

硅酸锆弥散强化日用陶瓷

何定坤¹, 李月明¹, 孙 熠¹, 李 恺¹, 万德田², 包亦望²

(1. 景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 中国轻工业功能陶瓷材料重点实验室, 江西 景德镇 333403;

2. 中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024)

摘 要: 以福建龙岩高岭土、安徽钾长石、江西星子石英为陶瓷主要原料, 添加适量的硅酸锆为增强相, 研究了硅酸锆引入量、烧成温度、保温时间等因素对日用陶瓷性能的影响, 探究了硅酸锆颗粒弥散分布对日用陶瓷的强化机理。结果表明: 当引入硅酸锆含量为 6% (质量分数), 烧成温度为 1 300 °C、保温时间为 30 min 时, 强化效果最好, 抗弯强度从基础配方的(58±6) MPa 提升至(106±11) MPa, 提升幅度为 83%。硅酸锆颗粒弥散分布在基体内部, 由于其与基体热膨胀系数的差异, 冷却过程中在基体内部产生径向压应力与切向张应力, 使裂纹在颗粒处钉扎, 从而提高了陶瓷强度。

关键词: 日用陶瓷; 硅酸锆; 预应力; 基体强化

中图分类号: TQ174.73 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)12-3251-09

网络出版时间: 2022-11-15



Zirconium Silicate Dispersion Strengthened Porcelain

HE Dingkun¹, LI Yueming¹, SUN Yi¹, LI Kai¹, WAN Detian², BAO Yiwang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University; China National Light Industry Key Laboratory of Functional Ceramic Materials, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China; 2. China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: A porcelain was prepared with Kaolin clay, potassium feldspar and quartz as raw materials and zirconium silicate as a reinforcing material. The effects of zirconium silicate content, firing temperature and holding time on the properties of porcelain were investigated, and the strengthening mechanism of zirconium silicate particle dispersion on the porcelain was analyzed. The results show that the optimum porcelain reinforcement can be obtained at zirconium silicate content of 6%, firing temperature of 1 300 °C and holding time of 30 min. The bending strength increases from (58±6) MPa to (106±11) MPa, and the growth rate is 83%. The radial compressive stress and tangential tensile stress are generated in the matrix during the cooling process due to the difference of thermal expansion coefficient between zirconium silicate particles and matrix, resulting in the increased porcelain strength.

Keywords: porcelain; zirconium silicate; prestress; matrix reinforcement

陶瓷产品具有热稳定性好、耐磨损、耐腐蚀等优良性能, 但陶瓷产品因脆性高易被破坏。为了解决这一难题, 许多研究人员开展了陶瓷材料增强的研究, 但与通过预应力增强的混凝土和玻璃材料相比^[1-3], 目前的研究还存在较大的差距。预应力是指预先在材料之中引入应力以抵抗外部的破坏载荷, 从而增加了材料开裂所需的应变, 提高材料断裂

强度以及可靠性。通过预应力能够使混凝土的强度增加 2~3 倍, 玻璃的强度增加 4~5 倍。与此相比, 预应力增强陶瓷材料仍处于研究与探索阶段^[4-5]。

硅酸锆在陶瓷行业是必不可少的原料之一, 常用于坯、釉料中作为乳浊剂^[6-7], 起乳浊增白的作用, 但其对日用陶瓷增强作用却少有人研究。硅酸锆性质稳定^[8], 不受陶瓷烧成气氛的影响, 晶体硬度高、

收稿日期: 2022-07-12。 修订日期: 2022-07-27。

基金项目: 国家自然科学基金(52032011, 52002160); 江西省自然科学基金(20202BAB204005); 江西省科技厅国内科技合作项目(2021BDH81010); 江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ190690, GJJ190698)。

第一作者: 何定坤(1998—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 李月明(1965—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-07-12. Revised date: 2022-07-27.

First author: HE Dingkun (1998—), male, Master candidate.

E-mail: 2440888281@qq.com

Correspondent author: LI Yueming (1965—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: lym6329@163.com

热膨胀系数低,同时还具有耐高温和耐化学腐蚀等诸多优点,在陶瓷行业使用范围十分广泛^[9–10]。

预应力强化分为内部强化与表面强化^[4–5, 11–12],关于内部强化,已有许多研究人员研究分析了颗粒与基体之间热膨胀系数差异而引起的应力场的影响^[13–15]:Guo 等^[13]在 SiC 陶瓷中加入 5% (质量分数) 纳米 TiN 颗粒,抗折强度从 472 MPa 提高到 686.8 MPa。万萍等^[14]以硅基日用陶瓷为基体、Al₂O₃ 短纤维为第二增强相,制备了 Al₂O₃ 短纤维/硅质陶瓷基复合材料,发现当烧结温度为 1 260 °C、Al₂O₃ 短纤维掺杂量为 5% 时,Al₂O₃ 短纤维/硅质陶瓷基复合材料的抗折强度为 103.6 MPa,强度提升达到 99.25%。

Takashi 等^[15]将氧化铝颗粒引入陶瓷基体中,通过改变烧滑石含量来改变陶瓷基体热膨胀系数,发现随着氧化铝颗粒与基体热膨胀差异增大,氧化铝增强陶瓷的效果也有所提升。

受弥散强化机理的启发^[16–17],本工作以硅酸锆为增强相、日用陶瓷为基体,研究了硅酸锆含量对陶瓷烧成性能、力学性能、物相以及显微结构的影响,并对其强化机理进行了研究分析。

1 实验

原料为福建龙岩高岭土、安徽钾长石、江西星子石英,外加增强相为硅酸锆,其化学组成见表 1。

表 1 坯体原料的化学成分
Table 1 Chemical composition of raw materials

Chemical composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	ZrO ₂	Y ₂ O ₃	I.L.
Kaolin	48.14	36.91	0.42	0.04	0.01	0.88	0.07			13.20
Feldspar	70.25	16.39	0.11	0.03	0.53	9.27	3.13			0.20
Quartz	97.95	0.53	0.19		0.33		0.44			0.29
Zirconium silicate	31.98	6.52	0.49		0.68			56.57	0.42	1.54

w—Mass fraction.

基础坯体配方组成为:高岭土 33% (质量分数),钾长石 36%,石英 31%,其化学实验式为:

$$\left. \begin{array}{l} 0.1951\text{K}_2\text{O} \\ 0.1038\text{Na}_2\text{O} \\ 0.0264\text{CaO} \end{array} \right\} \cdot \left. \begin{array}{l} 0.9920\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.0080\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{array} \right\} \cdot \left. \begin{array}{l} 6.1517\text{SiO}_2 \\ 0.0045\text{TiO}_2 \end{array} \right\}$$

在基础配方中分别添加 0、2%、4%、6%、8% 的硅酸锆,准确称量各原料后,采用行星式球磨机进行湿法球磨,球磨后将原料干燥、造粒,干压成型,压制成 40 mm×10 mm×6 mm 的坯体,以 5 °C/min 升温速率至不同温度下保温不同时间,随炉冷却后取出进行测试分析。

采用 Archimedes 法测试烧结后陶瓷样品的吸水率和体积密度。利用 D8 Advance A25 型 X 射线衍射仪分析陶瓷烧结体的物相组成(Cu 靶,管电压 40 kV,管电流 40 mA,步长 0.02°)。利用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜观察背散射电子像(加速电压 10 kV,工作距离 9.1 mm)。利用 SU-8010 型扫描电子显微镜观察二次电子像(加速电压 5 kV,放大倍数 500 倍与 15 000 倍,工作距离 8.1~9.6 mm)。利用 LD26.105,LSI 万能试验机对样品进行三点弯曲强度测试,抗弯强度(断裂模数 R)以 MPa 表示,按式(1)进行计算:

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

式中: F 为破坏荷载(N); L 为支撑棒之间的跨距(mm); b 为试样的宽度(mm); h 为试验后沿断裂边测得的试样断裂面的最小厚度(mm)。

2 结果与讨论

2.1 硅酸锆加入量对陶瓷吸水率的影响

对于陶瓷材料,常用吸水率来表征其烧结性能。烧成温度为 1 300 °C、保温时间为 30 min 时,烧结体吸水率如图 1 所示。由图 1 可以看出,研究中烧结体吸水率皆小于 0.5%,表明其在 1 300 °C 条件下保温 30 min 已烧结成瓷。同时,烧结体吸水率随引入的硅酸锆含量增多变化不大,吸水率极差仅为 0.014%,表明在相同的烧结温度和保温时间条件下,硅酸锆不同的添加量对烧结体烧结性能的影响不大。

2.2 硅酸锆加入量与烧成温度对陶瓷性能影响

图 2 为不同烧成温度下保温 30 min 后烧结体抗弯强度、Weibull 分布图及体积密度。当烧成温度为 1 300 °C、保温时间为 30 min 时,不同硅酸锆添加量对烧结体抗弯强度的作用见图 2a。可以看出,随着硅酸锆含量的增多,烧结体抗弯强度出现了先增后

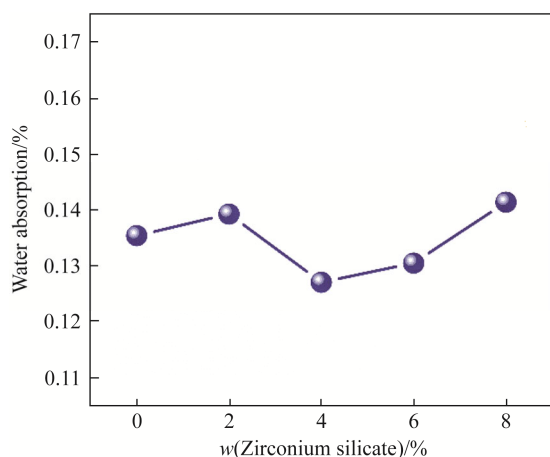


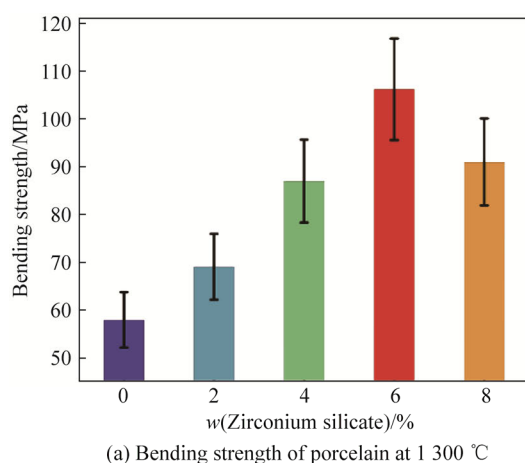
图 1 1300 °C 烧成保温 30 min 后烧结体的吸水率

Fig. 1 Water absorption of sintered porcelain at 1300 °C for 30 min

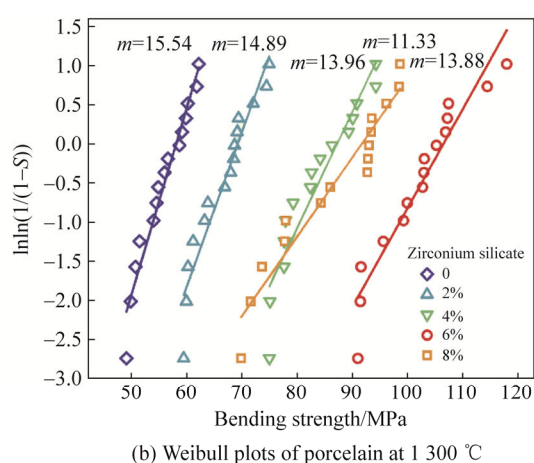
减的趋势, 烧结体强度最高出现在加硅酸锆 6% 处, 达到 (106 ± 11) MPa, 未添加硅酸锆的组成强度只有 (58 ± 6) MPa, 提升幅度达 83%, 提升效果较好。硅酸锆添加量继续增多时, 烧结体抗弯强度出现下降,

这是因为过多的增强相会在烧结体内部产生过大的预应力, 使得内部部分独立微裂纹相连, 使得烧结体力学性能下降。图 2b 为烧结体强度的 Weibull 分布图, 用于估算陶瓷抗弯强度的概率分布。图中 Weibull 模数较高, 表明材料较为均匀, 材料的强度分散性较小、数据的可靠性较高。

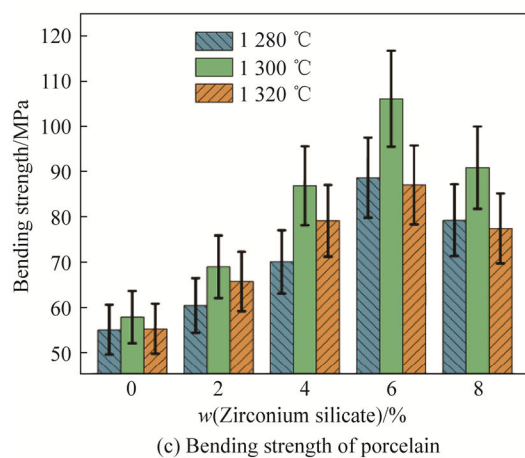
图 2c 为不同烧成温度下烧结体的抗弯强度图, 从图 2c 可以看出, 随着烧成温度的升高, 相同配方的烧结体的抗弯强度先上升后下降, 在 1300 °C 达到最高值, 基础配方的烧结体强度变化受烧成温度影响较小, 而强化效果越好的配方受烧成温度的影响越大, 这是由于温度的变化易使得烧结体内部出现部分缺陷, 这些缺陷会在烧结体内部造成小范围的应力集中或松弛, 预应力强化效果越好的配方对其中应力的变化越敏感, 因此其强度的波动会比基础配方烧结体的大。同时, 3 个温度点下烧成的烧结体强度随硅酸锆含量增加变化幅度都不相同, 表明烧成温度会影响烧结体强度以及基体的强化效果。



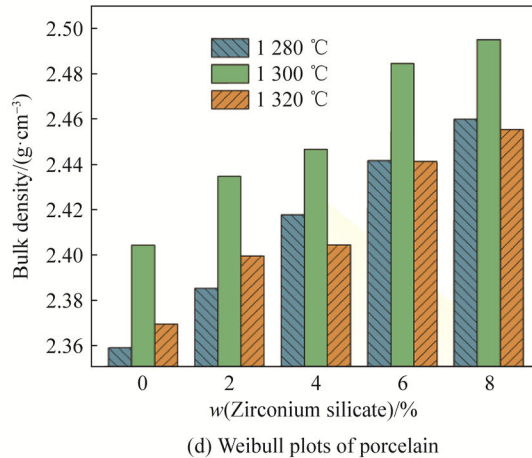
(a) Bending strength of porcelain at 1300 °C



(b) Weibull plots of porcelain at 1300 °C



(c) Bending strength of porcelain



(d) Weibull plots of porcelain

图 2 不同烧成温度下保温 30 min 后烧结体抗弯强度、Weibull 分布及体积密度

Fig. 2 Bending strength, Weibull plots and bulk density of sintered porcelain at different firing temperatures for 30 min

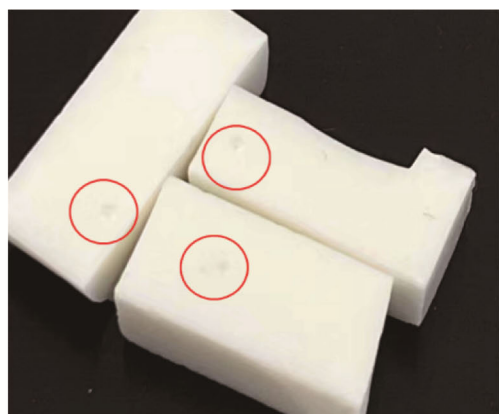
图 2d 为各组成在不同烧成温度下的体积密度, 当温度从 1 280 °C 升温至 1 300 °C 时, 各组成体积密度都有增加, 陶瓷烧结程度、致密度提高, 烧成温度继续提高时, 体积密度下降。烧结体抗弯强度变化趋势与体积密度变化趋势相同, 说明烧结体致密程度影响了烧结体的抗弯强度。综合分析, 添加硅酸锆含量为 6%、烧成温度为 1 300 °C 时, 烧结体强度最高。

2.3 保温时间对陶瓷性能的影响

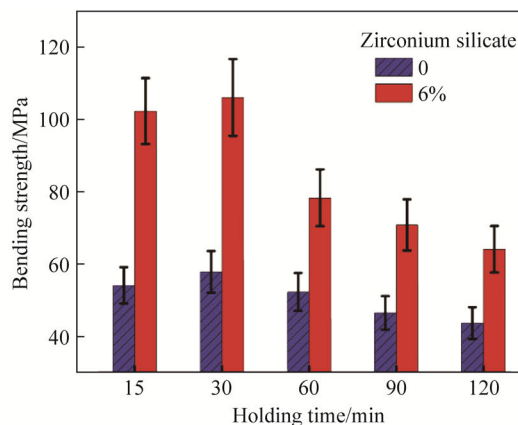
未添加以及添加 6% 硅酸锆的坯体在 1 300 °C 条件下烧成, 保温时间分别选择 15、30、60、90、120 min,

烧成后进行性能测试, 测试结果如图 3 所示。

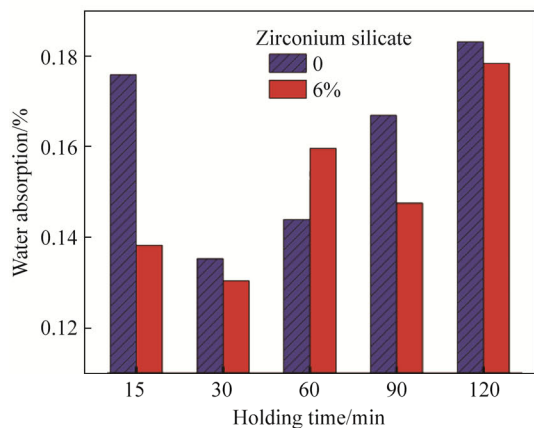
由图 3a 可见, 此时烧结体已经出现少许过烧现象, 烧结体表面出现少量突起(图中红圈所示)。从图 3b 可以看出, 随着保温时间的延长, 烧成后烧结体的强度先提高后降低。未引入硅酸锆的烧结体由 (54±5) MPa 提升至 (58±6) MPa 后降低至 (44±4) MPa; 硅酸锆含量为 6% 的烧结体强度由 (102±9) MPa 提升至 (106±11) MPa 后降低至 (64±6) MPa。除此之外, 虽然通过吸水率判断烧结体已经成瓷, 但随着保温时间的延长, 烧结体的体积密度在保温时间为 30 min 之后逐渐下降, 烧结体致密化程度逐渐降低。



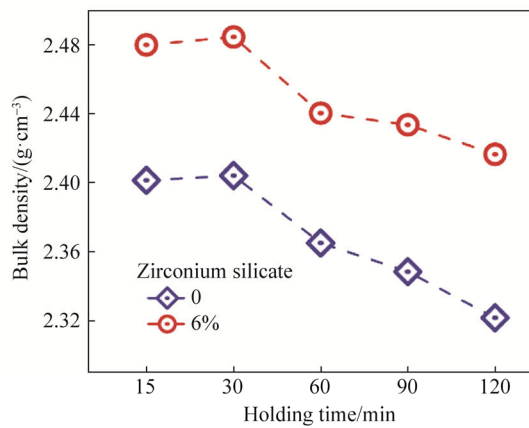
(a) The picture of porcelain at 1 300 °C for 120 min



(b) Bending strength



(c) Water absorption



(d) Bulk density

图 3 保温时间为 120 min 陶瓷烧结体、烧结体抗弯强度、吸水率与体积密度

Fig. 3 Holding time is 120 min for sintered porcelain, bending strength, water absorption and bulk density of sintered porcelain

图 4 为 1 300 °C 烧成温度条件下保温不同时间烧结体的 SEM 照片。保温 15 min 与 30 min 时, 烧结体内部气孔较小, 从保温时间为 60 min 开始, 随着保温时间继续延长, 烧结体内部气孔也逐渐增大。

在坯体烧结过程中^[18], 坯体中的颗粒会发生重

排、键合, 排出大气孔, 随着传质的进行, 晶界开始移动并带动气孔, 使气孔可以利用晶界的快速通道排除, 接着, 气孔会慢慢封闭, 形成类似球状的孤立气孔, 此时样品逐渐变得致密, 强度也会提升。但在此过程中, 保温时间过长, 能量升高, 晶界的移动速率加快, 会使得部分气孔来不及排除而被包

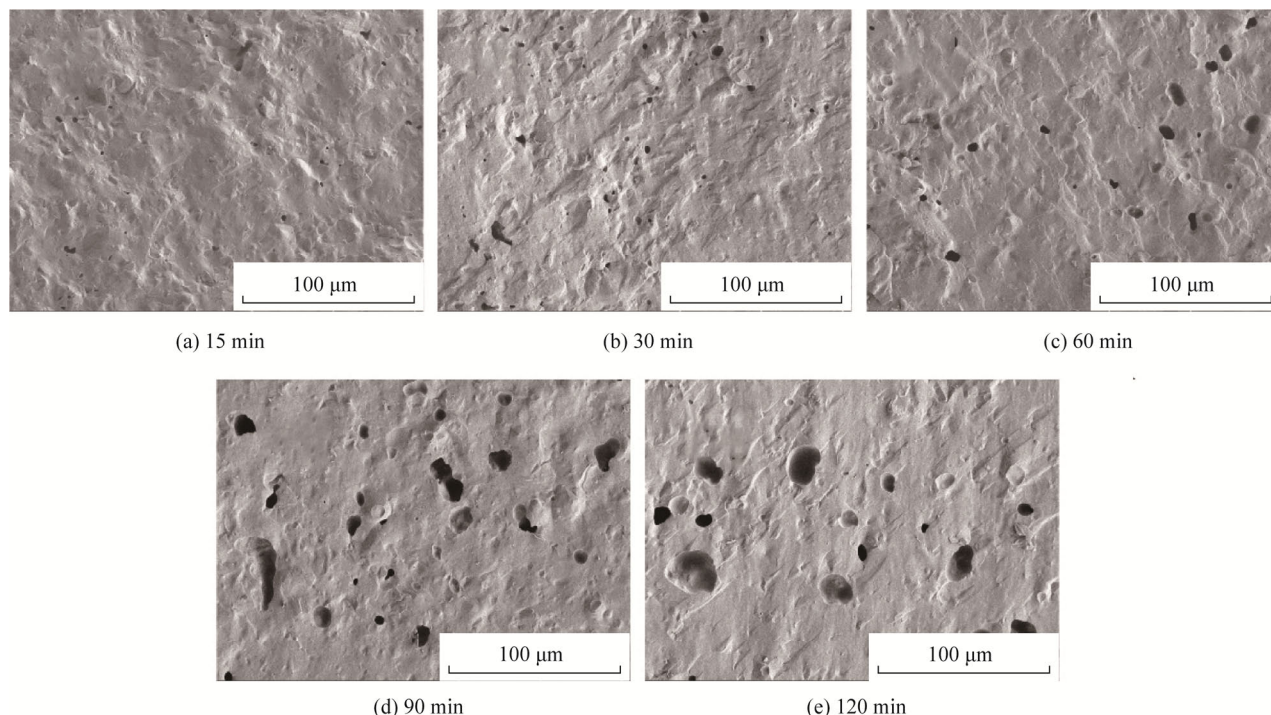


图 4 1300 °C 烧成温度条件下保温不同时间烧结体的 SEM 照片
Fig. 4 SEM images of sintered porcelain at 1300 °C with different holding time

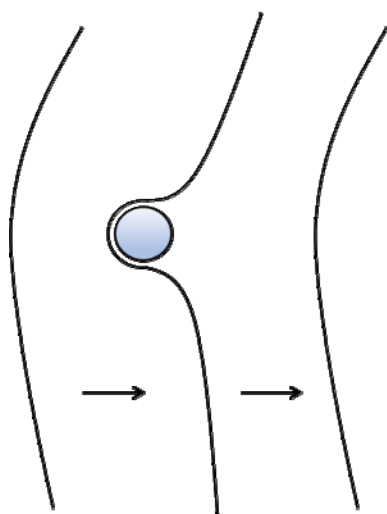


图 5 晶界通过气孔时形状变化^[19]
Fig. 5 Shape change of grain boundary when passing through bubbles^[19]

裹于烧结体中^[19]。同时, 由于小气孔中的气体压力较大, 导致它会迁移扩散到低气压的大气孔中去, 使烧结体内部气孔逐渐增大, 小气孔不断汇聚形成气泡, 靠近制品表面的气泡甚至会发生逸出现象。大气孔的出现, 使烧结体内部易出现微裂纹, 从而使得其抗弯强度下降, 气孔尺寸越大, 表明烧结体

内部的缺陷越大, 对烧结体力学性能影响越大。保温时间对烧结体力学性能影响很大, 综合分析最佳保温时间为 30 min。

图 6 为添加 6% 硅酸锆的烧结体在烧成温度 1300 °C 条件下分别保温不同时间的 SEM 照片。在图 6 中可观察到石英、莫来石与硅酸锆(其中: Z 为硅酸锆; Q 为石英; M 为莫来石)。随着保温时间的延长, 烧结体中物相并未出现明显改变, 说明保温时间对烧结体晶相影响不大。

2.4 硅酸锆加入量对陶瓷物相的影响

图 7 为加入不同含量硅酸锆陶瓷坯体在烧成温度为 1300 °C、保温时间为 30 min 条件下的 XRD 谱。由图 7 可见, 基础料烧成后晶相组成为石英、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, 加入硅酸锆后增加了 ZrSiO_4 晶相。发现硅酸锆引入后, 烧结体物相并未发生明显改变。

2.5 陶瓷背散射形貌

图 8 分别为外加硅酸锆 2%、4%、6%、8% 的坯体在烧成温度为 1300 °C、保温时间为 30 min 条件下的背散射电子显微镜照片。由图 8 可以看出, 烧成后的硅酸锆含量变化与引入时基本一致, 引入的硅酸锆含量越多, 在背散射电子显微镜照片中表现出来的也越多, 与上述 XRD 测试结果相符。硅

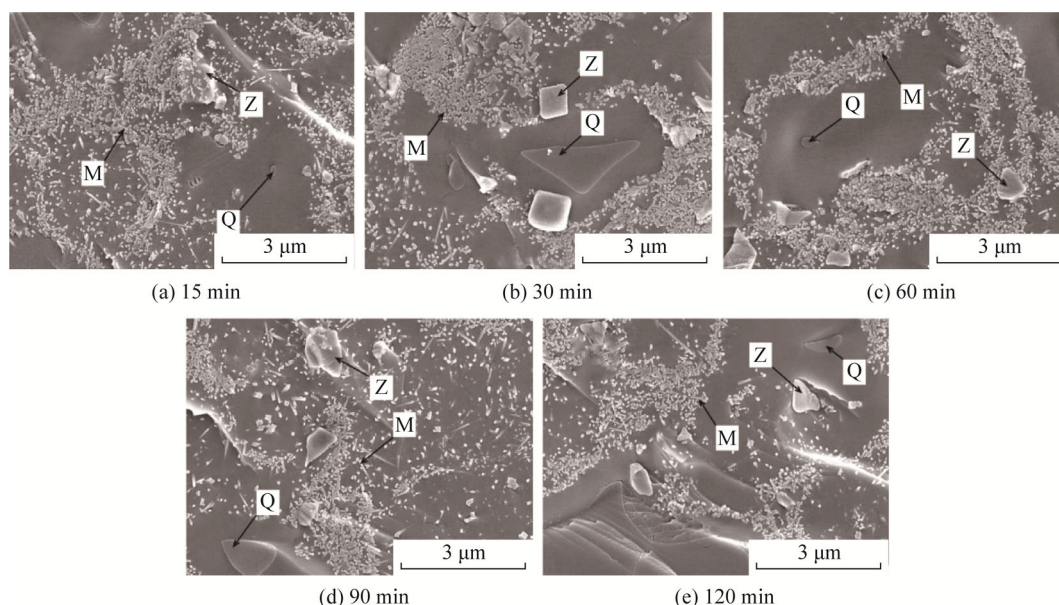


图 6 添加 6% 硅酸锆的烧结体在 1300 °C 烧成温度条件下保温不同时间的 SEM 照片

Fig. 6 SEM images of sintered porcelain with zirconium silicate addition of 6% at 1300 °C for different holding time

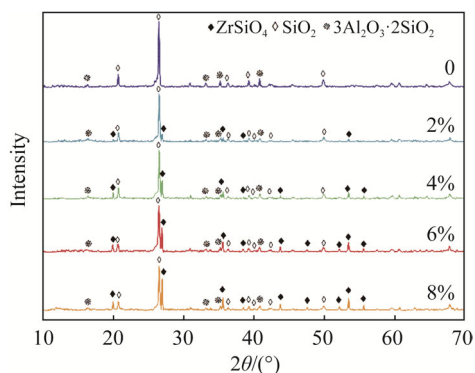


图 7 硅酸锆添加量不同的坯体烧成后 XRD 谱

Fig. 7 XRD diagram of porcelain after firing with different zirconium silicate addition

酸锆颗粒在烧结体中呈现出明显弥散分布，且分布较均匀。

2.6 陶瓷强化原理分析

陶瓷基体与硅酸锆基本性能参数见表 2。为便于理论计算，假设加入后的硅酸锆为均匀分布的球形颗粒，被均匀包裹在烧结体玻璃相中(如图 9 所示)。由于硅酸锆的热膨胀系数小于基体，陶瓷冷却后硅酸锆颗粒将处于压应力状态，而基体径向受压应力，切向收到拉应力，裂纹将在颗粒处钉扎或穿过颗粒^[20]，同时硅酸锆强度较高，裂纹继续扩展穿过硅酸锆需要更多能量，因而提升了陶瓷整体强度。

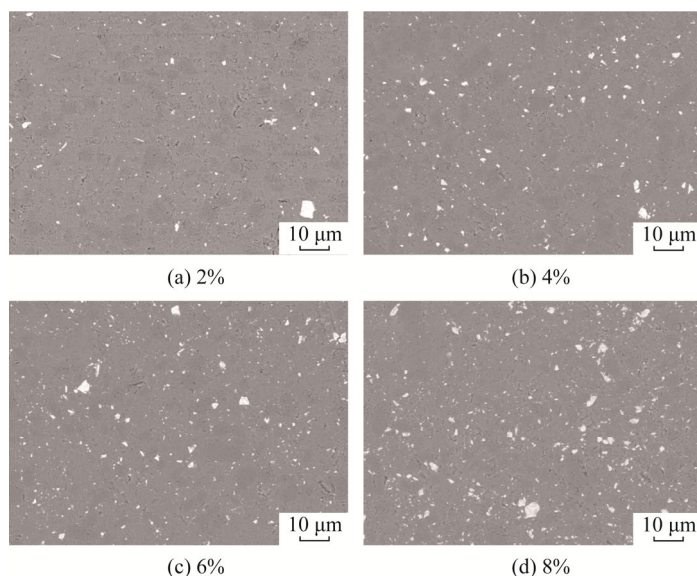


图 8 1300 °C 烧成温度条件下硅酸锆添加量不同的烧结体的背散射电子显微镜照片

Fig. 8 BSE images of sintered porcelain at 1300 °C with different Zirconium silicate addition

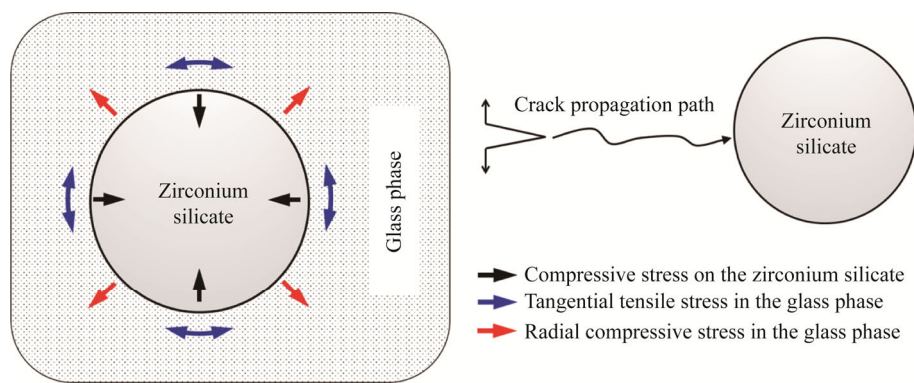


图 9 烧结体内部应力状态及裂纹扩展

Fig. 9 Stress state and crack propagation in porcelain

表 2 日用陶瓷基体与硅酸锆基本性能参数

Table 2 Basic performance parameters of domestic porcelain body and zirconium silicate

Material	Elastic modulus E/GPa	Thermal expansion coefficient $\alpha \times 10^6/^{\circ}\text{C}^{-1}$
Porcelain (m)	51.25	7.34
Zirconium silicate ^[21] (p)	230.00	4.10

考虑如图 10 所示一球形颗粒物处于基体中的情况, 由于基体与颗粒之间的热膨胀的差异, 二者之间将会受到一个残余内应力 p_i 作用^[22]:

$$p_i = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{\left(\frac{1+\nu_m}{2E_m} + \frac{1-2\nu_p}{E_p}\right)} \quad (2)$$

其中: 下标 p 与 m 分别代表颗粒与基体; $\Delta\alpha = \alpha_m - \alpha_p$, 即基体与颗粒之间的热膨胀系数的差值; ΔT 为烧结过程之中的冷却阶段的温度差值; ν 为材料的 Poisson's ratio; E 为材料的弹性模量。

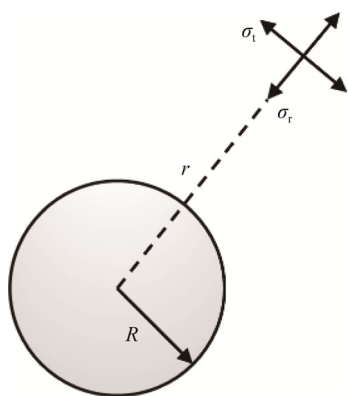


图 10 基体中某一颗粒物

Fig. 10 A particle in the matrix

由式(2)决定的残余内应力 p_i 将在基体内形成径向应力 σ_r 与切向应力 σ_t :

$$\begin{cases} \sigma_r = -p_i \left(\frac{R}{r}\right)^3 \\ \sigma_t = \frac{1}{2} p_i \left(\frac{R}{r}\right)^3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 为球形颗粒的半径; r 为基体中某一点到颗粒球心处的距离($r \geq R$)。式(3)表示的是单个粒子的情况, 当有多个粒子相互作用时, 情况将有所不同。如图 7 背散射电子图像所示, 弥散颗粒均匀分布在基体之中, 彼此之间也会产生应力场作用, 此处以 2 个粒子相互作用为例。假设第 2 个粒子与第 1 个粒子半径相同, 即皆为 R , 2 个粒子之间的距离假设为 b , 可以使用与等式相同的坐标来表示粒子周围基体中的应力^[23]。

$$\begin{cases} \sigma_{r2} = -p_i \cdot \left(\frac{R}{b+2R-r}\right)^3 \\ \sigma_{t2} = \frac{1}{2} p_i \cdot \left(\frac{R}{b+2R-r}\right)^3 \end{cases} \quad (4)$$

其中: b 为基体中 2 个粒子之间的距离; 下标 2 表示第 2 个粒子。因此, 2 个颗粒之间的残余应力应为 2 个颗粒热残余应力的叠加, 即:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} = -p_i \cdot \left[\left(\frac{R}{r}\right)^3 + \left(\frac{R}{b+2R-r}\right)^3\right] \\ \sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2} = \frac{1}{2} p_i \cdot \left[\left(\frac{R}{r}\right)^3 + \left(\frac{R}{b+2R-r}\right)^3\right] \end{cases} \quad (5)$$

热残余应力沿 2 个颗粒之间的线对称分布, 如图 11 所示, 其遵循 $\sigma_r = -2\sigma_t$ 。这表明基体中的压应力($\alpha_m < \alpha_p$ 的切应力)和拉应力(径向)同时出现或同时消失, 但它们的绝对值不同。

由式(2)确定的颗粒中的应力与颗粒半径无关, 但基体中应力区的大小受颗粒半径的影响。如果

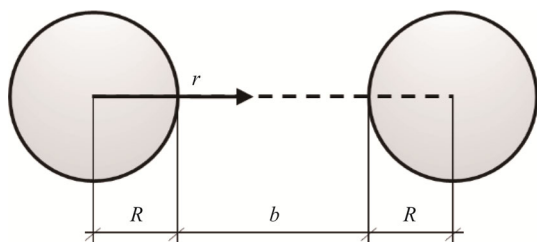


图 11 两颗粒之间作用

Fig. 11 Interaction between two particles

2 个相邻的粒子具有不同的半径, 即 R_1 和 R_2 , 则粒子之间的非对称应力分布修正如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} = \\ -p_i \cdot \left[\left(\frac{R_1}{r} \right)^3 \cdot \left(\frac{R_2}{b + R_1 + R_2 - r} \right)^3 \right] \\ \sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2} = \\ \frac{1}{2} p_i \cdot \left[\left(\frac{R_1}{r} \right)^3 \cdot \left(\frac{R_2}{b + R_1 + R_2 - r} \right)^3 \right] \end{array} \right. \quad (6)$$

上述分析提供了理论依据, 此外, 在基体的任意一点上, 残余应力仅由最近的颗粒控制。材料基体界面所受到的径向压应力可以使得颗粒与基体在界面处不会分离脱开, 这是基体向颗粒传递外加载荷的前提, 是保证颗粒引入可以强化陶瓷的重要条件^[24], 因此选择热膨胀系数比坯体小的材料可以起到增强陶瓷的作用。

但同样, 此径向压应力的值并不是越大越好, 因为引入的颗粒难以像假设中均为球形颗粒, 而在非球形颗粒的棱角处则极易产生应力集中的现象^[23]。在外加载荷的作用之下, 此压应力会迅速释放从而造成剪切断裂。陶瓷烧结体的强度随着增强相的引入而逐渐提高, 但当引入过多的第二相, 则会导致应力叠加致使独立微裂纹之间相连, 进而影响陶瓷制品的强度。本研究中, 在引入硅酸锆含量为 6% 之前, 随着硅酸锆含量增多, 烧结体的抗弯强度都是稳定提高的, 但在引入硅酸锆含量为 8% 时, 强度则降低, 表明添加适量的增强相, 可以有效提高烧结体抗弯强度。

3 结论

1) 由于硅酸锆与基体的热膨胀差异, 硅酸锆的弥散分布会在陶瓷内部产生残余应力场, 使陶瓷内受径向压应力与切向拉应力, 达到强化陶瓷的作用。

2) 烧成条件对陶瓷强度影响很大, 温度过高

或保温时间过长会使陶瓷内部气孔膨胀导致强度降低。

3) 通过改变烧成工艺, 得到最佳烧成温度 1300 °C 与最佳保温时间 30 min, 与工业生产工艺相差不大, 不会额外增加能耗, 在此条件下, 添加 6% 硅酸锆时, 陶瓷达到最高强度, 较未添加的组成强度从 (58±6) MPa 提升至 (106±11) MPa, 提升幅度达 83%, 提升效果明显且操作简便, 有很大应用前景。

参考文献:

- [1] JOHNSTON R D, CHIPMAN R D, KNAPP W J. Prestressed ceramics as a structural material[J]. J Am Ceram Soc, 1953, 36(4): 121–126.
- [2] GREEN D J, TANDON R, SGLAVO V M. Crack arrest and multiple cracking in glass through the use of designed residual stress profiles[J]. Science, 1999, 283(5406): 1295–1297.
- [3] WONDRAKZEK L, MAURO J C, ECKERT J, et al. Towards ultrastrong glasses[J]. Adv Mater, 2011, 23(39): 4578–4586.
- [4] 包亦望, 孙熠, 旷峰华, 等. 高强度预应力陶瓷的发展与探索[J]. 无机材料学报, 2020, 35(4): 399–406.
BAO Yiwang, SUN Yi, KUANG Fenghua, et al. J Inorg Mater, 2020, 35(4): 399–406.
- [5] 谈翔, 李月明, 包亦望, 等. 钙长石涂层预应力增强建陶瓷砖[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(9): 1366–1372.
TAN Xiang, LI Yueming, BAO Yiwang, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(9): 1366–1372.
- [6] NODEH A A, BARARTI S B, HEJAZI Z, et al. Compositional modification to porcelain opaque glazes by using zirconium silicate[J]. J Aust Ceram Soc, 2015, 51(1): 79–88.
- [7] GORDON D V. High-fire opaque glazes for zircon bodies[J]. J Am Ceram Soc, 1951, 34(2): 33–38.
- [8] DONDI M, ESPOSITO M. Zirconium silicate: origin, production, radioactivity[J]. Ceram Int, 2009, 27(4): 49–53.
- [9] 余有根. 陶瓷釉面耐磨性能的影响因素及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
YU Yougen. The influence factors and the mechanism of ceramic glaze abrasive resistance (in Chinese, dissertation). Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [10] LUTTRELL C B. Glaze for zircon porcelains[J]. J Am Ceram Soc, 1949, 32(10): 327–332.
- [11] MCLEAN J W, HUGHES T H. The reinforcement of dental porcelain with ceramic oxides[J]. Br Dent J, 1965, 119(6): 251–267.
- [12] SOUTHAN D E. Bridge design and laboratory procedures in dental ceramics[J]. Aust Dent J, 1981, 26(6): 407–408.
- [13] GUO X, HUI Y, ZHANG L, et al. Sintering behavior, microstructure and mechanical properties of silicon carbide ceramics containing different nano-TiN additive[J]. Ceram Int, 2010, 36(1): 161–165.
- [14] 万萍, 周莉梅, 余峰, 等. Al₂O₃ 短纤维增强硅基日用陶瓷的研究[J]. 中国陶瓷, 2019, 55(12): 66–73.
WAN Ping, ZHOU Limei, YU Feng, et al. China Ceram (in Chinese), 2019, 55(12): 66–73.
- [15] TAKASHI A, MIHO T, TAKAHITO S, et al. Strengthening in

- porcelain reinforced with alumina particles[J]. *J Ceram Soc JPN*, 2020, 128(12): 1045–1054.
- [16] ISMAHAN S, ABDELHAMID H, SOUAD K, et al. Effect of ZrO_2 additions on densification and mechanical properties of modified resistant porcelains using economic raw materials[J]. *J Aust Ceram Soc*, 2019, 55(2): 489–499.
- [17] YANG S, CHEN J, CHEN P, et al. Effect of Cr_2AlC particle on the dispersion strengthening of CLF-1 steel[J]. *Fusion Eng Des*, 2022, 177: 113076.
- [18] 张联盟, 黄学辉, 宋晓岚. 材料科学基础[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2004, 500–520.
- [19] KINGERY W D, BOWEN H K, UHLMANN D R. Introduction to ceramics[M]. *J Electrochem Soc*, 1977, 124(3): 152.
- [20] 穆柏春. 陶瓷材料的强韧化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 113–114.
- [21] 熊甜甜. 水热法合成硅酸锆粉体[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2016.
- XIONG Tiantian. The synthesising of zircon powder by the hydrothermal method (in Chinese, dissertation). Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic Institute, 2016.
- [22] CARTY W M, SENAPATI U. Porcelain—raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior[J]. *J Am Chem Soc*, 1998, 81(1): 3–20.
- [23] BAO Y W, LIU C C, HUANG J L. Effects of residual stresses on strength and toughness of particle-reinforced $\text{TiN}/\text{Si}_3\text{N}_4$ composite: theoretical investigation and FEM simulation[J]. *Mater Sci Eng*, 2006, 434(1/2): 250–258.
- [24] 刘继富, 沈仰云. 颗粒弥散强化复相陶瓷材料热应力分析[J]. *耐火材料*, 1994, 28(2): 117–119.
- LIU Jifu, SHEN Yangyun. *Refract*, 1994, 28(2): 117–119.