数值模拟射砂过程不同曳力模型应用对比

郭小琦¹,李伟峰²,廖敦明¹,陈宇豪¹,杨 铭¹

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室,湖北武汉 430074;2. 浙江红马铸造有限公司,浙江平湖 314200)

摘要:基于计算颗粒流体力学(CPFD)商业化软件Barracuda,分别使用EMMS模型、Ergun 模型和WenYu-Ergun曳力模型模拟了射砂过程。将模拟结果和高速摄像机拍摄的砂粒流态进 行对比,EMMS曳力模型的预测结果更为准确。直观分析了颗粒体积分数对三种模型曳力值 的影响。同时对三种不同模型预测的颗粒速度、颗粒体积分数、曳力值、滑移速度进行了对 比研究。结果表明,EMMS曳力模型由于考虑了颗粒团聚效应的影响,能够更加准确地模拟 射砂过程。

关键词: 曳力模型; 射砂工艺; 数值模拟; 气固两相流

射砂工艺是生产砂芯最普遍的方法,采用射砂工艺生产的砂芯质量受众多因素 的影响:覆膜砂的性质(密度、粒径、形状等)、模具设计(排气孔、射砂孔、流 道形状等)、工艺参数(射砂压力、次数、时间等)。传统的试错法会造成时间和 财力的大量浪费,而采用数值模拟手段可以节省时间、降低成本^[1]。

近些年来,双流体模型大量应用于流化床的数值模拟中,也有一些学者采用该 方法对射砂过程进行了数值模拟。崔怡等^[2]利用双流体模型来研究射砂过程,将砂粒 和气体都假设为连续相,实验结果和模拟结果相比,芯盒的填充状态、砂粒的流动 情况非常接近,射砂孔处的压力变化趋势总体上相似。倪长江等^[3-4]采用双流体模型 研究了排气槽的分布、湍流、砂粒密度、砂粒直径、粘接剂含量对砂芯充填过程的 影响。计算结果、压力曲线均和实验结果吻合很好,结果表明排气槽的分布对不同 区域压力差有着直接影响。但是,该方法存在一定的局限性。双流体模型无法对颗 粒类型和粒径分布进行建模,因为每个粒径和类型都必须求解单独的连续性和动量 方程。而实验表明,颗粒直径会显著影响射砂的充型过程。

计算颗粒流体力学(CPFD)理论模型是欧拉-拉格朗日模型的一种,可以对具 有各种颗粒类型、尺寸、形状和速度的流动状况进行分析。该方法将位于特定位置 的具有相同密度、体积和速度的颗粒打包为计算粒子,因此可以使用数百万个计算 粒子来分析包含数十亿个颗粒的大型颗粒流系统,计算效率较高。张影等^[5]基于计算 颗粒流体力学对射砂过程进行了数值模拟,结果表明,芯盒内砂粒的流动过程与实 验数据吻合较好,该方法能够有效模拟射砂过程。

气固曳力表示两相之间发生的动量交换,曳力模型的选取直接决定着模拟结果的准确性。单个颗粒上的曳力可以很容易地计算出来,但是密集系统中颗粒的曳力 依赖于颗粒体积分数和颗粒雷诺数,这种依赖性很复杂。目前,针对曳力模型的研 究主要集中在流化床的数值模拟上^[6-7],且众多曳力模型中,Ergun、WenYu-Ergun、 EMMS三种模型的应用较为广泛^[8-9],认可度更高。但不同曳力模型对射砂过程气固 两相流动的影响的研究还鲜有报道。

本研究使用商业化软件Barracuda内置的Ergun、WenYu-Ergun、EMMS三种曳力模型对简单模具的射砂充型过程进行数值模拟,通过高速摄像机拍摄砂粒流态,

作者简介: 郭小琦(1997-),男,硕 士生,研究方向为射砂 工艺颗粒流动场数值模 拟。E-mail:937952742@ qq.com 通讯作者: 廖 敦 明,男,教 授, 博 士 生 导 师。电 话: 18071121688,E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

中图分类号:TG242.7 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2020) 11-1221-07

基金项目:

广东省重点领域研发计划 项目(2019B090921001), 华合方实验室基金(由陕 西方直贸易有限公司资 助)。 收稿日期: 2020-04-27收到初稿, 2020-07-09收到修订稿。 将模拟结果和试验结果对比,研究三种曳力模型对射 砂过程的影响。并对比分析了三种模型计算的颗粒速 度、颗粒体积分数、曳力值、滑移速度。

1 数学模型

1.1 控制方程

气相一般被当作连续介质处理,可用N-S方程求 解。气体的连续性方程(1)和动量守恒方程(2)分 别为:

$$\frac{\partial(\theta_{\rm f}\rho_{\rm f})}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_{\rm f}\rho_{\rm f}v_{\rm f}) = 0 \qquad (1)$$

式中: $v_{\rm f}$ 、 $\rho_{\rm f}$ 、 $\theta_{\rm f}$ 分别表示气体的速度、密度和体积分数。

$$\frac{\partial(\theta_{\rm f}v_{\rm f})}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_{\rm f}v_{\rm f}v_{\rm f}) = -\frac{1}{\rho_{\rm f}}\nabla P - \frac{1}{\rho_{\rm f}}F + \theta_{\rm f}g + \frac{1}{\rho_{\rm f}}\nabla \cdot \tau \quad (2)$$

式中: *P*是气体压力; *r* 是宏观气体应力张量; *g*是重力加速度; *F*是气体和颗粒相之间每单位体积的动量交换速率。

$$F = \iiint f v_p \rho_p \left[\beta(v_f - v_p) - \frac{1}{\rho_p} \nabla P \right] d\Omega_p d\rho dv_p \quad (3)$$

式中:f为颗粒的概率函数; v_p 为颗粒速度; ρ_p 为颗粒 密度; β 为曳力系数; Ω_p 为颗粒体积。

颗粒相加速度和颗粒位移:

$$\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = D_{\mathrm{p}}(v_{\mathrm{f}} - v_{\mathrm{p}}) - \frac{1}{\rho_{\mathrm{p}}} \nabla P - \frac{1}{\theta_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{p}}} \nabla \tau_{\mathrm{p}} + g + F_{S} \qquad (4)$$

$$\frac{\mathrm{d}x_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = v_{\mathrm{p}} \tag{5}$$

式中: τ_p 是颗粒法向应力,且:

$$\tau_{\rm p} = \frac{P_{\rm s} \theta_{\rm p}^{\prime\prime}}{\max\left[\left(\theta_{\rm cp} - \theta_{\rm p}\right), \varepsilon(1 - \theta_{\rm p})\right]} \tag{6}$$

式中:常数 P_s 为材料参数, P_a ; β 为模型自有参数,值 为2~5^[10]; θ_{cp} 、 θ_p 分别代表颗粒紧密堆积颗粒体积分 数和当前状态堆积颗粒体积分数; ε 是量级为10⁻⁸的一 个很小的数,用于防止在计算正应力时出现无穷大的 现象。

1.2 曳力模型

作用在颗粒上的曳力:

 $F_{p}=m_{p}D(v_{f}-v_{p})$ (7) 式中: m_{p} 是颗粒质量;D是曳力方程; v_{f} 、 v_{p} 分别是气体速度和颗粒速度。

Wen-Yu模型^[11]基于单个颗粒的标准曳力函数,引入与颗粒体积分数有关的修正因子对流化系统中的曳力模型进行修正,并考虑了相邻粒子的影响:

$$D_{\rm I} = \frac{3}{8} C_{\rm d} \frac{\rho_{\rm f} (v_{\rm f} - v_{\rm p})}{r_{\rm p} \rho_{\rm p}} \tag{8}$$

式中: C_{d} 为阻力系数,是雷诺数Re和气体体积分数 θ_{f} 的函数。

$$C_{\rm d} = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687})\theta_{\rm f}^{-2.65} & Re \leq 1 \ 000 \\ 0.44\theta_{\rm f}^{-2.65} & Re > 1 \ 000 \end{cases} \tag{9}$$

Ergun曳力模型^[12]结合固定床压降实验,通过管内 流动阻力的计算公式得出,适合稠密颗粒流动。其曳 力方程定义如下:

$$D_2 = 0.5 \left(\frac{180\theta_{\rm p}}{\theta_{\rm f} Re} + 2 \right) \frac{\rho_{\rm f} |v_{\rm f} - v_{\rm p}|}{r_{\rm p} \rho_{\rm p}} \tag{10}$$

$$Re = \frac{2\rho_{\rm f}r_{\rm p} |v_{\rm f} - v_{\rm p}|}{\mu_{\rm f}}$$
(11)

WenYu-Ergun曳力模型^[13]结合Wen-Yu模型和Ergun 模型,颗粒体积分数较低时使用Wen-Yu模型,颗粒体 积分数较高时使用Ergun模型,公式定义如下:

$$D = \begin{cases} D_{1} & \theta_{p} < 0.75\theta_{cp} \\ (D_{2} - D_{1}) \left(\frac{\theta_{p} - 0.75\theta_{cp}}{0.85\theta_{cp} - 0.75\theta_{cp}} \right) + D_{1} & 0.75\theta_{cp} \ge \theta_{p} \ge 0.85\theta_{cp} \\ D_{1} & \theta_{p} > 0.75\theta_{cp} \end{cases}$$
(12)

式中: D₁是Wen-Yu曳力方程; D₂是Ergun曳力方程。

EMMS电力模型^[14]考虑了颗粒流的非均质性,即 颗粒集群和团簇的形成,公式定义如下:

$$D = \frac{9}{2} \frac{\mu_{\rm f}}{\rho_{\rm p} r_{\rm p}^2} f_{\rm e}$$
 (13)

不同模型的曳力值主要取决于颗粒雷诺数和颗粒 体积分数。本研究侧重于研究颗粒体积分数对曳力的 影响,因此将*Re*=100时的曳力函数图形展示出来,如 图1a所示。EMMS曳力模型考虑到在 θ_p=0.1左右时颗 粒会形成团簇,气体绕开团簇流动,而不是穿过颗粒 聚集区域,因此气固曳力下降^[15],在此区间曳力值最 小。当颗粒体积分数最大时,EMMS曳力模型取得最 大值,并且都随着颗粒体积分数的增加而增大。

为了进一步比较四种曳力模型,以Wen-Yu模型为标准,将四个曳力模型统一:

$$\beta_x = \frac{F_{\rm P_x}}{F_{\rm PWenYu}} \tag{14}$$

式中: *F*_{PWenYu}表示WenYu模型的曳力, *F*_{Px}分别代指其他3个模型的曳力。结果如图1b, Ergun曳力模型在低颗粒体积分数区域曳力值最大,约为Wen-Yu模型的2.5倍。EMMS模型在中间部分发生突变,最大值约为Wen-Yu模型的2倍。尽管曳力模型的函数图形是有帮助

的,但只能通过数值模拟研究其对颗粒流动预测的影 响。

2 试验和模拟设置

2.1 试验装置和边界条件

使用的装置由三部分组成:射砂筒、射砂孔、芯 盒。射砂筒高度200 mm,射砂孔直径为10 mm,芯盒 尺寸如图2所示。射砂过程开始时,高压气体快速进 入射砂筒,通过射砂孔将砂粒射入芯盒,同时,芯盒 内的空气从排气孔逸出,最后,砂粒填满芯盒并被紧 实。入口压力边界条件如图3所示,0~0.1 s为增压阶 段,0.1 s后压力维持在0.3 MPa,持续到射砂过程结 束。排气孔处为大气压,颗粒无法通过排气孔射出。 模拟使用的其他相关参数见表1。

2.2 网格无关性验证

为了排除网格大小对计算结果的影响,采用粗 (5 mm×5 mm×5 mm)、中(4 mm×4 mm×4 mm)、 细(3 mm×3 mm×3 mm)三种不同尺寸的三维网格 对射砂过程进行数值模拟。图4是三种网格0.3 s时芯盒 内的颗粒体积分数,粗网格和中、细尺寸的网格有较 大区别,在射砂孔下方未能形成砂粒流束,且在芯盒 右下方出现了较大空隙区域。图5是三种不同网格颗粒 射入芯盒内的质量流率和总质量随时间的变化关系。 0.1 s时,由于入口压力达到最大值,3 mm和4 mm网格 预测的质量流率也相应达到最大,约为0.58 kg/s。而 5 mm网格在0.2 s达到最大值,约为0.8 kg/s。同样,在 总质量随时间的变化关系中,粗网格也表现出较大的 差异。为了保证计算的准确性,接下来的模拟均采用 细网格。





表1 数值模拟使用的物性参数 Table 1 Physical parameters used in numerical simulation

砂粒密度/ (kg・m ⁻³)	空气密度/ (kg・m ⁻³)	砂粒平均直径/μm	颗粒紧实体积分数	
2 650	1.225	129	0.62	

3 结果与分析

3.1 三种模型模拟结果和试验结果对比

三种曳力模型模拟的射砂过程和试验结果的对比 如图6所示。显然在总体趋势上,三种不同曳力模型的模 拟结果和高速相机拍摄的试验结果较为接近。t=0.05 s 时,砂粒在高压气体作用下呈发散状垂直射入模具, 流动前沿较宽,呈倒梯形,三种曳力模型的模拟结果 和试验结果一致,但是EMMS曳力模型预测的中间区 域砂粒体积分数较高。当砂粒接触到模具底部时,由 于左侧壁面的阻碍,会形成三角形堆积区域,三种曳 力模型均能预测此现象。随后砂粒向右侧继续充填, 在此过程中,左侧三角形区域逐渐增大,由于气流的 作用,在模具底部形成凹槽,只有EMMS曳力模型较 好地体现该特征(t=0.2 s)。和左侧类似,芯盒右下方 也会形成三角形堆积,但因充填顺序的不同,右侧三 角形堆积区域比左侧堆积区域小,当芯盒下方充填完 成后(t=0.55 s),砂粒在气流作用下克服重力向右上 方填充,直至结束(t=0.85 s)。在t=0.05 s时,高速气 流射向右侧带动砂粒会形成圆弧状凹槽,三个曳力模型 的预测结果均未体现该现象,可能原因是CPFD方法具 有一定的局限性,无法单独依靠曳力模型解决此问题。

图7是射砂孔下方颗粒速度和芯盒竖直方向压力差

随时间的变化关系。由于0.5 s以后颗粒速度和压力差 值趋于稳定。因此,只展示两者0~0.5 s之间的变化情 况。在增压阶段三个曳力模型预测的颗粒速度有两个 极大值,0~0.1 s颗粒速度随着压力的增加而增大,此 阶段射砂孔处砂粒主要在后方砂粒的推动以及重力作 用下运动,0.1 s时,压力差达到第一个极大值,颗粒 速度也达到极大值。射砂孔穿孔后,气流直接作用在 颗粒上,此时压力差和砂粒速度达到第二个极大值, 并逐渐降低,射砂过程趋于稳定。EMMS模型较低的 压力差也导致颗粒速度的两个波峰并不明显。由于 EMMS模型考虑到颗粒的团簇效应导致曳力的降低, 所以计算的颗粒速度更低,并且该颗粒速度值和倪长 江等^[16]的研究结果更为接近。

3.2 曳力值和颗粒速度的对比与分析

为了进一步深入研究曳力模型对射砂过程的影 响,取0.1 s时芯盒左侧竖直截面(图8a)为研究对象。 图8b是颗粒体积分数和芯盒高度之间的关系,在芯盒 底端(*h*=0.04 m以下),颗粒体积分数急剧增加,并 在最底部达到紧实,颗粒体积分数为0.62。EMMS模型 预测的颗粒体积分数高于其他两种模型。根据EMMS 模型的曳力方程, *θ*_p=0.26是方程的间断点,在0.26以





前EMMS模型的曳力值低于其他两种模型,0.26以后 EMMS模型的曳力值急剧增大,高于WenYu-Ergun模 型和Ergun模型。这一特征和图8c中曳力值的预测结果 完全一致。因此颗粒速度在h>0.03 m时,WenYu-Ergun 模型和Ergun模型的预测值高于EMMS模型的预测值, h<0.03 m时EMMS模型的预测值更大。

值得注意的是,底端颗粒所受到的曳力虽然更大,但是颗粒的运动速度却接近0。这是因为在较低颗粒体积分数区域,颗粒与周围颗粒之间是瞬时的接触和碰撞,曳力占据主导地位;而在高体积分数区域,

颗粒与周围颗粒之间变为持续性的接触,主导力是颗 粒所受到的摩擦力^[14]。因此在紧实区域,曳力的重要 性将会降低。

3.3 对滑移速度的影响

滑移速度是描述气固混合、气固接触以及颗粒停 留时间分布等的重要参数^[17]。因此研究气固滑移速度 能够更直观地了解气固之间的相对运动。EMMS模型 考虑了颗粒的团聚效应,而团聚物是形成高滑移速度 的直接原因^[18]。



图6 模拟的颗粒体积分数和试验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulated particle volume fraction and experimental results



Fig. 7 Variations of particle velocity and pressure difference at nozzle with time

1226 有造 FOUNDRY 工艺技术

图9a是射砂孔下方一点的颗粒体积分数和滑移 速度随时间的变化关系,三个曳力模型对于颗粒体积 分数的预测较为接近,在0.1 s时出现峰值。但是对于 滑移速度的预测,EMMS模型则表现出较大的差异, 其变化趋势和颗粒体积分数的变化趋势完全一致,在 0.1 s时滑移速度达到峰值,约为45 m/s。而Ergun模型 和WenYu-Ergun模型预测的滑移速度和颗粒体积分数没 有十分吻合的关系,并且峰值远远小于EMMS模型预 测的峰值。这是因为颗粒浓度的增加,团聚物尺寸变 大,所以高颗粒体积分数区域滑移速度增加。取0.1 s时 芯盒左侧三种曳力模型的滑移速度作为研究对象,如 图9b。EMMS模型预测的滑移速度比其他两种模型的 预测结果更大,进一步证明上述结论。并且在从芯盒 顶端到底部逐渐减小,这是颗粒速度增加,气体速度 减小,颗粒得到气体的动量转让产生的结果。



图8 芯盒左侧竖直方向位置示意图(a)、颗粒体积分数对比(b)颗粒曳力对比(c)和颗粒速度对比(d) Fig. 8 Schematic diagram of vertical position of left side of core box



Fig. 9 Relationship of particle slip velocity with time (a) and difference in vertical direction (b)

4 结论

使用计算颗粒流体力学理论,结合3种不同的曳力模型(EMMS曳力模型、Ergun和WenYu-Ergun曳力模型)模拟了射砂过程,进行网格无关性验证。将模拟的砂粒流态和试验拍摄的砂粒流态进行对比,分析了三种模型的颗粒 速度、曳力大小、颗粒体积分数以及滑移速度。得到的结论如下:

(1)三种模型预测的砂粒流态总体上和试验结果相接近,但EMMS曳力模型能更准确地预测出左下角的凹形 区域;射砂孔处颗粒速度的变化与压力差的变化趋势(ΔP)一致,EMMS模型计算的颗粒速度更为准确,Ergun和 WenYu-Ergun曳力模型均高估了颗粒速度。

(2) EMMS模型预测的曳力值在低颗粒体积分数区域低于Ergun和WenYu-Ergun模型,在高颗粒体积分数区域远远大于Ergun和WenYu-Ergun模型。但是在高颗粒体积分数区域,作用在颗粒上的主导力是摩擦力。

(3) EMMS模型考虑了颗粒的团聚效应,所以滑移速度的变化和颗粒体积分数的变化趋势一致,并且滑移速度的计算值也大于Ergun和WenYu-Ergun曳力模型。

参考文献:

- [1] BAKHTIYAROV S I, OVERFELT R A. CFD modeling and experimental study of resin-bonded sand/air two-phase flow in sand coremaking process [J]. Powder Technology, 2003, 133 (1): 68–78.
- [2] 崔怡,李文珍,吴浚郊.射砂过程的数值模拟 [J].特种铸造及有色合金,2001 (2):34-36.
- [3] NI Changjiang, LU Gaochun, ZHANG Qingdong, et al. Influence of core box vents distribution on flow dynamics of core shooting process based on experiment and numerical simulation [J]. China Foundry, 2016, 13 (1) : 22–29.
- [4] NI Changjiang, LU Gaochun, JING Tao, et al. Influence of core sand properties on flow dynamics of core shooting process based on experiment and multiphase simulation [J]. China Foundry, 2017, 14 (2): 121–127.
- [5] 张影,廖敦明,曹流,等.基于计算颗粒流体力学的射砂过程数值模拟[J].铸造技术,2018,39(12):122-126.
- [6] 李麟,薄泽民,陆梁,等.曳力模型对流态化两相流动数值计算影响的研究 [J].节能技术, 2018, 36 (5): 54-57.
- [7] LI Fei, SONG Feifei, BENYAHIA S, et al. MP-PIC simulation of CFB riser with EMMS-based drag model [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 82: 104–113.
- [8] WU Y, LIU D, MA J, et al. Effects of gas-solid drag model on Eulerian-Eulerian CFD simulation of coal combustion in a circulating fluidized bed [J]. Powder Technology, 2018: 48–61.
- [9] MARCHELLI F, HOU Q, BOSIO B, et al. Comparison of different drag models in CFD-DEM simulations of spouted beds [J]. Powder Technology, 2020: 1253–1270.
- [10] LI Debao, FAN Jianren, LUO Kun, et al. Direct numerical simulation of a particle-laden low Reynolds number turbulent round jet [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37 (6): 539–554.
- [11] WEN C Y, YU Y H. Mechanics of fluidization [C]. Chemical Engineering Progress Symposium Series. 1966, 62 (62): 100-111.
- [12] BEETATRA R, VANDERHOEF M A, KUIPERS J A M. Drag force of intermediate Reynolds number flow past mono- and bidisperse arrays of spheres [J]. Aiche Journal, 2007, 53 (2): 489–501.
- [13] GIDASPOW D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions [M]. Academic press, 1994.
- [14] YANG Ning, WANG Wei, GE Wei, et al. Simulation of heterogeneous structure in a circulating fluidized-bed riser by combining the twofluid model with the EMMS approach [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43 (18) : 5548–5561.
- [15] GUNN D J, MALIK A A. The structure of fluidized beds in particulate fluidization [C]//Proceedings of the International Symposium on Fluidization. Netherlands University Press: Eindhoven, The Netherlands, 1967: 52–65.
- [16] NI Changjiang, GUO Enyu, ZHANG Qingdong, et al. Frictional-kinetic modeling and numerical simulation of core shooting process [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2016, 29 (4): 214–221.
- [17] 漆小波. 循环流化床提升管气固两相流动力学研究 [D]. 四川大学, 2003.
- [18] 李松庚,林伟刚,姚建中.提升管中气固相的局部滑移速度 [J].化工学报,2003,54 (1):119-123.

Application Comparison of Different Drag Models in Numerical Simulation of Core Shooting Process

GUO Xiao-qi¹, LI Wei-feng², LIAO Dun-ming¹, CHEN Yu-hao¹, YANG Ming¹

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Zhejiang Hongma Casting Co., Ltd., Pinghu 314200, Zhejiang, China)

Abstract:

Based on the commercialized software Barracuda of Computational Particle Hydro dynamics (CPFD), the core shooting process was simulated by using the EMMS model, the Ergun model and the WenYu-Ergun drag model, respectively. Comparing the sand flow behavior simulated by the three models with the sand flow behavior captured by high-speed cameras, it was found that the prediction results of the EMMS drag model are more accurate. The effect of particle volume fraction on the drag force values of the three models is visually analyzed. The particle velocity, particle volume fraction, drag force value, and slip velocity predicted by the three different drag models are compared. The results show that the EMMS drag model can more accurately simulate the core shooting process due to taking into account the effect of particle agglomeration.

Key words:

drag models; core shooting process; numerical simulation; gas-solid two-phase flow