

# 孔特性可控的轻质 YSZ 泡沫陶瓷制备及其力学性能研究

艾建平<sup>1</sup>, 李萌<sup>1</sup>, 周国红<sup>2</sup>, 江博帆<sup>1</sup>, 胡丽玲<sup>1</sup>, 王正娟<sup>2</sup>, 李文魁<sup>1</sup>

(1. 江西科技师范大学, 江西 南昌 330038)

(2. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899)

**摘要:** 采用颗粒稳定泡沫的方法制备出闭孔结构、孔径均匀分布和轻质的氧化钇稳定的氧化锆 (YSZ) 泡沫陶瓷。研究烧结温度、表面活性剂种类和固含量对泡沫陶瓷骨架组成、孔特性 (包括孔隙率、孔径分布和平均孔径) 和抗压缩强度的影响规律。结果显示, 孔隙率处于 45%~85% 之间时, YSZ 泡沫陶瓷的抗压缩强度与孔隙率之间的关系符合 Rice 模型; 在烧结温度 1450 °C 及固含量为 32.50% (体积分数) 时, 采用异丁烯与马来酸酐共聚物分子和阳离子型表面活性剂十二烷基三甲基氯化铵共稳 YSZ 湿泡沫制备出的材料综合性能最优, 孔隙率为 (83.7±0.2)%、平均孔径为 (90.1±0.8) μm、抗压缩强度为 (45.1±1.3) MPa。在相同孔隙率的情况下, YSZ 泡沫陶瓷的抗压缩强度高于大多数已报道的结果。

**关键词:** 氧化钇稳定的氧化锆; 抗压缩强度; 直接发泡法; 高孔隙率; 混合表面活性剂

中图分类号: TQ174.75+8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)03-1072-09

泡沫陶瓷结合了陶瓷材料和泡沫结构的优异性能, 不仅具有陶瓷材料耐高温、耐腐蚀和抗氧化等特性, 还兼具低密度、高比表面积、低热导率、选择性渗透和能量吸收等性能<sup>[1-3]</sup>。基于这些特性, 泡沫陶瓷在高温窑炉保温<sup>[4]</sup>、催化剂载体<sup>[5]</sup>、熔融金属过滤器<sup>[6]</sup>和高比强度材料<sup>[7]</sup>领域具有广泛应用。众所周知, 泡沫陶瓷的性能和应用领域主要取决于材料体系和孔特性。氧化钇稳定的氧化锆 (YSZ) 因其具有高熔点、高韧性、高强度、抗氧化和良好的物理化学稳定性, 是用作高温热防护材料的首选材料之一<sup>[8]</sup>。

当前, 直接发泡法已成为调控和剪裁氧化锆泡沫陶瓷孔特性、物化性能的一种常用方法, 该制备方法操作简便, 关键在于控制湿泡沫的稳定性和长时间固化成型。由于泡沫本身是一种热力学不稳定的气相体系, 其稳定存在于陶瓷浆料中需要加入一些化合物。刘海燕等<sup>[9]</sup>采用卵清蛋白作为发泡剂, 蔗糖为浆料粘度调节剂, 制备出开口气孔为主, 总孔隙率为 77.2%~94.5% 的 YSZ 泡沫陶瓷。Hu<sup>[10]</sup>等人采用叔丁醇基注凝体系制备出孔隙率 52%~76%, 平均孔尺寸 0.7~1.8 μm, 抗压缩强度 3.0~29.0 MPa 的全稳定氧化锆多孔陶瓷。Meng<sup>[11]</sup>等人以十二烷基硫酸三乙醇胺为发泡剂, 羧甲基纤维素钠为泡沫

稳定剂制备出高孔隙率 (76.2%~84.9%)、低热导率 (0.137~0.254 W (m K)<sup>-1</sup>), 抗压缩强度 0.69~3.66 MPa 的 YSZ 泡沫陶瓷。由于蛋白质和表面活性剂稳定的泡沫是热力学非稳态, 表面活性剂在气液界面的吸附能量较小, 吸附分子容易从气液界面脱附, 导致湿泡沫容易发生合并和粗化, 从而使得制备出的泡沫陶瓷多呈开孔结构、孔隙均匀性较差、强度偏低。

与蛋白质和表面活性剂稳定泡沫相比, 部分疏水的颗粒由于具有较高的吸附能, 能不可逆地吸附在气液界面, 可更好地发挥稳定泡沫和调控孔隙结构均匀性的作用。因此, 近年来为了获得平均孔径尺寸小、孔隙结构更加均匀和闭孔结构为主的微观结构, 部分研究人员尝试采用颗粒稳定泡沫的制备方法, 已获得综合性能优异的氧化锆泡沫陶瓷。例如 Ahmad<sup>[12]</sup>等人使用短链戊酸分子作为颗粒改性剂, 制备出孔隙率超过 90% 的超轻质氧化锆泡沫陶瓷。Huo<sup>[13]</sup>等人率先采用长链十二烷基硫酸钠 (SDS) 部分疏水改性氧化锆颗粒, 使用改性后的氧化锆颗粒稳定湿泡沫, 制备出超轻高孔隙率 (96%~98%)、闭孔结构和细晶的 YSZ 泡沫陶瓷; 同时, 也探究了氧化铝和氧化锆协同稳定泡沫机制, 制备出超轻高孔隙率 (96.7%)、孔

收稿日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51862009); 江西省科技厅自然科学基金(20202BABL204016); 江西省教育厅科技类重点项目(GJJ190585); 校级青年拔尖人才项目(2018QNBJRC005); 大学生创新训练计划项目(20201404089)

作者简介: 艾建平, 男, 1986 年生, 博士, 副教授, 江西科技师范大学材料与机电学院, 江西 南昌 330038, 电话: 0791-83831281, E-mail: 1020151005@jxstnu.edu.cn

隙结构均匀的复相泡沫陶瓷<sup>[14]</sup>。到目前为止,对氧化锆颗粒疏水改性及其泡沫陶瓷的制备研究大部分集中于单一表面活性剂。然而,现有的研究表明,混合表面活性剂泡沫体系具有更佳的起泡性和泡沫稳定性,体系中带有相反电荷的表面活性剂在彼此静电吸引力的作用下,结合成正负表面活性剂<sup>[15,16]</sup>。Du<sup>[17]</sup>等人已成功采用阴、阳离子型表面活性剂混合修饰氮化硅颗粒,制备出总孔隙率 92%~97%、平均孔径 140~240  $\mu\text{m}$  和抗压缩强度 0.85~5.38 MPa 的超轻质  $\text{Si}_3\text{N}_4$  泡沫陶瓷。

基于上述混合表面活性剂稳定陶瓷湿泡沫和静电结合的思路,本研究选用具有酰胺、羧酸阴离子和羧酸酐 3 种官能团的 Isobam 分散 YSZ 颗粒<sup>[18]</sup>,然后再采用带相反电荷的阳离子型表面活性剂十二烷基三甲基氯化铵 (DTAC) 共同修饰 YSZ 陶瓷颗粒,并研究球磨发泡法制备轻质 YSZ 泡沫陶瓷的工艺;与单一表面活性剂十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 修饰改性 YSZ 颗粒制备泡沫陶瓷对照,揭示混合表面活性剂共修饰 YSZ 陶瓷颗粒在控制 YSZ 泡沫陶瓷孔特性方面的优势。同时,探究烧结工艺和浆料固含量对 YSZ 泡沫陶瓷孔特性和抗压缩强度的影响规律,为进一步制备轻质、高强的 YSZ 泡沫陶瓷提供参考依据。

## 1 实验

本实验所用氧化锆粉体(掺入摩尔分数 3%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 型号 SZ-FS-S2; 一次颗粒平均尺寸为  $(102.3 \pm 2.2)$  nm, 见图 1c; 比表面积  $11.66 \text{ m}^2/\text{g}$ ) 购自江西赛瓷材料有限公司; 异丁烯与马来酸酐共聚物 (Isobam104#; 分子量 55000-65000) 购自日本可乐丽公司。其它所用化学试剂包括: 十二烷基苯磺酸钠 (SDBS), 十二烷基三甲基氯化铵 (DTAC), 盐酸 (HCl) 均为分析纯试剂, 购自国药集团化学试剂有限公司。试验所用水均为自制蒸馏水。

图 1a 展示了酸性条件下分散 YSZ 陶瓷颗粒, 然后通过静电吸引力嫁接阴离子型十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 表面活性剂制备泡沫陶瓷的示意图 (标识为 M1)。具体过程为: 先按照固含量 32.0% (体积分数) 配料, 称取相应质量 YSZ 粉体和一定体积的蒸馏水, 再将上述原料和氧化锆磨球 (磨球与陶瓷粉体质量比 2:1) 分别加入到 1 L 容积的刚玉球磨罐中, 以 250 r/min 转速混料 1 h 获得均匀浆料。其中, 采用二级配球法, 大球采用直径 10 mm 氧化锆球, 小球采用直径 5 mm 的氧化锆球, 大、小球质量比为 5:1, 球磨罐填充率为 30% (体积分数)。球磨后加入 1 mol/L 浓度的 HCl 调节浆料 pH 值至 4.1 左右, 使得 YSZ 陶瓷颗粒表面呈正电荷 (见图 1b), 再加入 0.04% (质

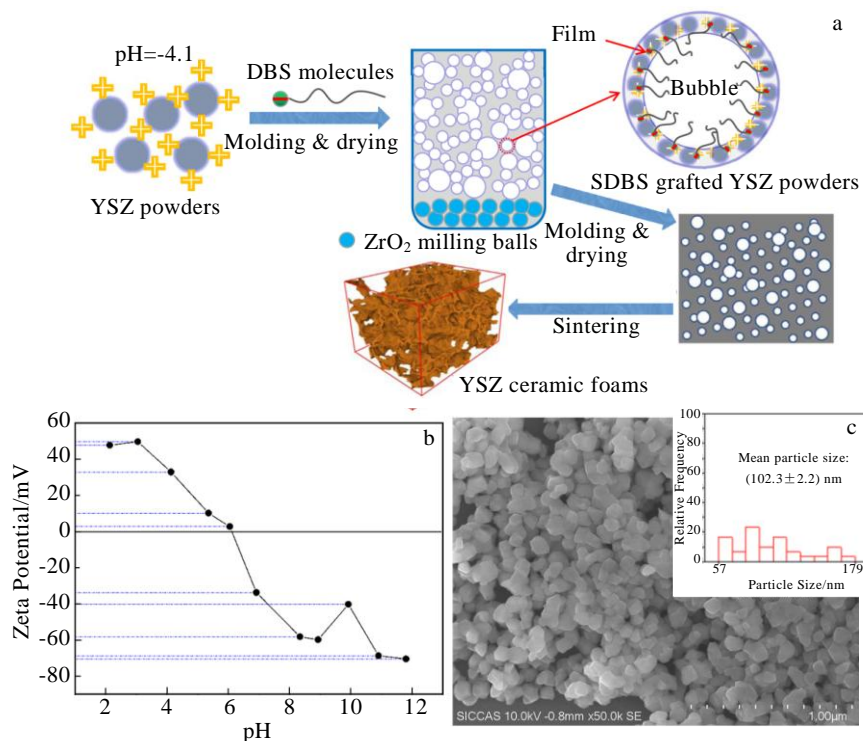


图 1 酸性条件下分散的 YSZ 陶瓷颗粒嫁接十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 分子后球磨发泡法制备泡沫陶瓷示意图、YSZ 颗粒表面 Zeta 电位随 pH 值的变化及 YSZ 原料粉体的 SEM 照片

Fig.1 Schematic diagram of fabrication of YSZ foam ceramics using sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) grafted YSZ powders by ball milling and foaming (a); Zeta potential of YSZ particles versus pH value (b); SEM image of the YSZ raw powder (c)

量分数)的 SDBS (相对于粉体质量), 并以 250 r/min 转速继续球磨混合 1 h 产生湿泡沫; 在室温下将湿泡沫浇注到纸盒子模具中固化成型, 将干燥后的泡沫坯体以 2 °C/min 的升温速率加热至 1350~1500 °C 下保温烧结 2 h, 自然冷却至室温。对应样品分别命名为 M1-1350、M1-1400、M1-1450、M1-1500。

本试验中采用的第 2 种制备 YSZ 泡沫陶瓷的方法为阴、阳离子型表面活性剂共稳泡沫制备 YSZ 泡沫陶瓷 (标识为 M2), 具体过程为: 在刚玉球磨罐中加入蒸馏水、YSZ 陶瓷粉体和 Isobam 原料 (相对粉体质量分数为 0.3%) 以及氧化锆研磨球 (加入磨球的比例和质量分布同上所述), 按照固含量 30.45%、31.50%、32.50% 和 33.50% (体积分数) 配料, 球磨罐填充率为 30%; 然后以 250 r/min 转速继续球磨混料 1 h 获得均匀浆料, 再加入 0.04% (质量分数) 的 DTAC 阳离子型表面活性剂 (相对于粉体质量), 并以 250 r/min 转速球磨混合 1 h 后获得泡沫坯体; 接着在室温下将湿泡沫浇注到纸盒子模具中固化成型, 将干燥后的泡沫坯体以 2 °C/min 的升温速率加热至 1450 °C 下保温烧结 2 h, 自然冷却至室温。按浆料固含量从小到大的顺序, 对应样品分别命名为 M2-1、M2-2、M2-3、M2-4。图 2 为阴、阳离子型表面活性剂共稳泡沫制备 YSZ 泡沫陶瓷流程图。

泡沫陶瓷的晶型采用日本岛津 Rigaku X 射线粉末衍射仪对其进行分析, 管电压为 40 kV, Cu 靶 K $\alpha$  辐射 ( $\lambda=0.154\ 178\ \text{nm}$ ), 扫描速率 4 °/min, 扫描范围  $2\theta=20\sim 86\text{°}$ 。采用日本 Hitachi 公司的 S-4800 型场发射扫描电镜观察样品的微观形貌。用 Nano Measurer 粒径分布计算软件对制备出的 YSZ 泡沫陶瓷的孔径

分布和晶粒尺寸分布进行分析, 根据标尺测量图中连续区域内 300 个气孔的直径, 然后计算平均孔径和标准偏差。样品的体积密度( $\rho$ )通过测量其重量和尺寸来确定, 再通过公式(1)计算得到泡沫陶瓷的总孔隙率:

$$P=(1-\rho/\rho_0)\times 100\% \quad (1)$$

其中,  $P$  是孔隙率,  $\rho_0$  是 YSZ 的真密度 (取  $6.1\ \text{g/cm}^3$ ),  $\rho$  是样品的体积密度。

根据标准 GB/T 1964-1996 多孔陶瓷抗压缩强度试验方法, 采用  $\Phi 20\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$  的样品进行抗压缩强度测试, 测量加载速率为 1.5 MPa/s, 使用 5 个样品测量抗压缩强度以计算平均值和标准偏差。

## 2 结果与讨论

### 2.1 烧结温度对泡沫陶瓷微观形貌与孔径分布的影响

氧化锆是存在多相转变的材料体系, 具体物相组成受烧结制度和稳定剂含量等因素的影响<sup>[19]</sup>。图 3 给出不同烧结温度下制备的 YSZ 泡沫陶瓷的 XRD 图谱。从图中可以看出 1350~1500 °C 烧结制备的材料物相组成全部为四方相, 与标准图谱 t-YSZ (JCPDS NO.83-0113) 衍射谱峰相一致; 由于 t-YSZ 具有相变增韧的特性, 预示在 1350~1500 °C 条件下制备出的 YSZ 泡沫陶瓷孔壁强度和韧性更高, 且最终泡沫陶瓷的力学性能取决于其孔特性。

图 4 和表 1 展示了在 1350~1500 °C 条件下制备的 YSZ 泡沫陶瓷微观形貌和孔特性。图 5 展示了在 1350~1500 °C 条件下制备的 YSZ 泡沫陶瓷孔壁形貌和晶粒尺寸分布。随着烧结温度的提高, 材料的总孔隙率从  $(60.8\pm 0.8)\%$  降低至  $(57.9\pm 0.5)\%$ , 且孔径分布

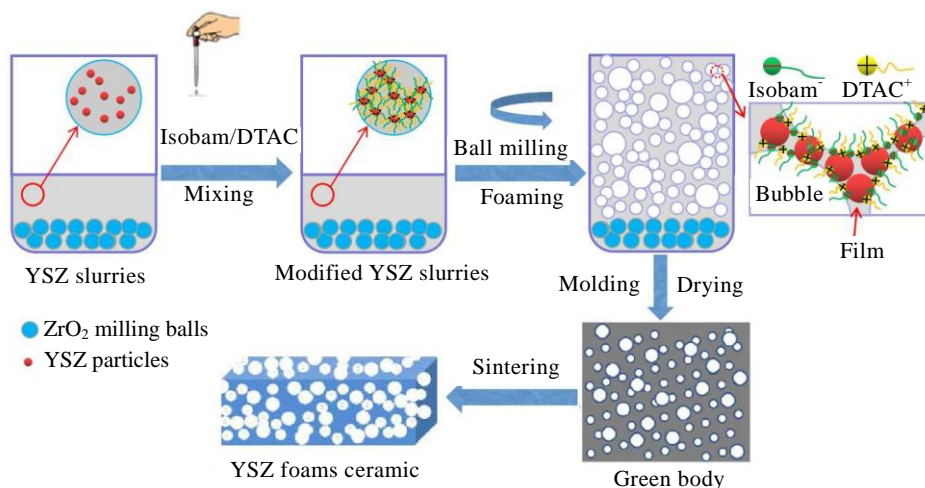


图 2 阴、阳离子型表面活性剂共稳泡沫制备 YSZ 泡沫陶瓷示意图

Fig.2 Schematic diagram of YSZ foam ceramics prepared by cationic surfactant co-stabilized foams

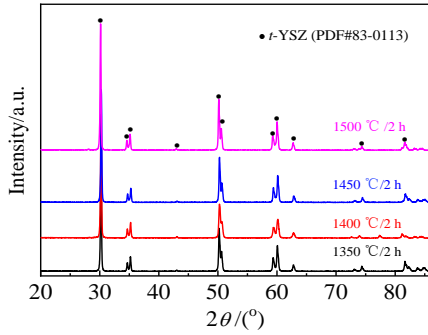


图 3 不同烧结温度下的 YSZ 泡沫陶瓷 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of YSZ foam ceramics at different sintering temperatures

范围变得更窄。其中，在 1500 °C 烧结制备出的 YSZ 泡沫陶瓷孔径分布范围介于 12.6~79.6 μm，平均孔径

在  $(26.8 \pm 0.4) \mu\text{m}$ 。从图 4 和表 1 中还可以看出材料几乎全部为闭孔结构，且烧结温度对材料平均孔径影响不大，平均孔径与发泡工艺紧密相关，这一实验结果与 Ahmad<sup>[20]</sup>等人相一致；但随着烧结温度的升高，YSZ 泡沫陶瓷的平均晶粒尺寸由 0.20 μm 增加至 0.41 μm，晶粒间连接更为紧密（见图 5），同时依据 Ahmad<sup>[12]</sup>和 Hu<sup>[21]</sup>等人已有的试验结果表明烧结温度升高后，孔壁厚度和致密化密度会发生增加，进而推断本试验中烧结温度的升高也将可能增加 YSZ 泡沫陶瓷骨架的致密度及其强度。

### 2.2 固含量对泡沫陶瓷微观形貌与孔径分布的影响

泡沫陶瓷的孔径是最重要也是最难精确控制的参数。到目前为止，尽管研究人员对湿泡沫的孔径设计进行大量的研究，但针对孔隙率相近的泡沫陶瓷孔特性剪裁研究的工作不是很多。本部分研究中，通过预留相同球磨发泡空间，微小幅度调节浆料固含量进而

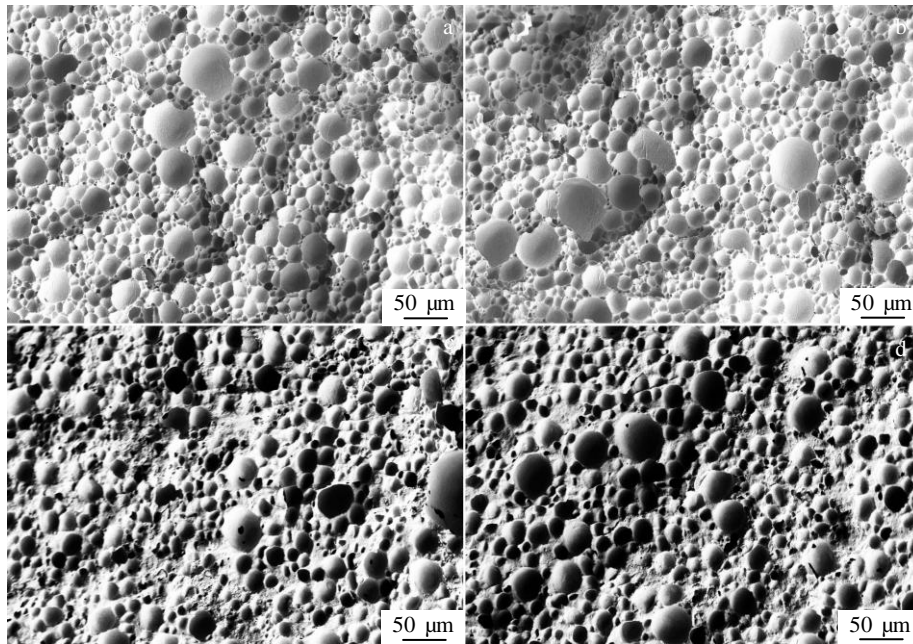


图 4 不同烧结温度下 YSZ 泡沫陶瓷的孔隙结构 SEM 照片

Fig.4 SEM images of as-prepared YSZ foam ceramic at different sintering temperatures: (a) 1350 °C, (b) 1400 °C, (c) 1450 °C, and (d) 1500 °C

表 1 不同烧结温度下制备的 YSZ 泡沫陶瓷基本特征

Table 1 Properties of YSZ foam ceramics sintered at different temperatures

Sample	Solid loading, $\phi/\%$	Sintering temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Porosity/ $\%$	Average grain size/ $\mu\text{m}$	Mean pore size/ $\mu\text{m}$	Pore size distribution/ $\mu\text{m}$
M1-1350	32.0	1350	$60.8 \pm 0.8$	0.20	$28.2 \pm 0.7$	4.5~70.4
M1-1400	32.0	1400	$61.2 \pm 0.6$	0.22	$30.1 \pm 0.9$	9.3~86.7
M1-1450	32.0	1450	$58.3 \pm 0.2$	0.37	$25.6 \pm 0.5$	13.3~95.0
M1-1500	32.0	1500	$57.9 \pm 0.5$	0.41	$26.8 \pm 0.4$	12.6~79.6

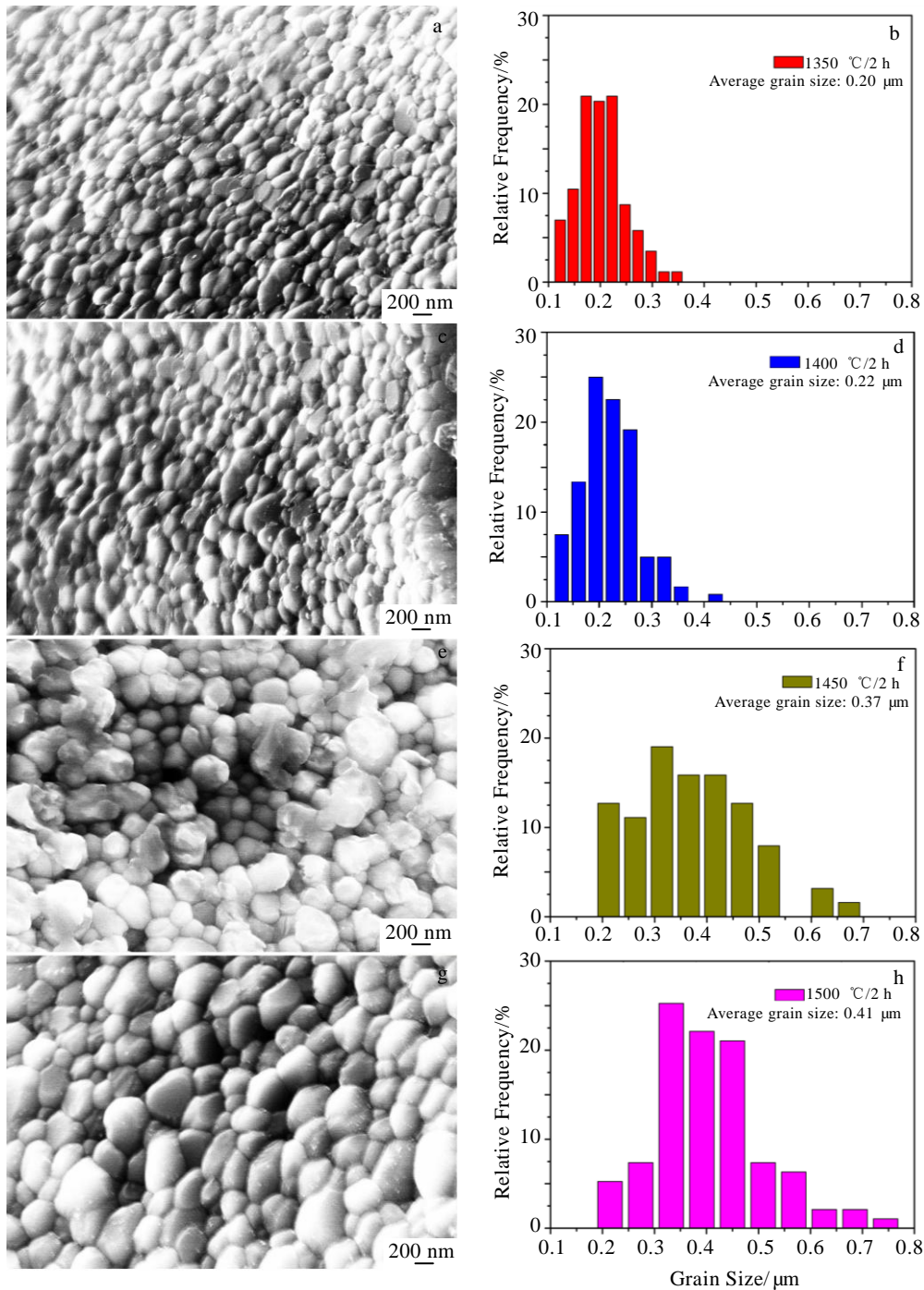


图 5 不同烧结温度下 YSZ 泡沫陶瓷的孔壁晶粒 SEM 照片和晶粒尺寸分布

Fig.5 SEM images (a, c, e, g) and grain size distributions (b, d, f, h) of strut wall for as-prepared YSZ foam ceramic at different sintering temperatures: (a, b) 1350 °C, (c, d) 1400 °C, (e, f) 1450 °C, and (g, h) 1500 °C

相应改变混合表面活性剂的浓度，实现对孔隙率相近的 YSZ 泡沫陶瓷的孔特性剪裁。图 6 和表 2 分别展示了不同固含量条件下制备出的 YSZ 泡沫陶瓷微观形貌和孔特性。从图 6 中可以看出 YSZ 泡沫陶瓷的孔形状都近似于球形且几乎全部为闭孔结构；在固含量略

微偏低的情况下(30.45%~31.50%，体积分数)，制备出的材料孔结构分布比较均匀，在孔壁上能观察到少部分窗口，表明此时颗粒稳定的湿泡沫还未达到极限稳定的状态；固含量 30.45%和 31.50%条件下制备出的泡沫陶瓷具有相近的孔径分布，它们的平均孔径分别

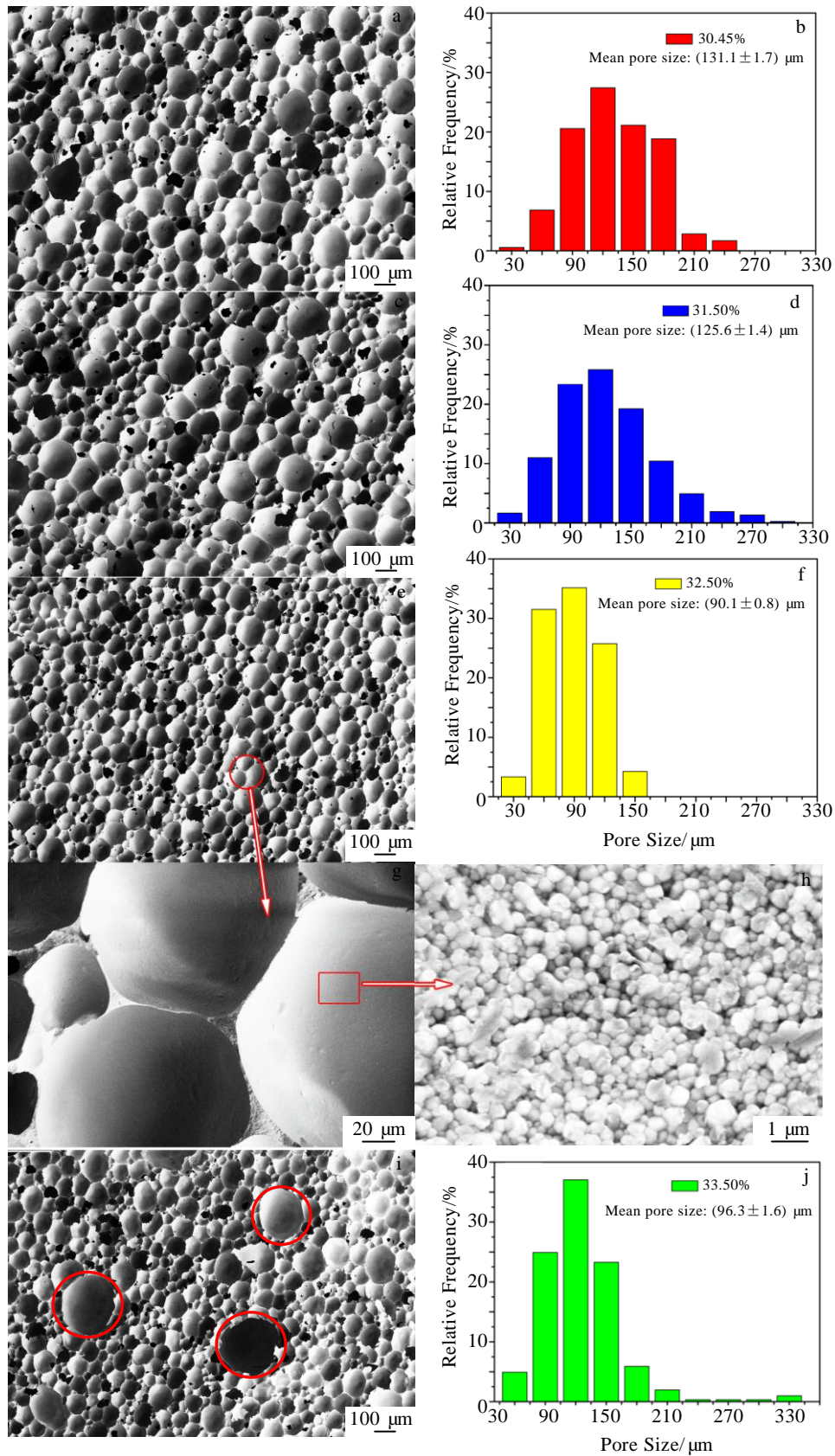


图 6 采用混合表面活性剂共稳泡沫制备 YSZ 泡沫陶瓷的形貌照片和孔径分布

Fig.6 SEM images (a, c, e, g, h, i) and pore size distributions (b, d, f, j) of YSZ foam ceramic fabricated by mixed surfactants co-stabilized wet foam: (a, b) 30.45%; (c, d) 31.50%; (e, f, g, h) 32.50%; (i, j) 33.50%

为(131.1±1.7) μm 和(125.6±1.4) μm (见图 6a、6d))。轻微增加固含量至 32.50%时,制备出的泡沫陶瓷孔结构分布更加均匀,孔壁上的窗口数量明显减少(见图 6e);与固含量 30.45%~31.50%条件下制备出的 YSZ 泡沫陶瓷孔径分布相比,固含量 32.50%条件下获得的材料孔径的分布更加集中,呈单峰分布,平均粒径降低至(90.1±0.8) μm (见图 6f);进一步观察材料的孔壁结构,可以看出孔壁结构完好,孔壁厚度为(1.27±0.19) μm,说明 YSZ 泡沫陶瓷的支撑壁并不是由单层颗粒构成的(见图 5e),YSZ 晶粒尺寸大约为 0.36 μm (见图 6f)。当固含量进一步增加到 33.50%时,可以明显观察到一些孔径尺寸为 220~320 μm 大小近球形或者扁平形状的气孔(见图 6i 红色圆圈标识部分),但是这些大尺寸气孔的孔壁并没有明显的窗口,这表明这些大尺寸气孔并不是由于湿泡沫合并、失稳所造成的,而是由于湿泡沫浆料的工艺性质,引起浇注时裹进去的大气泡,进而经过烧结后演变而来的,导致 YSZ 泡沫陶瓷孔径分布的均匀性显著降低,孔径分布范围变宽,但对材料的平均孔径影响不大(见图 6i 和 6j)。

表 2 展示了采用混合表面活性剂共稳泡沫工艺、固含量为 30.45%~33.50%条件下制备出的 YSZ 泡沫陶瓷的基本性能,可知获得的泡沫陶瓷总孔隙率为 83.7%~88.2%,密度处于 0.720~1.037 g/cm<sup>3</sup>之间。其中,固含量 32.50%时获得的材料平均孔径最小,孔径分布范围最窄。

### 2.3 YSZ 泡沫陶瓷的力学性能

图 7a 展示了采用 M1 (单一表面活性剂) 和 M2 (混合表面活性剂) 2 种工艺方法制备的 YSZ 泡沫陶瓷的抗压缩强度和孔隙率对比。从图中可以看出,与 M1 方法相比较,M2 方法制备出的泡沫陶瓷更为轻质。在相同的烧结温度 1450 °C 下,M1 方法制备出的 YSZ 泡沫陶瓷的抗压缩强度为(178±34) MPa,总孔隙率为(58.3±0.2)%;与 M1 (固含量 32.0%) 方法相比,M2

方法(烧结温度 1450 °C,固含量 32.50%)制备出的 YSZ 泡沫陶瓷兼具轻质与高比强度的特性,材料的抗压缩强度为(45.1±1.3) MPa,总孔隙率为(83.7±0.2)%。这是由于 M2 方法采用了 2 种具有长链结构的表面活性剂共同稳定湿泡沫,显著提高了泡沫的稳定性,进而提高了 YSZ 泡沫陶瓷的孔隙率。采用 M2 方法制备出的一系列材料中,固含量 32.50%时获得的 YSZ 泡沫陶瓷综合性能最优,这是由于该材料的主要为闭孔结构,孔径均匀分布且孔径范围窄,呈单峰分布,平均粒径较低,孔壁结构完好且窗口数量极少;制备出的 YSZ 泡沫陶瓷实物可以漂浮在水面上,表明该材料具有轻质的特性(见图 7c)。

为了研究 YSZ 泡沫陶瓷的抗压缩强度和孔隙率之间的关系,实验数据采用指数函数进行拟合,即采用 Rice 模型<sup>[22]</sup>。经典的 Rice 模型如公式(2)所示:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bP) \quad (2)$$

式中, $\sigma$  和  $\sigma_0$  分别表示泡沫陶瓷的强度和致密陶瓷的强度, $P$  为泡沫陶瓷的总孔隙率, $b$  是一个取决于结构和材料组成的参数。因此,当实验结果与 Rice 模型一致时,压缩强度的自然对数与孔隙率呈线性关系。从图 7b 中可以看出在孔隙率处于 45%~85%之间,试验结果与 Rice 模型符合得很好,线性相关系数高于 0.92,定量关系为  $\ln\sigma=9.0567-0.0684P$ 。孔隙率超过 88%时试验结果与 Rice 模型拟合结果偏差较大;目前已有学者采用线性方程描述超高孔隙率泡沫陶瓷的抗压缩强度与孔隙率的关系,具有更高线性相关系数( $R^2 \geq 0.989$ )<sup>[14]</sup>。另外,从图 7d<sup>[23]</sup>中可以看出,本研究制备的 YSZ 泡沫陶瓷在同等孔隙率的前提下,比目前大部分报道的块状泡沫陶瓷的强度都要高。这归因于坚韧的四方相 YSZ 和封闭、均匀且孔径分布窄的孔隙结构。因此,YSZ 泡沫陶瓷可以作为一种有前途的轻质、高强保温隔热材料,为某些特定的应用领域提供候选材料。

表 2 不同固含量条件下制备的 YSZ 泡沫陶瓷基本特征

Table 2 Properties of YSZ foam ceramics with different solid contents

Sample	Sintering temperature/°C	Solid loading, $\varphi$ /%	Porosity/%	Density/g cm <sup>-3</sup>	Mean pore size/μm	Pore size distribution/μm
M2-1	1450	30.45	83.7±0.1	0.994±0.006	131.1±1.7	43.7~249.4
M2-2	1450	31.50	83.0±0.2	1.037±0.012	125.6±1.4	34.1~283.2
M2-3	1450	32.50	83.7±0.2	0.994±0.012	90.1±0.8	31.7~162.3
M2-4	1450	33.50	88.2±0.3	0.720±0.036	96.3±1.6	32.8~329.3

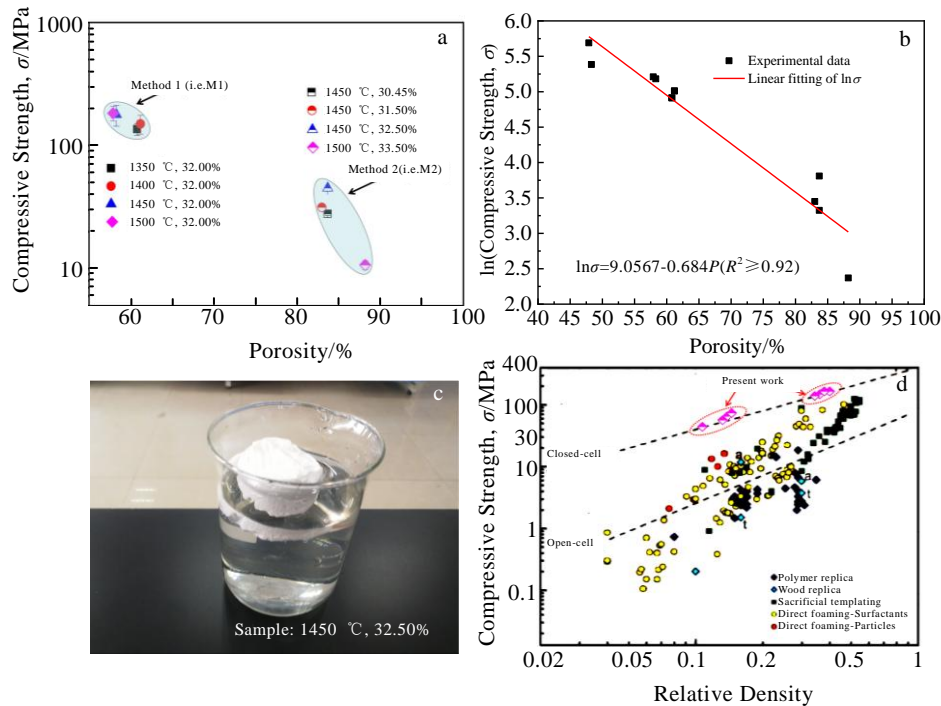


图7 不同工艺条件下制备出的 YSZ 泡沫陶瓷的压缩强度和孔隙率对比、YSZ 泡沫陶瓷抗压缩强度与孔隙率的自然对数曲线、固含量为 32.50% 条件下采用混合表面活性剂共稳泡沫工艺制备出 YSZ 泡沫陶瓷实物照片及本研究制备的 YSZ 泡沫陶瓷的抗压缩强度与部分其它块体泡沫材料相对密度比较示意图

Fig.7 Comparison of compressive strength and porosity of YSZ ceramic foams prepared under different process conditions in present work (a); variation of the natural logarithm of compressive strength of YSZ ceramic foams and porosity (b); photograph image of YSZ ceramic foams fabricated by the mixed surfactants co-stabilized foam with solid content of 32.50% (c); strength comparison and relative density of YSZ ceramic foams with reported bulk foams (d)<sup>[23]</sup>

### 3 结论

1) 采用球磨发泡工艺制备 YSZ 泡沫陶瓷, 在 1350~1500 °C 温度烧结的 YSZ 泡沫陶瓷全部为强韧性的四方相; 随烧结温度的提高, 泡沫陶瓷孔壁结构致密度增加, 晶粒平均尺寸增大, 材料总孔隙率降低。与单一表面活性剂稳定湿泡沫相比, 混合表面活性剂稳定泡沫工艺制备出的 YSZ 泡沫陶瓷具有更高的孔隙率(高于 83%), 固含量 32.50% 条件下制备的材料孔径的分布更加均匀, 呈单峰分布, 平均粒径为  $(90.1 \pm 0.8) \mu\text{m}$ , 孔壁结构完好, 且不是由单层颗粒构成的。

2) 当孔隙率处于 45%~85% 之间时, YSZ 泡沫陶瓷的抗压缩强度与孔隙率之间的关系与 Rice 模型符合度较高。采用 Isobam 分子和十二烷基三甲基氯化铵 2 种具有长链结构的表面活性剂共同稳定湿泡沫, 固含量为 32.50% 条件制备出的 YSZ 泡沫陶瓷综合性能最优, 抗压缩强度为  $(45.1 \pm 1.3) \text{MPa}$ , 总孔隙率为  $(83.7 \pm 0.2)\%$ , 是一种在高温隔热和低温保温领域极具应用潜力的候选材料。

### 参考文献 References

- [1] Zhao Jin(赵瑾), Mao Xiaojian(毛小建), Wang Shiwei(王士维). *Journal of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐学报)[J], 2019, 47(9): 1222
- [2] Zhang Shuhao(张曙豪), Hou Shiyu(侯诗宇), Zheng Yu(郑玉) et al. *Journal of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐学报)[J], 2019, 47(9): 1247
- [3] Chen J H, Liu P S, Sun J X. *Ceramics International*[J], 2020, 46(14): 22 699
- [4] Wu H B, Huang Z R, Jiang D L et al. *International Journal of Applied Ceramic Technology*[J], 2014, 11(6): 1061
- [5] Twigg M V, Richardson J T. *Industrial & Engineering Chemistry Research*[J], 2007, 46(12): 4166
- [6] Carvalho A C, Raupp-Pereira F, Neto J R et al. *Materials Letters*[J], 2015, 145: 250
- [7] Schaedler T A, Carter W B. *Annual Review of Materials Research*[J], 2016, 46(1): 187
- [8] Wang Changan(汪长安), Lang Ying(郎莹), Hu Liangfa(胡良)



- 发). *Journal of Ceramics*(陶瓷学报)[J], 2017, 38(3): 287
- [9] Liu Haiyan(刘海燕), Liu Jiachen(刘家臣), Zhang Pengyu(张鹏宇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(S1): 590
- [10] Hu L F, Wang C A, Huang Y. *Journal of Materials Science*[J], 2010, 45: 3242
- [11] Meng X Y, Xu J, Zhu J T *et al. Journal of Materials Science*[J], 2020, 55: 15106
- [12] Ahmad R, Ha J H, Song I H. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2014, 34(5): 1303
- [13] Huo W L, Zhang X Y, Chen Y G *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 2016, 99(11): 3512
- [14] Huo W L, Zhang X Y, Chen Y G *et al. Ceramics International*[J], 2019, 45(1): 1464
- [15] Wang G Y, Yin Q W, Shen J X *et al. Journal of Molecular Liquids* [J], 2017, 234: 142
- [16] Fauser H, Uhlig M, Miller R *et al. Journal of Physical Chemistry B*[J], 2015, 119(40): 12 877
- [17] Du Z P, Yao D X, Xia Y F *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 2019, 102: 6827
- [18] Lu Y J, Gan K, Huo W L *et al. Ceramics International*[J], 2018, 44(10): 11 357
- [19] Ai Jianping(艾建平), Zhou Guohong(周国红), Wang Shiwei(王士维) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(S1): 332
- [20] Ahmad R, Ha J H, Hahn Y D *et al. Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*[J], 2012, 19: 278
- [21] Hu L F, Wang C A. *Ceramics International*[J], 2010, 36: 1697
- [22] Ryshkewitch E. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 1953, 36(2): 65
- [23] Studart A R, Gonzenbach U T, Tervoort E *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 2006, 89: 17

## Fabrication and Mechanical Properties of Light Mass YSZ Foam Ceramic With Controllable Cell Structure

Ai Jianping<sup>1</sup>, Li Meng<sup>1</sup>, Zhou Guohong<sup>2</sup>, Jiang Bofan<sup>1</sup>, Hu Liling<sup>1</sup>, Wang Zhengjuan<sup>2</sup>, Li Wenkui<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China)

(2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

**Abstract:** The light mass YSZ foam ceramic with closed pore structure and uniform pore size distribution were fabricated by the particle-stabilized foams method. Effects of the sintering temperature, surfactant type and solid content of the initial slurries on the strut structure, pore characteristics (porosity, pore size distribution, and average pore size), and compressive strength were investigated. The results show that when the sintering temperature is 1450 °C and solid content is 32.50vol%, the comprehensive performance of YSZ foam ceramic obtained through Isobam molecule and cationic surfactant dodecyl trimethyl ammonium chloride (DTAC) co-stabilized YSZ wet foam is the best, with the porosity of (83.7±0.2)%, mean pore size of (90.1±0.8) μm and compressive strength of (45.1±1.3) MPa. The compressive strength of YSZ foam ceramic in present work is much higher than that of most reported results in the case of the same porosity.

**Key words:** YSZ; compressive strength; direct foaming; high porosity; mixed surfactants

Corresponding author: Ai Jianping, Ph. D., Associate Professor, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, P. R. China, Tel: 0086-791-83831281, E-mail: 1020151005@jxstnu.edu.cn