

黏滞液体落球实验的 COMSOL 仿真探索

白云芃¹ 梁莹² 张震² 罗锻斌² 刘海峰¹ 刘程琳¹ 张孟²

(¹ 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; ² 华东理工大学物理学院, 上海 200237)

摘要 随着计算科学的发展, 数字模拟技术被广泛运用于教育领域。在大学物理实验教学中, 通过软件模拟可以更加直观显示实验现象和模拟规律, 得到实验上无法测量的物理量, 从而拓展实验教学的广度和深度。本文利用 COMSOL Multiphysics 软件对落球法测定黏度实验进行模拟分析, 研究了落球法测定黏度实验中的速度场、压力梯度、速度变化和受力图等实验现象。研究发现 COMSOL 软件对实验建模具有很高的精度, 可以有效辅助实验教学和开发, 让学生加深对于物理实验规律的认识, 培养学生数字化运用能力, 从而提升实验教学效果。

关键词 落球法测定黏度实验; COMSOL 仿真模拟; 实验改进

EXPLORATION OF COMSOL SIMULATIONS FOR VISCOUS LIQUID DROP BALL EXPERIMENTS

BAI Yunpeng¹ LIANG Ying² ZHANG Zhen² LUO Duanbin² LIU Haifeng¹ LIU Chenglin¹ ZHANG Meng²

(¹ School of Resource and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237;

² School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract With the development of computing science, digital simulation technology has been widely applied in the field of education. In university physics experiment teaching, software simulations can more intuitively display experimental phenomena and simulate laws, obtaining physical quantities that cannot be measured experimentally, thereby expanding the breadth and depth of experimental teaching. This paper uses COMSOL Multiphysics software to simulate and analyze the viscosity measurement experiment using the falling ball method. It studies phenomena such as the velocity field, pressure gradient, velocity changes, and force diagrams in the viscosity measurement experiment. The research found that COMSOL software provides high accuracy in experimental modeling, effectively assisting experimental teaching and development. This helps students deepen their understanding of the laws of physics experiments, cultivate their digital application skills, and ultimately enhance the effectiveness of experimental teaching.

Key words falling ball method for viscosity determination; COMSOL simulation; experimental improvements

收稿日期: 2024-05-08

基金项目: 2019 年华东理工大学教改项目(80222301901001)2019.01—2022.01; 2020 年华东理工大学教师思政和师德建设研究课题(YK0109002)(重点)2020.09—2022.09; 2022 年中央教改专项-教改(教育部基金 JGV00221001); 2022 年中央教改专项-教育实践(教育部基金 JGV00223001); 2022 年高等学校教学研究项目(DWJZW202225hd); 2022 年高等教育科学研究规划课题(22LK0304, 22LK0403)。

通信作者: 张孟, 华东理工大学物理学院副教授, mzhang@ecust.edu.cn。

引文格式: 白云芃, 梁莹, 张震, 等. 黏滞液体落球实验的 COMSOL 仿真探索[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 181-188.

Cite this article: BAI Y P, LIANG Y, ZHANG Z, et al. Exploration of COMSOL simulations for viscous liquid drop ball experiments[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 181-188. (in Chinese)

流体的黏性是其重要性质之一,由流体内部的切应力产生。落球法是一种常见的用于测定流体黏度的实验方法,在大学物理实验中被广泛使用。已经有很多研究者对该实验条件进行了探究,并改进了实验装置,以提高实验的测量精度^[1-3]。传统的大学物理实验注重培养学生的动手能力和实验设计能力,随着计算技术的发展和教育教学的影响,将数字模拟手段融入物理实验教学中,以加深学生对理论的认识、提高实验设计的严谨性,更好地掌握建立物理模型的方法,已成为当今时代对实验教学的新要求。文献调研表明,目前也有利用诸如 Python、VBA、Matlab 和 Scratch 等计算软件对落球实验进行相关仿真模拟^[4-7]。然而,这些方法仅限于求解小球的运动速度,无法很好地解释小球周围流体的运动特性和动力学图像,而这些信息对于学生理解流体力学至关重要。

COMSOL Multiphysics 软件是一款功能强大、灵活性高的多物理场仿真软件,适用于解决各种工程和科学领域的复杂问题。用户可以根据需要选择特定的物理场进行建模,并根据问题的需求添加或移除其他物理场。该软件还支持用户自定义方程和材料属性,以满足各种模拟需求。目前 COMSOL 软件也已经在物理教学中有所使用^[8]。在本文中,我们利用 COMSOL Multiphysics 软件对落球法测定液体黏度实验进行了数字仿真,求解出了一定范围内的速度场、压力场以及速度随时间变化的曲线。通过这些仿真结果,一方面可以帮助学生进一步理解流场的概念,另一方面,学生也可以参照这些模拟结果,通过改变圆管直径、小球直径和液体黏度等变量来辅助实验设计。利用 COMSOL 软件模拟落球实验具有很高的精度,可以有效辅助实验教学和开发。通过这种数字化仿真手段,学生能够更深入地理解物理实验的规律,并培养数字化运用能力,从而提升实验教学效果。本研究使用的数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 华东理工大学已获得许可,并在此特别鸣谢 COMSOL 公司提供的软件支持。

1 物理原理和模拟方法

小球在圆管液体里的下落运动,可以视为在惯性坐标系下的圆球绕流问题,在速度压力都不太大的情况下,落球的流动由纳维斯托克斯方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mu \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{F} \quad (1)$$

和连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

描述^[9]。其中, ρ 表示密度(kg/m^3), $\mathbf{u}$ 表示速度矢量(m/s), μ 表示黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), p 表示压强(Pa), $\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \nabla \mathbf{u}$ 是速度对时间的全导数, $\mu \Delta \mathbf{u}$ 是黏性力项, ∇p 是压强项, $\mathbf{F}$ 表示小球单位体积元上所受的体积力。图 1 为实验装置与受力分析图。

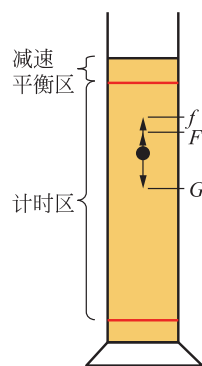


图 1 实验装置与受力分析图

对于实验而言,受力平衡本质上是纳维斯托克斯方程的解析解,当小球达到受力平衡时,小球所受的向上的合力,就是纳维斯托克斯方程中的黏性力和压力之和,体现在小球的受力分析上,即为小球受到了浮力与流动阻力。

依连续性方程(2)可以得到 $\rho \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = 0$, 同时体积力等于小球重力与体积之商 $\mathbf{F} = \rho_{\text{小球}} g$, 压强梯度为 $\rho_{\text{液}} g$, 因此只有黏性力项是需要积分的。在实验中黏性力的表达式由对黏性项的解析得出,模拟计算本质上是对纳维斯托克斯方程求数值解,两者虽然解决问题的方法不同,但所得到的结果是相同的。实验只能对达到平衡时小球受黏性力求解,而模拟计算这一条件将不受限制,这是模拟的优势所在。下面将分别简述实验条件下和模拟中对小球和流体运动的描述。

1.1 实验小球的黏性力求解

将直角坐标系改为球面坐标系,经过一系列变换和对方程的求解最终得到定常流动的黏性力表示为^[10]

$$\begin{aligned} f &= \int_0^\pi \left[\left(-p + \frac{3}{2} \frac{\mu \mathbf{u}}{r} \cos \theta \right) \cos \theta - \frac{3}{2} \frac{\mu \mathbf{u}}{r} \sin^2 \theta \right] \\ &\quad 2\pi r^2 \sin \theta d\theta \\ &= 6\pi \mu \mathbf{u}_0 r \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{u}_0$ 表示平衡速度; θ 是极位夹角; r 为小球半径。代入受力平衡表达式则有

$$mg = \rho_0 g V + 3\pi\mu\mathbf{u}_0 d \quad (4)$$

其中, d 为小球直径。此时可以求得黏度的表达式为

$$\mu = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18\mathbf{u}_0} \quad (5)$$

由于斯托克斯公式的条件是无限广延的液体运动情形,但这种情况在实验室条件中不可能出现,因此实验进行了适当的修正。考虑管壁影响黏度计算式为

$$\mu = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18\mathbf{u}_0 \left(1 + K \frac{d}{D}\right)} \quad (6)$$

其中, K 的值通常取 2.4^[11]。

利用黏度表达式可以通过实验测出液体的黏度,在模拟中可以用来与模拟结果相互验证。

1.2 模拟中流场的受力分析

COMSOL 软件通过对颗粒表面应力张量的法向分量求积分,求解纳维斯托克斯方程,进而来计算蓖麻油对小球施加的体积力与质量力。由于模型是轴对称的,小球垂直沉降,因此只有力的竖直方向非零,因而小球受到的阻力 F_z 可表示为^[12]

$$F_z = 2\pi \int_0^s r \mathbf{n} \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] \mathrm{d}s \quad (7)$$

其中, r 是径向坐标, $\mathbf{n}$ 是砂粒表面的法向矢量。

除此之外模拟时需要对初始条件和边界条件进行设置。小球由原点静止释放因此可得初始条件为: $x_0 = u_0 = 0$ 。

由于采用了惯性坐标系,小球是相对参考系静止的,因此小球表面由无滑移壁条件来描述。依固液耦合的边界条件,在小球表面流体相对于小球的速度为零。在流体域的入口处,速度等于沉降速度。

在管壁处,由于模型是轴对称的,因此法向速度和切向剪切应力都为零。此外,采用 $\mathbf{n} \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] = 0$ 描述出口条件,即出口是不受黏性力与压力的,这样可以使计算结果收敛。

2 COMSOL 模型的建立

模型是物理研究的必要途径,合理地建立模

型就是要抓住影响物体运动的主要因素。在模拟的过程中,为了减少计算量,需要合理地简化模型。本模拟采用如下方式简化:

(1) 采用相对运动的方式,即认为小球是不动的,小球周围的流场具有速度。用达到平衡时的流体速度代替小球的最终速度。

(2) 采用轴对称接口,建立二维模型,再进行旋转的方式来建立三维模型,这样减少了计算量,加快了解算效率。

由于本实验的雷诺数较小,为了简化计算,本模拟采用了 COMSOL 软件的层流模型,与描述颗粒力平衡的常微分方程相耦合。由于蓖麻油的黏度受温度影响较大^[13],也受放置时间影响较大^[14],因此在参数方面,蓖麻油的黏度和密度均由查表来确定。即通过实验查表来确定蓖麻油的黏度,再通过求解最终速度的方法来与实验中小球的下落速度互证,验证模型的可靠性。需要说明的是,查表得蓖麻油黏度和密度与参考书中^[15]的黏度和密度吻合较好。表 1 明确了模拟的变量。

表 1 模型物性参数值表格

名称	取值
蓖麻油密度	963 kg/m ³
蓖麻油动力黏度	1.42 Pa · s
小球半径	7.5 × 10 ⁻⁴ m
小球体积	1.767 × 10 ⁻⁹ m ³
小球密度	7830 kg/m ³
小球质量	1.384 × 10 ⁻⁵ kg
小球受到的重力	-1.357 × 10 ⁻⁴ N
直管的半径	49.37 mm

计算方面先选取层流模型,在流体密度和黏度一栏中输入相关物性参数。接着添加体积力计算模块,输入小球质量与体积即可计算出小球的体积力。然后添加两个全局方程,分别将小球的速度全局方程和受力方程输入,并给出相应的初始条件。接着,依次设置小球的壁面,流体的进出口和管壁的条件,其中无滑移壁面可以直接选择,滑移壁面需要将相应方程输入。

利用 COMSOL 软件建立几何模型,采用三角网格划分即可得到几何建模及网格剖分(图 2),由于直管半径已经参数化处理,因此后续模拟不同直管的半径只需要改变参数即可。真实实验中直管的半径已经标示在实验器具上。

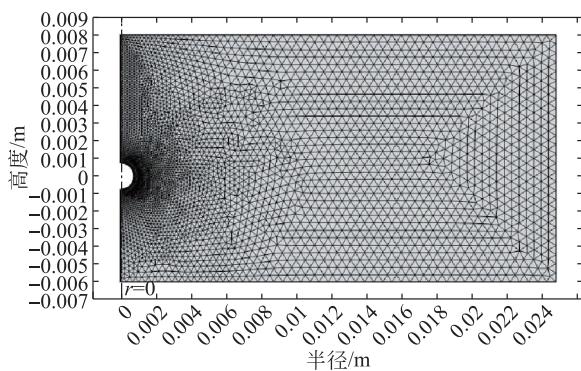


图2 建模及网格剖分

3 模拟结果

将求解器条件设置为:步长为 0.0001s ,求解 0.04s ,经过 COMSOL 软件自带的绘图系统处理,可以得到落球法流场模拟的速度场、压力梯度、速度变化曲线、合力曲线。同时模拟可以非常容易地对实验的条件进行任意的改变,通过改变不同的管径、小球的直径和不同黏度的液体可以很好地对实验进行探究。

3.1 流场模拟的结果

3.1.1 速度场的模拟

就落球法实验而言,雷诺数小于 2 是保证斯托克斯公式成立的条件,通过 COMSOL 软件的后处理器进行绘图得到的流场结果可以看出雷诺数小于 2 时流场是十分稳定的。这也解释了实验中采用的小球直径要小,被测的液体黏度要大的原因。

图 3 的横纵坐标表示建模体旋转绘图后的尺寸,即圆管的几何特征,右侧的色标表示当前小球相对壁面的移动速度,依次从 0mm/s 到 6mm/s 。在 $t=0\text{s}$ 时,如图 3(a)所示,小球静止释放相对流体运动速度为 0m/s 。随着时间的改变,图中颜色逐渐向红色靠拢,表明速度不断增大,在约 0.02s 时即达到最终速度。由小球速度分布图可知,小球下落不会产生湍流,也不会产生涡。整体速度场极为稳定,满足了雷诺数严格小于 2,保证了斯托克斯公式的应用范围。

3.1.2 流场压强的模拟

流体力学中认为等压线均匀分布时,流场较为稳定,通过小球的受压力图可以从受力角度理解流场的稳定性。利用 COMSOL 软件作图得到等压线图(图 4),其中横纵坐标表示模型的尺寸,右侧色标表示压强(单位为 Pa)。由压力分布图可知,整个过程中流场内的压力几乎只与所处的深度有关,此条件下流场压力类似于静压梯度分布,这从另一个侧面证明了该系统的稳定性。

3.1.3 小球的速度变化图和受力图

利用 COMSOL 软件可以绘制出小球的速度变化图和受力变化图。其中速度变化图的横坐标为时间,纵坐标为轴线最下端点的速度;受力变化图纵坐标为小球受到的重力、阻力与合力。通过速度与时间的关系可以预估实验仪器上预留的小球加速的距离是否足够,从而辅助线下实验设计和仪器开发。

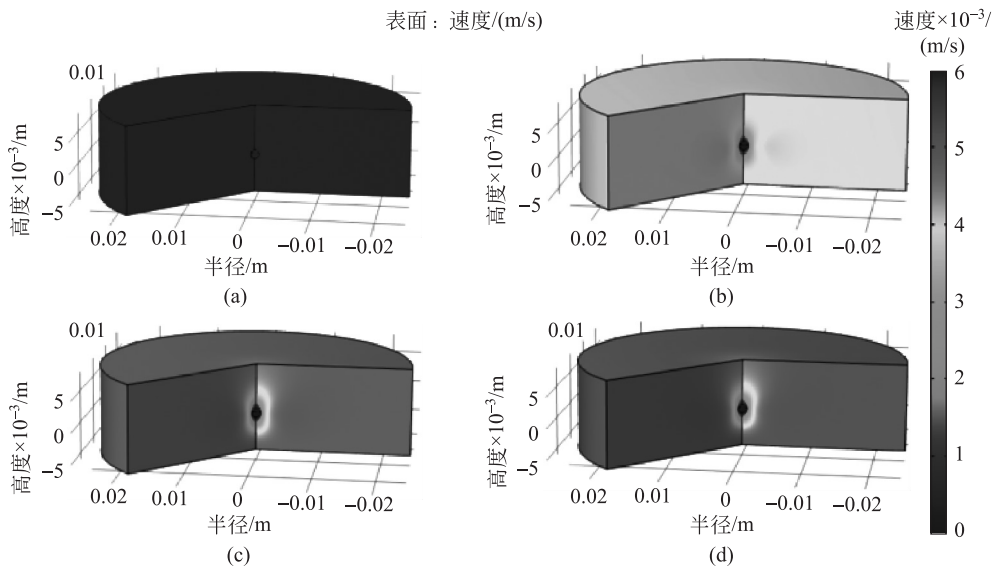


图3 三维速度场随时间变化图

(a) 时间=0s; (b) 时间=0.002s; (c) 时间=0.005s; (d) 时间=0.01s

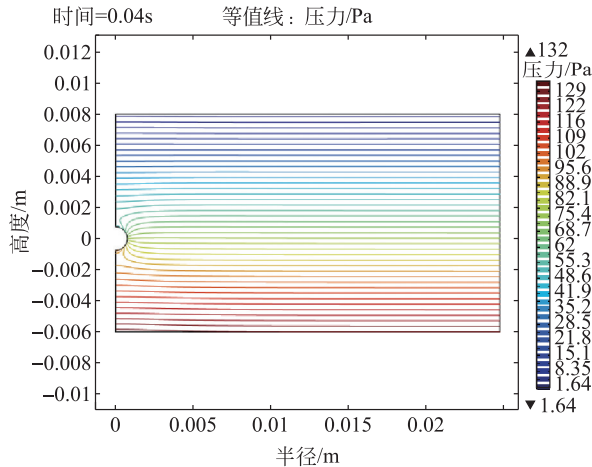


图4 流场的压力分布图

由图5可知小球在约0.02s就达到了匀速运动。将COMSOL软件中的数据导出到Origin软件中进行绘图,由于纵轴为速度横轴为时间,可通过积分工具计算出速度与时间曲线下面的面积为0.096,即下落距离为0.096mm。由此可见,小球到达红线之前就已经达到了速度平衡。由图6可知小球阻力(黑色曲线)随时间逐渐增大,直至与重力相等,这时小球的合力为0。

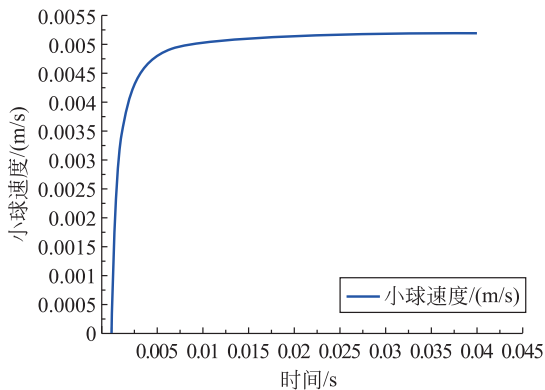


图5 小球速度随时间的变化曲线

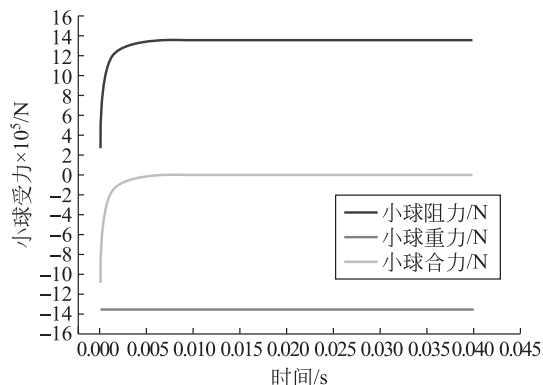


图6 受力曲线

3.2 对不同实验条件的探究

本模型除了对实验进行模拟,还可以设置小球的半径和液体的种类不变,改变管的直径,探索管的直径粗细对落球速度的影响。

3.2.1 小球终速度随管直径变化的影响

在COMSOL软件中重新建模改变管直径参数,此处选择5mm、10mm、15mm、25mm、50mm 5种直径,计算后导出其速度时间数据,绘制为图7,可得到在管直径为5mm、10mm、15mm、25mm、50mm条件下,终速度依次增大,这与实验表达式相符。

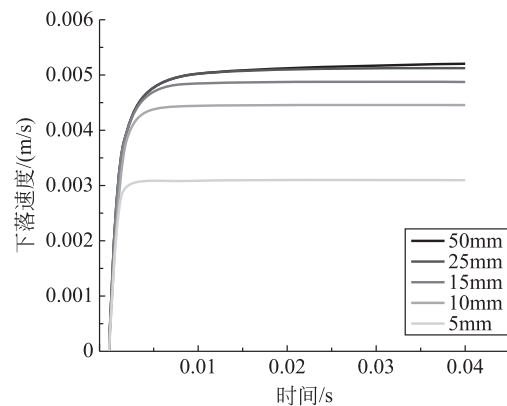


图7 不同圆管直径下小球的最终速度对比

由于表达式可以简化为

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{A} + \frac{Kd}{AD} \quad (8)$$

$$A = \frac{gd^2(\rho - \rho_0)}{18\mu} \quad (9)$$

利用圆筒直径的倒数对速度倒数作图(图8),可以得到在圆管50mm到6mm的范围内, A^{-1} 和 Kd/A 的计算值与作图值误差为2%,此时采用 $K=2.4$ 可以很好地描述速度与圆管直径的关系。

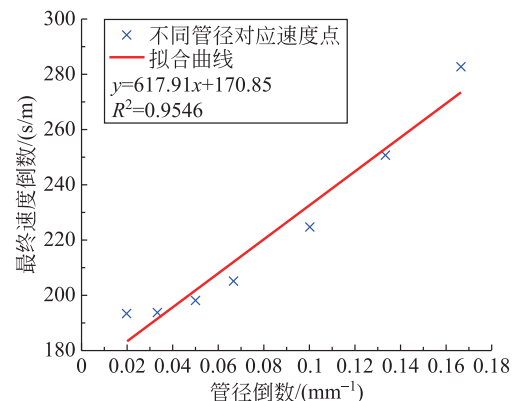


图8 对管径修正系数的讨论

通过调查实验室的圆管一般会在 $10 \sim 50 \text{ mm}$ 的范围内,可以满足经验公式,但是如果取得更精确的黏度结果,在实验时应再次测定经验系数 K 。有些实验教材也会采用雷诺数修正和圆管直径的二次修正,并得到了更好的结果^[16]。

3.2.2 不同密度的液体对实验影响

保持小球的直径 1.5 mm 、管的直径 13.17 mm ,将液体改变为水,即在软件中调整密度为 998.2 kg/m^3 、动力黏度为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。对于水而言,黏度偏小,对小球的黏滞力减小,达到速度平衡的时间较长,因此解算时间为 0.4 s ,步长设为 0.001 s 。

分别绘制出蓖麻油和水的速度矢量图 9、图 10,可知在达到平衡时,小球与水的系统中,小球的最终速度约为 0.55 m/s ,远远大于蓖麻油中的 0.01 m/s ,同时小球尾部产生了明显的涡,流场等稳定性远不及蓖麻油。此时雷诺数已经大于 2,不再属于斯托克斯区,综上所述,因此落球法无法测定水的黏度。

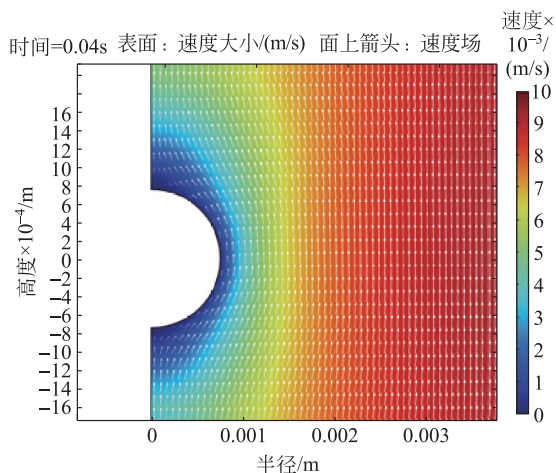


图 9 蓖麻油的速度矢量图

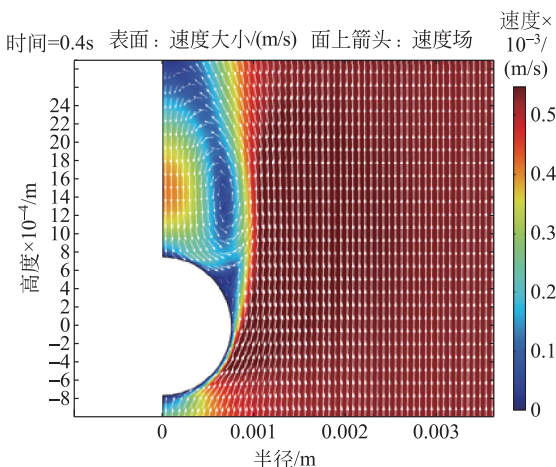


图 10 水的速度矢量图

3.2.3 不同直径小球对实验影响的模拟

保持液体的性质不变,圆管的直径不变,改变小球的直径依次为 1.5 mm 、 2 mm 、 3 mm 、 4 mm 、 5 mm ,分别得到速度与时间的曲线(图 11),可知在此种情况下,小球直径对于该实验的影响相对较小,适当地增大直径,对实验的结果影响较小。

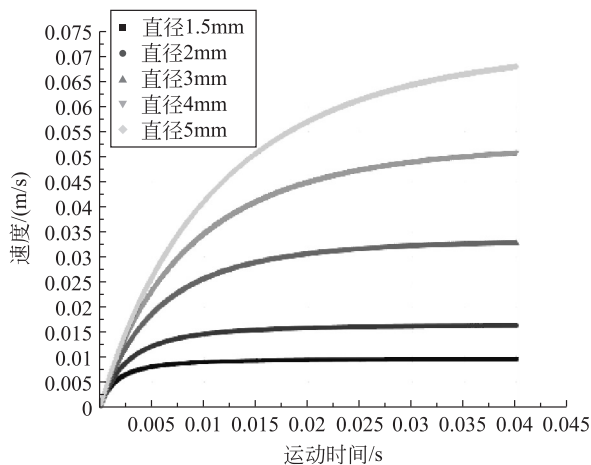


图 11 不同直径小球的速度时间图

4 实验对比

COMSOL 软件模拟和实验室真实情况下结果做了对比。实验室中利用 1.5 mm 的小球,在室温 17.5°C 的蓖麻油液体中对不同管径 d 的圆管进行实验,小球下落高度为 180 mm 。每个管径测试 5 次时间并取平均值 T ,计算小球下落速度 v 、计算黏度 μ ,与模拟速度 v_0 进行对比并计算误差 σ 得到表 2。

表 2 实验数据与理论数据验证

T/s	d/cm	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$v/(\text{mm/s})$	$v_0/(\text{mm/s})$	$\sigma/\%$
33.686	49.37	1.467	5.343	5.177	9.3
33.953	39.02	1.452	5.301	5.176	9.2
34.136	31.24	1.430	5.273	5.168	9.2
34.692	23.53	1.406	5.189	5.115	9.1
36.962	18.99	1.452	4.870	5.026	8.7
38.160	13.17	1.400	4.717	4.766	8.9

如表 2 所示,计算的终速度与小球的实验速度误差在 10% 以内。通过分析,误差主要由以下几个原因导致,首先是蓖麻油的密度测量并不准

确,蓖麻油的密度随温度变化较大,存在读数误差。其次是实验室中小球下落的时间由肉眼观测,导致有较大的误差。此外,实验室中小球并非完美的球形以及螺旋测微器对小球直径的测量误差同样会产生较大影响。以上原因综合导致了实验与模拟之间的误差。正因为如此,更体现COMSOL数值模拟的教学价值,帮助学生理解流场的分布情况,分析实验误差原因,以及辅助实验设计和改善。

5 总结与讨论

本文利用COMSOL Multiphysics软件对落球法测定黏度实验进行了建模仿真,在模拟中求出了速度场、压力分布图,速度时间图,受力图以及探究了圆管直径、小球直径和液体黏度对于小球终速度的影响。通过结果可以看出在蓖麻油和小直径小球的条件下,整个流场分布稳定,不会产生涡,压力梯度基本上只与液体的深度有关,相当于静压环境。不同的圆管直径会对小球的最终速度产生影响,但是当圆管直径变化不大的时候,对小球的终速度影响也较小。

通过COMSOL的仿真模拟可以很清晰地揭示小球周围流体运动的规律,让学生更好地了解落球实验的流场分布,更深刻地理解场的稳定性这一概念,在黏度大的液体中小球附近形成了明显的边界层,有较为平缓的速度梯度。数值仿真还揭示了一些实验中可能未曾注意到的现象,如在低黏滞系数下小球的非线性运动行为,这为学生理解流体的复杂性提供了直观的依据。

数值仿真结果不仅验证了理论分析的准确性,还为具体实验提供了有益的指导。通过仿真,我们可以预先预测不同黏滞系数下小球的运动轨迹和最终速度,模拟可以对不同流体,不同直径的小球甚至不同形状(柱形、碟形)的小球进行实验,从而优化实验条件,减少实验次数和成本,解决了实验的局限性。此外,初步探究表明,不同类型的液体,对于该实验的影响较为显著,而小球的直径的略微放大,对实验的影响较小。

经过实验验证,本实验的模拟结果与真正的实验速度相差在10%左右,综合模型的结果认为该流体力学模拟的吻合度较高。COMSOL Multiphysics可以将做好的模型导出为应用程序格

式,未来可以进一步开发相关的App,以辅助实验设计和开发。

参 考 文 献

- [1] 秦之斌,李嘉蕊,张斯,等. 基于传感器的液体粘滞系数测量装置设计[J]. 大学物理实验, 2022, 35(3): 75-80.
QIN Z B, LI J R, ZHANG S, et al. Design of a sensor-based liquid viscosity coefficient measurement device[J]. Physical Experiment of College, 2022, 35(3): 75-80. (in Chinese)
- [2] 董大兴,洪涵真,尤建军,等. 落球法测定液体粘滞系数实验仪的一点改进[J]. 大学物理实验, 2020, 33(4): 49-51.
DONG D X, HONG H Z, YOU J J, et al. An improvement on the experimental apparatus for measuring the liquid viscosity coefficient using the falling ball method[J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(4): 49-51. (in Chinese)
- [3] 郭晓春,吴佳琪,曹萍萍,等. 基于多激光光电门的液体黏度测量[J]. 大学物理, 2021, 40(8): 40-44.
GUO X C, WU J Q, CAO P P, et al. Measurement of liquid viscosity based on multiple laser photoelectric gates[J]. College Physics, 2021, 40(8): 40-44. (in Chinese)
- [4] 李慧静,刘万嘉,龙亿洋,等. Python在液体粘滞系数测量与分析中的应用[J]. 大学物理实验, 2023, 36(2): 112-117.
LI H J, LIU W J, LONG Y Y, et al. Application of Python in the measurement and analysis of liquid viscosity coefficient[J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(2): 112-117. (in Chinese)
- [5] 李宫晟,张鹏,苏关东,等. VBA程序设在落球法测液体粘滞系数实验中的应用[J]. 大学物理实验, 2017, 30(4): 89-93.
LI G S, ZHANG P, SU G D, et al. Application of VBA programming in the experiment of measuring liquid viscosity coefficient using the falling ball method[J]. Physical Experiment of College, 2017, 30(4): 89-93. (in Chinese)
- [6] 刘毅恒,陈一凡,盛文博,等. 基于Matlab GUI落球法测液体黏度的虚拟仿真设计[J]. 大学物理, 2023, 42(3): 55-60, 65.
LIU Y H, CHEN Y F, SHENG W B, et al. Virtual simulation design for measuring liquid viscosity using the falling ball method based on Matlab GUI[J]. College Physics, 2023, 42(3): 55-60, 65. (in Chinese)
- [7] 吴庆丰,郑朝丹,代国红,等. 利用Scratch软件实现落球法测量液体粘滞系数实验的仿真[J]. 大学物理实验, 2020, 33(2): 45-48.
WU Q F, ZHENG Z D, DAI G H, et al. Simulation of measuring liquid viscosity coefficient using the falling ball method with Scratch software[J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(2): 45-48. (in Chinese)
- [8] 李春熠,胡安琦,张格格,等. COMSOL仿真的声波谐振管实验中的应用[J]. 大学物理, 2022, 41(11): 58-64, 76.

- LI C Y, HU A Q, ZHANG G G, et al. Application of COMSOL simulation in the acoustic resonance tube experiment[J]. College Physics, 2022, 41(11): 58-64, 76. (in Chinese)
- [9] 李伟锋, 刘海峰, 龚欣. 工程流体力学[M]. 2版. 上海: 华东理工大学出版社, 2016.
- LI W F, LIU H F, GONG X. Engineering fluid mechanics (Second Edition)[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [10] 张兆顺, 崔贵香. 流体力学[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- ZHANG Z S, CUI G X. Fluid mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [11] 张兆奎, 缪连元, 张立, 等. 大学物理实验[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- ZHANG Z K, MIAO L Y, ZHANG L, et al. Physical experiment of college (Fourth Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)
- [12] COMSOL Multiphysics. Terminal falling velocity of a sand grain[J/OL]. (2021-11-06)[2024-08-27]. <http://cn.comsol.com/model/terminal-falling-velocity-of-a-sand-grain-983>.
- [13] 乔辉, 张军善. 蓖麻油粘度随温度变化关系的理论分析与研究[J]. 大学物理实验, 2015, 28(1): 32-34.
- QIAO H, ZHANG J S. Theoretical analysis and research on the relationship between the viscosity of castor oil and temperature[J]. Physical Experiment of College, 2015, 28(1): 32-34. (in Chinese)
- [14] 李晨浩, 韦帅兵, 罗钧洋, 等. 环境对蓖麻油粘滞系数的影响研究[J]. 科学技术创新, 2021(5): 18-20.
- LI C H, WEI S B, LUO J Y, et al. Study on the influence of environment on the viscosity coefficient of castor oil[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(5): 18-20. (in Chinese)
- [15] 沙振舜. 当代物理实验手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- SHA Z S. Modern physics experiment manual[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 高德文, 李蕾, 赵英. 落球法测量液体黏度的实验研究[J]. 大学物理, 2016, 35(9): 16-19.
- GAO D W, LI L, ZHAO Y. Experimental research on measuring liquid viscosity using the falling ball method[J]. College Physics, 2016, 35(9): 16-19. (in Chinese)

(上接第 167 页)

该装置是力学、电磁学及电子技术知识的综合实践应用, 集成度低, 成本低。该方法不仅丰富了黏滞系数测量方案, 也有助于学生加深流体黏滞性和振动原理的理解, 比较适用于实验室开展教学实验。

注: 文章内容根据作者参加 2021 年全国大学生物理实验竞赛(创新)作品整理, 作品在竞赛中获得一等奖。

参 考 文 献

- [1] 刘子臣. 大学基础物理实验(力学, 热学及分子物理学分册)[M]. 2版. 天津: 南开大学出版社, 2005: 205-217.
- [2] SEETON C J. Viscosity-temperature correlation for liquids[C]//Proceedings of the International Joint Tribology Conference. San Antonio, TX, 2006: 131-142.
- [3] CHRISTEN M. Air and gas damping of quartz tuning forks[J]. Sensors and Actuators, 1983, 4: 555-564.
- [4] 陈惠钊. 粘度测量(修订本)[M]. 北京: 中国计量出版社, 2002. 12: 117-122.
- [5] 王洪伟. 我所理解的流体力学[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2020: 171-180.
- [6] YANG W A, ZHOU G, GONG K, et al. The numeric calculation for cylindrical magnet's magnetic flux intensity[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 40(3): 227-235.
- [7] 庄礼贤, 尹协远, 马晖扬. 流体力学[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 1991: 138-141.
- [8] 刘聪. 基于柔性铰链的液体粘度测量系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [9] ESTEBAN B, RIBA J-R, BAQUERO G, et al. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils[J]. Biomass and bioenergy, 2012, 42: 164-171.
- [10] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2010. 57-67.
- [11] 陈莹梅, 陆申龙. 音叉的共振频率与双臂质量的关系研究及应用[J]. 物理实验, 2006, 26(7): 6-9.
- CHEN Y M, LU S L. Study on the Relationship between the resonant frequency of tuning fork and the mass of both arms and its application[J]. Physical Experiment, 2006, 26(7): 6-9. (in Chinese)