

# 粉末注射成形过程计算机模拟研究

## Computer Simulation of Powder Injection Molding Process

曲选辉<sup>1,2</sup>, 温宏宇<sup>1</sup>, 敖 晖<sup>1</sup>, 郑州顺<sup>1</sup>

(1 中南大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;

2 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

QU Xuan-hui<sup>1,2</sup>, WEN Hong-yu<sup>1</sup>, AO Hui<sup>1</sup>, ZHENG Zhou-shun<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory for Powder Metallurgy,  
Central South University, Changsha 410083, China;

2 School of Materials Science and Engineering,  
University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**摘要:** 综述了国内外近年来在粉末注射成形计算机充模流动模拟研究方面的一些重要成果, 主要涉及粉末注射成形充模流动过程的各种模型、控制方程及其数值计算方法等。并对各自的优缺点进行了分析和比较, 在此基础上阐明了该技术的主要发展趋势和方向。

**关键词:** 粉末注射成形; 计算机模拟; 充模流动; 有限元/有限差分法

**中图分类号:** TF124.39    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381 (2001) 06-0033-04

**Abstract:** The main recent achievements in the computer simulation of powder injection molding process are reviewed, including mathematical models, controlling equations and numerical methods. Their merits and demerits are analyzed and compared. The main trends and directions in this field were proposed.

**Key words:** powder injection molding; computer simulation; flow; finited element/finited difference method.

粉末注射成形是一门正在迅速发展的新型粉末冶金近净成形技术<sup>[1]</sup>。注射成形过程是将喂料熔融体以高压注入模具型腔内, 让其冷却、凝固, 从而得到所需形状坯件的过程。喂料在熔融状态下是非牛顿流体, 其充满型腔的过程是一个非稳定的、非等温的流动过程。粉末注射成形产品的缺陷多数都是在成形过程中产生, 而且有些缺陷无法在后续脱脂和烧结过程中消除<sup>[2]</sup>。实验研究费时耗财, 而且有些参数本身无法通过实验获得。随着计算机及数值计算技术的发展, 用等数值计算方法来分析模拟注射成形过程, 求出喂料熔体的压力、温度、流动速率分布等参数的变化, 研究各工艺参数的影响规律, 进而得出最佳工艺参数组合, 这已成为粉末注射成形技术研究的一个主要领域。本文结合作者的一些相关研究结果, 对目前国内外在粉末注射成形充模流动方面的研究进展作一个简单的综述。

## 1 模型的建立

### 1.1 连续介质模型

粉末注射成形是一种源于塑料注射成形的新型粉末冶金成形技术, 国际上目前对粉末注射成形过程的模拟研究绝大部分都是沿用塑料注射成形过程的研究方法, 即基于连续介质模型, 不考虑喂料在流动过程中的内部结构变化及模壁冷凝层的影响, 并认为流动是充分发展的, 引入“润滑”近似, 将充模过程视为广义的 Hele-Shaw 流动, 使之成为一个相对简单的非线性动力学系统。该模型的基本控制方程为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} \therefore V &= \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g_i &= 0 \\ \rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P V \Delta T - \rho Q_{mass} \Delta H_b \cdot f_s + \therefore q - \\ (-\tau \cdot \therefore V) - Q &= 0 \end{aligned}$$

其中:  $V = u_1 e_1 + u_2 e_2 + u_3 e_3 = u_i e_i$   
 $e_1, e_2, e_3$  分别代表直角坐标轴 1、2、3 上的单位向量,  
 $\rho$  为密度,  $\tau$  为应力张量偏分量,  $P$  为压力,  $g_i$  为重力  
加速度分量,  $Q_{mass}$  为喂料熔体中粘结剂的重量百分数,

$q$  为导热流,  $\dot{Q}$  为单位体积熔体凝固时所释放的热量,  $-\tau \cdot \nabla V$  为粘性耗散项,  $\nabla$  为 Hamilton 算子, 式中用到了爱因斯坦求和记法。这是考虑了所有因子的三维流动的连续方程、动量方程和能量方程, 实现起来相当复杂。为了简化问题, 人们在此基础上提出几条基本假设: 忽略惯性力和重力, 忽略流动过程喂料凝固的影响和潜热, 方程可简化为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2$$

其中:  $S$  为流导率,  $\lambda$  为热传导系数,  $P$  与  $z$  无关。

Kwon 等人<sup>[4]</sup>认为充模过程中喂料与模壁之间有一层厚度为粉末粒径数量级的纯粘结剂。并提出了滑动速度理论和滑动边界层理论。

对于滑动速度模型, 如图 1 所示。

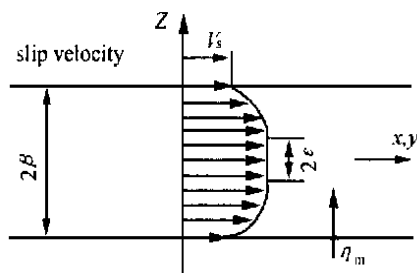


图 1 滑动速度模型

Fig. 1 Slip velocity model

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial P}{\partial x} \right) - b u_s + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial P}{\partial y} - b v_s \right) = 0$$

其中:

$$S = \int_z^b \frac{z^2}{\eta_m} dz$$

对滑动边界层模型, 如图 2 所示。

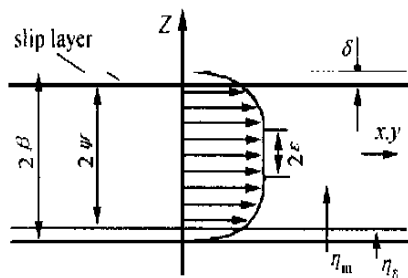


图 2 滑动边界层模型

Fig. 2 Slip layer model

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0$$

其中:

$$S = \int_z^b \frac{z^2}{\eta_m} dz + \int_\psi^b \frac{z^2}{\eta_m} dz$$

在此基础上, 他们利用有限元法编制出了一个专门的粉末注射成形过程的计算机模拟软件 PIM-FLOW。

这种模型的优点是: 容易实现有限元或有限差分等计算方法, 对宏观力学参数可进行直接计算。但同时也存在一些不足之处, 如: 不能考察喂料内部的结构变化, 无法预测密度分布以及粉末和粘结剂体系的分离现象等。

## 1.2 颗粒模型

由于 PIM 喂料中包含大量的固相粒子, 不仅其流变行为与塑料存在很大差异, 其热物性参数也相差很大, 使 PIM 喂料中的压力梯度、温度梯度远大于塑料熔体, 而且由于 PIM 喂料的热传导系数较大, 熔体在充模流动过程中容易在模壁上形成“凝固层”, 从而使流动截面发生变化, 使整个非线性动力学系统变得更加复杂。尽管传统的分析方法能给出一些有用的信息, 但无法预测粉末注射成形特有的粉末密度分布和两相分离现象, 更不能说明注射成形过程中缺陷产生的不确定性机理。Iwai 等人<sup>[5,6]</sup>提出了基于粉末—粘结剂协同作用的颗粒模型。在该模型中, 首先将实际形状的粉末颗粒转换成等效的球形颗粒, 每个颗粒周围包覆着一层粘结剂, 这层粘结剂随着颗粒一起运动。因此, 每个单元实际上由一个“硬核”(粉末颗粒)和外面的“软壳”(粘结剂)组成。如图 3 所示。

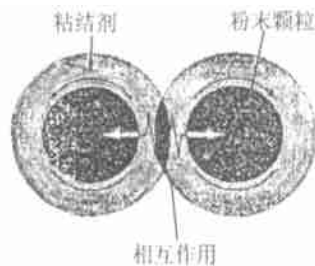


图 3 颗粒模型

Fig. 3 Granular model

其基本控制方程组为<sup>[5]</sup>:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F^b + F^c + m_i g$$

$$F_n^b = \sum_j \bar{Q}_{ij} [\eta_l (y - v)_n G + K_g (R_i + R_j) (u_i - u_j)_n]$$

$$F_t^b = \sum_j \bar{Q}_{ij} \{ \eta [(\dot{\gamma} - \dot{\gamma})_t \epsilon + R_i \theta] \}$$

$$F_n^c = \sum_j \bar{Q}_{ij} [K_{ij} (u_j - u_i)_n + C_n (\dot{\gamma} - \dot{\gamma})_n]$$

$$F_t^c = \sum_j \bar{Q}_{ij} \{ [K_{ij} (u_j - u_i)_t + (R_i \dot{\theta} + R_j \dot{\theta})] \}$$

$$\max F_t^b = \mu^b F_n^b$$

其中:  $F_t^b$ 、 $F_t^c$  和  $\max F_t^b$  分别表示颗粒—粘结剂作用力、颗粒—颗粒作用力和边界摩擦力,  $n$  和  $t$  分别表示垂直方向和切向,  $m_i$ 、 $R_i$ 、 $v_i$ 、 $u_i$  和  $\theta$  分别是第  $i$  个单元的质量、半径、速度、位移和转角,  $\eta$ 、 $K_g$  和  $K$  分别是斯托克斯系数、总体刚度和局部刚度,  $\bar{Q}_{ij}$  为坐标转换基,  $\epsilon$  为粘性系数。由于这种模型直接将粉末颗粒作为一个单元, 可以直接考察粉末特性(粒度、粒径分布、密度、形状等)对流动过程的影响。从而可以监视流动过程中粉末的变化、聚集状态, 以预测密度分布情况和两相分离现象等, 而且颗粒模型很容易引申至三维问题的分析。但在实际计算中, 由于要处理大量的粉末颗粒, 很容易导致计算过程的发散。由于粉末注射成形过程是一个非常复杂的非线性系统, 分形和混沌理论的应用将有利于对该过程的深刻理解。颗粒模型可以更加精确的反映粉末注射成形喂料状态, 是实现模拟实用化的关键。但该模型目前尚在理论研究阶段, 运用于实践中还不成熟。

## 2 数值计算方法

目前求解动量运输方程(或压力控制方程)与能量方程的常用方法为有限差分法(FDM), 有限元法(FEM)和有限元/有限差分混合法(FEM/FDM)。

### 2.1 有限差分法

将偏微分方程利用泰勒级数展开为一个函数, 根据已知边界条件求出初始值, 按照一定的差分格式, 利用迭代的方式, 求解方程直到相邻两次解的差值达到规定小量。由于该方法为逐点近似, 用离散的网格节点上的值来近似表达连续函数, 一般不能保证解的光滑性, 故难以处理不规则的几何形状和复杂的边界条件问题。

乐红胜<sup>[7]</sup>应用有限差分法模拟了粉末注射成形中喂料熔体的一维、二维充模流动过程, 研究表明喂料熔体的充模过程与传统聚合物相比有其自身的特殊性, 成形工艺参数的设定有较大的差异; 温度场的变化是充模过程的主控因素, 当注射速率较小、模温较低和模腔尺寸较大时, 模内温度场不均匀性增大、模壁凝固层变厚和喂料粘度升高, 充模过程就可能严重受阻; 可通过提高注射速率和模具温度或在喂料中

添加少量表面活性剂改善粉末与粘结剂的润湿性和相互作用力, 提高喂料熔体的流动性, 减小两相分离的可能性。

Wang 等人<sup>[8]</sup>在研究粉末注射成形的充模流动模拟方面就采用了有限差分法来求解动量方程和能量方程, 并采用VOF法来跟踪流动前沿的发展, 得到一系列很有价值的模拟结果。如流动前沿位置、速度场、压力场、温度场的分布、剪切率和剪切应力等, 并预测了焊接线和内部孔洞的形成位置。这种计算方法运算速度快且较稳定, 与实验结果能较好的吻合。但由于它仅局限于规则的差分网格, 只反应了节点的作用, 对把节点联结起来的单元的本身特性不予计算。有限差分法是点近似, 计算结果不是很精确, 且不能动态模拟注射成形过程, 大多数研究者的目光转向工程范围应用极广的有限元法。

### 2.2 有限元法

应用极广泛的数值计算方法, 几乎能处理所有连续介质的偏微分方程问题。该方法将区域离散为若干单元, 单元之间由节点相互连接, 节点参数是基本未知数, 在每个单元内用节点来确定一组近似函数, 将每个节点的近似函数集合起来就形成一个泛函表达式, 对该泛函取驻值并满足边界条件即可得到一组方程, 求解此方程组即可得到相应的近似解。有限元法是分段(片、块)近似, 在单元内近似解是连续解析的, 在单元间近似解也是连续的; 有限元法得到的是一个充分光滑的近似解, 在单元内导数存在, 在单元之间的边界上解满足所谓兼容性条件; 对于求解区域的单元剖分有限元法没有特别的限制, 剖分灵活, 特别适于处理具有复杂边界的实际问题。

Kwon 等人<sup>[9,10]</sup>在基于有限元法的基础上开发了一个用于粉末注射成形充模过程的三维CAE系统—PIMFLOW软件, 采用满足Babuska-Brezzi条件的全三维多变量有限单元。假设喂料为等温、非牛顿、不可压缩流体, 在充模过程中的每一个时间步长内是准稳态的。该软件问世后, 在实际生产中起到了很好的指导作用。但在计算这种有限单元时, 中间区域的节点速度是合理的, 而边节点和角节点的速度却不合理。随着充模流动的进行, 代表流动前沿外形的角节点的增加将导致异常节点的增加, 从而恶化数值结果。

### 2.3 有限元/有限差分混合法(FEM/FDM)

计算任意平面几何形状型腔充模流动的主要困难在于确定熔体流动前沿位置和时间  $t$  之间的函数关系, 在给定型腔的几何形状、流动条件、材料的热学性质和粘性系数时, 通常采用FEM/FDM进行处理, 即用有限元法求解压力场, 用有限差分法求解温度

场。此法采用有限单元描述平面中的几何形状,而有限差分网格描述温度、速度、粘度、剪应变率等沿厚度方面的变化<sup>[11]</sup>。

Najmi 等人<sup>[3]</sup>用有限元/有限差分混合法分析了非等温条件下,不同的粉末—粘结剂在二维矩形形腔的注射成形充模过程中的行为,用有限元法计算压力场来描述流动前沿的推进过程,用有限差分法求解能量方程来确定温度场的分布。在这种方法中,在平面方向上采用有限元网格划分型腔,而在厚度方向和时间方向上则采用有限差分法分析,充分发挥有限元和有限差分的优势。计算了PIM 喂料熔体在二维薄板模腔内的流动行为,主要工艺参数、喂料流变参数、热物性参数及浇口位置对流动行为的影响。

毛金英<sup>[12]</sup>应用此法编制出了比较完整的二维矩形板充模流动模拟软件,该软件由头文件、喂料物性参数、模腔边界条件信息、有限元网格信息、充模流动及菜单等六个模块组成,可以方便地得出网格信息及模腔内压力场、温度场、剪切速率场等信息。

### 3 结论与展望

粉末注射成形计算机模拟目前所基于的数学模型在很大程度上进行了简化,忽略一些重要参数的影响,模拟结果与实验有一定偏差。比如在充模流动过程中,模壁温度的变化对喂料熔体的粘度影响显著,熔体的流动性能会发生很大变化,另外喂料内部的结构变化、两相分离现象和凝固层的产生对充模过程都有很明显的影 响。所以,发展更加符合实际状态的颗粒模型和相应的计算方法,对于深入研究粉末注射成形过程、开发商用模拟软件有很大的意义。

#### 参考文献

- [1] German R M. Powder Injection Molding [C]. Metal Powder Industries Federation. Princeton, New Jersey, 1990: 7.
- [2] 曲选辉, 颜寒松, 李益民等. MIM 粘结剂中聚合物性质的估算 [J], 材料工程, 1997, (7): 11-13, 32.
- [3] Najima L A. Simulation of Mold Filling for Powder Injection Molding Processes [J]. Advances in Powder Metallurgy, 1990, 3: 299-311.
- [4] Kwon T H. Finite Element Analysis of PIM Filling Process with Slip Characterization of Powder-Binder Mixtures [J]. Powder Metallurgy, 1997, 40 (3): 174-176.
- [5] Iwai T, Aizawa T and Kihara J. Three Dimensional Granular Modeling for Metal Injection Molding [C]. In: PM'94, Proceedings of 1994 Powder Metallurgy World Congress, 2: 1097-1100.
- [6] Iwai T, Aizawa T and Kihara J. Powder-Binder Flow Simulation in Powder Injection Molding [J]. Advances in Powder Metallurgy & Particular Materials, 1996, 5 (19): 91-103.

- [7] 乐红胜. 粉末注射成形充模流动及冷却凝固过程计算机模拟 [D]. 长沙: 中南工业大学硕士论文, 1997.
- [8] Wang C M, Leonard R L, Posteraro R A and McCabe. A Finite-Difference Computing Model for 3-D Simulation of the Powder Injection Molding Process [C]. In: Powder Injection Molding Symposium, Edited by Booker P H, Gaspervich J and German R M, Metal Powder Industries Federation. Princeton, New Jersey, 1992: 435-449.
- [9] Kwon T H and Ahn S Y. Characterization of Slip of Powder/Binder Mixtures and Its Effects in PIM Filling Process Analysis [C]. In: PM'94, Proceedings of 1994 Powder Metallurgy World Congress, 2: 1093-1096.
- [10] Kwon T H, Hwang C J and Rhee J H. Numerical Simulation of Powder Injection Molding Filling Process for Three-Dimensional Complicated Cavity Geometries [J]. Advances in Powder Metallurgy & Particular Materials, 1996, 5 (19): 79-90.
- [11] Hieber C A. A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection Molding Filling Process [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1980, 7: 1-32.
- [12] 毛金英. 粉末注射成形二维充模流动计算机模拟 [D], 长沙: 中南工业大学硕士论文, 1999.

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (编号: 50025412), 国家 973 计划 (编号: G2000067203) 和教育部博士点基金的资助。

收稿日期: 2000-12-21; 修订日期: 2001-02-04

作者简介: 曲选辉 (1960-), 男, 长江学者奖励计划特聘教授, 博士生导师, 主要从事粉末冶金新技术和新材料的研究。联系地址: 北京科技大学材料科学与工程学院 (100083)。

本文编辑: 孙常青

## 耐腐蚀、易加工的铝铜合金

最近, 瑞士 UMS 金属制造有限公司研制出了耐腐蚀、容易机械加工的铝铜合金族。该合金族特别耐工业废水、海水、轻度酸性或碱性盐溶液、稀酸及腐蚀气氛。

该合金族铝的含量在 6% 到 11% 之间, 在某些合金中含有少量的 Ni、Fe、Mn 和 Pb。例如, 一种合金的成分为 Cu, 8-11Al, 1-2Pb 及最大量为 0.5 的 Mn 和 Fe。这种合金是一种含有细小铅颗粒弥散相的复相结构。该合金具有很高的耐腐蚀性、耐磨损性以及很好的冲压、轧制和机械加工性能。其扁平轧材的拉伸强度为 550MPa, 延伸率达 15%。

另一种合金添加有镍和铁以形成强度高, 耐腐蚀性、抗氧化性、耐疲劳性、耐磨损性好的综合性能。该合金热加工性能好, 在适度高温条件下能保持其强度。该合金的成分是 Cu, 8.5-9.5Al, 3-4Fe, 4-6Ni, 1-2Mn, 1-2Pb。其拉伸强度为 650MPa, 延伸率为 8%。

铝铜合金族的用途包括: 高压配件、发动机零部件、耐火花工具、机器构件、压紧螺母、滚柱轴承、齿轮零件及通用船舶零件。

(张胜玉)