

立方体风沙粒子的低雷诺数绕流计算

马 亮, 钱光平

(北京航空航天大学 流体力学研究所, 北京 100083)

摘 要: 采用计算流体力学软件 Fluent 计算了均匀来流条件下立方体颗粒的三维绕流流场, 得到了立方体颗粒在不同来流方向下的速度分布、压力分布, 给出了拟合的立方体阻力系数经验公式。结果表明: 绕流阻力受来流方向的影响明显, 而传统的非球型颗粒阻力经验公式给出的是来流方向垂直于立方体表面时的阻力。

关键词: 立方体颗粒; 阻力系数; 低雷诺数

中图分类号: P425.5+5

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2009)01-0076-03

Flow Calculation Study on the Lower Reynolds Number for Cube-Shaped Blown Sand

Ma Liang, Qian Guangping

(Institute of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: By using CFD software Fluent, three dimensional numerical circle flow fields for cube-shaped blown sand are simulated. The flow speed and pressure distributions on different inflow condition are computed and analyzed. It is shown that the cube drag coefficient is strongly influenced by inflow angle and the traditional drag coefficient value is nearing the computed value of zero inflow angle. Finally, the cube sand drag coefficient calculation formula is fitting out and revised.

Key words: cube-shaped sand; drag coefficient; lower Reynolds number

0 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 由于人类活动导致的现代沙漠化土地在以每年 12 460 km² 的速度扩展。这种沙漠化过程的主要表现形式是风沙粒子在风场作用下的运动, 而由此带来的则是我国乃至全球关注的极其严重的环境问题。风沙灾害在本质上主要是由空气风力作用下风沙粒子的运动造成的, 因此, 掌握风沙粒子在风场中的空气动力学特性是研究风沙灾害形成机理的重要基础。

风沙粒子受多种力作用, 大多数研究者认为有效重力、空气拖拽力和碰撞力最为重要; 其次是电场力、Magnus 力、Saffman 力和流场剪切力; 再次是 Basset 力、附加质量力和颗粒间的离散力。空气拖拽力是推动颗粒向前运动的驱动力, 其实相当于颗粒所受的阻

力, 据估算其可达重力的 58%~78%^[1], 是除重力之外的第二大外力。由于风沙颗粒的直径较小, 一般在低雷诺理论范围内考虑其阻力情况。

对于球形颗粒的阻力, 经过许多学者的工作, 已建立了从小 Re 数开始的一系列经验公式^[2]。随着计算机技术的发展, 通过求解 $N-S$ 方程, 计算低雷诺数球体绕流场, 验证了经验公式的有效性^[3]。

在很多情况下, 实际风沙粒子的形状与圆球相差较远, 沙粒形状极不规则, 一般呈柱形或棱角形。因此, 对非球形颗粒的空气动力学特性研究是解决实际问题的必要途径。由于非圆球颗粒在流场中所受的阻力强烈地依赖于颗粒的尺寸、形状、取向等因素, 阻力公式的建立远较球形颗粒复杂。通过引入球形率、等效体积直径等形状因子概念, Haider 等得到了非球形颗粒的阻力系数公式^[4]。对于非球形粒子的阻力系

收稿日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10532030)子课题

作者简介: 马 亮(1965-), 男, 山西汾阳人, 北京航空航天大学流体力学研究所副教授, 博士, 主要研究方向为计算流体力学,

E-mail: liang_ma5@hotmail.com

数, 已有学者通过实验和数值模拟验证了有限圆柱在低雷诺数下的阻力。对更复杂外形颗粒的阻力系数计算目前还未见到。

本文采用计算流体力学软件 Fluent, 计算了均匀来流条件下立方体颗粒的三维绕流流场; 使用有限体积法对三维 $N-S$ 方程进行求解, 得到了立方体非球型颗粒绕流流场的速度分布、压力分布等; 重点计算了阻力系数随雷诺数和来流方向的变化, 并与经验公式做了分析比较; 给出了拟合的立方体阻力公式。

1 数值计算模型

1.1 控制方程

本文研究 $Re \ll 300$ 的低雷诺数绕流, 采用不可压缩 $N-S$ 方程为控制方程: $\nabla \cdot \vec{u} = 0$, (1)

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \vec{F} - \frac{\nabla p}{\rho} - \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

式中: \vec{u} 、 p 、 ρ 分别为气流速度、压力和密度; ν 为运动粘性系数;

\vec{F} 为外力 (本文中计算不计重力等外力, 该项为 0)。

采用笛卡尔坐标系, x 轴与立方体颗粒的 1 条棱平行, y 轴是相应的垂直方向, 向上为正, z 轴沿展向方向, 如图 1 所示。

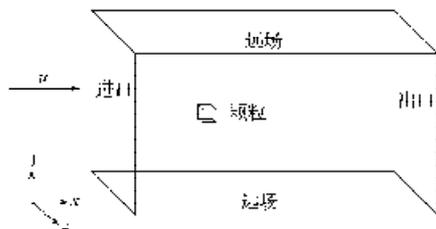


图 1 颗粒绕流计算域示意图

Fig. 1 Computation domain chart around a blown sand

计算采用有限体积法作空间离散, 五步龙格-库塔法作时间推进, SIMPLE 格式耦合求解速度和压力场。边界条件为: 入口给定来流条件, 出口为给定静压条件, 颗粒表面为无滑移条件。

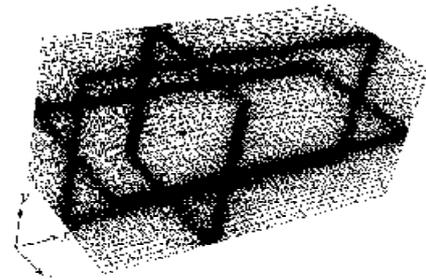
1.2 计算模型

风沙运动的雷诺数较低, 基本不需要考虑可压缩性, 计算时气体参数取为固定值, 其中空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, 粘性系数 $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。另外, 实际在 8 级风时的平均风速为 19 m/s 左右。因此, 本文只计算了 $Re \leq 300$ 范围内的情况。

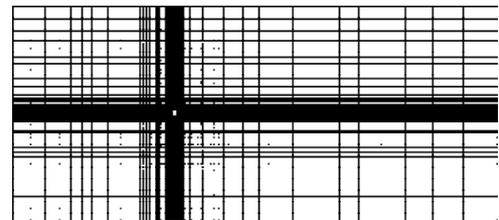
根据 Johnson 等的研究结果^[5], 单个圆球在 $Re \leq 210$ 时尾迹是定常对称的, 而 $Re > 210$ 后尾迹不再对称, 出现了非定常流动。本文的计算也发现了类似情况, 因此, 在 $Re \leq 200$ 时采用定常计算, $Re > 200$ 时采用非定常计算方法。

2 计算结果及讨论

设立方体颗粒的边长为 d , 则本文经验算取计算域的尺度为: 入口距离沙粒 $15d$, 出口距离沙粒 $30d$, 上下边界宽 $20d$ 。网格用软件 gambit 生成, 采用分区对接网格、整体网格和立方体周围的局部截面网格, 分布如图 2 所示。经验算, 网格总数取 670 000 较为合适。



a) 立方体沙粒计算整体网格示意



b) 立方体周围局部截面网格

图 2 计算网格分布

Fig. 2 Grid distribution

本文阻力系数的表达式为 $C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \cdot \frac{1}{4} \pi D^2}$,

式中: F 为颗粒绕流所受到的阻力, 是计算得到的颗粒表面各点压力沿流动方向分力的合力;

ρ 为空气密度;

U_∞ 为来流速度;

D 为当量球的直径 (即与立方体有相同表面积的球体直径)。

图 3 是不同雷诺数下阻力系数随来流方向角度变化图, 其中横坐标为来流方向与 x 轴的夹角。

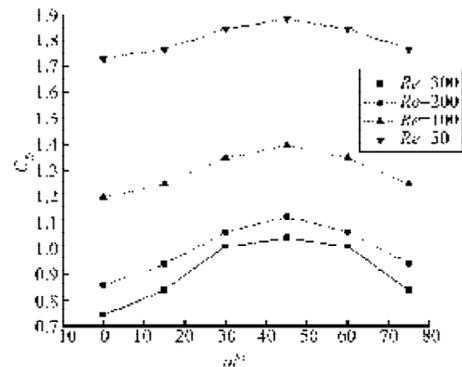


图 3 不同雷诺数下阻力系数随角度变化图

Fig. 3 Drag coefficient value under different inflow angles and Reynolds numbers

从图3可以看出,当角度为 45° 时,阻力最大, 0° 时阻力最小,说明来流与立方体一个表面垂直时阻力小于不垂直的情形。

图4给出了 $Re=100$,来流角度为 45° 时 xy 截面上的流线和等压图。

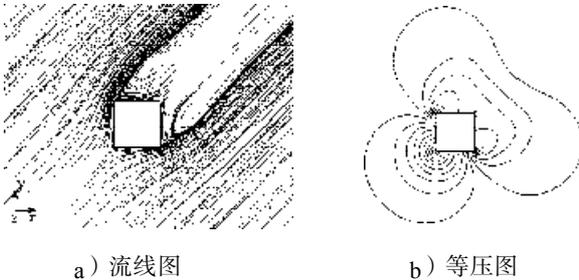


图4 来流角度为 45° 时截面流线、等压图
Fig. 4 Stream line and pressure contour when inflow angle is 45°

图5给出了 $Re=100$,来流角度为 0° 时 xy 截面上的流线和等压图。

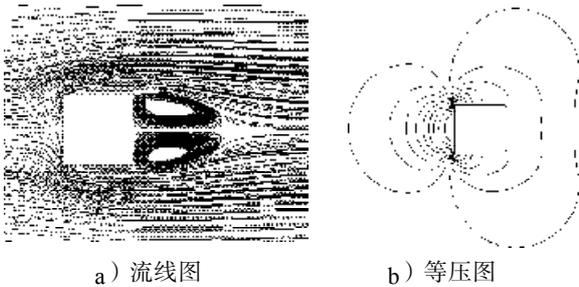


图5 来流角度为 0° 时截面流线、等压图
Fig. 5 Stream line and pressure contour on 0° inflow angle

从图4、5可以看出,来流角度为 45° 时,立方体绕流后的混合层比 0° 时要厚,而且尾迹也沿伸得远,流动分离强度大,是阻力大的原因。

对非球型粒子的阻力系数估算一般采用当量球经验公式^[6],由于该公式采用球型率概念,把非球型粒子转换成相应的球型粒子阻力,所以未计及来流角度影响。本文将立方体阻力计算值与该经验公式值做了比较,如图6所示。

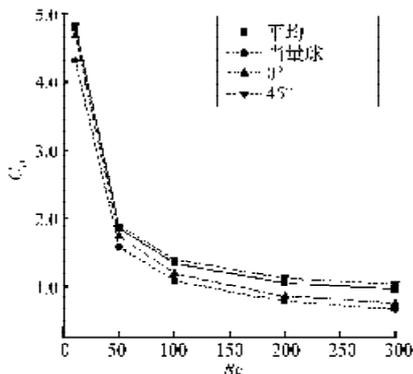


图6 本文计算值与经验公式值的比较

Fig. 6 The comparison of the computational drag coefficient value with traditional formula value

从图6可以看出,当量球的阻力系数值(即经验公式值)最接近于 0° 下立方体的阻力系数计算值,而与立方体阻力系数值各个角度下的算术平均值差别较大,立方体阻力系数值用各个角度下的计算平均值更科学、准确。本文根据计算值拟合出立方体阻力系数公式为: $C_D = 1.3784 +$

$$18.8421Re^{-0.4343} - 4.16054(\ln Re)Re^{-0.4343},$$

其适用范围是雷诺数小于等于300,如图7所示。

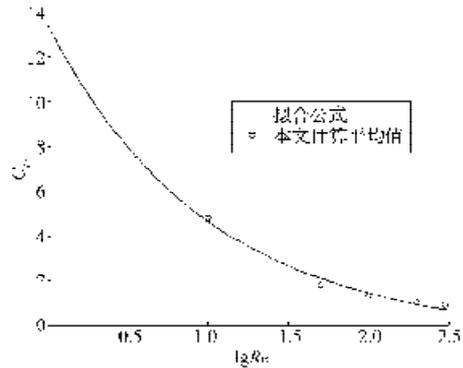


图7 立方体阻力系数拟合曲线

Fig. 7 The fitted drag coefficient formula curve

参考文献:

- [1] 拜格诺 R A. 风沙与荒漠沙丘物理学[M]. 钱宁, 林秉南译. 北京: 科学出版社, 1959: 10-30.
Bagnald R A. Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. Qian Ning, Lin Bingnan Translate. Beijing: Science Press, 1959: 10-30.
- [2] 杨保. 气流中颗粒阻力系数和升力系数的讨论[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 70-76.
Yang Bao. Discussion on Drag Coefficient and Lift Coefficient of Saltation Particles in Air Flow[J]. Journal of Desert Research, 1998, 18(1): 70-76.
- [3] 郑晓静, 王萍. 风沙流中沙粒随机运动的数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 184-188.
Zheng Xiaojing, Wang Ping. Numerical Simulation on Stochastic Movement of Sands in Wind-blown Sand[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 184-188.
- [4] Haider A, Levenspiel O. Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles[J]. Powder Technology, 1989, 58: 63-70.
- [5] Johnson T A, Patel V C. Flow Past a Sphere Up to a Reynolds Number of 300[J]. Fluid Mech., 1999, 378: 19-70.
- [6] Gary H Ganser. A Rational Approach to Drag Prediction of Spherical and Nonspherical Particles[J]. Powder Technology, 1993, 77: 143-152.
- [7] Wilson J D. Trajectory Models for Heavy Particles in Atmospheric Turbulence[J]. Appl. Meteorol., 2000, 39: 1894-1912.