https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20250299

钛合金氧化钇陶瓷铸型凝胶注模成形缺陷模拟与控制

李 帅[1,2]，宁 帅[2]，纪志军[3]，刘 岩[2]，张维涛[4]，丁贤飞[3]，南 海[3]，黄魁东[5]，范学领[6]，鲁中良[1,2]，李涤尘[2]

（1. 西安交通大学 未来技术学院，陕西 西安 710049）

（2. 西安交通大学 精密微纳制造技术全国重点实验室，陕西 西安 710049）

（3. 中国航发北京航空材料研究院 铸造钛合金技术中心，北京 100095）

（4. 中国航发四川燃气涡轮研究院 涡轮技术研究部，四川 成都 610500）

（5. 西北工业大学 机电学院，陕西 西安 710072）

（6. 西安交通大学 航天航空学院，陕西 西安 710049）

摘 要：针对钛合金闭式叶轮一体化氧化钇（Y_2O_3）陶瓷铸型凝胶注模过程中气泡滞留缺陷导致金属铸件瘤状凸起的问题，构建Carreau非牛顿粘度模型和体积分数法（volume of fluid，VOF）两相瞬态充型的预测与调控框架，通过实验流变数据拟合获得氧化钇浆料Carreau模型（相对误差<5%），并复现充型过程气泡生成和滞留的时空演化，模拟得到的滞留位置与陶瓷铸型计算机断层扫描（computed tomography，CT）空洞及钛合金铸件CT瘤状凸起在叶轮/底部区域呈高度空间对应。结果表明：适中充型速度0.05 m/s可显著降低滞留体积；底注式充型结构可基本消除叶轮区滞留；在此基础上施加水平振动（50 Hz，1 mm）后气泡滞留完全消除。基于模拟优化制备的陶瓷铸型经扫描验证，叶轮内部气泡滞留消除。本研究为复杂钛合金构件的凝胶注模铸型提供了缺陷预测与主动调控的理论框架。

关键词：钛合金闭式叶轮；凝胶注模；数值模拟；气泡滞留；振动协同控制

中图法分类号：TG146.23 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X（2026）10-2522-11

1 引 言

钛合金有良好的比强度、比刚度和耐蚀性，对于减轻质量、强化功效、改善可靠性等方面具有显著优势，在航空航天领域得到广泛应用[1–3]。钛合金闭式叶轮可以提高流体动力学效率，降低泄漏损失，并改善整体系统的稳定性和效率[4]。随着发动机对高性能、轻质和耐腐蚀材料需求的不断增长，钛合金闭式叶轮正逐步从传统制造向高端快速制造技术转型[5]。利用立体光固化仪（stereolithography apparatus, SLA）/蜡3D打印获得一次树脂模，凝胶注模快速制壳并浇注，在模具中实现近净成形，能够制造出传统加工难以实现的复杂闭式结构，减少了后续机械加工和精密修整的需求[6]。可显著缩短制造周期与成本，为复杂闭式结构提供敏捷试制路径。但钛合金在浇注温度下极易与模壳反应生成α相，恶化表面与疲劳性能，迫使必须选用化学惰性更高的面层或铸型材料。Zhao等[7]研究不同面层材料的Ti-1100高温钛合金界面反应特性，得出采用Y_2O_3面层材料的反应层厚度明显低于ZrO_2面层材料。氧化钇型壳/型芯一体化凝胶注模是钛合金闭式叶轮制造的重要前沿。

由于Y_2O_3易发生水解，浆料粘度较高，Y_2O_3高固含凝胶体系粘度高，充型中易出现自由表面翻卷、夹气与局部滞留，后续难以消除并在金属件上表现为瘤状凸起等缺陷[8–10]。由于充型过程瞬态强、空间受限，陶瓷浆料在模腔内的局部压力与速度难以实现高精度原位测量；而采用计算流体动力学（computational fluid dynamics, CFD）方法可在三维尺度上复现实时流动与界面行为，进而直观且定量评估微细特征处的充填充分性与气体滞留风险，并揭示结构与工艺参数对充型行为的影响。赵洪晨等[11]研究分析了单晶叶片型壳浆料粘度对型壳性能的影响，强调了浆料粘度在型壳制备过程中的重要性。研究指出，浆料的流变性能直接影响型壳的致密性和强度，对提高铸件质量具有重要意义。荆慧等[12]使用Fluent进行了凝胶注模充型行为模拟，对浆料的非牛顿流体特性进行了分析，模拟过程条件并没有还原出非牛顿流体的特性，模拟并不充分，只是反映出浆料充型过程中的卷气现象，无法模拟出充型结束后的气泡滞留现象。现有数

收稿日期：2025-10-30

基金项目：“钛合金闭式叶轮型壳/型芯一体化成形技术”课题资助（ZT-2025CG-0083）

作者简介：李 帅，男，1999年生，博士生，西安交通大学未来技术学院，陕西 西安 710049，E-mail：lishuai2023@stu.xjtu.cn

值模拟常将浆料近似为牛顿流体，难以反映剪切速率依赖的粘度衰减与液面台阶化推进，导致对气泡滞留与缺陷映射的预测力不足。聚合物/颗粒浆料领域的经验表明，Carreau 类模型在充型和自由表面问题上具备更好的稳定性与预测能力，适合迁移用于凝胶注模充型阶段。近年来，Carreau 模型作为描述剪切变形非牛顿流体行为的经典模型，被广泛应用于高分子注塑成型、陶瓷注模和粉末注射成型等充型模拟研究中[13]。在聚合物注塑领域，Li 等[14]通过比较 Carreau、Cross 以及 Carreau–WLF 模型在典型熔融聚合物充型过程中的表现，发现 Carreau 模型在剪切率变化剧烈的流场中具有良好的稳定性与预测能力，适合复杂模腔内的数值模拟。

尽管关于钛合金闭式叶轮的快速制造技术已有一定研究，但针对其在凝胶注模过程中流动行为与金属铸件瘤状凸起缺陷形成机制的系统研究仍较为稀缺。现有研究多集中于陶瓷浆料流动性能评估，而对实际充型过程中流体行为的模拟分析尚不充分，尤其缺乏与实际缺陷验证结合的研究。为弥补这一空白，本工作围绕钛合金闭式叶轮在 Y_2O_3 一体化壳芯凝胶注模过程中的气泡滞留与瘤状凸起缺陷演化展开研究。基于 ANSYS Fluent，耦合 VOF 多相界面追踪与 Carreau 非牛顿粘度模型，对凝胶注模充型全程进行数值模拟，跟踪浆料/空气界面，观察气泡形成与滞留的时空过程。并将模拟预测与钛合金铸件上实际观察到的瘤状凸起缺陷在位置与形貌上进行对比验证，形成面向凝胶注模充型的机理—仿真框架；进一步，利用该模型系统评估充型速度、模腔结构与工艺条件对 Y_2O_3 陶瓷铸型充填行为的影响，给出参数窗口与优化依据，为凝胶注模浆料充型模拟与工艺设计提供理论参考。

2　实　验

2.1　钛合金闭式叶轮一体化氧化钇陶瓷铸型制造

钛合金在高温下具有极高的化学活性，易与模具材料发生反应并造成界面污染，从而显著降低铸件的表面质量与力学性能[1]。因此，选择一种能够抵抗钛合金高温反应的模具材料至关重要。氧化钇陶瓷因其优异的化学惰性和高温稳定性，成为钛合金铸造的理想模具材料[15]。研究表明，氧化钇陶瓷能够有效减少界面反应，从而获得高质量的钛合金铸件。同时，氧化钇陶瓷还具有较高的熔点和良好的热震性能，能够在铸造过程中保持模具的完整性[16]。

为适应钛合金闭式叶轮铸造的结构复杂与周期敏捷需求、降低制造成本并实现快速试制，本课题组提出，以光固化原型为基础，陶瓷型壳一体化制备的凝胶注模新方法。型芯与型壳一体化成型，避免了由于装配型芯而引入型芯与型壳之间的相对位置误差，保证型腔内部的尺寸精度。该工艺方法的主要流程如图 1 所示。

（1）利用 SLA 制备含有钛合金叶轮原型的树脂模具。

（2）采用凝胶注模成型工艺，一次性完成内外结构一体化陶瓷型壳成型，依靠预先配置好的陶瓷浆料本身良好的流动性，填充钛合金叶轮树脂原型。

（3）通过干燥、焙烧等工艺过程，烧失树脂原型，并使陶瓷烧结成为陶瓷铸型。

（4）浇铸金属，脱芯后形成钛合金叶轮。

根据 Funk-Dinger 分布函数[17]可知：当颗粒的级配数增加时，浆料的固相含量逐渐增加，粘度可以进行凝胶注模。使用巩义正宇新材料有限公司的氧化钇粉末，选择四级级配方法，颗粒粒径分别为 100，50，18，5 μm。并添

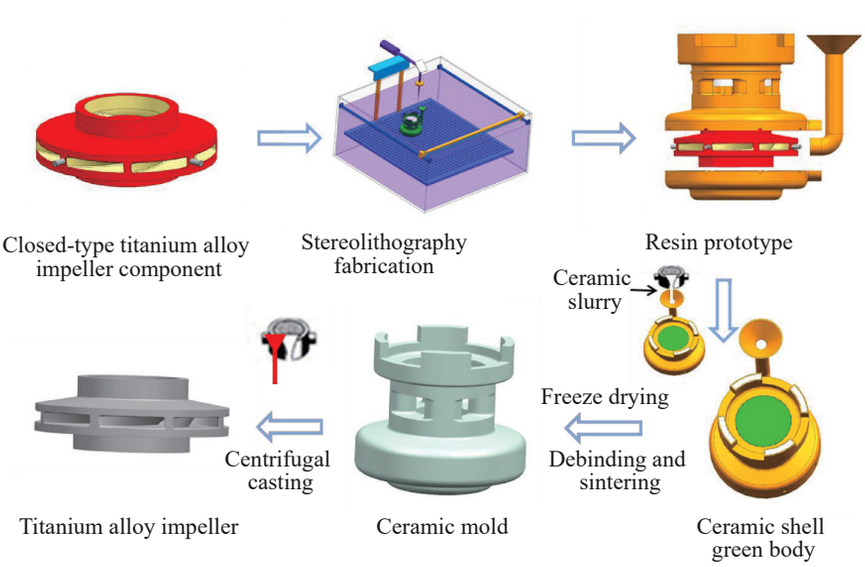


图 1　钛合金叶轮凝胶注模铸造工艺流程

Fig.1　Process flowchart of gelcasting for titanium alloy impeller

加纳米氧化钇粉末，进一步填充微米级颗粒之间的空隙，改善颗粒堆积密度。碳纤维增加陶瓷材料的强度和韧性。凝胶体系选择丙烯酰胺（AM）和亚甲基双丙烯酰胺（MBAM），分散剂选择聚丙烯酸钠（PAAS），引发剂选择过硫酸铵（APS），催化剂选择四甲基乙二胺（TMEDA），浸渍液选择氧化钇溶胶。

由于氧化钇易发生水解，浆料粘度较高，氧化钇陶瓷浆料流变特性如图2所示，较高的浆料粘度会对陶瓷浆料的凝胶注模充型过程产生不利影响。在充型过程中，易产生充型不完整，在陶瓷铸型内部残留气泡，致使陶瓷铸型气泡滞留缺陷，表现在钛合金金属铸件上为金属铸件外部有瘤状凸起缺陷。

2.2　陶瓷铸型充型过程数值模拟

在基于SLA的闭式叶轮一体化氧化钇陶瓷铸型制造中，凝胶注模是决定铸型充填质量的关键环节。由于陶瓷浆料与腔内空气相互作用，充填过程呈典型气–液两相流动，其行为受自由表面动力学强烈影响，长期存在建模与测量难点。实际充填中常出现自由表面翻卷、界面断裂/再并合、卷气与“憋气”致气泡滞留等瞬态现象。为准确捕捉上述界面演化及气体分布，采用VOF对浆料充填全过程进行瞬态两相数值模拟。

VOF 模型是用于两种或多种不混溶流体的固定欧拉网格的表面跟踪技术，最早由Hirt和Nichols在1981年提出，并对溃坝进行数值模拟取得了好的结果[18]。在VOF模型中，流体共享一组动量方程，并且在整个域中跟踪每个计算单元中每种流体的体积分数。VOF模型可应用于：分层流动、自由液面流动、填充、晃动、大气泡在液体中的运动、溃坝后液体的运动、射流破裂的预测（表面张力）以及任何液-气界面的稳态或瞬态跟踪。该模型对自由液面的模拟提供了重要基础，目前在水利与海洋方面被广泛应用，也是本研究中CFD耦合的基础。该方法中，互不相容的流体组分共用一套动量方程，并通过引入相体积分数α这一变量来实现对计算域内相间界面的追踪。其中α表示液体或气体中一相的体积所在网格体积的比值。

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{Phase A} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{Interface} \\ \alpha = 1 & \text{Phase B} \end{cases} \tag{1}$$

VOF方法通过求出整个计算域内各网格单元的相分数，从而可以构建出界面，如图3所示。

对于凝胶注模充型过程，空气和冷却液是互不相溶的两相，均为不可压缩湍流流动，流场均遵循流动控制方程。默认加注过程的结果，给定自定义场函数作为排气的输入状态，所以假定VOF模型：

（1）气相与液相互不相溶，并且有连续的相界面；

（2）各相具有相同速度场。

多相VOF模型存在总的质量守恒方程，第二相体积分数方程，总动量守恒方程，因不考虑热交换影响，总能量守恒方程不必考虑。

（1）总质量守恒方程见式（2）：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla\left(\rho\vec{v}\right) = 0 \tag{2}$$

（2）第二相体积分数方程见式（3）：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q\rho_q\right) + \nabla\left(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\right) = \sum_{p=1}^{n}\left(\dot{m}_{Pq} - \dot{m}_{qP}\right) \tag{3}$$

（3）总的动量守恒方程见式（4）：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\vec{v}\right) + \nabla\left(\rho\vec{v}\vec{v}\right) = -\nabla p + \nabla\left[\mu\left(\nabla\vec{v} + \left(\nabla\vec{v}\right)^T\right)\right] + \rho\vec{g} + \vec{F} \tag{4}$$

式中，ρ为平均密度，kg·m^{-3}；μ为平均粘性，kg·(m·s)$^{-1}$；$\vec{v}$为两相平均速度，m·s^{-1}；α_q为第q相体积分数；ρ_q为第q相密度；$\dot{m}_{Pq}$为P相到q相的质量传输。

由于液体在自由面上受到表面张力的影响，这里采用了连续表面力模型[19]，其核心写法是：

$$f_\sigma = \sigma\kappa\nabla\alpha,\ n = \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|},\ \kappa = -\nabla\cdot n \tag{5}$$

式中，α是液相体积分数（VOF相函数），σ为界面张力系数，κ为曲率由体积分数梯度计算得到。

浆料和空气均满足动量方程和连续性方程，结合特征函数方程，就可以得到浆料和空气在每个网格单元所占的体积。在自由面的处理上，一般体积分数α为0时代

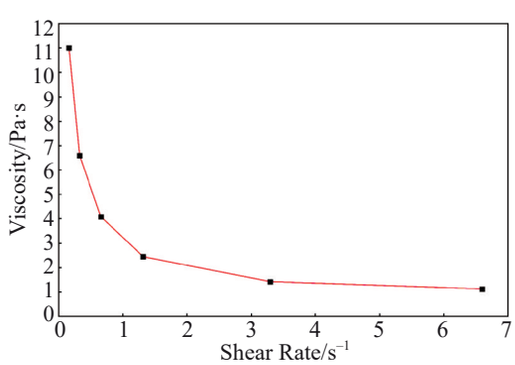
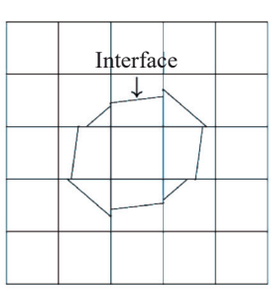


图2　氧化钇陶瓷浆料流变特性

Fig.2　Rheological behavior of the Y_2O_3 ceramic slurry

0	0	0	0	0
0	0.09	0.51	0.29	0
0	0.68	1	0.68	0
0	0.29	0.51	0.09	0
0	0	0	0	0

a



b

图3　VOF方法的相分数场与界面重构

Fig.3　VOF volume-fraction field (a) and interface reconstruction (b)

表空气，为1时代表浆料，介于0和1之间时代表浆料和空气两相的交界面。

陶瓷浆料在充型树脂模具过程中的流动特性可以分为湍流和层流。在细小结构处，根据大致计算的雷诺数远小于2300，填充过程可视为浆料在圆管中的层流。可以通过分析一种非牛顿陶瓷浆料在细圆管中的流动，建立简化的数学模型，从而得到各参数对浆料的细微结构流动充型能力的影响。对于正的速度梯度，流体内摩擦应力可表示剪切速率的幂律[20]：

$$\tau_{xy}=\mu\left(\frac{\mathrm{d}u_x}{\mathrm{d}y}\right)^n \tag{6}$$

其中，τ_{xy}为剪切内应力，$\mathrm{d}u_x/\mathrm{d}y$为正的速度梯度（剪切速率），$\mu$为动力粘度，$n$为无量纲参数。牛顿流体符合牛顿内摩擦定律，$n=1$，非牛顿流体通过参数$n$的变化反应自身流变特性，$n<1$对应剪切变稀，$n>1$对应剪切增稠。

根据粘度与流动的关系又把流体分为两类，当流体的粘度不随剪切速率变化时称作牛顿流体，当流体粘度随剪切速率变化时称这种流体为非牛顿流体。常见的牛顿流体包括空气、水等，非牛顿流体包括聚乙烯、聚丙烯等高分子聚合物溶液。Carreau型非牛顿流体模型是化工中常用的非牛顿流体模型，主要用于描述有机高分子材料流体、淀粉浆料等粘稠流体的剪切变稀现象，其表达式如公式（7）所示。凝胶注模所使用的凝胶体系是非牛顿流体，有剪切变稀现象，符合Carreau粘度模型。

$$\mu=\mu_\infty+\left(\mu_0-\mu_\infty\right)\left[1+\left(\lambda\gamma\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \tag{7}$$

式中：μ_0为剪切速率为零时流体的粘度（Pa·s）；μ_∞为剪切速率为无穷大时流体的粘度（Pa·s）；λ为单位时间参数（s）；n为无量纲参数。

其中$\mu_0>\mu_\infty>0$，由此可见Carreau模型函数为单调递减函数，可以很好地描述钛合金氧化钇钛渣料的剪切变稀现象。

模型方面，使用Siemens公司的UG作为建模软件，基于生产经验和设计理念构建了凝胶注模的型芯型壳一体化设计，其中注型为浆料充型模拟域，陶瓷注型围成的封闭区域是金属铸件区域，以上述两个区域模型作为研究中注型充型行为模拟和金属浇铸模拟的初始模型。应用Hypermesh软件以四面体单元划分模型网格，网格质量达标，网格总数为330346。导入到Fluent软件中进行模型仿真。氧化钇陶瓷铸型充型几何结构如图4所示，各主要结构尺寸如表1所示。

选择VOF两相流模型进行模拟、求解器选择为基于压力的瞬态流动压力-速度耦合，使用层流Laminar模型（估算充型过程中雷诺数远小于2300，为层流），算法选择为Explicit显式格式[21]，重力加速度设为9.81 m/s^2。按表2参数定义液相“Slurry”为陶瓷浆料，设Slurry的热力学参数与水一致（流动模拟不涉及传热分析）；直接调用材料库中air的参数定义气相。设定气相为基本相，液相为第二相。

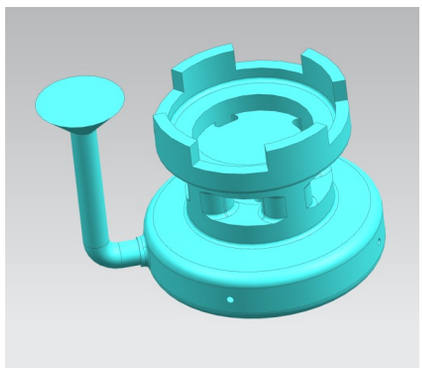


图4 陶瓷铸型结构

Fig.4 Geometric configuration of the ceramic mold

表 1 钛合金氧化钇陶瓷铸型特征尺寸

Table 1 Characteristic dimensions of yttria-stabilized ceramic mold for titanium alloy (mm)

Overall height	Overall width	Impeller mold diameter	Impeller mold height
115	153	110	25

表2 液相材料参数设定

Table 2 Parameter settings of liquid phase materials

Material	Density/ kg·m^{-3}	Relative molecular mass	Surface tension/N·m^{-1}
Slurry	3350	93	0.05

以速度入口和压力出口定义边界条件，速度和压力值由充型工艺确定；在大气环境下充型，浆料向充满空气的树脂模具中进行充型，故入口处的Slurry Multiphase项设为1，出口处设为0。

以Fluent默认值设定各参数亚松弛因子和残差。初始化由入口开始计算，由于腔体初始状态为充满空气，故slurry体积分数设为1。时间步长0.001 s，载荷步数12 000，云图观察气相体积分数，每10个载荷步自动保存一次模拟计算结果。

3　结果与讨论

在氧化钇陶瓷铸型钛合金浇铸件中发现有瘤状凸起缺陷，对实验流程进行追根溯源，分析缺陷是由于凝胶注模陶瓷铸型在充型过程中存在气泡滞留，使用Carreau粘度模型对陶瓷铸型充型行为模拟复现充型气泡滞留缺

陷，并基于模拟研究充型速度、充型结构以及施加机械振动等工艺条件对于充型行为的影响进行研究。

3.1　凝胶注模气泡滞留缺陷机理数值模拟研究

3.1.1　粘度模型对于充型模拟的影响

Carreau 模型拟合结果如图 5 所示。实验测量氧化钇浆料流变特性 6 个实验数据点，用数据点拟合 Carreau 模型参数，由此可见 Carreau 模型函数为单调递减函数，可以很好地描述氧化钇浆料的剪切变稀现象。

为了验证 Carreau 模型拟合浆料的情况是否准确，将实验数据与拟合结果进行了误差分析，公式为：

$$\delta = \frac{N^{*}-N}{N} \times 100\% \tag{8}$$

式中：δ 为相对误差；N^{*} 为预测值；N 为试验值。

将拟合过程中的数据代入误差分析公式（8）中，结果如图 6 所示。拟合误差小于 5%，Carreau 粘度模型能较为准确的表示氧化钇浆料的流变特性。

以 20 cm/s 的充型速度进行充型，定粘度模型 η_{∞}= 0.56 Pa·s 和 Carreau 粘度模型，充型过程模拟如图 7 所示，两者充型速率相当，都在 6 s 左右充满。充型 3 s 时，定粘度模型因忽略剪切变稀效应，浆料前沿呈水平推进，而 Carreau 模型由于准确表征粘度随剪切速率的动态衰减行为，液位呈现阶梯状分布更接近实际实验观察情况。在 6 s 充满后，模拟观察到 12 s，发现定粘度外侧可观察到的气泡残余被排出，而 Carreau 粘度模型充型 12 s 时气泡滞留仍然保持，从浆料充型的外部观察来看，使用定粘度模型无法模拟出凝胶注模充型的气泡滞留行为，Carreau 粘度模型能够模拟出一定的气泡滞留现象。

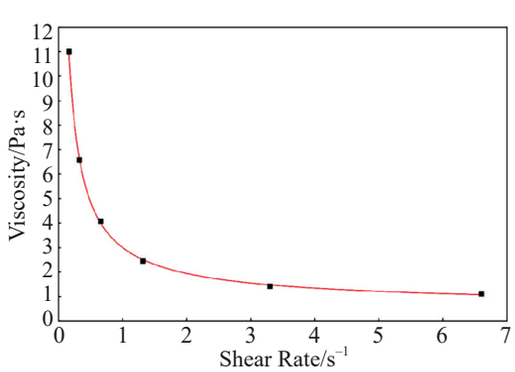


图 5　Carreau 粘度模型拟合曲线

Fig.5　Fitting curve of the Carreau viscosity model

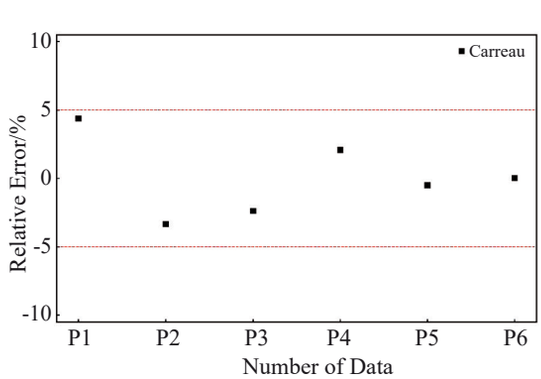


图 6　Carreau 模型拟合的数据与实验数据误差

Fig.6　Error analysis between Carreau model predictions and experimental data

定粘度和 Carreau 粘度模型充型 6 和 12 s 气泡滞留情况如图 8 所示，在 6 s 时，定粘度模型叶片内上部有少量气泡滞留，Carreau 粘度模型的底部凹槽处和叶片内上部有气泡滞留。在 12 s 时，定粘度模型气泡滞留消失，Carreau 粘度模型气泡滞留情况基本保持。从气泡滞留情况来看，使用定粘度模型能模拟出凝胶注模充型过程中少部分气泡滞留行为，Carreau 粘度模型能够模拟出充型过程中的气泡滞留现象并能够保持气泡滞留现象。

3.1.2　凝胶注模充型气泡滞留和钛合金闭式叶轮瘤状凸起实验对比

如图 9 所示，为进一步确认金属铸型瘤状凸起缺陷是由于陶瓷铸型充型过程中气泡滞留导致并且 Carreau 粘度模型充型模型方法可以模拟出正确的气泡滞留现象。取 Carreau 粘度模型充型模型方法结果叶轮位置和底部位置截面图如图 9c 和图 9d 所示，对陶瓷铸型相应位置进行 CT 扫描如图 9b 和图 9e 所示，可见 Carreau 粘度模型充型模型方法气泡滞留结果与陶瓷铸型气泡滞留的位置基本一致。另外，Carreau 粘度模型充型模型方法叶轮位置（图 9c）和底部位置（图 9d）所示气泡滞留情况分别与金属铸造试验件叶轮位置（图 9f）和底部位置（图 9g）瘤状凸起缺陷位置相一致。对金属铸造试验件叶轮位置进行 CT 扫描，叶轮截面位置充型模拟、陶瓷铸型 CT 到金属铸件气泡滞留到形成瘤状凸起结果对比如图 10 所示，金属铸型瘤状凸起缺陷位置与陶瓷铸型有气泡滞留空洞位置基本一致，Carreau 粘度模型充型模型模拟出的气泡滞留位置与陶瓷铸型有空洞位置相一致。由于铸型在浇注后未取出金属铸型，铸型会被破坏掉，所以陶瓷铸型做 CT 件与金属浇注并不是同一个，气泡滞留位置所产生的空洞是基本一致的，也可证明陶瓷铸型充型过程中气泡滞留导致金属铸型瘤状凸起缺陷，而 Carreau 粘度模型充型模型方法可以模拟还原出充型和气泡滞留现象。

闭式叶轮区域的瘤状凸起缺陷对于钛合金闭式叶轮性能影响较大，需要研究影响气泡滞留的因素，解决气泡滞留问题。底部气泡滞留导致的底部瘤状凸起对于钛合金闭式叶轮的使用也有一定影响。以下将以底部和闭式叶轮内上部气泡滞留为研究重点，以提出的模拟方法为实验模拟方法，探究影响气泡滞留的因素。

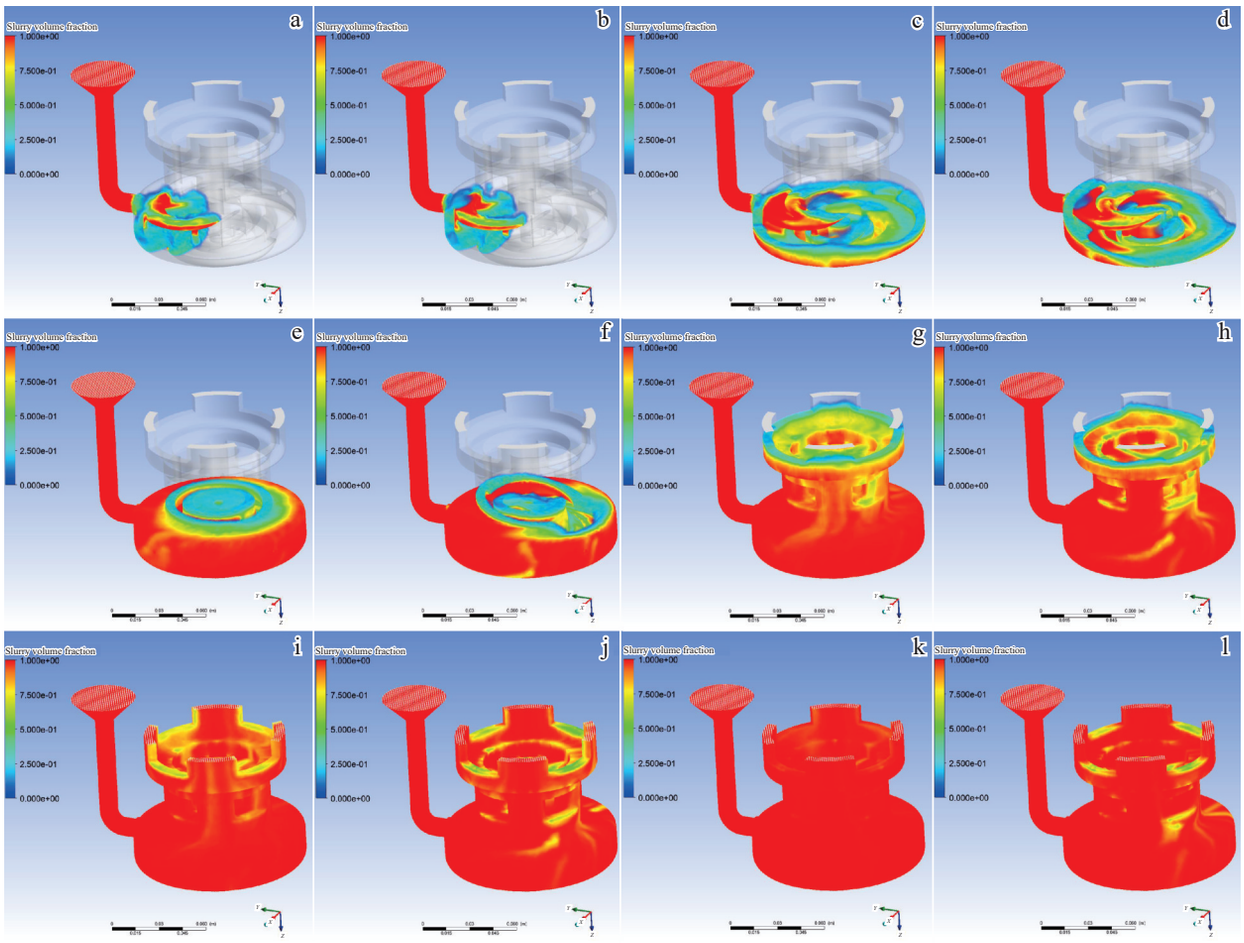


图7　定粘度与Carreau粘度模型充型过程对比

Fig.7　Comparative analysis of filling processes using Constant (a, c, e, g, i, k) vs. Carreau (b, d, f, h, j, l) viscosity models: (a–b) 0.5 s, (c–d) 1.5 s, (e–f) 3 s, (g–h) 4.5 s, (i–j) 6 s, and (k–l) 12 s

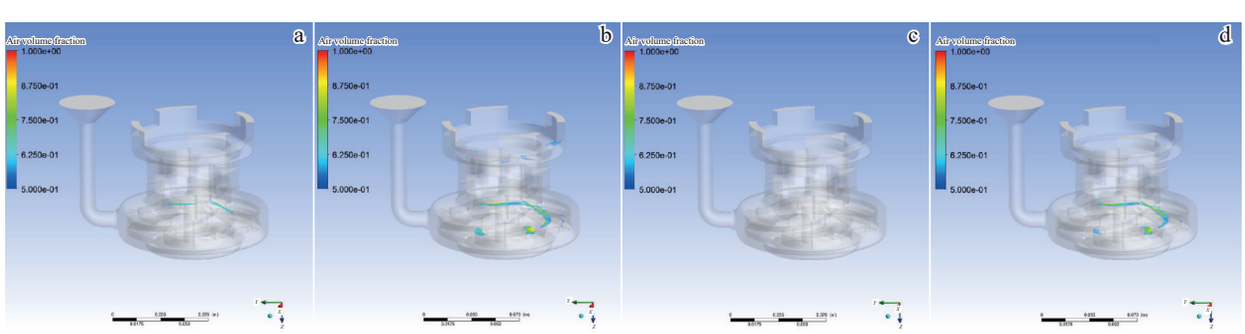


图8　定粘度和Carreau粘度模型充型对比

Fig.8　Gas entrapment comparison between Constant (a, c) and Carreau (b, d) viscosity models: (a–b) gas entrapment at 6 s filling completion and (c–d) gas entrapment at 12 s post-filling

3.2　充型速度和充型结构对于铸型气泡滞留的影响

3.2.1　凝胶注模充型速度对铸型气泡滞留的影响

钛合金氧化钇陶瓷铸型凝胶注模充型速度对于充型行为有一定影响。以0.01、0.05、0.10 m/s不同入口速度充型1 s时充型情况如图11所示，入口速度小时，氧化钇陶瓷浆料充型也慢。入口速度大时，氧化钇陶瓷浆料充型也快。

0.01、0.05、0.10 m/s不同速度充型满时气泡滞留情况如图12所示。相对于入口速度0.05 m/s的充型过程，由于氧化钇陶瓷浆料有剪切变稀现象，入口速度0.01 m/s，流动速度减小，浆料剪切变稀变弱，浆料粘度变大，气泡滞留区域和体积都增大。但是缺陷地方都没有

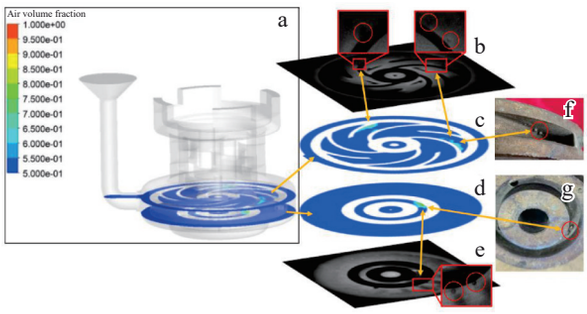


图9 Carreau–VOF 充型模拟气泡滞留预测与陶瓷铸型 CT/钛合金铸件瘤状凸起的空间对应与对比验证

Fig.9 Spatial correlation and validation between gas entrapment predicted by the Carreau-VOF filling model and CT-observed voids in ceramic molds/nodular defects on Ti alloy castings: (a) casting appearance—nodular protrusions at the impeller and bottom regions (section locations indicated); (b) ceramic mold CT—impeller section: voids; (c) Carreau – VOF filling simulation—impeller section: gas entrapment (air volume fraction, α_{air}); (d) Carreau – VOF filling simulation—bottom section: gas entrapment; (e) ceramic mold CT—bottom section: voids; (f) gas entrapment in impeller section; (g) gas entrapment in bottom section

明显改善，气泡滞留体积的减少不足以解决缺陷。入口速度 0.10 m/s，剪切变稀增强，浆料粘度变小，叶轮内上部气泡滞留体积减小，但流动剧烈，导致更多区域产生气泡滞留，并不有利于铸型的完整。由此可知，适中的入口速度能够使充型结果气泡滞留区域较少，气泡滞留体积较小，此氧化钇陶瓷铸型入口速度 0.05 m/s 对于气泡滞留的改善最佳。

3.2.2　凝胶注模充型结构对气泡滞留的影响

观察图 11b，浆料充型进入叶轮部分后，一部分沿着底部充型，一部分直接到了闭式叶轮的叶轮部分，造成上下同时充型，在右侧叶轮内部上方接触部分夹气产生气泡滞留。图 7c 充型过程中浆料液位不水平，产生夹气气泡滞留。为使充型过程中液位水平上升，将充型结构改

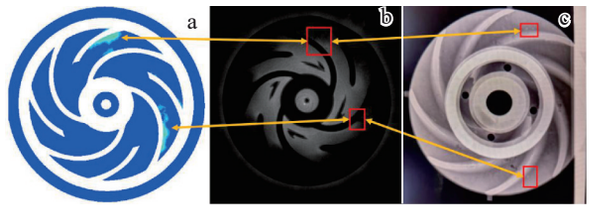


图10 叶轮截面处气泡滞留的数值预测与陶瓷铸型和实物 CT 缺陷的对比

Fig.10 Cross-sectional validation of simulated gas entrapment against CT/actual defects at the impeller section: (a) Carreau–VOF filling simulation—impeller cross-section: gas entrapment (α_{air}); (b) ceramic mold CT—impeller cross-section: voids; (c) Ti-alloy casting—impeller cross-section CT: nodular defect at the corresponding location

为底部式充型，其结构如图 13 所示。

底部充型式结构模拟充型 2.6 s 时如图 14 所示，浆料液面水平上升充型，相较于之前侧面注入式液面变更为水平上升充型。

从原本侧面充型式改为底部充型式，充型结果如图 15 所示，叶片区域气泡滞留基本消失，底部气泡滞留仍然存在，有明显的气泡滞留消除作用。

3.3　凝胶注模充型过程中振动对气泡滞留的影响

3.3.1　充型过程中垂直方向振动对气泡滞留的影响

在充型过程中，常开启振动以促进内部气泡滞留的排出，而目前缺少机械振动对于充型过程的完整模拟研究。在充型过程中施加垂直方向（Z 轴方向）的频率 25 Hz 振幅 1 mm 的机械振动，模拟结果如图 16 所示。Z 轴方向振动使得叶轮部分气泡滞留相较于无振动底注式气泡滞留增多，底部气泡滞留情况一致。深入分析发现，在重力方向的机械振动对于增大水平流动充型基本没有帮助，还会妨碍水平方向剪切变稀现象，重力方向振动导致粘度增大等因素导致叶轮气泡滞留变多，重力方向振动对于气泡滞留的消除有副作用，说明重力方向振动对于

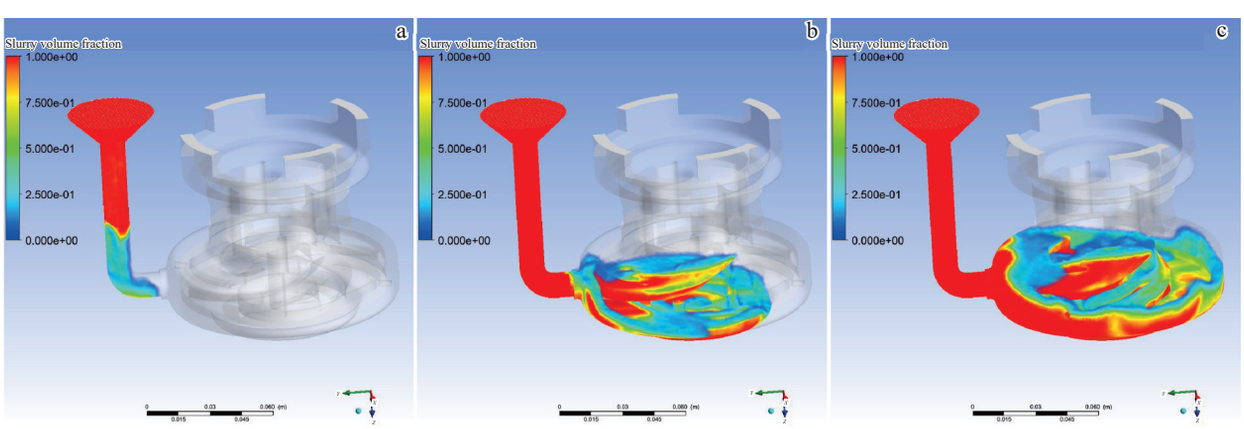


图11 入口速度为 0.01、0.05、0.10 m/s 充型 1 s 时情况

Fig.11 Filling patterns at different inlet velocities for 1 s: (a) 0.01 m/s, (b) 0.05 m/s, and (c) 0.10 m/s

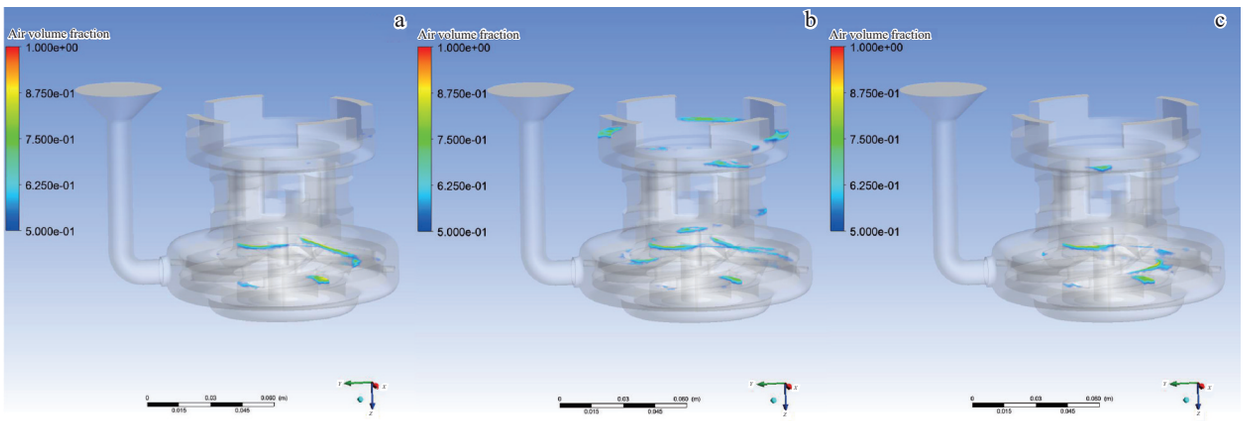


图 12　入口速度为0.01、0.05、0.10 m/s充型满时气泡滞留情况

Fig.12　Gas entrapment distribution at full mold filling under different inlet velocities: (a) 0.01 m/s, (b) 0.05 m/s, and (c) 0.10 m/s

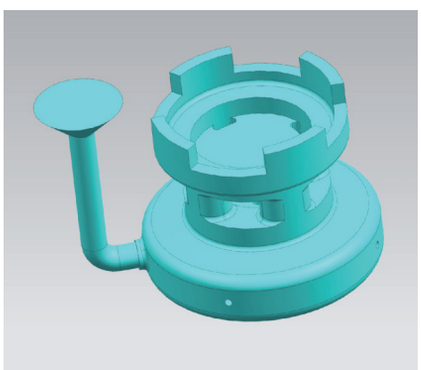


图 13　底部充型式结构

Fig.13　Bottom-gated mold design

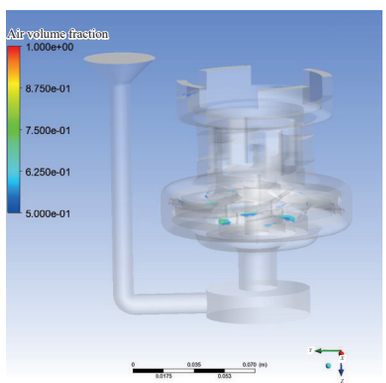


图 15　充型满后气泡滞留情况

Fig.15　Gas entrapment elimination in bottom-gated mold after full filling

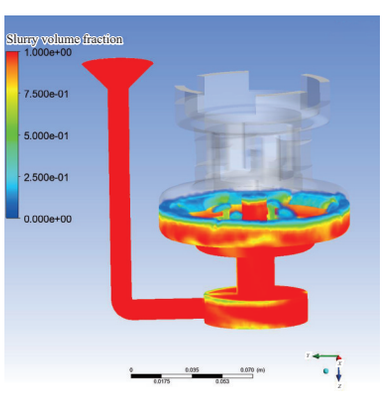


图 14　充型 2.6 s时气泡滞留情况

Fig.14　Filling progression at 2.6 s (bottom-gated configuration)

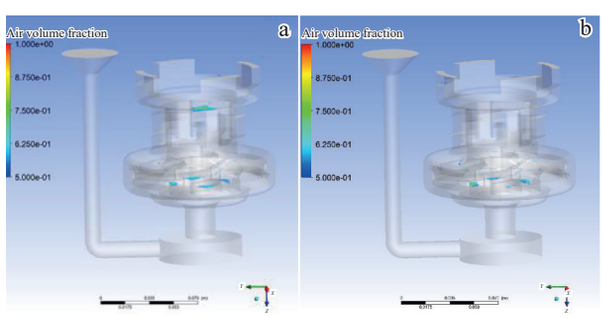


图 16　施加垂直方向机械振动和不振动对比

Fig.16　Effect of vertical vibration (25 Hz, amplitude of 1 mm) (a) and non-vibration (b) on gas entrapment

凝胶注模充型没有帮助。

3.3.2　充型过程中水平方向振动对气泡滞留的影响

在充型过程中施加水平方向（X轴方向）频率 25 Hz 振幅 1 mm 的机械振动，模拟结果如图 17 所示。X轴方向振动可以明显减少叶轮和底部气泡滞留，在注型后持续振动可以进一步消除叶轮内上部气泡滞留，实现注型中全部气泡排出，消除大部分气泡滞留体积。

进一步加大水平方向机械振动强度到频率 50 Hz 振幅 1 mm，充型模拟结果如图 18 所示，气泡滞留完全消失。

为进一步分析水平振动消除气泡滞留的机理，施加水平方向机械振动充型 4.5 s 剖面水平方向速度云图如图 19a 所示，无振动充型 4.5 s 剖面水平方向速度云图如

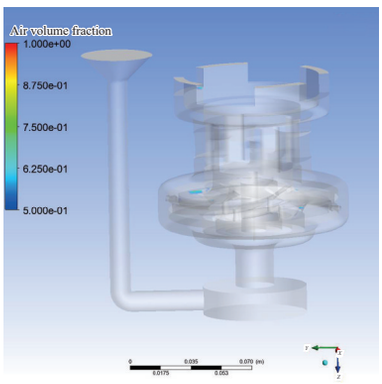


图17 水平方向振动25 Hz，1 mm充型结果

Fig.17 Gas entrapment reduction via horizontal vibration (25 Hz, 1 mm amplitude)

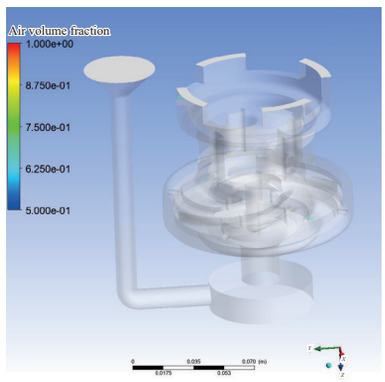


图18 水平方向振动50 Hz，1 mm充型结果

Fig.18 Complete elimination of gas entrapment with enhanced horizontal vibration (50 Hz, amplitude of 1 mm)

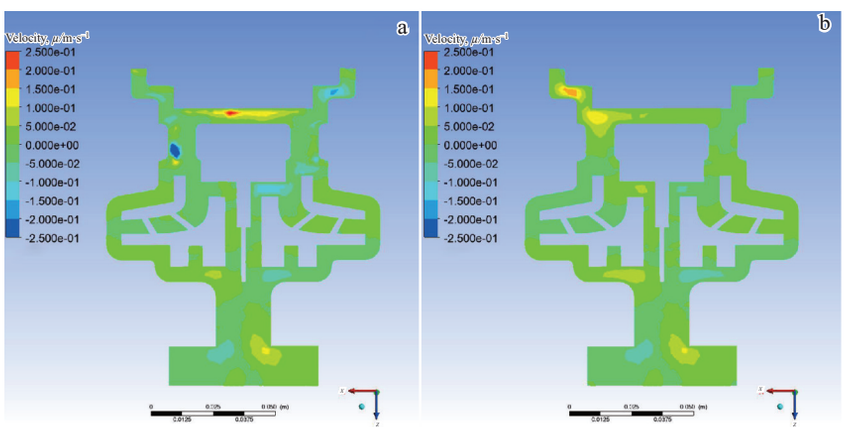


图19 施加水平方向振动和无振动的速度云图对比

Fig.19 Comparative analysis of velocity contours with (a) and without (b) horizontal vibration for 4.5 s

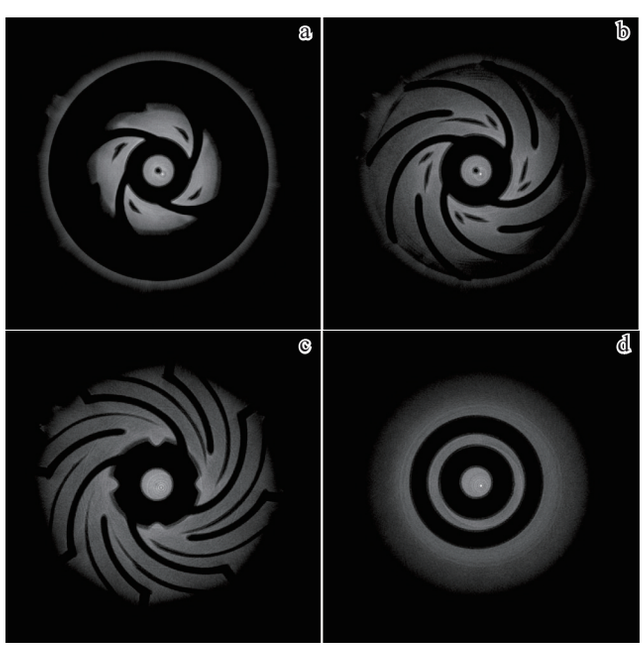


图20 铸型扫描图

Fig.20 CT scan validation of gas entrapment-free ceramic mold: (a) defect-free regions in impeller top, (b) blade surface, (c) mid-blade, and (d) mold root

图 19b 所示。速度云图对比发现，施加水平方向机械振动使得充型过程中水平方向速度变大，水平方向运动更加剧烈，使得浆料出现更强的“剪切变稀”粘度下降，明显减少铸型充型气泡滞留。

3.4　凝胶注模实验结果

根据上述模拟研究结果，以底注式结构，过程中施加水平方向机械振动，氧化钇陶瓷叶轮铸型凝胶注模充型结果扫描图如图 20 所示，叶轮内顶部、叶轮内叶片上、叶轮内叶片中部和铸型根部均无气泡滞留。根据模拟复现出气泡滞留现象，明确充型气泡滞留问题的机理，通过充型速度、充型结构和过程中增加机械振动，消除了氧化钇陶瓷铸型气泡滞留。

4　结　论

1）基于 Carreau 非牛顿流体粘度模型和 VOF 两相瞬态模拟，实现对“气泡生成—迁移—滞留”全过程的可视化与定量定位，与陶瓷铸型 CT 空洞及金属铸件瘤状凸起在叶轮/底部区域的空间位置高度一致，证明该模型能可靠预测气泡滞留与缺陷映射关系。

2）在可靠模拟基础上开展参数对比：适中充型速度可显著抑制滞留；底注式充型结构可明显降低叶轮区滞留风险，为复杂零部件的凝胶注模提供快速工艺优化方法。

3）引入机械振动工况：水平方向振动在充型过程中可减少气泡滞留，且在充型完成后持续施加有助于进一步排出残余气泡；而垂直方向振动改善有限。该结果为闭式叶轮凝胶注模的缺陷预防与参数选型提供了可行方法，降低瘤状凸起发生率。

参考文献　　References

[1] Zhang Meijuan(张美娟), Nan Hai(南 海), Ju Zhongqiang(鞠忠强) *et al*. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2016, 36(3): 13

[2] Yang Wanbo(杨万博), Huo Yuanming(霍元明), He Tao(何 涛) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(2): 386

[3] Liu Zhiduo(刘知多), Zhang Haoyu(张浩宇), Zhou Ge(周 舸) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(2): 658

[4] Liu Bing(刘 兵), Jin Feng(金 锋), Yuan Baojie(袁保杰). *Internal Combustion Engines & Parts*(内燃机与配件)[J], 2022(16): 45

[5] Cai Jianming(蔡建明), Tian Feng(田 丰), Liu Dong(刘 东) *et al*. *Materials Engineering*(材料工程)[J], 2018, 46(5): 36

[6] Li Dichen(李涤尘), Lu Zhongliang(鲁中良), Tian Xiaoyong(田小永) *et al*. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2022, 43(4): 22

[7] Zhao E E, Kong F T, Chen Y Y *et al*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21: s348

[8] Hu Chunyang(胡春阳), Jia Zhiwei(贾志伟), Xiao Qiangwei(肖强伟) *et al*. *Foundry Engineering*(铸造工程) [J], 2024, 48(3): 12

[9] Li Chengpan(李成攀). *Proceedings of the 27th Chongqing Foundry Conference & 11th National Casting Defect Remediation Symposium*(第 27 届重庆市铸造年会暨第十一届全国铸件挽救工程技术交流会论文集)[C]. Chongqing: Chongqing Foundry Industry Association, 2017: 156

[10] Zhu Chunlei(朱春雷), Zhu Xiaoping(朱小平), Yi Fan(仪 凡) *et al*. *Foundry*(铸造)[J], 2023, 72(7): 891

[11] Zhao Hongchen(赵洪晨), Cao Guoqiang(曹国强). *Electromechanical Information*(机电信息)[J], 2024(18): 20

[12] Jing Hui(荆 慧), Li Yining(李奕宁), Jiang Bo(姜 博) *et al*. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐通报)[J], 2014, 33: 2073

[13] Baum M, Anders D, Reinicke T. *Polymers*[J], 2023, 15(21): 4220

[14] Li Jinghao, Zhou Xianglin, Zhao Yaoyao *et al*. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 31: 100989

[15] Yan Zhengguo(颜正国), Li Zhonghua(李忠华), Yang Wengang(杨文刚) *et al*. *Material Sciences*(材料科学)[J], 2022, 12: 1276

[16] Yang Rui(杨瑞), Qi Zhe(齐哲), Yang Jinhua(杨金华)*et al*. *Materials Engineering*(材料工程)[J], 2018, 46(12): 1

[17] Dinger D R, Funk J E. *MRS Bulletin*[J], 1997, 22(12): 19

[18] Hirt C W, Nichols B D. *Journal of Computational Physics*[J], 1981, 39(1): 201

[19] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. *Journal of Computational Physics*[J], 1992, 100(2): 335

[20] Schramm L L. *Suspensions: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*[M]. Washington: American Chemical Society, 1996: 3

[21] Yuwen Xuanxuan(宇文晅晅). *Thesis for Master Degree*(硕士学位论文)[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012

Simulation and Control of Forming Defects in Gel Casting of Yttria-Stabilized Ceramic Molds for Titanium Alloy

Li Shuai[1,2], Ning Shuai[2], Ji Zhijun[3], Liu Yan[2], Zhang Weitao[4], Ding Xianfei[3], Nan Hai[3], Huang Kuidong[5], Fan Xueling[6], Lu Zhongliang[1,2], Li Dichen[2]

(1. School of Future Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(3. Cast Titanium Alloy R&D Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(4. Turbine Technology Research Department, AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

(5. School of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(6. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address nodular protrusions on titanium alloy-closed impellers caused by gas entrapment during gelcasting of integrated Y_2O_3 (yttria) ceramic molds, this work established a predictive and control framework that couples a Carreau non-Newtonian viscosity model with a transient two-phase volume-of-fluid filling solver. Rheological experiments were fitted to obtain the Carreau parameters for the yttria slurry (relative error < 5%), enabling time-space reconstruction of bubble generation-migration-entrapment throughout filling. Results show that the simulated entrapment locations exhibit strong spatial correspondence with computed-tomography voids in ceramic molds and nodular defects on Ti alloy castings at both the impeller and bottom regions. Parametric studies indicate that a moderate filling velocity of 0.05 $m \cdot s^{-1}$ markedly reduces trapped-gas volume; a bottom-fill configuration essentially eliminates entrapment in the impeller region; on this basis, applying horizontal vibration (50 Hz, 1 mm) during and after filling removes the remaining bubbles. Ceramic molds fabricated with the optimized parameters were verified by scanning, confirming the disappearance of gas entrapment within the impeller. The study provides a reusable framework for defect prediction and active process control in gelcasting of complex Ti alloy components.

Key words: titanium alloy-closed impeller; gelcasting; simulation; gas entrapment; vibration-assisted control

---

Corresponding author: Ji Zhijun, Senior Engineer, Cast Titanium Alloy R&D Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, E-mail: 386029953@qq. com; Lu Zhongliang, Ph. D., Professor, State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: zllu@xjtu.edu.cn