

## Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub>透明陶瓷机械性能评价

张 舟, 王 皓, 涂兵田, 徐鹏宇, 王为民, 傅正义

(武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

**摘 要:** MgAlON 透明陶瓷具有优良的光学与机械性能, 在军用和民用领域均具有重要的应用潜力。本研究表征并评价了 Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub> 透明陶瓷的机械性能, 实验测定了 Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub> 透明陶瓷的维氏硬度、断裂韧性以及室温和高温断裂强度, 并使用 Weibull 函数对室温断裂强度测试结果进行统计。结果表明: 该透明陶瓷特征断裂强度为 255 MPa、断裂韧性为 2.56 MPa/m<sup>1/2</sup>、杨氏模量为 288 GPa、硬度为 15.1 GPa。样品的 Weibull 模数为 4.5, 1200℃ 下样品断裂强度达 125 MPa。同时还测定了不同载荷下 Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub> 透明陶瓷的硬度与不同载荷加载速率下的断裂强度。研究表明 MgAlON 光学透明陶瓷机械性能介于 AlON 和 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 之间。

**关 键 词:** MgAlON; 透明陶瓷; 机械性能; Weibull 统计

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Characterization and Evaluation on Mechanical Property of Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub> Transparent Ceramic

ZHANG Zhou, WANG Hao, TU Bing-Tian, XU Peng-Yu, WANG Wei-Min, FU Zheng-Yi

(State Key Lab of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Owing to excellent optical and mechanical properties, MgAlON transparent ceramic has been considered as a potential candidate for important military and civilian applications in recent years. In this study, several characterizations were conducted to evaluate the hardness, fracture toughness, and flexural strength of Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub> transparent ceramic. Flexural strength at room temperature of Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub> were further analyzed using Weibull statistic. The results show that the Vicker's hardness, flexural strength, fracture toughness, and Young's modulus of the transparent ceramic were equal to 15.1 GPa, 255 MPa, 2.56 MPa/m<sup>1/2</sup>, and 288 GPa, respectively, while the flexural strength of samples at 1200℃ was determined to be 125 MPa. The Weibull modulus of specimens was 4.5. Flexural strength and Vicker's hardness of Mg<sub>0.27</sub>Al<sub>2.58</sub>O<sub>3.73</sub>N<sub>0.27</sub> transparent ceramic were also investigated under different loading condition. The work reveals that mechanical properties of MgAlON transparent ceramic are higher than those of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> transparent ceramic, but a slightly lower than those of AlON transparent ceramic.

**Key words:** MgAlON; transparent ceramic; mechanical properties; Weibull statistic

透明结构陶瓷具有结构陶瓷材料耐高温、耐腐蚀、耐磨损、抗冲击、高硬度、高强度以及良好的电绝缘性能等特点, 并且具有优秀的光学性能<sup>[1-3]</sup>,

在紫外光、可见光和红外光波段具有良好的光学透过率, 被广泛应用于导弹整流罩、高温光学窗口、透明装甲以及手机屏幕、高级摄像镜头等领域<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2018-02-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0310500); 国家自然科学基金(51472195, 51502219)

The National Key Research and Development Program of China (2017YFB0310500); National Natural Science Foundation of China (51472195, 51502219)

作者简介: 张 舟(1991-), 男, 硕士研究生. E-mail: 15072300967@163.com

通讯作者: 王 皓, 教授. E-mail: shswangh@whut.edu.cn

刘啸等<sup>[4]</sup>成功制备了具有高光学透过率的  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷, 研究表明与 AION 相比,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  具有更宽的光学透过范围<sup>[4]</sup>, 但对该材料机械性能的研究还不充分。目前对于具有相同晶体结构的 AION 和  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  透明陶瓷材料, 人们已开展了晶粒尺寸对材料机械性能影响的研究。如 Tokariev 等<sup>[5]</sup>比较了细晶和粗晶  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷机械性能之间的差异, 得到与 Chantickul 等<sup>[6]</sup>同样的结论, 即多晶陶瓷的强度会随着显微结构的粗化而降低。Krell 等<sup>[7-8]</sup>也对不同粒径尺寸  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  透明陶瓷的硬度进行了研究, 发现细化晶粒有利于提高硬度。此外, 组分变化对透明陶瓷机械性能的影响也有报道<sup>[9]</sup>。

目前导弹整流罩应用对于光学材料的高温机械性能的要求越来越高, 并且高级摄像机镜头等应用也对部件在常温低应力情况下的机械性能提出了更高要求。为了比较  $\text{MgAlON}$  透明陶瓷与同类材料机械性能的差异, 本工作以热等静压烧结制备的  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料为研究对象, 全面评价其机械性能, 测定不同载荷以及载荷加载速率条件下的硬度、断裂强度以及高温条件下的断裂强度, 研究了  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料在上述条件下机械性能的变化规律。并将结果与同类材料  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  和 AION 透明陶瓷进行比较。

## 1 实验方法

采用高纯度  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{AlN}$  粉体为初始原料, 按照一定比例混合均匀, 经过高温固相反应得到高纯度  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  粉体。然后使用压片机对粉末轴向加压得到直径为 40 和 70 mm, 厚度为 5 mm 的圆片, 在 200 MPa 冷等静压下保压 5 min 得到生坯。生坯在  $\text{N}_2$  气氛下 1875℃ 保温 2 h, 然后在 180 MPa 的  $\text{Ar}$  气压下 1880℃ 热等静压烧结 5 h。对

热等静压烧制的样品进行切割、研磨、抛光加工后得到待测样品。

样品机械性能的测试内容、测试标准、样品规格、数目与测试仪器如表 1 所示。实验主要表征了  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的维氏硬度、断裂强度、断裂韧性以及杨氏模量。通过上述性能测试分析评价  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料的机械性能及其与同类材料的差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 断裂强度统计与断裂形貌

图 1 是样品加工后的宏观照片与光学透过率图谱, 可以看到样品在 0.38 到 4.34  $\mu\text{m}$  波长范围内光直线透过率达 80% 以上, 最大直线透过率为 3.4  $\mu\text{m}$  处的 84%, 样品具有优良的光学透明性, 适合进行材料性能的评价。图 2 是烧结样品刻蚀表面形貌的 SEM 照片, 可以看到样品中气孔很少, 高度致密, 平均晶粒尺寸约为 140  $\mu\text{m}$ 。

常温下断裂强度测试采用双环法<sup>[10]</sup>, 对测试结果进行收集和处理时使用 Weibull 数学统计模型<sup>[11-14]</sup>。为了描述材料的强度, 以 Weibull 断裂概率中最简单的一种形式表示<sup>[11-14]</sup>:

$$P = 1 - \exp[-(\sigma/\sigma_N)^m] \tag{1}$$

式中  $P$  为样品在某次测试中的断裂概率,  $\sigma$  是测试中样品断裂瞬间的实际强度,  $\sigma_N$  是材料的特征强度,  $m$  是材料的 Weibull 模数。

图 3 为  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料样品的两参数 Weibull 函数关系图, 可以看到  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  材料的 Weibull 模数  $m$  约为 4.5, 特征强度  $\sigma_N=255.54$  MPa。其断裂强度高于  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  透明陶瓷<sup>[12,15-18]</sup>, 略低于 AION 透明陶瓷<sup>[15-18]</sup>。同时材料的 Weibull 模数  $m$  也低于大部分细晶透明陶瓷材料, 而略高于粗晶 AION 材料<sup>[9]</sup>。

表 1 机械性能测试详情  
Table 1 Details of mechanical properties tests in this work

Property	Testing standards	Shape of specimens /testing condition	Number of specimens	Testing instruments
Flexural strength	ASTM C1499	Disks, $\phi$ 32.5 mm, $h=1.4$ mm	25	Universal Testing Machine (Model 810; MTS Systems Inc., Minneapolis, MN)
Fracture toughness	GB/T 23806-2009	Bars, 25 mm $\times$ 5 mm $\times$ 2.5 mm	10	
Young's modulus	GB/T 10700-2006		10	Ultrasonic Equipment (EXPLORE-9000; Matec Instruments, Hookinton, MA)
Vicker's hardness	GB/T 16534-2009	0.3-3 kg, 10 s	10	Hardness Tester (Model 430 SVD; Wolpert, Shanghai, China)
High temperature flexural strength	GB/T 14390-2008	Bars, 50 mm $\times$ 5 mm $\times$ 3.5 mm	6	Made by China Building Materials Academy

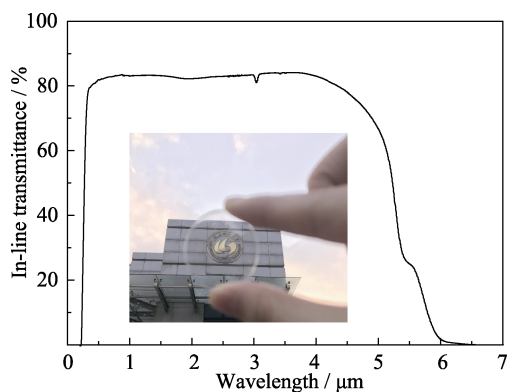


图 1  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷样品光学透过率图谱  
Fig. 1 Optical transmission spectra of  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  transparent ceramic

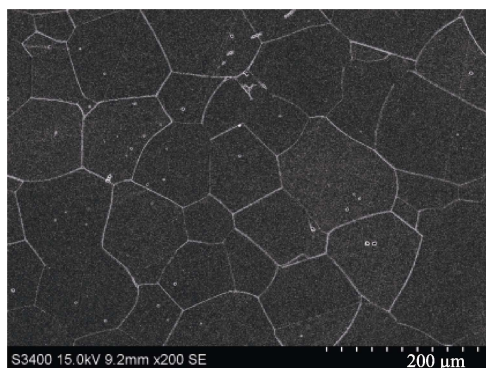


图 2  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  刻蚀表面的 SEM 照片  
Fig. 2 SEM image of etched surface of  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$

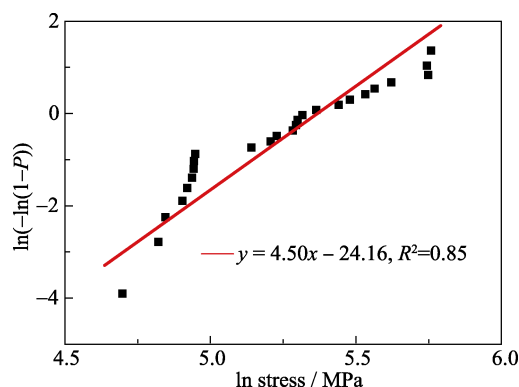


图 3  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷抗弯强度 Weibull 统计图  
Fig. 3 Fracture strength Weibull plots for  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$

从图 3 还可以看到, 强度数据点的离散性较大。这是由于在样品的断裂过程中, 导致其最终断裂的裂纹及缺陷的来源并不一致。根据文献[19-20]可知, 导致样品断裂的裂纹及缺陷来源大致可分为两类, 分别是样品内部的残余气孔或者其它杂质以及样品表面存在的棱角、裂纹或者残留的缺陷。由于本实验中样品晶粒排列整齐、尺寸分布均匀, 因此可以认为对测试强度影响较大的因素主要是样品自身的少量气孔以及样品表面大晶粒拔出造成的大尺寸缺陷。

近年来学者们<sup>[19-21]</sup>发现导致材料发生断裂的缺陷尺寸大小与形成原因均会对材料的 Weibull 统计分析产生一定影响, 造成强度统计与 Weibull 分布之间出现偏差甚至不服从<sup>[22]</sup>。本实验中的  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷样品晶粒尺寸很大, 因此低测试值样品的断裂往往来源于光学加工中样品表面大晶粒拔出或者损坏而导致的缺陷, 这些缺陷尺寸(100~300 μm)往往远大于材料内部存在的少量气孔与杂质, 并且这些缺陷尺寸分布离散程度也很大, 从而导致 Weibull 曲线中低强度部分离散度较高以及拟合直线整体的拟合度偏低。

图 4 是样品断面的 SEM 照片, 可以看到样品断面存在明显的穿晶断裂与沿晶断裂的痕迹, 并与同类脆性固体材料一样存在很典型的台阶式断面, 这些都证明  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷在断裂形式上与  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  与 AlON 陶瓷高度相似, 是一种典型的脆性固体陶瓷材料。

## 2.2 不同加载速率下的断裂强度

为了研究  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷在低应力作用下的断裂行为, 测试了不同载荷加载速率下材料的断裂强度。从图 5 可以看到, 随着载荷加载速率的降低,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的断裂强度逐渐减弱。这是由于在样品的后续研磨和抛光过程中未能消除的内部缺陷以及微裂纹在持续应力作用下扩展造成的。研究表明, 在外加应力的作用下, 这些裂纹和缺陷由静态转向动态, 而当裂纹扩展达到临界裂纹尺寸时, 样品就会发生断裂。为了更好地描述不同材料中低应力作用下微裂纹扩展的情况, 采用以下计算公式<sup>[5]</sup>:

$$\lg \sigma_f = \frac{1}{n+1} \lg v + \lg D \quad (2)$$

式中  $n$  和  $D$  都是材料的裂纹缓慢扩展系数(SCG parameters),  $v$  为载荷加载速率,  $\sigma_f$  为该载荷加载条件下测试得到的样品断裂强度。 $n$  与  $D$  只与样品本

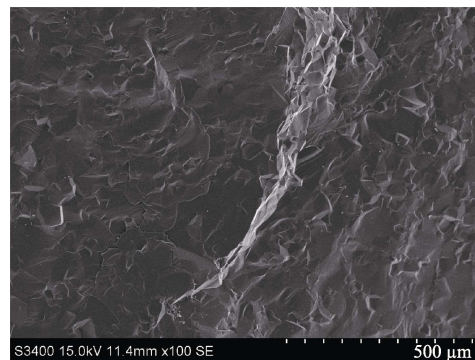


图 4 样品的断面 SEM 照片  
Fig. 4 Fractured surface SEM image of specimen

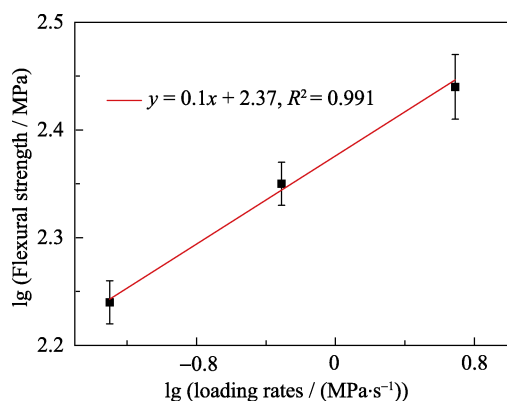


图5 不同载荷速率下  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷抗弯强度变化曲线

Fig. 5 Fracture strength as a function of loading rate for  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  transparent ceramic

身有关, 可以认为  $D$  是材料的惰性强度(无裂纹缓慢扩展的材料断裂强度),  $n$  则是表征材料裂纹缓慢扩展情况的参数,  $n$  越小代表材料越容易受到应力腐蚀影响, 裂纹缓慢扩展速率越高。根据式(2)可以计算出  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料的  $n \approx 11$ ,  $D \approx 270$  MPa; 而粗晶  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷<sup>[5]</sup>的  $n \approx 13$ ,  $D \approx 71$  MPa; 细晶  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷<sup>[5]</sup>的  $n \approx 51$ ,  $D \approx 140$  MPa。与  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷相比,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷具有更大的  $D$  值。 $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的裂纹缓慢扩展系数  $n$  与粗晶  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷相差不大, 这主要是由于样品本身的晶粒尺寸大, 而受到粒径的影响, 样品内部的均匀性较差, 材料的  $n$  值较小。考虑到  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  材料的  $D$  值远大于  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷, 虽然其  $n$  值较小, 但是其低应力作用下的断裂强度依然会高于  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷。

### 2.3 维氏硬度

实验采用压痕法研究了不同载荷下  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的维氏硬度变化。图6是  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  和  $\text{AlON}$  透明陶瓷的维氏硬度与载荷的关系, 可以看到随着载荷增大,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的硬度逐渐减小, 并趋近于稳定。这是由于在进行硬度测试时, 存在压痕尺寸效应<sup>[23-24]</sup>(ISE, Indentation Size Effect)。与同类材料<sup>[23-24]</sup>相比,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷样品硬度随载荷变化的趋势基本一致, 但是在相同载荷下,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的硬度明显高于  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  透明陶瓷, 略低于  $\text{AlON}$  透明陶瓷。

### 2.4 高温断裂强度

实验测试了不同温度下  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的断裂强度。如图7所示, 可以看到材料的断裂强度随温度的升高而降低, 且温度超过  $1000^\circ\text{C}$  之后,

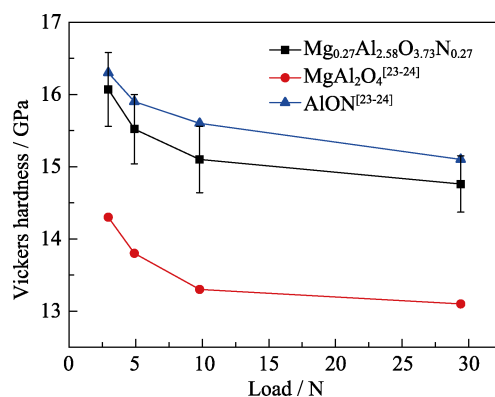


图6 不同载荷下  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  和  $\text{AlON}$  透明陶瓷的维氏硬度

Fig. 6 Vicker's hardness of  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  and  $\text{AlON}$  transparent ceramic as a function of the indentation load

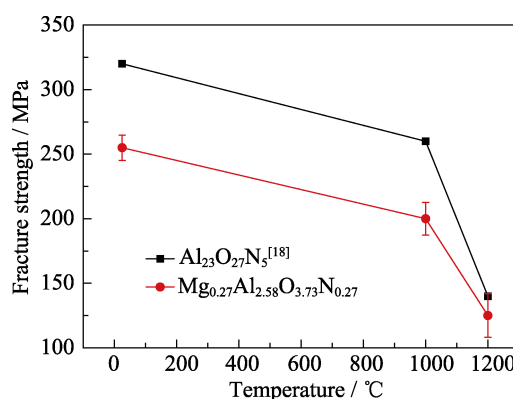


图7 高温环境下  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  和  $\text{AlON}$  透明陶瓷的断裂强度

Fig. 7 Fracture strength of  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  and  $\text{AlON}$  transparent ceramic at different temperatures

材料断裂强度快速下降,  $1200^\circ\text{C}$  时的强度只有室温时的 50%。但是相比于  $\text{AlON}$ <sup>[18]</sup>,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料断裂强度在  $1000^\circ\text{C}$  后下降幅度更小。这是由于  $\text{AlON}$  和  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的组成、结构相似, 当温度由室温升高到  $1000^\circ\text{C}$  时, 多晶陶瓷内部发生的蠕变行为导致材料的断裂强度下降。当温度上升至  $1200^\circ\text{C}$  时,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  及  $\text{AlON}$  透明陶瓷都会发生氧化, 而  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷与  $\text{AlON}$  透明陶瓷不同的氧化行为<sup>[25]</sup>以及两种材料不同的热膨胀系数, 均可能影响材料高温断裂强度。具体原因还需要在之后的工作中进行深入研究。

实验还表征了  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷样品的断裂韧性及杨氏模量, 如表2所示。可以看到  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷样品的机械性能介于  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  透明陶瓷与  $\text{AlON}$  透明陶瓷之间, 更接近于  $\text{AlON}$  透明陶瓷<sup>[18]</sup>。由于这类致密多晶陶瓷材料的机械性能受到材料本身组成的影响, 通过对  $\text{MgAlON}$  材料组成的合理设计, 有望改善其机械性能。

表 2  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  的机械性能与  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  和 AION 对比  
Table 2 Mechanical properties of  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  compared with  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  and AION

	Vickers hardness (9.8 N)/GPa	Young's modulus/GPa	Flexural strength/MPa	Fracture toughness/( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ )
$\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$	15.1±0.5	288±7	255±10	2.56±0.2
$\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [15]	13.3	277	190	1.8±0.2
AION [15]	15.5	315	300	2.9

### 3 结论

本研究比较全面地评价了  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的机械性能, 测定了不同载荷下材料的维氏硬度与不同加载速率下的断裂强度, 采用 Weibull 统计函数分析了  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的断裂强度。结果表明  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷的机械性能介于  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  和 AION 透明陶瓷之间, 且更接近于 AION 透明陶瓷, 同时其断裂强度与维氏硬度随测试条件的变化规律与同类透明陶瓷基本一致。此外, 与 AION 和  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  透明陶瓷相比,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷还具有以下特点: 当晶粒尺寸相近时,  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料的断裂强度在 1000~1200 °C 中下降幅度小于 AION 透明陶瓷;  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  透明陶瓷材料的裂纹缓慢扩展系数  $n \approx 11$ ,  $D \approx 270$  MPa, 其  $D$  值远高于  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  透明陶瓷, 而  $n$  值则与粗晶  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  陶瓷接近。

### 参考文献:

- [1] GOLDSTEIN A, KRELL A. Transparent ceramics at 50: progress made and further prospects. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, **99**(10): 3173–3197.
- [2] DU MERAC M R, KLEEBE H J, MÜLLER M M, *et al.* Fifty years of research and development coming to fruition; unraveling the complex interactions during processing of transparent magnesium aluminate ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) spinel. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, **96**(11): 3341–3365.
- [3] KRELL A, HUTZLER T, KLIMKE J, *et al.* Fine-grained transparent spinel windows by the processing of different nanopowders. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, **93**(9): 2656–2666.
- [4] LIU X, WANG H, TU B, *et al.* Highly transparent  $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$  ceramic prepared by pressureless sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, **97**(1): 63–66.
- [5] OKARIEV O, SCHNETTER L, BECK T, *et al.* Grain size effect on the mechanical properties of transparent spinel ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, **33**(4): 749–757.
- [6] CHANTIKUL P, LAWN B R, MARSHALL D B. Micromechanics of flaw growth in static fatigue: influence of residual contact stresses. *Journal of the American Ceramic Society*, 1981, **64**(6): 322–325.
- [7] KRELL A, BALES A. Grain size-dependent hardness of transparent magnesium aluminate spinel. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, **8**(5): 1108–1114.
- [8] KRELL A, BLANK P. Grain size dependence of hardness in dense submicrometer alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, **78**(4): 1118–1120.
- [9] WAETZIG K, KRELL A. The effect of composition on the optical properties and hardness of transparent Al-rich  $\text{MgO}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$  spinel ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, **99**(3): 946–953.
- [10] ASTM C 1499-05, Standard Test Method For Monotonic Equibiaxial Flexural Strength of Advanced Ceramics At Ambient Temperature.
- [11] KLEIN C A, MILLER R P. How to do a Weibull statistical analysis of flexural strength data: application to AION, diamond, zinc selenide, and zinc sulfide. *Proc SPIE*, 2001, **4375**: 241–257.
- [12] KLEIN C A. Flexural strength of infrared-transmitting window materials: bimodal Weibull statistical analysis. *Optical Engineering*, 2011, **50**(2): 023402–1–10.
- [13] KLEIN C A, MILLER R P, GENTILMEN R L. Characteristic strength and Weibull modulus of selected infrared-transmitting materials. *Optical Engineering*, 2002, **41**(12): 3151–3160.
- [14] MROZATJ, HARTNETT M, WAHL J M. Recent advances in spinel optical ceramic. <http://www.surmet.com/pdfs/news-and-media/SURMET-WHITE-PAPER-Recent-Advances-in-Spinel-Optical-Ceramic.pdf>. 2011-03-15.
- [15] HARRIS D C. Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance. Washington: SPIE, 1999: 84–121.
- [16] KRELL A, HUTZLER T, KLIMKE J. Transmission physics and consequences for materials selection, manufacturing, and applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, **29**(2): 207–221.
- [17] JONATHAN A S. Transparent armor ceramics as spacecraft windows. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, **96**(1): 281–289.
- [18] HARTNETT T M, MAGUIRE E A, GENTILMEN R L, *et al.* Aluminum Oxynitride Spinel (AION): a New Optical and Multi-mode Window Material. New England Section Topical Meeting on Nonoxide Ceramics, USA, 1981: 67–76.
- [19] U H H K, JAHANNIR S. Scratching and grinding of a machinable glass-ceramic with weak interfaces and rising T-curve. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, **78**(2): 497–500.
- [20] U H H K, JAHANNIR S, LEWIS K. Effect of grinding on strength of tetragonal zirconia and zirconia-toughened alumina. *Machining Science & Technology*, 1997, **1**(1): 49–66.
- [21] EE S K, TANDON R, READY M J, *et al.* Scratch damage in zirconia ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, **83**(6): 1428–1432.
- [22] LANGE F F. Powder processing science and technology for increased reliability. *Journal of the American Ceramic Society*, 1989, **72**(1): 3–15.
- [23] ANSTIS G R, CHANTIKUL P, LAWN B R, *et al.* A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, direct crack measurements. *Journal of the American Ceramic Society*, 1981, **64**(9): 533–538.
- [24] QUINN J B, QUINN G D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach. *Journal of Materials Science*, 1997, **32**(16): 4331–4346.
- [25] SU X, ZHOU N, ZHANG S. Oxidation behavior of aluminum oxynitride spinel (AION) and its interaction with  $\text{MgO}$  and  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  at elevated temperatures. *China's Refractories*, 2002, **36**(3): 136–138.