

浮射流速度场和断面流量规律特性的研究

王 怡¹, 疏艺波¹, 黄艳秋¹, 周 宇¹, 任晓芬^{1,2}

(1 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2 河北工程大学城市建设学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 在工业生产过程中经常产生大量高温含尘浮射流, 研究浮射流的流动规律能从根本上使此类浮射流得到有效控制. 在实验误差验证的基础上, 运用数值模拟方法研究了浮射流的速度场和断面流量, 研究表明: 浮射流在初始段轴心速度递增率随阿基米德数(Ar)数增大而增大, 在充分发展段轴心速度随断面高度的增高而减小; 在同一高度下, 浮射流断面流量与初始温度、初始速度和出口尺寸成正比; 并分别提出了在浮射流断面高度大于和小于出口尺寸两种条件下, 浮射流断面流量受温度、速度及出口尺寸综合影响的计算式, 从而补充浮射流上方排风罩的设计计算依据.

关键词: 浮射流; 阿基米德数; 数值模拟; 流量

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)06-0839-05

目前, 在钢铁冶金、焦化等重工业行业中, 广泛存在大量无组织排放的粉尘. 这对建筑室内环境造成粉尘污染, 严重危害作业工人身心健康. 在热压作用下粉尘排至室外, 对大气环境也会造成污染^[1].

工艺生产过程中散发的粉尘经常受到热的作用形成含尘浮射流, 是粉尘迁移的主要形式. 局部排风系统是控制含尘浮射流最有效的方法, 浮射流速度场和断面流量的规律是局部排风系统的排风量等参数设计的重要依据, 因此研究其规律特性, 对提高这类含尘浮射流的捕集效率、减少固体颗粒物对室内外环境的污染有重要意义. 对于浮射流的研究, 国外 Rodi^[2]等从理论上探讨了浮射流轴心速度的变化规律, 如初始速度、初始温度和出口尺寸等单因素对其的影响, 实际上三种不同影响因素通常同时变化. Morton^[3]用虚拟极点法得出点源浮射流断面流量的经验表达式, Popiolek^[4]提出基于高斯分布假设的面源羽流断面流量计算方法. 王炎生^[5]等人通过模型实验得出羽流断面流量的经验计算公式. 但工业生产过程中大部分热气流存在初速度, 且具有一定的出口尺寸. 所以不同影响因素共同作用下的浮射流流动规律尚未得到全面解释, 并且浮射流断面流量的计算方法有待补充和改善.

为了研究初始温度、初始速度和热源尺寸因素对浮射流的综合影响, 本文运用实验和数值模拟方法, 利用阿基米德数(Ar)简化分析方法, 研究了在不同 Ar 数下时, 自由浮射流的轴心速度变化规律; 分析得出了不同影响因素下浮射流断面流量的变化规律; 并提出了浮射流断面流量的计算公式, 为浮射流上方排风罩的排风量设计提供计算方法.

1 数值模拟方法简介

1.1 浮射流物理模型和实验方法

物理模型尺寸如下描述: 房间尺寸 L (长) $\times B$ (宽) $\times H$ (高) = 7 m \times 7 m \times 3 m; 浮射流出口尺寸为直径 0.3 m, 高度 0.9 m; 界面 1 尺寸为 0.5 m \times 0.8 m, 距地 1 m; 界面 2 的尺寸为 0.9 m \times 1.8 m; 界面 3 为房间顶棚. 物理模型示意图如图 1 所示.

实验原理图如图 2 所示, 整个实验装置中空气从进风口进入, 采用电热丝模拟热源, 风道内空气经轴流风机加压和电热丝加热后获得初始速度和初始温度从圆形风口送出, 形成圆形浮射流, 其中风量调节阀调节风量改变空气流速; 实验中使用 Swema 3000 多通道测试系统进行测量, 测量探头型号为 SWA 31, 可同时测量浮射流速度和温度, 测量范围和精度能很好的满足测量需求, 测量杆可垂直上下移动. 浮射流出口轴心高度方向上从圆心每隔 0.1 m 布置一个测点, 共 19 个测点, 在距出口高度 0.65 m 断面上由圆心沿半径方向每隔 0.02 m 布置一个测点, 共 10 个测点.

1.2 数值模拟方法及边界条件

为了研究浮射流的流动规律, 采用计算流体力学 CFD 方法对浮射流的轴心速度、断面流量进行数值模拟分析. 模型控制方程可以用以下通用形式表示^[6]:

收稿日期: 2014-04-08

修改稿日期: 2014-10-08

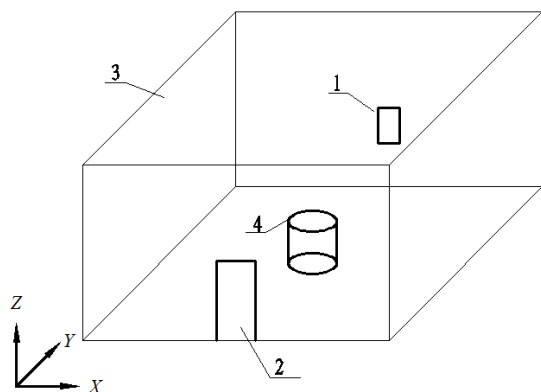
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51238010); 国家杰出青年基金项目(51425803)

作者简介: 王怡 (1970-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑通风理论及其在实际中应用研究. E-mail: wangyi6920@126.com

$$\partial(\rho\phi)/\partial t + \text{div}(\rho\phi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

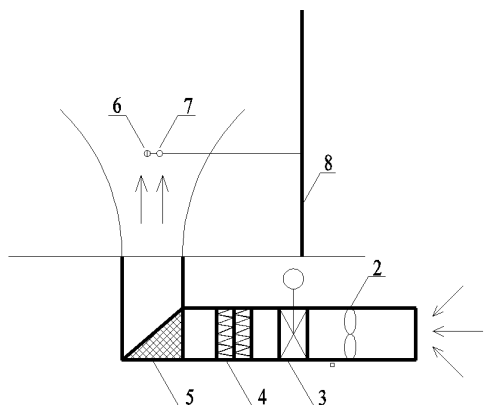
式(1)中: ϕ 为通用变量, 可以代表 u 、 v 、 w 、 T 等求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源相。

本数值模拟认为室内空气属于连续介质, 且为不可压缩。浮射流出口设定为速度入口边界条件(velocity inlet), 速度大小为 0.65 m/s, 出口温度为 328 K, 环境温度为 302 K, 顶棚、室内墙壁和地面作为定壁温处理, 温度也为 302 K, 界面 1 采用压力入口 (pressure inlet), 界面 2 采用压力出口 (pressure outlet)。湍流模型采用 Realizable k- ϵ 模型, 它对旋转均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流动、管道内流动、边界层流动、以及带有分离的流动有很好的表现。由于模拟工况为非等温流场, 流体密度及比热等热物性参数会随温度变化而变化, 因此采用分段线性插分方法对其进行设置^[7]。



1-界面 1, 2-界面 2, 3-界面 3, 4-浮射流出口

图1 物理模型
Fig.1 Physical model



1-进风口, 2-轴流风机, 3-风量调节阀, 4-电热丝, 5-柔性连接, 6-速度测点, 7-温度测点, 8-测量杆

图2 浮射流实验装置原理图
Fig.2 The experimental device schematic diagram of buoyant jet

1.3 数值模拟的有效性验证

通过数值模拟得到与实验相同工况下浮射流的流场, 将模拟结果从轴心速度、轴心温度、水平断面上速度和温度分布四个方面和实验结果对比。

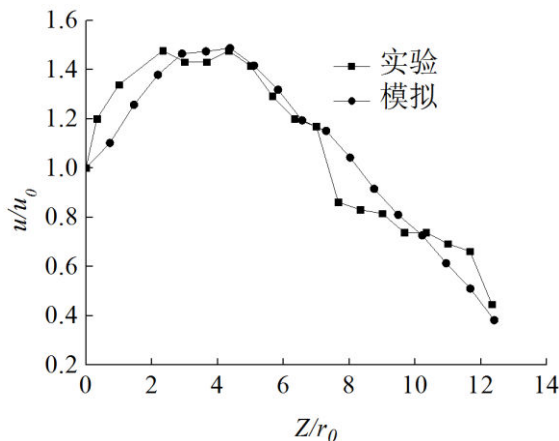


图3 轴心速度的分布

Fig.3 The distribution of axis velocity

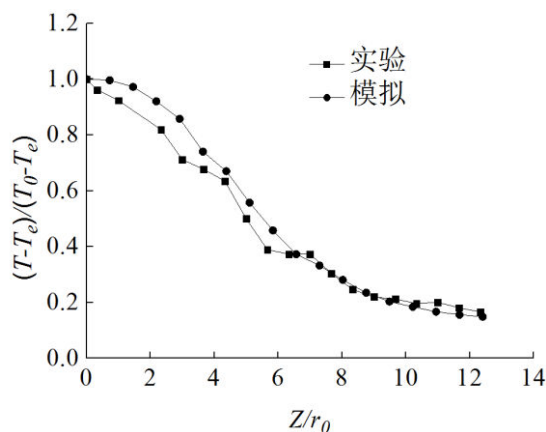


图4 轴心温度的分布

Fig.4 The distribution of axis temperature

由图3和图4可得出, 对于圆形浮射流流动, 数值模拟结果和实验结果基本吻合。浮射流轴心速度随距出口高度先增大后减小, 而轴心温度一直减小。对于速度实验值的微小波动, 这是由于浮射流的出口速度不均匀性导致的。

图5和图6可得出数值模拟和实验数据断面上的速度和温度分布大致符合高斯分布。温度实验值低于模拟值, 分析原因是门窗间横向气流影响浮射流的运动, 其温度低于浮射流主体段的温度, 使实验测得的轴心温度低于实际值。总体而言, 实验结果和数值模拟结果存在一致的规律性。

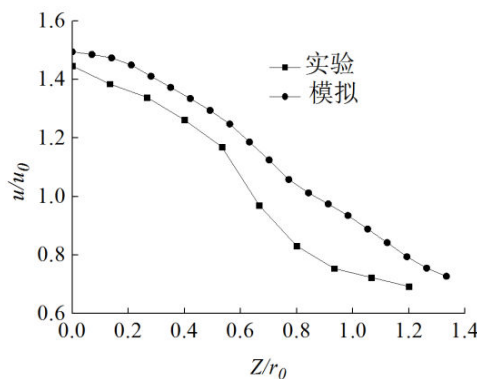


图5 水平断面速度分布

Fig.5 The velocity distribution in horizontal section

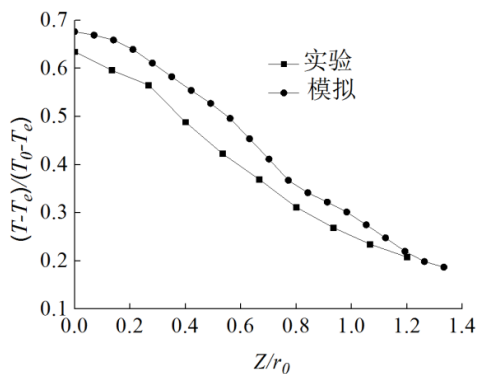


图6 水平断面温度分布

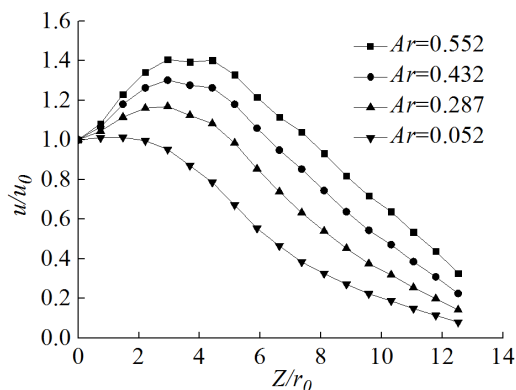
Fig.6 The temperature distribution in horizontal section

2 浮射流的流场规律分析

影响浮射流的流场规律有很多因素,其中浮射流出口尺寸、初始速度和初始温度是主要因素.阿基米德数是关于出口尺寸、速度和温度的无量纲准则数,研究不同 Ar 数下浮射流的速度场规律能全面的阐述三个因素对其的综合影响.采用数值模拟的方法研究不同 Ar 数下,自由浮射流轴心速度的变化规律,以及不同影响因素下浮射流断面流量的分布规律.

2.1 浮射流轴心速度分布

为了研究自由浮射流的基本特性,将图1中的界面3设置为压力出口 (pressure outlet). 得到不同 Ar 数下浮射流的无量纲轴心速度分布如图7所示,浮射流在上升过程中受到浮升力作用,浮升力使浮射流主体加速,但射流速度也会随着浮射流卷吸周围空气不断衰减.阿基米德数表征浮升力和惯性力间的相对关系,在浮射流初始段,浮升力是影响其轴心速度的主导因素,而浮射流的 Ar 数越大,浮升力相对于惯性力的比重越大,速度递增越快;在充分发展段,浮射流不断卷吸周围空气质量增加,但由于动量守恒,轴心速度呈下降趋势.在同一高度位置,浮射流轴心速度和 Ar 数的大小成正比.

图7 不同 Ar 数对轴心速度的影响Fig.7 The influence of different Ar number on axial velocity

2.2 浮射流断面流量的分布

影响浮射流不同高度断面流量的因素有初始速度,初始温度,出口尺寸和距出口的断面高度,图8-图10表示了浮射流断面流量 G 随断面高度 Z 的变化规律.

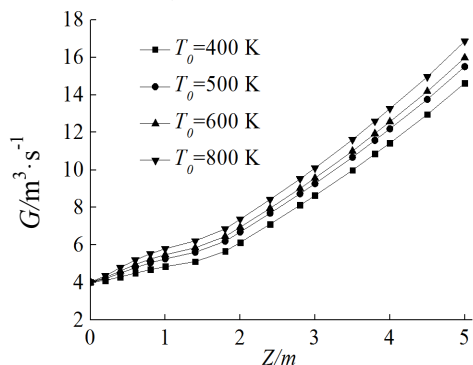
图8 不同初始温度下浮射流断面流量的变化规律
($v_0=2$ m/s, $D=1.6$ m)

Fig.8 The variation of the buoyant jet section flow rate at different initial temperatures

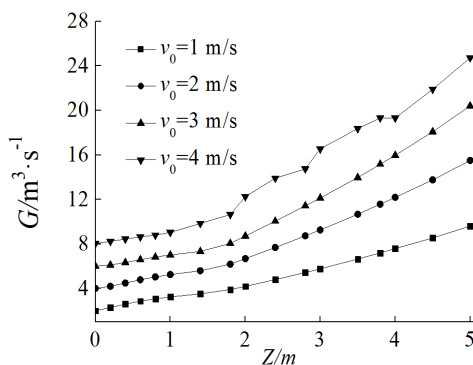
图9 不同初始速度下浮射流断面流量的变化规律
($T_0=500$ K, $D=1.6$ m)

Fig.9 The variation of the buoyant jet section flow rate at different initial velocities

以上三图给出了不同影响因素下浮射流断面流量随高度的分布,其变化规律基本相同,均是浮射流断面流量随着高度的增加而增加.在同一高度位置上,随着浮射流初始温度的升高,其卷吸周围空气的能力增强,导致浮射流的断面流量增加;随着浮射流初始速度的提高,浮射流的断面流量增加;随着浮射流出口尺寸的增加,浮射流的断面流量也增加.浮射流初始段断面流量随高度的递增率较小,而充分发展段断面流量随高度的递增率较大.当浮射流的断面流量在初始段和充分发展段分段表示时,与高度均有近似的线性关系.将浮射流不同高度断面流量和三个影响因素无量纲化后进行多项式拟合,得到浮射流断面流量的分段表达式如下:

$$G/G_0 = 1.28Ar^{0.087}(\Delta T/T_0)^{0.03}(Z/D)^{0.141} \quad (R^2 = 0.95) \quad 0 < Z/D < 1 \quad (2)$$

$$G/G_0 = 1.32Ar^{0.084}(\Delta T/T_0)^{0.0296}(Z/D)^{0.906} \quad (R^2 = 0.93) \quad Z/D \geq 1 \quad (3)$$

其中:公式2的限制条件是断面高度 Z 小于浮射流出口尺寸 D ,而公式3的限制条件是断面高度 Z 大于等于浮射流出口尺寸 D .

3 浮射流与羽流断面流量的对比分析

为了验证浮射流断面流量计算公式的准确性,并指出其与羽流断面流量计算公式之间的差异,将二者进行对比分析.对于羽流断面流量计算公式的研究,由于实验条件各不相同,不同研究者得出的具体结果不尽相同,但总的变化规律一致.其中王炎生^[5]通过实验实测,得到羽流不同高度上断面流量的实验数据,进而获得在 $Z/D=0.9\sim 7.4$ 的范围内,羽流的断面流量关于高度的经验公式:

$$G = 0.04Q^{1/3}(Z + 1.26D)^{3/2} \quad (4)$$

其中 Q 为热源的对流散热量

公式3和公式4之间的差别在于:公式3中引入了速度自变量,且适用于具有初速度的热气流,即浮射流;公式4适用于无初速度的热气流,即羽流,《简明通风设计手册》^[8]上的热源上部接受式排风罩的排风量也参照此式计算.当出口尺寸同为 $D=1.6$ m,初始温度同为 $T=500$ K,浮射流初始速度 $v_0=2$ m/s时,浮射流和羽流的断面流量对比如图11.

图11表明浮射流和羽流断面流量随高度的变化规律一致,但浮射流断面流量随高度的递增率明显大于羽流,具有初速度的浮射流卷吸空气能力强于羽流.且在相同工况同一高度下,浮射流的断面流量大于羽流断面流量,二者之间的差值随着高度增加,故

图11中最小差值在 $Z=1.8$ m处为 1.46 m³/s,最大差值在 $Z=5.0$ m处为 3.70 m³/s.所以如采用羽流计算公式进行浮射流上方排风罩设计,计算得到的排风量将低于实际值,会造成捕集效率的急剧下降.

4 结论

为提高工业建筑中含尘浮射流的捕集效率,本文基于实验误差分析,通过数值模拟方法研究浮射流轴心速度和断面流量的变化规律,得到以下结论:

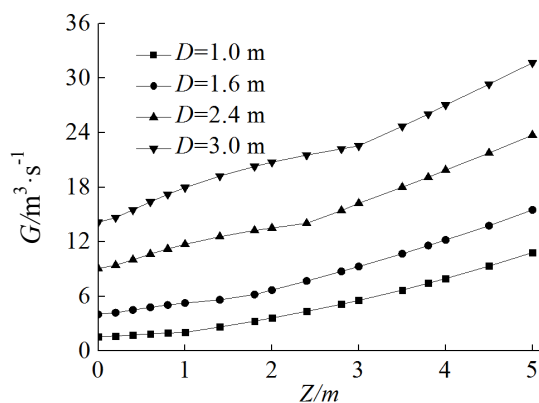


图10 不同出口尺寸下浮射流断面流量的变化规律 ($v_0=2$ m/s, $T_0=500$ K)

Fig.10 The variation of the buoyant jet section flow rate at different outlet sizes

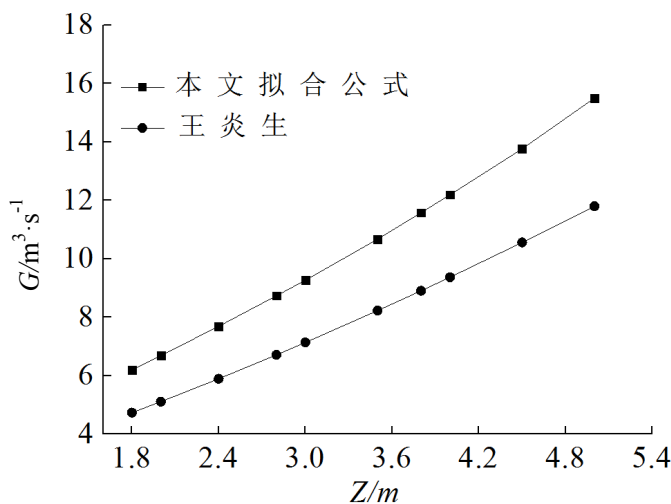


图11 浮射流和羽流断面流量对比

Fig.11 The comparison of section flow rate formula of the buoyant jet and plume

(1) 分析了 Ar 数对浮射流轴心速度的影响,在浮射流初始段, Ar 数越高,浮射流轴心速度递增越快,在充分发展段,由于浮射流质量增加而动量守恒,其轴心速度随高度下降,任一高度位置上的轴心速度与 Ar 数成正比。

(2) 通过数值模拟得出不同影响因素下浮射流断面流量随高度的变化规律,其变化规律基本相同,均是浮射流断面流量随着高度的增加而增加。在同一高度下,浮射流断面流量与初始温度、初始速度和出口尺寸成正比。通过多项式拟合得到的浮射流断面流量分段计算公式,可供浮射流上方排风罩的排风量设计参考。

(3) 通过浮射流与羽流断面流量计算公式的对比分析,得到在相同工况同一高度下,浮射流的断面流量大于羽流断面流量,二者之间的差值随着高度增加。如采用羽流断面流量公式进行浮射流上方排风罩设计,计算出的设计排风量将低于实际值,会造成捕集效率的下降。

参考文献 References

- [1] 张旭,叶天鸿,孙承波.控制强热源诱导含尘浮射流最佳通风量的研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,1997,29(3):58-62.
ZHANG Xu, YE Tianhong, SUN Chengbo. An experimental study of the optimum ventilating volume on high heat source induced dusting buoyant jet[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 1997, 29(3): 58-62.
- [2] WIKIPEDIA Rodi, Turbulent buoyant jets and plumes[M]. Pergamon Press, 1982.
- [3] HUNT G. R, COOPER P, LINDEN P. F. Thermal stratification produced by plumes and jets in enclosed spaces[J]. Building and Environment, 2001, 36: 871-882.
- [4] POPIOLEK Z. Problems of Testing and Mathematical Modeling of Plumes above Human Body and other Extensive Heat Source[R], A4- series no. 54, Department of Heating and Ventilating, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 1981.
- [5] 王炎生等.热过程伞形排气罩性能研究[J].通风除尘,1982,2.
WANG Yansheng, et al. The performance study of canopy exhaust hood during thermal process [J]. Ventilation and Dedusting, 1982, 2.
- [6] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004.
- [7] 王怡,黄艳秋.炼铁厂高温烟气流场特性及排风罩优化 [J].土木建筑与环境工程,2013,(S1):162-166.
WANG Yi, HUANG Yanqiu. Flow Field of High-temperature Gases and Exhaust Hood Optimization in Ironmaking Plant[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, (S1) 162-166.
- [8] 孙一坚.简明通风设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
SUN Yijian. Concise ventilation design manual [M]. Beijing: China building industry press, 1997.

The study on the characteristics of velocity field and section flow rate of buoyant jet

WANG Yi¹, SHU Yibo¹, HUANG Yanqiu¹, ZHOU Yu¹, REN Xiaofen^{1,2}

(1 School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2 Institute of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: A large amount of high temperature buoyant jets with dust is produced in the process of industrial production. The study on the principle of the buoyant jet flow field is therefore aimed at bringing such jet flow into effective control. Based on the error verification by experimental method, the velocity field and the section flow rate of the buoyant jet were studied by numerical simulation in this paper. The results showed that at the beginning section the axis velocity growth rate of the buoyant jet increased as the Archimedes number (Ar) increased and at the fully developed section the axis velocity decreased as the section height increased. The buoyant jet section flow rate was proportional to its initial temperature, initial velocity, and outlet size at the same height. A calculation formula on the section flow rate was presented as it is jointly influenced by the temperature, velocity and the outlet size under the conditions when the height of the flow section is respectively larger or smaller than the size of outlet. These results complemented the design basis of the exhaust hood over the buoyant jet.

Key words: buoyant jet; archimedes number (Ar); numerical simulation; flow rate

(本文编辑 吴海西)