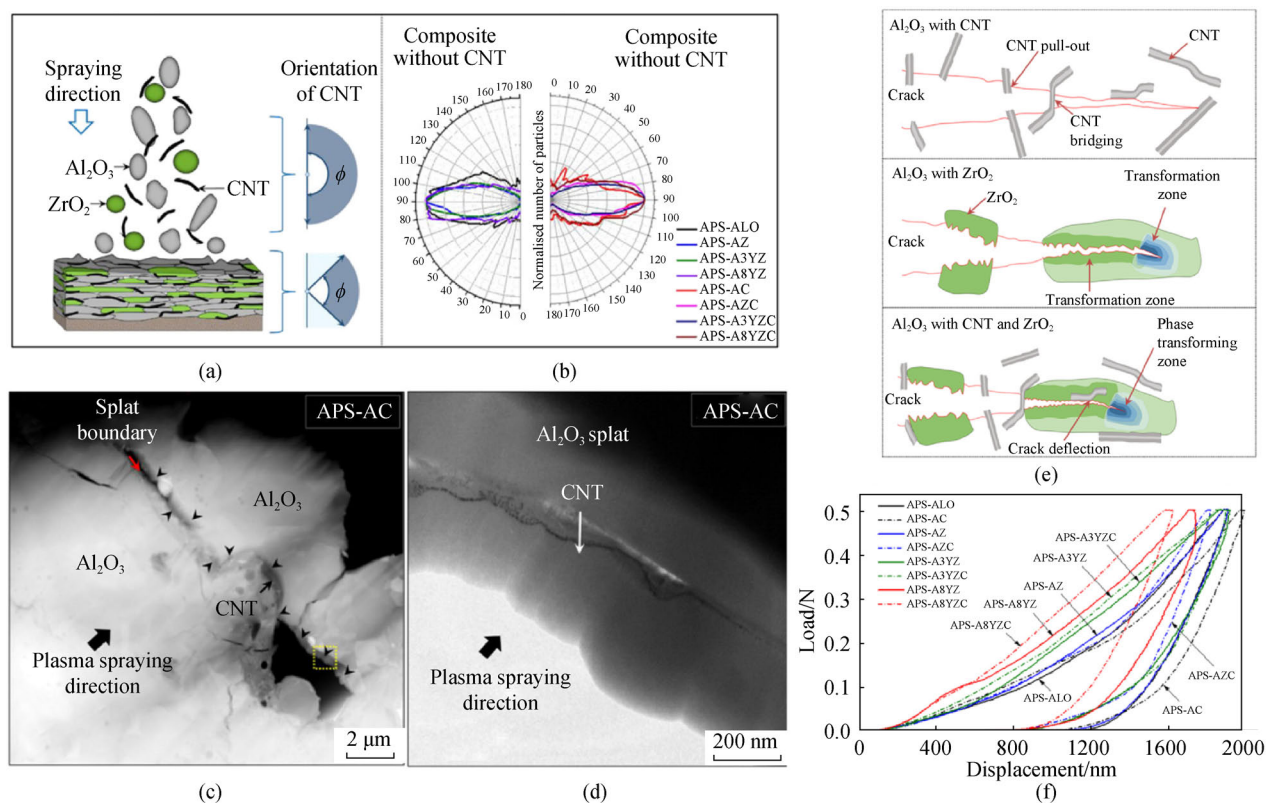


图 6 碳纳米管对 Al_2O_3 基热障涂层的增韧机制^[104]

Fig. 6 Toughening mechanism of carbon nanotubes on Al_2O_3 -based thermal barrier coatings^[104]

与石墨烯相比, MXene 具有更高的面内刚度、更良好的亲水性以及更优异的高温结构稳定性^[107], 是一类新兴的二维过渡金属碳/氮化物, 其增韧机理结合了二维材料的片层效应和自身独特的性能优势。Liang 等^[108]采用具有高热稳定性的二维 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 陶瓷, 通过类珍珠母结构设计在高

温下有效增强 Al_2O_3 陶瓷。制备的 MXene/ Al_2O_3 纳米复合材料在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的断裂韧性是纯 Al_2O_3 的 2.4 倍, 同时该材料在此温度下仍保持约 193 MPa 的高强度。

1.6 多元协同增韧

随着 Al_2O_3 陶瓷在极端环境下的应用拓展, 相

变增韧、纤维增韧等单一增韧机制常面临性能提升的瓶颈。在此背景下,多元协同增韧逐渐成为研究的新方向与前沿焦点。大量研究表明,将2种或多种增韧相与相变、桥联、裂纹偏转等不同增韧机制相结合,能够同步甚至突破性地提升材料的断裂韧性、强度、硬度及损伤容限,产生“1+1>2”的协同效应^[109]。

尽管 ZrO_2 的相变增韧机制能有效提高 Al_2O_3 陶瓷的断裂韧性,但通常会导致硬度显著降低。为解决这一问题,研究者开始探索增韧相与硬化相之间的协同作用机制。Zheng 等^[110]创新性地,在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 陶瓷中引入高熵碳化物(HEC)作为硬化相,构建出新型功能梯度陶瓷体系,实现了表面硬度(19.49 GPa)与断裂韧性($7.40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)的同步提升。

将晶须、短纤维和第二相颗粒掺入 Al_2O_3 基体中可显著提高复合材料的机械性能。Wang 等^[111]将 $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 颗粒作为增强相引入 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w$ 陶瓷刀具中,通过晶须和颗粒的协同作用有效提高复合材料的断裂韧性($6.78 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)和抗弯强度(769 MPa)。进一步研究发现, Si_3N_4 颗粒促进了复合材料在热压烧结过程中 $\beta\text{-sialon}$ ($\text{Si}_{6-z}\text{Al}_2\text{O}_2\text{N}_{8-z}$)相的形成,与 SiC_w 通过裂纹偏转、桥接与晶须拔出等机制实现韧

性提升。但随着烧结温度的升高,复合材料的力学性能和相对密度逐渐下降。

通过对晶须、纤维、石墨烯片等不同维度增强体进行结构设计,也可有效抑制裂纹扩展。例如,Lo 等^[112]研制出一种采用二维与三维 Al_2O_3 纤维毡增强的 Al_2O_3 复合材料。与纯 Al_2O_3 相比,该复合材料的三维结构使韧性提升近 74%。Cui 等^[16]通过热压工艺制备了石墨烯增强的 Al_2O_3 基复合陶瓷。结果表明,仅添加 0.2% 石墨烯纳米片就可使材料的断裂韧性提高约 35.3%, 达到 $7.78 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 弯曲强度提升约 49% 至 608.54 MPa, 同时硬度保持在 24.22 GPa 左右。

为满足高温部件在严苛服役环境下的应用需求,理想的 Al_2O_3 复合材料在高温下也应具备较高的强度与韧性。Liu 等^[54]研制出一种新型 Al_2O_3 基陶瓷工具材料(AW20P5),该材料通过 SiC 晶须与纳米颗粒的协同作用,在室温下展现出优异的综合力学性能。随着温度升高,AW20P5 的断裂韧性逐渐下降,但在 1200 °C 时因出现明显塑性行为而有所回升。研究分析表明,高温下 AW20P5 性能下降主要源于 SiC 的氧化及其弹性模量降低,而 1200 °C 时韧性回升则与微裂纹的自愈合、缺陷修复以及界面结合强度减弱等因素有关。

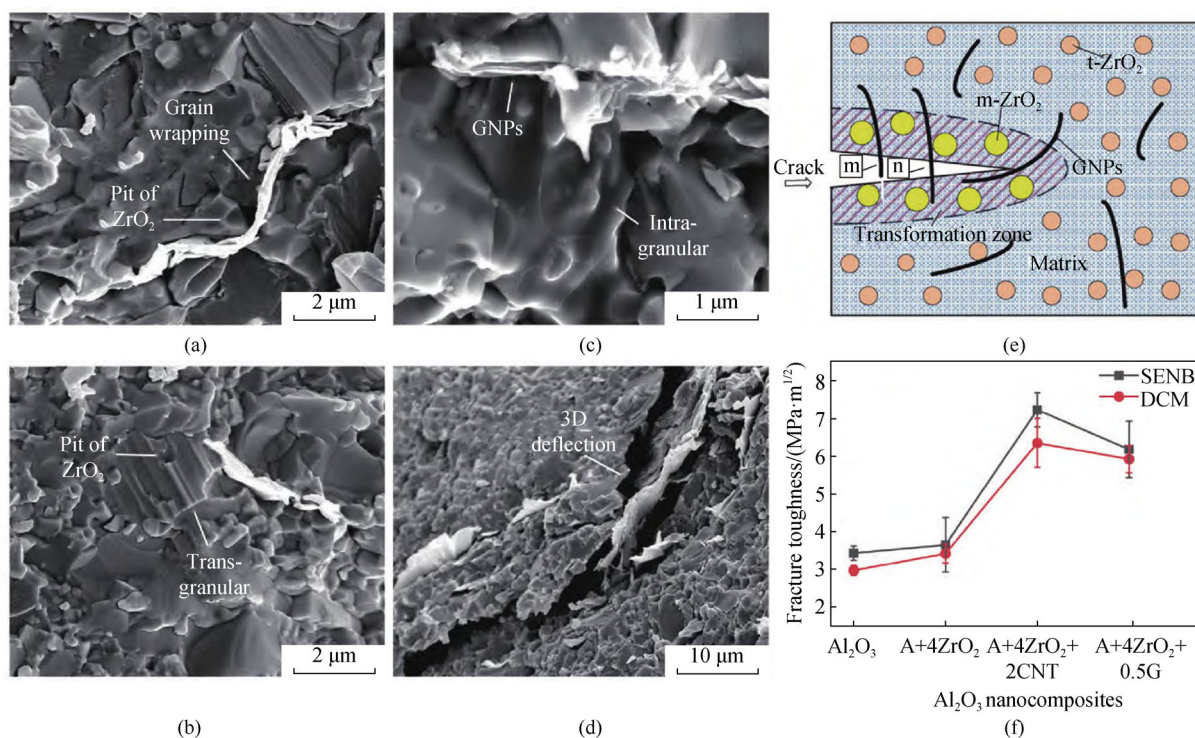
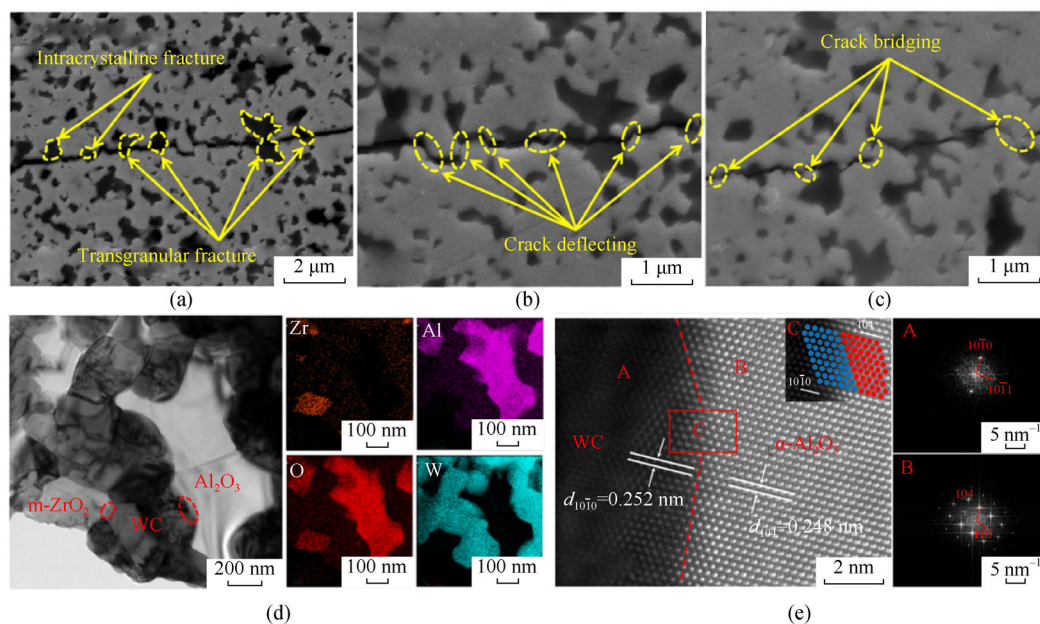


图7 石墨烯纳米片和纳米 ZrO_2 协同增韧 Al_2O_3 基复合材料的增韧机制^[4]

Fig. 7 Different toughening mechanisms for synergistic toughening of Al_2O_3 -based composites by graphene nanoplatelets (GNPs) and nano- ZrO_2 ^[4]

图 8 WC-ZrO₂-Al₂O₃ 陶瓷的协同增韧机制及显微组织^[113]Fig. 8 Synergistic toughening mechanism and microstructure of WC-ZrO₂-Al₂O₃ ceramics^[113]表 2 Al₂O₃ 基陶瓷复合材料的增韧机制Table 2 Main toughening mechanisms of Al₂O₃-based ceramic composites

Toughening type		Materials system	Fracture toughness/(MPa·m ^{1/2})	Toughening mechanism	Limitations
Particle toughening	Metal particles	Ti/Al ₂ O ₃	6.3 ^[17]	Plastic deformation	Reduce hardness and high-temperature oxidation resistance
		Ni/Al ₂ O ₃		Crack bridging	
		Mo/Al ₂ O ₃		Tip blunting	
	Non-metallic particles	TiC/Al ₂ O ₃	8.28 ^[28]	Crack deflection	Poor dispersibility
		BNMR/Al ₂ O ₃		Microcrack toughening	
Transformation toughening		Sm ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃			
		ZTA	11.2 ^[51]	Phase transition consumes energy	Reduced hardness
		SiC-ZTA		Compressive stress inhibits crack propagation	Prone to failure at high temperatures
		TiC-ZTA			
		B ₄ C-ZTA			
Whisker and fiber toughening	Whiske toughening	SiC _w /Al ₂ O ₃	7.1 ^[55]	Fiber pull-out	Costly
	Fiber toughening	ZrO ₂ /Al ₂ O ₃	11.0 ^[69]	Interfacial debonding	Suffer from significant thermal damage
		Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃		Crack deflection and bridging	Difficulties in controlling interfacial bond strength
Bioinspired structural toughening	“Brick-and-mortar” structure	GNPs/Al ₂ O ₃ /Al	6.6 ^[83]	Crack deflection	Process is complex
	Gradient structure	Al ₂ O ₃ /Al		Bridging of the hard layer	
Carbon materials toughening	Graphene	GPLs/Al ₂ O ₃ /TiC	7.08 ^[103]	Suppression of crack propagation by residual stress gradients	Difficult to produce on a large scale
				Crack deflection	
				Layer exfoliation	
	CNTs	CNTs/Al ₂ O ₃		Microcrack toughening	Difficult to disperse
				Reinforcement phase exfoliation/bridging	
Multiple synergistic toughening	MXene	Ti ₃ C ₂ T _x /Al ₂ O ₃	7.78 ^[16]	Grain refinement	The mechanism of synergistic toughening still requires systematic investigation
		Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ -HEC		“2D sheet effect”	
		Al ₂ O ₃ -SiC _w -Si ₃ N ₄		Phase-transition toughening	
		GNPs/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃		Crack deflection and bridging	
				Fiber pull-out	

2 氧化铝陶瓷复合材料的应用

Al_2O_3 基陶瓷复合材料通过诸如相变增韧、纤维增强及多元协同增韧等机制进行优化, 综合力学性能与可靠性得到了显著提升, 成功推动了 Al_2O_3 陶瓷在高端制造、国防、航空航天、半导体以及生物医疗等高科技领域的应用。

2.1 高端精密制造领域

在高端制造领域, 增韧 Al_2O_3 陶瓷刀具因其硬度高、耐磨性好、高温稳定性强, 已广泛应用于现代机械加工中^[114–118]。与硬质合金刀具相比, 增韧 Al_2O_3 陶瓷刀具在高温切削时化学惰性更强, 加工铸铁、钢件时不易产生积屑瘤, 且可高速长时间连续切削, 加工效率呈指数级提升, 能满足大批量铸铁件的生产需求。

传统的 Al_2O_3 陶瓷刀具韧性较差, 应用场景有限^[119]。而通过在 Al_2O_3 中添加少量的 ZrO_2 等增强相, 可大幅提高其韧性及抗热震性能, 成为车削不锈钢、淬硬钢、高温合金等难加工材料的首选工具之一^[114,118]。在 Al_2O_3 中添加 TiC 、 SiC 等强化相后, 机械性能进一步增加^[120], 断裂韧性提升至 $8.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 硬度最高可达 23.5 GPa ^[121], 即使在高温下也能抑制切削刀具因受热而变形, 可用于淬硬材料的高速精加工。美国 Greenleaf 公司推出的 WG-300™ 碳化硅晶须增韧 Al_2O_3 陶瓷, 碳化硅之间相互缠绕晶须的“拉拔”效应增强了陶瓷的抗断裂韧性($10.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), 在高速切削时具有超长的使用寿命, 且金属去除率比硬质合金片高 10 倍以上。

中国陶瓷刀具行业市场参与者众多, 既有京瓷(KYOCERA)、山特维克(Sandvik)等国际品牌, 也有厦门金鹭、株洲新陶等本土企业, 市场竞争十分激烈。随着中国高端制造业对加工效率和产品质量的要求不断提升, 传统刀具向高性能刀具升级, 陶瓷刀具市场规模持续扩大。据统计, 2024 年, 中国陶瓷刀具行业市场规模达 55.91 亿元, 同比增长 10.71%。

传统耐磨材料以锰钢、白口铸铁、合金钢等为主, 但存在加工困难、成本高、硬度和脆性无法平衡等问题, 无法满足恶劣工况下的使用需求。20 世纪 80 年代以来, 新型耐磨陶瓷材料以其优良的性能广泛应用于冶金、建筑、电力等领域, 大幅提高了设备的使用寿命。与金属相比, 陶瓷材料硬度大、强度高, 耐磨性相当于锰钢的 8~10 倍, 而密度仅为钢铁一半, 是今后研究发展的主要方向。增韧 Al_2O_3

陶瓷是耐磨陶瓷材料的典型代表^[122], 可用作衬套、球磨机衬板, 硬度达 HRA88 以上。

2.2 国防与航空航天领域

在国防军工领域, Al_2O_3 陶瓷凭借其高硬度、低密度、优异的抗压强度及相对较低的成本, 已成为现代装甲防护系统的核心材料之一^[123–125]。与金属装甲通过塑性变形吸收射弹动能的机理不同, Al_2O_3 陶瓷在弹头撞击瞬间使其钝化、破碎甚至熔化, 从而消耗并分散其绝大部分动能。随后, 由高韧性纤维复合材料构成的背板通过大范围的塑性变形吸收残余能量, 并最终达到降低 30%~50% 战斗伤亡率的防护效果。通常 Al_2O_3 基陶瓷装甲的抗压强度可达到 $1.9\sim 3.0 \text{ GPa}$, 抗弯强度高于 300 MPa ^[126], 已成功应用在单兵防护装备、装甲车辆、现代舰船、航空飞机等设备上。

CMCs 可借助纤维增韧机制将断裂韧性提升 3~5 倍, 同时保留了 Al_2O_3 优异的抗氧化性与抗高温蠕变性能^[127], 是下一代航空发动机的燃烧室、涡轮叶片等热端部件的优选材料^[60,127–130]。德国于 2009 年开展 HiPOC 项目, 在发动机工况下对 WHIPO™、UMOX™ 2 种 CMCs 材料制备的燃烧室进行考核(图 9)。在最大起飞推力 70%~90% 的状态下测试 10.0~12.5 h, 总体状况良好, 仅在燃烧室内发现少量裂纹, 但并未失效。美国 GE 公司研制的 Passport 20 发动机的排气混合器、中心体和整流罩等部件由 CHI 公司提供的 CMCs 材料制备, 具有更高的工作温度和燃油效率, 已应用于庞巴迪“环球”系列超远程公务机, 曾创下公务机最长航程和速度纪录^[68]。

航空发动机空心涡轮叶片精密铸造用的陶瓷型芯、型壳也可采用 Al_2O_3 基复合材料制备^[131–136]。与石英玻璃相比, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在烧结和使用过程中不会发生晶型转变, 具有更好的化学稳定性和耐高温性能, 且高温下蠕变性能更好, 因此, 更适用于定向凝固过程及单晶叶片的浇注^[137]。

2.3 半导体领域

Al_2O_3 具有机械性能、电绝缘性能好, 耐高温等优异特性, 能满足在真空、高温等特殊环境下半导体制造的性能要求, 其应用几乎覆盖所有的半导体生产设备, 包括陶瓷劈刀、半导体器件封装载板、喷嘴、轴承导轨等。

陶瓷劈刀是一种用于芯片封装领域引线键合过程中的焊接工具, 属于精密微结构陶瓷材料^[138]。劈刀在工作过程中受力复杂, 且会受到高频的摩擦,

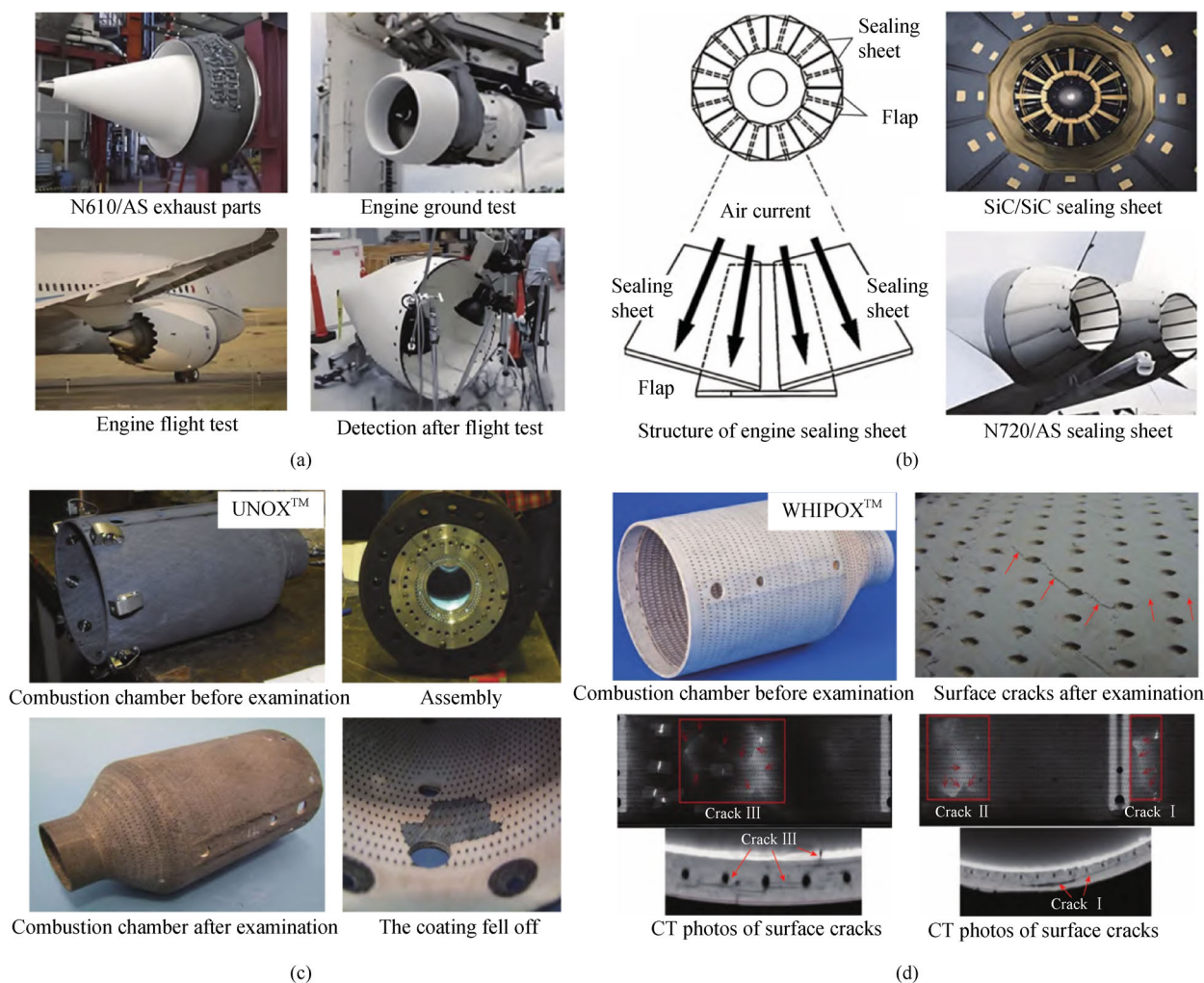


图 9 (a) N610/AS 复合材料排气部件测试过程; (b) 发动机密封片结构; (c) UMOX™ 燃烧室考核结果; (d) WHIPOX™ 燃烧室考核结果^[68]

Fig. 9 (a) Testing process for N610/AS composite exhaust components. (b) Engine gasket structure. (c) UMOX™ combustion chamber qualification results. (d) WHIPOX™ combustion chamber qualification results^[68]

因此,需要具备较高的硬度和韧性^[139]。陶瓷劈刀主要的材料为 ZTA,其微观组织均匀而致密,具有非常优异的力学性能^[140],强度可达 750~950 MPa,从而减少焊接过程中陶瓷劈刀尖端的磨损和更换次数。目前陶瓷劈刀主要厂商有瑞士 SPT、美国 K&S 和 GAISER、韩国 PECO 和 KOSMA,上述厂商全球市场占有率合计约 90%,而以三环集团为代表的中国国内厂商尚未形成规模。作为芯片封装领域的必要耗材,且受益于下游封装测试行业的较快发展及国产替代趋势,陶瓷劈刀发展前景广阔。

目前,覆铜陶瓷载板中常用陶瓷材料包括 Al_2O_3 、 AlN 、ZTA 等。与 Al_2O_3 相比,ZTA 材料具有更高的可靠性、更优异的机械强度和更高的电压耐受性,作为半导体器件封装载板被广泛应用于车规绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、发光二极管(LED)

等领域^[141]。并且随着中国新能源汽车市场快速发展,以 ZTA 陶瓷为基材的 DCB 陶瓷基板因其在新新能源汽车核心供电模块的应用而备受行业关注。主流的 ZTA 陶瓷基板相关厂商有:三环集团、CeramTec、郑州中瓷、光弘、NIKKO 等。

2.4 先进生物医疗领域

Al_2O_3 是最具代表性的生物惰性陶瓷,可用于髋关节、人造牙根、肩关节等^[142]。1937 年,法国外科医生 Pierre Boutin 首次在临床上完成 Al_2O_3 陶瓷关节植入手术^[143],但由 Al_2O_3 材料的本征脆性造成的失败案例逐渐增加,研究者们亟须寻找一种更为先进的陶瓷材料。而 ZTA 陶瓷较高的机械性能和良好的生物相容性,使其在医疗领域的应用成了行业内的研究重点之一。

牙种植体常采用 Ti 作为基材,但存在过敏等风

险。而基于 ZTA 的陶瓷种植体不仅具有较高的美学修复价值, 其良好的生物相容性也成为金属过敏患者的首选^[144]。全髋关节置换术(THA)所使用的陶瓷材料具有硬度高、耐磨等优点, 可大幅降低术后风险, 并延长人工关节寿命。目前, 用于人工髋关节置换术的陶瓷材料主要有 Al_2O_3 、 ZrO_2 以及 ZTA 3

种。与低韧性的 Al_2O_3 和易老化的 ZrO_2 陶瓷相比, ZTA 陶瓷可利用相变增韧提高其综合性能, 且在人体内不存在老化等问题, 逐渐成为 THA 的理想材料。德国 CeramTec 公司推出的 BIOLOX® delta 陶瓷关节假体采用 ZTA 复合陶瓷^[145–147], 断裂韧性高达 $6.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 可制作厚度更薄或形状不规则的假体。

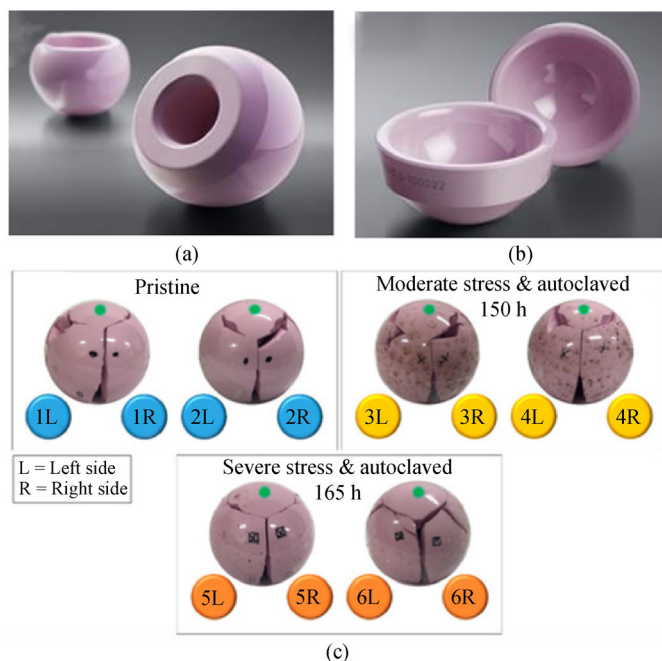


图 10 Biolox® delta 复合陶瓷人工关节及强度测试结果^[145]

Fig. 10 Biolox® delta composite ceramic artificial joint^[145]

表 3 Al_2O_3 基陶瓷复合材料的主要应用领域及其性能特征

Table 3 Main application fields and performance characteristics of Al_2O_3 -based ceramic composites

Areas of application	Typical application examples	Main material system	Key performance
Precision manufacturing	Ceramic cutting tools	ZTA	Fracture toughness: $8\text{--}10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; Hardness: 23.5 GPa (Cutting tools)
	Wear-resistant liners	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$	
	Ball mill liners	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiC}_w$	
Defense and aerospace	Ceramic armour	ZTA	Compressive strength: $1.9\text{--}3.0 \text{ GPa}$; Flexural strength $\geq 300 \text{ MPa}$ (Protective armor)
	Aircraft engine components	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiC}_w$	
	Ceramic cores	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	
Semiconductor industry	Bonding capillary	ZTA	Flexural strength: $750\text{--}950 \text{ MPa}$ (Bonding capillary)
	IC substrate	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$	
	Bearing guide rail		
Advanced biomedical technology	Artificial hip joints	ZTA	Fracture toughness: $6.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (Artificial joint)
	Dental prostheses		

3 结论与展望

本文介绍了 Al_2O_3 基复合陶瓷的主要增韧机制, 系统总结了颗粒增韧、相变增韧、仿生结构增韧、低维碳基材料增韧等机制对 Al_2O_3 陶瓷强度与韧性的影响机理。从增韧效果来看, ZTA、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiC}_w$ 、石墨烯/ Al_2O_3 等复合材料的断裂韧性已从纯 Al_2O_3

的 $3\text{--}4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 提升至 $8\text{--}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 并在刀具、装甲、航空发动机热端部件、半导体封装器件、人工关节等领域实现工程化应用。 Al_2O_3 陶瓷的强韧化研究正从单一机制向多尺度、多机制协同方向发展, 从室温性能向高温性能延伸, 从实验室样品向工程化产品转化, 有望在更广阔的工程领域中发挥其应用潜力。然而, 随着应用场景向更高温度、更复杂

载荷、更长服役寿命的方向拓展,现有增韧技术也暴露出一些亟待解决的问题。面向未来,以下几个方面值得重点关注:

1) 现有增韧研究多聚焦于单一机制或简单复合,对不同尺度增韧相之间的物理化学相容性、界面匹配规律以及多元协同增韧的耦合机理缺乏系统性的理论认识。未来应加强对多尺度模拟与原位表征技术的结合的研究,揭示裂纹在复杂微结构中的扩展动力学行为与能量耗散机制,建立微观结构与宏观性能之间的关系模型。

2) 当前增韧 Al_2O_3 陶瓷的制备仍面临诸多工艺瓶颈:金属颗粒的分散性与界面结合难以精确控制;晶须与纤维在烧结过程中的热损伤问题突出;仿生结构的复杂构型难以实现规模化制备;碳基材料的高温氧化问题尚未有效解决。未来应大力发展以增材制造为代表的先进成形技术,充分发挥其设计自由度高的优势,实现复杂仿生结构、成分梯度结构的精确可控制备。此外,磁场、超声波场等外场辅助成形技术有望实现增强相的空间有序排布,为微观结构的精准调控提供新途径。

3) 随着高端装备向轻量化、智能化、多功能化方向发展,对 Al_2O_3 基复合材料提出了更为苛刻的性能要求。未来应面向具体应用需求,利用材料基因工程与人工智能技术开展材料设计、制备工艺与使役性能一体化的系统研究。例如,针对航空发动机热端部件,可发展纤维增韧与相变增韧协同的复合材料体系;针对半导体装备,可探索石墨烯、MXene 等二维材料的功能化增韧,实现韧性与导热、导电性能的协同提升。

参考文献:

- [1] LI Q L, MENG X T, ZHANG X C, et al. Enhanced 3D printed Al_2O_3 core via *in-situ* mullite[J]. Addit Manuf, 2022, 55: 102826.
- [2] HUO M D, LI Q L, LIU J Q, et al. *In-situ* synthesis of high-performance Al_2O_3 -based ceramic cores reinforced with core-shell structures[J]. Ceram Int, 2022, 48(22): 33693–33703.
- [3] LI Q L, AN X L, LIANG J J, et al. Balancing flexural strength and porosity in DLP-3D printing Al_2O_3 cores for hollow turbine blades[J]. J Mater Sci Technol, 2022, 104: 19–32.
- [4] 张月林, 许如意, 姜如, 等. 氧化铝陶瓷增韧的研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5222–5240.
ZHANG Yuelin, XU Ruyi, JIANG Ru, et al. Acta Mater Compos Sin, 2024, 41(10): 5222–5240.
- [5] YANG K, LI Q L, CHEN T C, et al. High-performance 3D-printed Al_2O_3 cores for low-temperature sintering[J]. Ceram Int, 2023, 49(22): 36894–36906.
- [6] 陈啸. 涡轮叶片用氧化铝陶瓷型芯高温性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] CHEN Xiao. Study on the high temperature performance of alumina ceramic cores for investment casting turbine blades [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [8] KAUSHAL S, SALONI, ZEESHAN M, et al. Progress in tribological research of Al_2O_3 ceramics: A review[J]. 2023, 82: 163–167.
- [9] 程诚, 纪箴, 贾成厂, 等. MgO 和烧结温度对 Al_2O_3 陶瓷致密化过程的影响[J]. 粉末冶金技术, 2015, 33(4): 275–280.
CHENG Cheng, JI Zhen, JIA Chengchang, et al. Powder Metall Technol, 2015, 33(4): 275–280.
- [10] 张巍, 张金, 段春雷, 等. Al_2O_3 抗热震陶瓷的研究进展[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(6): 624–647.
ZHANG Wei, ZHANG Jin, DUAN Chunlei, et al. Thermal shock resistant 3D printed ceramics reinforced with MgAl_2O_4 shell structure[J]. J Shenyang Univ Technol, 2020, 42(6): 624–647.
- [11] QIU Y X, LI Q L, YANG K, et al. Thermal shock resistant 3D printed ceramics reinforced with MgAl_2O_4 shell structure[J]. J Mater Sci Technol, 2024, 178: 100–111.
- [12] QIU Y X, LI Q L, LIANG J J, et al. Control of sintering kinetics and thermal shock resistance for stereolithography 3D printed ceramics[J]. Ceram Int, 2025, 51(13): 17453–17462.
- [13] SHI S F, CHO S, GOTO T, et al. Fine Ti-dispersed Al_2O_3 composites and their mechanical and electrical properties[J]. J Am Ceram Soc, 2018, 101(7): 3181–3190.
- [14] IRSHAD H M, HAKEEM A S, AHMED B A, et al. Effect of Ni content and Al_2O_3 particle size on the thermal and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ composites prepared by spark plasma sintering[J]. Int J Refract Met Hard Mater, 2018, 76: 25–32.
- [15] SBAIZERO O, PEZZOTTI G. Influence of the metal particle size on toughness of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$ composite[J]. Acta Mater, 2000, 48(4): 985–992.
- [16] HUANG M Y, LI Z, WU J, et al. Multifunctional alumina composites with toughening and crack-healing features via incorporation of NiAl particles[J]. J Am Ceram Soc, 2015, 98(5): 1618–1625.
- [17] CUI E Z, ZHAO J, WANG X C, et al. Microstructure and toughening mechanisms of $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W}, \text{Ti})\text{C}/\text{graphene}$ composite ceramic tool material[J]. Ceram Int, 2018, 44(12): 13538–13543.
- [18] RONG Y D, ZHANG Q F, SANG G L, et al. High-strength and toughness Al_2O_3 ceramic via $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ foam hot-press sintering[J]. Ceram Int, 2025, 51(19): 28867–28875.
- [19] YILDIRIZ B K, YILMAZ H, TÜR Y K. Influence of nickel addition on the microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 -5vol% ZrO_2 ceramic composites prepared via precipitation method[J]. Int J Miner Metall Mater, 2019, 26(7): 908–914.
- [20] NI X Y, ZHAO J, SUN J L, et al. Effects of metal binder on the microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 -based micro-nanocomposite ceramic tool material[J]. Int J Miner Metall Mater, 2017, 24(7): 826–832.
- [21] 李喜坤, 修稚萌, 孙旭东, 等. 常压烧结制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$ 复合陶瓷材料[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1069–1074.
LI Xikun, XIU Zhimeng, SUN Xundong, et al. J Chin Ceram Soc, 2003, 31(11): 1069–1074.
- [22] 李永利, 张久兴, 乔冠军, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BN}$ 复相陶瓷的 R 曲线特性[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(6): 723–726.
LI Yongli, ZHANG Jiuxing, QIAO Guanjun, et al. R-curve behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BN}$ ceramic composites[J]. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(6): 723–726.

- 硅酸盐学报, 2005, 33(7): 806–810.
- ZHANG Xihua, LIU Changxia, ZHANG Jianhua. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(7): 806–810.
- [23] ZANG P A, ZHANG G F, CHEN Z Q, et al. Finite element analysis of residual stress toughening $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiB}_2/\text{h-BN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite ceramic materials[J]. J Mater Res, 2024, 39(5): 789–800.
- [24] HE W, AI Y L, LIANG B L, et al. Effects of La_2O_3 and Nb_2O_5 dopants on the microstructural development and fracture toughness of Al_2O_3 ceramic[J]. Mater Sci Eng A, 2018, 723: 134–140.
- [25] XIA X J, LI X Q, LI J M, et al. Microstructure and characterization of WC–2.8wt% Al_2O_3 –6.8wt% ZrO_2 composites produced by spark plasma sintering[J]. Ceram Int, 2016, 42(12): 14182–14188.
- [26] SHI S F, CHO S, GOTO T, et al. Ti and SmAlO_3 co-affected Al_2O_3 ceramics: Microstructure, electrical and mechanical properties[J]. J Alloys Compd, 2020, 835: 155427.
- [27] SHI S F, SEKINO T, CHO S, et al. Ti and TiC co-toughened Al_2O_3 composites by *in-situ* synthesis from reaction of Ti and MWCNT[J]. Mater Sci Eng A, 2020, 777: 139066.
- [28] LI Z Y, FU L P, GU H Z, et al. Fabrication of *in-situ* Ti(C, N) phase toughened Al_2O_3 based ceramics from natural bauxite[J]. Ceram Int, 2021, 47(18): 25497–25504.
- [29] WANG D, BAI Y F, XUE C, et al. Optimization of sintering parameters for fabrication of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}/\text{TiC}$ micro–nano-composite ceramic tool material based on microstructure evolution simulation[J]. Ceram Int, 2021, 47(4): 5776–5785.
- [30] YI M D, JING G Q, LI D P, et al. Strengthening and toughening mechanism of (W, Ti, Ta)C based cermet with the addition of c-BN/ Al_2O_3 [J]. Ceram Int, 2021, 47(22): 32075–32085.
- [31] XU Z W, ZHOU X X, PENG K, et al. High-performance B_4C – Al_2O_3 composite ceramics fabricated *via* fast hot-pressing sintering[J]. Mater Today Commun, 2024, 39: 108941.
- [32] GRIGORIEV S, VOLOSOVA M, PERETYAGIN P, et al. The effect of TiC additive on mechanical and electrical properties of Al_2O_3 ceramic[J]. Appl Sci, 2018, 8(12): 2385.
- [33] WANG J L, LU D P, XUAN W P, et al. Boron nitride microribbons strengthened and toughened alumina composite ceramics with excellent mechanical, dielectric, and thermal conductivity properties[J]. J Adv Ceram, 2024, 13(4): 496–506.
- [34] LYU X X, ZHAO Z Y, SUN H L, et al. Influence of Y_2O_3 contents on sintering and mechanical properties of B_4C – Al_2O_3 multiphase ceramic composites[J]. J Mater Res Technol, 2020, 9(5): 11687–11701.
- [35] 柴建龙. SiC–ZTA/ATZ 复相陶瓷的增韧优化及抗氢辐照性能研究[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2019.
- CHAI Jianlong. Toughening optimization and helium irradiation resistance of SiC–ZTA/ATZ composite ceramics [D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [36] JIANG H, QIAO D X, JIAO W N, et al. Tensile deformation behavior and mechanical properties of a bulk cast $\text{Al}_{0.9}\text{CoFeNi}_2$ eutectic high-entropy alloy[J]. J Mater Sci Technol, 2021, 61: 119–124.
- [37] LIU X D, YUAN Y C, WANG R J, et al. Low temperature sintering of high performance $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ ceramics with ultra-fine nanoparticles strengthening[J]. J Alloys Compd, 2024, 971: 172405.
- [38] ZHU T B, XIE Z P, HAN Y, et al. Microstructure and mechanical properties of ZTA composites fabricated by oscillatory pressure sintering[J]. Ceram Int, 2018, 44(1): 505–510.
- [39] LIU S Y, CHU H T, LU P, et al. Influence of the MgO content on zirconia-toughened alumina ceramic slurry properties and sintered body microstructure[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2025, 22(3): e15034.
- [40] KERN F, LAWITZKI R. Properties of alumina 10 vol% zirconia composites: The role of zirconia starting powders[J]. J Eur Ceram Soc, 2022, 42(2): 534–542.
- [41] 焦宝祥, 丘泰, 李纯成, 等. 浆料的固相含量对注凝成型氧化锆增韧氧化铝陶瓷的影响[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(9): 1165–1169.
- JIAO Baoxiang, QIU Tai, LI Chunheng, et al. J Chin Ceram Soc, 2004, 32(9): 1165–1169.
- [42] 李纯成, 丘泰, 焦宝祥, 等. 氧化锆增韧氧化铝陶瓷悬浮体的流变性能[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(3): 287–291.
- LI Chunheng, QIU Tai, JIAO Baoxiang, et al. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(3): 287–291.
- [43] LIU L, MAEDA K, ONDA T, et al. Effect of YSZ with different Y_2O_3 contents on toughening behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ba}-\beta\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ composites[J]. Ceram Int, 2019, 45(14): 18037–18043.
- [44] MURUGESAN A, BISWAS K. Tailoring toughening mechanisms for enhanced mechanical performance in an Al_2O_3 – B_4C – ZrO_2 composite fabricated *via* hot pressing[J]. J Alloys Compd, 2025, 1039: 182793.
- [45] FANG Y H, ZHAO X R, XIA L Q, et al. High-performance Al_2O_3 Composite ceramics modified with short rod-shaped ZrO_2 Particles[J]. Trans Indian Ceram Soc, 2023, 82(3): 246–255.
- [46] DU W Y, AI Y L, HE W, et al. Formation and control of “intragranular” ZrO_2 strengthened and toughened Al_2O_3 ceramics[J]. Ceram Int, 2020, 46(6): 8452–8461.
- [47] SCHMITT-RADLOFF U, KERN F, GADOW R. Manufacturing of electrical discharge machinable ZTA–TiC– hot pressing vs. spark plasma sintering[J]. J Eur Ceram Soc, 2018, 38(10): 3585–3594.
- [48] 刘龙阳. 热压烧结制备碳化硅强韧化 ZTA 陶瓷及其机制[D]. 海口: 海南大学, 2019.
- LIU Longyang. Fabrication of SiC reinforced-ZTA ceramics by hot-pressing sintering method and the mechanisms [D]. Haikou: Hainan University, 2019.
- [49] NIU L J, LI S F, ZHU Y B, et al. Correlation between phase content and mechanical properties of SiC_w –ZTA composites sintered by SPS[J]. Ceram Int, 2021, 47(11): 15059–15066.
- [50] 李淑芬, 朱亚滨, 郭亚威, 等. ZrC 掺杂对 ZTA 复相陶瓷微观结构和力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(12): 1723–1728.
- LI Shufen, ZHU Yabin, GUO Yawei, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(12): 1723–1728.
- [51] LI S F, ZHU Y B, CHAI J L, et al. Effects of ZrC content on the microstructure and mechanical property of ZrC/ZTA composites consolidated by hot pressing[J]. J Alloys Compd, 2021, 860: 158402.
- [52] LIU L, TAKASU Y, ONDA T, et al. Influence of *in-situ* formed Ba– β - Al_2O_3 on mechanical properties and thermal shock resistance of ZTA/Ba– β - Al_2O_3 composites[J]. Ceram Int, 2020, 46(3): 3738–3743.
- [53] 钟辛子, 曹丽云, 黄剑锋, 等. 氧化物纤维增强氧化物陶瓷基复合材料的进展[J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40(4): 121–133.
- ZHONG Xinzi, CAO Liyun, HUANG Jianfeng, et al. J Shaanxi Univ Sci Technol, 2022, 40(4): 121–133.
- [54] LIU X F, LIU H L, HUANG C Z, et al. Synergistically toughening effect of SiC whiskers and nanoparticles in Al_2O_3 -based composite ceramic cutting tool material[J]. Chin J Mech Eng, 2016, 29(5): 977–982.
- [55] XING H Y, ZOU B, WANG X F, et al. Fabrication and characterization of SiC whiskers toughened Al_2O_3 paste for stereolithography 3D printing applications[J]. J Alloys Compd, 2020, 828: 154347.
- [56] LAN D H, GAO R, LIU X D, et al. Microstructure and mechanical

- properties of ZrO₂ fiber toughened Al₂O₃/ZrO₂(Y₂O₃) solidified ceramics prepared with high frequency induction zone melting[J]. *J Alloys Compd*, 2023, 967: 171669.
- [57] CHEN Z Y, LAN D H, GAO R, et al. The effect of fibers addition on the microstructure and mechanical properties of ZrO₂ fibers toughened Al₂O₃/ZrO₂ (Y₂O₃) solidified ceramics[J]. *Mater Today Commun*, 2024, 40: 109817.
- [58] AOKI Y, MASUDA H, TOCHIGI E, et al. Overcoming the intrinsic brittleness of high-strength Al₂O₃-GdAlO₃ ceramics through refined eutectic microstructure[J]. *Nat Commun*, 2024, 15: 8700.
- [59] JIA J G, LIU D Q, GAO C Q, et al. Preparation and mechanical properties of short carbon fibers reinforced α -Al₂O₃-based composites[J]. *Ceram Int*, 2018, 44(16): 19345–19351.
- [60] 刘文广, 屈圣文, 杨利华, 等. 连续纤维增强陶瓷基复合材料增材制造研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2026, 47(1): 1–15.
LIU Wenguang, QU Shengwen, YANG Lihua, et al. *J Ceram*, 2026, 47(1): 1–15.
- [61] LIU X L, XUE J M, YANG F, et al. Design and fabrication of Al₂O₃/SiCN composite with excellent microwave absorbing and mechanical properties[J]. *J Am Ceram Soc*, 2020, 103(11): 6255–6264.
- [62] 焦秀玲, 陈代荣. 氧化铝基陶瓷连续纤维研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(8): 2738–2754.
JIAO Xiuling, CHEN Dairong. *J Chin Ceram Soc*, 2024, 52(8): 2738–2754.
- [63] LI H, LU M N, XUE Y F, et al. Processing and properties of Nextel™ 720 fiber reinforced alumina-zirconia ceramic matrix composites[J]. *Ceram Int*, 2022, 48(18): 25849–25857.
- [64] SÜß F, SCHNEIDER T, FRIEB M, et al. Combination of PIP and LSI processes for SiC/SiC ceramic matrix composites[J]. *Open Ceram*, 2021, 5: 100056.
- [65] SANTHOSH U, AHMAD J, EASLER T, et al. A polymer infiltration and pyrolysis (PIP) process model for ceramic matrix composites (CMCs)[J]. *J Am Ceram Soc*, 2021, 104(12): 6108–6130.
- [66] YAN C L, LIU R J, CAO Y B, et al. Fabrication and properties of PIP 3D C_f/ZrC-SiC composites[J]. *Mater Sci Eng A*, 2014, 591: 105–110.
- [67] MA B S, ZHU Y, WANG K W, et al. PIP process greatly influencing the microstructure and electrical conductivity of polymer-derived SiCN ceramics[J]. *J Alloys Compd*, 2019, 784: 1084–1090.
- [68] 梁艳媛, 李琼云, 刘青铜, 等. Al₂O₃/Al₂O₃ 陶瓷基复合材料制备工艺及应用[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(19): 51–67.
LIANG Yanyuan, LI Qiongyun, LIU Qingtong, et al. *Aeronaut Manuf Technol*, 2025, 68(19): 51–67.
- [69] LIU H T, JIANG R, SUN X, et al. Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃/Al₂O₃ composite densified through a slurry infiltration and sintering process[J]. *J Mater Res Technol*, 2023, 25: 2925–2935.
- [70] MO C, XIANG Y, JIANG B Z, et al. A novel polymer impregnation and pyrolysis process for fabricating Al₂O₃/Al₂O₃ composites[J]. *J Am Ceram Soc*, 2025, 108(12): e70086.
- [71] DONG R L, PENG Z H, XIANG Y. Al₂O₃/Al₂O₃ composites with high bending strength prepared via a MnO₂ modified slurry impregnation method[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2024, 44(10): 5925–5937.
- [72] ZHANG Y Y, LI X D. Bioinspired, graphene/Al₂O₃ doubly reinforced aluminum composites with high strength and toughness[J]. *Nano Lett*, 2017, 17(11): 6907–6915.
- [73] MUNCH E, LAUNEY M E, ALSEM D H, et al. Tough, bio-inspired hybrid materials[J]. *Science*, 2008, 322(5907): 1516–1520.
- [74] RITCHIE R O. The conflicts between strength and toughness[J]. *Nature Mater*, 2011, 10(11): 817–822.
- [75] BOUVILLE F, MAIRE E, MEILLE S, et al. Strong, tough and stiff bioinspired ceramics from brittle constituents[J]. *Nature Mater*, 2014, 13(5): 508–514.
- [76] STUDART A R. Turning brittleness into toughness[J]. *Nature Mater*, 2014, 13(5): 433–435.
- [77] LE FERRAND H, BOUVILLE F, NIEBEL T P, et al. Magnetically assisted slip casting of bioinspired heterogeneous composites[J]. *Nature Mater*, 2015, 14(11): 1172–1179.
- [78] WEGST U G K, BAI H, SAIZ E, et al. Bioinspired structural materials[J]. *Nature Mater*, 2015, 14(1): 23–36.
- [79] 肖灵彬, 王红洁, 苏磊, 等. 仿珍珠层结构陶瓷的研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2025, 46(1): 18–29.
XIAO Lingbin, WANG Hongjie, SU Lei, et al. *J Ceram*, 2025, 46(1): 18–29.
- [80] WILKERSON R P, GLUDOVATZ B, WATTS J, et al. A study of size effects in bioinspired, “nacre-like”, metal-compliant-phase (nickel-alumina) coextruded ceramics[J]. *Acta Mater*, 2018, 148: 147–155.
- [81] WILKERSON R P, GLUDOVATZ B, WATTS J, et al. A novel approach to developing biomimetic (“nacre-like”) metal-compliant-phase (nickel-alumina) ceramics through coextrusion[J]. *Adv Mater*, 2016, 28(45): 10061–10067.
- [82] CHEN S N, FAN H Z, SU Y F, et al. Tough and damage-tolerant composite ceramics enabled by bioinspired multiple architectures[J]. *Mater Today*, 2025, 90: 169–178.
- [83] BARAL P, JADDI S, WANG H, et al. Al₂O₃/Al hybrid nanolaminates with superior toughness, strength and ductility[J]. *Nat Commun*, 2025, 16: 1355.
- [84] KONG D K, GUO A F, WU H L, et al. Method for preparing biomimetic ceramic structures with high strength and high toughness[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(24): 40284–40296.
- [85] LI Y T, MA X, SUN X, et al. Compositionally graded structures of zirconia toughened alumina using extrusion-based 3D printing[J]. *Addit Manuf*, 2024, 88: 104275.
- [86] ZHANG K Q, HE R J, DING G J, et al. Effects of fine grains and sintering additives on stereolithography additive manufactured Al₂O₃ ceramic[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(2): 2303–2310.
- [87] QIAN C C, HU K H, LU Z G, et al. Volume shrinkage and conversion rate of Al₂O₃ ceramic stereolithography suspension polymerised by ultraviolet light[J]. *Mater Chem Phys*, 2021, 267: 124661.
- [88] 李乔磊, 李金国, 梁静静, 等. 光固化 3D 打印制备空心叶片陶瓷型芯研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(11): 1339–1344.
LI Qiaolei, LI Jinguo, LIANG Jingjing, et al. *Spec Cast Nonferrous Alloys*, 2021, 41(11): 1339–1344.
- [89] XING Z W, LIU W W, CHEN Y, et al. Effect of plasticizer on the fabrication and properties of alumina ceramic by stereolithography-based additive manufacturing[J]. *Ceram Int*, 2018, 44(16): 19939–19944.
- [90] SUN C N, TIAN X Y, WANG L, et al. Effect of particle size gradation on the performance of glass-ceramic 3D printing process[J]. *Ceram Int*, 2017, 43(1): 578–584.
- [91] ZHANG K Q, XIE C, WANG G, et al. High solid loading, low viscosity photosensitive Al₂O₃ slurry for stereolithography based additive manufacturing[J]. *Ceram Int*, 2019, 45(1): 203–208.
- [92] ZHANG K Q, HE R J, DING G J, et al. Digital light processing of 3Y-TZP strengthened ZrO₂ ceramics[J]. *Mater Sci Eng A*, 2020, 774: 138768.

- [93] KOVACEV N, LI S, ESSA K. Effect of the preparation techniques of photopolymerizable ceramic slurry and printing parameters on the accuracy of 3D printed lattice structures[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2021, 41(15): 7734–7743.
- [94] LI M, ZHAO N F, WANG M N, et al. Conch-shell-inspired tough ceramic[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, 32(39): 2205309.
- [95] CHENG Y, ZHANG Y, WAN T Y, et al. Mechanical properties and toughening mechanisms of graphene platelets reinforced $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ composite ceramic tool materials by microwave sintering[J]. *Mater Sci Eng A*, 2017, 680: 190–196.
- [96] 豆鹏飞. 碳纳米管/陶瓷复合材料的应用研究现状[J]. *陶瓷*, 2017(1): 13–17.
DOU Pengfei. *Ceramics*, 2017(1): 13–17.
- [97] 孙启航. 石墨烯增韧氧化铝基梯度陶瓷刀具的研制及其切削性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2025.
SUN Qihang. Development and cutting performance of graphene toughened alumina-based gradient ceramic tool [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2025.
- [98] 李晓龙, 许磊, 王亚松, 等. 石墨烯与陶瓷颗粒增强铝基复合材料研究进展[J/OL]. *复合材料学报*, 2026: 1–15. (2026–01–21). <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20260121.001>.
LI Xiaolong, XU Lei, WANG Yasong, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2026: 1–15. (2026–01–21). <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20260121.001>.
- [99] 陈本帅. 仿生叠层石墨烯复合陶瓷刀具研制及其切削性能研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
CHEN Benshuai. Study on the fabrication of biomimetic laminated graphene composite ceramic cutting tool and its cutting performance[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [100] SUN Z F, ZHAO J. Nano-graphene toughened Al_2O_3 ceramic materials: 3D simulation of the fracture behaviour[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(18): 28569–28577.
- [101] 康永. 碳纳米管增韧陶瓷复合材料研究进展[J]. *陶瓷*, 2016(3): 9–14.
KANG Yong. *Ceramics*, 2016(3): 9–14.
- [102] 武玺旺. 碳纳米管强韧化氧化铝陶瓷基复合材料研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
WU Xiwang. Study on the carbon nanotubes reinforced alumina ceramic composite material[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [103] JIA J G, LIU D Q, ZHANG S, et al. Effects of CNTs content on microstructure and mechanical properties of $\text{C}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{C}/\text{Cs}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ composites[J]. *Ceram Int*, 2019, 45(16): 19956–19961.
- [104] ARIHARAN S, NISAR A, BALAJI N, et al. Carbon nanotubes stabilize high temperature phase and toughen Al_2O_3 -based thermal barrier coatings[J]. *Compos Part B Eng*, 2017, 124: 76–87.
- [105] SHI S F, CHO S, GOTO T, et al. CNT-induced TiC toughened $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ composites: Mechanical, electrical, and room-temperature crack-healing behaviors[J]. *J Am Ceram Soc*, 2020, 103(8): 4573–4585.
- [106] SHAH W A, LUO X, RABIU B I, et al. Toughness enhancement and thermal properties of graphene-CNTs reinforced Al_2O_3 ceramic hybrid nanocomposites[J]. *Chem Phys Lett*, 2021, 781: 138978.
- [107] YANG Z S, ZHANG X F, JIN J L, et al. Embedding two dimensional Al_2O_3 platelets array into YSZ ceramics for high-temperature applications[J]. *Nat Commun*, 2026, 17: 2988.
- [108] LIANG L, SUN X X, NING Y H, et al. Mxene-toughened Al_2O_3 ceramic at high temperature[J]. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, 2023, 174: 107714.
- [109] 景茂祥, 沈湘黔, 李东红, 等. ZrO_2 和 Ni 复合掺杂对 Al_2O_3 陶瓷结构及性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(1): 35–40.
JING Maoxiang, SHEN Xiangqian, LI Donghong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2007, 35(1): 35–40.
- [110] ZHENG Y Q, WU X F, LIU L, et al. Functionally gradient Al_2O_3 ceramics with tailored high-entropy carbide hardening phase and ZrO_2 toughening phase[J]. *J Am Ceram Soc*, 2026, 109: e70372.
- [111] WANG Z, LIU Y, ZOU B, et al. Mechanical properties and microstructure of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w$ ceramic tool material toughened by Si_3N_4 particles[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(7): 8845–8852.
- [112] LO J, ZHANG R, SHALCHI-AMIRKHAZ B, et al. Improving Fracture Toughness of Alumina With Multi-Walled Carbon Nanotube and Alumina Fiber Reinforcements[M]. Florida: Wiley, 2015: 137–145.
- [113] CHENG Y, ZHU T B, SUN N J, et al. Synergistic strengthening and toughening of oscillatory pressure sintered WC– ZrO_2 – Al_2O_3 ceramics[J]. *J Alloys Compd*, 2022, 922: 166133.
- [114] 陈皓月. ZrO_2 增韧 Al_2O_3 基梯度陶瓷刀具的研制及其性能的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2023.
CHEN Haoyue. Preparation and performance of ZrO_2 toughened Al_2O_3 gradient ceramic tool [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2023.
- [115] 乔娟娟. TiN 晶须增韧 Al_2O_3 基复合陶瓷刀具材料的制备与性能研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2023.
QIAO Juanjuan. Research on the preparation and properties of TiN whisker toughened Al_2O_3 -based composite ceramic tool materials [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2023.
- [116] 吴利翔, 王宏建, 郭伟明, 等. 氧化锆增韧氧化铝基陶瓷刀具的制备及其切削性能[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(9): 1347–1351.
WU Lixiang, WANG Hongjian, GUO Weiming, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(9): 1347–1351.
- [117] 段晓云, 冯甜甜. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_3/\text{WC}$ 硬质合金刀具切削钛合金的表面质量研究[J]. *农业装备与车辆工程*, 2025, 63(10): 79–82.
DUAN Xiaoyun, FENG Tiantian. *Agric Equip Veh Eng*, 2025, 63(10): 79–82.
- [118] 周后明, 陈皓月, 李神贵. 基于梯度结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 陶瓷刀具材料的制备及其力学性能[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(10): 1199–1207.
ZHOU Houming, CHEN Haoyue, LI Shengui. *China Mech Eng*, 2023, 34(10): 1199–1207.
- [119] 孟祥龙, 衣明东, 肖光春, 等. 石墨烯纳米片增韧 Al_2O_3 基纳米复合陶瓷刀具材料[J]. *材料工程*, 2019, 47(1): 25–31.
MENG Xianglong, YI Mingdong, XIAO Guangchun, et al. *J Mater Eng*, 2019, 47(1): 25–31.
- [120] WANG D, BAI Y F, XUE C, et al. Optimization of sintering parameters for fabrication of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}/\text{TiC}$ micro-nano-composite ceramic tool material based on microstructure evolution simulation[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(4): 5776–5785.
- [121] 廖婷婷, 李萌崛, 陈德平, 等. Co, Ni, Ti 增韧氧化铝/碳化硅刀具复合材料的制备及性能评价[J]. *工具技术*, 2022, 56(8): 52–55.
LIAO Tingting, LI Mengjue, CHEN Deping, et al. *Tool Eng*, 2022, 56(8): 52–55.
- [122] 周后明, 曾国章, 刘景文, 等. 稀土氧化物 $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$ 增韧补强 ZTA 陶瓷材料及其耐磨性能研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(12): 14–17.
ZHOU Houming, ZENG Guozhang, LIU Jingwen, et al. *Mater Rev*, 2016, 30(12): 14–17.
- [123] 孙金贵, 厉承森, 李宗家, 等. 装甲用陶瓷及高性能纤维复合材料的应用与发展[J]. *合成纤维*, 2025, 54(9): 50–56.
SUN Jingui, LI Chengsen, LI Zongjia, et al. *Synth Fiber China*, 2025,

- 54(9): 50–56.
- [124] 杨金龙, 赵士晖, 乔坚栗, 等. 泡沫前驱体制备高性能陶瓷的研究进展与展望[J]. 硅酸盐学报, 2026, 54(3): 1083–1096.
YANG Jinlong, ZHAO Shihui, QIAO Jianli, et al. J Chin Ceram Soc, 2026, 54(3): 1083–1096.
- [125] 巩玉贤. 大尺寸异形 Al_2O_3 防弹装甲制备技术的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.
GONG Yuxian. Preparation technology research of greate size heterogeneous type Al_2O_3 [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2009.
- [126] 满蓬. 氧化铝基陶瓷复合装甲面板与背板的配置效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
MAN Peng. Study on the effect of configuration on front plate and back plate of ceramic composite armor based on Al_2O_3 [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [127] 程军. 复合材料与先进性材料在航空发动机中的应用与发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2025(9): 134–136.
CHENG Jun. Intern Combust Engine Parts, 2025(9): 134–136.
- [128] 刘伟然, 王运生, 邵长涛, 等. 莫来石纤维增强氧化铝基复合材料的微观结构及力学性能评价[J]. 纤维复合材料, 2025, 42(6): 13–16.
LIU Weiran, WANG Yunsheng, SHAO Changtao, et al. M Fiber Compos, 2025, 42(6): 13–16.
- [129] 胡继东, 许艺芬, 李媛, 等. 航天先进复合材料用特种陶瓷前驱体研究进展[J]. 高分子通报, 2025, 38(10): 1451–1462.
HU Jidong, XU Yifen, LI Yuan, et al. Polym Bull, 2025, 38(10): 1451–1462.
- [130] 朱迪. 新材料在发动机核心部件中的应用与可靠性分析[C]//第十三届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集. 南宁, 2025: 48–49.
- [131] LIU S Q, YU R L, DONG W J, et al. Effect of polysilazane on microstructure and properties of Al_2O_3 -based ceramic core for 3D printing[J]. China Foundry, 2025, 22(5): 545–554.
- [132] ZHAI X F, CHEN J Y, WANG Y R, et al. Fabrication of Al_2O_3 ceramic cores with high porosity and high strength by vat photopolymerization 3D printing and sacrificial templating[J]. Ceram Int, 2023, 49(19): 32096–32103.
- [133] ZHENG W, WU J M, CHEN S, et al. Influence of Al_2O_3 content on mechanical properties of silica-based ceramic cores prepared by stereolithography[J]. J Adv Ceram, 2021, 10(6): 1381–1388.
- [134] DONG W J, LI Q L, CHEN T C, et al. Effect of sintering temperature on microstructure and properties of 3D printing polysilazane reinforced Al_2O_3 core[J]. China Foundry, 2023, 20(5): 387–394.
- [135] QU B Y, YU R L, CHEN T C, et al. Mitigating anisotropy of vat photopolymerization 3D printing Al_2O_3 -based ceramic cores through zircon addition[J]. China Foundry, 2025, 22(5): 592–602.
- [136] HUO M D, LI Q L, YUE X Y, et al. Design and formation mechanism of *in-situ* synthesis YAG sintered necks in stereolithography 3D printed Al_2O_3 -based ceramic cores[J]. Ceram Int, 2024, 50(11): 20644–20653.
- [137] HU K H, LV Z G, LU K, et al. Additive manufacturing of complex ceramic cores and verification of casting process[J]. J Mech Eng, 2021, 57(3): 227.
- [138] 宫在磊, 王秀峰, 王莉丽. 微电子领域中陶瓷劈刀研究与应用进展[J]. 材料导报, 2015, 29(17): 89–94.
GONG Zaili, WANG Xiufeng, WANG Lili. Mater Rep, 2015, 29(17): 89–94.
- [139] 吴兵硕, 刘旭, 张玉. 应用于陶瓷封装外壳镍层表面的自动化金丝焊接方法[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(8): 101–107.
WU Bingshuo, LIU Xu, ZHANG Yu. Micronanoelectronic Technol, 2024, 61(8): 101–107.
- [140] 熊新锐, 应纪昀, 刘子玉, 等. 注射成型结合热等静压制备高性能细晶氧化锆增韧氧化铝陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 2026, 54(3): 1032–1041.
XIONG Xinrui, YING Jiyun, LIU Ziyu, et al. J Chin Ceram Soc, 2026, 54(3): 1032–1041.
- [141] 丁凯东, 李响, 卢响, 等. 氧化锆增韧氧化铝陶瓷研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(4): 75–90.
DING Kaidong, LI Xiang, LU Xiang, et al. J Mater Eng, 2025, 53(4): 75–90.
- [142] ZHANG X X, ZHANG B, MENG F C, et al. Nat Commun, 2025, 16: 11530.
- [143] 曾子彬, 陈浩明, 汪亮, 等. 牙科应用中氧化锆陶瓷的增材制造: 材料、技术与挑战[J]. 材料工程, 2026, 54(2): 40–62.
ZENG Zibin, CHEN Haoming, WANG Liang, et al. J Mater Eng, 2026, 54(2): 40–62.
- [144] 李明哲, 王威, 赵云凤. VITA In-Ceram ALUMINA 陶瓷结构及性能研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2007, 23(4): 216–217.
LI Mingzhe, WANG Wei, ZHAO Yunfeng. J Clin Stomatol, 2007, 23(4): 216–217.
- [145] DÖRING J, BUCHHOLZ A, HERBSTER M, et al. Damage analysis of retrieved Biolox[®] delta components used in hard and soft bearings[J]. Acta Biomater, 2023, 158: 827–842.
- [146] TATEIWA T, MARIN E, RONDINELLA A, et al. Burst strength of BIOLOX[®] delta femoral heads and its dependence on low-temperature environmental degradation[J]. Materials, 2020, 13(2): 350.
- [147] MASSIN P, LOPES R, MASSON B, et al. Does Biolox[®] Delta ceramic reduce the rate of component fractures in total hip replacement?[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2014, 100(6): S317–S321.

作者贡献声明:

邱宇翔: 调查研究、绘制图表、分析/综合数据并推导结论、撰写初稿

李乔磊: 论文构思、设计研究方法和实验方案、监督指导、审阅与修订

梁静静: 项目管理、监督指导、审阅与修订

周亦青: 项目管理、获取资助

COLOMBO Paolo: 论文构思、提供资源

李金国: 监督指导、审阅与修订、获取资助

Research Progress on Mechanisms and Applications of Toughening of Alumina-Based Ceramic Composites

QIU Yuxiang^{1,2}, LI Qiaolei^{1,3}, LIANG Jingjing¹, ZHOU Yizhou¹, COLOMBO Paolo^{3,4}, LI Jinguo¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China; 3. Department of Industrial Engineering,

University of Padova, Padova 35131, Italy; 4. Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, State College 16802, United States)

Extended Abstract

Alumina (Al_2O_3) ceramics are widely recognized as one of the most important structural ceramic materials due to their exceptional combination of high hardness, high mechanical strength, excellent chemical inertness, wear resistance, and resistance to high-temperature oxidation. These properties make them highly promising for applications in extreme environments, including aerospace, defense, semiconductor manufacturing, and biomedical engineering. However, the intrinsic brittleness of Al_2O_3 , arising from its strong ionic bonding and lack of effective energy dissipation mechanisms, severely limits its reliability and service life under mechanical or thermal shock. This limitation prompts extensive research into toughening strategies that preserve the material's strength, while improving its fracture resistance.

In recent years, significant progress has been made in developing multi-mechanism synergistic toughening approaches. These include particle toughening, phase transformation toughening, whisker and fiber reinforcement, biomimetic structural design, and the incorporation of low-dimensional carbon-based materials such as graphene, carbon nanotubes, and MXenes. Each mechanism contributes uniquely to hindering crack propagation and enhancing fracture toughness through different energy dissipation pathways operating in various length scales.

Particle toughening introduces ductile metallic phases (such as Ni, Ti, or Al) or rigid ceramic particles (such as TiC or BN) that induce crack deflection, bridging, and microcracking, effectively increasing the energy required for crack propagation. Phase transformation toughening, particularly through the dispersion of ZrO_2 particles, exploits the stress-induced martensitic transformation from tetragonal to monoclinic phase, which absorbs energy and generates compressive stresses around crack tips. Whiskers and fibers, such as SiC whiskers or continuous Al_2O_3 fibers, provide crack bridging, pull-out, and interfacial debonding effects that significantly enhance energy dissipation. Continuous fiber reinforcement represents the most effective approach for achieving non-catastrophic failure behavior in ceramic matrix composites.

Biomimetic strategies, inspired by natural structures like nacre, employ layered or gradient architectures to guide crack propagation along tortuous paths, significantly increasing energy dissipation during fracture. These architectures typically consist of alternating hard ceramic layers and soft compliant interfaces that force a repeated crack deflection. Also, low-dimensional materials like graphene, carbon nanotubes, and MXenes contribute to toughening through nanoscale crack bridging, sheet pull-out, and enhanced interfacial interactions, often achieving remarkable toughness improvements even at very low addition levels.

Despite these advances, several challenges remain. Achieving uniform dispersion of toughening phases, particularly nanosized reinforcements, remains difficult due to agglomeration tendencies. Controlling interfacial bonding strength is crucial, as excessively strong interfaces lead to brittle failure, while weak interfaces compromise load transfer. Maintaining thermal and chemical stability during high-temperature processing and service presents another challenge, especially for carbon-based reinforcements susceptible to oxidation. Moreover, the complex interplay between multiple toughening mechanisms is not yet fully understood, and systematic theoretical models for predicting synergistic effects are still lacking. The fabrication of biomimetic structures with a precise architectural control remains technically demanding and difficult to scale for industrial production.

Summary and Prospects In summary, the toughening of Al_2O_3 -based ceramics evolves from single-mechanism approaches to multi-scale, multi-mechanism synergistic strategies. The fracture toughness of Al_2O_3 composites is increased by 3–4 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ for monolithic alumina and by 10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ for ZrO_2 -toughened alumina (ZTA) and SiC whisker-reinforced systems. These materials are applied in high-performance cutting tools, ceramic armor, aero-engine hot-section components, semiconductor packaging substrates, and artificial joints. Nevertheless, several critical issues must be addressed to further advance their application:

1) Future research should focus on elucidating the coupled effects of multiple toughening mechanisms through *in-situ* characterization and multi-scale simulation. Understanding how cracks interact with complex microstructures will enable the design of materials with tailored energy dissipation pathways.

2) Advanced manufacturing techniques, particularly additive manufacturing, offer some opportunities for fabricating complex biomimetic architectures and compositionally graded structures. However, some issues such as fiber damage during sintering, dispersion of nano-reinforcements, and interfacial control must be resolved. External field-assisted techniques (*e.g.*, magnetic or ultrasonic fields) can enable controlled alignment of reinforcements.

3) As application demands become more stringent, future Al_2O_3 -based composites must exhibit high toughness and meet requirements for thermal shock resistance, oxidation resistance, electrical conductivity or insulation, and biocompatibility. This calls for a holistic design approach that integrates material selection, microstructure engineering, and performance optimization.

In summary, the development of high-performance Al_2O_3 -based ceramic composites is moving toward greater complexity and functionality. With continued innovation in toughening mechanisms, processing technologies, and performance evaluation, these materials are expected to play an increasingly vital role in advanced engineering applications.

Keywords alumina; toughening mechanism; fracture toughness; composite materials