

DOI: 10.7652/xjtuxb201410012

凝胶注模制备空心涡轮叶片陶瓷铸型的 颗粒偏析控制

姜博, 鲁中良, 苗恺, 周江平, 李涤尘
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对凝胶注模制备大尺寸空心涡轮叶片陶瓷铸型产生的颗粒偏析导致铸型均匀性降低、烧结产生变形甚至开裂等问题,以铸型高度方向上的密度变化为评价指标,主要研究了颗粒级配、固相含量、球磨时间、振动等因素对于铸型颗粒偏析的影响,并利用样品粒度分布和微观结构进行佐证。结果表明:当颗粒级配为 $40\text{ }\mu\text{m}/5\text{ }\mu\text{m}$ 、固相体积分数为 60% 、浆料球磨时间为 60 min 、充型时施加振动频率为 60 Hz 、幅值为 3 mm 时,陶瓷铸型密度梯度最小。成功制备了高度为 150 mm 、上下密度梯度仅为 0.89% (密度差异值为 0.018 g/cm^3) 的均匀陶瓷铸型,完全满足大尺寸空心涡轮叶片陶瓷铸型的均匀性要求。

关键词: 颗粒偏析;密度梯度;空心涡轮叶片;凝胶注模

中图分类号: TB321 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0077-07

Particle Segregation Control in Fabricating Ceramic Mold for Hollow Turbine Blades During Gel-Casting

JIANG Bo, LU Zhongliang, MIAO Kai, ZHOU Jiangping, LI Dichen
(State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In fabricating ceramic casting mold of hollow turbine blades, particle segregation usually weakens the mold homogeneity leading to deformation and cracking as sintering. The variety trend of density along casting mold height is regarded as the evaluating index, the effects of grain gradation, solid content, milling time, validation etc on particles segregation are discussed and verified by the size distribution and microstructures. The results show that taking the grain gradation as $40\text{ }\mu\text{m}/5\text{ }\mu\text{m}$, solid volume fraction as 60% , milling time as 60 min , filing vibration frequency as 60 Hz , with amplitude of 3 mm , the casting mold density gradient reaches the smallest. The homogeneity casting mold with height of 150 mm , density gradient of 0.89% (variety of density 0.018 g/cm^3) is successfully prepared to completely satisfy the homogeneity requirements of large-size ceramic casting mold of the hollow turbine blades.

Keywords: particle segregation; density gradient; hollow turbine blade; gel-casting

空心涡轮叶片是高性能热动力装备的关键部件,向双工质双冷却通道方向发展,现有的熔模制造

技术存在产品开发周期长、成本高、工艺复杂、控制难度大、成品率低等缺点。西安交通大学快速成型

收稿日期: 2014-02-24。 作者简介: 姜博(1990—),男,硕士生;鲁中良(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035703);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2014-08-07 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140807.1623.001.html>

中心提出了基于光固化原型的空心涡轮叶片内外结构一体化制造方法^[1],该工艺可以成型具有交错冷却通道且存在细小冲击孔和气膜孔的高效冷却空心涡轮叶片,成型过程要求浆料达到高固相含量、低黏度,保证高流动性(黏度小于 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。但是,低黏度高固相浆料要求级配时颗粒粒径比较大^[2],这种大粒径比颗粒制备的浆料会导致不同颗粒沉降速度差异变大,成型后要求铸型烧结收缩率低,以满足精度要求。为了降低陶瓷铸型的收缩率,所采用的颗粒尺寸较大,因此其沉降速度较快。在灌注形状复杂尺寸较大的陶瓷铸型时,浆料充型时间和工艺操作时间较长,所需凝胶固化诱导时间较长,导致颗粒沉降时间较长。以上因素都会导致陶瓷颗粒的偏析程度增大,致使陶瓷铸型上下产生密度梯度,陶瓷铸型尺寸越大,由密度梯度导致强度和收缩率差异就越明显,烧结时型壳可能由于强度和收缩不一致产生变形甚至开裂。

为避免产生上述情况,研究如何降低颗粒偏析程度变得尤为重要。文献[3]研究了黏度对于颗粒偏析现象的影响;文献[4]发现了注浆成型工艺中重力场和 Clogging 效应引起的颗粒偏析是导致梯度分布的原因;文献[5]研究了在垂直圆管中浇注时重力造成的颗粒偏析,分析了颗粒尺寸和圆管直径对颗粒偏析的影响;文献[6]强调的是凝胶注模坯体的均匀性较好。颗粒偏析产生的密度梯度很少有相关文献报道,文献[7]利用离心-凝胶注模工艺制备双梯度多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 陶瓷,但只研究了离心速度和时间对于密度梯度的影响。

本文以铸型的密度梯度为评价指标,主要研究实验中可控因素如颗粒级配、颗粒固相体积分数、浆料球磨时间、充型时环境真空度以及充型时施加的振动条件对于铸型颗粒偏析程度的影响,以实现高效率冷却空心涡轮叶片整体式均匀陶瓷铸型的制备。

1 实验

1.1 实验原料与步骤

1.1.1 实验原料 实验原料为电熔刚玉陶瓷粉料,使用激光粒度仪测定粉体粒度分布,颗粒粒径分别为 $1, 2, 5, 25, 40, 100 \mu\text{m}$,由山东淄博星光磨料厂生产,颗粒形貌为不规则块状。利用 Rise-2008 型激光粒度分析仪可得不同颗粒粒径分布,如图 1 所示。陶瓷浆料溶剂为去离子水,分散剂是质量分数为 30% 的聚丙烯酸钠溶液,浓氨水作为 pH 调节剂,单

体交联剂为丙烯酰胺-亚甲基双丙烯酸酯,催化剂为四甲基乙二胺,引发剂为过硫酸铵,去离子水为工业纯,其余均为分析纯。

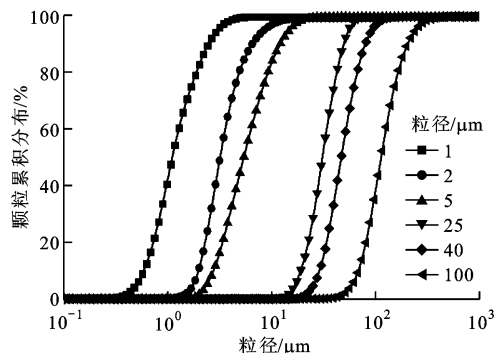


图 1 不同颗粒粒径分布情况

1.1.2 实验步骤 选取不同粒径的两种颗粒进行级配,按照不同的固相体积分数(56%、58%、60%、62%)添加到去离子水中,再使用浓氨水调节悬浮体系 pH 至 9.5,分散剂聚丙烯酸钠添加量为粉体总质量的 2%。陶瓷铸型的浆料中还需添加占预混液质量 15% 的有机单体与交联剂,搅拌均匀后使用行星式球磨机进行不同时间(30、60、90 min)的湿法球磨以完成浆料的制备,其中料球质量比为 3:1。球磨完成后取出浆料,加入催化剂、引发剂在真空注塑机振动台上进行光固化模具充型,使其在 13~15 min 中之内固化为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 陶瓷铸型试样,之后按文献[1]的工艺路线进行真空冷冻干燥,截取试样,进行密度测量。

1.2 检测与表征

采用尼润 SNB-2 黏度计测量浆料的黏度;用阿基米德排水法测量浇注后生坯的密度,测量仪器为 JA1103 电子秤。浇注试样形状及密度测试如图 2 所示,在浇注方向上每隔 20 mm 切割取一块作为密度测试样品。实验在高度方向上等距离测试不同位置的密度变化,而密度梯度的计算公式为 $\xi = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) / \rho_{\text{avg}}$,其中 $\rho_{\max}$ 为同一铸型的试样最大密度, $\rho_{\min}$ 为最小密度, ρ_{avg} 为铸型的平均密度。

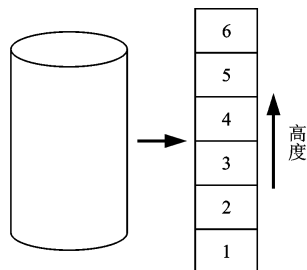


图 2 样品测试位置示意图

在 Rise-2008 型激光粒度分析仪上进行粒度分析,并利用 SU-8010 场发射扫描电镜进行样品微观结构的观察。

2 结果与讨论

2.1 颗粒级配的影响

表 1 中为 4 种不同颗粒级配制备的陶瓷浆料的参数,不同级配的粗细颗粒体积比按照最低表观黏度进行选择。

表 1 不同颗级配对应的浆料特性

颗粒级配	粗细颗粒 粒径比	粗细颗粒 体积比	浆料黏度 /Pa·s
100 μm/5 μm	20	60:40	0.102
40 μm/5 μm	8	68:32	0.274
40 μm/2 μm	20	62:38	0.185
25 μm/1 μm	25	58:42	0.259

注:固相体积分数均为 58%

由图 3 可知,上述 4 种颗粒级配的浆料都产生了一定的密度梯度,其趋势是:中部较均一,顶部和底部差异大。这是由于陶瓷颗粒密度总大于预混液密度,在重力场的作用下,垂直方向总是存在向下的重力,不同粒径受到的力不同,会引起陶瓷浆料中颗粒不同速度的沉降,致使下表面较上表面明显更致密,上下浆料颗粒分布不均。在影响陶瓷浆料颗粒分布均匀性的诸多因素中,悬浮颗粒粒径大小和粒径分布起着关键作用。文献[8]研究发现在悬浮液中颗粒过大或粒径分布较宽时,悬浮颗粒会产生聚凝和沉降等现象,导致陶瓷浆料中悬浮颗粒分布不均。

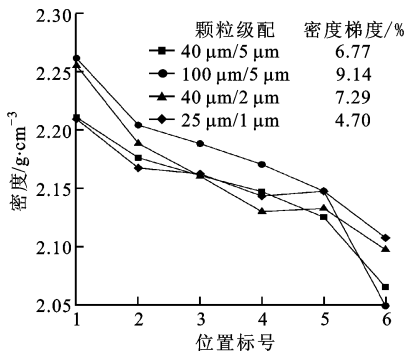


图 3 不同颗粒级配与密度梯度的关系

对比级配为 100 μm/5 μm 和 40 μm/2 μm 的浆料,粒径比都为 20,但是 40 μm/2 μm 密度梯度明显较小,从 9.14%变化到 7.29%。根据斯托克斯公式,颗粒沉降速度与粒径关系可表示为

$$v_0 = \frac{(\rho - \rho_0)d^2g}{18\eta}$$

式中: v_0 为粒子的沉降速度; ρ 和 ρ_0 分别为粒子与介质的密度; d 为粒子的直径; η 为介质的黏度; g 为重力加速度。因此,在浆料中,沉降速度与粒径的平方成正比,大颗粒优先沉降,在铸型底部富集。文献[9]指出,当颗粒小于 10 μm 时,沉降速度较小,因为此时布朗运动的速率足以与颗粒沉降的速度抗衡,粒子处于均匀分散状态,具有较强的动力学稳定性。

对比级配为 40 μm/2 μm、40 μm/5 μm 的浆料可以发现,随颗粒粒径比的减小,密度梯度呈减小趋势。在高固相浆料条件下,颗粒之间距离较小,颗粒粒径比越小,颗粒之间的相互作用力越明显,颗粒之间沉降干扰现象越明显^[10]。颗粒之间干扰沉降的速度公式为

$$v_g = v_0(1 - \lambda)^n$$

式中: λ 为粒群的固体容积浓度; n 为反映粒群的粒度和形状的指数。粒度越相近则 n 值越大,即沉降速度减小,相应密度梯度会减小,但是减小趋势并不明显,由于 40 μm/2 μm 中小颗粒较多,一定程度上减小了密度梯度。在颗粒级配最大的 25 μm/1 μm 反而密度梯度较小,这是由于亚微米颗粒加入量达到一定比例时,浆料出现一定的正触变性^[11],即灌注之后静置一段时间之后黏度增大。并且,当固相含量一定时,颗粒的粒度越细,数量就越多,颗粒群的表面积就越大,颗粒之间相互碰撞和摩擦的机会也就越多,都在一定程度上减小了颗粒的沉降,因此铸型的密度梯度减小。

虽然颗粒粒径比越大,颗粒平均粒径越大,浆料的流动性越好,但是小颗粒对大颗粒的移动阻碍越小,导致颗粒的沉降和浆料的离析,并最终影响浇注铸型的结构均匀性,因此合适的粒径范围为 1~50 μm。

2.2 固相含量的影响

由图 4 可以看出,所有试样顶部的生坯密度都低于底部,随着固相含量的增大,铸型的密度梯度呈直线减小,固相体积分数从 58%提高到 62%,密度梯度从 9.51%下降到 1.05%。固相含量越低差异越大,铸型的密度梯度呈直线减小,说明在较高固相含量下,不同颗粒大小的氧化铝分离现象被抑制。这是因为在高固相含量的浆料内,单位体积内氧化铝颗粒数目增多,颗粒间距显著降低,彼此的相互作用力增大,削弱了重力对于粒子的影响,单个颗粒很难从周围粒子的束缚中脱离、沉降,使其能够达到稳

定状态,所以没有明显的大尺寸颗粒优先沉降的现象,颗粒尺寸分布较均匀。

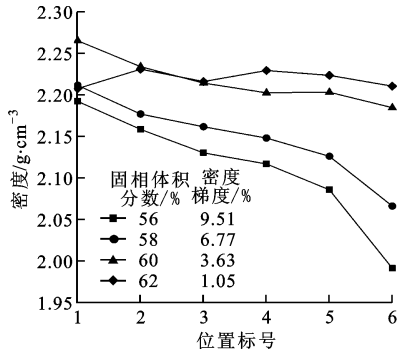


图 4 固相含量与密度梯度的关系

由图 4 可以看到,固相体积分数从 60% 提高到 62% 时,虽然密度梯度减小,但是铸型的平均密度没有上升反倒下降。这是由于浆料高固相含量增大到一定程度时,在灌注过程中夹杂到浆料中的铸型中的气泡难以排除,气泡占据了一定的体积比,减小了陶瓷颗粒占据的体积,从而导致铸型密度的下降。而且固相体积分数增大到 62% 时,浆料黏度增大到 1.325 Pa·s,大于 1 Pa·s,不满足灌注要求,因此固相体积分数应选择 60%。

2.3 球磨时间的影响

由图 5 可知,随着球磨时间的增大,密度梯度先增大后减小,从 6.77% 减小到 1.59%。这与球磨后浆料黏度和颗粒分布有很大关系,在球磨较短时间之后,颗粒在溶液中均匀混合,使颗粒之间包裹的自由水释放出来,浆料黏度降低,此时颗粒沉降速度较大。球磨较长时间会导致预先配制好的颗粒悬浮液的粒径分布发生畸变,大粒径陶瓷颗粒被打碎,颗粒数增多,黏度增大。由图 6 可知,级配为 40 μm/5 μm 时,在实验球磨时间内,浆料的颗粒分布差异改变不大,但是这改变对于浆料黏度值影响较大(如图 7 所示),因此此时对颗粒偏析起主要影响作用的

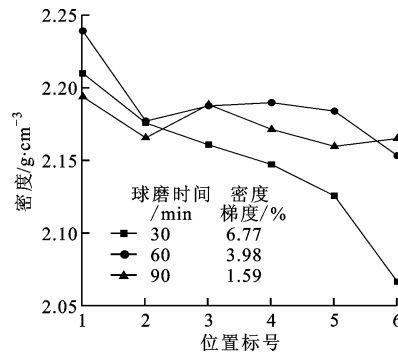


图 5 球磨时间与密度梯度的关系

是浆料黏度,而不是粒径分布。浆料未球磨时,颗粒混合不均匀,因此不作考虑。虽然球磨 90 min 密度梯度较小,但是浆料黏度增大至 1.153 Pa·s,大于 1 Pa·s,故球磨时间应选为 60 min。

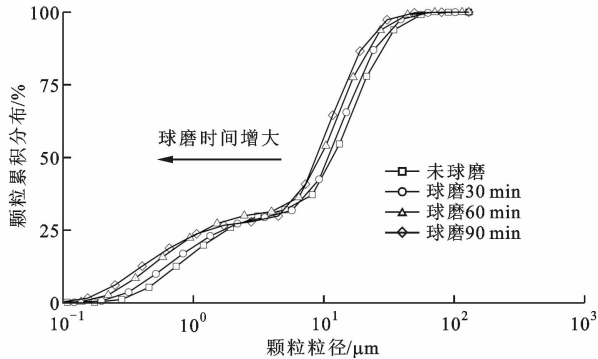


图 6 不同球磨时间后的颗粒粒径分布情况

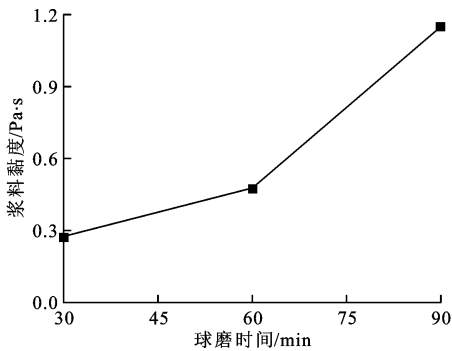


图 7 浆料黏度与球磨时间的关系

2.4 真空度的影响

随着真空度的提高,浆料平均密度值增大,铸型的上下密度差异值逐渐减小,但是减小的程度有限,仅从 6.77% 减小到 4.92%,见图 8。当浆料中含有气泡时,气泡作为一个独立相也占有一定的体积分数,抽真空之后,浆料中气泡数量大大减少,一定程度上提高了氧化铝颗粒的体积分数,浆料的黏度增大,但是增大程度有限^[12],因此对密度梯度的影响较小。

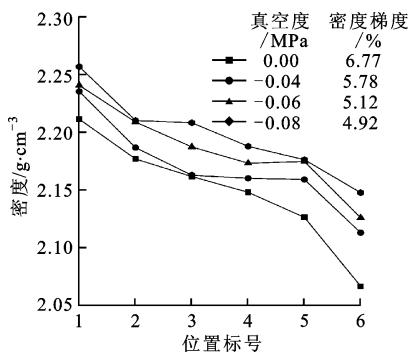


图 8 真空度与密度梯度的关系

2.5 振动的影响

充型时施加振动,振幅和频率均会影响铸型上下的密度梯度分布。由图 9 可知,在振动幅值固定为 2 mm 时,随着振动频率的增大,铸型的上下密度梯度值从 6.77% 逐渐减小到 3.23%。这是由于随着频率逐渐增加,浆料中颗粒之间的对流明显增大,而且在振动频率为 60 Hz 时,充型时发现浆料“沸腾”现象较为明显,从而减小了颗粒的沉降速度。随着振动频率的增加,铸型的平均密度也呈上升趋势。这是由于在振动过程中,流体动力振动施加于浆料,抵消了颗粒之间的静摩擦力,促使颗粒处于能量最

低的位置,此时小颗粒能更好填充大颗粒之间的缝隙,从而得到较为紧密的铸型,使铸型密度增加。

在振动频率固定为 60 Hz 时,随着振动幅值的增大,密度梯度先增大至 7.53% 后减小到 2.36%,见图 10。这是由于在较小振幅情况下,振动促进了颗粒之间的密实填充,加速了颗粒的沉降,导致了密度梯度的增大,而振幅增加到 3 mm 时,颗粒堆积产生失稳现象,不能形成较为密实的堆积状态,铸型密度由下到上呈现波动趋势,而且波动趋势逐渐增大,致使密度梯度呈现减小趋势,其原理示意图如图 11 所示。

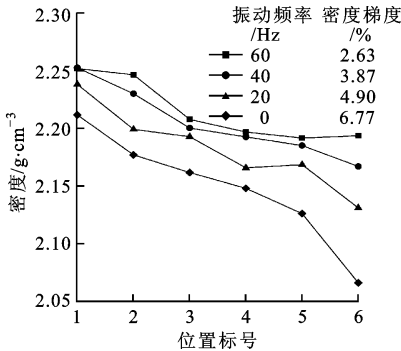


图 9 振动频率与密度梯度的关系

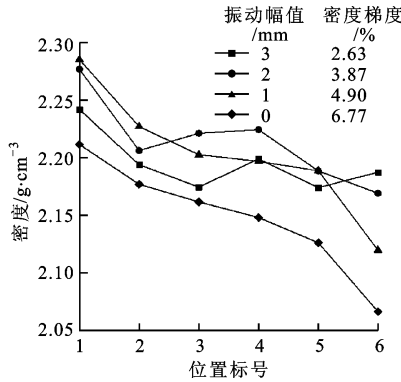


图 10 振动幅值与密度梯度关系

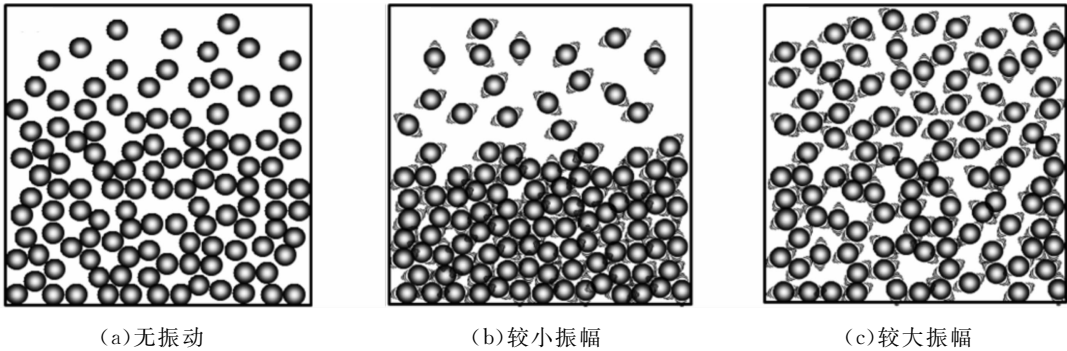


图 11 振动幅值对于颗粒分布的影响

综上所述,在浆料的灌注过程中,施加于铸型的振动频率应为 60 Hz,振幅应为 3 mm。

2.6 均匀大尺寸陶瓷铸型的制备

在颗粒级配为 40 μm /5 μm 、固相体积分数为 60%、浆料球磨时间为 60 min、充型时施加频率为 60 Hz、幅值为 3 mm 振动时(调整后),浆料黏度完全满足灌注要求,为 0.475 Pa·s,小于 1 Pa·s,铸型的密度梯度较小。在高度为 150 mm 的铸型中,密度梯度值仅为 0.89%。与相同颗粒级配 40 μm /5 μm 、固相体积分数为 58%、浆料球磨时间为 30 min、无振动、常压下(调整前)进行对比,图 12 为

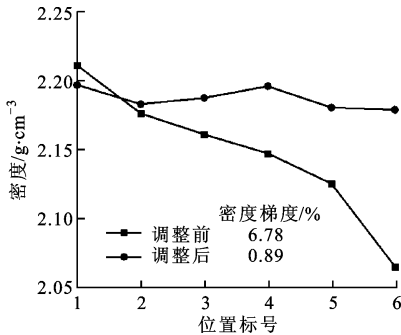


图 12 调整前后颗粒密度梯度分布

调整前、后的密度梯度分布图。利用粒度分析仪对底部和顶部粒度进行分析,结果如图 13、图 14 和表 2 所示。从中发现调整前较小的颗粒集中在顶部,底部大颗粒较多,而经过调整后颗粒的分布上下较为均匀一致(调整后顶部颗粒平均粒径和底部平均粒径均小于未球磨时的平均粒径,这是由于球磨后改变了粒径分布)。图 15 为调整前、后扫描电镜图对比,同样能发现上述规律。

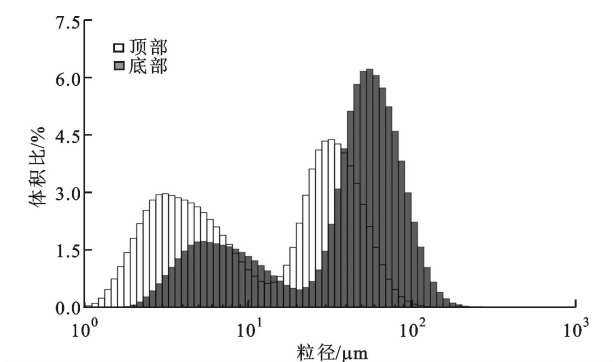


图 13 调整前铸型顶部和底部粒度分布

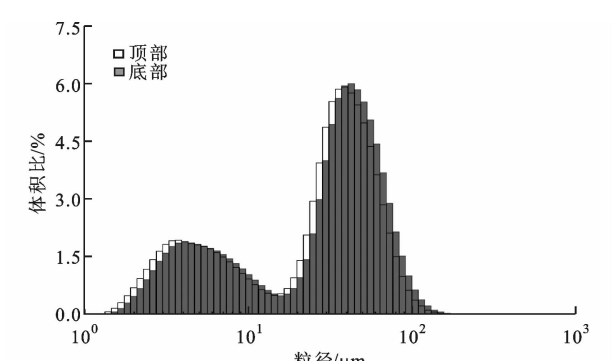


图 14 调整后铸型顶部和底部粒度分布

表 2 调整前后颗粒铸型顶部和底部平均粒径

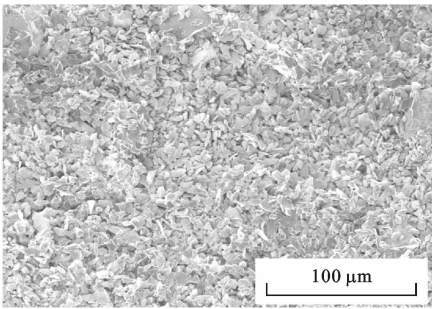
位置	平均粒径/ μm	
	调整前	调整后
D50 顶部	14.309	31.126
D50 底部	48.315	34.724

注:未球磨时平均粒径为 $35.752\ \mu\text{m}$ 。

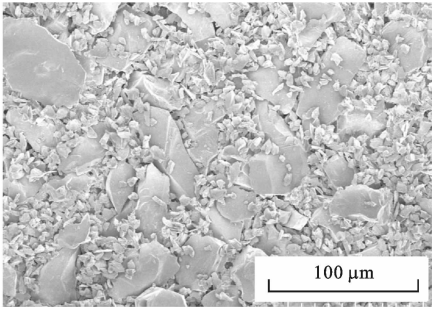
3 结 论

(1)陶瓷铸型的颗粒偏析主要是由浆料在固化前颗粒沉降造成的。

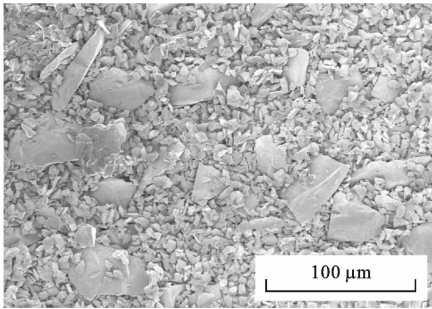
(2)各种因素对颗粒偏析影响原理如下:颗粒级配主要考虑颗粒尺寸和沉降时颗粒之间相互作用;固相含量主要通过改变黏度;球磨是通过球磨混合作用和改变颗粒分布;而振动通过传递能量以实现颗粒对流和密实堆积。



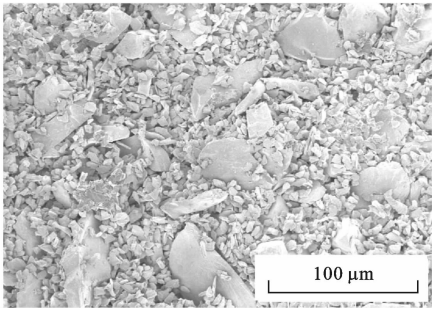
(a)调整前顶部



(b)调整前底部



(c)调整后顶部



(d)调整后底部

图 15 铸型顶部和底部断面显微结构对比

(3)当颗粒级配为 $40\ \mu\text{m}/5\ \mu\text{m}$ 、固相体积分数为 60%、球磨时间为 60 min、振动频率为 60 Hz、幅值为 3 mm 时,浆料黏度为 $0.475\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,完全满足灌注要求的小于 $1\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,铸型上下密度梯度减小到 0.89%(密度差仅为 $0.018\ \text{g}/\text{cm}^3$),完全满足大尺寸空心涡轮叶片陶瓷铸型的均匀性要求。

参考文献:

- [1] WU Haihua, LI Dichen, TANG Yiping, et al. Rapid casting of hollow turbine blades using integral ceramic moulds [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(6): 695-702.
- [2] 李奕宁, 鲁中良, 李振发, 等. 面向空心涡轮叶片凝胶注模陶瓷浆料设计与制备 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(6): 54-59.
LI Yining, LU Zhongliang, LI Zhenfa, et al. Design and preparation of gel-casting ceramic slurry for gas turbine blades [J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(6): 54-59.
- [3] CHOU S H, LIAO C C, HSIAU S S. The effect of interstitial fluid viscosity on particle segregation in a slurry rotating drum [J]. Physics of Fluids, 2011, 23(8): 083301.
- [4] 曹顺华, 邹仕民, 李春香, 等. 粉浆浇注制备铁基梯度复合材料 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2007, 12(5): 316-320.
CAO Shunhua, ZOU Shimin, LI Chunxiang, et al. Preparing Fe-base gradient composite material by slip casting [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2007, 12(5): 316-320.
- [5] LISS E D, CONWAY S L, ZEGA J A, et al. Segregation of powders during gravity flow through vertical pipes [J]. Pharmaceutical Technology, 2004, 28(2): 78-97.
- [6] 王小锋, 王日初, 彭超群, 等. 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 Xiaofeng, WANG Richu, PENG Chaoqun, et al. Research and development of gelcasting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 496-509.
- [7] JING Yuanyu, QIANG Li. Study on mass segregation phenomenon of Al_2O_3 ceramic slurries during centrifugal slip casting [J]. Advanced Materials Research, 2012, 490: 3584-3588.
- [8] LUCKHAM P F. The physical stability of suspension concentrates with particular reference to pharmaceutical and pesticide formulations [J]. Pesticide Science, 1989, 25(1): 25-34.
- [9] 冯莉, 刘炯天, 张明青, 等. 煤泥水沉降特性的影响因素分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 671-675.
FENG Li, LIU Jiongtian, ZHANG Mingqing, et al. Analysis on influencing factors of sedimentation characteristics of coal slime water [J]. Journal of China University of Mining Technology, 2010, 39(3): 671-675.
- [10] 涂必训. 干扰沉降影响因素之间关系的研究 [J]. 选煤技术, 2009(4): 22-24.
- [11] 据晨辉, 王燕民, 叶建东, 等. 颗粒粒度分布对高固相含量氧化铝浆料流变性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(8): 985-991.
JU Chenhui, WANG Yanmin, YE Jiandong, et al. Effect of particle size distribution on the rheological behavior of dense alumina suspension [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(8): 985-991.
- [12] 朱新文, 江东亮, 谭寿洪. 真空脱气处理对网眼多孔陶瓷力学性能的改善 [J]. 无机材料学报, 2001, 16(5): 889-895.
ZHU Xinwen, JIANG Dongliang, TAN Shouhong. Improvement in the mechanical properties reticulated porous ceramics by vacuum degassing [J]. Journal of Inorganic Materials, 2001, 16(5): 889-895.

[本刊相关文献链接]

- 刘飞, 鲁中良, 李振发, 等. 凝胶注模成型氧化铝基陶瓷坯体的冷冻干燥缺陷控制 [J]. 2014, 48(1): 123-126. [doi: 10.7652/xjtuxb201401021]
- 陈思翰, 刘福兴. 用选择性激光烧结技术制作陶瓷原件研究 [J]. 2011, 45(11): 116-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201111022]
- 刘毅, 金志浩. Ti_2AlN 可加工陶瓷的快速制备及压痕行为研究 [J]. 2011, 45(10): 104-108. [doi: 10.7652/xjtuxb201110019]
- 刘桂武, 倪长也, 金峰, 等. 陶瓷/金属复合装甲抗弹约束效应述评 [J]. 2011, 45(3): 7-15. [doi: 10.7652/xjtuxb201103002]
- 于雪梅. 气体静压轴承用多孔 SiC 陶瓷的制备及静态性能 [J]. 2011, 45(3): 117-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201103022]
- 衣明东, 许崇海, 蒋振钰, 等. Al_2O_3 粉末对 $\text{ZrO}_2\text{-TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米复合陶瓷材料力学性能的影响 [J]. 2011, 45(3): 125-128. [doi: 10.7652/xjtuxb201103024]
- 肖琪琳, 吕振林, 张珊珊, 等. 不同压力下 Ti_3SiC_2 陶瓷的干摩擦磨损性能研究 [J]. 2011, 45(2): 121-124. [doi: 10.7652/xjtuxb201102025]
- 张笑, 鲍崇高, 乔冠军, 等. 氧化铝陶瓷注射成型用黏结剂及混料工艺研究 [J]. 2011, 45(1): 127-131. [doi: 10.7652/xjtuxb201101025]
- 张旭辉, 陈祖煌, 马宁, 等. 液固混合烧结制备渗流型镍锌铁氧体/钛酸钡复相陶瓷 [J]. 2010, 44(12): 110-113. [doi: 10.7652/xjtuxb201012021]
- 张润理, 鲍崇高. 系列 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 结构陶瓷的耐冲蚀磨损性能 [J]. 2010, 44(5): 71-74. [doi: 10.7652/xjtuxb201005015]

(编辑 杜秀杰)