

# 大长径比超细 WC-Co 圆棒 PIM 充模过程的数值模拟

谢兴铖<sup>1</sup>, 曹瑞军<sup>1</sup>, 李增德<sup>1</sup>, 周增林<sup>1</sup>, 李卿<sup>1</sup>, 李悦<sup>2</sup>, 贾斌<sup>2</sup>

(1. 有研工程技术研究院有限公司, 北京 101407)

(2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036)

**摘要:** 基于计算流体动力学的粉末-粘结剂双流体模型, 采用 CFX 商业软件对大长径比超细 WC/10Co 粉末注射成形 (PIM) 充模过程进行数值模拟。结果表明: 数值模拟结果与实际充模过程相一致, 其假设条件和参数设置具有合理性, 双流体模型具有可行性; 粉末与粘结剂的温度分布一致, 喂料熔体最低温度 ( $\geq 330$  K) 高于粘结剂的玻璃化温度, 不发生凝固现象; 粉末的粘度为 50.0~379.4 Pa·s, 粘结剂的粘度为 2.9~9.2 Pa·s, 粘度差是造成偏析现象的主要原因; 从浇口处到模壁处, 粉末与粘结剂的相对速度差从 0.2% 增加到 1.8%, 从浇口处到远端, 相对速度差从 0.1% 增大到 1.6%, 相对速度差是引起偏析现象的主要原因。

**关键词:** 双流体模型; 超细 WC/10Co; 充模过程; 数值模拟

**中图分类号:** TF125.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2021)01-0160-07

粉末注射成形 (PIM) 的充模过程是一个非牛顿流体的非等温、非定常的复杂流动, 是一个包括固相粉末颗粒、液相粘结剂和模腔气体的多相流动过程<sup>[1-3]</sup>。超细 WC/Co 喂料流变性低, 熔体流动复杂多变, 充模过程难以有效控制, 试验研究成本高昂<sup>[4-8]</sup>。随着计算机技术的发展, 数值模拟可以有效优化工艺参数, 降低反复调试和模具修正过程的生产成本<sup>[9-11]</sup>。同时, 数值模拟可以实现喂料熔体充模流动过程可视化, 预测裂纹、气孔、熔接线等缺陷产生信息, 为分析工艺条件和喂料性质、指导工艺参数和模具设计提供有效信息<sup>[12-14]</sup>。

粉末注射成形的数值模拟是将喂料视为不可压缩的非牛顿流体, 基于连续介质假设的流体模型<sup>[15,16]</sup>。Iwai 等<sup>[17,18]</sup>提出了一种基于粉末-粘结剂协调作用的颗粒模型, 将实际形状粉末颗粒转换成等效球状颗粒, 将包裹有粘结剂的粉末颗粒作为一个单元, 直接考察粉末特性对流动过程的影响, 该模型可以更加精确地反映粉末注射成形喂料状态, 限于实际计算中易发散, 运用尚不成熟。郑洲顺等<sup>[3,11,16]</sup>应用类似分子动理论的方法, 由 Boltzmann 方程出发建立了 PIM 粉末-粘结剂两相流动的动力学方程, 该方法给出了有效的双流体模型, 十分适用于气-固两相流。王玉会等<sup>[13,19,20]</sup>引用流体力学的研究方法, 基于连续介质模型并应用平均

化方法建立了粉末-粘结剂两相流模型, 其模型计算量小, 初始条件易于给定并且求得的结果易于应用。

本研究结合实验结果, 采用粉末-粘结剂的双流体模型对大长径比超细 WC-Co 圆棒 PIM 充模过程进行数值模拟, 讨论粉末和粘结剂各自的温度场、粘度场和速度场, 分析两相流模型的可行性及充模过程中两相各自的充模特性。

## 1 PIM 工艺

喂料由 YG10 超细硬质合金混合料与蜡基粘结剂组成, 其中, WC 粉末费氏粒度为 0.6  $\mu\text{m}$ , 来自江西耀升钨业股份有限公司; Co 粉费氏粒度为 1  $\mu\text{m}$ , 来自南京寒锐钴业有限公司。粘结剂质量组分为 63% 石蜡 (PW)-15% 聚丙烯 (PP)-15% 高密度聚乙烯 (HDPE)-5% 邻苯二甲酸二辛酯 (DOP)-2% 硬脂酸 (SA)。

将 WC 粉和 Co 粉配制成 WC/10Co 混合料, 滚动湿磨 30 h, 干燥后, 依次过 200 目 ( $\leq 74 \mu\text{m}$ ) 和 320 目 ( $\leq 45 \mu\text{m}$ ) 的筛。将混合料粉末和粘结剂在  $\Sigma$  型真空捏合机上混炼 2 h 制备喂料, 粉末装载量为 49 vol%。喂料经过制粒后, 在 CJ50E 型注塑成型机上制取注射坯, 模具型腔尺寸为  $\Phi 2.8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} / \Phi 2.2 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$ , 如图 1 所示。

收稿日期: 2020-01-07

基金项目: 国家重点研发计划专项 (2017YFB0306000); 有研科技集团有限公司青年基金 (66271907); 有研科技集团有限公司科技创新基金天使研究项目 (2019TS0102)

作者简介: 谢兴铖, 男, 1986 年生, 博士, 高级工程师, 有研工程技术研究院有限公司先进电子材料事业部, 北京 101407, 电话: 010-60662611, E-mail: xiexingcheng@grinm.com

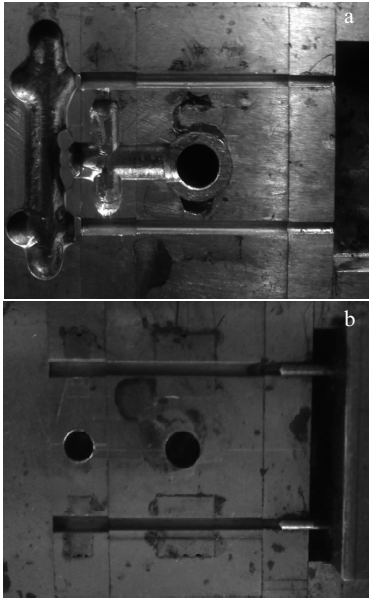


图 1 模具型腔实物图

Fig.1 Photos of mold cavity: (a) stationary mould fixed half and (b) movable mould moving half

注射工艺参数如下：浇口大小约为  $R=0.5$  cm 半圆，模具温度为 298 K，注射温度为 423 K，注射体积流量为  $3.2 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 2 模拟条件

### 2.1 基本假设

将粉末表面包覆一层粘结剂组成的物质定义为等效粉末，将等效粉末作为拟流体来研究。粉末-粘结剂双流体模型假定粉末颗粒与粘结剂在空间任意位置是共同存在且可以相互渗透的连续介质，粉末与粘结剂属于彼此独立而又相互作用的 2 种流体。PIM 充模流动过程不发生相变，粉末与粘结剂的密度、导热系数和比热等为常数。

### 2.2 基本方程

当相界面处不发生相变，两相间无质量交换，两者之间主要通过动量交换和能量交换相互作用，其粉末和粘结剂各自的质量、动量和能量守恒方程<sup>[21,22]</sup>分别如下：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_k \rho_k) + \nabla \cdot (\phi_k \rho_k \mathbf{v}_k) = 0 \quad (1)$$

式中： $k=1, 2$  分别表示粘结剂，粉末； $\phi_k$  是  $k$  相所占有的体积分数； $\rho_k$  是  $k$  相的相密度； $\mathbf{v}_k$  是粉末-粘结剂相界面处第  $k$  相的速度。

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_k \rho_k \mathbf{v}_k) + \nabla \cdot (\phi_k \rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = -\phi_k \nabla p_k + \nabla \cdot (\phi_k \boldsymbol{\tau}_k) + \phi_k \rho_k \mathbf{g} + \mathbf{F}_k \quad (2)$$

式中： $p_k$  是  $k$  相的正压力； $\boldsymbol{\tau}_k$  是  $k$  相的剪应力； $\mathbf{g}$  是重力常数； $\mathbf{F}_k$  是  $k$  相的单位体积的相间相互作用。

能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_k \rho_k (e_k + \frac{1}{2} \mathbf{v}_k^2) + \nabla \cdot [\phi_k \rho_k \mathbf{v}_k (e_k + \frac{1}{2} \mathbf{v}_k^2)] = -\nabla \cdot (\phi_k p_k \mathbf{v}_k) + \nabla \cdot (\phi_k \boldsymbol{\tau}_k \cdot \mathbf{v}_k) - \nabla \cdot (\phi_k \mathbf{q}_k) + \phi_k \rho_k \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_k + E_k \quad (3)$$

式中： $e_k$  是单位质量相  $k$  介质具有的内能； $\mathbf{q}_k$  为  $k$  相的热流量； $E_k$  是  $k$  相的动能。

相间能量交换项主要是相间热交换，PIM 充模流动过程的雷诺数较小，取  $Nu \approx 2$ 。

相间动量交换是通过粉末和粘结剂间的拖拽力来实现的，其拖拽力采用混合模型<sup>[23-25]</sup>，其表达式为式(4)和式(5)：

$$M_1 = -M_2 \approx C_D \rho_{12} |\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1| (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \quad (4)$$

$$C_D = K \eta_e \quad (5)$$

式中： $M$  为粉末和粘结剂的相间动量交换率； $C_D$  为粉末和粘结剂之间的拖拽系数； $\rho_{12}$  为混合喂料密度； $K$  为比例系数。

各相粘度满足<sup>[24,25]</sup>：

$$\eta_e = \phi_1 \eta_1 + \phi_2 \eta_2 \quad (6)$$

式中： $\eta_e$  为混合喂料的等效粘度。

### 2.3 条件设置

PIM 充模过程的初始条件为  $t=0$  时刻的加载状态。表 1 为充模过程的初始条件。

PIM 充模流动的边界条件主要包括速度、温度、压力边界条件及体积分数。入口处为给定的注射速度、温度及不同物质各自的理论体积分数，模壁处满足无滑移条件或滑移条件  $V_{\text{wall}} = V_0$ <sup>[25]</sup>。表 2 为 PIM 充模过程边界条件。

### 2.4 计算模型

图 2 为大长径比圆棒模腔的三维模型和网格化模型。建模步骤包括：(1)采用 UG NX 5.0 对模腔进行几何建模；(2)采用 ANSYS ICEM CFD 13.0 软件划分网

表 1 PIM 充模过程初始条件

Table 1 Initial conditions of PIM filling process

| Initial condition                        | Value                                                            |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Temperature/K                            | 298                                                              |
| Pressure/ Pa                             | $10^5$                                                           |
| Velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | $\mathbf{v}_{\text{air}} = \mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2 = 0.0001$ |
| Volume fraction                          | $\phi_{\text{air}} = 1, \phi_1 = \phi_2 = 0$                     |

表 2 PIM 充模过程边界条件

| Table 2 Boundary conditions of PIM filling process |                                        |                                                            |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Boundary condition                                 |                                        | Value                                                      |
| Inlet                                              | Velocity/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 8.153                                                      |
|                                                    | Temperature/K                          | 298                                                        |
|                                                    | Volume fraction/%                      | $\varphi_{\text{air}}=0$ , $\varphi_1=51$ , $\varphi_2=49$ |
| Outlet                                             | Pressure/Pa                            | $10^5$                                                     |
| Cavity                                             | Temperature/K                          | 298                                                        |
| wall                                               | Velocity                               | No slip                                                    |

格, 其中, 浇口截面为  $R=0.5\text{ mm}$  的半圆, 双侧排气槽截面均为  $R=0.25\text{ mm}$  的圆。(3)采用非结构的四面体网格划分, 全局网格尺寸为 0.2, 其中型腔内壁、入口内壁和出口内壁呈圆弧状。(4) 使用三菱柱网格细化圆弧边缘, 经检验网格质量为 0.4。

WC/10Co 与粘结剂的物性参数如表 3 所示。拖拽系数公式中的比例系数  $K$  取经验值  $3.6\text{ Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3 模拟结果与分析

结合实验结果, 以双流体模型为基础, 采用 CFX 软件对大长径比超细 WC/10Co 圆棒充模过程进行数值模拟。通过 CFX-Post 后处理软件分析注射坯截面或线上的各个物理量或物理场。为了便于表述, 选取图 3 所示的截面  $S_1$ 、 $S_2$  (随  $Z$  坐标改变的截面  $\phi=2.2\text{ mm}$  或  $\phi=2.8\text{ mm}$ )、 $S_3$ 、 $S_4$ , 截面  $S_4$  上的线段  $L_1$ 、直线  $L_2$ , 以及模腔整体等部位进行分析。

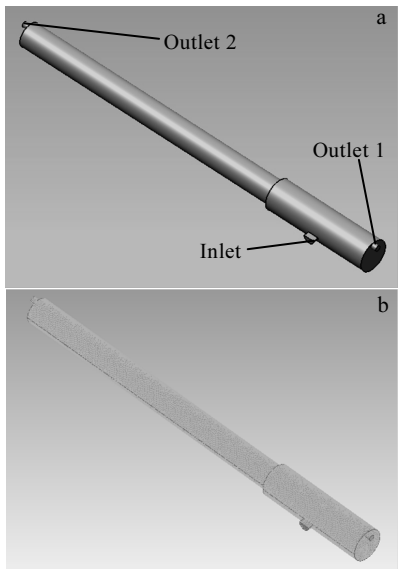


图 2 模腔结构图

Fig.2 3D-structure of cavity: (a) geometric model and (b) mesh model

表 3 WC/10Co 粉末和粘结剂的物性参数

| Table 3 Physical properties of WC/10Co powder and binder |                                           |                                                                         |                                                                   |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Material                                                 | Density/<br>$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | Thermal conductivity/<br>$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | Specific heat/<br>$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| WC/10Co powder                                           | 14.507                                    | 103 <sup>[26]</sup>                                                     | 230                                                               |
| Binder                                                   | 0.917                                     | 1.6 <sup>[27]</sup>                                                     | 1701 <sup>[27]</sup>                                              |

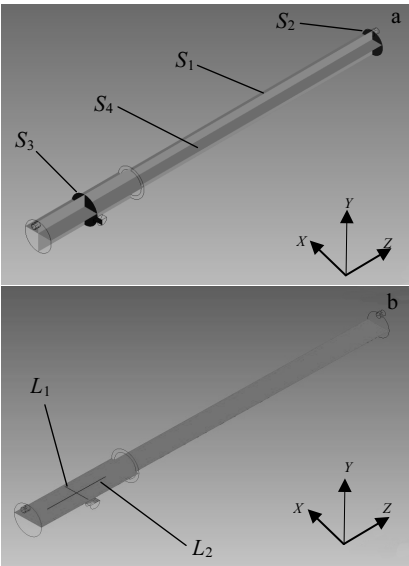


图 3 模拟结果分析部位示意图

Fig.3 Diagrams of analysis parts of simulation results:  
(a) section positions and (b) line positions

3.1 充模过程

图 4 为超细 WC/10Co 喂料充模过程的数值模拟 (截面  $S_1$ ) 与实验结果。由图可得, 超细 WC/10Co 喂料模拟填充过程基本与实际充模过程相一致, 其模拟模型具有有效性和可行性。由于粉末和粘结剂在粘度和密度上差别较大, 充模初期其熔体前段为半球状, 逐渐形成平面状, 这与喂料熔体温度逐渐下降、熔体粘度增大、充模阻力增加等因素作用下的结果相符合。注射坯实际密度为  $6.94\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 模拟结果的密度为略高于实际密度, 而且存在不均匀的密度分布, 在接近真实充模过程的同时, 更加清晰地显示出可能出现的空隙、偏析和裂纹等注射坯缺陷。因此, 双流体模型可以更加形象地展现粉末和粘结剂的特征充模过程。

3.2 温度场

图 5 为 WC/10Co 粉末和粘结剂的温度分布比较图 (截面  $S_1$ )。由图可得, 在热传导、热对流、热辐射等热作用下, 喂料在充模过程 (即从入口到出口) 中存在热损失, 具有显著的温度梯度分布。超细 WC/10Co 粉末具有较好的热传导性, 聚合物的热传导性很低, 而双流体模型中的粉末为包裹有粘结剂的拟流体,

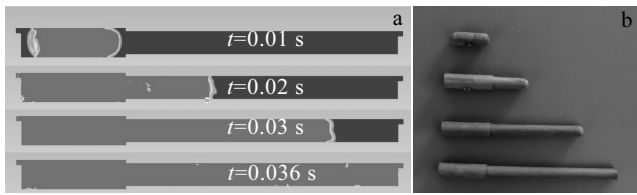


图4 超细 WC/10Co 喂料充模过程

Fig.4 Filling processes of ultra-fine WC/10Co feedstock:  
(a) numerical simulation results (on section  $S_1$ ) and  
(b) experimental samples

粉末与粘结剂之间的温度差并不显著, 因此, 可通过粉末温度分布进行喂料温度场分析。

图6为喂料熔体前沿截面  $S_2$  (Z坐标不同) 上的粉末温度分布图, 其充模时间分别为 0.01, 0.02, 0.03, 0.036 s。由图可得, 随着充模过程的进行, 熔体前沿的温度逐渐下降。充模初期 ( $t=0.01$  s), 充模熔体前沿的温度 (402~413 K) 与入口温度相近, 这是由于熔体在经过喷嘴、浇口及截面尺寸较小的流道时, 受到短时间的强烈剪切作用<sup>[28]</sup>, 由此产生的粘性耗散可以补偿损失的能量。充模后期 ( $t=0.03$  s), 其熔体前沿温度 (354~360 K) 显著下降, 此时, 熔体与模腔壁、空气及自身复杂的热作用下温度大幅下降, 粘性耗散的能量已经不足以补偿散热。当充模完成时 ( $t=0.036$  s), 熔体前沿的最高温度为 342 K, 除了模壁附近的边界层以外, 熔体流动区的温度在 333~342 K, 故此时的最低温度在 333 K 以上。而熔体的熔融组分主要是低熔点组分 (PW、SA 和 DOP), 高聚物 (PP 和 HDPE) 处于玻璃态, 故在充模过程中喂料熔体温度高于粘结剂的玻璃化温度, 流动熔体不会发生凝固, 即充模过程中熔体不考虑凝固现象。

### 3.3 粘度场

图7为超细 WC/10Co 喂料充模 0.01 s 时截面  $S_3$  上粉末和粘结剂的粘度分布图。从图可得, 充模过程

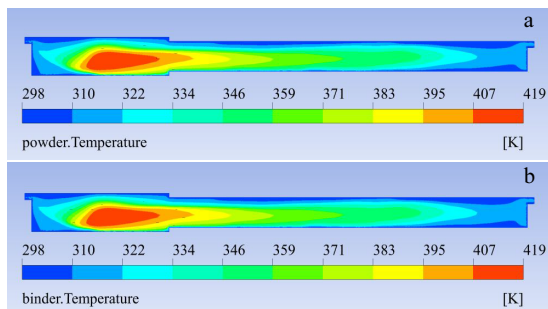
图5 温度分布比较图 (截面  $S_1$ )

Fig.5 Temperature distribution on section  $S_1$ : (a) WC/10Co powder and (b) binder

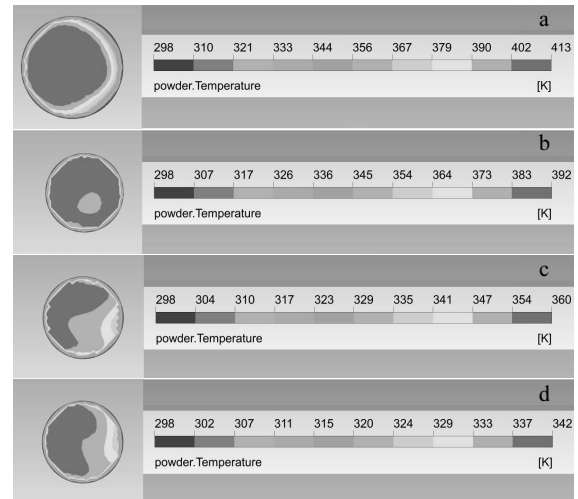


图6 喂料熔体前沿截面  $S_2$  (Z坐标不同) 的不同充模时间粉末温度分布图

Fig.6 Powder temperature distribution diagram of the front side of melting feedstock on section  $S_2$  with different Z coordinates, when the filling time is 0.01 s (a), 0.02 s (b), 0.03 s (c), and 0.036 s (d)

中粉末和粘结剂的粘度分布存在显著差别。图7b中粘结剂的粘度范围为 2.9~9.2 Pa·s, 满足成形温度下粘结剂的粘度低于 10 Pa·s 的要求<sup>[4]</sup>。图7a中粉末的粘度范围 50.0~379.4 Pa·s, 大于喂料 (粉末-粘结剂) 的粘度, 远远大于粘结剂的粘度。一方面, 粘度是流体内部摩擦力的度量<sup>[13]</sup>, 粘度越大, 流体的内摩擦力越大, 流体内部的阻力越大, 流体充模速度越慢, 即粘度差是流体充模过程中产生速度差的关键因素之一。另一方面, 超细硬质合金喂料为假塑性流体, 粘度同温度和流体受到的剪切速率紧密相关 (流体温度越高, 其粘度越低; 剪切速率越高, 其粘度越低)。因此, 粉末和粘结剂的粘度分布与充模过程的温度和剪切速率密切相关, 即温度越低、粘度越大, 剪切速率越低, 粘度越大; 而且粘结剂的速度会高于粉末速度, 粉末和粘结剂分离的趋势大, 易出现偏析现象。

### 3.4 速度场

图8为超细 WC/10Co 喂料充模 0.01 s 时截面  $S_4$  上粉末和粘结剂的速度分布图。由图可见, 粉末和粘结剂的速度分布基本相同, 这有利于超细硬质合金喂料的充模过程, 降低粉末与粘结剂的分离趋势。

图9为超细 WC/10Co 喂料充模 0.01 s 时线段  $L_1$  上粉末和粘结剂的速度分布及相对速度差 (相对速度差=(粘结剂速度-粉末速度)/粉末速度)。图10为超细 WC/10Co 喂料充模 0.01 s 时线段  $L_1$  上粉末和粘结

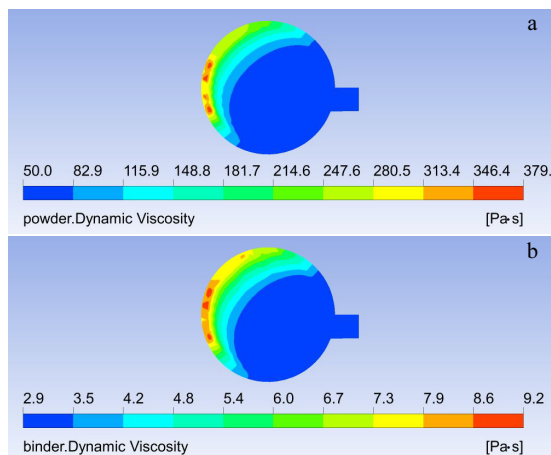


图 7 充模 0.01 s 时粉末和粘结剂的粘度分布图 (截面  $S_3$ )

Fig.7 Viscosity distribution on section  $S_3$  of WC/10Co powder (a), and binder (b) at 0.01 s during feedstock filling:

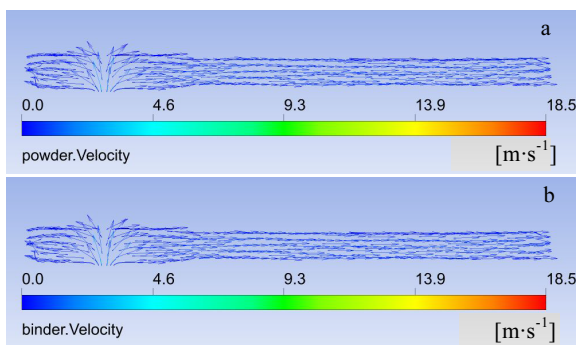


图 8 充模 0.01 s 时粉末和粘结剂的速度分布图 (截面  $S_4$ )

Fig.8 Velocity distribution on section  $S_4$  at 0.01 s during feedstock filling: (a) powder and (b) binder

剂的体积分数分布图。图 11 为超细 WC/10Co 喂料充模 0.01 s 时截面  $S_3$  上粉末和粘结剂的体积分数分布图。由图 9 可见,粉末与粘结剂的速度分布基本相似,在浇口处速度最大,随着流动距离的延长,其速度逐渐减小,粘结剂的速度要大于粉末的速度。随着熔体流动距离越长,粉末与粘结剂的速度降低,但其相对速度差却变大,使得粉末和粘结剂分离趋势越显著。由图 10 可得,从浇口处到模壁处(沿  $L_1$  方向),粉末的体积分数逐渐降低,在模壁处升高;粘结剂的体积分数逐渐升高,在模壁处降低。粉末与粘结剂的相对速度差从 0.2% 增加到 1.8% 时,粉末体积分数偏差从 0.05% 增加到 8.07%,粘结剂体积分数偏差从 0.05% 增加到 7.75%,即喂料熔体充模过程中出现了偏析现象。这与截面  $S_3$  上的体积分数分布(图 11 所示)相一致,从浇口处到模壁处(沿  $L_1$  方向),截面中心部位(包含线段  $L_1$ )的粉末体积分数呈降低趋势,而在模壁处

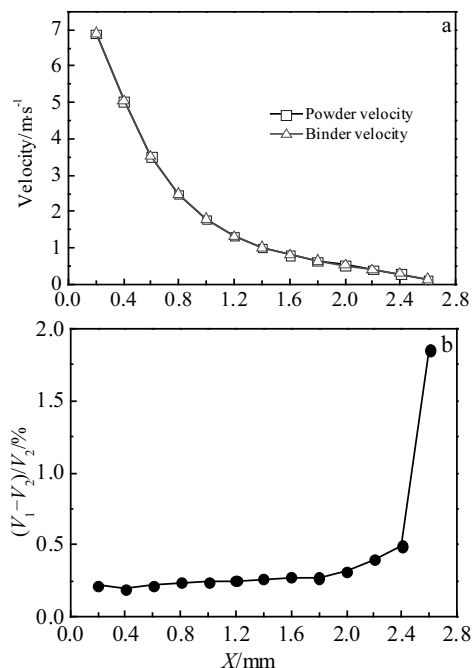


图 9 充模 0.01 s 时粉末和粘结剂的速度 (线段  $L_1$ )

Fig.9 Velocity distribution of binder and powder on line  $L_1$  at 0.01 s during feedstock filling: (a) velocity distribution and (b) relative velocity difference

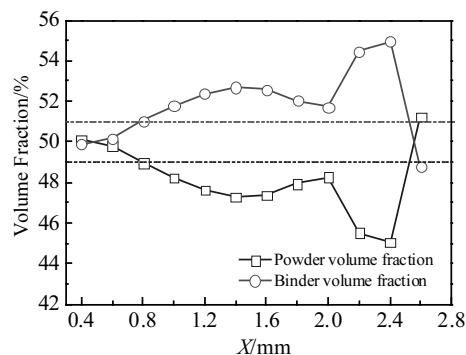


图 10 充模 0.01 s 时粉末和粘结剂的体积分数分布 (线段  $L_1$ )

Fig.10 Volume fraction distribution of powder and binder on line  $L_1$  at 0.01 s during feedstock filling

呈升高趋势,粘结剂呈相反趋势,并在模壁附近出现明显的偏析现象。这是由于速度场分布(图 8 所示)、喂料层流运动(雷诺数小)和相对速度差共同引起的。因此,相对速度差是引起粉末和粘结剂分离的主要因素。

图 12 为超细 WC/10Co 喂料充模 0.03 s 时直线  $L_2$  上粉末和粘结剂的速度和速度差分布图,其中,浇口位置为  $(X, Z) = (0, 5 \text{ mm})$ ,  $Z=0\sim 10 \text{ mm}$  处截面 1 直径为 2.8 mm,  $Z=10\sim 26 \text{ mm}$  处截面 1 直径为 2.2 mm。

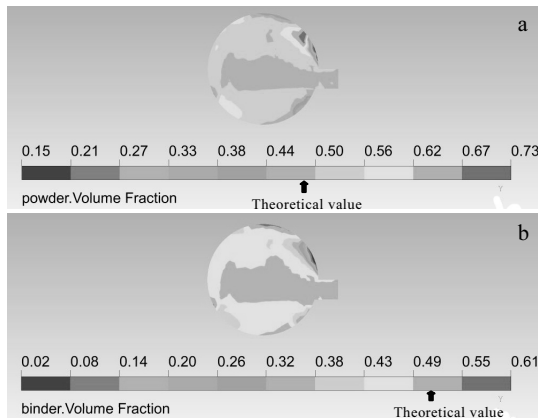


图 11 充模 0.01 s 时粉末和粘结剂的体积分数分布 (截面  $S_3$ )  
Fig.11 Volume fraction distribution of WC/10Co powder (a) and binder (b) on section  $S_3$  at 0.01 s during feedstock filling

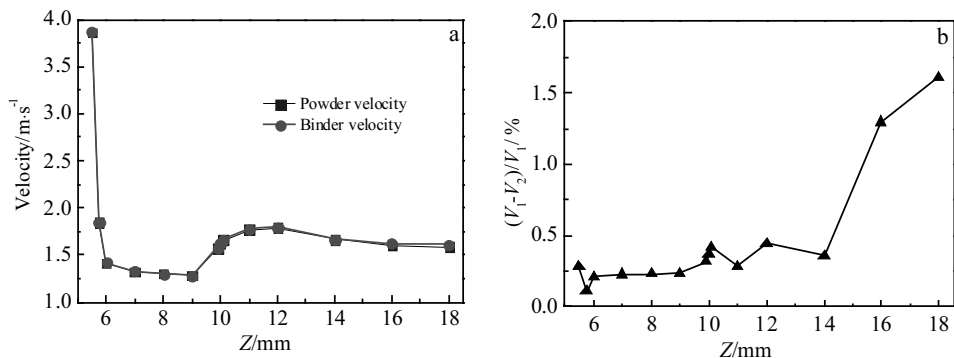


图 12 充模 0.03 s 时粉末和粘结剂的速度 (线段  $L_2$ )

Fig.12 Velocity of powder and binder on line  $L_2$  at 0.03 s during feedstock filling: (a) velocity distribution and (b) relative velocity difference

## 4 结 论

1) 采用双流体模型进行大长径比超细 WC/10Co 圆棒充模过程的数值模拟结果与实际充模过程相一致, 其假设条件和参数设置具有合理性, 该模拟模型具有可行性。

2) 超细 WC/10Co 粉末与粘结剂的温度分布基本一致, 喂料熔体温度 ( $\geq 330$  K) 高于粘结剂的玻璃化温度, 不存在凝固现象。

3) 超细 WC/10Co 粉末与粘结剂的粘度分布基本一致, 但粉末的粘度为 50.0~379.4 Pa·s, 粘结剂的粘度为 2.9~9.2 Pa·s, 粉末和粘结剂分离的趋势大。粘度差是产生偏析现象的主要原因。

4) 超细 WC/10Co 粉末与粘结剂的速度分布基本一致; 从浇口处到模壁处, 两者相对速度差从 0.2% 增加到 1.8%, 粉末体积分数偏差从 0.05% 增加到 8.07%, 粘结剂体积分数偏差从 0.05% 增加到 7.75%; 从浇口处到远端, 相对速度差从 0.1% 增大到 1.6%。相对速度差是引起偏析现象的主要原因。

图 12a 中, 粉末和粘结剂的速度分布基本相同, 2 条曲线基本重合。喂料熔体从浇口进入后, 由于能量损失, 其速度逐渐减小; 当熔体流至截面  $Z=10$  mm 后, 其速度变大, 这是由于截面面积发生改变, 根据动量守恒定律 ( $Ft=mv$ ), 单位体积的熔体质量下降, 其速度提高。图 12b 中, 喂料熔体在浇口处 ( $L_2, Z=5.75$  mm) 时, 粉末和粘结剂的相对速度差为 0.1%, 随着进一步充模, 其相对速度差变大。当流入窄截面后, 粉末和粘结剂的速度增大, 其相对速度差也随之增大; 随着流动距离的进一步增加, 其相对速度差随之增大; 在 ( $L_2, Z=18$  mm) 处, 其相对速度差达到 1.6%。故充模过程中, 熔体流动距离越长, 其粉末和粘结剂的速度越低, 其相对速度差越大, 偏析现象越严重, 相分离趋势越大。

## 参考文献 References

- [1] Liu Youliang(刘友良), Gao Jianxiang(高建祥), Qu Xuanhui(曲选辉). *Hunan Nonferrous Metals*(湖南有色金属)[J], 2007, 23(1): 31
- [2] Zhuo Haiyu(卓海宇), Gao Jianxiang(高建祥), Qu Xuanhui(曲选辉). *New Technology & New Process*(技术新工艺)[J], 2007(6): 87
- [3] Zheng Zhoushun(郑洲顺), Wang Shuang(王爽), Li Qiaojie(李俏杰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(8): 1585
- [4] Xie Xingcheng(谢兴铖), Lin Chenguang(林晨光), Jia Chengchang(贾成厂) et al. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2012, 26(23): 99
- [5] Lin D, Kang T G, Han J S et al. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*[J], 2018, 70(5): 621
- [6] Sanétnrik D, Hausnerová B, Filip P et al. *Powder Technology* [J], 2018, 325: 615
- [7] Xie Xingcheng(谢兴铖), Lin Chenguang(林晨光), Jia Cheng-

- chang(贾成厂) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(12): 3202
- [8] Xie X C, Lin C G, Jia C C *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2015, 48: 305
- [9] Gao Jianxiang(高建祥), Zhuo Haiyu(卓海宇), Gao Zeping(高泽平) *et al. Cemented Carbide*(硬质合金)[J], 2006, 23(1): 47
- [10] Xu Huaan(徐华安), Xiong Weihao(熊惟皓), Ye Dameng(叶大萌). *Materials Reports*(材料导报)[J], 2006, 20(11): 84
- [11] Zheng Zhoushun(郑洲顺), Qu Xuanhui(曲选辉). *Computer Engineering and Applications*(计算机工程与应用)[J], 2003, 39(4): 215
- [12] Liu Fei(刘 飞), Li Wenming(李文明). *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2019, 23(3): 292
- [13] Wang Yuhui(王玉会), Qu Xuanhui(曲选辉), He Xinbo(何新波) *et al. Rare Metals and Cemented Carbide*(稀有金属与硬质合金)[J], 2008, 36(2): 10
- [14] Kate K H, Enneti R K, McCabe T *et al. Ceramics International*[J], 2016, 42(1): 194
- [15] Qu Xuanhui(曲选辉), Wen Hongyu(温宏宇), Ao Hui(敖 晖) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2001(6): 33
- [16] Zheng Zhoushun(郑洲顺), Qu Xuanhui(曲选辉), Han Xuli(韩旭里) *et al. China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2002, 13(14): 1257
- [17] Iwai T, Aizawa T, Kihara J. *Powder Metallurgy World Congress-94*[C]. Paris: Taylor & Francis Group, 1994: 1097
- [18] Iwai T, Aizawa T, Kihara J. *Advances of Powder Metallurgy and Particulate Materials*[J], 1996, 5: 91
- [19] Wang Yuhui(王玉会), Qu Xuanhui(曲选辉), He Xinbo(何新波) *et al. Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2008, 32(5): 74
- [20] Wang Yuhui(王玉会), Qu Xuanhui(曲选辉), He Xinbo(何新波). *Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2008, 32(5): 74
- [21] Liu Dayou(刘大有). *Fluid Dynamics of Two-Phase System*(二相流体动力学)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 441
- [22] Li Jinghai(李静海), Ou Yangjie(欧阳洁), Gao Shiqiu(高士秋) *et al. Multi-scale Simulation of Granular Fluid Complex System*(颗粒流体复杂系统的多尺度模拟)[M]. Beijing: Science Press, 2005: 144
- [23] Shen H, Ackermann N L. *Journal of the Engineering Mechanics Division*[J], 1982, 108(5): 748
- [24] Manninen M, Taivassalo V, Kallio S. *On the Mixture Model for Multiphase Flow*[M]. Espoo: VTT Publications, 1996: 288
- [25] Kwon T H, Ahn S Y. *Powder Technology*[J], 1995, 85(1): 45
- [26] Shackelford J F, Han Y H, Kim S *et al. CRC Materials Science and Engineering Handbook*[M]. New York: CRC Press, 2016
- [27] Shah J, Nunn R E. *Powder Metallurgy International*[J], 1987, 19(6): 38
- [28] Sun Xiwei(孙秀伟), Wang Jianling(王建玲). *China Plastics*(中国塑料)[J], 2014, 28(10): 76

## Numerical Simulation of PIM Filling Process of Ultra-Fine WC-Co Round Bar with Large Aspect Ratio

Xie Xingcheng<sup>1</sup>, Cao Ruijun<sup>1</sup>, Li Zengde<sup>1</sup>, Zhou Zenglin<sup>1</sup>, Li Qing<sup>1</sup>, Li Yue<sup>2</sup>, Jia Bin<sup>2</sup>

(1. GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd, Beijing 101407, China)

(2. The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** Based on the powder-binder two-fluid model, the filling process was simulated by CFX commercial software, especially for the ultra-fine WC/10Co round bar with large aspect ratio by powder injection molding (PIM). The results indicate that the numerical simulation results are almost consistent with the experimental filling process results, which proves that the hypothesis and parameter settings are reasonable and the two-fluid model is feasible. Also there is no great difference in temperature distribution between powder and binder. There is no solidification for melting feedstock, because the lowest temperature at 330 K of melting feedstock is higher than the vitrification temperature of binder. In addition, the great difference in the viscosity between powder and binder, which is 50.0~379.4 and 2.9~9.2 Pa·s, respectively, is one reason for segregation. Finally, another main reason for segregation is the relative difference of velocity between powder and binder, which increases remarkably, for example, the velocity from gate to the die wall changes from 0.2% to 1.8%, and velocity from gate to the for end changes from 0.1% to 1.6%.

**Key words:** two-fluid model; ultra-fine WC/10Co; filling process; numerical simulation

Corresponding author: Xie Xingcheng, Ph. D., Senior Engineer, Advanced Electronic Materials Division, GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd, Beijing 101407, P. R. China, Tel: 0086-10-60662611, E-mail: xiexingcheng@grinm.com