

DOI: 10.11973/jxgccl202212001

陶瓷材料抗热震性的研究进展

赵婷婷^{1,2}, 范立坤¹, 黎 阳²

(1. 上海材料研究所, 上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437;

2. 上海第二工业大学环境与材料工程学院, 上海 201209)

摘要: 当陶瓷材料受到温度骤变时产生的热应力超过其强度时, 材料会发生开裂、剥落甚至断裂, 进而失效, 因此研究陶瓷材料的抗热震性成为热点。简述了陶瓷材料抗热震性评价理论以及抗热震性的测试与表征方法, 综述了提高抗热震性的方法, 包括补强增韧、提高热导率、降低热膨胀系数、降低弹性模量等, 总结了影响抗热震性的外部因素, 提出了今后提高陶瓷材料抗热震性的发展方向。

关键词: 陶瓷材料; 抗热震性; 热应力断裂; 影响因素

中图分类号: TB35

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2022)12-0001-08

Research Progress on Thermal Shock Resistance of Ceramic Materials

ZHAO Tingting^{1,2}, FAN Likun¹, LI Yang²

(1. Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation,

Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China;

2. School of Environmental and Materials Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: When the thermal stress caused by sudden temperature change of ceramic materials exceeds its strength, materials will happen to crack, peel and even fracture, and then failure. Therefore, the study of thermal shock resistance of ceramic materials becomes a hot spot. The evaluation theory of thermal shock resistance of ceramic materials and the methods for testing and characterizing are described. The methods of improving thermal shock resistance, including strengthening and toughening, improving thermal conductivity, reducing thermal expansion coefficient, and reducing elastic modulus, are reviewed. The external influencing factors of thermal shock resistance are summarized. The development direction of improving thermal shock resistance of ceramic materials in future is proposed.

Key words: ceramic material; thermal shock resistance; thermal stress fracture; influence factor

0 引言

陶瓷材料具有高熔点、高强度、良好的化学和物理稳定性等特点, 在苛刻的服役环境中具有巨大的应用潜力^[1]; 但由于陶瓷材料本身是脆性的, 在经历温度骤变时, 热膨胀或收缩所引起的热应力会导致脆性的陶瓷材料开裂、剥落甚至断裂, 这使得陶瓷材料的应用范围受到限制^[2]。抗热震性(又称抗热冲击性)是指陶瓷材料能够承受温度急剧变化的能力,

是衡量陶瓷材料使用性能的一项重要指标^[1]。研究陶瓷材料的抗热震性对其实际应用具有重要意义, 提高抗热震性一直是陶瓷材料领域的研究热点之一。为了给相关工作人员提供参考, 作者对陶瓷材料抗热震性的国内外研究进展进行了总结, 简述了陶瓷材料抗热震性理论、表征方法的发展进程以及影响陶瓷材料抗热震性的外部因素, 指出了提高陶瓷材料抗热震性的方法, 并给出了未来的研究方向。

1 抗热震性评价理论

材料外部温度波动时会导致其内部产生热应力, 从而产生热应力裂纹, 当裂纹积累到一定程度后材料会发生失效。抗热震性表征的是材料抵抗温度

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2022-09-06

作者简介: 赵婷婷(1995—), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生

通信作者(导师): 范立坤高级工程师

急剧变化的能力,是材料力学性能(断裂韧性、抗弯强度、弹性模量)和热学性能(热膨胀系数、热导率)对受热情况的综合反应^[3]。陶瓷材料的热震破坏方式主要分为两类,一类是热冲击作用下的瞬时断裂,另一类是热冲击循环作用下的开裂、剥落、整体破坏。基于热震破坏方式得到陶瓷材料的抗热震性评价理论,分别为热应力断裂理论和热冲击损伤理论^[4-5]。

热应力断裂理论以材料的断裂强度和受到的热应力之间的平衡条件为依据,当热应力高于断裂强度时,材料将发生断裂;此理论侧重于裂纹形核阶段^[6],适用于高强度致密陶瓷材料,但无法解释含微孔陶瓷材料的抗热震性,相关的公式为

$$R = \frac{\sigma_f(1-\nu)}{E\alpha} \quad (1)$$

$$R' = \frac{\sigma_f(1-\nu)}{E\alpha}\lambda \quad (2)$$

式中: R, R' 分别为第一、第二热应力断裂抵抗因子; α 为热膨胀系数; ν 为泊松比; E 为弹性模量; σ_f 为断裂强度; λ 为热导率。

由热应力断裂理论可以看出,要得到高的抗热震性陶瓷材料需降低材料的弹性模量、热膨胀系数以及提高材料的断裂强度、热导率。

热冲击损伤理论以材料的断裂能和弹性应变能之间的关系为依据,当材料中存储的应变能超过材料的断裂能时,裂纹形成并扩展,材料产生热震损伤^[7];此理论侧重裂纹扩展阶段^[8],适用于低强度多孔陶瓷材料,且仅限于裂纹扩展阶段抗热震性能的评价,相关的公式为

$$R'' = \frac{E}{\sigma_f^2(1-\nu)} \quad (3)$$

$$R''' = \frac{2E\gamma_E}{\sigma_f^2(1-\nu)} \quad (4)$$

式中: R'', R''' 分别为抗热震损伤因子; γ_E 为断裂能。

由热冲击损伤理论可知,抗热震性好的陶瓷材料应具有低的断裂强度、高的断裂能和弹性模量。

王润泽等^[9]研究发现,熔融石英颗粒复合材料的抗热震损伤因子(R''')与断裂能成正比,断裂能越大,抗热震性能越好。LI等^[10]研究发现,在实际使用过程中陶瓷的热冲击初始温度应尽量选择合适区域, R' 的适用范围存在局限性,盲目用 R' 来反映材料抗热震损伤状态的所有情况是不合理的。王守仁等^[11]通过试验和有限元模拟方法发现, R' 与陶瓷材料的热震温差呈线性关系,即热震温差越大, R' 越

小,材料的抗热震性能越差。

由于热应力断裂理论与热冲击损伤理论侧重的阶段不同,同时两者的适用范围不一致,因此HASSELMAN等^[8,12]将这2个理论结合起来,提出了热应力裂纹稳定性因子 R_{st} ,得出提高陶瓷材料的热导率、抗拉强度以及降低其弹性模量、热膨胀系数可提高其抗热震性的结论,此观点被广大学者接受并应用。 R_{st} 的表达式为

$$R_{st} = \left(\frac{\gamma_E \lambda}{\alpha^2 E} \right)^{1/2} \quad (5)$$

近年来,一些新的抗热震性评价理论相继出现。王凤森等^[13]将抗弯强度 σ 与 R_{st} 的乘积 σR_{st} 作为新的抗热震参数,可实现材料抗弯强度和抗震性的最优化。ZHOU等^[14]构建了多层层压陶瓷材料临界热震温差与材料力学性能、断裂能、层数之间的关系,建立了可以作为层压陶瓷的定性或定量分析工具来评价其抗热震性。李定玉^[15]在HASSELMAN等提出的理论基础上,建立了降温、升温及主动冷却(非表面急剧降温)等不同环境下材料抗热震性的热-损伤表征模型,并研究了不同材料在不同环境下的抗热震性。

2 抗热震性的测试与表征方法

常用抗热震性的测试方法主要有残余强度法、循环热震法和压痕法。残余强度法^[16]通过将试样在烧结炉中加热至指定温度,在空气、水等介质中淬火冷却后测得的残余抗弯强度来表征抗热震性能;该方法可以直接确定陶瓷材料抗热震性能的好坏,但所需试样数量大,试样不能重复使用,且测试条件需要根据试验要求,如热震温度^[17]、热震介质^[18]而定。循环热震法是以温度循环过程中试样出现裂纹或发生断裂前的热震循环次数作为判断依据,陶瓷材料抗热震性的好坏主要靠测试人员主观意识决定。压痕法^[19]是指采用维氏硬度计在经过抛光处理的试样上预制初始裂纹,在设定的热震温差下进行试验,利用光学显微镜观察裂纹的扩展情况以判断抗热震性能的一种方法;该方法中的试样可以重复利用,测试结果更直接,可人为控制裂纹位置、尺寸和形状,测试成本低,但难以选择合适的载荷^[20]。

目前,陶瓷材料抗热震性的表征指标主要包括热震后的抗弯强度保持率和抗弯强度损失率以及临界热震温差、 R 参数、弹性模量等。董伟霞等^[21]以热震循环3次后的常温抗弯强度保持率来表征不同

晶粒尺寸莫来石陶瓷的抗热震性能;李中秋^[22]研究了残余抗弯强度与热震温差的关系,利用残余抗弯强度出现突降温度的高低来作为判断陶瓷材料抗热震性能的依据;XIANG等^[23]用脉冲激励法,通过动态弹性模量来评价复相陶瓷材料的抗热震性能;EICHLER等^[24]研究发现,在热震试验中,随着2Y-TZP陶瓷粒径的增加, R 呈线性增大趋势,且 R 变化越明显,材料的抗热震性越好。

虽然有些研究认为,250℃至室温连续热震循环3次后未出现裂纹的陶瓷材料称为高抗热震陶瓷^[25],但此类材料主要用于制作烹饪器皿,不适合用于工业及其他领域。用同一种方法表征陶瓷材料的抗热震性能时,不同学者得到不同材料的抗弯强度保持率、临界热震温差等表征范围不一致,基本认为这些数据越大,陶瓷材料的抗热震性能越好。目前在实验室环境中陶瓷材料的抗热震性主要用室温下残余抗弯强度为初始强度70%时的热震温差来表征^[15],但此方法难以真实反映高温环境下热冲击对陶瓷材料力学性能的影响。因此,开发出准确和简便的表征方法是目前研究陶瓷材料抗热震性急需解决的问题。

3 提高抗热震性的方法

3.1 补强增韧

根据热应力断裂理论,当材料受到的热应力大于其断裂强度时,材料将会断裂,因此提高材料的强度可提高材料的抗热震性。目前提高陶瓷材料强度的方法主要包括工艺优化和第二相增强^[26]。工艺优化是指优化陶瓷制备工艺,减少陶瓷的内部缺陷,从而达到增强效果的方法;第二相增强是指在陶瓷基体中引入第二相,利用第二相与基体之间的性能匹配度不同而对基体起到强化作用的方法。相较于工艺优化,第二相增强的效果更明显。增强补韧的主要途径包括颗粒增强、相变增韧、纤维或晶须增韧以及复合增韧等^[27],常用的第二相包括氧化物颗粒(如氧化铝等)、非氧化物颗粒(如碳化物等)以及金属或金属间化合物颗粒。

3.1.1 颗粒增强

当陶瓷材料受到外力作用导致裂纹萌生并扩展时,第二相颗粒的钉扎作用可以使裂纹尖端在颗粒处发生弯曲而产生线张力,从而提高断裂能;根据热冲击损伤理论,第二相颗粒可以产生增强增韧效果。吕珺等^[28]研究发现, Al_2O_3 陶瓷的热震温差为300℃

时,残余抗弯强度保持率仅为22%,而在 Al_2O_3 陶瓷中添加质量分数25% TiC颗粒后,热震温差升高至800℃后,残余抗弯强度保持率却达到64%,弥散分布的TiC颗粒对裂纹起到钉扎作用,对基体晶粒的长大起到阻碍作用,从而提高了陶瓷的强度。李家茂等^[29]在 Al_2O_3 陶瓷中加入 MnO_2 、 MgO 等颗粒后,陶瓷的抗热震性和致密性能明显提高。MANSHOR等^[30]在ZTA(ZrO_2 增韧 Al_2O_3)复相陶瓷材料中加入 TiO_2 颗粒后,其断裂韧性、硬度、致密性、抗热震性能都有所提高。樊传刚等^[31]在 ZrO_2 陶瓷中添加 MgO 与 CaO 颗粒制得的复合陶瓷具有较高的抗弯强度和较理想的抗热震性。

除了氧化物、碳化物等第二相颗粒外,在陶瓷材料中引入金属颗粒也可以提高其抗热震性能。田忠良等^[32]研究发现,未添加铜颗粒的复相金属陶瓷经过3次热震循环后破裂,但添加铜颗粒后经10次热震循环后仍完好,且随着铜颗粒添加量的增加,金属陶瓷的抗热震性能提高。陶瓷材料基体中的气孔、晶界、金属颗粒都对裂纹扩展起到阻碍作用,其中金属颗粒的阻碍作用最显著^[33]。金属颗粒的加入增加了陶瓷材料中裂纹形核和扩展的难度,提高了陶瓷材料的热导率,降低了材料内部的温度梯度,从而降低了材料内部热应力^[34];同时金属颗粒具有较好的塑性,可降低陶瓷基体的残余抗弯强度和热应力,从而降低裂纹扩展所需的弹性能,进而提高抗热震性。

3.1.2 相变增韧

在陶瓷材料中应用最多的相变增韧为 ZrO_2 相变增韧。 ZrO_2 有3种不同的晶体结构,m- ZrO_2 (单斜相)、t- ZrO_2 (四方相)和c- ZrO_2 (立方相); ZrO_2 的马氏体相变主要发生在单斜晶系与四方晶系之间,当t- ZrO_2 转变到m- ZrO_2 时, ZrO_2 晶体的体积会膨胀3%~5%。通过调整 ZrO_2 相变量的分布区域,可在一定程度上利用 ZrO_2 的相变体积效应,减小热震应变场的应变,从而达到提高抗热震性的效果。杨威等^[35]研究发现,引入m- ZrO_2 粉会提高方镁石-尖晶石材料的致密性,降低强度和弹性模量,并在950℃风冷热震循环3次后得到约26%的弹性模量保持率。王大磊等^[36]研究发现,当添加 ZrO_2 的质量分数为25%,30%时, Al_2O_3 复相陶瓷的抗热震指数比纯 Al_2O_3 陶瓷分别提高了26.5%,49.6%。陈林林等^[37]以质量比为70:30的莫来石和 Al_2O_3 以及不同含量3Y- ZrO_2 (物质的量分数3% Y_2O_3 部分稳定 ZrO_2)为原料制备了复相陶瓷,

发现当 3Y-ZrO₂ 质量分数为 10% 时,经 30 次热震循环后复相陶瓷的抗弯强度明显提高,这与 ZrO₂ 马氏体相变所产生的少量体积膨胀可以起到增韧作用有关,同时热震循环后陶瓷中气孔尺寸和分布更加均匀。徐晓虹等^[38]研究了不同含量 3Y-ZrO₂ 对刚玉-莫来石复相陶瓷抗热震性能的影响,发现在加热至 1 100 °C 后水冷的热震过程中 t-ZrO₂ 在热应力作用下转变为 m-ZrO₂,并因体积膨胀而伴随微裂纹的产生,微裂纹释放了陶瓷表面的应力,使陶瓷的抗热震性增强;当添加 3Y-ZrO₂ 质量分数为 10% 时,经过 30 次热震循环后,陶瓷的抗弯强度为 182.04 MPa,强度损失率为 12.96%。范芳等^[39]通过添加 ZrO₂、3Y-ZrO₂、8Y-ZrO₂ 对 Al₂O₃-莫来石复相陶瓷进行改性,发现在 1 500 °C 保温 30 min 后空冷的热震条件下强度有所提高,未改性复相陶瓷的抗弯强度增长率最小,经过 8Y-ZrO₂ 改性的复相陶瓷的抗弯强度增长率最大,可达 163.9%。赵志鹏等^[40]研究了 m-ZrO₂、t-ZrO₂、c-ZrO₂ 对氧化镁陶瓷抗热震性的影响,发现在 900 °C 保温 30 min 水冷的热震条件下,未添加 ZrO₂ 的陶瓷抗热震性最差,热震 1 次后便出现裂纹,添加 m-ZrO₂ 的陶瓷抗热震性最好,热震循环次数达到了 8 次,添加 t-ZrO₂、c-ZrO₂ 的陶瓷热震循环次数分别为 5 次和 4 次。可见,在热震过程中 t-ZrO₂ 受热应力作用转变为 m-ZrO₂,在此过程中伴随体积膨胀而使陶瓷产生微裂纹,微裂纹可释放表面的应力,减慢阻止裂纹扩展。

3.1.3 纤维和晶须增韧

陶瓷材料中纤维和晶须的增韧机理主要包括拔出、裂纹偏转、裂纹桥联等^[41]。HOU 等^[42]研究发现,当 Al₂O₃ 陶瓷中引入的 ZrO₂ 纤维质量分数为 15% 时,陶瓷的抗弯强度为 613 MPa,热震循环次数达到 29 次。杨孟孟等^[43]研究发现,在 ZrO₂-莫来石陶瓷中加入 SiC 纤维后可显著提高该陶瓷的抗热震性,热震循环次数高达 50 次。冯帅等^[44]研究发现,在 Al₂O₃ 陶瓷中添加 ZrO₂ 纤维后,陶瓷的抗热震性比纯 Al₂O₃ 陶瓷好,在 1 400 °C 循环空冷条件下其热震循环次数高达 30 次。LANG 等^[45]以 Al₂O₃ 纤维、钇稳定 ZrO₂ 为原料制备多孔复相陶瓷,发现当 Al₂O₃ 纤维体积分数为 10% 时,复相陶瓷的断裂韧性从 0.5 MPa·m^{1/2} 增加 1.2 MPa·m^{1/2},抗压强度达到 (100.2±25.4) MPa。胡克艳等^[46]研究发现,在 Al₂O₃ 陶瓷中添加莫来石晶须可有效提高其力学性能,晶须在基体均匀分布并与界面紧密结合,通

过自身牵拉增加断面表面积,使得表面能增加而消耗断裂能,从而提高陶瓷的抗热震性能。

3.2 提高热导率

热导率大的材料热量传递快,其内部温度更易分布均匀,从而降低由温度梯度造成的热应力水平。常见的高热导率陶瓷有 SiC、Si₃N₄、BeO 等。在热导率相对较低的陶瓷(如 Al₂O₃)中添加热导率相对较高的材料时,基体的热导率和抗热震性都得到显著提高。张阳等^[47]研究发现,添加 SiC 后,Sialon 陶瓷的抗热震性得到显著提高。SiC/Si₃N₄ 复相陶瓷在临界热震温差下的残余强度比单相 Si₃N₄ 陶瓷提高了 9.6%^[48]。热导率高的石墨、B₄C 等的添加也可以改善陶瓷材料的抗热震性。黄启忠等^[49]研究发现,经 600 °C 水淬热震试验后,C-B₄C-SiC 复相陶瓷的抗弯强度为 105.3 MPa,比热震前提高了 41%,复相陶瓷抗热震性的提高与热应力释放和微裂纹增韧补强的协同作用有关。

3.3 降低热膨胀系数

固体材料的原子热振动引起材料热膨胀,原子间的势能决定原子之间的距离,当温度升高时,原子间的振动加快,导致原子间的距离增大,宏观表现为材料的膨胀^[50]。热膨胀系数低的材料在同一温度范围变化后的宏观应变变量小,所产生的热应力也低^[51]。陈桂华等^[41]研究发现,Al₂O₃-莫来石复相陶瓷的热膨胀系数失配较合理,经过 1 100 °C 水淬热震试验后,其抗弯强度保持率达到 51.3%,抗热震性较好。韩亚苓等^[52]研究发现,将热膨胀系数低的莫来石、钛酸铝加入到 Al₂O₃ 陶瓷中能得到更加致密的复相陶瓷,该陶瓷可承受 1 500 °C 空冷的热震破坏。添加堇青石的 Al₂O₃ 陶瓷的抗热震性优于纯 Al₂O₃ 陶瓷^[53]。ZHANG 等^[54]研究发现,在 Al₂O₃ 陶瓷中加入低热膨胀系数的莫来石/堇青石后,复相陶瓷具有优异的抗热震性,其临界热震温差达到 350 °C,抗弯强度达到 90~120 MPa,弹性模量为 100 GPa。李婷婷^[55]以 Al₂O₃、SiO₂、Li₂CO₃、ZrO₂ 为原料于 1 350 °C 下烧结得到 β-锂辉石陶瓷,该陶瓷在 900 °C 水淬条件下热震循环 15 次后的残余抗弯强度大于 50 MPa,表现出良好的抗热震性,这与锂辉石具有较低的热膨胀系数有关。

3.4 降低弹性模量

陶瓷材料的弹性模量随气孔率的增大而减小^[56],因此可以通过增大气孔率来降低陶瓷材料的弹性模量,但气孔率增加又会导致陶瓷材料的抗

弯强度降低,而平衡弹性模量与气孔率之间的关系需要进行大量试验^[57]。SHEN 等^[58]研究发现,当热震温差为 1 180 ℃时,多孔 Si₃N₄ 陶瓷的抗弯强度保持率为 23%,这是因为孔隙可以阻止裂纹扩展,改变裂纹扩展路径,使得裂纹只能在相对较短的距离内以静态方式扩展。江涛等^[59]研究发现,BN/B₄C 复相陶瓷具有较低的弹性模量和较高的抗弯强度,其抗热震性优于单相 B₄C 陶瓷,临界热震温差由 300 ℃上升到 500~600 ℃。

4 影响抗热震性的外部因素

陶瓷材料的抗热震性不仅与材料本身的力学性能(断裂韧性、抗弯冷却强度、弹性模量等)、导热性能(热膨胀系数、热导率)、微观结构、物相组成等有关,还与试样尺寸、冷却介质温度、冷却方式等外部因素相关^[15]。

对于同一种陶瓷材料,试样的厚度对其抗热震性有重要影响, SHERMAN 等^[60]研究发现,当 Al₂O₃ 陶瓷试样的厚度由 6 mm 降至 1 mm 时,抗热震温差由 200 ℃升至 270 ℃,这是因为在热震试验时厚度较小的试样温度可以较快达到平衡,由温度差所造成的热应力较小。GLANDUS 等^[61]研究发现:对于体积较大的陶瓷试样,随着试样体积的增大,陶瓷材料的临界热震温差降低;而对于体积较小的试样,临界热震温差保持在 180 ℃左右。但 ZENG 等^[62]通过有限元与热力学行为相结合的方法,发现试样形状对 ZrB₂ 陶瓷的抗热震性无明显影响。有限元计算结果受抗热震理论模型和数学模型的直接影响,目前抗热震理论的研究还极不完善,因此在利用有限元方法来预测材料的抗热震性时还存在较多的问题。

LI 等^[63]研究发现,当冷却介质温度在 5~100 ℃范围时,陶瓷材料的抗热震性对冷却介质的温度非常敏感,这与陶瓷材料的冷却能力有关。李定玉^[15]研究发现,与在纵向入水姿势条件下的热震试验相比,在横向入水姿势条件下热震试验后, Al₂O₃ 陶瓷中产生的裂纹较少,平均残余抗弯强度较高,临界热震温差较高,抗热震性能较好,这是因为纵向入水时先入水的部分将周边水加热,后入水部分入水淬火时周边水更容易汽化,从而带走较多的热量,导致试样与水之间的表面热交换系数较大,因此试样受到的热震破坏更严重。

5 结束语

陶瓷材料的抗热震性是衡量其使用性能的一项重要指标。目前,陶瓷材料的抗热震性理论主要包括热应力断裂理论、热冲击损伤理论以及二者相结合得到的热应力裂纹稳定性因子理论等。抗热震性的表征参数主要包括陶瓷材料热震后的抗弯强度保持率和抗弯强度损失率以及临界热震温差、R 参数、弹性模量等。不同学者得到不同材料的抗弯强度保持率、临界热震温差等表征范围不一致,且难以真实反映高温环境下热冲击对陶瓷材料力学性能的影响,因此开发准确和简便的表征方法是目前研究陶瓷材料抗热震性急需解决的问题。提高陶瓷材料抗热震性的方法主要包括补强增韧、提高热导率、降低热膨胀系数、降低弹性模量等,同时试样尺寸、冷却介质温度、温度作用方式等外部因素也会影响陶瓷材料的抗热震性。

随着抗热震评介理论的发展和新型陶瓷制备技术、设备的出现,高性能抗热震陶瓷材料的设计将成为可能。近年来,为了提高陶瓷材料的抗热震性,层状陶瓷和梯度功能陶瓷的概念受到了越来越广泛的关注。通过使陶瓷材料的组分和性能呈梯度变化,改变材料内部的应力分布,让陶瓷层间的裂纹发生偏转和分叉^[64],可以有效提高材料的抗热震性能,因此层状陶瓷和梯度功能陶瓷或将成为未来的研究方向。

参考文献:

- [1] 董艳玲,王为民.陶瓷材料抗热震性的研究进展[J].现代技术陶瓷,2004,25(1):37-41.
DONG Y L, WANG W M. Progress of investigation on thermal shock resistance of ceramic materials[J]. Advanced Ceramics, 2004, 25(1): 37-41.
- [2] 郭景坤.关于陶瓷材料的脆性问题[J].复旦学报(自然科学版),2003,42(6):822-827.
GUO J K. The brittleness problem of ceramic material[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2003, 42(6): 822-827.
- [3] 宋世学,艾兴,黄传真.结构陶瓷抗热震性能及其机理的研究进展[J].陶瓷学报,2002,23(4):233-237.
SONG S X, AI X, HUANG C Z. Study development for thermal shock resistance and its mechanisms of ceramics[J]. Journal of Ceramics, 2002, 23(4): 233-237.
- [4] MA T F, WANG X F, ZHAO L. Theoretical analysis on thermal shock resistance of refractories [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1061/1062: 145-150.

- [5] SALVINI V R, PANDOLFELLI V C, BRADT R C. Extension of Hasselman's thermal shock theory for crack/microstructure interactions in refractories [J]. *Ceramics International*, 2012, 38(7): 5369-5375.
- [6] KINGERY W D. Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1955, 38(1): 3-15.
- [7] 文圆, 黄惠宁, 张国涛, 等. 陶瓷材料抗热震性的研究进展[J]. *佛山陶瓷*, 2018, 28(12): 1-7.
WEN Y, HUANG H N, ZHANG G T, et al. Progress of investigation on thermal shock resistance of ceramic materials [J]. *Foshan Ceramics*, 2018, 28(12): 1-7.
- [8] HASSELMAN D P H. Unified theory of thermal shock fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1969, 52(11): 600-604.
- [9] 王润泽, 刘延伶. 熔融石英颗粒复合材料的断裂行为[J]. *金属学报*, 1986, 22(3): 117-123.
WANG R Z, LIU Y L. Fracture behaviour of fused quartz particulate composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1986, 22(3): 117-123.
- [10] LI D, LI W, LI D, et al. Theoretical research on thermal shock resistance of ultra-high temperature ceramics focusing on the adjustment of stress reduction factor[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2013, 6(2): 551-564.
- [11] 王守仁, 王高琦, 杨学锋, 等. 基于第二抗热震因子的 BNNTs/ Si_3N_4 复合材料抗热震性能评价[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(2): 410-417.
WANG S R, WANG G Q, YANG X F, et al. Evaluation of thermal shock resistance of BNNTs/ Si_3N_4 composites based on the second heat shock factor [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(2): 410-417.
- [12] LU T J, FLECK N A. The thermal shock resistance of solids [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(13): 4755-4768.
- [13] 王凤森. 耐火材料抗热冲击性和抗机械冲击性的相互关系[J]. *国外耐火材料*, 1998, 23(8): 36-42.
WANG F S. Relationship between thermal shock resistance and mechanical shock resistance of refractories [J]. *Foreign Refractories*, 1998, 23(8): 36-42.
- [14] ZHOU Z H, WANG Z H, YI Y, et al. A thermal-shock-resistance model for laminated ceramics and its validation[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, 30(6): 1543-1547.
- [15] 李定玉. 计及使役环境的高温陶瓷材料抗热震性能及表征方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LI D Y. Research of thermal shock resistance of high temperature ceramics and its characterization methods with the consideration of different operating environments [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [16] 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 W, ZHANG J, DUAN C L, et al. Research progress in Al_2O_3 thermal shock resistant ceramics [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2020, 42(6): 624-647.
- [17] AKSEL C. The microstructural features of an alumina-mullite-zirconia refractory material corroded by molten glass [J]. *Ceramics International*, 2003, 29(3): 305-309.
- [18] AKSEL C. The influence of fine alumina particles on the mechanical properties and thermal shock behaviour of slip-cast alumina-mullite refractories [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 264/265/266/267/268: 1811-1814.
- [19] 陈蓓, 丁培道, 程川, 等. 压痕法研究 ZrO_2 层状复合陶瓷的抗热震性[J]. *耐火材料*, 2004, 38(4): 234-237.
CHEN B, DING P D, CHENG C, et al. Study of thermal shock resistance for ZrO_2 laminated ceramics by indentation method [J]. *Refractories*, 2004, 38(4): 234-237.
- [20] 吕珺, 郑治祥, 金志浩, 等. 压痕-急冷法测定增韧氧化铝基陶瓷复合材料的抗热震性能[J]. *理化检验-物理分册*, 2003, 39(1): 14-18.
LU J, ZHENG Z X, JIN Z H, et al. Indentation-quench method to determine the thermal shock resistance for toughening Al_2O_3 ceramic matrix composites [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2003, 39(1): 14-18.
- [21] 董伟霞, 顾幸勇, 包启富, 等. 以不同粒度煤矸石-氢氧化铝预烧颗粒制备莫来石[J]. *耐火材料*, 2017, 51(5): 394-396.
DONG W X, GU X Y, BAO Q F, et al. Mullite was prepared from coal gangue aluminum hydroxide pre-fired particles with different particle sizes [J]. *Refractories*, 2017, 51(5): 394-396.
- [22] 李中秋. $\text{ZrO}_2/\text{LaPO}_4$ 复相陶瓷的抗热震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
LI Z Q. The thermal shock resistance of $\text{ZrO}_2/\text{LaPO}_4$ ceramic composites [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [23] XIANG R, LI Y, LI S, et al. Preparation of mullite-zirconia composites from waste foundry sand and alumina [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2015, 123: 1441.
- [24] EICHLER J, HOFFMAN M, EISELE U, et al. R-curve behaviour of 2Y-TZP with submicron grain size [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, 26(16): 3575-3582.
- [25] 王建祥. 高抗热震陶瓷的抗污染研究[J]. *江苏陶瓷*, 2017, 50(5): 12-14.
WANG J X. Study on anti pollution of high thermal shock resistance ceramics [J]. *Jiangsu Ceramics*, 2017, 50(5): 12-14.
- [26] 张彪, 郭景坤, 诸培南, 等. 抗热震陶瓷材料的设计[J]. *硅酸盐通报*, 1995(3): 35-40.
ZHANG B, GUO J K, ZHU P N, et al. Design of thermal shock resistant ceramics [J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 1995(3): 35-40.
- [27] 王凡. 氧化铝基复相陶瓷的抗热震性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
WANG F. Study on thermal shock resistance of alumina based composite ceramics [D]. Xi'an: Changan University, 2018.
- [28] 吕珺, 郑治祥, 金志浩, 等. 晶须及颗粒增韧氧化铝基陶瓷复合

- 材料的抗热震性能[J]. 材料工程, 2000, 28(12): 15-18.
- LÜ J, ZHENG Z X, JIN Z H, et al. Thermal shock resistance of alumina matrix ceramic composites toughened by whiskers and particles [J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 28(12): 15-18.
- [29] 李家茂, 龙世刚. 复合添加剂对氧化铝陶瓷烧结性和抗热震性的影响[J]. 粉末冶金技术, 2009, 27(4): 273-276.
- LI J M, LONG S G. Effect of compound additives on sinterability and thermal shock resistance of alumina ceramics [J]. Powder Metallurgy Technology, 2009, 27(4): 273-276.
- [30] MANSHOR H, MD ARIS S, AZHAR A Z A, et al. Effects of TiO_2 addition on the phase, mechanical properties, and microstructure of zirconia-toughened alumina ceramic composite [J]. Ceramics International, 2015, 41(3): 3961-3967.
- [31] 樊传刚, 徐兰, 严解荣, 等. $(\text{MgO})_{0.1-x}(\text{CaO})_x(\text{ZrO}_2)_{0.9}$ 陶瓷的相组成、力学与抗热震性能研究[J]. 耐火材料, 2007, 41(2): 104-107.
- FAN C G, XU L, YAN J R, et al. Phase composition, mechanical properties and thermal shock resistance of $(\text{MgO})_{0.1-x}(\text{CaO})_x(\text{ZrO}_2)_{0.9}$ ceramics [J]. Refractories, 2007, 41(2): 104-107.
- [32] 田忠良, 赖延清, 张刚, 等. CaO 掺杂 $\text{Cu}/(\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-}10\text{NiO})$ 金属陶瓷致密化及力学性能[J]. 矿产保护与利用, 2010(4): 38-42.
- TIAN Z L, LAI Y Q, ZHANG G, et al. Study on the densification and mechanical properties of $\text{Cu}/(\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-}10\text{NiO})$ cermets doped with CaO [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2010(4): 38-42.
- [33] 席锦会, 姚广春, 刘宜汉, 等. Ag 含量对 NiFe_2O_4 基金属陶瓷惰性阳极性能的影响[J]. 功能材料, 2006, 37(6): 880-882.
- XI J H, YAO G C, LIU Y H, et al. Effect of content of Ag on properties of inert anodes of NiFe_2O_4 -based cermet [J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(6): 880-882.
- [34] ZHANG G, LI J, LAI Y Q, et al. Effect of metallic phase content on mechanical properties of $(85\text{Cu-}15\text{Ni})/(10\text{NiO-NiFe}_2\text{O}_4)$ cermet inert anode for aluminum electrolysis[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(5): 1063-1068.
- [35] 杨威, 韩兵强, 鄢文, 等. 单斜氧化锆加入量对方镁石-尖晶石材料性能的影响[J]. 耐火材料, 2018, 52(3): 209-212.
- YANG W, HAN B Q, YAN W, et al. Effect of monoclinic ZrO_2 addition on properties of periclase-spinel refractories [J]. Refractories, 2018, 52(3): 209-212.
- [36] 王大磊, 殷骏, 陈涵, 等. ZrO_2 对 Al_2O_3 复相陶瓷抗热震性能的影响[J]. 中国陶瓷, 2014, 50(6): 25-28.
- WANG D L, YIN J, CHEN H, et al. Effects of ZrO_2 and 3YSZ on Al_2O_3 ceramics thermal shock resistance [J]. China Ceramics, 2014, 50(6): 25-28.
- [37] 陈林林. 耐高温氧化锆—刚玉—莫来石复相陶瓷的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- CHEN L L. Study on zirconia-corundum-mullite composite ceramics for high temperature [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [38] 徐晓虹, 陈林林, 吴建锋, 等. 耐高温氧化锆—刚玉—莫来石复相陶瓷的制备及其抗热震性[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(6): 1026-1033.
- XU X H, CHEN L L, WU J F, et al. Preparation and thermal shock resistance of high-temperature resistant zirconia-corundum-mullite composite ceramics [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2017, 46(6): 1026-1033.
- [39] 范芳, 李生娟, 范立坤. 氧化锆—莫来石高温复合陶瓷改性研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1254-1259.
- FAN F, LI S J, FAN L K. Study on modification of alumina-mullite high temperature composite ceramics [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(4): 1254-1259.
- [40] 赵志鹏, 吴锋, 李红林, 等. 不同晶型 ZrO_2 纳米粉对氧化镁陶瓷烧结和抗热震性的影响[J]. 耐火材料, 2018, 52(3): 192-195.
- ZHAO Z P, WU F, LI H L, et al. Effects of zirconia nanopowders with different crystal forms on sintering and thermal shock resistance of magnesia ceramics [J]. Refractories, 2018, 52(3): 192-195.
- [41] 陈桂华. 莫来石—刚玉质抗热震复相陶瓷的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- CHEN G H. Study on mullite corundum thermal shock resistant composite ceramics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [42] HOU X Q, LIU J Y, GE H Y. Thermal shock resistance of ZrO_2 fiber/ Al_2O_3 ceramics [J]. Advanced Materials Research, 2011, 306/307: 754-757.
- [43] 杨孟孟, 安迪, 罗旭东, 等. SiC 晶须对 ZrO_2 -莫来石陶瓷烧结性能及抗热震性能的影响[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(3): 361-365.
- YANG M M, AN D, LUO X D, et al. The effect of SiC whisker on the sintering and thermal shock resistance property of ZrO_2 -mullite ceramic [J]. Journal of Ceramics, 2017, 38(3): 361-365.
- [44] 冯帅, 王志, 丁寅森, 等. 氧化锆纤维增强的氧化铝陶瓷的抗热震性能[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2013, 27(2): 123-126.
- FENG S, WANG Z, DING Y S, et al. Thermal shock resistance of zirconia fiber reinforced alumina ceramics [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2013, 27(2): 123-126.
- [45] LANG Y, WANG C G. Al_2O_3 -fiber-reinforced porous YSZ ceramics with high mechanical strength [J]. Ceramics International, 2014, 40(7): 10329-10335.
- [46] 胡克艳, 顾幸勇, 陈宗玲. 外加莫来石晶须增强 80 氧化铝瓷工艺研究[J]. 中国陶瓷, 2010, 46(1): 15-18.
- HU K Y, GU X Y, CHEN Z L. The technical study of mullite whisker strengthens 80 aluminum oxide ceramics [J]. China Ceramics, 2010, 46(1): 15-18.
- [47] 张阳. Sialon/ SiC 陶瓷的制备及抗热震性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.

- ZHANG Y. Research on the preparation technology of Sialon/SiC ceramic with the properties of thermal shock-wear resistance [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [48] 白晓杰. 反应热压烧结制备 SiC/Si₃N₄ 复合材料及抗热震性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- BAI X J. SiC/Si₃N₄ Composites prepared by reactive-hot pressed sintering and thermal shock resistance [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [49] 黄启忠, 杨巧勤, 谭平, 等. C-B₄C-SiC 复合材料的抗热震性能[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1995(4): 493-497.
- HUANG Q Z, YANG Q Q, TAN P, et al. A study on the thermal shock resistance of hot-pressed C-B₄C-SiC composite [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 1995(4): 493-497.
- [50] 张巍. 抗热震陶瓷制备技术及应用研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
- ZHANG W. Technique and research on application of thermal shock resistant ceramics [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2008.
- [51] 雷海波. 再结晶碳化硅陶瓷抗氧化及抗热震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- LEI H B. Research on oxidation resistance and thermal shock resistance of recrystallized silicon carbide ceramics [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [52] 韩亚苓, 张巍, 于祥鹤, 等. 氧化铝-钛酸铝-莫来石复相陶瓷抗热震性研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(5): 501-506.
- HAN Y L, ZHANG W, YU X H, et al. Research on thermal shock resistance of alumina-aluminium titanate-mullite ceramics [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(5): 501-506.
- [53] 韩亚苓, 张巍, 潘斌斌, 等. Al₂O₃/堇青石陶瓷的制备和抗热震性能研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(4): 380-384.
- HAN Y L, ZHANG W, PAN B B, et al. Research on preparation technology and thermal shock resistance of Al₂O₃/cordierite ceramics [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(4): 380-384.
- [54] ZHANG L F, OLHERO S, FERREIRA J M F. Thermo-mechanical and high-temperature dielectric properties of cordierite-mullite-alumina ceramics [J]. Ceramics International, 2016, 42(15): 16897-16905.
- [55] 李婷婷. 锂辉石陶瓷的制备、表征及其抗热震性能[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2012.
- LI T T. Preparation, characterization and thermal shock resistance of spodumene ceramics [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012.
- [56] 陈海涛. ZTA 复合陶瓷制备及其抗热震性能的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- CHEN H T. Study on preparation and thermal shock resistance of ZTA composite ceramics [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [57] SHE J H, YANG J F, OHJI T. Thermal shock resistance of porous silicon nitride ceramics [J]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22(5): 331-333.
- [58] SHEN L Y, LIU M J, LIU X Z, et al. Thermal shock resistance of the porous Al₂O₃/ZrO₂ ceramics prepared by gelcasting [J]. Materials Research Bulletin, 2007, 42(12): 2048-2056.
- [59] 江涛, 金志浩, 乔冠军, 等. 可加工 BN/B₄C 复相陶瓷的制备与其抗热震性能[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(8): 1527-1532.
- JIANG T, JIN Z H, QIAO G J, et al. Fabrication and thermal shock resistance of the machinable BN/B₄C composite ceramics [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(8): 1527-1532.
- [60] SHERMAN D, SCHLUMM D. Thickness effect in thermal shock of alumina ceramics [J]. Scripta Materialia, 2000, 42(8): 819-825.
- [61] GLANDUS J C, BOCH P. Influence of the size factor on the thermal shock resistance of ceramic samples [J]. International Journal of Thermophysics, 1981, 2(1): 89-101.
- [62] TAO Z, SHI Y, YU G, et al. Effect of sample shape and size on the thermal shock resistance for ultra-high temperature ceramics [J]. Advanced Materials Research, 2010, 177: 223-225.
- [63] LI W G, WANG R Z, LI D Y, et al. Effect of the cooling medium temperature on the thermal shock resistance of ceramic materials [J]. Materials Letters, 2015, 138: 216-218.
- [64] 江涛. 层状陶瓷复合材料的制备技术及其研究发展现状和趋势[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2475-2491.
- JIANG T. Fabrication technology, research and development status, trend of laminated ceramics composites [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(8): 2475-2491.