

Al₂O₃ 悬浮液分散稳定性的影响因素

刘 兵, 彭超群, 王日初, 王小锋, 王志勇, 李婷婷

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究分散剂聚丙烯酸铵(NH₄PAA)加入量、pH 值、固相体积分数、球磨时间和离子强度对 Al₂O₃ 陶瓷悬浮液黏度和沉降高度的影响。结果表明: 分散剂加入量、pH 值、固相体积分数、球磨时间和离子强度均对悬浮液的分散稳定性有显著影响。当分散剂加入量为 0.8%(质量分数)、pH 为 9.5、固相体积分数为 50%、球磨时间为 24 h 时、离子强度为 0 时, 悬浮液的黏度和沉降高度达到最小值, 分散稳定性达到最佳。

关键词: Al₂O₃; 悬浮液; 黏度; 沉降高度; 分散剂; pH 值

中图分类号: TG174

文献标志码: A

Influence factors for stability behavior of Al₂O₃ suspension

LIU Bing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, WANG Zhi-yong, LI Ting-ting

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effects of the dispersant ammonium poly-acrylate (NH₄PAA) content, pH value, volume fraction of solid phase, ball milling time and ionic strength on the viscosity and sedimentation height of Al₂O₃ suspension were examined in detail. The results show that the ammonium poly-acrylate (NH₄PAA) content, pH value, volume fraction of solid phase, ball milling time and ionic strength significantly influence the dispersion and stability behavior of Al₂O₃ suspension. The viscosity and sedimentation height achieve the minimum value at dispersant content of 0.8% (mass fraction), pH value of 9.5, volume fraction of solid phase of 50%, ball milling time of 24 h, and then dispersion and stability behavior achieves the best value.

Key words: Al₂O₃; suspension; viscosity; sedimentation height; dispersant; pH value

20 世纪 90 年代初期, 美国橡树岭国家重点实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)的 OMATETE 等^[1]发明了一种新型的陶瓷成型技术—凝胶注模成型。该技术将传统的陶瓷工艺与高分子化学巧妙地结合在一起, 是一种新型制备复杂形状陶瓷件的近净尺寸成型技术^[2]。实现凝胶注模成型工艺的前提和关键是制备出高分散性、高稳定性和高固相含量的陶瓷粉体悬浮液^[3]。超细陶瓷粉体在液相介质中的分散体系属于典型的多相体系, 具有较高的界面能, 这是引起悬浮液热力学不稳定性的主要原因。另外, 粉体颗粒的密度通常高于液相介质的密度, 重力场会引起悬浮

液的动力学不稳定性, 这些不稳定的因素都将导致悬浮液中的粉体颗粒团聚而最终沉降^[4]。研究表明, 影响悬浮液分散稳定性的因素很多, 如分散剂的种类和添加量^[5-6]、悬浮液的固相体积分数^[7]、pH 值^[8]、离子强度^[9]和温度^[10]等, 其中分散剂的影响作用最为重要, 目前高分散稳定性陶瓷悬浮液的制备主要是通过加入分散剂来实现的。制备高技术陶瓷悬浮液的分散剂种类很多, 聚丙烯酸铵(NH₄PAA)是其中一种重要的高效聚电解质分散剂, 其在粉体表面会通过物理和化学吸附而产生静电稳定、空间位阻稳定和静电位阻稳定等稳定机制^[6]。本文作者以聚丙烯酸铵(NH₄PAA)为分散

剂,通过对悬浮液黏度和沉降高度的测试,系统研究分散剂添加量、pH 值、悬浮液的固相体积分数、球磨时间和离子强度对 Al_2O_3 陶瓷悬浮液分散稳定性的影响。

1 实验

1.1 原料和仪器

主要原料 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 由河南济源兄弟材料有限公司提供,纯度为 99.8%,平均粒径为 $1.5\ \mu\text{m}$;分散剂聚丙烯酸铵(NH_4PAA)为分析纯(AR),相对分子质量为 800~1 000,天津市科密欧化学试剂有限公司提供;氯化钠(NaCl)、氨水($\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$)和硝酸(HNO_3)分别用于调节悬浮液的离子强度和 pH 值,3 种试剂均由上海国药集团有限公司提供;溶剂为实验室自制的去离子水。球磨采用南京大学仪器厂提供的 QM-BP 行星球磨机;pH 测试采用上海精密仪器仪表有限公司提供的 pHS-25 型数字酸度计;黏度测试采用上海衡平仪表厂提供 NDJ-1 型旋转式黏度计。

1.2 样品制备

将 Al_2O_3 粉体和去离子水按比例添加到高密度聚氨酯球磨罐中,按 Al_2O_3 干粉质量分数添加分散剂聚丙烯酸铵(NH_4PAA),用 HNO_3 和 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 调节悬浮液的 pH 值(调节 pH 值引起的离子强度变化忽略不计),用 NaCl 调节悬浮液的离子强度。以 Al_2O_3 球为球磨介质,球料比为 1:1,在行星式球磨机上球磨一定时间后进行测试。

1.3 性能测试

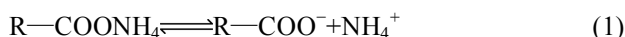
采用 NDJ-1 型旋转式黏度计测试悬浮液的黏度,黏度测试前,悬浮液在恒定剪切速率下剪切 3 min,再静置 3 min;沉降实验是将 Al_2O_3 悬浮液置于 50 mL 量筒中静置,测量不同静置时间下悬浮液的沉降高度。

2 结果与讨论

2.1 悬浮液的分散稳定性与分散剂加入量的关系

悬浮液固相体积分数为 50%、pH 值为 9 时,其黏度与分散剂加入量的关系如图 1 所示。从图 1 中可以看出,随着分散剂加入量的增加,在不同的剪切速率下,悬浮液的黏度都呈减小趋势,当分散剂加入量为 0.8% 时,悬浮液黏度达到最小值。继续增大加入

量,悬浮液的黏度值增大。 NH_4PAA 是一种阴离子型高分子聚合物电解质^[11],其结构式如图 2 所示^[12]。利用静电位阻复合稳定机制使悬浮液达到分散和稳定:一方面,在悬浮液中, NH_4PAA 的锚固基团会吸附在 Al_2O_3 颗粒表面,其溶剂化链在介质中充分伸展形成位阻层,产生新的排斥能,即空间斥力势能,阻止 Al_2O_3 颗粒的范德华力吸引和重力沉降;另一方面, NH_4PAA 在悬浮液中易解离成 NH_4^+ 和 RCOO^- ,其解离方程式如式(1)所示:



其中 $\text{R}-\text{COO}^-$ 基团易吸附在 Al_2O_3 颗粒表面,增大颗粒表面的负电荷密度,使 Zeta 电位增加,颗粒之间的静电斥力位能增大,从而提高悬浮液的分散性^[12]。当 NH_4PAA 加入量较少时,其聚合物基团不能完全吸附所有颗粒,吸附于某一颗粒质点上的聚合物分子长链会同时吸附于其他颗粒质点上,将两个或多个质点连接起来,这时不仅不能起到保护作用,而且还会使体系的临界聚沉浓度降低,使体系变得不稳定而产生絮凝和沉降;当分散剂加入量太多时,一方面过量的自由分子链容易发生桥连或空缺絮凝,另一方面,悬浮液中酸根离子浓度过高,部分吸附的酸根离子会压缩进入双电子层的吸附层,使扩散层变薄,悬浮液 Zeta 电位降低,从而导致悬浮液的黏度增加,分散性下降^[13]。当悬浮液固相体积分数为 50%、pH 为 9 时,不同分散剂加入量的 Al_2O_3 悬浮液静置 1 d 和 21 d 后沉降高度的变化如图 3 所示。由图 3 可以明显看出,随着静置时间的延长,悬浮液的沉降高度增大。经过 1 d 和 21 d 静置沉降后,沉降高度与分散剂加入量的关系和黏度与加入量的关系基本一致。比较图 1 和 3

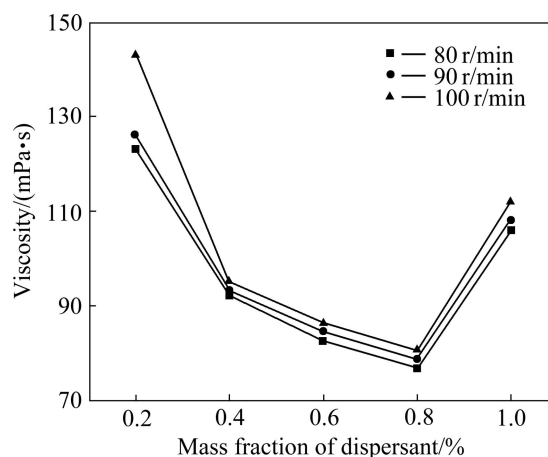


图 1 悬浮液的黏度与分散剂加入量的关系

Fig. 1 Relationship between dispersant amount and viscosity of suspension

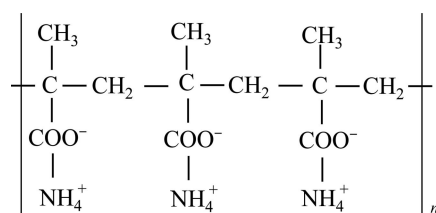
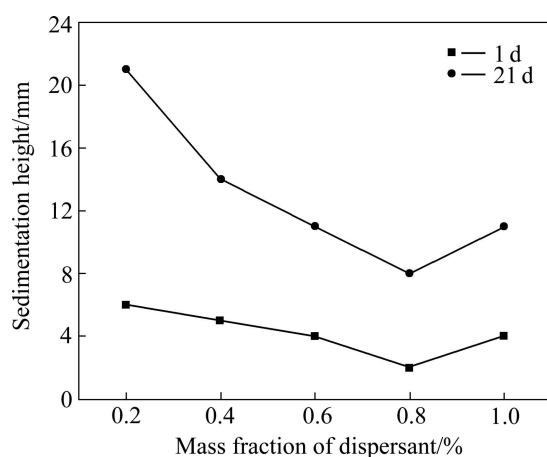
图 2 分散剂聚丙烯酸铵(NH_4PAA)的结构式Fig. 2 Molecular structure of dispersant ammonium poly-acrylate (NH_4PAA)

图 3 悬浮液的沉降高度与分散剂加入量的关系

Fig. 3 Relationship between dispersant amount and sedimentation height of suspension

可以看出,当分散剂加入量为 0.8% 时,悬浮液的黏度和沉降高度都为最小,说明此时 Al_2O_3 颗粒在悬浮液中的分散稳定效果最好。

2.2 悬浮液的分散稳定性与 pH 值的关系

悬浮液固相体积分数为 50%、分散剂加入量为 0.8% 时,其黏度和沉降高度与 pH 值的关系分别如图 4 所示。由图 4 可以看出,当 $\text{pH} < 9.5$ 时,随着 pH 值的增加,悬浮液的黏度和沉降高度都减小,当 pH 值达到 9.5 时,黏度和沉降高度都达到最小值,继续增大 pH 值,悬浮液的黏度和沉降高度都增大。这可以从悬浮液的静电位阻稳定理论来解释:如式(1)所示, NH_4PAA 在悬浮液中易解离生成 NH_4^+ 和 RCOO^- 离子,而 pH 值能够影响 NH_4PAA 解离度的大小。当 pH 值很小时, NH_4PAA 解离度 α 趋近于 0,官能团 R-COO^- 离子的解离很小,悬浮液中的聚合物基本为电中性,此时仅有空间位阻作用,聚合物电解质很容易团聚而导致悬浮液的分散稳定性下降^[14]。随着 pH 值的逐渐增大,解离度 α 会逐渐增大,式(1)的平衡向右移动,

悬浮液中 R-COO^- 的生成量增大, Al_2O_3 颗粒会通过静电作用和分子间引力吸附更多的 R-COO^- ,从而使颗粒表面的负电荷增加, Zeta 电位值增大, Al_2O_3 颗粒间的静电斥力增大。当 pH 达到 9.5 时,颗粒表面的 Zeta 电位达到最大值,颗粒间的静电斥力最强,此时悬浮液的黏度和沉降高度都达到最小,分散性和稳定性均达到最佳状态。继续提高悬浮液的 pH 值,一方面会使 Al_2O_3 颗粒对分散剂的饱和和吸附量下降,悬浮液中出现过剩的高聚物,其长链互相较链和缠结,使悬浮液的黏度升高,沉降也相应增加;另一方面,悬浮液中电解质浓度增加会压缩双电子层,使颗粒间的静电斥力减小,从而减小颗粒间碰撞的势垒数值,使悬浮液的分散稳定性下降^[15]。

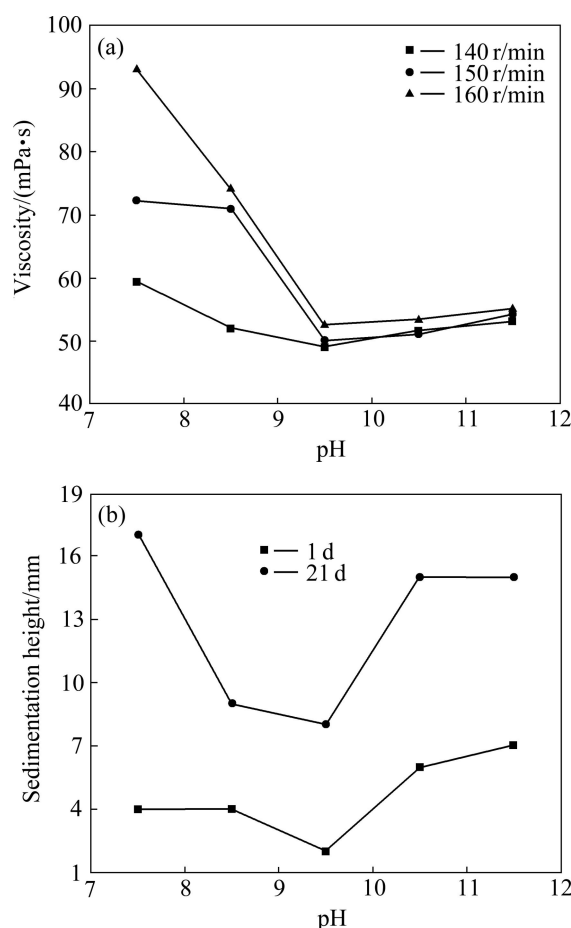


图 4 悬浮液的黏度和沉降高度与 pH 的关系

Fig. 4 Relationship between viscosity(a) and sedimentation height(b) of suspension and pH

2.3 悬浮液的分散稳定性与固相体积分数的关系

分散剂加入量为 0.8%、pH 为 9.5 时,悬浮液黏度和沉降高度与固相体积分数的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出,悬浮液的黏度随着固相体积分数的增

加逐渐增大,刚开始时增大速率较慢,当固相体积分数达到 50%时,增大速率突然较快,黏度突然增大。在悬浮液中, Al_2O_3 颗粒表面会吸附很多液体水分子或有机高分子,当固相体积分数增加时,颗粒表面吸附水总量会相应增大,悬浮液自由水总量会相对减少,同时 Al_2O_3 颗粒间的距离会减小,这一方面会导致颗粒间的相互作用力增强,另一方面会使吸附在 Al_2O_3 颗粒表面的有机物链相互搭接,从而使颗粒的相对运动变得困难,悬浮液黏度增大。当固相体积分数增大到某一数值时,悬浮液会变成连续的整体而失去流动性,黏度达到极大值。

而随着固相体积分数的增加,悬浮液的沉降高度逐渐减小,稳定性增大,当固相体积分数达到 50%时,悬浮液的沉降高度基本保持不变。且随着固相体积分数的增加,悬浮液的沉降速率随静置时间的增加逐渐减慢,55%固含量的悬浮液静置 1 d 和 21 d 沉降高度相差不大。当固相体积分数较低时, Al_2O_3 颗粒分布比较分散,堆积密度较低,因而悬浮粒子分散性较差,悬浮液稳定性较低。当固相体积分数较高时, Al_2O_3 颗粒

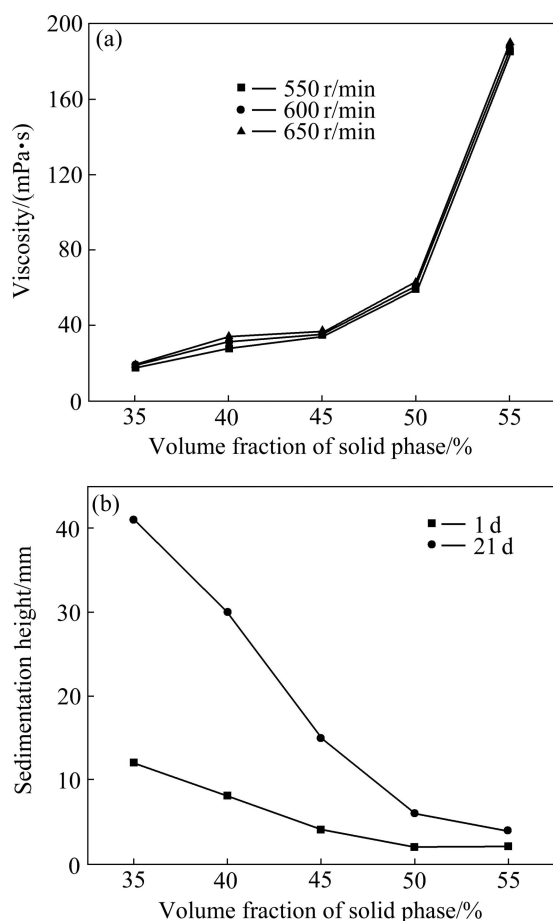


图 5 悬浮液的黏度和沉降高度与固相体积分数的关系

Fig. 5 Relationship between viscosity(a) and sedimentation height(b) of suspension and volume fraction of solid phase

相互紧靠,具有较高的堆积密度,因此粉体粒子分散良好,悬浮液稳定性较高^[7]。对于凝胶注模成型工艺,在满足成型所需黏度和稳定性的前提下,应尽可能提高悬浮液的固相体积分数^[16],实验选取固相体积分数 50%最为合适。

2.4 悬浮液的分散稳定性与球磨时间的关系

固相体积分数为 50%、pH 值为 9.5、分散剂加入量为 0.8%时,悬浮液黏度与球磨时间的关系如图 6 所示。由图 6 可以看出,当球磨时间小于 24 h 时,随着球磨时间的延长,悬浮液的黏度逐渐降低。当球磨时间为 24 h 时,悬浮液的黏度达到最小值。继续增加球磨时间,悬浮液的黏度增大。 Al_2O_3 陶瓷粉体与分散剂和分散介质混合球磨后,由于颗粒重排、团聚体打开和分散剂分散作用的实现,悬浮液的均匀性会提高,黏度也会随之下降,可通过球磨工艺获得混合均匀和流动性良好的 Al_2O_3 陶瓷悬浮液。 NH_4PAA 加入到悬浮液中后,其本身的解离和在 Al_2O_3 颗粒表面的吸附都需要一个过程。球磨时间较少时,一方面 NH_4PAA 不能完全解离, Al_2O_3 表面的 Zeta 电位绝对值提高不大;另一方面 Al_2O_3 颗粒表面对 NH_4PAA 的吸附未达到饱和,静电斥力和位阻效应都不能完全体现出来,颗粒间的排斥力较小,宏观表现为悬浮液的黏度较高。随着球磨时间的增加, Al_2O_3 粉体的团聚在外界机械作用下会受到破坏,新裸露出的颗粒表面会继续吸附悬浮液中游离的 NH_4PAA ,通过静电斥力和位阻效应阻止 Al_2O_3 颗粒的再次团聚,从而使悬浮液的黏度降低^[17]。而当球磨时间过长时, Al_2O_3 颗粒变得异常细小,异常细小的颗粒由于表面能过高会重新聚结,反而导致悬浮液的黏度再次升高。

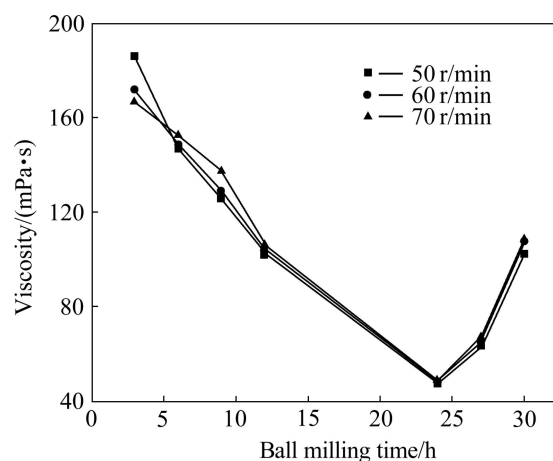


图 6 悬浮液的黏度与球磨时间的关系

Fig. 6 Relationship between viscosity of suspension and milling time

2.5 悬浮液的分散稳定性与离子强度的关系

固含量为 50%、pH 值为 9.5、分散剂加入量为 0.8%、球磨时间为 24 h 时,悬浮液黏度与离子强度和沉降高度的关系如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着离子强度的增加,悬浮液的黏度呈增大趋势。离子强度较小时,悬浮液黏度增加较慢,当离子强度达到 0.4% 时,悬浮液的黏度增加较快。离子强度对悬浮液黏度的影响是多方面的:一方面,根据 DLVO 理论, Al_2O_3 颗粒之间存在双电子层重叠时的静电斥力和长程范德华引力,当斥力占主导作用时,体系处于相对稳定的状态^[18-19]。粉体颗粒表面双电层的厚度和所带电量的多少可以通过 Zeta 电位直接反映, Zeta 电位越高,带电粒子相互靠近时的排斥力也就越大,体系的稳定性就越高,反之, Zeta 电位越低,体系的稳定性也就越低。悬浮液中加入电解质后,扩散层中的反离子将压缩双电子层,使 Al_2O_3 颗粒表面的带电量减少,双电层厚度变薄, Zeta 电位值降低,颗粒更易团聚;另一方面,离子强度增加,单位分散剂分子空间占有的体积减小,在 Al_2O_3 颗粒表面的覆盖率下降^[20]。在

分散剂添加量不足以使 Al_2O_3 颗粒表面达到饱和和吸附的情况下,显然离子强度增加,会进一步提高 Al_2O_3 颗粒表面吸附的不饱和程度,从而使悬浮液的黏度升高^[21]。随着离子强度的增加,悬浮液的沉降高度逐渐增大,但增大速率较慢;在整个离子加入范围内,静置时间增加,悬浮液的沉降速率减慢,悬浮液静置 1 d 和 21 d 沉降高度相差不大。

3 结论

1) 通过对 Al_2O_3 陶瓷悬浮液黏度值和沉降高度的测定,发现分散剂加入量、pH 值、固相体积分数、球磨时间和离子强度均对 Al_2O_3 悬浮液的分散稳定性有显著影响。在一定范围内,悬浮液的分散稳定性随分散剂加入量、pH 值和球磨时间的增加先增大后减小,随固相体积分数和离子强度的增加始终减小。

2) 在以聚丙烯酸铵(NH_4PAA)为分散剂的水基凝胶体系中,当分散剂加入量为 0.8%、pH 调节为 9.5、球磨时间为 24 h 时,可以获得固相体积分数为 50%、黏度为 48.3 mPa·s 的 Al_2O_3 陶瓷浆料,满足凝胶注模的成形要求。

REFERENCES

- [1] OMATETE O O, JANNEY M A, STREHLOW R A. Gelcasting—A new ceramic forming process[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1991, 70(10): 1641-1649.
- [2] 王小锋, 王日初, 彭超群, 李婷婷, 罗玉林, 王超, 刘兵. 凝胶注模成型技术的研究与进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 496-509.
WANG Xiao-feng, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, LI Ting-ting, LUO Yu-lin, WANG Chao, LIU Bing. Research and development of gelcasting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 496-509.
- [3] MORISSETTE S L, LEWIS J A. Chemorheology of aqueous-based alumina-poly(vinyl alcohol) gelcasting suspensions[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1999, 82(3): 521-528.
- [4] 税安泽, 张永伟, 刘平安, 程小苏, 王慧. 氧化铝悬浮液的分散行为及其影响因素研究[J]. 材料导报, 2010, 24(2): 81-84.
SHUI An-ze, ZHANG Yong-wei, LIU Ping-an, CHENG Xiao-shu, WANG Hui. Study on dispersion behavior and its influence factors for alumina suspension[J]. Materials Review, 2010, 24(2): 81-84.
- [5] BRONSWIJK W, WATLING H R, YU Z. A study of the adsorption of acyclic polyols on hydrated alumina[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1999,

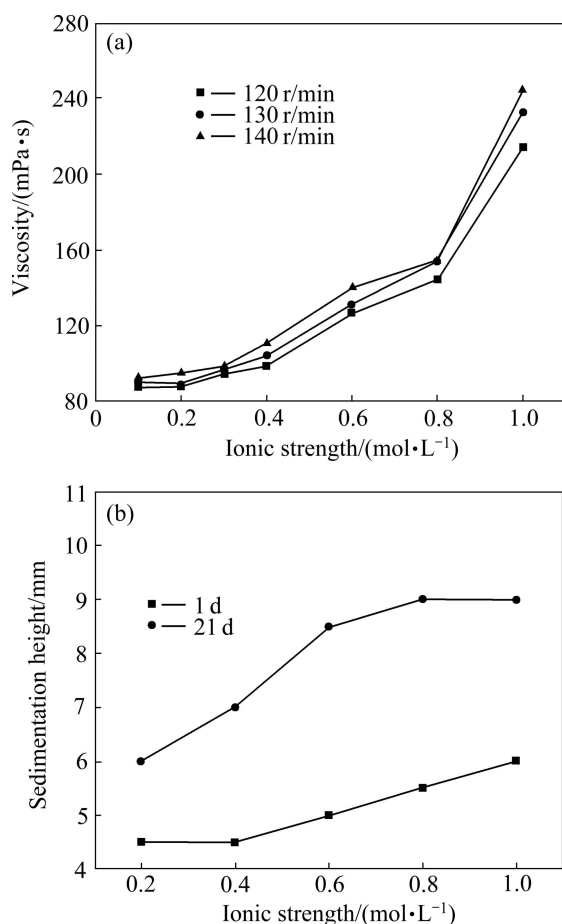


图7 悬浮液的黏度和沉降高度与离子强度的关系

Fig. 7 Relationships between viscosity(a) and sedimentation height(b) of suspension and ionic strength

- 157(1/3): 85–94.
- [6] 李登好, 郭露村. α - Al_2O_3 - H_2O -聚丙烯酸悬浮液流变性的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1): 80–84.
- LI Deng-hao, GUO Lu-cun. Rheological properties of aqueous α - Al_2O_3 suspensions with polyacrylic acid[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(1): 80–84.
- [7] 易中周, 黄 勇, 谢志朋, 马景陶. 碳化硅浓悬浮体的分散特性和流变性研究[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(4): 517–520.
- YI Zhong-zhou, HUANG Yong, XIE Zhi-peng, MA Jing-tao. Dispersion and rheological property of the concentrated SiC suspension[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(4): 517–520.
- [8] BIANCO M, RAND B, RILEY F. Polymeric stabilization of aqueous suspensions of barium titanate. Part I: Effect of pH[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2000, 20(10): 1579–1586.
- [9] 李登好, 郭露村. 超细氧化铝水悬浮液分散稳定性研究[J]. 硅酸盐通报, 2005, 24(1): 36–40.
- LI Deng-hao, GUO Lu-cun. Study on the stability of superfine α - Al_2O_3 suspensions with polyelectrolyte[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2005, 24(1): 36–40.
- [10] BINNER J G P, MURFIN A M. The effect of temperature, heating method and state of dispersion on the vacuum filter casting of alumina suspensions[J]. Journal of the European Ceramic Society, 1998, 18(7): 791–798.
- [11] 杨金龙, 黄 勇, 司文捷, 谢志鹏, 张云龙. α - Al_2O_3 直接凝固注模成型工艺的研究[J]. 硅酸盐学报, 1997, 25(5): 514–519.
- YANG Jin-long, HUANG Yong, SI Wen-jie, XIE Zhi-peng, ZHANG Yun-long. Study on direct coagulation casting process of α - Al_2O_3 [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1997, 25(5): 514–519.
- [12] 杜景红, 周 平, 史庆南, 严继康, 甘国友. 不同分散剂在压电陶瓷浆料制备中的作用[J]. 功能材料, 2007, 38(s): 754–756.
- DU Jing-hong, ZHOU Ping, SI Qing-nan, YAN Ji-kang, GAN Guo-you. The role of different dispersant on slurry of piezoelectric ceramics[J]. Functional Materials, 2007, 38(s): 754–756.
- [13] 芦令超, 申玉芳, 常 钧, 刘福田, 程 新. 氧化铝陶瓷料浆流变性的研究[J]. 硅酸盐通报, 2003, 22(4): 36–40.
- LU Ling-chao, SHEN Yu-fang, CHANG Jun, LIU Fu-tian, CHENG Xin. Study on the rheological behavior of alumina slurries[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2003, 22(4): 36–40.
- [14] 张立伟, 陈森凤, 沈 毅, 卢迪芬, 弓琴双. 精细氧化铝陶瓷水基凝胶注模成型工艺[J]. 电子元件与材料, 2005, 24(4): 44–47.
- ZHANG Li-wei, CHEN Sen-feng, SHEN Yi, LU Di-fen, GONG Qin-shuang. Optimization research on forming of fine alumina ceramic by hydrous gel-casting[J]. Electronic Components and Materials, 2005, 24(4): 44–47.
- [15] 全建峰, 陈大明. pH 值对凝胶注模氧化铝陶瓷料浆性能的影响[J]. 航空材料学报, 2003, 23(3): 50–52.
- TONG Jian-feng, CHEN Da-ming. pH effect on the performance of alumina ceramic slurry for gelcasting[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(3): 50–52.
- [16] 周竹发, 王淑梅, 缪大梅. 氧化铝陶瓷凝胶注模成型影响因素的研究[J]. 苏州大学学报: 工科版, 2004, 24(6): 1–4.
- ZHOU Zhu-fa, WANG Shu-mei, MIU Da-mei. Study on the influencing factors alumina ceramics slurry by gelcasting[J]. Journal of Soochow University: Engineering Science Edition, 2004, 24(6): 1–4.
- [17] 江伟辉, 谢笑虎, 于 云. 钛酸铝陶瓷凝胶注模成型工艺的研究[J]. 中国陶瓷, 2006, 42(9): 9–12.
- JIANG Wei-hui, XIE Xiao-hu, YU Yun. Studies on gelcasting of aluminium titanate ceramic[J]. China Ceramics, 2006, 42(9): 9–12.
- [18] 江 龙. 化学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- JIANG Long. Chemistry introduction[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [19] 高 濂, 孙 静, 刘阳桥. 纳米粉体的分散及表面改性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- GAO Lian, SUN Jing, LIU Yang-qiao. Nano powder diversity and surface modification[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [20] HLEN K V, LEWANDOWSKI H, NARRES H D, SCHWUGER M J. Adsorption of polyelectrolytes onto oxides-the influence of ionic strength, molar mass, and Ca^{2+} ions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2000, 163(1): 45–53.
- [21] GUO Lu-cun, ZHANG Yao, NOZOMU U, KEIZO U. Adsorption effects on the rheological properties of aqueous alumina suspension with polyelectrolyte[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(3): 549–556.

(编辑 李艳红)