

基于示踪气体浓度值的圆形喷口非等温冷射流卷吸运动实验研究

王昕, 叶李飞, 刘友勤, 马静思

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 利用示踪气体浓度值分析圆形喷口非等温冷射流对周边环境空气的卷吸运动。利用恒温恒湿实验室进行喷口射流模型实验。对比了传统方法和示踪气体法卷吸量测量结果,并对喷口射流沿程卷吸量与卷吸系数的变化规律进行分析。实验数据表明:利用示踪气体浓度值沿程变化测量射流卷吸量的方法是可行的。在惯性力起主导作用的射流运动中,雷诺数 Re 是影响射流卷吸效应强弱的主要准则,随着出口 Re 数增大,卷吸量逐渐增加;当出口雷诺数 $Re > 15000$ 时,流量增大系数几乎不变。

关键词: 卷吸运动; 非等温冷射流; 雷诺数; 示踪气体

中图分类号:TV131.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0093-05

Experiment on entrainment movement of non-isothermal cold jet of circular nozzle based on tracer gas concentration

WANG Xin, Ye Lifei, Liu Youqin, Ma Jingsi

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The paper used tracer gas concentration to analyze the entrainment movement of ambient air by the non-isothermal cold jet coming from the circular nozzle. The model experiment of nozzle jet has been conducted in the thermostatic and humidistatic laboratory. It compared the result of the entrainment volumes derived from the traditional method and the tracer gas method, and analyzed the patterns of entrainment volume and the entrainment coefficient along the jet curve. The results show that the method of measuring the jet entrainment according to on-way changes of tracer gas concentration is feasible. The Reynolds number is the dominant physical factors in the movement of jet where the inertial force plays a dominant role. With the increase of Re number, the volume of entrainment increases gradually, when $Re > 15000$, the flow increase coefficient almost keep the same.

Key words: entrainment movement; non-isothermal cold jet; Re ; trace gas;

1 研究背景

随着城市建设的加快和现代建筑的增加,大空间建筑室内热环境及其舒适性研究逐渐为人们所关注^[1]。大空间建筑室内热环境与一般建筑不同,由于高度大,屋顶日辐射大,上下温度差常常达 10°C 以上^[2]。因为此温度分层现象,位于热分层面上的喷口送风射流,卷吸上部非空调区热空气进入下部空调区,形成了对流转移热,增加了空调系统负荷,增加了能耗,而造成热量转移现象的原因正是由于射流运动的卷吸效应^[3]。众所周知,暖通空调系统

占建筑能耗的比例是非常大的^[4]。因此,在大空间建筑常用的喷口射流送风系统中,非等温射流的卷吸效应产生的冷射流和热空气之间的热量交换是值得关注的问题。

卷吸研究最早始于1949年 Geoffery Taylor 提出的卷吸假说理论,即假定通过射流边界层进入射流主体的流体平均速度和射流的某一特征速度成比例,并提出“卷吸系数概念”,近年来关于卷吸系数的研究,具有代表性的是美国的 Fernando^[5] 等人开展的工作,他们通过盐水模型实验和全尺寸实验发现分层流卷吸速率不仅与理查森数有关,与雷诺数

收稿日期:2014-06-02; 修回日期:2014-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51108263、51278302)

作者简介:王昕(1980-),女,山东济南人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:大空间建筑室内热环境及节能研究。

Re 也密切相关。Turner 在 1986 年对卷吸假说做了详尽的综述^[6],并指出纯射流和浮羽流的卷吸运动是卷吸假说理论最好的体现。在 1996 年我国的余常昭等^[7]教授同样通过实验的手段,利用热膜流速仪对圆形断面自由湍动纯水射流的流场进行精细测量后,得出射流的卷吸量和卷吸后总流量沿程增大的变化规律,阐述了卷吸系数和雷诺数的关系。

根据射流的基础运动理论可以推断,非等温射流运动过程中,射流空气对周围环境空气的卷吸除受到浮升力、惯性力的影响还会受到空气间粘滞力的影响。而在空气射流领域中,常用阿基米德数 (Ar) 和雷诺数 (Re) 作为表征这些物理机制间相互关系的无量纲数。本文提出基于示踪气体浓度值变化确定射流沿程卷吸量的实验方法,从运动无量纲准则数出发,确定研究分析的对象,对影响卷吸强弱的物理机制进行分析。

2 利用示踪气体浓度值确定射流沿程卷吸量

卷吸量是射流卷吸运动的一个重要研究对象,以往卷吸量的实验确定方法是使用测量介质流速的仪器,对射流流场域进行精细的网格划分,然后测量每个网格测点处的介质速度值大小,由测试数据绘制流场速度值分布图,得到射流沿射程的各个断面的平均速度大小和面积,计算断面流量,并以断面流量值之差作为卷吸量^[8]。这种实验方法由于大量的速度测量点直接处于流场中,对流场干扰大,大量实验数据由于仪器的测量误差也会对数据结果产生影响。因此,本文通过测量掺混在射流各断面中示踪气体浓度值,根据浓度变化量确定射流对周围空气的卷吸量,达到减少工作量且提高精确度的目的,仅需布置少量测点,并在流场无干扰的情况下得到射流运动沿射程卷吸量。

射流卷吸效应将环境空气卷吸进入射流域,取射流域中的某一控制体为分析对象,利用质量守恒原理和组分守恒原理,流入控制体的气体量加上该控制体的卷吸量等于流出控制体的气体量。同时,若将示踪气体掺混在射流源空气中,沿射程在控制体前后示踪气体量不会发生变化。沿射流射程,示踪气体浓度值会随之降低。选取射流射程中任一段作为控制体,原理如图 1 所示。

将喷嘴处示踪气体初始浓度记为 Y_0 ,将流入断面处示踪气体浓度值记为 Y_{in} ,流出断面处示踪气体浓度值记为 Y_{out} 。 M_{in} 、 M_{out} 、 M_e 分别为射流流入、流

出、卷吸进入控制体的气体的质量流量。由质量守恒定律可知流入控制体的气体总质量等于流出控制体的气体总质量,即:

$$M_{in} + M_e = M_{out} \quad (1)$$

由质量守恒定律可知流入控制体的示踪气体质量等于流出控制体的示踪气体质量,即:

$$M_{in} Y_{in} = M_{out} Y_{out} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)得:

$$M_{in} (Y_{in} - Y_{out}) = M_e Y_{out} \quad (3)$$

将质量流量用体积流量和密度的乘积来表示,则:

$$Q_{in} \rho_{in} (Y_{in} - Y_{out}) = Q_e \rho_e Y_{out} \quad (4)$$

式中: Y 为射流沿程某处的示踪气体体积浓度值, ppm; M 为射流断面的气体流动质量流量, mg/h; Q 为射流断面的气体流动体积流量, m^3/h 。

其中 Q_{in} 为前一控制体流出断面的流量,等于前一控制体流入断面流量与其卷吸量的代数和。由公式(4)可知在已知实验室内环境温度以及射流的温度的情况下,只要测出控制体流入和流出断面示踪气体浓度值就可求得相应控制体的卷吸量 Q_e 。

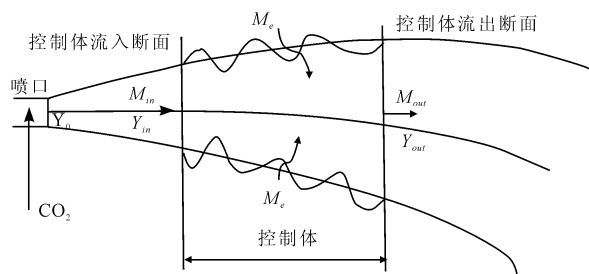


图 1 示踪气体浓度确定卷吸量实验方法原理图

3 实验系统设计

3.1 模型实验台设计与搭建

以上海国际体操中心建筑为原型,根据相似理论,选取几何比例尺为 1:10 搭建模型实验台。原型建筑为柱状结构,气流组织采用典型的喷口侧送风、下回风方式。模型实验台同样采取喷口侧送风气流组织,仅模拟其中单个喷口射流运动卷吸运动特性。利用恒温恒湿实验室进行射流卷吸实验。由于原型实验和模型实验都属于非等温气流运动过程,因此二者的控制方程在形式上完全相同。只要使得控制准则数 Re 、 Ar 和 Pr 相等,便可实现模型与原型的相似。在这 3 个准则数中, Ar 数是表征非等温气体流动的主要准则数, Re 数都处于自模区,因此只需要模型与原型的 Ar 数相等则模型实验与原型相似。

实验时以一定的释放速度将示踪气体释放到射流喷口中,使示踪气体与射流空气一起送出喷口。沿射流射程布置示踪气体浓度测点,将测点放置于射流轴心线上,由于测点是一根细软管,且在流场中布置个数较少,放置方式是搭挂在流域中的细软线上,减少测点对流场的干扰。使用示踪气体浓度测试仪器将各个测点的示踪气体浓度值进行监测和记录,得到沿射流射程示踪气体浓度值变化量,依据示踪气体浓度值实验方法的原理对记录的浓度数据进行处理得到射流沿程的卷吸量。

3.2 测点布置

实验将射流区域以 0.1 m 为间隔划分为 5 个控制体,在选定的每个断面的射流轴心处布置浓度测点,共布置 6 个测点,如图 2 所示。

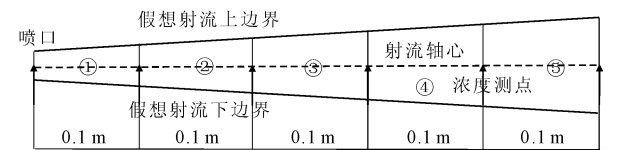


图2 射流区域浓度测点位置分布

3.3 测试仪器

从实验目的和研究对象出发,实验过程中需要测量的主要参数还有喷口射流送风速度 v , 喷口射流空气温度 T_o , 房间环境空气温度 T_e 。需要用到的主要设备仪器列于表 1。

表1 主要实验仪器及测量参数

仪器名称及型号	数量	仪器测量参数	仪器精度
INNOVA Multi Gas Monitoring Instrument INNOVA 7620	1	测量示踪气体浓度值	0.01
手持式热线风速仪 SwemaAir300	1	喷口送风速度及温度	0.1
E + E 温湿度数据测量记录仪 Humlog10	4	测量实验室内空气温度	0.1
格力(Gree)可调式发热板电热板 NDYC(0-1500W)	1	控制实验室内温度	
单级压力调节器 YQJF-L	1	控制示踪气体释放速率	

4 实验工况

本研究分别进行了示踪气体法验证及射流卷吸运动分析两组实验,其实验工况分别如表 2、3 所示。验证实验采用的示踪气体为 SF_6 , 卷吸运动分析实验采用的示踪气体为 CO_2 。

表2 示踪气体法验证实验工况表

工况	送风速度	出口雷诺数	出口空气流量	m/s, m ³ /s, °C, mg/m ³		
				送风温度	室内环境温度	示踪气体初始浓度
1	2	11000	0.005652	15	11	2365.97
2	3	16000	0.008478	19	15	2153.95

表3 射流卷吸运动分析实验工况表

工况序号	送风速度	出口雷诺数	送风温度	温差	m/s, °C, ppm	
					出口阿基米德数	示踪气体初始浓度
1	1	5306.6	28	0	0.00000	7195.15
2	1	5344.3	26	2	0.00423	6180.83
3	1	5382.1	24	4	0.00846	6745.72
4	1	5419.9	22	6	0.01260	6897.23
5	2	10613.1	28	0	0.00000	3284.52
6	2	10688.7	26	2	0.00105	3445.06
7	2	10764.2	24	4	0.00211	3300.66
8	2	10839.7	22	6	0.00315	3124.61
9	3	15919.7	28	0	0.00000	2743.30
10	3	16033.0	26	2	0.00047	2640.62
11	3	16146.3	24	4	0.00093	2691.85
12	3	16259.6	22	6	0.00141	2874.37
13	4	21226.3	28	0	0.00000	1921.45
14	4	21377.4	26	2	0.00026	2232.35
15	4	21528.4	24	4	0.00053	2205.37
16	4	21679.5	22	6	0.00079	1983.93
17	5	26532.9	28	0	0.00000	2021.44
18	5	26721.7	26	2	0.00017	2038.90
19	5	26910.5	24	4	0.00034	1748.34
20	5	27099.4	22	6	0.00079	1979.65

5 实验结果及分析

5.1 利用示踪气体浓度值测量卷吸量验证分析

传统卷吸量的实验确定方法是对射流流场域进行精细的网格划分,然后测量每个网格测点处的介质速度值,由测试数据绘制流场速度值分布图,得到射流沿程各断面的平均速度和面积,计算断面流量,并以断面间流量差值作为卷吸量。表 4 给出了传统方法,示踪气体法卷吸量对比。

表4 两种卷吸量测量结果对比

控制体	送风速度 2		送风速度 3	
	示踪气体法	传统方法	示踪气体法	传统方法
	①	②	③	④
①	168.4	126.0	224.7	214.8
②	184.4	173.3	231.3	214.0
③	164.8	128.2	195.8	172.4
④	48.3	45.1	55.5	53.9
⑤	5.8	3.8	9.5	6.2

由表 4 可以看出,每个控制体的卷吸量示踪气体法比传统方法测量值略大,变化规律基本一致。

5.2 雷诺数(*Re*)对卷吸量的作用分析

5.2.1 射流沿程流量增大系数 卷吸后的射流总流量就等于初始流量与卷吸量之和:

$$Q = Q_0 + Q_e \tag{5}$$

射流总流量沿程不断增加,则^[9]:

$$\frac{Q}{Q_0} = C \frac{l}{d_0} \tag{6}$$

其中,射流沿程流量增大系数:

$$C = \frac{Q}{Q_0} \frac{d_0}{l} \tag{7}$$

式中: *Q* 为卷吸后射流流量,m³/h; *Q*₀ 为射流初始流量,m³/h; *Q*_{*e*} 为射流卷吸量,m³/h; *l* 为射流距喷口的横向距离,m; *d*₀ 为喷口直径,m。

选取工况 1、5、9、13、17,算出其沿程各断面流量增大系数值后可以发现:相同的 *l/d*₀ 断面,*C* 值总体上是随送风速度有一定变化的,而当初始送风速度较大时,即射流出口雷诺数达到一定数值后,实验中沿流各断面 *C* 值变化很小。图 3 为射流主体段中具有代表性的断面 *l/d*₀ = 6.6 处的流量增大系数与出口雷诺数的关系。

由图 3 可知,当出口雷诺数 *Re* > 15000 时,曲线基本上是一条平直直线,即流量增大系数 *C* 可看作一个常数;而当出口雷诺数 *Re* < 15000 时,系数 *C* 随 *Re* 的变化比较明显,呈现对数关系。图 3 中还给出了 *l/d*₀ = 10 处的断面 *C* - *Re* 关系曲线,和 *l/d*₀ = 6.6 的曲线非常接近,在实验中可以取各断面系数的平均值作为最终流量增大系数。在出口 *Re* 大于临界值 15000 时,*C* 可以视为常数,实验得到的数值与文献中流速均匀分布时所得的 0.37 和流速为高斯分布时所得的 0.32^[10] 都很接近。在出口小 *Re* 数的情况下,*C* 则与 *Re* 呈现对数关系。

5.2.2 射流卷吸系数 根据卷吸假说理论,通过湍动射流边界层进入射流流体平均速度与湍动射流特征速度成比例,特征速度即表征射流运动湍流特性

的速度值。因此,射流对周围环境空气的卷吸系数^[11]可表示为:

$$a = \frac{U_e}{u} \tag{8}$$

式中: *U*_{*e*} 为卷吸周围空气的快慢程度,即为单位时间内的卷吸速率,m/s; *U* 为射流的特征速度,m/s。

以往卷吸系数计算中,通常取射流沿射程各断面的最大流速作为湍动射流特征速度。从卷吸系数的物理意义可以看出,卷吸系数表征的是卷吸速率与湍动射流速率的比值,即卷吸强度与射流湍动强度的比值,湍流强度 *I* 可按公式(9) 计算^[12]:

$$I = 0.16Re^{-\frac{1}{8}} \tag{9}$$

$$Re = \rho dv/\mu \tag{10}$$

式中: *v* 为沿程流动平均速度,m/s; ρ 为介质流体密度,kg/m³; *d* 为断面尺寸,m; μ 为介质流体的动力粘滞系数,N · s/m²。

从公式(9)、(10)可以看出,沿射流射程的平均流速比断面最大流速能更好地表征射流湍动强度。图 4 为工况 1、5、9、13、17 射流全程(以射流喷口为起点至射流任意断面处)卷吸系数与出口雷诺数 *Re* 的关系曲线图。

由图 4 可见,卷吸系数 *a* 随出口雷诺数 *Re* 的变化趋势与断面流量增大系数 *C* 随出口雷诺数 *Re* 的变化趋势基本相似。当出口雷诺数 *Re* 较小时,卷吸系数随出口雷诺数增大而增大;但当 *Re* 数值超过临界值 15000 以后,卷吸系数 *a* 可认为是一个常数,由实验的结果计算可取其平均值 *a* = 0.48 作为卷吸系数。

5.3 阿基米德数(*Ar*)对卷吸量的作用分析

阿基米德数(*Ar*) 是表征流体流动浮升力与惯性力的比值。在实验中保持送风速度不变,通过改变送风与环境空气温度差来改变 *Ar* 数。

图 5 为各工况下射流全程卷吸系数 *a* 随出口阿基米德数 *Ar* 的变化曲线图。由图 5 可看出随着射流送风速度的增加,射流惯性力增大,但温差增大导致的浮升力增大幅度比惯性力增大幅度要小得多,

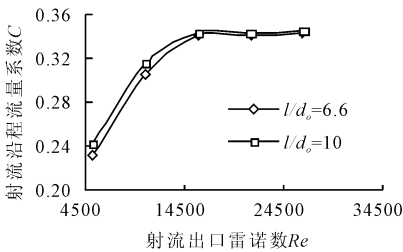


图 3 流量增大系数与出口雷诺数关系曲线

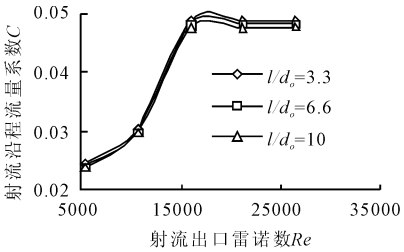


图 4 射流全程卷吸系数与出口雷诺数关系曲线

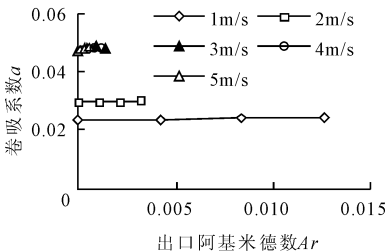


图 5 射流卷吸系数与出口阿基米德数关系曲线

阿基米德数随射流送风速度的增大而急剧减小。与雷诺数相比,阿基米德数对射流卷吸量的影响非常小,在3~5 m/s的送风速度下 Ar 数的作用更不明显。可以看出送风速度提高,惯性力比浮升力对射流运动的作用更显著,卷吸运动主要受雷诺数的影响。

6 结 语

(1)利用模型实验台,分别采用传统方法和示踪气体法测量了喷口射流对环境空气的卷吸量,对比两种测量结果,可以利用示踪气体浓度分析射流卷吸量。

(2)表征流体所受惯性力与粘滞力比值的雷诺数 Re 是影响卷吸效应强弱的关键因素,随着出口雷诺数增大卷吸量逐渐增加,当出口雷诺数 Re 15000时,流量增大系数几乎不变。

(3)阿基米德数总体上对射流卷吸的影响不明显,且随雷诺数的增大,影响效果逐渐减弱,说明阿基米德数对卷吸效应的影响程度远小于雷诺数。

参考文献:

- [1] 黄晨,李美玲,左涛,等.采用第一类边界条件数值模拟具有开口的大空间建筑室内速度场与温度场[J].制冷学报,2002,23(2):20-24.

- [2] 胡宇,黄晨,蔡宁.大空间建筑及其相似放大建筑的室内热环境模拟分析[J].流体机械,2012,40(9):67-71+42.
- [3] 董小超.大空间分层空调热环境设计、实验研究及综合评价[D].上海:上理工大学,2012.
- [4] 朱能,刘珊.置换通风与冷却顶板的热舒适性研究[J].制冷学报,2000(4):64-70.
- [5] Fernando H J S. Turbulent mixing in stratified fluids[J]. Fluid Mechanics and Heat Transfer, 1991,23:455-493.
- [6] Turner J S. Turbulent entrainment; the development of the entrainment assumption and its application to geophysical flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986,173:431-471.
- [7] 余常昭,李春华.圆形断面自由湍动射流卷吸的实验研究[J].气动实验与测量控制,1996,10(1):31-38.
- [8] Fischer H B, List E J, Koh R C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters[M]. London: Academic Press, 1979.
- [9] 刘沛清.自由紊动射流理论[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [10] 余常昭.紊动射流[M].北京:高等教育出版社,1993.
- [11] Strang E J, Fernando H J S. Entrainment and mixing in stratified shear flows[J]. Fluid Mech, 2001:349-386.
- [12] 阳东.狭长受限空间火灾烟气分层与卷吸特性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.

(上接第92页)

参考文献:

- [1] 刘元波,傅巧妮,宋平,等.卫星遥感反演降水研究综述[J].地球科学进展,2011,26(11):1162-1172.
- [2] Jiang S H, Ren L L, Yong B, et al. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products with surface rain gauge observations from Laohahe Basin in northern China[J]. Water Science and Engineering, 2010,3(4):405-417.
- [3] Kidd C, Huffman G. Global precipitation measurement[J]. Meteorological Applications, 2011,18(3):334-353.
- [4] Jiang S H, Ren L L, Hong Y, et al. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the bayesian model averaging method[J]. Journal of Hydrology, 2012,452:213-225.
- [5] Jiang S H, Ren L L, Hong Y, et al. Improvement of multi-satellite precipitation products for ensemble streamflow

- simulation in a middle latitude basin in South China[J]. Water Resources Management, 2014(28):2259-2278.
- [6] 杨云川,程根伟,范继辉,等.四川盆地及周边地区TRMM 3B42数据精度检验[J].气象科学,2013,33(5):526-535.
- [7] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等.赣江流域TRMM降水数据的误差特征与成因[J].水科学进展,2013,24(6):794-800.
- [8] 李相虎,张奇,邵敏.基于TRMM数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J].地理科学进展,2012,31(9):1164-1170.
- [9] 李景刚,黄诗峰.基于TRMM数据的汉江流域1998年-2010年降水变化特征[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):48-53.
- [10] 罗阳,赵伟,翟景秋.两类天气预报评分问题研究及一种新评分方法[J].应用气象学报,2009,20(2):129-136.