

超细镁铝尖晶石凝胶注模用浆料的制备

张亚倩, 张荣实

(天津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: 研究了在凝胶注模用超细镁铝尖晶石浆料的制备工艺中, 粉体粒度、pH 值、分散剂等对浆料流变性、Zeta 电位、粘度和稳定性的影响及作用机理。实验结果表明: 相同剪切速率下, 随着粉体粒径的减小, 浆料粘度变大, 稳定性提高。当浆料中不添加分散剂时, 超细镁铝尖晶石浆料在酸性条件下的 Zeta 电位绝对值比在碱性条件下高。添加分散剂后, 等电位点对应 pH 值向酸性方向移动, 且随固相含量的提高, 制备低粘度浆料所需分散剂百分含量越低。pH 值和分散剂含量均存在最佳范围, 过高和过低, 浆料的流变性和稳定性均会变差。Zeta 电位绝对值的大小仅仅是影响浆料稳定性的一个方面, 如果分散剂过量, 即使浆料颗粒 Zeta 电位绝对值很大, 浆料也会产生团聚和絮凝。

关键词: 浆料制备; 浆料流变性和稳定性; 凝胶注模成型; 超细镁铝尖晶石

中图分类号: O741.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1121004

Preparation of ultra-fine magnesium aluminate spinel slurry for gelcasting forming

Zhang Yaqian, Zhang Rongshi

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: The effect of particle size, pH value and dispersant on the rheological properties, Zeta potential, viscosity and stability of slurry and its mechanism were studied. The experimental results show that the viscosity of slurry increases and the stability increases with the decrease of particle size at the same shear rate. When no dispersant is added in the slurry, the absolute value of Zeta potential of the ultra-fine magnesium aluminate spinel slurry under acidic condition is higher than that in alkaline condition. While, in the presence of dispersant, the pH value corresponding to the isoelectric point moves in an acidic direction, and the percentage of dispersant required for preparing low viscosity slurry decreases with the increase of solid content. pH value and dispersant content have the best range, if too high or too low, the rheological and stability of the slurry will be worse. The absolute value of the Zeta potential is just one aspect that affects the stability of the slurry, and if the dispersant is excessively large, even if the slurry particles Zeta potential absolute value is large, and the slurry will produce agglomeration and flocculation.

Key words: slurry preparation; rheological and stability of the slurry; gelcasting forming; ultra-fine magnesium aluminate spinel

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-11

作者简介: 张亚倩(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事红外透明陶瓷成型与制备方面的研究。Email: zhangyaqianedu@163.com

0 引言

镁铝尖晶石($MgAl_2O_4$)透明陶瓷是一种从紫外、可见光到中红外波段具有重要应用的光学材料。它具有透过波段宽、透射率高、力学性能好、介质损耗小、抗腐蚀、耐高温、硬度大等特点,是一种新型、理想的窗口材料^[1-3]。自 20 世纪 60 年代,美国的 GE 公司通过热压烧结技术首先制备出镁铝尖晶石透明陶瓷始,热压烧结技术便广泛地在透明 $MgAl_2O_4$ 陶瓷制备中得到应用^[4],同时热压烧结也有其不可避免的缺点:如设备结构复杂不便于维修,生产成本低,并且由于其单向加压,导致材料存在各向异性,影响其光学和力学性能。因此,高效率、低成本的无压烧结技术成为镁铝尖晶石透明陶瓷制备的发展方向之一^[5]。要实现透明陶瓷的无压烧结,制备得密度高且分布均匀的素坯是镁铝尖晶石透明陶瓷制备的重点。

凝胶注膜技术是 20 世纪 90 年代初由美国橡树岭国家重点实验室的 Nunn 等人发明的一项成型技术。其基本原理是先由有机单体和交联剂及其他添加剂配制成低浓度预混液,再将陶瓷粉料分散其中制备出低粘度、高固相体积分数的浆料,在引发剂与催化剂的作用下,单体与交联剂发生原位聚合反应,形成三维网络结构,将陶瓷颗粒原位黏结并固化成型。成型后坯体将进行脱模、干燥、排胶及烧结等工序,最终获得所需形状的陶瓷^[6]。凝胶注模成型法无需施加外力,不存在单向加压造成的各向异性问题,在该工艺过程中,具有良好分散性和稳定性的高固相含量陶瓷料浆制备是关键,能够保证坯体密度均匀的同时提高素坯的致密度,为高质量陶瓷的成功制备提供技术支持。多年以来,众多科研工作者在这方面做了大量研究,但是多数集中于对 Al_2O_3 、 Si_3N_4 、 ZrO_2 、 Y_2O_3 、PZT、YAG 等材料体系的成型工艺探究^[7-11],如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所针对纳米级碳化硅凝胶注模用浆料的流变性做了深入研究^[12],并通过凝胶注模成型技术制备出了 1.5m 量级的 SiC 素坯和大口径的 SiC 反射镜^[13-14]。但是,针对镁铝尖晶石粉体浆料的制备方面的研究却为数不多,尤其是关于超细镁铝尖晶石水基高固相料浆的制备工艺方面的研究几乎未见报道,笔者及所在实验室在该方面做了深入研究,将在下面展开讨论。

1 实验

1.1 实验原料

实验中使用的超细纳米镁铝尖晶石为粒度不同的 I 粉和 II 粉,其纯度大于 98%,分散剂为聚丙烯酰胺。

1.2 实验方法

将镁铝尖晶石粉体按照一定的体积分数来配料,加入适量分散剂和去离子水后放入球磨罐中进行球磨,最终制成浆料。利用盐酸和氨水来调节浆料的酸碱度。浆料的 pH 值采用上海仪电科学仪器股份有限公司生产的 PHSJ-4A 型 pH 计测定。用 BROOKFIELD 粘度计测量浆料粘度。Zeta 电位采用英国 MALVERN 公司生产的 ZETA-SIZER4 测量。采用英国 MALVERN 公司的粒径测定仪测量粉体粒径和分布。

2 实验结果与分析

2.1 粉体粒度对浆料流变性能的影响

图 1 是这两种超细镁铝尖晶石粉体的粒度分布曲线。可以看到 I 粉的粒径更小,平均粒径为 $0.192 \mu m$,II 粉的平均粒径为 $0.523 \mu m$,且二者粒径分布范围都比较窄,粒径大小相对集中。图 2 为这两种超细粉体浆料的流变曲线图。其中,两种浆料的固相体积分数均为 45%,pH 值均为 8。从图中可以看出,无论是 I 粉还是 II 粉的浆料都表现出剪切变稀特性,即随

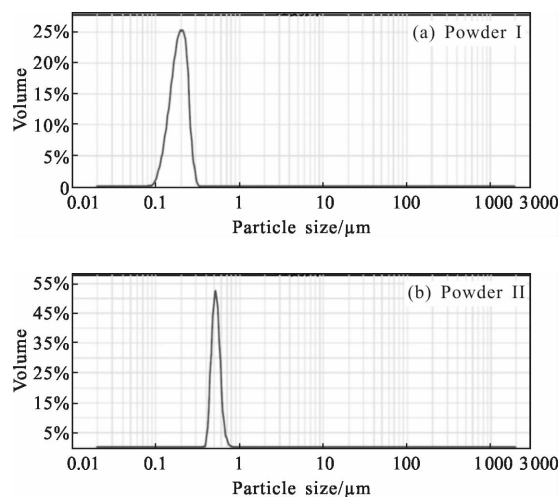


图 1 超细尖晶石粉体粒度分布曲线

Fig.1 Particle size distribution of the magnesium spinel suspensions

着剪切速率的增加,浆料粘度变小。且在剪切速率小于 50 s^{-1} 范围内变化显著,在剪切速率大于 50 s^{-1} 范围内变化相对平缓,接近牛顿流体。在这个过程中,浆料经过剪切,颗粒分布结构和相互作用被破坏,所以浆料流动性提高。对比 I 粉和 II 粉的浆料的流变曲线还可以看到,随着粉体颗粒粒径的减小,在相同的剪切速率下,浆料粘度增加。所以,II 粉浆料的最大固相含量可达 50%,I 粉浆料的最大固相含量只有 47%。这是因为在浆料固含量不变的情况下,减小内部颗粒粒径,比表面积增大,其效果相当于增加了颗粒的数量,从而增强了颗粒间的相互作用强度,降低了体系的流动性。

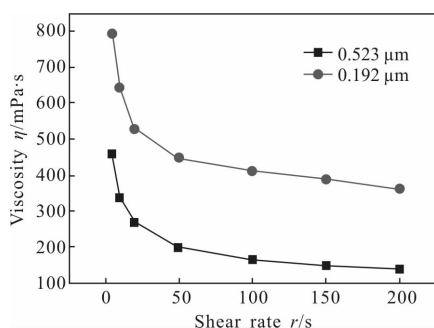


图 2 超细镁铝尖晶石浆料流变曲线

Fig.2 Rhological curves of superfine magnesium aluminum spinel suspensions

2.2 pH 值和分散剂对超细镁铝尖晶石浆料 Zeta 电位的影响

图 3 为超细尖晶石悬浮体系 Zeta 电位与浆料 pH 值关系曲线。由图可见,不加入分散剂时,超细镁铝尖晶石 II 粉在酸性和碱性环境中均能形成溶胶。在酸性介质中,超细尖晶石成为带正电的胶粒,形成正溶胶;在碱性介质中形成负溶胶。等电位点所对应的 pH 值大约为 8.5,且在酸性条件下的 Zeta 电位的绝对值最大为 53.1 mV,大于碱性条件下的 Zeta 电位的最大绝对值为 22.9 mV。在超细尖晶石悬浮体系中,要制备流变性能良好的浆料,光靠 Zeta 电位的静电稳定机制是远远不够的,必须要借助分散剂的静电空间稳定机制。从图 3 曲线还可以看出,在超细镁铝尖晶石 II 粉悬浮体系中加入 5% 分散剂后,其等电位点对应的 pH 值向酸性方向移动,大约在 4 左右。在酸性条件下,悬浮体系的 Zeta 电位绝对值降低。这是因为此时超细尖晶石粉体粒子表面净电荷

为正,分散剂电离出的带负电基团聚丙烯酸根在粉体表面上的吸附,结果导致电性中和,粒子间的排斥势能降低,Zeta 电位必然也降低。在碱性条件下,悬浮体系的 Zeta 电位绝对值大幅度增加,此时细尖晶石粉体粒子表面净电荷为负,聚丙烯酸根在粉体表面产生了特性吸附,提高了颗粒表面的电荷密度,增加了颗粒间的双电层斥力,即提高了 Zeta 电位绝对值。且在 pH 值为 9 时,取得最大 Zeta 电位绝对值 73.5 mV。

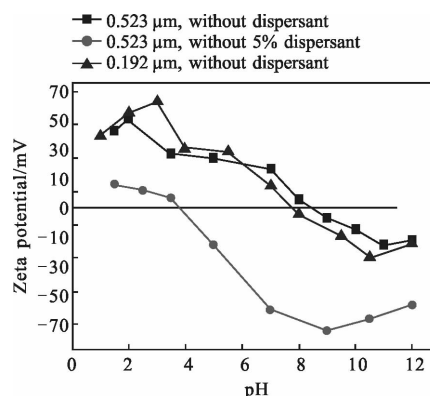


图 3 超细尖晶石悬浮体系 Zeta 电位与浆料 pH 值关系曲线

Fig.3 Relationship between Zeta-potential and pH for the superfine magnesium aluminum spinel suspensions

对比不同粒度尖晶石粉体 pH-Zeta 电位曲线可以看到,超细镁铝尖晶石 I 粉在不加分散剂的条件下,其等电位点所对应的 pH 值约为 7.8,Zeta 电位绝对值最大达 63.6 mV,说明随粉体粒度的降低,粉体颗粒对应的等电位点的 pH 值降低,其最大 Zeta 电位绝对值升高。

2.3 pH 值和分散剂对镁铝尖晶石浆料粘度的影响

将超细镁铝尖晶石 II 粉配制成固相体积分数为 45% 的浆料,分散剂添加量为 5%。图 4 为浆料粘度在不同条件下的关系曲线。其中粘度是在 50 s^{-1} 的剪切速率下测得的。由图可见,整体来说,随着浆料 pH 值的增加,浆料粘度表现出先减小后增加的规律。当 pH 值小于 5 时,浆料粘度趋于无限大,且 pH 值为 9 时,浆料粘度取得最小值 $47.1\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。结合图 3 可以看到,pH 值对浆料颗粒表面的 Zeta 电位有很大影响,其等电位点对应的 pH 值约 4。当浆料 pH 值小于 5 时,颗粒表面的 Zeta 电位很低,静电斥力很小,颗粒间的范德华力的作用使得颗粒呈团聚状态甚至絮凝,反映在流变特性上就是浆料粘度变大甚至失去流动性。然后,随着 pH 值的增加,颗粒表面电位增

大,静电排斥力增强,在 pH 值为 9 时取得最大值,浆料表现出非常好的流动性。当 pH 值大于 9 时,虽然颗粒表面的 Zeta 电位比较大,但是在强碱条件下,胶体颗粒间因过饱和吸附而使聚电解质间相互搭连的几率增加,从而使浆料的粘度又有所增加。

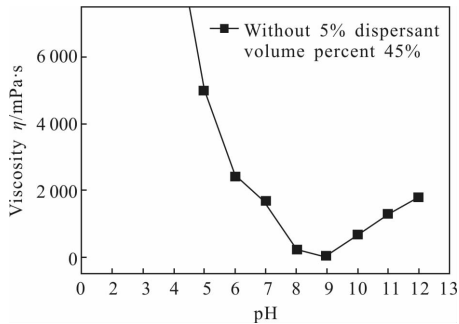


图 4 pH 值与浆料粘度的关系

Fig.4 Relationship between viscosity and pH of suspensions

实际上,浆料的稳定是通过静电稳定机制和空间位阻机制共同作用的^[15]。通过调节浆料的 pH 值,实现了颗粒表面电位和静电斥力控制,进而达到控制浆料粘度的目的。而添加分散剂除了达到如图 3 所示调控颗粒表面电位的作用外,同时也是为了引入空间位阻机制。悬浮体系的空间稳定就是利用吸附在颗粒表面上物质分子的空间排斥作用来实现的:当两个吸附有一层物质分子的陶瓷颗粒相互靠近到吸附层重叠时,吸附层间产生空间排斥力,空间排斥力足以克服颗粒间的范德华吸引力,使两颗粒分开,从而提高浆料的流变性能。在确定了超细镁铝尖晶石 II 粉的最佳 pH 值后,配制体积分数分别为 45%、47%、50%,pH 值均为 9 的超细镁铝尖晶石 II 粉浆料。通过调节分散剂含量研究其粘度变化,所得结果如图 5 所示。从图中可以看出,不同分散剂加入量对三种浆料粘度的影响趋势近似相同。随着分散剂加入量的增多,浆料粘度大体呈现出先减小后增大的趋势。这是由于当浆料中分散剂用量很少时,粒子表面具有较低的电荷密度,粒子间的排斥力小,因而浆料的稳定性差,粘度较大;随着分散剂用量增加,粒子表面的电荷密度升高,粒子间的斥力也相应增大,分散剂聚电解质基团一头充分吸附在粉体颗粒表面,另一头伸展到溶剂里阻止颗粒相互靠近和聚沉,所以浆料的粘度大幅度下降,体系流变性得到明显改善。随着分散剂含量继续增加,颗粒表面产生

过饱和和吸附,过量的聚合物分散剂就会在溶液中形成胶团,高分子长链相互缠绕在一起,限制颗粒的运动,使得浆料的粘度升高。

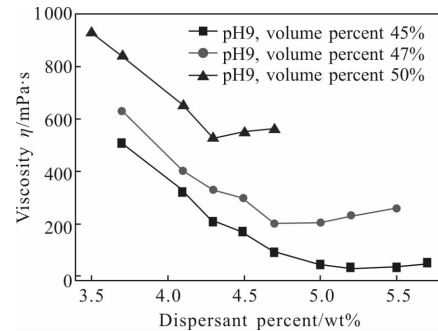


图 5 分散剂含量对浆料粘度的影响

Fig.5 Effects of dispersants concentration on viscosity of the suspensions

从图 5 中还可以看到,随着超细尖晶石粉体固相含量的增加,浆料粘度也随之大幅提高。固相体积分数为 45% 的浆料,所需分散剂百分含量为 5.2% 左右;固相体积分数为 47% 的浆料,所需分散剂百分含量为 4.7% 左右;而固相体积分数为 50% 的浆料,所需分散剂百分含量则为 4.3% 左右。单纯就质量而言,固相含量高,其内所含粉体质量也高,所需分散剂质量就大。但是从分散剂相对粉体百分含量来看,稳定高固相含量的浆料所需的分散剂百分含量比低固相含量要少。这是因为在高固相含量时,粉体颗粒在浆料中填充更密实,溶剂体积减小,使得聚丙烯酰胺浓度增大,而且颗粒之间的间距减小到某一数量级时,粉体颗粒之间的排斥作用增强,浆料相对低固相含量所需要的分散剂用量减少。

2.4 粒度和 pH 值及分散剂对镁铝尖晶石浆料稳定性的影响

陶瓷悬浮体的稳定是指陶瓷颗粒分散在介质中形成不连续相,颗粒间互不接触;如果颗粒间接触,则悬浮体是不稳定的。稳定是指动力学上的稳定,热力学上,由于布朗运动的存在,陶瓷悬浮体是不稳定的。一般陶瓷颗粒在液态介质中分散,要受到范德华力、静电斥力、重力等的作用。通过沉降实验可以反映出浆料的稳定性。图 6 为超细镁铝尖晶石粉 I 和粉 II 在不添加分散剂的条件下,陶瓷浆料沉降体积随 pH 值的变化关系。其中,浆料的固相含量为 5%。

由图 6 曲线的整体趋势可以看到,无论是超细

镁铝尖晶石粉 I 还是粉 II, 在酸性条件下的稳定性比在碱性条件下好。碱性条件下, 6 h 后就能看到明显沉降, 24 h 后沉降体积达 80% 左右, 3 天后已经沉降完全。而酸性条件下 24 h 后才出现沉降, 且 pH 值在 7~9 范围内沉降体积最大, 对比两种尖晶石粉体沉降曲线, 颗粒度小的粉体表现出更优良的稳定性。

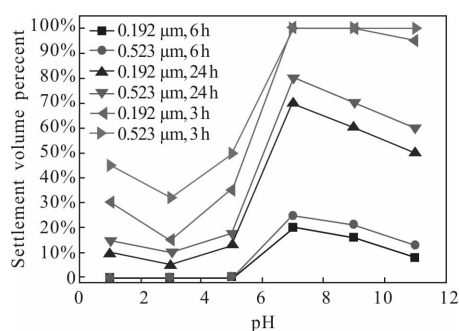


图 6 沉降体积与浆料 pH 的关系

Fig.6 Relationship between settlement volume percentage and pH of the suspensions

结合图 3 的 Zeta 电位-pH 曲线可知, 两种浆料在酸性条件下 Zeta 电位大于 30 mV, 颗粒间的静电斥力克服范德华引力和重力的作用, 而稳定存在于溶剂介质中, 表现出良好的稳定性。在碱性环境中, 尤其是等电位点所处的 pH 值 7~9 范围内, 颗粒表面 Zeta 电位小于 30 mV, 静电斥力非常小, 不足以克服范德华引力等作用力而产生絮凝。随着粉体粒度的降低, 其 Zeta 电位绝对值会稍有增加, 静电斥力也会增强, 更多的是因为颗粒度越小, 比表面积越大, 体系中电荷密度也会越高, 颗粒间距离缩短, 相应势垒也随之降低, 颗粒间相互作用也越强, 所以粉体粒度越小的浆料表现出更好的稳定性。

图 7 为超细镁铝尖晶石粉 II、固相体积分数为 45%、pH 值为 9 的浆料, 在添加不同含量分散剂的条件下, 沉降体积百分比与浆料沉降时间的关系。从图中可以看到, 添加分散剂含量为粉体质量的 6% 时, 浆料第 4 天已经沉降完全。添加分散剂含量为粉体质量 3% 的浆料, 第 2 天开始出现沉降, 第 10 天沉降完全。而分散剂含量为 4% 的浆料, 其稳定性最好, 两周后沉降了不到 30%。经测定, 四种浆料按添加分散剂从少到多, 其 Zeta 电位绝对值分别为 -66.3、-70.1、-75、-72.4 mV, 四者相差不大, 说明影响浆料稳定性的因素不只 Zeta 电位所形成的静电斥力, 分散剂的

空间位阻作用影响不容忽视。而且分散剂有一个合适的用量, 在最佳用量下, 分散剂能够保证浆料中粒子之间有足够有效的静电排斥和空间位阻稳定作用。若用量不足, 则它对浆料的分散稳定性起不到所需要的作用; 若用量过多, 会导致整个分散体系产生团聚和絮凝, 稳定性变差。

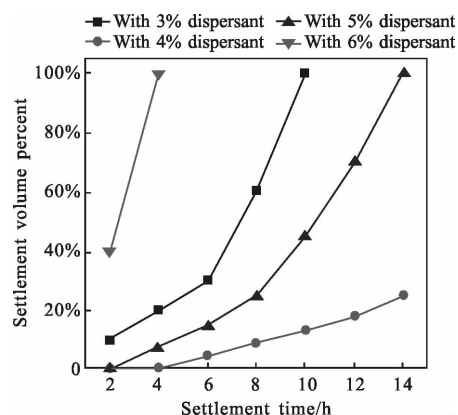


图 7 沉降体积百分比与浆料沉降时间的关系

Fig.7 Relationship between settlement volume percentage and settlement time of the suspension

2.5 烧制品光学性能

图 8 为 pH 值为 9、分散剂百分含量为 5.2%、固相体积分数为 45% 的超细镁铝尖晶石粉 II 浆料凝胶注模而成的素坯, 经无压烧结后的尺寸为 $\Phi 75 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 球高为 32 mm 的透明 MgAl_2O_4 球罩。



图 8 球罩形镁铝尖晶石透明陶瓷

Fig.8 Semispherical magnesium aluminum spinel transparent ceramics

图 9 和图 10 为样件可见光和红外波段的透过率曲线, 从图中可以看出, 0.39~0.76 μm 波段最高透过率 $\geq 76\%$; 1.06 μm 波段透过率 $\geq 79\%$; 2~6 μm 波段最高透过率 $\geq 85\%$, 说明该凝胶注模用浆料的制备是符合工艺要求的。

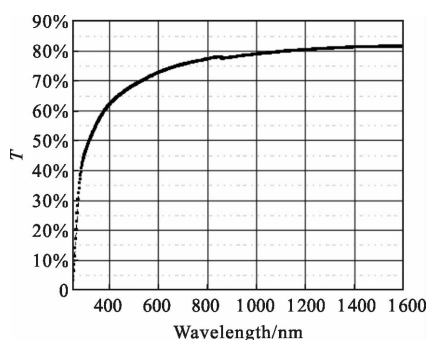


图 9 尖晶石球罩样件在 0.39~1.06 μm 波段的透过率
Fig.9 Transmittance at the wavelength of 0.39~1.06 μm of the semispherical spinel samples

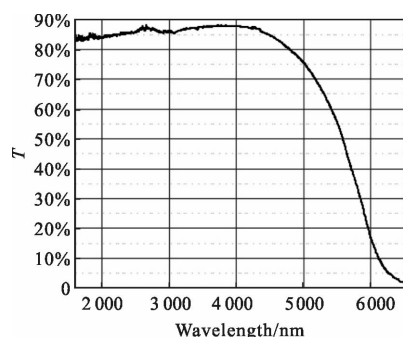


图 10 尖晶石球罩样件在 2~6 μm 波段的透过率
Fig.10 Transmittance at the wavelength of 2~6 μm of the semispherical spinel samples

3 结论

(1) 在较低的剪切速率下,超细镁铝尖晶石浆料表现出剪切变稀特性,当剪切速率高于 50 s^{-1} 时,粘度变化不大,接近牛顿流体。且随着粉体粒度的细化,浆料粘度大幅增加,流动性变差。

(2) 在不添加分散剂的条件下,超细镁铝尖晶石 II 粉浆料在酸性条件中具有更高的 Zeta 电位绝对值,表现出良好的流变性。在分散剂作用下,等电位点对应 pH 值向酸性方向移动,当 pH 值为 9 时,Zeta 电位绝对值取得最大值 73.5 mV。

(3) pH 值和分散剂含量均存在最佳范围,过高和过低,浆料的流变性均会变差。且固相含量越高,制备低粘度浆料所需的分散剂百分含量越低。

(4) Zeta 电位绝对值的大小仅仅是影响浆料稳定性的一个方面,它是通过影响粉体颗粒间静电斥力起到稳定浆料作用的。而分散剂同时通过静电斥

力和空间位阻机制来达到调控浆料稳定性的目的。如果分散剂过量,即使浆料颗粒 Zeta 电位绝对值很大,浆料也会产生团聚和絮凝。

参考文献:

- [1] Yoshimura E M, Yukihiro E G. Optically stimulated luminescence of magnesium aluminate (MgAl_2O_4) spinel[J]. *Radiat Meas*, 2006(41): 163-169.
- [2] Hosseini S M. Structural, electronic and optical properties of spinel MgAl_2O_4 Oxide[J]. *Phys Stat Sol: B*, 2008, 245(12): 2800-2807.
- [3] Thomas M, Lee M G, Andrew D G, et al. Nano-structured, infrared-transparent magnesium-aluminate spinel with superior mechanical properties [J]. *Int J Appl Ceram Technol*, 2012, 9(1): 83-90.
- [4] Lei Muyun, Hong Dongmei, Wen Fang, et al. Transparent property of transparent ceramic spinel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 620-523. (in Chinese)
雷牧云, 洪冬梅, 闻芳, 等. 透明尖晶石陶瓷的透过性能研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 620-523.
- [5] Liu Dongfang, Ma Xiangdong, Zhang Zhihao, et al. Effect of TiO_2 content on sintering of MgAl_2O_4 [J]. *Bulletin of the Chinese Society*, 2016, 35(8): 2481-2485. (in Chinese)
刘东方, 马向东, 张志浩, 等. TiO_2 含量对镁铝尖晶石烧结性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2481-2485.
- [6] Huang Huawei, Wang Xiaomin, Xu Kui, et al. Research progress of ceramic gel injection molding process [J]. *Electronic Components and Materials*, 2010, 29(7): 63-66. (in Chinese)
黄华伟, 王晓敏, 许奎, 等. 陶瓷凝胶注模成型工艺研究进展[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(7): 63-66.
- [7] Shi Liang, Xie Guangyuan, Gao Yunming, et al. Study on preparation of zirconia tube by gel injection molding [J]. *Journal of Wuhan university of Science and Technology*, 2013, 36(5): 366-369. (in Chinese)
石亮, 谢光远, 高运明, 等. 凝胶注模制备氧化锆管工艺研究[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(5): 366-369.
- [8] Huang Yong, Ma Liguang, Tang Qiang, et al. Surface oxidation to improve water-based gelcasting of silicon nitride [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(14): 3519-3524.
- [9] Yi Sun, Shunzo Shimai, Xiang Peng, et al. Fabrication of transparent Y_2O_3 ceramics via aqueous gelcasting [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(6): 8841-8845.
- [10] Guan Yongbing, Lu Tiecheng, Lu Zhongwen, et al. Study

- on micro-structure and optical properties of Yb-YAG transparent ceramics by gel-injection molding [J]. *Journal of Sichuan University*, 2014, 51(3): 583-586. (in Chinese)
- 关永兵, 卢铁城, 卢忠文, 等. 凝胶注模成型 Yb-YAG 透明陶瓷的微观结构和光学性能的研究 [J]. 四川大学学报, 2014, 51(3): 583-586.
- [11] Li Denghao, Guo Lucun. Study on rheological properties of α -Al₂O₃-H₂O-polyacrylic acid suspension[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(1): 80-84. (in Chinese)
- 李登好, 郭露村. α -Al₂O₃-H₂O-聚丙烯酸悬浮液流变性的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1): 80-84.
- [12] Wang Xing, Bao Jianxun. Effects of nano-SiC powder on rheological behavior of SiC slurry and mechanical properties of RBSC [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 197-202. (in Chinese)
- 王兴, 包建勋. 纳米碳化硅对浆料流变学级碳化硅性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 197-202.
- [13] Zhang Ge. Gelcasting process of 1.5 m SiC ceramic green body [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 2989-2993. (in Chinese)
- 张阿. 1.5 m 量级 SiC 陶瓷素坯凝胶注模成型工艺 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 2989-2993.
- [14] Zhao Rucheng, Bao Jianxun. Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 553-558. (in Chinese)
- 赵汝成, 包建勋. 大口径轻质 SiC 反射镜的研究与应用[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 553-558.
- [15] Sun Jing, Gao Lian, Guo Jingkun. Preparation of stable slurry in wet processing[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1999, 27(3): 29-34. (in Chinese)
- 孙静, 高濂, 郭景坤. 湿法成型中稳定浆料的制备[J]. 硅酸盐通报, 1999, 27(3): 29-34.