

四对对称源汇复合温度扩散的实验研究和数值模拟

同济大学 臧建彬[☆] 张旭 徐文华 徐琳

摘要 采用模型实验和数值模拟相结合的方法,研究了不同通风量下不同温度和流量的热射流的温度扩散规律。提出了适用于评价通风方式对控制区域内最高温度的影响的指标——基于热源的温度效率,并探讨了复合温度扩散反问题。

关键词 源汇 热射流 复合温度扩散 通风量 数值模拟 实验

Numerical and experimental research on hybrid temperature diffusion for four pairs of symmetric sources and sinks

By Zang Jianbin[★], Zhang Xu, Xu Wenhua and Xu Lin

Abstract Using the method of model experiment combined with numerical simulation, studies temperature diffusion characteristics of heat jets with different temperature and flow rate under different ventilation rates. Proposes an evaluation index for the effect of a ventilation mode on controlling the highest temperature in a zone, i. e. the temperature effectiveness based on the heat source. Discusses the inverse problem of hybrid temperature diffusion.

Keywords source and sink, heat jet, hybrid temperature diffusion, ventilation rate, numerical simulation, experiment

★ Tongji University, Shanghai, China

①

到目前为止,仅有极少数的、非常简单的、非常特殊的扩散问题可以解析求解,而实际工程中涉及的扩散问题均是诸如多个源汇这类复合扩散问题。本文研究的多源汇复合扩散流场问题是从实际工程中提炼出来的一个高温热射流扩散问题。本文采用的研究方法是实验和数值模拟计算方法,由于所研究的扩散问题发生在大型矩形隧道形空间里,相同尺度的实验无法进行,而采用相似理论指导下的模型实验和流场数值模拟相结合的方法是目前解决这类大型空间扩散问题可行的研究方法。

1 物理问题描述

在一个矩形隧道形空间(128 m×16.4 m×8.7 m),一端开启一端封闭,靠近封闭一端两侧有对称排风口,对空间进行单向通风;空间内存在四

股参数相同的高温热射流,热射流出口为直径 900 mm 的圆形风口,与垂直方向成 30°角,源流进口为 3 000 mm×2 400 mm 的矩形风口,其他参数如图 1 所示^①。

2 模型实验研究

2.1 模型实验参数比例缩尺

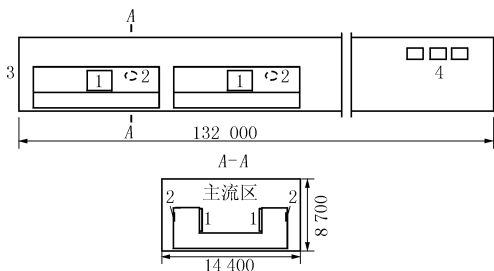
定常黏性流场的量纲一关系式简化为^[1]

$$F(Eu, Pr, Re, Fr) = 0 \quad (1)$$

保证上述四个特征数同时满足相似条件几乎不可能,因此,需要作近似处理,以简化模型^[2]。经

①[☆] 臧建彬,男,1973 年 10 月生,博士,讲师
200092 上海市四平路 1239 号同济大学机械工程学院
(021) 69589511 (0) 15901308540
E-mail: jianbinzang@mail.tongji.edu.cn
收稿日期:2005-11-01
一次修回:2006-09-21
二次修回:2006-11-06

① 同济大学暖通空调及燃气研究所, 装载舱通风系统设计研究, 上海:同济大学,2003



1 热射流源流进口 2 热射流出口 3 通风气流入口 4 排风口

图 1 物理模型

过简化,确定以阿基米得数 Ar 作为模型实验的控制特征数^[3],即有

$$F(Ar) = 0 \quad (2)$$

式中 $Ar = \frac{\Delta T g l}{T u^2}$, ΔT 为流场中温度与通风气流进口空气温度的差, $\Delta T = T - T_a$, 其中 T 为流场中任一点的温度, K , T_a 为通风气流进口空气温度, K ; g 为自由落体加速度, m/s^2 ; l 为特征长度, 取热射流出口直径, m ; u 为特征速度, 取热射流出口速度, m/s 。

首先根据实验条件及考虑安全因素,确定温度相似倍数或温差相似倍数(二者之间存在关系),进而确定其他相似倍数。本文中模型实验的相似倍数见表 1。

表 1 相似倍数数据表

	符号	数值
几何相似倍数	C_l	0.083 3
温度相似倍数	C_{T_0}	0.615
温差相似倍数	$C_{\Delta T_0}$	0.25
速度相似倍数	C_u	0.184
风量相似倍数	C_G	0.001 278

2.2 模型实验系统

实验装置包括隧道形空间模型及 3 套气流模拟系统,如图 2 所示^[4]。高温热射流模拟系统有两

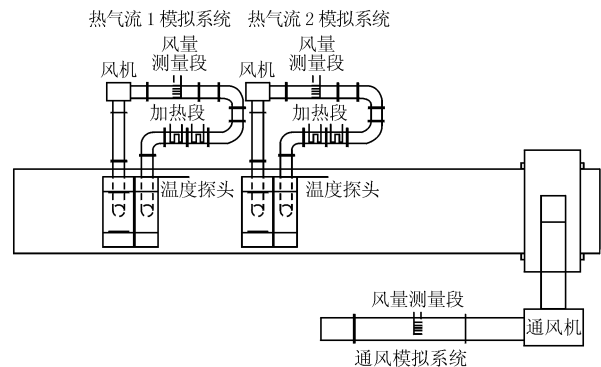


图 2 模型实验系统

套,分别模拟前后两对对称热射流,包括风机、风量测量段、加热段及相应的通风箱体;通风模拟系统包括通风机和风量测量段。

测量断面共 9 个,按照距离进口断面的距离划分,具体位置见表 2。每个断面均布置 8 个测点,测点位置数据见图 3 和表 3。

表 2 断面位置

断面编号	断面位置/m								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
模型断面位置/m	1.14	1.65	2.07	2.80	3.70	4.88	6.39	7.72	9.58
原型断面位置/m	13.6	19.8	24.8	33.6	44.4	58.5	76.6	92.6	115

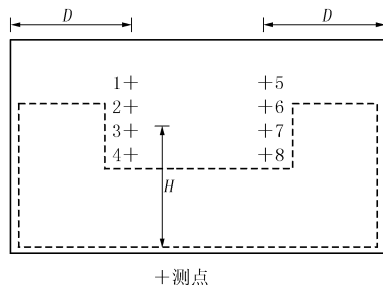


图 3 测点位置

表 3 测点数据

测点编号	测点位置 H/D/m			
	1,5	2,6	3,7	4,8
模型测点位置 H/D/m	0.705/0.25	0.585/0.25	0.458/0.25	0.332/0.25
原型测点位置 H/D/m	8.46/3.0	7.02/3.0	5.50/3.0	3.98/3.0

2.3 模型实验工况

实验工况如表 4 所示。

表 4 模型实验工况

	热射流强度		通风量/(m ³ /h)		
	出口温度/K	流量/(m ³ /h)	1	2	3
原型	599	61 200	1 000 000	1 500 000	2 000 000
模型	369.5	78	1 278	1 917	2 556

3 数值模拟

在 FLUENT 软件平台上^①,对上述物理问题进行数值模拟分析研究。采用标准 $K-\epsilon$ 两方程模型,近壁面采用标准壁面函数(standard wall function)法。根据非稳态计算结果可知,过程大概经过 15 s 就很快趋于稳定,所以采用三维稳态模拟可以满足要求^[2]。

3.1 边界条件的确定

计算工况及边界条件见表 5 和表 6。

① FLUENT 公司. FLUENT 6.0

表5 计算工况

计算工况	热射流强度		通风量/ (10 ⁴ m ³ /h)
	出口温度/K	流量/(10 ⁴ m ³ /h)	
1	599	6.12	100/150/200
2	373	5/10/15	100/150/200
3	473	5/10/15	100/150/200
4	573	5/10/15	100/150/200

表6 边界条件

计算 工况	热射流			通风气流		
	出口温 度/K	出口速度/(m/s)	源流进口速度/ (m/s)	进口速度/ (m/s)	出口压 力/Pa	
1	599	26.7	2.36	1.95/2.92/3.90	0	
2	373	21.8/43.6/65.4	1.93/3.86/5.79	1.95/2.92/3.90	0	
3	473	21.8/43.6/65.4	1.93/3.86/5.79	1.95/2.92/3.90	0	
4	573	21.8/43.6/65.4	1.93/3.86/5.79	1.95/2.92/3.90	0	

3.2 计算模型

三维模型如图4所示。由于计算区域相当庞大,所以对计算区域离散时采用了非均匀网格方案进行网格划分,在每股射流出口截面采用加密网格。网格的类型为长方体网格,这种网格在计算的

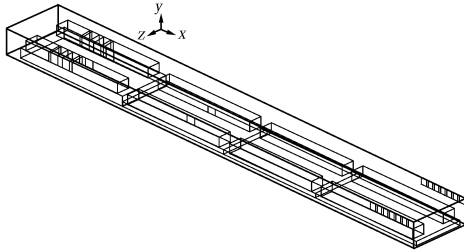


图4 计算模型

时候表现出良好的稳定性,对计算结果的收敛有一定的好处。

4 模型实验与数值计算结果对比分析

风量为1 500 000 m³/h时各断面测点4和测

点8平均温度的模型实验结果与数值计算结果的对比如图5所示。由图5可以看出,数值计算结果与模型实验结果比较吻合。

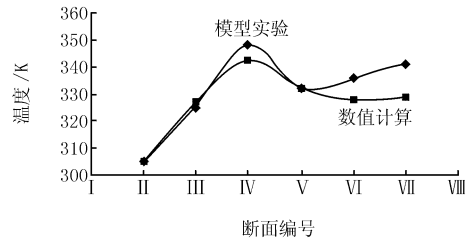


图5 1 500 000 m³/h风量时数值计算与模型实验结果的对比

5 结果分析

为了研究温度扩散规律,笔者共计算了27个工况。计算结果表明,计算结果的对称性非常好,而且在主流区域各高度面的最高温度出现在中心断面($z=8.1$ m)处,因此该面的温度分布可以反映受限空间内温度扩散规律。为分析方便,取高度 $y=3.98$ m处(该高度以下是人员活动区域)温度变化规律为例说明。

5.1 中心断面($z=8.1$ m)上高度 $y=3.98$ m处温度变化规律

图6给出了不同热射流温度和流量,在不同通风量下,中心断面($z=8.1$ m)上高度 $y=3.98$ m处温度的变化。由图6可以发现,热射流流量相同(即出口流速相同)时的温度变化曲线非常相似,只是由于热射流温度的差异导致各点温度相应变化,这说明温度扩散趋势主要由热射流出口速度决定,而温度扩散幅度是由热射流温度决定的。

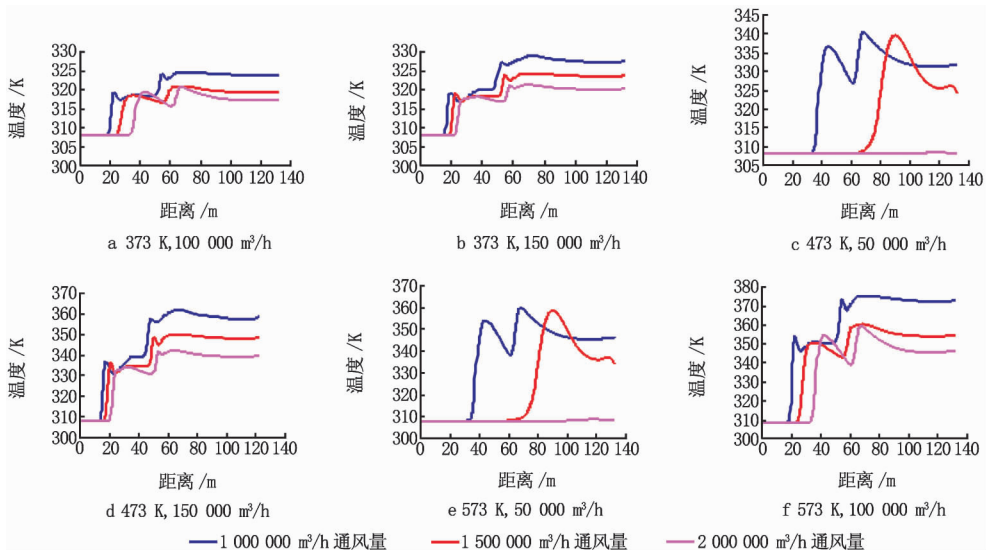


图6 中心断面($z=8.1$ m)上高度 $y=3.98$ m处温度变化

为了表示温度扩散,取中心断面($z=8.1\text{ m}$)上高度 $y=3.98\text{ m}$ 处各工况的最高温度 T_{\max} , 定义一个量纲一温差:

$$\Delta\bar{T}_{\max} = \frac{T_{\max} - T_a}{T_0 - T_a} \quad (3)$$

式中 T_0 为热射流出口温度, K。

研究表明,量纲一温差 $\Delta\bar{T}_{\max}$ 与热射流出口温度 T_0 和流速 U_0 、通风气流进口温度 T_a 和风速 U_a 有关,另外量纲一温差 $\Delta\bar{T}_{\max}$ 还与距进口的距离 x 有关,因此有下式成立:

$$\Delta\bar{T}_{\max} = f(T_0, T_a, U_0, U_a, x) \quad (4)$$

将上式整理为量纲一形式,即

$$\Delta\bar{T}_{\max} = \frac{T_{\max} - T_a}{T_0 - T_a} = 0.011\ 548\ 1 \left(\frac{T_0}{T_a}\right)^{-0.358\ 391} \left(\frac{U_0}{U_a}\right)^{0.262\ 102\ 8} \left(\frac{x}{L}\right)^{-3.779\ 279} \quad (7)$$

5.2 基于热源的温度效率

本文讨论的问题是有限空间内多个热射流温度扩散时在一定区域(如人员活动区域)内的温度分布,通常情况下考虑的是该区域的平均温度,采用既有的温度效率概念可以评价通风的效率,但有时需要知道该区域的最高温度,或者需要控制该区域的最高温度。

上节中给出的量纲一温差表示的是区域最大温差与热源出口温差的比值,可以反映通风方式对控制区域内最高温度的影响,因此这里定义量纲一温差为评价这类问题的指标——基于热源的温度效率。

基于热源的温度效率 E'_T 的计算式为

$$E'_T = \frac{T_{\max} - T_a}{T_0 - T_a} \quad (8)$$

由式(6),(8)可得

$$E'_T = \frac{T_{\max} - T_a}{T_0 - T_a} = C_1 \left(\frac{T_0}{T_a}\right)^{C_2} \left(\frac{U_0}{U_a}\right)^{C_3} \left(\frac{x}{L}\right)^{C_4} \quad (9)$$

5.3 复合温度扩散反问题

在求解通风问题时,经常要控制一定区域的最高温度,需要确定通风方式和通风量,若通风方式确定的话则需要确定通风量,这就是复合温度扩散反问题。

整理式(9),可得

$$U_a = U_0 \left[\frac{T_{\max} - T_a}{C_1 (T_0 - T_a)} \left(\frac{T_a}{T_0}\right)^{C_2} \left(\frac{L}{x}\right)^{C_4} \right]^{-\frac{1}{C_3}} \quad (10)$$

$$\Delta\bar{T}_{\max} = f\left(\frac{T_0}{T_a}, \frac{U_0}{U_a}, \frac{x}{L}\right) \quad (5)$$

式中 L 为隧道形空间的长度。

设式(5)的表达式为

$$\Delta\bar{T}_{\max} = C_1 \left(\frac{T_0}{T_a}\right)^{C_2} \left(\frac{U_0}{U_a}\right)^{C_3} \left(\frac{x}{L}\right)^{C_4} \quad (6)$$

将基本数据按照上式拟合,可得 $C_1 = 0.011\ 548\ 1, C_2 = -0.358\ 391, C_3 = 0.262\ 102\ 8, C_4 = -3.779\ 279$ 。拟合表达式的相关系数为 $0.546\ 8$ 。

因此,四对对称源汇复合温度扩散 $y=3.98\text{ m}$ 处量纲一最大温差的计算式为

$$\Delta\bar{T}_{\max} = 0.011\ 548\ 1 \left(\frac{T_0}{T_a}\right)^{-0.358\ 391} \left(\frac{U_0}{U_a}\right)^{0.262\ 102\ 8} \left(\frac{x}{L}\right)^{-3.779\ 279} \quad (7)$$

由式(10)可以计算控制不同热射流强度(温度和流量)下 $y=3.98\text{ m}$ 以下区域最高温度需要的通风速度。

6 结论

采用模型实验和数值计算相结合的方法,研究了一类特殊的但又不失普遍意义的多源汇复合温度扩散问题,分析了不同通风量对不同温度和流量的热射流温度复合扩散规律的影响,得到以下结论。

6.1 提出了适用于评价通风方式对控制区域内最高温度的影响的指标——基于热源的温度效率,并根据数值计算结果拟合得到了四对对称源汇复合温度扩散 $y=3.98\text{ m}$ 处量纲一最大温差计算式。

6.2 探讨了复合温度扩散反问题,给出了四对对称源汇复合温度扩散时 $y=3.98\text{ m}$ 处控制温度相对应的风速(风量)计算式。

参考文献

- [1] 费祥麟. 高等流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993
- [2] Xu Lin, Zhang Xu, Zang Jianbin. Numerical study on the ventilating and cooling for some tunnel workshop[C]// Pro of 3rd International Workshops on EERB, Xi'an, 2004
- [3] 田忠保, 完强. 地下高大厂房气流组织模化试验研究[J]. 通风除尘, 1996, 15(1): 1-5
- [4] 臧建彬. 通风中典型源汇问题的解析分析及实验研究[D]. 上海: 同济大学, 2005