

特约专栏

石榴石增强的牙科饰面瓷研究现状

彭 练, 朱庆山

(中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 回顾了石榴石微晶玻璃在制备方法、热稳定性和力学性能3个方面的研究进展。与传统的玻璃析晶法相比, 先制备石榴石晶体, 然后将其与低软化点玻璃混合烧结, 这种方法在控制石榴石晶体尺寸方面更具优势。烤瓷温度和时间会影响微晶玻璃中石榴石晶体的含量, 进而影响微晶玻璃的热膨胀系数, 因此需要严格控制。微晶玻璃中石榴石晶体的直径应该小于4 μm , 这样可以将微晶玻璃中微裂纹的影响减少到最小。作者制备的一种石榴石微晶玻璃在950 $^{\circ}\text{C}$ 保温60 min后析晶完成, 并且石榴石晶体的尺寸在1 μm 左右。

关键词: 石榴石; 饰面瓷; 微晶玻璃; 热稳定性

中图分类号: TQ171.733 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2012)01-0030-06

Present Status of Leucite Reinforced Dental Porcelain

PENG Lian, ZHU Qingshan

(State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The development of leucite based glass-ceramics was reviewed from three aspects of fabrication methods, thermal stability and mechanical properties. Compared with traditional glass crystallization methods, the sintering method, i. e., the leucite crystals were first synthesized and then were sintered with a low soften temperature glass, was more competitive for controlling the size of leucite crystals. Leucite content was influenced by firing temperature and time, which further influenced the thermal expansion coefficient (TEC) of glass-ceramics, so firing temperature and time must be strictly controlled. The leucite crystal diameter in glass-ceramic should be less than 4 μm , which can minimize microcracking in glass-ceramics. The leucite glass-ceramic fabricated by the authors crystallized completely after annealed at 950 $^{\circ}\text{C}$ for 60 min and the leucite crystal size of the glass-ceramic was about 1 μm .

Key words: leucite; porcelain; glass-ceramic; thermal stability

1 前 言

20世纪60年代问世的瓷熔附金属(PFM, Porcelain Fused to Metal)技术对于齿科材料的发展而言是一次划时代的革命, 它将陶瓷的美学性能和金属的力学性能完美地结合在一起^[1]。这种熔附于金属表面起装饰作用的瓷即为人们常说的饰面瓷, 通常可以将其分为3层: 第1层瓷为遮色瓷(Opaque), 其直接涂覆在金属基底上, 用来增强金瓷结合强度以及遮盖金属的底色; 第2层瓷为体瓷(Body), 其涂覆在遮色瓷上, 用来提供牙齿的颜色; 第3层瓷分为两种, 分别涂覆于体瓷的两个部位, 涂覆于牙齿尖端部位的为切端瓷(Incisal), 用来体现牙

齿尖端部位特有的形状和色泽, 而涂覆于牙齿中上部位的则为透明瓷(Translucent), 用来体现牙齿表面的光泽, 图1即为一种典型的瓷熔附金属示意图。除了选择金属作为基底材料之外, 还可以选择陶瓷作为基底材料, 只是在选择陶瓷作为基底材料时, 不需要涂覆遮色瓷。

饰面瓷的本质是微晶玻璃, 根据析出的主晶相的不同, 饰面瓷大致可以分为4类, 这4类饰面瓷所含的主晶相分别为: 云母, 石榴石, 氟磷灰石和二硅酸锂^[2-3]。石榴石微晶玻璃是目前使用得最为广泛的饰面瓷之一, 它主要由 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ 玻璃相和石榴石(KAlSi_2O_6)微晶构成。 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ 玻璃的折射率为1.47~1.51, 石榴石的折射率为1.508^[4-5]。由于晶相的折射率和玻璃相的折射率非常接近, 因此石榴石微晶玻璃具有非常好的光学通透性, 这对于石榴石饰面瓷的颜色调配是非常有利的。此外, 由于石榴石晶体具有很高的热膨胀系数 $(20\sim25)\times10^{-6}\text{K}^{-1}$, 而 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ 玻璃相的热膨胀系数则较低 $(7\sim8)\times10^{-6}\text{K}^{-1}$ ^[6],

收稿日期: 2011-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21006111, 20876159)

作者简介: 彭 练, 男, 1979年生, 工学博士, 副研究员

通信作者: 朱庆山, 男, 1969年生, 教授, 博士生导师

因此,白榴石微晶玻璃的热膨胀系数可以在很宽的范围内变化 $[(8 \sim 14) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}]$,从而可以匹配具有不同热膨胀系数的基底材料,譬如钛合金 $(\sim 9.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})$,镍基和钴基合金 $[(13.8 \sim 15.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}]$,氧化锆瓷块 $(\sim 10.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})$ 等。本文将从白榴石微晶玻璃的制备方法、热稳定性和力学性能3个方面介绍白榴石增强的牙科饰面瓷的研究进展,并分析白榴石微晶玻璃作为牙科饰面瓷需要改进的方面。

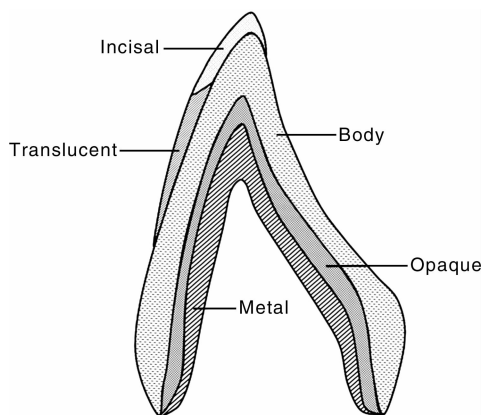


图1 瓷熔附金属示意图

Fig. 1 Schematic of porcelain fused to metal (PFM)

2 白榴石微晶玻璃的制备方法

白榴石微晶玻璃是一种复合材料,由白榴石微晶和玻璃相构成,其中白榴石晶体的合成是这种微晶玻璃制备的关键。根据文献的报道,白榴石微晶玻璃的制备方法可以分为两种:一种是传统的制备微晶玻璃的方法,即先制备原始玻璃,再通过烧结析晶的方法将原始玻璃处理成白榴石微晶玻璃;另一种就是先制备白榴石晶体,然后再将得到的白榴石晶体(或是含有白榴石晶体的微晶玻璃)与一种低软化点的玻璃混合烧结制备最终的微晶玻璃。

制备白榴石微晶玻璃的传统方法是利用 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ 玻璃表面析晶的原理^[3,7-9]。即先根据 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ 三元相图制备原始玻璃,然后将原始玻璃磨成粉,采用合适的热处理制度使玻璃粉表面析出白榴石晶体,再将析晶后的玻璃粉磨成需要的粒径,通过微晶玻璃粉的烧结就可以制备出最终的白榴石微晶玻璃。Cattell等人通过这种方法制备出了白榴石晶体均匀分布,且具有精细尺寸 $(0.3 \sim 1 \mu\text{m})$ 的微晶玻璃^[7]。这种方法的核心就是要设计合适的热处理制度以控制白榴石晶体的尺寸,如果白榴石晶体的尺寸生长得太大,则不利于饰面瓷的长期寿命。此外,微晶玻璃中玻璃相的软化温度也是需要仔细考虑的一个方面,因为它直接影响到饰面瓷

的烤瓷温度。然而微晶玻璃中玻璃相的软化温度与原始玻璃的软化温度完全不同,这是因为析出白榴石晶体后,残余玻璃相的组成已经偏离了原始玻璃的组成,所以,需要考虑白榴石晶体的质量分数、原始玻璃的密度以及微晶玻璃的密度等综合因素,才能确定残余玻璃相的组成,然后才能设计残余玻璃相的软化温度。

另一种制备白榴石微晶玻璃的方法则是先制备白榴石晶体,然后将其与一种低软化点玻璃混合烧结来制备微晶玻璃。制备白榴石晶体的方法主要包括:水热合成法、共沉淀法、溶胶-凝胶法和玻璃析晶法^[10-15]。其中前3种方法都是制备单纯的白榴石晶体,而且特别适合制备尺寸可控、形貌可控和相态可控(可以选择四方相或是立方相白榴石)的白榴石晶体。譬如,Kloužková等人通过水热法制备出了粒径尺寸为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 的四方相白榴石晶体^[14]。而通过玻璃析晶法制备白榴石晶体则如前所述,这种方法同样可以制备出晶粒尺寸精细的白榴石晶体。需要指出的是,与传统制备白榴石微晶玻璃的方法相比,这种先制备白榴石晶体,再将其与一种低软化点玻璃复合的方法,有一个很明显的优势,即白榴石晶体的尺寸不仅可以通过工艺(溶剂、温度、时间等)来控制,而且可以通过球磨这种机械方法进行控制。譬如,即使析出的白榴石晶体尺寸达到 $100 \mu\text{m}$ 甚至更大,那么也可以通过球磨的方法将其磨至需要的尺寸,然后再与低软化点玻璃进行复合,这显然大大拓宽了白榴石微晶玻璃的制备手段。

3 热稳定性

在烤瓷过程中,饰面瓷往往需要经过几次涂覆、烤瓷才能达到理想状态。由于白榴石的热膨胀系数非常高,因此白榴石晶相的含量对于微晶玻璃的热膨胀系数有非常大的影响。Piché等人测量了两种商业饰面瓷的白榴石含量,发现其白榴石含量(质量分数)分别为:25%和41%,对应的饰面瓷的热膨胀系数分别为: $13.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($25 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$)和 $19.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($25 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$)^[16],由此可见,白榴石含量对微晶玻璃热膨胀系数的影响。因此,如果白榴石晶相的含量在烤瓷升降温过程中发生大的变化,那么,就会导致微晶玻璃的热膨胀系数出现大的波动,从而偏离初始设计值,最终导致崩瓷。白榴石晶相的含量会以两种形式发生改变:①烤瓷过程中白榴石晶相持续析出;②白榴石晶相发生相转变以及化学反应。下面将讨论这两种情况对白榴石微晶玻璃热稳定性的影响。

3.1 烤瓷过程的影响

白榴石微晶玻璃中的玻璃相是一种介稳体系,因

此,在烤瓷升降温过程中有析晶的驱动力。Isgrò 等人研究了烤瓷次数对两种白榴石微晶玻璃(Carrara Vincent 和 Exp 1)热膨胀系数(Thermal Expansion Coefficient, TEC)的影响^[17]。Carrara Vincent 和 Exp 1 在经历了 4 次烤瓷升降温之后,热膨胀系数发生了较明显的改变,如表 1 所示。Carrara Vincent 和 Exp 1 的热膨胀系数变化最大值分别为 5% 和 7.3%,Isgrò 等人认为这种热膨胀系数的波动可能是由于白榴石晶体在反复烤瓷过程中不断析出导致的。

表 1 Carrara Vincent 和 Exp 1 的热膨胀系数随烤瓷次数的变化
Table 1 Dependence of TEC of Carrara Vincent and Exp 1 on firing numbers

Times	Firing temperature /°C		TEC/×10 ⁻⁶ K ⁻¹	
	Carrara Vincent	Exp1	Carrara Vincent	Exp1
1st	845	800	13.9	12.3
2nd	840	795	14.4	12.5
3rd	835	790	14.5	13.2
4th	835	790	14.6	12.6

Mackert 等人考察了快冷和慢冷两种不同降温速率对 7 种微晶玻璃中白榴石晶相含量的影响^[18]。其研究结果表明,与快冷过程比起来,慢冷过程明显地增加了微晶玻璃中白榴石晶相的含量,增加幅度最小为 8.5%,最大为 55.8%,平均增加幅度为 26.9%,这种晶相含量的剧烈波动无疑会使得微晶玻璃的热膨胀系数值严重偏离初始设计值,从而增加崩瓷的风险。因此,饰面瓷的实际烤瓷过程都是采用快速降温以避免白榴石晶体的进一步析出。Mackert 等人进一步考察了这 7 种白榴石微晶玻璃的晶相含量随 750 °C 热处理时间的变化规律,发现在 750 °C 保温 16 min 后,所有微晶玻璃中白榴石晶相的含量(体积分数)都有所增加,最少增加 6.1%,最多增加 21.3%^[19]。并且推导出白榴石晶相含量随热处理时间的变化关系如(1)式所示:

$$L_t = L_0 + R_0(1 - e^{-b_R t^{3/2}}) \quad (1)$$

式中, L_0 是微晶玻璃中白榴石的初始体积分数, L_t 是 t 时间白榴石的体积分数, R_0 是微晶玻璃的玻璃相中初始 K_2O 的浓度, b_R 是白榴石生成反应的速率常数。从(1)式不难看出,如果热处理时间无限长,那么理论上玻璃中所有的 K_2O 都会以白榴石晶体的形式析出。Mackert 等人还考察了热膨胀系数的测量过程对这 7 种微晶玻璃中白榴石晶相含量的影响^[20]。其升降温制度是以 3 °C/min 升温至微晶玻璃的软化温度,然后在空气中快速冷却。他们发现,这种热膨胀系数测量过程,对 7 种微晶玻璃中白榴石晶相含量几乎没有任何影响,这可能是由于在热膨胀测试过程中,温度仅仅升至微晶玻璃的软化温度,从而不足以引起白榴石晶体的进一步

析出。除此之外,Mackert 等人还考察了一种热压铸型白榴石微晶玻璃的白榴石晶相含量在烤瓷过程中的变化情况^[21]。他们发现经过第 1 次烤瓷后,白榴石晶相的含量(质量分数)从 41.3% 增加到 43.4%,经过第 2 次烤瓷后,白榴石晶相的含量从 43.4% 增加到 45.4%。但是,再增加烤瓷次数就不会影响白榴石晶相的含量,即白榴石晶相的含量在经历两次烤瓷后达到稳定。综上所述,时间和烤瓷温度是影响微晶玻璃中白榴石含量的两个关键因素。

作者也研究了一种 $SiO_2-Al_2O_3-K_2O$ 微晶玻璃(主晶相为白榴石)的热膨胀行为随 950 °C 热处理时间的变化关系,如图 2 所示。该微晶玻璃在 950 °C 保温 10 min 后的热膨胀系数为 $8.3 \times 10^{-6} K^{-1}$ ($RT \sim 480$ °C),但是在 950 °C 保温 60 min 后的热膨胀系数却升高至 $9.5 \times 10^{-6} K^{-1}$ ($RT \sim 480$ °C)。这表明微晶玻璃在 950 °C 保温 60 min 的过程中,一直在不断析出白榴石晶体,因此导致热膨胀系数升高。将该微晶玻璃在 950 °C 保温 120 min 后,其热膨胀系数为 $9.4 \times 10^{-6} K^{-1}$ ($RT \sim 480$ °C),而且其热膨胀行为几乎与保温 60 min 的完全一致(如图 2 所示,两条曲线几乎完全重叠),这说明该微晶玻璃在 950 °C 保温 60 min 后白榴石晶体已完全析出,因此,尽管将保温时间延长了 60 min,但微晶玻璃的热膨胀行为却几乎没有变化。图 3 是该微晶玻璃在 950 °C 分别保温 (a) 10 min、(b) 60 min 和 (c) 120 min 后的 SEM 像。从图 3 中可以看出,该微晶玻璃中白榴石晶体的尺寸并未随热处理时间的延长而变化,始终维持在 1 μm 左右。由于该微晶玻璃在 950 °C 热处理 60 min 后就具有稳定的且与 ZrO_2 相匹配的热膨胀系数,并且晶体尺寸始终维持在 1 μm 左右,因此,比较适合作为锆块的饰面瓷。

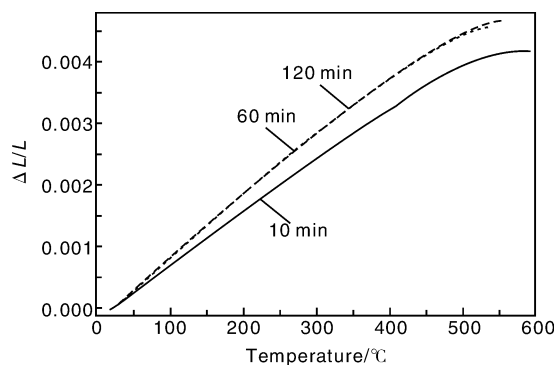


图 2 白榴石微晶玻璃的热膨胀行为随 950 °C 热处理时间的变化关系

Fig. 2 Dependence of thermal expansion behavior of a leucite glass-ceramic on the annealing time at 950 °C

综上所述,作者认为,白榴石微晶玻璃在经历烤瓷

程序之前就应使其充分析晶,使其中的白榴石晶相达到一种稳定的状态,以保证其在经历烤瓷程序的过程中不

会再析出白榴石晶体,从而确保微晶玻璃热膨胀系数的稳定。

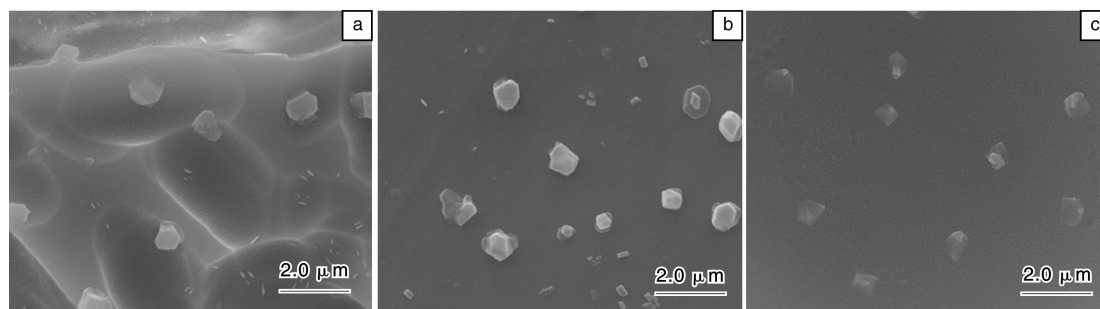


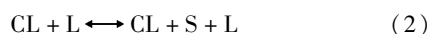
图3 白榴石微晶玻璃在950 °C保温(a) 10 min, (b) 60 min 和(c) 120 min 后内部结构的SEM像

Fig. 3 SEM images of microstructure of a leucite glass-ceramic annealed at 950 °C for (a) 10 min, (b) 60 min, and (c) 120 min

3.2 相转变以及化学反应的影响

白榴石晶体有两种晶相:低温相(四方相)和高温相(立方相)。在400~600 °C,四方相和立方相会发生相互转变,而且这种转变是可逆的。立方相向四方相的转变会造成1.2%的体积收缩,这会使得微晶玻璃内产生压应力,有利于阻止裂纹扩展^[22]。四方相白榴石的热膨胀系数很高,为 $25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (20~800 °C),而立方相白榴石的热膨胀系数则较低,为 $\sim 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (20~800 °C)^[23]。四方相白榴石是希望的晶相,因为其具有高的热膨胀系数,而这通常不难做到,因为四方相白榴石是热力学稳定相,在经历烤瓷程序后,白榴石晶相通常以四方相的形式存在于最后的饰面瓷中^[24-25]。

除了白榴石晶相自身的相转变之外,白榴石、钾长石(KAlSi_3O_8)和玻璃液相之间也会发生相互转化。钾长石的热膨胀系数比白榴石的低很多,只有 $(4 \sim 8) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (20~700 °C)^[24]。因此,钾长石的析出会大幅度降低微晶玻璃的热膨胀系数,所以应该避免析出钾长石。根据 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元相图,白榴石在降温过程中会分解为钾长石和玻璃液相。Barreiro等人通过详细的实验研究绘制了一种商业白榴石微晶玻璃(Ceramco)的时间-温度-相转变图(Time-Temperature-Transformation, TTT)^[24]。他们发现这种微晶玻璃最快在900 °C保温20 min后就开始出现钾长石,并且白榴石最快在850~900 °C保温700 min后就会消耗殆尽。此外,Barreiro等人认为立方相白榴石(CL)、钾长石(S)和玻璃液相(L)之间在980 °C存在如(2)式的平衡关系:



而三者在930 °C存在如(3)式的平衡关系:



因此,在白榴石微晶玻璃的制备过程中应严格控制

晶化温度和时间,以防止钾长石形成。而且,由于烤瓷温度通常在900~950 °C,所以烤瓷次数也应尽可能减少,因为过多的烤瓷次数,无疑会增加烤瓷温度下的保温时间,加大钾长石形成的风险。

4 力学性能

饰面瓷中的白榴石晶相除了提高饰面瓷的热膨胀系数外,另一个作用就是提高饰面瓷的力学性能。Tsetsekou等人考察了一种商业低温瓷(Omega 900, VITA)的断裂模量、弹性模量和维氏硬度随烤瓷温度的变化关系^[25]。他们发现当烤瓷温度为800 °C时,这种饰面瓷中的白榴石含量达到最大值,与此对应的是饰面瓷的断裂模量、弹性模量和维氏硬度也达到最大值。因此,饰面瓷的力学性能随着白榴石含量的增加而增大。

饰面瓷的热膨胀系数通常比基底材料的热膨胀系数略低,这有助于在降温过程中使饰面瓷内产生合适的压应力以阻止裂纹扩展,有利于提高饰面瓷的强度。另一方面,由于白榴石微晶玻璃中白榴石晶相的热膨胀系数远高于玻璃相的热膨胀系数,因此在经历烤瓷降温程序后,如果白榴石晶体尺寸太大,那么微晶玻璃体内就会产生较大的热应力,这种热应力是诱发以及恶化微裂纹的潜在因素^[26]。因此,白榴石晶体的尺寸必须处于一个合适的范围,否则将会因为晶体尺寸太大而使得饰面瓷内的热应力超过临界值,从而导致微裂纹密度增大并最终恶化饰面瓷的力学性能。Mackert等人通过计算证明,白榴石晶体的临界直径为4 μm,当白榴石晶体的直径小于4 μm时,饰面瓷中的微裂纹会被降低到最小程度^[27]。Zhang等人也对白榴石颗粒尺寸对饰面瓷力学性能的影响做了非常系统的研究^[28]。他们认为白榴石晶体的尺寸对饰面瓷的硬度、弯曲强度以及断裂韧性没有明显的影响,但是对饰面瓷的相对密度以及强度的可

靠性却有明显的影响: 相对密度和强度的可靠性随着石榴石晶体尺寸的增加而减小。其原因还是由于相对密度以及强度的可靠性都与饰面瓷中微裂纹的密度成反比, 而微裂纹的密度随着石榴石晶体尺寸的增加而增多。他们得出了与 Mackert 等人一致的结论, 即石榴石晶体的临界直径为 $4\ \mu\text{m}$ 。因此, 在制备石榴石微晶玻璃的过程中要仔细控制石榴石晶体的直径, 使其小于 $4\ \mu\text{m}$, 这是石榴石饰面瓷长期性能的保证。

5 结 语

饰面瓷是齿科修复体材料中一种非常重要的材料, 其在 PFM 上的应用已经接近半个世纪, 而且长盛不衰。近年来随着氧化锆块的迅速崛起, 饰面瓷的应用获得了进一步的发展。尽管商业白石榴石微晶玻璃在齿科饰面瓷的应用上已获得广泛认可, 但是其崩瓷的风险却依然随着烤瓷次数的增加而加大, 这反映出商业白石榴石微晶玻璃的显微结构依然不够稳定, 会随着热处理次数的增加而改变。因此, 未来努力的方向是设计白石榴石微晶玻璃的显微结构、控制白石榴石晶体的尺寸和数量, 使其达到一种稳定的状态, 这不仅是饰面瓷各种性能(光学性能、力学性能等)的要求, 也是饰面瓷长期寿命的保证。

参考文献 References

- [1] Kelly J R. Ceramics in Restorative and Prosthetic Dentistry[J]. *Annual Review of Materials Science*, 1997, 27: 443–468.
- [2] Höland W, Rheinberger V, Apel E. Principles and Phenomena of Bioengineering with Glass-Ceramics for Dental Restoration[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27: 1 521–1 526.
- [3] Höland W, Rheinberger V, Apel E, et al. Clinical Applications of Glass-Ceramics in Dentistry[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2006, 17: 1 037–1 042.
- [4] Schairer J F, Bowen N L. The System $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [J]. *American Journal of Science*, 1955, 253: 681–746.
- [5] Qu Yumei(曲玉梅), Zhang Yi(张 翼), Yang Jinping(杨金萍), et al. 石榴石的合成及其在牙科烤瓷材料中应用的进展[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐通报), 2006, 25(5): 87–91.
- [6] Li X X, Shaw L L. Formation of Leucite-Free Zone in Laser Densified Dental Porcelains[J]. *Materials Letters*, 2007, 61: 3 946–3 950.
- [7] Cattell M J, Chadwick T C, Knowles J C, et al. The Nucleation and Crystallization of Fine Grained Leucite Glass-Ceramics for Dental Applications[J]. *Dental Materials*, 2006, 22: 925–933.
- [8] Cattell M J, Chadwick T C, Knowles J C, et al. The Crystallization of an Aluminosilicate Glass in the $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ System[J]. *Dental Materials*, 2005, 21: 811–822.
- [9] Chen X, Chadwick T C, Wilson R M, et al. Crystallization of High-Strength Fine-Sized Leucite Glass-Ceramics[J]. *Journal of Dental Research*, 2010, 89 (12): 1 510–1 516.
- [10] Zhang Y, Qu C, Rao P G, et al. Nanocrystalline Seeding Effect on the Crystallization of Two Leucite Precursors[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90 (8): 2 390–2 398.
- [11] Kloužková A, Mrázová M, Kohoutková M. Synthesis of Partially Stabilized Leucite[J]. *Journal of Physics and Chemistry*, 2007, 68: 1 207–1 210.
- [12] Novotná M, Kloužková A, Maixner J, et al. Preparation of Leucite Powders with Controlled Particle Size Distribution[J]. *Ceramics-Silikáty*, 2005, 49 (4): 252–258.
- [13] Yoon C K, Rasmussen S T, Brien W J, et al. Properties of Leucite-Glass Composites Prepared by a Coprecipitation Process[J]. *Journal of Materials Research*, 1994, 9 (9): 2 285–2 289.
- [14] Kloužková A, Mrázová M, Kohoutková M. Preparation of Leucite Powder with Controlled C-Phase Fraction for a Variety of Dental Applications[J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 361–363: 897–900.
- [15] Zhang Y, Lv M, Rao P G, et al. Quantitative XRD Analysis of Hydrothermally-Derived Leucite Content in Dental Porcelain Ceramics[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2007, 115 (5): 329–332.
- [16] Piché P W, Brien W J, Groh C L, et al. Leucite Content of Selected Dental Porcelains[J]. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1994, 28: 603–609.
- [17] Isgro G, Kleverlaan C J, Wang H, et al. The Influence of Multiple Firing on Thermal Contraction of Ceramic Materials Used for the Fabrication of Layered All-Ceramic Dental Restorations[J]. *Dental Materials*, 2005, 21: 557–564.
- [18] Mackert J R, Evans A L. The Effect of Cooling Rate on Leucite Volume Fraction in Dental Porcelains[J]. *Journal of Dental Research*, 1991, 70: 137–139.
- [19] Mackert J R, Twigg S W, Evans-Williams A L. Isothermal Anneal Effect on Leucite Content in Dental Porcelains[J]. *Journal of Dental Research*, 1995, 74 (6): 1 259–1 265.
- [20] Mackert J R, Khajotia S S, Russell C M. Potential Interference of Leucite Crystallization During Porcelain Thermal Expansion Measurement[J]. *Dental Materials*, 1996, 12: 8–12.
- [21] Mackert J R, Russell C M. Leucite Crystallization During Processing of a Heat-Pressed Dental Ceramic[J]. *The International Journal of Prosthodontics*, 1996, 9 (3): 261–265.
- [22] Mackert J R, Butts M B, Fairhurst C W, et al. The Effect of the Leucite Transformation on Dental Porcelain Expansion[J]. *Dental Materials*, 1986, 2: 32–36.
- [23] Rouf M A, Hermansson L, Carlsson R. Crystallization of Glasses in the Primary Phase Field of Leucite in the $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ System[J]. *Transactions and Journal of the British Ceramic Society*, 1978, 77: 36–39.

- [24] Barreiro M M, Vicente E E. Kinetics of Isothermal Phase Transformations in a Dental Porcelain [J]. *Journal of Materials Science: Materials Medicine*, 1993, 4: 431 - 436.
- [25] Tsetsekou A, Papadopoulos T, Adamopoulos O. Microstructure Effect on the Properties of a Commercial Low-Fusing Dental Porcelain[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2002, 13: 407 - 416.
- [26] Mackert J R, Rueggeberg F A, Lockwood P E, *et al.* Isothermal Anneal Effect on Microcrack Density around Leucite Particles in Dental Porcelain [J]. *Journal of Dental Research*, 1994, 73 (6): 1 221 - 1 227.
- [27] Mackert J R, Twigg S W, Russell C M, *et al.* Evidence of a Critical Leucite Particle Size for Microcracking in Dental Porcelains[J]. *Journal of Dental Research*, 2001, 80 (6): 1 574 - 1 579.
- [28] Zhang Y, Rao P G, Lü M, *et al.* Mechanical Properties of Dental Porcelain with Different Leucite Particle Sizes[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91 (2): 527 - 534.



专栏特约编辑宋宝珍



特约撰稿人韩布兴



特约撰稿人卢天健



特约撰稿人宋延林



特约撰稿人朱庆山

宋宝珍：女，1942年生，研究员、博导，享受国务院特殊津贴；曾任中国科学院过程工程研究所学术委员、战略发展委员；研究方向为纳米超细磁性粉体、彩色激光打印粉、复印粉超细粉体高技术制备、甲壳素材料的高技术提取及高值化应用；承担了包括国家“863”、支撑项目、国家高新工程(空天)等多项国家、省部级重点研究课题；以第一完成人身份获世界科学技术发展成就奖，国家科技进步二等奖，省部级一等、二等奖8项，获中科院巾帼建功标兵称号。

韩布兴：男，1957年生，研究员、博导，英国皇家化学学会 Fellow，国家杰出青年基金获得者；主要开展化学热力学与绿色化学交叉

的研究；发表 SCI 收录论文 400 余篇，其中在影响因子 3 以上期刊发表论文 200 余篇，被引用 7 000 余次，在重要国际学术会议作大会报告和邀请报告 50 余次；担任《Chem Sci》、《Green Chem》等 16 种期刊的编委或顾问编委；任国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)绿色化学分会主席、中国化学会化学热力学与热分析专业委员会主任等。

卢天健：男，1964年生，工学博士(哈佛大学)，教授、博导，国家“千人计划”入选者，“973”项目首席科学家；主要从事生物热-力耦合学、热疼痛、生物材料、康复科学与工程、固体力学和传热学的研究；曾获中国青年科学家奖、中国侨界贡献奖(创新成果)等奖

项；获得了我国在“生物组织热-力耦合学”领域的第一个杰出青年基金、高等学校学科创新引智计划(111 计划)项目、国家自然科学基金重大国际合作研究项目以及国家自然科学基金外国青年学者研究基金。

宋延林：男，1969年生，研究员、博导，中国科学院化学研究所新材料实验室主任，国家杰出青年基金获得者；曾获国家自然科学基金二等奖 2 项，以及第十一届中国青年科技奖，首届“中国化学会-阿克苏诺贝尔奖”、第十届中国科学院杰出青年荣誉称号，2011 年入选首批科技北京领军人才；SCI 收录论文 150 余篇，论文被他人引用 2 900 余次，主持和参加编写英文专著 5 部，获

授权发明专利 50 余项。

朱庆山：男，1969年生，工学博士、研究员、博导，中科院“百人计划”入选者；主要从事资源化工、化工过程强化、纳微粉体结构调控、瓷牙科材料、封接材料等方面的研究工作；在国际主流学术期刊等国内外发表学术论文 90 多篇；现任国际期刊《Particuology》、《Journal of Crystallization Physics and Chemistry》及《International Review of Chemical Engineering》编委，《过程工程学报》副主编，中国颗粒学会流态化专业委员会副主任等职。

徐 峰：男，1980年生，工学博士(英国剑桥大学)，哈佛大学博士后，教授，西安交通大学生物医学工程与生物力学研究中心主



特约撰稿人徐 峰

任；担任《Journal of Mechanics in Medicine and Biology》和《Journal of Medical Imaging and Health Informatics》期刊的副主编，同时担任《International Journal of Heat and Mass Transfer》、《Journal of Biomaterials Science: Polymer Edition》、《Biofabrication》等 12 个国际期刊的审稿人；在国际期刊上发表论文 70 余篇和 60 余篇会议论文/摘要，特邀报告 15 个，申报国家发明专利 5 项，已出版专著 4 本。