

钻探浆液渗透过程中混合非解析 CFD-DEM 耦合框架开发与验证

杜浩颐, 蹇黎明*, 王 胜, 张健松, 许嘉伟, 谢 杰

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 常规非解析 CFD-DEM 方法受限于网格尺寸与颗粒直径限制, 难以应用于大尺度宽粒径岩土介质的高效模拟。为此, 本文开展了混合非解析 CFD-DEM 耦合方法二次开发。该方法以流体网格尺寸与颗粒直径之比作为自动判别准则, 对于比值 >3 的细颗粒以采样点法进行体积分数映射和颗粒-流体动量交换; 而对于比值 ≤ 3 的粗颗粒, 则引入高斯核函数进行体积分数平滑映射, 并对颗粒诱导的流体动量源项进行扩展分配。进一步地, 针对颗粒靠近壁面时核函数拓展域被流体边界截断导致的映射误差, 采用基于网格体积加权的归一化修正, 以保证边界附近映射满足守恒要求。基于所开发程序, 设计了体积分数守恒验证、单颗粒沉降速度验证和球形颗粒柱 Ergun 压降验证, 以此评价混合非解析 CFD-DEM 耦合框架在宽粒径模型应用中的可靠性。结果表明, 该方法可兼顾宽粒径颗粒体系模拟中的计算效率与耦合稳定性, 为土石混合体注浆渗透、细颗粒迁移及颗粒柱渗流等问题提供可行的数值模拟方法。

关键词: 宽粒径颗粒体系; CFD-DEM; 非解析方法; 钻探浆液; 流固耦合; 数值模拟

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0112-08

Development and validation of a hybrid unresolved CFD-DEM coupling framework for drilling slurry penetration

DU Haoyi, JIAN Liming*, WANG Sheng, ZHANG Jiansong, XU Jiawei, XIE Jie

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: Conventional unresolved CFD-DEM methods are limited by the constraint between grid size and particle diameter, making it difficult to efficiently simulate large-scale geomaterials with a wide particle size distribution. To address this issue, this paper presents the secondary development of a mixed unresolved CFD-DEM coupling framework. In this method, the ratio of fluid grid size to particle diameter serves as an automatic criterion. For fine particles with a ratio greater than 3, a sampling-point method is employed for volume fraction mapping and particle-fluid momentum exchange; whereas for coarse particles with a ratio less than 3, a Gaussian kernel function is introduced for smoothed volume fraction mapping, and the particle-induced fluid momentum source term is distributed over an extended region. Furthermore, to correct the mapping error caused by truncation of the kernel function's extended domain at fluid boundaries when particles approach walls, a normalization correction based on grid-volume weighting is adopted to ensure conservation near boundaries. Based on the developed program, three verification tests, namely, volume fraction conservation, single-particle settling velocity, and Ergun pressure drop in a spherical particle column are designed to evaluate the reliability of the mixed unresolved CFD-DEM coupling framework in applications involving wide particle

收稿日期: 2026-06-27; 修回日期: 2026-07-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.012

基金项目: 珠峰科学研究计划项目(编号: 80000-2025ZF11411)

第一作者: 杜浩颐, 男, 汉族, 2004年生, 硕士研究生, 土木水利专业, 研究方向为岩土工程, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 3334074601@qq.com。

通信作者: 蹇黎明, 男, 汉族, 1996年生, 特聘研究员, 地质工程专业, 博士, 主要从事钻掘工程方面的教学与科研工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, jianlm@cdut.edu.cn。

引用格式: 杜浩颐, 蹇黎明, 王胜, 等. 钻探浆液渗透过程中混合非解析 CFD-DEM 耦合框架开发与验证[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 112-119.
DU Haoyi, JIAN Liming, WANG Sheng, et al. Development and validation of a hybrid unresolved CFD-DEM coupling framework for drilling slurry penetration[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 112-119.

size distributions. The results demonstrate that the proposed method can balance computational efficiency and coupling stability in simulations of polydisperse particle systems, providing a feasible numerical approach for problems such as grouting permeation in soil-rock mixtures, fine particle migration, and seepage through particle columns.

Key words: polydisperse particle system; CFD-DEM; unresolved method; drilling slurry; fluid-solid coupling; numerical simulation

0 引言

在钻探工程实践中,水泥或钻井液等护壁堵漏浆液进入破碎岩土介质后,其运移过程受到颗粒骨架结构、孔喉尺寸、浆液颗粒尺度以及流固相互作用的控制^[1-2]。然而浆液中固相颗粒在孔喉处发生滞留、桥接和堵塞过程具有明显的颗粒尺度效应和局部非均质特征,单纯依靠宏观渗透试验或经验公式难以揭示其内部流固耦合机制。因此,有必要借助颗粒尺度数值模拟方法,对岩土介质中的浆液流动、颗粒迁移和孔隙堵塞过程进行细观分析。

近年来,计算流体力学与离散元方法耦合的CFD-DEM技术逐渐成为研究颗粒介质流固耦合作用的重要工具。该方法能够同时求解流体相运动和离散颗粒迁移,并通过颗粒-流体相互作用力实现两相信息交换^[3],因而适用于研究渗流、颗粒过滤和孔隙堵塞等问题。其中,非解析法更是以其计算成本优势,在钻井液和水泥注浆的细观机理研究中得到广泛应用。Zhang等^[4]较早将CFD-DEM方法用于泥浆渗透与滤饼形成过程模拟,分析了注入压力、颗粒间摩擦系数和内聚能密度等因素对泥浆迁移、颗粒滞留及泥膜发育的影响。Yin等^[5]进一步从颗粒尺度效应出发,指出泥浆颗粒与地层颗粒之间的粒径比以及泥浆颗粒间黏聚作用,是控制泥膜形成能力和压降发展的关键因素。Lin等^[6]则从孔隙尺度揭示了颗粒堵塞的空间演化规律,认为堵塞过程通常由局部孔喉滞留逐步扩展为整体渗流通道受阻。Doan等^[7]针对黏性细颗粒在颗粒柱中的堵塞行为指出,颗粒间黏结力会诱发团聚体反复形成和破碎,进而导致孔隙通道不断重构,是引起内部流动不稳定和堵塞加速的重要细观机制。

然而,常规非解析CFD-DEM方法的关键假设是流体网格尺寸应明显大于颗粒尺寸^[8]。通常,只有当流体网格尺寸与颗粒直径之比 >3 时,采用颗粒质心法或采样点法可较稳定地计算固相体积分数和流体体积分数。然而,在面临宽粒径颗粒体系时,固定的流体网格往往无法同时满足所有颗粒的

尺度要求。若为了保证大颗粒满足非解析方法的网格尺度条件而显著加粗网格,则无法准确描述孔隙流场变化;反之,若为了保证流体域计算精度而采用较细网格,则粗颗粒可能接近甚至超过网格尺寸,导致颗粒体积集中映射到少数网格中,引起局部体积分数尖峰、动量源项局部化和数值振荡^[6,9]。针对上述问题,已有研究提出了改进非解析或半解析处理策略,例如通过统计核函数将粗颗粒体积分布至周围网格,或者通过源项扩展方法将颗粒诱导动量源项分配到一定影响域内^[10-12]。这些方法能够在一定程度上缓解粗颗粒与网格尺寸不匹配引起的局部变量突变,提高宽粒径体系模拟稳定性。但是,如果将这些修正过程应用于模型中的所有颗粒,程序需要对每一个颗粒执行邻域搜索、权重计算和网格循环。尤其是浆液中存在大量细颗粒时,这种全颗粒修正会带来极高的计算成本。

可见,宽粒径颗粒体系CFD-DEM耦合的核心矛盾在于,粗颗粒需要改进非解析法处理以保证耦合稳定性,而大量细颗粒不需要也不适合执行复杂修正。为此,本文提出开展混合非解析CFD-DEM方法二次开发,设计了一种选择性修正策略。该策略以流体网格特征尺寸与颗粒等效直径之比作为判别准则,对满足常规非解析法要求的颗粒以采样点法求解体积分数,对不满足要求的粗颗粒,则采用高斯核函数进行体积分数平滑修正,并对颗粒诱导动量源项进行扩展分配。为检验所开发方法的合理性,本文进一步设计体积分数守恒验证、单颗粒沉降速度验证和球形颗粒柱Ergun压降验证,分别评价二次开发方法的体积映射守恒性、颗粒-流体相互作用力计算可靠性以及多颗粒渗透柱宏观渗流阻力预测能力。

1 常规非解析CFD-DEM方法及其局限

1.1 基本控制方程

在非解析CFD-DEM框架中,流体相在欧拉网格上求解,通常采用含孔隙率项的连续方程和动量

方程描述,见式(1)、(2)。流体体积分数不仅影响流场控制方程中的有效流通面积,也直接参与颗粒阻力模型和源项计算,因此是两相耦合中的核心变量。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_f \rho_f) + \nabla \cdot (\epsilon_f \rho_f u_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_f \rho_f u_f) + \nabla \cdot (\epsilon_f \rho_f u_f u_f) = -\nabla p + \epsilon_f \nabla \cdot \tau_f + \epsilon_f \rho_f g - f_{pf} \quad (2)$$

式中: ϵ_f ——流体体积分数; p ——压力; ρ_f ——流体密度; u_f ——流体速度; τ_f ——流体剪切应力张量; g ——重力加速度; f_{pf} ——粒子与流体相互作用的动量源项。

颗粒相在拉格朗日框架下逐个跟踪,每个颗粒的平动和转动分别满足牛顿第二定律,所受作用力包括颗粒间接触力、壁面接触力、重力以及流体作用力。控制方程如下:

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} M_{ij} \quad (3)$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{pf,i} + \sum_{j=i}^{k_i} (f_{c,ij} + f_{d,ij}) + m_i g \quad (4)$$

式中: v_i ——颗粒 i 的平移速度; ω_i ——颗粒 i 的角速度; k_i ——相互作用的粒子数; $f_{pf,i}$ ——颗粒-流体相互作用力; m_i ——颗粒 i 的质量; $f_{c,ij}$ ——弹性力; $f_{d,ij}$ ——阻尼力; M_{ij} ——粒子 j 或壁面作用在粒子 i 上的力矩; I_i ——粒子 i 的转动惯量。

颗粒-流体相互作用力包括曳力、浮力、黏性力、压力梯度力以及虚拟质量力。其中,曳力和浮力主导相间动量交换。因此,本研究仅考虑曳力和浮力作为颗粒-流体相互作用力,如式(5)、(6)所示:

$$f_{fp} = F_{d,i} + F_{b,i} \quad (5)$$

$$f_d = 0.5 C_d \rho_f A |u_{p-f}^{\text{rel}}| u_{p-f}^{\text{rel}} \quad (6)$$

式中: A ——颗粒投影面积; u_{p-f}^{rel} ——流体与颗粒的相对速度; ρ_f ——流体密度; C_d ——曳力系数,选用Ergun-Wen-Yu组合模型。

1.2 体积分数映射限制

体积分数映射是非解析CFD-DEM方法中连接颗粒相和流体相的基础步骤。常规采样点法通过在颗粒内部布置一定数量的采样点,将每个采样点所在网格视为颗粒体积贡献区域(如图1所示),从而计算各流体网格内固相体积分数。当网格尺寸明显大于颗粒尺寸时,采样点分布能够较好反映

颗粒体积在网格中的占据情况。

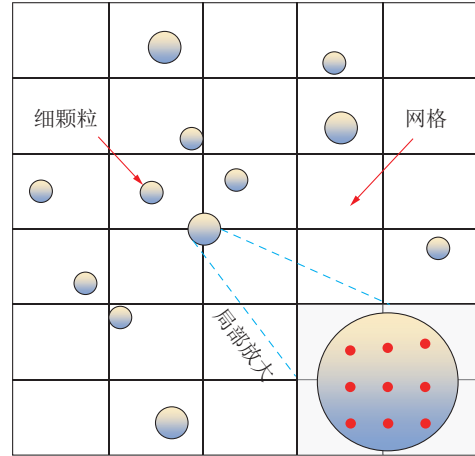
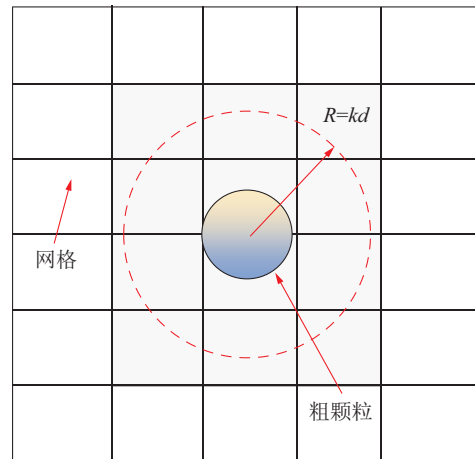


图1 采样点法分配体积分数

但是,当颗粒直径接近或大于流体网格尺寸时,常规采样点法容易产生较大的体积分数映射误差。一方面,有限数量的采样点难以准确反映粗颗粒对周围网格的实际占据范围;另一方面,若颗粒体积集中分配到少数网格,可能导致局部固相体积分数过高,进而影响孔隙率、阻力模型参数和流体动量方程源项的计算。因此,对于宽粒径体系中的粗颗粒,其体积不宜简单映射至单一网格,而应在一定空间作用域内进行平滑分配。统计核函数方法以颗粒中心为核函数中心,根据邻域网格与颗粒中心的距离分配颗粒体积,使固相体积分数在空间上连续过渡(如图2所示)。



R ——扩散半径; d ——颗粒直径; k ——比例系数

图2 扩散半径法分配体积分数

1.3 动量源项局部化问题

在常规非解析CFD-DEM方法中,颗粒作用力会以源项形式反馈给流体网格。通常,程序将颗粒诱导的动量源项直接施加到颗粒所在网格。当颗粒尺寸远小于网格尺寸时,这种处理能够近似表示颗粒对所在控制体流体的动量交换。然而,当颗粒尺寸与网格尺寸相当甚至大于网格尺寸时,将使整个颗粒源项集中于单一网格,从而会带来局部速度、压力和孔隙率的强烈波动,尤其在高固相浓度区域可能引起计算发散。更合理的做法是将粗颗粒诱导的动量源项分配到颗粒周围一定影响域内,使其与颗粒实际影响范围相一致。与体积分数修正类似,动量源项扩展分配也应包括影响域确定、邻域网格搜索以及权重函数定义。

2 混合非解析CFD-DEM方法二次开发

2.1 二次开发总体框架

本文程序在耦合模块中首先根据颗粒体积反算其等效球形直径,并计算流体网格特征尺寸与颗粒直径之比。当该比值 >3 时,认为颗粒满足常规非解析CFD-DEM方法的网格尺度要求,采用采样点法进行体积分数映射,并将颗粒-流体动量源项施加到颗粒所在网格。当该比值 ≤ 3 时,颗粒被识别为粗颗粒,程序则启用改进型非解析法(图3)。因此,混合处理的优势在于选择性,尤其是在宽粒径颗粒体系中,为满足耦合计算需求,常规方法多采用高斯核函数修正体积分数和动量源项。但此类系统中细颗粒含量通常远大于粗颗粒含量,若对所有颗粒均执行邻域搜索、权重计算和网格循环,将导致计算成本难以控制。因此本文仅对违反网格尺度条件的粗颗粒执行复杂修正,而对数量庞大的细颗粒沿用成熟的常规非解析处理方式,从程序结构上减少了不必要的网格循环操作。

2.2 粗颗粒高斯核体积分数修正

对于粗颗粒,本文采用基于高斯核函数的体积分数平滑分配方法。程序以颗粒 i 中心为作用域中心,设定搜索半径 R_s ,通常不小于3倍颗粒直径^[13],并遍历流体域中网格中心位于该半径内的所有邻域网格。对于任一邻域网格 j ,根据其网格中心与颗粒中心之间的距离计算高斯核函数权重体积:

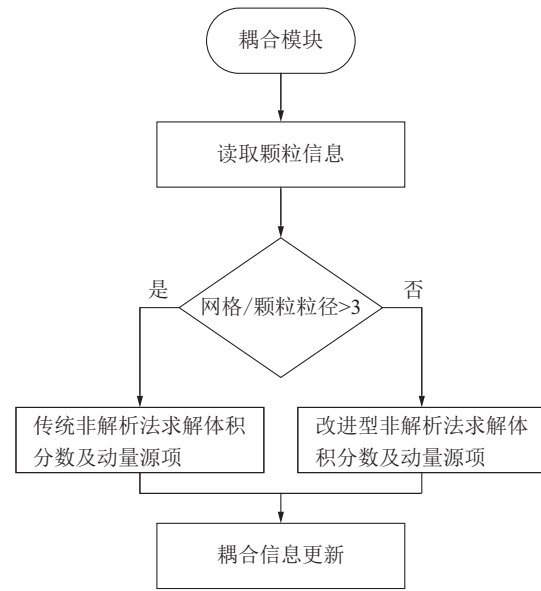


图3 二次开发总体框架

$$W_{i,j} = h(x_j - x_i) V_j = \frac{1}{(b^2 \pi)^{3/2}} \exp \left[- \frac{(x_j - x_i)^T (x_j - x_i)}{b^2} \right] V_j \quad (7)$$

式中: x_j ——网格 j 的空间坐标; x_i ——颗粒 i 的中心坐标; V_j ——网格 j 的体积; b ——高斯核带宽参数,取值 $< R_s/2.5^{[10]}$;T——向量转置符号。

若直接将高斯分布函数作为体积分配权重,在连续无限空间中可近似满足归一化条件;但是在离散网格和有限计算域中,尤其是颗粒靠近壁面时,该条件并不严格成立。这是因为,虽然高斯核函数在全空间的理论积分为1(参考图2),但在实际数值计算中,只能以颗粒为中心、在有限搜索半径内对网格进行求和,而且当颗粒靠近壁面时,部分影响区域会落在计算域之外,导致所有网格的高斯核加权体积之和 <1 (图4)。

由图2、图4可知,直接应用高斯分布函数进行颗粒体积分配,会在流体域边界处产生严重误差,理论上该值可高达30%。为避免这一不足,本文在程序中引入网格体积加权归一化方法。具体而言,程序首先计算影响域内所有邻域网格的离散归一化因子:

$$\phi_{i,j} = \frac{h(x_j - x_i) V_j}{\sum_{k \in \Omega_i} h(x_k - x_i) V_k} \quad (8)$$

式中: Ω_i ——颗粒 i 的作用域; V_k ——作用域内网格

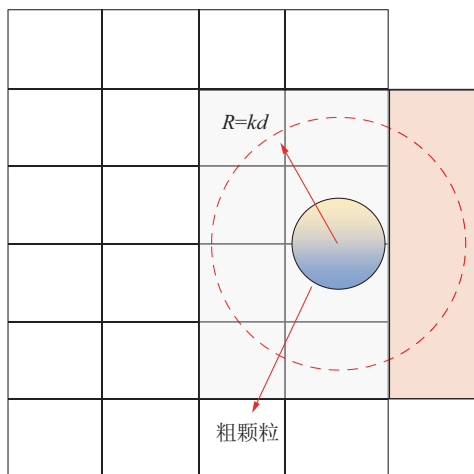


图4 边界截断效应

的体积。

如此一来,即使颗粒位于流体域边界,其作用域也会被严格限制在计算域之内(图5),也就意味着 $\phi_{i,j}$ 之和必然为1。基于此,可将颗粒 i 体积分配至网格 j 的固相体积分数并按式(9)定义,而单个网格 j 上分配得到的多个颗粒总体积分数则以式(10)计算:

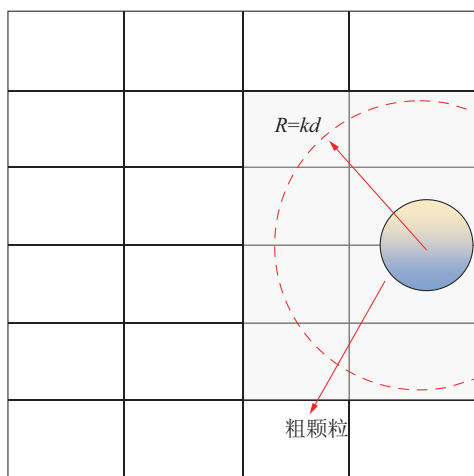


图5 归一化后映射方式

$$\epsilon_{i,j} = \frac{V_i \cdot \phi_{i,j}}{V_j} \quad (9)$$

$$\epsilon_j = \sum_{i=1}^{N_p} \frac{V_i \cdot \phi_{i,j}}{V_j} = \sum_{i=1}^{N_p} V_i \cdot \frac{h(x_j - x_i)}{\sum_{k \in \Omega_i} h(x_j - x_i) V_k} \quad (10)$$

式中: $\epsilon_{i,j}$ ——颗粒 i 在网格 j 上的体积分数; ϵ_j ——网格 j 上的固相体积分数; N_p ——网格 j 上的颗粒总数。

2.3 粗颗粒动量源项扩展分配

对于粗颗粒,程序以颗粒坐标为中心建立影响作用域,并搜索该区域内所有流体网格。源项分配权重由网格内固相体积分数和网格体积共同决定,且同样引入归一化思想进行计算,为此分配系数可确定如式(11)所示,而单个颗粒的源项分配结果则如式(12)所示。

$$w_{j,i} = \frac{\epsilon_i V_j}{\sum_{j=1}^{N_i} (\epsilon_i V_j)} \quad (11)$$

$$S_{q,correct} = \sum_{i=1}^{N_p} \frac{w_{j,i} f_{pf}}{V_j} \quad (12)$$

式中: $w_{j,i}$ ——动量源项归一化分配系数; $S_{q,correct}$ ——多个颗粒分配给网格 j 的动量源项。

2.4 边界截断条件下的归一化必要性

为验证归一化修正的必要性,本文还原了图2、图4两种计算案例,并对每一案例分别采用归一化或不归一化的开发程序进行求解。出于定量分析的目的,重点计算了映射体积分数误差,具体结果如表1所示。

表1 边界截断条件下体积分数归一化修正对比方案

工况	颗粒位置	是否归一化	评价指标	评价结果/%
1	流体域中心	否	映射体积误差	1.1
2	流体域中心	是	映射体积误差	1.63×10^{-13}
3	靠近壁面	否	映射体积误差	28.8
4	靠近壁面	是	映射体积误差	1.87×10^{-13}

由表1可知,在未归一化案例中,颗粒处于流体域中心时,体积分数误差为1.1%,尚在可接受范围内,但当颗粒靠近壁面时,这一误差瞬间可高达28.8%,出现了明显的体积分数损失。而在归一化案例中,无论颗粒位于流体域中心还是靠近壁面,这一误差均极小,分别为 $1.63 \times 10^{-13}\%$ 和 $1.87 \times 10^{-13}\%$ 。可见采用归一化修正后,壁面颗粒的体积分数映射误差显著降低,说明该修正能够有效改善边界附近颗粒体积分数的守恒性,避免了边界截断效应带来的映射误差。

3 混合非解析 CFD-DEM 合理性验证

3.1 体积分数算法验证

体积分数算法验证的目的在于检验开发程序

能否自动为不同粒径的颗粒分配适宜的体积分数算法,以及能否将DEM模块中多个颗粒的真实体积准确映射至CFD模块中的流体网格。验证模型如图6所示,模型中随机生成10个粒径不一的球形颗粒,5个颗粒满足网格尺寸/颗粒粒径 >3 的条件,5个则不满足该限制,从而确保混合非解析CFD-DEM框架中的传统非解析法与改进型非解析法均能参与计算。开启耦合计算后统计每个颗粒所分配到的体积分数算法如表2所示。

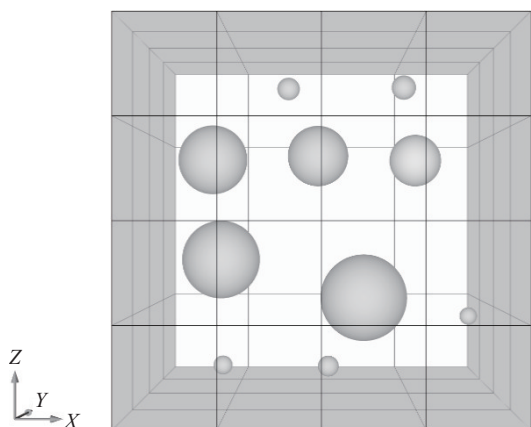


图6 体积分数验证模型

表2 程序分配体积分数算法统计

编号	粒径/mm	网格/粒径	程序自动分配到 的体积分数算法	分配是 否正确
1	1.0	5.00	传统非解析法	是
2	1.1	4.55	传统非解析法	是
3	1.2	4.17	传统非解析法	是
4	1.3	3.85	传统非解析法	是
5	1.4	3.57	传统非解析法	是
6	3.0	1.67	改进型非解析法	是
7	3.5	1.43	改进型非解析法	是
8	4.0	1.25	改进型非解析法	是
9	4.5	1.11	改进型非解析法	是
10	5.0	1.00	改进型非解析法	是

由表2可知,二次开发程序可依据网格尺寸与颗粒粒径比值正确分配解析算法,当该值 >3 时,无需对颗粒体积在影响域上进行拓展,宜采用传统非解析法进行求解;但该值 ≤ 3 时,宜采用改进型非解析法进行求解。统计发现,程序对不同颗粒可做出正确决策,算法分配完全正确,并且对于多颗粒的计算案例,映射体积误差依旧保持在 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ 的

极低水平,与2.4节单颗粒计算结果高度一致,因此本文提出的混合非解析CFD-DEM耦合框架在体积分数映射上完全合理。

3.2 颗粒沉降速度验证

本节采用单颗粒沉降速度验证用于评价颗粒-流体作用力计算的合理性,验证模型如图7所示,设置为充满静止流体的 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 竖直矩形计算域,网格尺寸为 3 mm ,在域内释放 $1 \sim 9\text{ mm}$ 不同直径的球形颗粒,使其在重力、浮力和曳力共同作用下沉降。当颗粒速度达到稳定后,提取其终端沉降速度,并与Concha提出的经验公式^[14]计算值进行对比,如图8所示。

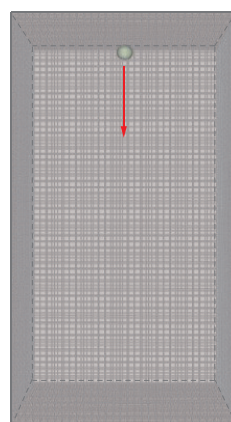


图7 沉降速度验证模型

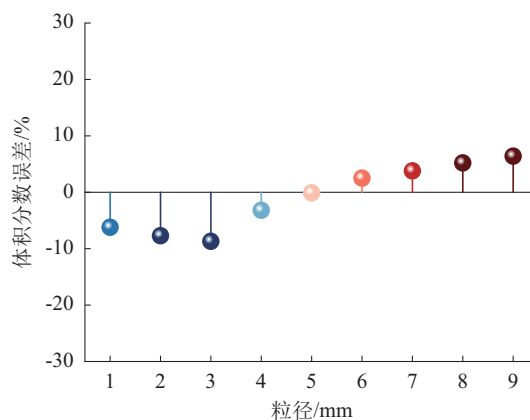


图8 沉降速度验证结果统计

颗粒稳定沉降速度是颗粒受力平衡后的宏观结果,其计算精度同时受局部体积分数映射和颗粒-流体动量源项分配的影响。若体积分数计算不准确,会导致局部流体体积分数和阻力模型参数失真;若动量源项分配不合理,则会影响颗粒周围流

场及颗粒所受流体作用力。在图8的计算结果中,随着颗粒粒径由1 mm增加至9 mm,颗粒粒径与网格尺寸之比由0.33增加至3.00。混合非解析CFD-DEM模拟得到的稳定沉降速度与Concha理论解均较为接近,二者绝对误差控制在10%以内,模拟沉降速度与理论解吻合程度较高,说明本文方法在不同颗粒尺度条件下足以合理地描述体积分数分布和颗粒-流体动量交换过程,从而保证颗粒-流体相互作用力计算的可靠性。

3.3 球形颗粒柱 Ergun 压降验证

为评价混合非解析CFD-DEM方法对多颗粒渗透柱宏观渗流阻力的预测能力,设计模型如图9所示,同样采用长方体流体域,在其中生成等直径球形颗粒并沉积形成颗粒柱。由于混合非解析CFD-DEM框架中传统非解析法的合理性已在诸多研究中得以证实,因此本节仅对改进型非解析法进行重点关注,为此控制网格/粒径为1,顶部边界条件设置为压力入口。通过改变压力大小分别为100、200、300、400以及500 kPa,并待流场稳定后计算单位长度压降,提取5组模型出口表观流速,并将模拟结果与Ergun公式(式13)^[15]对比。模拟结果如图10所示。

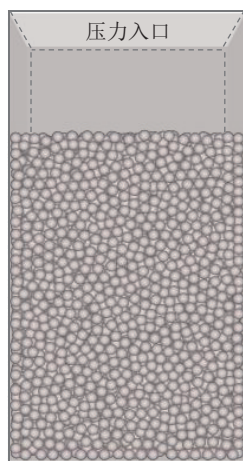


图9 Ergun压降验证模型

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu_f u_s}{d_p^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_f u_s^2}{d_p} \quad (13)$$

式中: $\Delta P/\Delta L$ ——压降梯度; ϵ ——孔隙率; d_p ——颗粒直径; μ_f ——流体动力黏度; u_s ——表观流速。

由图10(a)可知距模型出口越远,孔隙率越大,最大可达100%,这是因为在模型设计时,距离

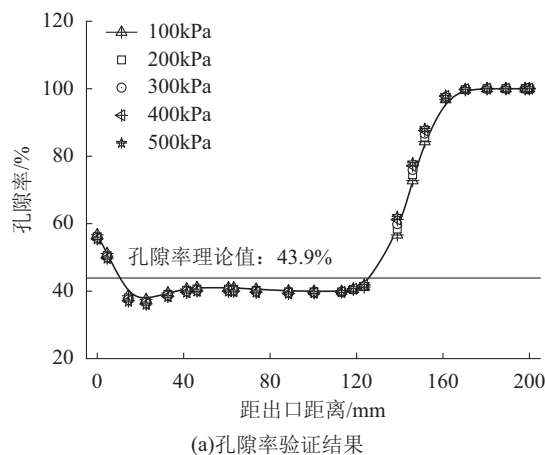
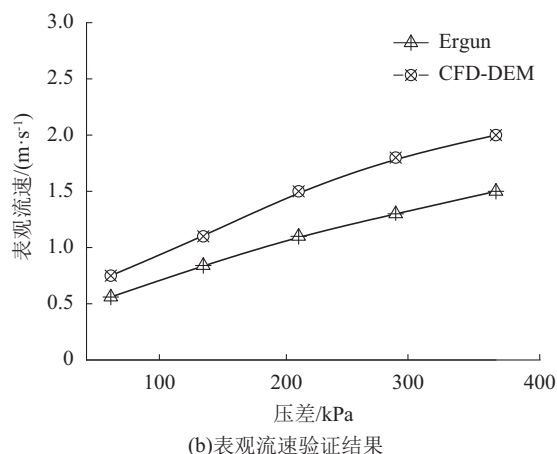


图10 孔隙率及表观流速验证结果

顶部50 mm区域均为液体填充(图9),故此可认为该部分完全由孔隙组成。但在此之下则填充球形颗粒,从DEM计算可知真实孔隙率为43.9%,与CFD中计算得出的孔隙率较为接近。此外,由图10(b)可知,CFD-DEM结果能够较好再现Ergun公式给出的压降-流速关系,虽然模拟结果略大于理论计算值,但总体仍在合理范围内。综合上述分析,本文所提出的混合非解析CFD-DEM耦合框架具有一定的合理性,可成功应用于宽粒径案例的高效模拟。

4 结论

(1)本文开展了混合非解析CFD-DEM方法二次开发,建立了基于流体网格尺寸与颗粒等效直径比的颗粒自动识别机制。该机制能够在同一耦合流程中对细颗粒采用常规采样点法,对粗颗粒启用改进体积分数修正和动量源项扩展分配,从而适应宽粒径颗粒体系的多尺度特征。

(2) 针对粗颗粒体积分数映射失真问题, 本文引入基于高斯核函数的体积分数平滑修正方法, 并采用离散归一化因子对颗粒体积进行守恒分配。该处理尤其适用于颗粒靠近壁面或计算域边界的情况, 能够避免核函数支撑域被截断导致的颗粒体积低估。

(3) 针对粗颗粒动量源项局部化问题, 本文建立了基于固相体积分数和网格体积权重的源项扩展分配方法。该方法将颗粒诱导的反作用源项分配至影响域内多个网格, 在保持总动量交换守恒的同时减弱单网格源项突变, 有助于提高宽粒径颗粒体系流固耦合计算的稳定性。

(4) 本文设计了体积分数守恒验证、单颗粒沉降速度验证和球形颗粒柱 Ergun 压降验证三类合理性验证方案。三类验证分别从体积映射守恒性、单颗粒流固作用力计算和多颗粒固定床宏观渗流阻力预测能力三个层面评价二次开发方法, 为后续宽粒径土石混合体、注浆渗透和颗粒迁移问题模拟提供了验证路径。

参考文献:

- [1] 刘海花, 蒋中明, 李叶朋, 等. 基于流固耦合效应的裂隙岩体注浆效果影响因素研究[J/OL]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 1-11[2026-09-04]. <https://doi.org/10.19951/j.cnki.1672-9331.20260420003>.
- [2] 曾一凡, 袁子龙, 李昊, 等. 岩石粒径和浆液浓度影响下的采空区充填浆液扩散规律试验[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(7): 80-89.
- [3] 刘垒雷, 邓刚, 李维朝, 等. 不同细粒含量与间断比下不连续级配砂砾土渗流的 CFD-DEM 数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(7): 2677-2689.
- [4] Zhang Z, Yin T, Huang X, et al. Slurry filtration process and filter cake formation during shield tunnelling: Insight from coupled CFD-DEM simulations of slurry filtration column test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 87: 64-77.
- [5] Yin T, Zhang Z, Huang X, et al. On the morphology and pressure-filtration characteristics of filter cake formation: Insight from coupled CFD - DEM simulations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103856.
- [6] Lin Y, Fang Y, He C. Numerical study on clogging mechanism of slurry infiltration in porous media based on coupled CFD-DEM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 128: 1-15.
- [7] Doan T, Indraratna B, Nguyen T T, et al. Coupled CFD-DEM modelling of clogging of granular columns by cohesive fines[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 177: 106902.
- [8] 蔡国庆, 刁显锋, 杨芮, 等. 基于 CFD-DEM 的流-固耦合数值建模方法研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(1): 17-32.
- [9] Zhou Z Y, Kuang S B, Chu K W, et al. Discrete particle simulation of particle-fluid flow: Model formulations and their applicability[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 661: 482-510.
- [10] 刘德天, 傅旭东, 王光谦. CFD-DEM 耦合计算中的体积分数算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(7): 720-727.
- [11] Chen J, Zhang J X. A semi-resolved CFD-DEM coupling model using a two-way domain expansion method[J]. Journal of Computational Physics, 2022, 469: 111535.
- [12] Wen X J, Zheng L N, Zhao X, et al. An improved semi-resolved computational fluid dynamics-discrete element method for simulating liquid-solid systems with wide particle size distributions[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(3): 033343.
- [13] Fullmer W D, Musser J. CFD-DEM solution verification: fixed-bed studies[J]. Powder Technol, 2018, 339: 760-764.
- [14] Concha F. Settling velocities of particulate systems[J]. Kona Powder and Particle Journal, 2009, 27: 18-37.
- [15] Ergun S, Orning A A. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1949, 41(6): 1179-1184.

(编辑 王文)