

高雷诺数下的圆柱绕流问题——以蜡烛燃烧为例

罗 芸¹, 王晓宁¹, 赵旭阳¹, 孟德忠^{2,3}, 郝会颖²

(1. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京) 数理学院, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京) 郑州研究院, 河南 郑州 450006)

摘要: 本文针对高雷诺数下的圆柱绕流问题, 以火焰熄灭为例进行了相关的实验研究. 结果表明在一定范围内, 火焰熄灭时间与障碍物直径、蜡烛与障碍物之间的距离、蜡烛燃烧速率成正比关系, 与气流流速成反比关系. 通过分析发现实验数据与理论分析一致, 说明了文章的实验方法可行、结论正确, 为深入研究圆柱绕流、火焰燃烧问题及二者之间的联系提供了重要支撑.

关键词: 圆柱绕流; 高雷诺数; 蜡烛燃烧; 灭火

中图分类号: O 357.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-0712(2022)02-0071-06

【DOI】 10.16854/j.cnki.1000-0712.210138

圆柱绕流是一个经典的流体力学问题, 对该现象的基础理论研究对于解决具体的工程问题具有重要的指导意义. 例如, 水流对桥梁、海上运输管线的作用, 风力对高空电缆、高塔设备的作用等问题中, 圆柱绕流问题都有着重要的工程应用背景. 因此, 对圆柱绕流问题进行深入研究, 不仅具有重要的理论意义, 还具有明显的社会经济价值. 关于圆柱形障碍物后气流如何流动的问题, 前人已经进行了深入的研究. Gabbai 等总结了圆柱涡激振动的数值和实验模拟结论^[1]; Williamson 等不仅总结了二维圆柱绕流动力学领域的研究, 并且利用 PIV 技术对静止和振动圆柱绕流进行了实验研究, 分析了尾涡的形成机理^[2,3]; Alam 等在相同直径并列双圆柱的实验研究中得到了双柱在不同间距时升力及流动结构的变化趋势^[4]; 姚熊亮等在相同直径串列双圆柱的模拟中研究了高雷诺数下双柱在不同间距比时的压力分布、阻力、升力及 St 数随雷诺数的变化趋势^[5]; Jester 等对串、并列双圆柱的绕流都进行了模拟, 研究了两圆柱在不同间距时的受力和尾涡状态, 并分析了两个圆柱相对位置的改变对彼此流动的影响^[6]; Zhao 等通过研究两个不同直径圆柱的绕流情况得到了小圆柱与主圆柱之间间隙比、小圆柱角度和小圆柱直径发生改变时的力系数、压强分布以及漩涡脱落结构的变化情况^[7,8]. 何颖等人研究了不

同雷诺数条件下旋转效应对旋涡脱落和尾部湍流产生的影响^[9]. 以上的研究内容重点分析了不同复杂条件下气流绕流的形成机制问题, 但关于绕流气流对障碍物后可燃物燃烧情况影响规律的研究却鲜有报道.

本文在前人研究结果的基础上进一步探究了绕流气流对障碍物后物质燃烧情况的影响规律. 针对灭火过程中有障碍物阻挡的问题, 建立圆柱绕流模型, 以蜡烛为火源探究了不同条件下圆柱绕流现象对障碍物后物质燃烧情况的影响. 针对此问题的研究结果可为有障碍物情况下的灭火场景提供理论支撑并运用于实际.

1 理论分析

针对绕流气流对障碍物后物质燃烧的分析可以采用如图 1 所示的物理模型, 当气流、圆柱形瓶子、燃烧的蜡烛在同一轴线位置时, 为什么在瓶子后燃烧的蜡烛会被瓶子前的气流吹灭, 仿佛瓶子根本就不存在呢? 这涉及到两个方面的问题, 一是气流如何绕过瓶子, 二是蜡烛如何被气流吹灭.

1.1 圆柱绕流

对于黏性流体, 在直角坐标系下, 其运动规律可用 N-S 方程来描述, 而该连续性方程如式(1)所示, 该动量方程如式(2)所示^[10,11].

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-06-22

基金项目: 北京市自然科学基金(3214052)以及中央高校基本科研业务费项目(2652019109)资助

作者简介: 罗芸(2002—), 女, 湖南邵阳人, 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院 2019 级本科生

通信作者: 孟德忠, E-mail: mdz604@163.com

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

其中 u_i 为速度分量, P 为压力, ρ 为流体的密度, ν 为流体的动力黏度.

对于定常流的不可压缩的无黏流体, 将 N-S 方程进行化简得伯努利方程为

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (3)$$

其中 P_1, v_1, h_1 分别为点 D_1 处的压强、流速和高度, P_2, v_2, h_2 分别为点 D_2 处的压强、流速和高度, ρ 为流体密度, g 为重力加速度.

根据伯努利方程可以推导出在同一条流线上流速大的地方压力小. 当流体与它流过的物体表面之间存在表面摩擦时(也可以说是流体黏性), 只要曲率不大, 流体就会顺着该物体表面流动. 根据牛顿第三定律, 物体施与流体一个偏转的力, 则流体也必定要施与物体一个反向偏转的力. 这种力在轻质物体上体现得非常明显, 称为康达效应, 即流体(水流或气流)有偏离原本流动方向, 改为随着凸出的物体表面流动的倾向^[12], 而流体绕过障碍物后的运动状况则需根据具体情况求解.

对于二维圆柱低速定常绕流现象, 流型只与雷诺数有关, 其具体的变化情况如表 1 所示.

表 1 不同雷诺 (Re) 数范围内的单柱绕流尾流形态^[13-15]

Re 数范围	流动现象及旋涡脱落状态
$Re < 5$	流动不发生分离, 没有旋涡产生
$5 \leq Re < 40$	流动从两侧分离, 在圆柱下游形成由两个对称驻涡组成的回流泡
$40 \leq Re < 150$	流动从两侧分离, 形成交替脱落的旋涡, 并保持层流状态
$150 \leq Re < 300$	旋涡内部开始由层流向湍流转换, 分离前边界层处于层流状态
$300 \leq Re < 3 \times 10^5$	整个涡街逐渐完全转变为湍流状态, 分离前边界层仍处于层流状态
$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$	分离前的边界层为湍流, 尾迹变窄, 旋涡脱落没有规律
$3.5 \times 10^6 \leq Re$	湍流涡街重新出现

对于理想流体, 其压强分布呈对称性, 所以圆柱不受升力及阻力. 而对于实际流体, 存在黏性, 则有边界层分离, 形成圆柱的阻力, 阻力大小与分离点

有关.

根据流体的圆柱绕流模型, 本文建立了圆形瓶子障碍下蜡烛熄灭模型, 如图 1 所示. 其中影响蜡烛熄灭的参数如下: ① 蜡烛的发热量 Q ; ② 环境风速 U_w ; ③ 障碍物的特征长度; ④ 蜡烛与障碍物之间的间距 S . 通过量纲分析可得到方程式 (4):

$$\frac{U_w}{\sqrt{gH}} = fcn \left[\frac{Q}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g} d^{\frac{5}{2}}}, \frac{H}{S}, \frac{H}{\varphi} \right] \quad (4)$$

其中 ρ_∞ 为空气密度, 取 1.21 kg/m^3 , C_p 取 $1.005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, T_∞ 为环境温度, 取 300 K , g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 , d 为蜡烛直径, H 为出风口高度.

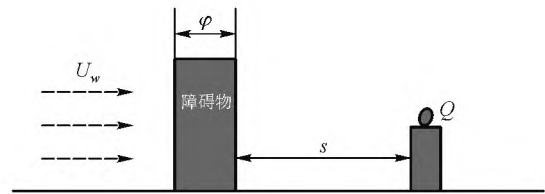


图 1 圆柱绕流的简化模型

1.2 蜡烛熄灭原因

在气流绕过圆柱到达蜡烛处时, 火焰产生振荡和湍流, 在风的剪切下火焰破碎, 燃料被吹走, 产热量减少. 当 $Q_{\text{放}}$ 小于 $Q_{\text{吸}}$ 时, 蜡烛周围温度不断降低直至燃点以下, 导致蜡烛熄灭. 假设蜡烛及其周围空气构成的系统的温度从蜡烛稳定燃烧降低至蜡烛燃点时, 系统释放热量为 α . 蜡烛燃烧单位时间产热为 β , $\beta = q \frac{dm}{dt}$ (q 为蜡烛热值, 用石蜡热值近似代替, 约等于 $43\,000 \text{ kJ/kg}$), 气流单位时间内吸热为 γ , 则单位时间内系统热量减少为 $\gamma - \beta$, 则系统降至燃点所需时间 $t = \frac{\alpha}{\gamma - \beta}$.

2 实验

2.1 实验装置设计

本文选择玻璃材质的圆柱体作为障碍物, 选择蜡烛作为火源, 分别设置蜡烛火源功率、气流流速、障碍物直径、蜡烛与障碍物之间间距为自变量, 选择蜡烛火焰被风吹灭的时间作为因变量, 进行进一步探究.

本文选定 A、B、C 三种蜡烛, 蜡烛燃烧速率分别为 $0.001\,84 \text{ g/s}$ 、 $0.001\,75 \text{ g/s}$ 、 $0.001\,78 \text{ g/s}$, 测量能将蜡烛火焰吹灭的最小流速及其他因素对蜡烛火焰

熄灭时间的影响,以得到更普适性的结论.本文利用剪辑软件以更精确地确定蜡烛火源熄灭时间,利用风速仪测量流速.所有实验均在干燥环境中进行,周围温度均为室温.

2.2 探究火焰熄灭时的气流最小流速

本文进行了实验研究,以验证导致蜡烛熄灭的主要原因,并对蜡烛火焰熄灭时的最小气流流速进行探究.

让蜡烛火焰熄灭的气流最小流速应为单位时间内气流吸热恰好等于蜡烛产热时的临界流速,对于不同种类的蜡烛,存在不同的临界流速.而在到达蜡烛处的气流流速小于该临界流速时,实验结果无意义.为探究该临界流速,我们选择A、B、C三种蜡烛,不断改变气源流速以改变到达蜡烛处的气流流速,利用风速仪测量到达蜡烛处气流流速.

通过多次测量发现,能让蜡烛A火焰熄灭的平均气流最小流速小于0.3 m/s,能让蜡烛B火焰熄灭的平均气流最小流速小于0.2 m/s,能让蜡烛C火焰熄灭的平均气流最小流速小于0.2 m/s.由于风速仪精度的限制,该临界流速无法进一步确定.但由于给出了临界流速的上界,因而对于后续的实验研究仍具有一定意义.让蜡烛火焰熄灭的气流最小流速受到蜡烛燃烧速率的直接影响,同时,该气流最小流速还会因蜡烛燃烧时火焰周围固态蜡形状的改变而改变.

2.3 不同变量对火焰熄灭时间的影响

2.3.1 到达障碍物处气流流速对火焰熄灭时间的影响

在实验中,为探究到达障碍物处气流流速对蜡烛火焰熄灭时间的影响,提供到达障碍物处气流流速分别为2.0 m/s、2.5 m/s、3.0 m/s、3.5 m/s、4.0 m/s、4.5 m/s,固定蜡烛与障碍物之间距离为50 mm,选择障碍物直径分别为18 mm、25 mm、60 mm、82 mm,以分别探究不同障碍物直径下到达障碍物处流速对火焰熄灭时间的影响.通过图2可知,对于直径越大的障碍物,到达障碍物处流速改变对火焰熄灭时间影响越明显,且总体而言火焰熄灭时间与到达障碍物处流速成反比关系.

2.3.2 障碍物直径对火焰熄灭时间的影响

障碍物直径的大小很大程度上影响了气流的方向及分布,因此本文进行了相关实验,以探究障碍物直径对火焰熄灭时间的影响.

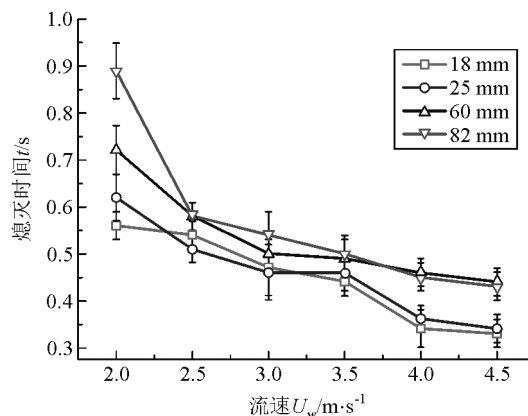


图2 障碍物不同直径时到达障碍物处流速对火焰熄灭时间的影响

在实验中,为探究障碍物直径对火焰熄灭时间的影响,提供障碍物直径分别为18 mm、25 mm、60 mm、82 mm,固定蜡烛与障碍物之间距离为50 mm,选择流速分别为2.0 m/s、2.5 m/s、3.5 m/s、4.0 m/s、4.5 m/s,以分别探究不同流速下障碍物直径对火焰熄灭时间的影响.通过图3可知对于到达障碍物处流速越小的情况,障碍物直径改变对火焰熄灭时间影响越明显,且火焰熄灭时间与障碍物直径成正比关系.但是当流速 ≥ 2.5 m/s,障碍物直径 ≥ 60 mm时,障碍物直径改变对火焰熄灭时间几乎无影响,这可能是因为在在此条件下,绕过障碍物后的气流速度达到了熄灭蜡烛火焰的阈值.

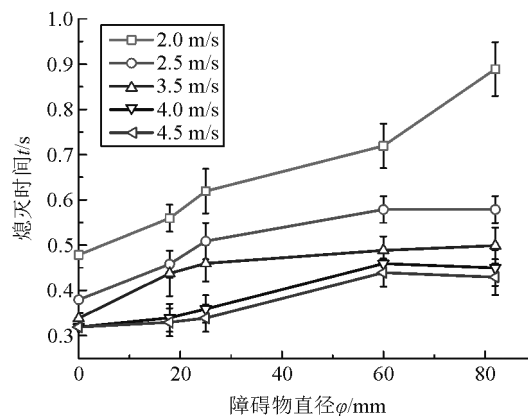


图3 不同流速下障碍物直径对火焰熄灭时间的影响

2.3.3 障碍物与蜡烛之间距离对火焰熄灭时间的影响

障碍物与蜡烛之间的距离是影响蜡烛火焰熄灭的另外一个原因,本文进行了相关实验,以探究障碍物与蜡烛之间距离对火焰熄灭时间的影响.

在实验中,为探究蜡烛与障碍物之间距离对火焰熄灭时间的影响,提供蜡烛与障碍物之间距离为 50 mm、100 mm、150 mm、200 mm,固定障碍物直径为 60 mm,选择流速分别为 2.0 m/s、3.0 m/s、4.0 m/s、4.5 m/s,以分别探究不同流速下蜡烛与障碍物之间距离对蜡烛火焰熄灭时间的影响.通过图 4 可知对于到达障碍物处流速越小的情况,蜡烛与障碍物之间距离改变对蜡烛熄灭时间影响越明显,且总体而言火焰熄灭时间和蜡烛与障碍物之间距离成正比关系.

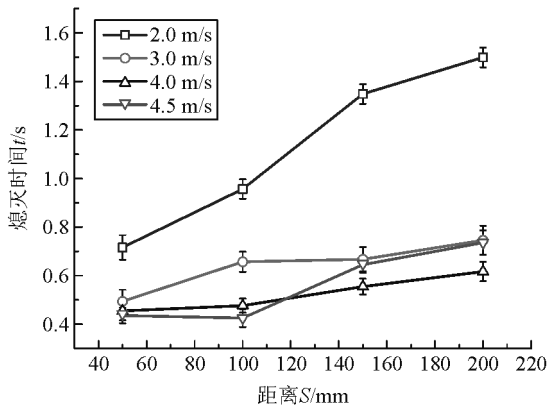


图4 不同流速下蜡烛与障碍物之间距离对火焰熄灭时间的影响

2.3.4 蜡烛燃烧速率对火焰熄灭时间的影响

为了进一步研究蜡烛本身燃烧速率的影响,本文进行了相关实验,以探究蜡烛燃烧速率对火焰熄灭时间的影响.

蜡烛燃烧速率直接影响蜡烛燃烧单位时间内产生的热量,进而影响火焰熄灭时间.在实验中,为探究蜡烛燃烧速率对火焰熄灭时间的影响,提供 A、B、C 3 种蜡烛,固定到达障碍物处流速为 2 m/s,障碍物直径为 60 mm,蜡烛与障碍物之间距离为 50 mm,其火焰熄灭时间对应为 0.80 ± 0.04 s、 0.65 ± 0.04 s、 0.72 ± 0.05 s.通过图 5 发现,蜡烛燃烧速率和火焰熄灭时间成正比关系.

2.4 临界值探究

2.4.1 蜡烛火焰不会熄灭时的临界障碍物直径

探究让蜡烛火焰不熄灭的临界障碍物直径能更好研究不同流速下的圆柱绕流问题,为探究该临界值,提供到达障碍物处流速为 1.2 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s、3.0 m/s、3.5 m/s、4.0 m/s、

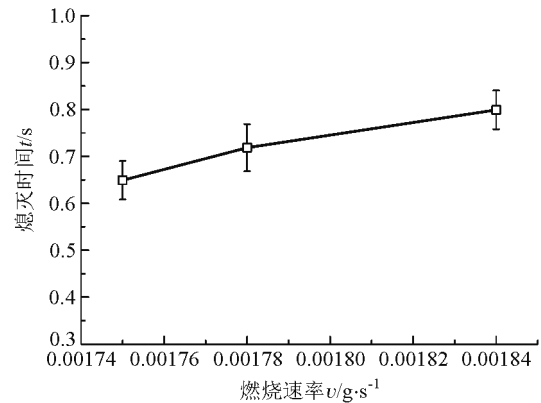


图5 蜡烛燃烧速率对火焰熄灭时间的影响

4.5 m/s、5.0 m/s、5.5 m/s、6.0 m/s、6.5 m/s、7.0 m/s,固定蜡烛 C 到障碍物之间距离为 200 mm,此时临界障碍物直径分别为 325 mm、340 mm、400 mm、465 mm、450 mm、400 mm、415 mm、370 mm、343 mm、325 mm、317 mm、265 mm、215 mm.通过图 6 分析可得临界障碍物直径先随流速增加而增加,后随流速增加而减少.

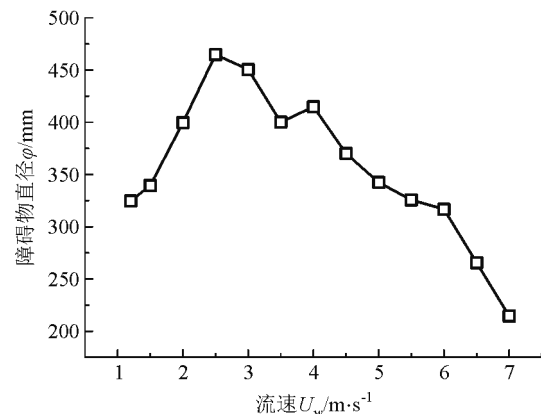


图6 不同流速下火焰不会熄灭时的障碍物临界直径

2.4.2 让蜡烛火焰不会熄灭的临界流速

为避免某些情况下障碍物后可燃物火焰不能被扑灭,需对火焰不会熄灭时的临界条件进行分析,以探究某些特定情况下蜡烛火焰不会熄灭时到达障碍物处的临界流速.实验中,为探究该临界值,提供障碍物直径分别为 150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、350 mm、400 mm、450 mm、500 mm,提供障碍物与蜡烛之间距离分别为 100 mm、200 mm、300 mm 进行探究,得到的实验结果如表 2 所示

表2 不同情况下的临界流速

直径/mm	障碍物与蜡烛之间距离/mm	流速/ $m \cdot s^{-1}$
150	100	1.54~1.74
150	200	2.20~2.40
150	300	1.77~1.90
200	100	1.81~1.96
200	200	1.78~1.84
200	300	1.96~2.02
250	100	2.60~2.70
250	200	2.43~2.55
250	300	2.40~2.50
300	100	2.62~2.74
300	200	2.54~2.64
300	300	2.38~2.47
350	100	2.74~2.86
350	200	2.56~2.66
350	300	2.35~2.50
400	100	2.30~2.41
400	200	2.06~2.20
400	300	2.09~2.22
450	100	不灭
450	200	1.78~1.96
450	300	1.50~1.67
500	100	不灭
500	200	不灭
500	300	不灭

3 结论

为探究气流对圆柱形障碍物后可燃物燃烧情况的影响,本文选择蜡烛为火源进行了相关实验.通过研究发现,蜡烛熄灭时间的主要影响因素包括到达障碍物处流速、蜡烛与障碍物之间距离、障碍物直径、蜡烛种类.对其进行进一步探究,可以得出:1) 火焰熄灭时间与到达障碍物处流速成反比关系;2) 火焰熄灭时间与障碍物直径成正比关系;3) 火焰熄灭时间与蜡烛和障碍物之间距离成正比关系;4) 火焰熄灭时间和蜡烛燃烧速率成正比关系.

由此可类比出气流对圆柱形障碍物后其他可燃物燃烧情况的影响的结论.此外,文章对两种临界情况进行了探究,即探究蜡烛火焰不熄灭时的临界

流速和临界障碍物尺寸,并发现了临界障碍物直径先随流速增加而增加,后随流速增加而减少;临界流速先随障碍物直径增加而增加,后随障碍物直径增加而减少的关系.

本文所探究的问题可在有障碍物时的灭火过程中得到实际应用,此外,也可以在流体力学课程中作为康达效应与圆柱绕流问题的简单实验演示,激发大学生对物理的研究兴趣.

参考文献:

- [1] Gabbai R D, Benaroya H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282: 575-616.
- [2] Williamson C H K. Vortex dynamics in the cylinderwake [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996 (28): 477-539.
- [3] Williamson C H K, Govardhan R. Vortex-induced vibrations [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004 (36): 413-455.
- [4] Alam M M, Zhou Y. Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2007(23): 799-805.
- [5] 姚熊亮,戴绍仕,王国忠.均匀流场中串列双圆柱水动力特性的数值实验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2008, 27(5): 698-703.
- [6] Jester W, Kallinderis Y. Numerical study of incompressible flow about fixed cylinder pairs[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003(17): 561-577.
- [7] Zhao M, Cheng L, Teng B, et al. Numerical simulation of viscous flow past two circular cylinders of different diameters[J]. *Applied Ocean Research*, 2005(27): 39-55.
- [8] Zhao M, Cheng L, Teng B, et al. Hydrodynamic forces on dual cylinders of different diameters in steady currents [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2007(23): 59-83.
- [9] 何颖,杨新民,陈志华,等.高雷诺数圆柱绕流分离的旋转控制[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(08): 1143-1150.
- [10] 毛青峰,张金团,梁东波,等.单圆柱绕流紊流数值模拟[J]. *建筑结构*, 2010, 40(S1): 455-456.
- [11] 黄苗苗,缪泉明,吴维武.不同雷诺数的圆柱绕流比较计算与分析[C]. *纪念顾懋祥院士海洋工程学术研讨会论文集*, 2011: 276-280.
- [12] 毕晓霖.伯努利原理及其应用[J]. *中学物理教学参考*, 2020, 49(10): 61-63.
- [13] 武玉涛,任华堂,夏建新.圆柱绕流研究进展及展望[J]. *水运工程*, 2017(2): 19-26+56.

- [14] 张涛,赵永涛.不同雷诺数下的单一圆柱绕流流场分析的计算机模拟研究[J]. 大学物理, 2016, 35(10): 17-19.
- [15] 马增威,汪志勇,韦建卫,等.大学物理中流体力学问题的计算机模拟研究[J]. 大学物理, 2016, 35(10): 17-19.

Flow around a cylinder at high Reynolds numbers—a case study of candle burning

LUO Yun¹, WANG Xiao-ning¹, ZHAO Xu-yang¹, MENG De-zhong^{2,3}, HAO Hui-ying²

(1. School of Geophysics and Information, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Zhengzhou Research Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: In view of high Reynolds number flow around a cylinder, the problem of how to put off a fire is carried out based on experimental research. It is showed that within a certain range, the flame extinction time is proportion to the obstacle diameter, the distance between candles and obstacles and the candles burning rate, and it is inversely proportional to the flow velocity of the obstacle. Through the analysis, it is found that the experimental data and the theoretical analysis are consistent, which indicate that the experiment conclusion is correct and the experimental method is feasible. Furthermore, it provides an important support for the in-depth study of the flow around a cylinder, flame combustion problems and the relationship between them.

Key words: flow around a cylinder; high Reynolds number; candle burning; put out the fire

(上接 70 页)

- [14] Omirou T, Marzo A, Seah S A, et al. Modular Acoustic Levitation for 3D Path Visualisations[J]. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2015: 309-312.
- [15] Wu D, Yin DY, Xiao, Z Y, et al. Design of an Acoustic Levitator for Three-Dimensional Manipulation of Numerous Particles. Chinese Physics.
- [16] Mason N J. The spectroscopy and chemical dynamics of microparticles explored using an ultrasonic trap[J]. Faraday Discussions, 2007(137): 367-376.
- [17] 马国利.声悬浮及声速测定实验仪的设计[J]. 应用声学, 2012, 31(03): 235-238.
- [18] 黄学东,俞嘉隆,乔卫平.运用声悬浮现象测量声速的演示实验[J]. 大学物理, 2005, 24(11): 42-44.

Three-dimensional multi-particle suspension and control device based on transducer array

XU Yu-qi, XU Hui-jie, GUO Rui-xue, FANG Ming-yue, ZHENG Jian-bin, XIE Cui-ting

(School of Physical and Telecommunications Engineering, South China Normal University, Guangdong 510006, China)

Abstract: Aiming at the problem of small number of suspended particles and limited levitation space in the current three-dimensional acoustic operation technology, a design scheme of acoustic levitation device composed of three pairs of opposed transducer arrays is proposed. By changing the phase difference of the transducer array, the three-dimensional manipulation of particles is successfully realized. This device can be used to measure the speed of sound with a relative error generally about 2%~5%, and the measurement should carry out under a relatively strict environment.

Key words: three-dimensional acoustic levitation; ultrasonic transducer array; containerless operation; sound velocity measurement