浙江理工大学学报,第55卷,第4期,2026年7月
Journal of Zhejiang Sci-Tech University
DOI:10.3969/j.issn.1673-3851(n).2026.04.010

壁面约束下球形颗粒的曳力与升力特性研究

崔宝玲,王　凯
(浙江理工大学复杂流动与流体工程装备全省重点实验室,杭州 310018)

摘　要:针对壁面约束下的颗粒受力问题,以静止流体中平行于壁面做匀速直线运动的单个球形颗粒为研究对象,采用直接数值模拟(Direct numerical simulation, DNS),结合重叠网格方法和移动计算域方法,在有限雷诺数(3～300)及不同颗粒-壁面距离(0.6～4.5倍粒径)范围内,对球形颗粒所受的曳力与升力开展全分辨数值分析,以探究壁面约束下颗粒的曳力与升力特性。结果表明:随着颗粒-壁面距离的增大,颗粒的曳力系数逐渐减小;通过拟合计算得到的曳力系数值得到壁面约束下球形颗粒的曳力系数表达式,其预测的平均绝对百分比误差为2.56%。颗粒的升力系数随着颗粒-壁面距离的增大而减小。当颗粒-壁面距离小于0.625倍粒径时,颗粒的升力系数随雷诺数的增大而减小;当颗粒-壁面距离超过0.625倍粒径时,升力系数随着雷诺数的增大先减小后增大。该研究结果可以为壁面约束下颗粒两相流研究提供一定参考。

关键词:数值模拟;颗粒两相流;壁面约束;曳力;升力
中图分类号:O359　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-3851 (2026) 07-0465-09
引文格式:崔宝玲,王凯. 壁面约束下球形颗粒的曳力与升力特性研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2026,55(4):465-473.
Reference Format: CUI Baoling,WANG Kai. A study on the drag and lift characteristics of a spherical particle under wall constraints[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2026,55(4):465-473.

A study on the drag and lift characteristics of a spherical particle under wall constraints

CUI Baoling,*WANG Kai*
(Zhejiang Key Laboratory of Multiflow and Fluid Machinery, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the issue of forces on particles under wall constraints, this study focuses on a spherical particle moving at a constant velocity parallel to the wall in a stationary fluid. Direct numerical simulation (DNS) combined with the overlapping grid method and the moving computational domain method was employed to conduct a fully resolved numerical analysis on the drag and lift forces experienced by the particle, within a finite Reynolds number range (3-300) and various particle-to-wall distances (0.6-4.5 particle diameters). The study investigated the drag and lift properties of the particle under wall constraints. The results show that as the particle-to-wall distance increases, the drag coefficient of the particle gradually decreases, and by fitting the computed drag coefficients, an expression for the drag coefficient of spherical particles under wall constraints is established, with the model demonstrating a mean absolute percentage error of 2.56%. The lift coefficient of the particle also decreases with increasing particle-to-wall distance: when the particle-to-wall distance is less than 0.625 particle diameters, the lift coefficient decreases with increasing Reynolds number; when the particle-to-wall distance exceeds 0.625 particle diameters, the lift coefficient first decreases and then increases with increasing Reynolds number.

收稿日期:2025－06－13　　网络出版日期:2025－09－16
基金项目:国家自然科学基金项目(U22A20209)
作者简介:崔宝玲(1975—　),女,河北滦南人,教授,博士,主要从事流体机械方面的研究。

The research findings can provide certain reference for the study of particle-laden two-phase flows under wall constraints.

Key words: numerical simulation; particle two-phase flow; wall constraints; drag force; lift force

0 引 言

颗粒两相流广泛存在于实际生产生活中,例如能源[1-2]、化工[3]、管道[4]及采矿[5]等领域,这些领域中的许多过程都涉及颗粒和流体的相互作用,如颗粒的传输、分散、沉积、混合等。值得注意的是,在这些过程中颗粒常受壁面的影响,使颗粒的受力特性表现出与大空间条件下不同的规律[6],因此研究壁面约束下的颗粒两相流具有理论和实际意义。

随着科学技术的不断发展,数值模拟逐渐成为研究颗粒两相流的重要工具之一[7]。目前颗粒两相流的主要数值研究方法是基于欧拉-拉格朗日框架的点颗粒方法和全分辨方法[8],其中全分辨方法将颗粒视为刚体,可以精确地模拟颗粒在流体中的行为,为颗粒两相流的研究提供一定的理论支持。

颗粒的曳力与升力是颗粒两相流的重要研究内容。其中曳力是指流体作用于流体内部与流体有相对运动的物体上的作用力[9],许多学者围绕曳力的理论模型、数值模拟等方面开展了相关研究。李瑞元等[10]研究了有限雷诺数(1～20)和有限马赫数(0～3)条件下的圆球绕流过程,并在此基础上将标准圆球曳力系数曲线进行了修正。苏杰等[11]利用浸没光滑有限元模型计算了无界流场较低雷诺数(0.0325～1.75)和较高雷诺数(16～76.8)下球形颗粒的曳力系数,并与标准圆球曳力系数曲线进行了比较,发现较低雷诺数下球形颗粒的曳力系数计算值与 Stokes 曳力系数一致,较高雷诺数下球形颗粒的曳力系数与标准圆球曳力系数曲线吻合较好。常心泉等[12]基于气动理论方法,分析了无界流场中多种颗粒的曳力系数,发现颗粒所受曳力与颗粒的几何形状和在流场中的取向有关。Presa-Reyes 等[13]提出了一种新的 DCC-DNN(Drag coefficient correlation-aided deep neural network)架构模型,尝试用其来预测不同形状、不同雷诺数范围的单颗粒的曳力系数。Luo 等[14]利用数值模拟方法研究了流化床中密集颗粒系统的曳力特性,在传统颗粒曳力模型的基础上,引入了颗粒速度修正方法,得到了精度更高的曳力系数模型。目前对于颗粒曳力特性的研究多基于无界大空间条件,而壁面约束下的颗粒曳力特性研究相对较少,因此有必要开展壁面约束下的颗粒曳力的研究。

升力是流体对物体施加的垂直于主流方向的横向力,主要由流场的不对称性引起。流体的剪切作用、颗粒的旋转以及壁面的存在等都会引起流场不对称性,进而导致升力的产生。与曳力相比,升力在量级上小得多,对于颗粒的影响不如曳力明显,且机制相较于曳力更加复杂,因此学界对颗粒在流体中所受的升力关注相对较少[15]。目前在颗粒两相流中,对颗粒升力的研究多见于由升力引起的大量颗粒的迁移或聚集现象[16-17],对于有限颗粒的升力研究,也有了许多可借鉴的研究结论。Shi 等[18]针对单个球体在壁面附近或剪切流动中受到的升力,总结了前人得到的经验公式和实验、模拟数据,并提出了新的壁面附近的颗粒升力模型。Zhang 等[19]研究了气流中单个球形粒子在壁面附近的剪切流中的受力,发现当壁面与颗粒的温度比小于 1 时,颗粒的升力方向指向壁面;当壁面与颗粒的温度比大于 1 时,颗粒的升力方向远离壁面。Wang 等[20]使用谱元法模拟研究了有限雷诺数范围(0.1～100)库埃特流中球形颗粒的升力特性,并根据模拟数据建立了非旋转粒子在有壁库埃特流中的升力关系式,结果发现目前的升力模型仍无法准确预测颗粒与壁面近接触时的升力。综上所述,颗粒在壁面附近会同时受到剪切和壁面效应的双重作用,因此需要采取方法消除剪切效应的作用,研究壁面的存在对颗粒升力的影响。

为探究壁面约束下颗粒的曳力与升力特性,本文采用直接数值模拟(Direct numerical simulation, DNS),在颗粒周围建立移动计算域并划分重叠网格,通过选取与颗粒同步运动的移动参考系,将颗粒的运动问题转化为绕流问题。首先研究颗粒所受的曳力,分析壁面约束下颗粒的曳力特性,拟合计算得到的曳力系数值以建立新的曳力系数公式,并评估公式的预测效果;然后探讨了壁面约束下颗粒的升力特性,旨在为壁面约束下的颗粒两相流研究提供一定的参考依据。

1 数值计算方法

1.1 控制方程

在本文的研究中,不考虑整个流体域及颗粒的

温度变化,并假定流体与颗粒的温度时刻保持相同,因此不涉及流场中的能量变化,只需考虑质量守恒及动量守恒即可形成封闭方程组。质量守恒方程和动量守恒方程可分别用式(1)和式(2)表示:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \boldsymbol{u} \tag{2}$$

其中:$\boldsymbol{u}$ 表示流体速度,m/s;p 为流体的压强,Pa;ρ 为流体的密度,kg/m^3;v 为流体的运动黏度,m^2/s;t 为时间,s。

由于本文选取的雷诺数较小(3～300),所以采用直接数值模拟(Direct numerical simulation, DNS)进行模拟计算。颗粒所受的曳力与升力通过直接积分颗粒表面的压力和剪切应力获得。

1.2　数值模拟方法

本文的研究对象为壁面附近的单个球形颗粒,颗粒中心与壁面之间的距离为 G,颗粒在静止流体中沿 X 轴负方向、平行于壁面做速度大小为 U 的匀速直线运动,U 的取值根据颗粒的雷诺数而定。颗粒平行于壁面运动的示意图如图 1 所示。

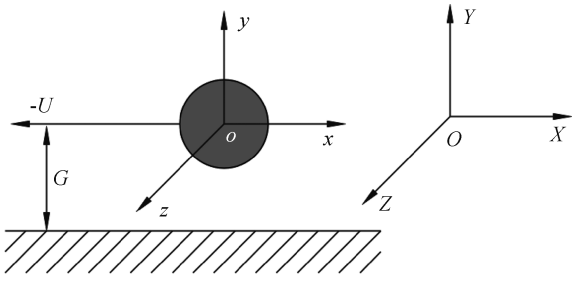

图 1　颗粒平行于壁面运动的示意图

在分析时不选取静止的绝对坐标系 O-XYZ 为参考系,而是选取固定于颗粒中心随颗粒同步移动的坐标系 o-xyz 为参考系,从而将颗粒的匀速直线运动问题转化为壁面约束下的圆球绕流问题。

1.3　移动计算域

由于计算域内流体的初始状态设为静止,颗粒在流场中做匀速直线运动,若采用常规的固定计算域方法将导致计算资源严重浪费,因此本文采用移动计算域方法,移动计算域示意图如图 2 所示。在 t_1 到 t_2 的时间段,计算域与颗粒一起运动,在运动的过程中二者保持相对静止。

1.4　计算域设置和网格无关性验证

本文计算域示意图如图 3 所示。计算域为 25D×20D×20D 的立方体,D 为颗粒直径。计算域左侧边界设置为速度入口,颗粒中心与速度入口距离为 5D;计算域右侧边界设置为压力出口;与颗粒相邻的壁面设置为无滑移边界条件,其余 3 个壁面均设置为远场条件;颗粒表面设置为无滑移边界条件。

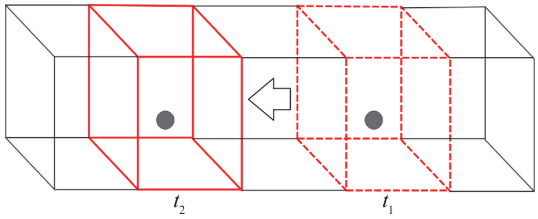

图 2　移动计算域示意图

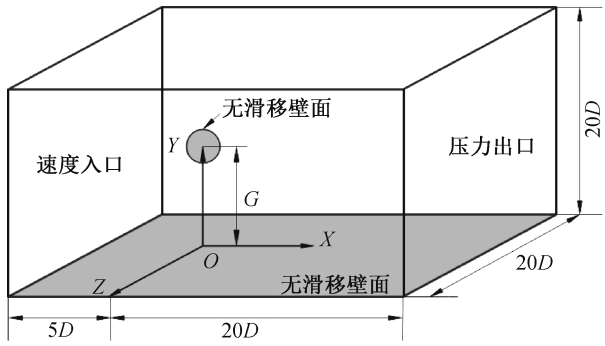

图 3　计算域示意图

网格划分包括背景区域和重叠区域两部分,背景区域为整个立方体区域,重叠区域为以颗粒中心为球心的直径为 4D 的球形区域,并在颗粒中心周围 2D 球形区域对重叠区域进行网格加密,在背景区域中对以颗粒中心为中心的 6D×6D×6D 正方体区域进行网格加密。颗粒周围网格划分如图 4 所示。

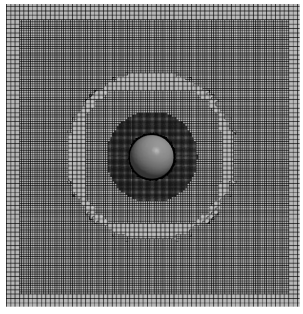

图 4　颗粒周围网格示意图

划分了不同网格数量的 4 套网格,分别命名为网格 1—网格 4,在工况为 G=2.5D、Re=30 下进行网格无关性分析,在 4 套网格下分别计算该工况下的颗粒曳力系数,颗粒曳力系数定义如式(3)所示:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 \frac{\pi}{4} D^2} \tag{3}$$

其中:C_D 表示颗粒的曳力系数;F_D 表示颗粒所受的

曳力,N。

计算结果如表 1 所示,从表中可以看到,4 套网格的计算结果几乎不变,因此采用第 3 套网格已经可以满足计算需求。

表 1 网格无关性验证

组别	网格数	C_D
网格 1	383175	2.137
网格 2	646172	2.137
网格 3	1226252	2.136
网格 4	2831715	2.136

1.5 计算方法验证

本文选取的雷诺数 Re 范围为 3～300,颗粒-壁面距离 G 的范围为 $0.6D$～$4.5D$,共计 110 组算例,具体研究参数选取如表 2 所示。

表 2 研究参数选取

参数	参数值
Re	3、30、60、90、120、150、180、210、240、270、300
G	$0.6D$、$0.625D$、$0.75D$、D、$1.5D$、$2D$、$2.5D$、$3D$、$3.5D$、$4.5D$

在大空间无界条件下,Schiller 经验公式[21]已经得到了广泛应用,Schiller 经验公式可用式(4)表示:

$$C_D=\frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.687}) \tag{4}$$

为验证本文所用数值模拟方法的可靠性,在本文所取的雷诺数条件下,分别用本文方法和 Schiller 经验公式计算颗粒在大空间无界条件下的曳力系数,并将二者的计算结果绘制成如图 5 所示的曲线。从图 5 中可以看出,在本文所选的雷诺数范围内,二者吻合得很好。因此本文的方法可以较为准确地进行颗粒受力的模拟计算。

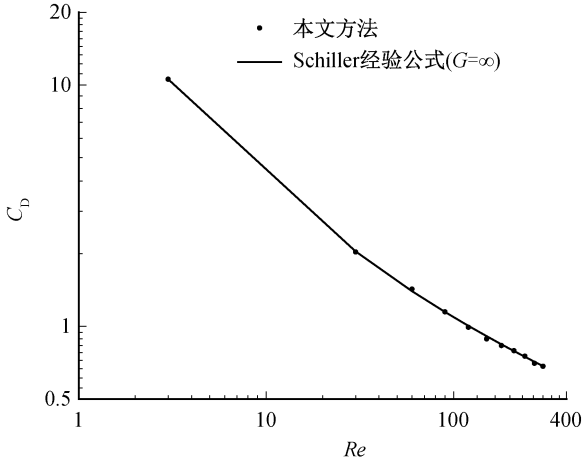

图 5 本文方法与 Schiller 经验公式计算的曳力系数曲线

2 壁面约束下颗粒曳力特性分析

为了探究壁面约束下颗粒的曳力特性,本文首先分析壁面约束对颗粒的曳力系数的整体影响,以揭示颗粒-壁面距离和雷诺数对颗粒曳力系数的影响规律;其次将颗粒的曳力系数分解为压差曳力系数和摩擦曳力系数,以研究壁面约束下压差曳力和摩擦曳力的相对大小;最后基于数值模拟结果,对所得的所有曳力系数值进行拟合,提出新的曳力系数表达式,并利用统计学方法对其预测效果进行评估。

不同颗粒-壁面距离下颗粒的曳力系数与雷诺数的关系曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出:在同一雷诺数下,颗粒的曳力系数随着颗粒-壁面距离的减小而增大,说明壁面的作用是增大颗粒所受的曳力。在研究的雷诺数范围内,颗粒的曳力系数都会随着雷诺数的增大而减小。当 $Re\leqslant 90$ 时,壁面约束下颗粒的曳力系数都大于无界绕流时颗粒的曳力系数;当 $Re>90$,颗粒-壁面距离为 $0.6D$～D 时,壁面约束下颗粒的曳力系数大于无界绕流时的颗粒曳力系数;当颗粒-壁面距离大于 D 时,壁面约束下颗粒的曳力系数小于无界绕流时颗粒的曳力系数。

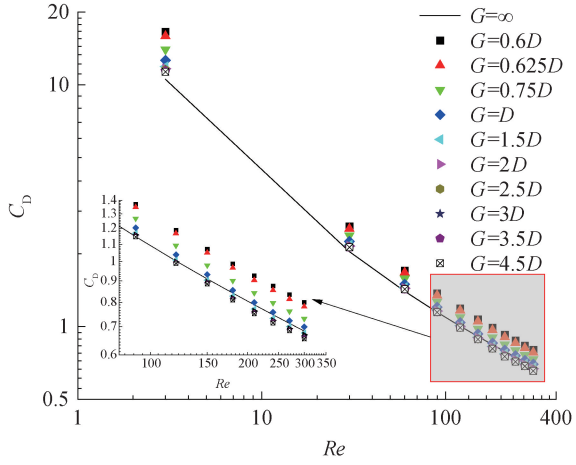

图 6 不同颗粒-壁面距离下颗粒的曳力系数与雷诺数的关系曲线

为更直观地解释颗粒-壁面距离变化对于颗粒曳力的影响,将颗粒的总曳力分解为压差曳力和摩擦曳力进行分析,压差曳力是由于物体在流体中运动时前后压力分布不均产生的阻力;摩擦曳力是由流体的黏性与物体表面之间的相互作用引起的阻力。压差曳力和摩擦曳力可以分别用式(5)和式(6)表示:

$$F_{D,p}=\frac{1}{2}C_{D,p}\rho U^2\frac{\pi}{4}D^2 \tag{5}$$

$$F_{D,f}=\frac{1}{2}C_{D,f}\rho U^2\ \frac{\pi}{4}D^2 \tag{6}$$

其中:$F_{D,p}$ 和 $F_{D,f}$ 分别为颗粒受到的压差曳力和摩擦曳力,N;$C_{D,p}$ 和 $C_{D,f}$ 分别是颗粒的压差曳力系数和摩擦曳力系数。

不同雷诺数下颗粒的压差曳力系数与摩擦曳力系数的比值随颗粒-壁面距离的变化曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出,在同一雷诺数下,随着颗粒-壁面距离的增大,压差曳力系数和摩擦曳力系数的比值呈现减小趋势。

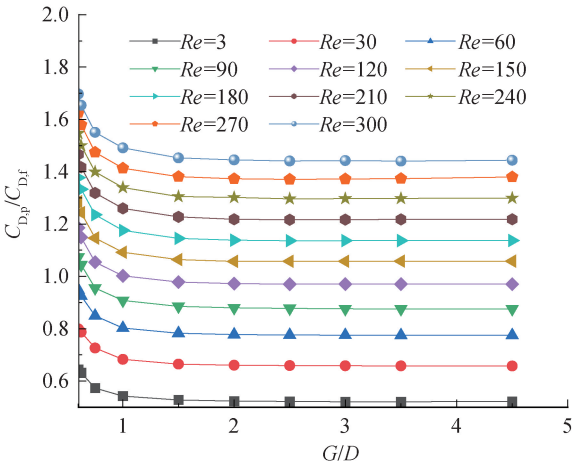

图 7　不同雷诺数下颗粒的压差曳力系数与摩擦曳力系数的比值随颗粒-壁面距离的变化曲线

当颗粒-壁面距离小于 D 时,二者的比值随颗粒-壁面距离的增大迅速减小;当颗粒-壁面距离超过 D 之后该比值减小的速度变缓,在此过程中摩擦曳力对总曳力的贡献相对增加;当颗粒-壁面距离大于 $2D$ 后该比值趋于稳定,此后压差曳力和摩擦曳力在总曳力中的比例不再变化。

若只考虑雷诺数对颗粒曳力系数的影响,$C_{D,p}$ 和 $C_{D,f}$ 的比值随着颗粒雷诺数的增大逐渐增大。当雷诺数小于 120 时,二者比值稳定后始终小于 1,此时流场中摩擦曳力占主要贡献;当雷诺数大于 120 时,二者比值稳定后始终大于 1,此时颗粒曳力主要来源于压差曳力。该现象说明增大雷诺数有利于提高压差曳力在总曳力中的占比。

当颗粒距离壁面较近时,Vasseur 等[22]确定了颗粒的曳力系数随颗粒与壁面距离减小而增加的渐进方程以及颗粒的曳力系数随颗粒与壁面距离增加而减小的渐进方程,两渐进方程可分别用式(7)和式(8)表示:

$$C_D-C_{D,free}=\frac{27}{4L^*},Re<<L^*<<1 \tag{7}$$

$$C_D-C_{D,free}=-\frac{4.56282}{2(L^*)^{5/2}},Re<<1<<L^* \tag{8}$$

其中:$C_{D,free}$ 为大空间无壁面约束下颗粒的曳力系数;L 为颗粒中心到壁面的距离与颗粒直径的比值;L^* 为颗粒中心到壁面的无量纲距离,具体定义如式(9)—(11)所示:

$$L=\frac{G}{D} \tag{9}$$

$$Re=\frac{UD}{v} \tag{10}$$

$$L^*=\frac{UG}{v}=LRe \tag{11}$$

为更好地描述壁面约束下颗粒的曳力特性,将本文计算得到的所有曳力系数值进行整理拟合,并绘制成$(C_D-C_{D,free})L^*$ 和 L^* 的函数关系形式,拟合后的结果如图 8 所示。

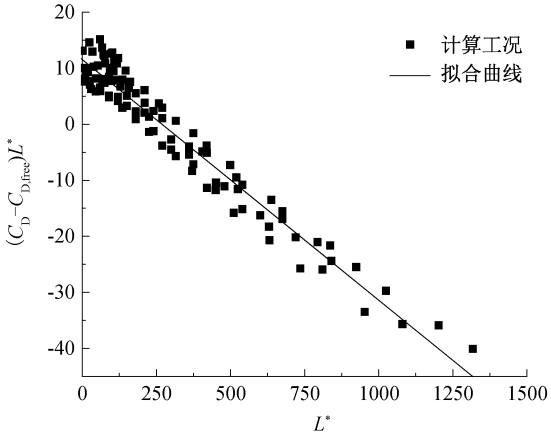

图 8　曳力系数拟合曲线

从图 8 中可以看出,计算结果可以较好地拟合为 $y=aL^*+b$ 的直线方程形式,其中斜率 a 为 −0.039,截距 b 为 9.956,表达式如式(12)所示:

$$(C_D-C_{D,free})L^*=-0.039L^*+9.956 \tag{12}$$

根据 Schiller 经验公式,大空间无界流场中颗粒的曳力系数为:

$$C_{D,free}=\frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.687}) \tag{13}$$

将式(11)和式(13)代入式(12),得到式(14):

$$\left[C_D-\frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.687})\right]LRe=-0.039LRe+9.956 \tag{14}$$

将式(14)整理成如式(15)所示形式,即得到本文中壁面约束下球形颗粒的曳力系数的拟合表达式:

$$C_D=\frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.687})+\frac{9.956}{LRe}-0.039 \tag{15}$$

为衡量该拟合公式的预测效果,采用平均绝对百分比误差(Mean absolute percentage error,MAPE)来评估,平均百分比可用式(16)表示:

$$E_{\mathrm{MAP}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{C_{\mathrm{D}i}-C_{\mathrm{D}i,\text{预测}}}{C_{\mathrm{D}i}}\right|\times 100\% \quad (16)$$

其中:E_{MAP} 为平均绝对百分比误差;$C_{\mathrm{D}i}$ 为实际曳力系数值;$C_{\mathrm{D}i,\text{预测}}$ 为拟合公式预测值;n 为总样本数,即算例总数 110 个。经过计算,平均绝对百分比误差为 2.56%,且最大预测误差为 12.61%,最小预测误差为 0,并且该拟合公式的决定系数(Coefficient of determination,COD)为 0.95。上述验证结果表明该预测公式预测效果较好。

3 壁面约束下颗粒升力特性分析

为探究壁面约束下颗粒的升力特性,本文首先分析壁面约束对颗粒的升力系数的整体影响,以揭示颗粒-壁面距离和雷诺数对颗粒升力系数的影响规律;其次将颗粒的升力系数分解为压差升力系数和摩擦升力系数,以研究壁面约束下压差升力和摩擦升力的相对大小。

不同颗粒-壁面距离下颗粒的升力系数与雷诺数的关系曲线如图 9 所示。颗粒的升力系数定义如式(17)所示:

$$C_{\mathrm{L}}=\frac{F_{\mathrm{L}}}{\frac{1}{2}\rho U^2\ \frac{\pi}{4}D^2} \quad (17)$$

其中:C_{L} 表示颗粒的升力系数;F_{L} 表示颗粒所受的升力,N。

从图 9 中可以看出:颗粒的升力系数随着颗粒-壁面距离的减小而增大;当颗粒-壁面距离小于 0.625D 时,颗粒的升力系数随着雷诺数的增大逐渐减小,当颗粒-壁面距离大于 0.625D 后,颗粒的升力系数随着雷诺数的增大先减小后增大,转折点集中于雷诺数 100~200 之间。

当雷诺数为 210 时,不同颗粒-壁面距离下颗粒周围的压力分布如图 10 所示。从图 10 中可以看出,壁面的存在破坏了颗粒周围流场分布的对称性,而流场的不对称性是升力产生的原因。当颗粒-壁面距离很小时,颗粒-壁面距离为 0.6D 时,颗粒周围的压力呈现明显的非对称分布(见图 10(a));随着颗粒-壁面距离的增大,颗粒表面压力分布的对称性开始恢复;颗粒-壁面距离达到 1.5D 时,颗粒周围的压力分布基本对称(见图 10(c));当颗粒-壁面距离达到 3D 后,颗粒周围的压力呈现对称分布(见图 10(d))。在此过程中壁面对于颗粒的影响逐渐减弱。

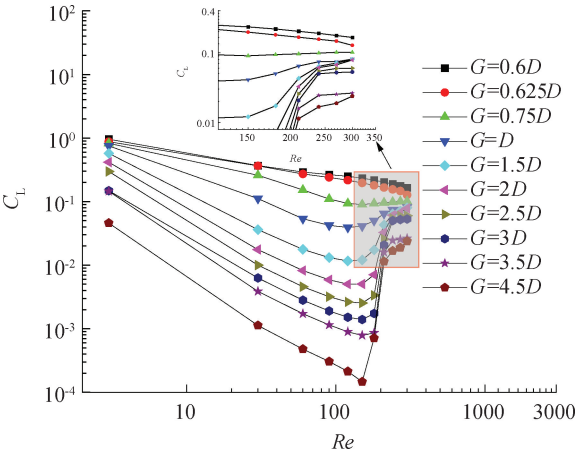

图 9 不同颗粒-壁面距离下颗粒的升力系数与雷诺数的关系曲线

雷诺数为 210 时不同颗粒-壁面距离下颗粒 XOY 截面上近壁侧与远壁侧压力系数分布曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出,颗粒近壁侧与远壁侧的压力系数分布曲线呈现出显著的非对称性,表明颗粒周围的流场受到壁面的强烈干扰。如果没有壁面的存在,颗粒近壁侧和远壁侧的压力分布是重合的。但在壁面的影响下,两侧的压力分布产生了较大差异。

当颗粒-壁面距离较小时,颗粒-壁面距离为 0.6D 和 0.625D 时,此时壁面对颗粒的影响较强,近壁侧和远壁侧的压力分布有明显差异(见图 11(a)和图 11(b));当颗粒-壁面距离持续增大,颗粒-壁面距离为 1.5D 时,壁面对颗粒的影响逐渐减弱,颗粒近壁侧与远壁侧的压力分布差异也随之减小(见图 11(c));直至颗粒远离壁面,颗粒-壁面距离为 3D 时,近壁侧和远壁侧的压力系数分布重合,壁面对颗粒的影响基本消失(见图 11(d))。以上过程说明由壁面引起的非对称性的影响随着颗粒-壁面距离的增大逐渐减弱。

升力也可以分为压差升力和摩擦升力两部分。压差升力是由于颗粒表面压力分布不均产生的垂直于颗粒运动方向的力;摩擦升力是由于流体在颗粒表面形成的黏性边界层产生剪切应力,导致颗粒受到的垂直于颗粒运动方向的力。压差升力和摩擦升力的可分别用式(18)和式(19)表示:

$$F_{\mathrm{L,p}}=\frac{1}{2}C_{\mathrm{L,p}}\rho U^2\ \frac{\pi}{4}D^2 \quad (18)$$

$$F_{\mathrm{L,f}}=\frac{1}{2}C_{\mathrm{L,f}}\rho U^2\ \frac{\pi}{4}D^2 \quad (19)$$

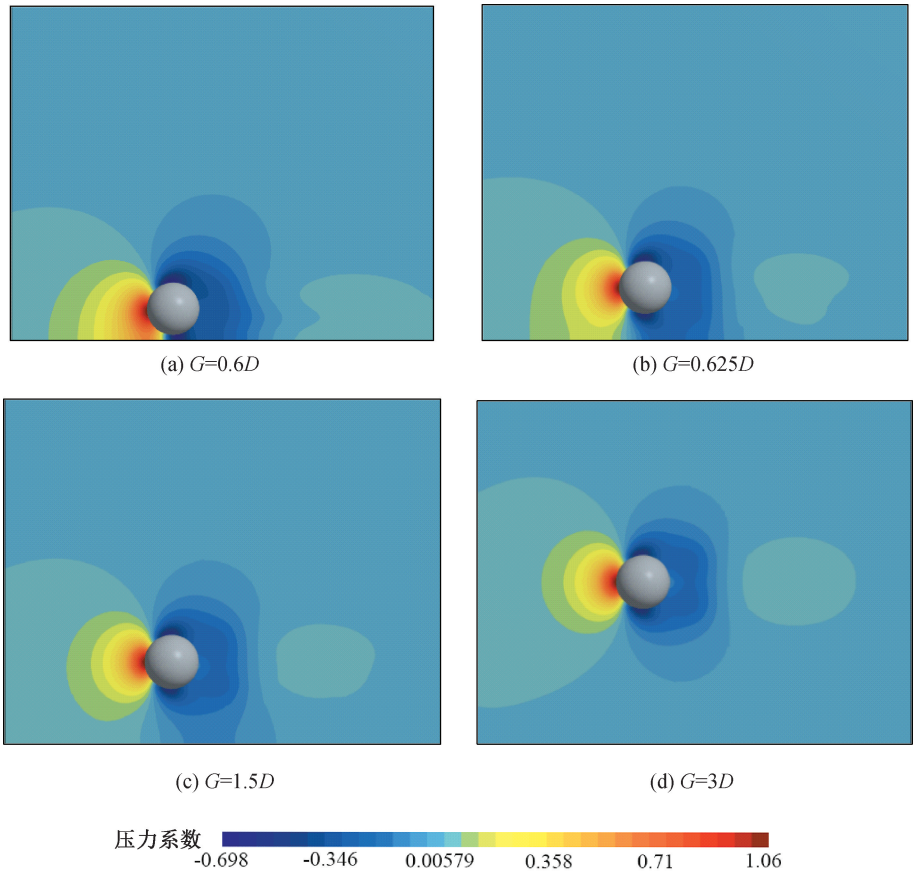

图 10　雷诺数为 210 时颗粒周围的压力分布

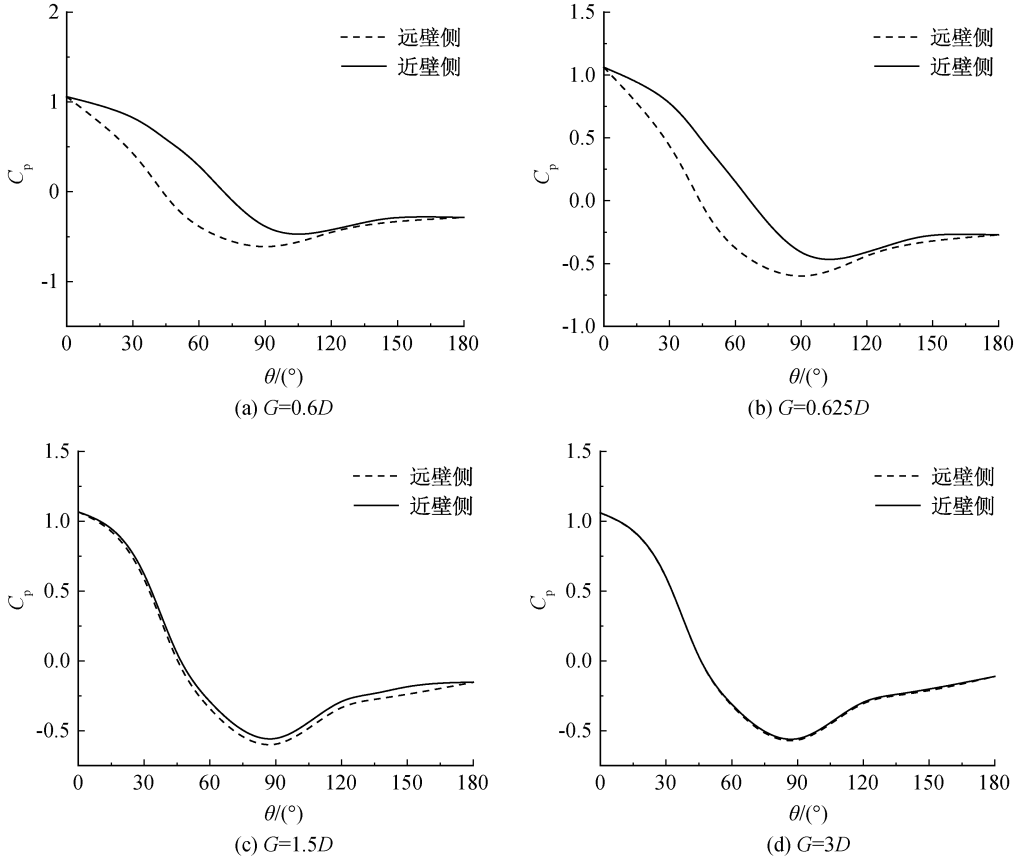

图 11　雷诺数为 210 时不同颗粒-壁面距离下颗粒 *XOY* 截面上近壁侧与远壁侧压力系数分布曲线

其中:$F_{L,p}$ 和 $F_{L,f}$ 分别为颗粒受到的压差升力和摩擦升力,N;$C_{L,p}$ 和 $C_{L,f}$ 分别是颗粒的压差升力系数和摩擦升力系数。

为更加明确地比较颗粒所受升力中压差升力和摩擦升力在总升力中的贡献,给出了不同颗粒-壁面距离下颗粒的压差升力系数与摩擦升力系数的比值随 L^* 的变化曲线,如图 12 所示。从图 12 中展示的所有工况可以看出:在初始阶段,颗粒的压差升力系数小于摩擦升力系数,说明颗粒所受升力的主要贡献来自摩擦升力;随着 L^* 的逐渐增大,颗粒的压差升力系数大于摩擦升力系数,之后颗粒升力的主要贡献来自压差升力。由于 $L^*=LRe$,在相同颗粒-壁面距离下,较大的 L^* 代表着更高的雷诺数,则可以认为,当雷诺数较小时,颗粒所受的摩擦升力大于压差升力,颗粒所受升力的主要贡献来自摩擦升力;当雷诺数较大时,颗粒所受的压差升力大于摩擦升力,颗粒所受升力中压差升力占主导。在不同的颗粒-壁面距离范围内,颗粒的压差升力系数和摩擦升力系数表现出不同的变化规律。当颗粒-壁面距离小于 $0.625D$ 时,颗粒的压差升力系数与摩擦升力系数都随着 L^* 的增大而减小;当颗粒-壁面距离达到 $0.75D$ 时,压差升力系数经过初始阶段的减小之后,开始表现出增大的趋势,摩擦升力系数仍在减小;当颗粒-壁面距离大于 $0.75D$ 后,随着 L^* 的增大,压差升力系数与摩擦升力系数均呈现出先减小后增大的变化趋势,且这一增大趋势随颗粒-壁面距离的增大而愈发显著。

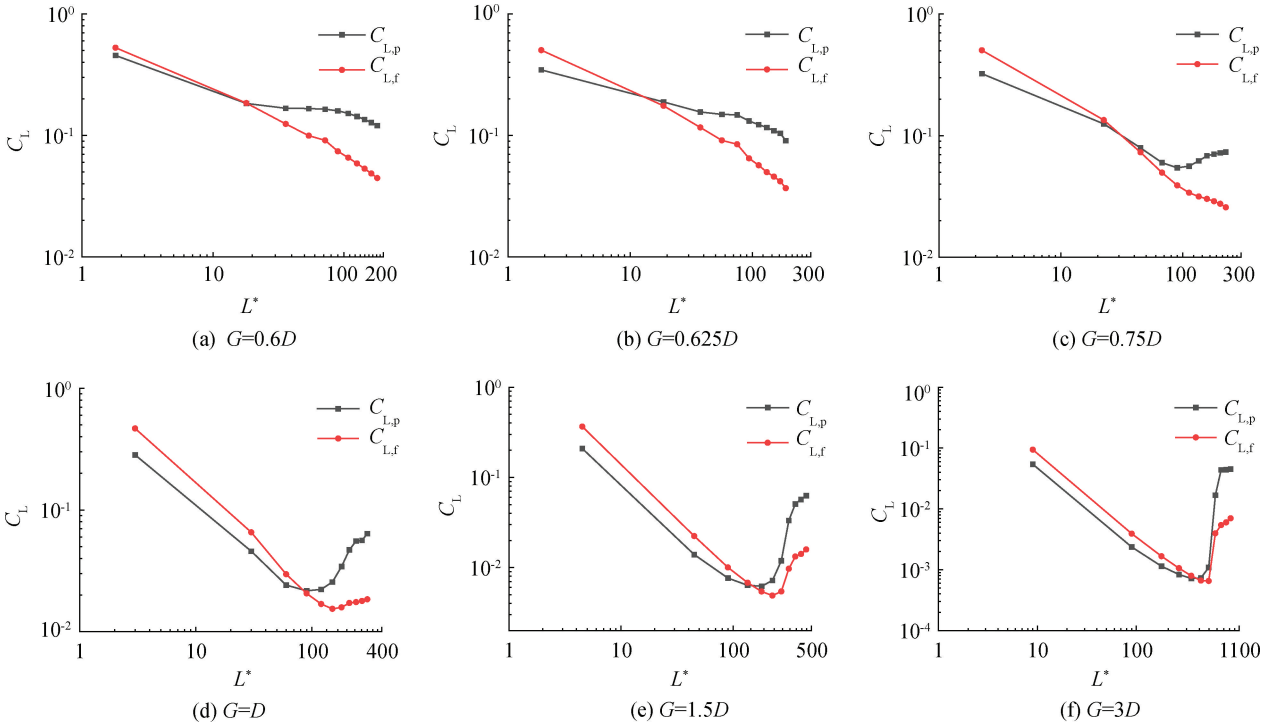

图 12 不同颗粒-壁面距离下颗粒的压差升力系数与摩擦升力系数随 L^* 的变化曲线

4 结 论

本文针对壁面约束下颗粒的受力问题,通过数值模拟方法研究了在静止流体中平行于壁面做匀速直线运动的单个球形颗粒所受的曳力与升力,探究壁面约束下颗粒的曳力与升力特性,主要结论如下:

a)壁面约束会增大颗粒所受的曳力,在其他条件不变时,颗粒的曳力系数随着颗粒-壁面距离的减小而增大;在壁面约束下,颗粒的曳力系数随着雷诺数的增大而减小;颗粒的压差曳力系数和摩擦曳力系数同样会随着颗粒-壁面距离的增大和雷诺数的增大而减小。

b)在有限雷诺数(3~300),有限颗粒-壁面距离(0.6~4.5 倍粒径)条件下,拟合得到壁面约束条件下球形颗粒的曳力系数表达式:

$$C_D=\frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.687})+\frac{9.956}{LRe}-0.039。$$

c)壁面约束会增大颗粒所受的升力,在其他条件不变时,颗粒的升力系数随着颗粒-壁面距离的减小而增大;在不同的颗粒-壁面距离下,颗粒的升力系数随雷诺数表现出不同的变化规律:颗粒-壁面距离较小($G\leqslant 0.625D$)时,颗粒的升力系数随雷诺数

的增大而减小;颗粒-壁面距离较大($G>0.625D$)时,升力系数在初始减小之后,随着雷诺数的进一步增大而增大,且颗粒-壁面距离越大升力系数增大的趋势越显著。

本文研究结果可以为壁面约束下颗粒受力特性的研究以及相关工程应用提供一定的参考。本文的研究对象为单个球形颗粒,而现实中的颗粒多为非球形,因此非球形颗粒的曳力与升力特性需要在此基础上进一步研究。

参考文献:

[1] Fang L, Jia H, Zheng M, et al. Modelling and analysis of full-wavelength phase volume fraction measurement in liquid-solid two-phase flow[J]. Energy,2025,333:137141.

[2] Liu L, Kuang S, Guo B, et al. Combustion characteristics of charcoal, semicoke, and pulverized coal in blast furnace and their impacts on reactor performance[J]. Powder Technology, 2024,433:119243.

[3] Wang G, Yang S, Zhang X, et al. Investigation of complex gas-particle flow characteristics in fluidizing process of non-spherical particles by CFD-DEM[J]. Powder Technology, 2024, 445: 120068.

[4] 王占,李晟锴,祁琦. 基于 Fluent-EDEM 耦合仿真的籽棉颗粒运动特性分析[J]. 价值工程,2025,44(11):9-11.

[5] Shao C, Wu X, Tan M, et al. Investigation of coarse particle transport characteristics in deep-sea mining pumps based on the UDM[J]. Powder Technology,2025,464:121259.

[6] 李姜华,王伯福,邱翔,等. 近壁圆柱绕流尾流的特性[J]. 自然杂志,2021,43(6):420-429.

[7] Zhu C, Yu Z, Pan D, et al. Interface-resolved direct numerical simulations of the interactions between spheroidal particles and upward vertical turbulent channel flows[J]. Journal of Fluid Mechanics,2020,891:A6.

[8] 崔智文,王泽,蒋新宇,等. 非球形颗粒两相流的数值模拟研究进展[J]. 力学进展, 2022,52(3):623-672.

[9] 李慧君,王业库,张久意. 基于鼓泡流化床的新型曳力模型的验证分析[J]. 动力工程学报,2022,42(8):715-721.

[10] 李瑞元,陈飞国,葛蔚,等. 高马赫数低雷诺数条件下圆球绕流曳力系数[J]. 空气动力学学报,2021,39(3):201-208.

[11] 苏杰,周长江,姜琛. 基于 IS-FEM 的颗粒曳力系数计算与试验验证[J]. 力学与实践,2023,45(1):119-129.

[12] 常心泉,张克学,王军,等. 自由分子区内的非球形颗粒曳力计算[J]. 力学学报,2024,56(5):1251-1260.

[13] Presa-Reyes M, Mahyawansi P, Hu B, et al. DCC-DNN: a deep neural network model to predict the drag coefficients of spherical and non-spherical particles aided by empirical correlations[J]. Powder Technology,2024,435:119388.

[14] Luo K, Wang D, Jin T, et al. Analysis and development of novel data-driven drag models based on direct numerical simulations of fluidized beds [J]. Chemical Engineering Science,2021,231:116245.

[15] He H, Zhang Q, Ottino J M, et al. Lift and drag forces on a moving intruder in granular shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics,2025,1008:A5.

[16] 邹赫,王企鲲,薛壮壮. 矩形截面通道中颗粒惯性聚集现象的力学成因[J]. 建模与仿真,2021,10(1):83-92.

[17] 姚军,刘敏,赵彦琳. 沉积管两相流动的大涡模拟研究[J]. 工程热物理学报,2024,45(5):1411-1417.

[18] Shi P, Rzehak R. Lift forces on solid spherical particles in wall-bounded flows[J]. Chemical Engineering Science, 2020, 211: 115264.

[19] Zhang K, Liu W, Chang X, et al. Forces acting on near-wall spherical particles in shear flows of diluted gases[J]. Journal of Aerosol Science,2024,181:106427.

[20] Wang T, Lin Z, Guo Y, et al. Hydrodynamic forces on a spherical particle in a plane Couette flow[J]. International Journal of Multiphase Flow,2025, 192:105341.

[21] Schiller L, Naumann A. A drag coefficient correlation[J]. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1933, 77: 318-320.

[22] Vasseur P, Cox R G. The lateral migration of spherical particles sedimenting in a stagnant bounded fluid[J]. Journal of fluid mechanics,1977,80(3):561-591.

(责任编辑:康　锋)