通风对狭长空间温度分布规律影响的数值模拟与实验研究*

山东建筑大学 刘乃玲☆ 陈兆涛
同济大学 张 旭 韩 星

摘要 对非常温工况的狭长空间，采用通风的方式进行降温是行之有效的。通过数值模拟研究了不同的通风量对狭长空间温度分布的影响规律，根据相似准则建立了实验台，并将模拟结果与实验结果进行了对比，结果表明计算值与实验值吻合较好，证明了用模拟的方法研究类似的工程问题是可行的。

关键词 狭长空间 通风量 温度分布 数值模拟 实验验证

Numerical simulation and experimental study of influence of ventilation on temperature distribution in long and narrow space

By Liu Nailing★, Chen Zhaotao, Zhang Xu and Han Xing

Abstract Mechanical ventilation is effective in lowering the temperature in long and narrow space at non-normal temperature. Simulates the influence of different ventilating rates on the temperature distribution. Establishes a test-rig based on the similitude laws. The simulation results are in quite good agreement with that of the experiment by comparison. This validates the practicability of using simulation methods to study similar engineering problems.

Keywords long and narrow space, ventilation rate, temperature distribution, numerical simulation, experimental validation

★ Shandong Jianzhu University, Jinan, China

①

0 引言

对于某些局部有高温热源、侧面没有开口的狭长空间，在短时间内会散发大量难以排除的热量，空间内的温度比空调意义上的常温工况要高出许多，本文将此类工况定义为非常温工况[1]。对于该类环境采用机械通风的方式进行降温是行之有效的。

对于尺寸相对较大的狭长空间，理论上讲实验是最直接有效的研究方法，但是由于受到测量手段的限制，并且涉及的时间、空间域很小，对于这类问题进行全面的实验研究是十分困难的。因此，本文利用 CFD 技术，对机械通风在非常温工况的狭长空间的降温效果进行模拟，并根据相似准则建立实验台对模拟结果进行验证，以期对解决类似的工程问题具有指导作用。

1 物理模型及边界条件

模拟对象长 130 m，宽 16 m，高 8.7 m。采用三维直角坐标进行求解，其几何模型如图 1 所示。将网格划分为块状的混合型网格，大部分为四面体的非结构网格，局部为六面体的结构网格。为了消除网格粗细对计算结果的影响，对网格进行了加密，计算结果变化不大。为了缩短计算时间，

* 山东省自然科学基金资助项目(编号：Y2007F79)，山东建筑大学博士基金资助项目(编号：724012)

①☆ 刘乃玲，男，1966 年 9 月生，博士研究生，工学博士，副教授
250013 济南市和平路新村 38 号
(0) 13616406279
E-mail：liunailing@163.com

收稿日期：2008-01-06
修回日期：2008-03-31

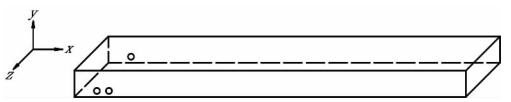


图 1 几何模型

最终使用的网格数约为 32.2 万个，且局部进行了加密细化处理。其中，y 向及 z 向某断面的局部网格质量分别如图 2，3 所示。

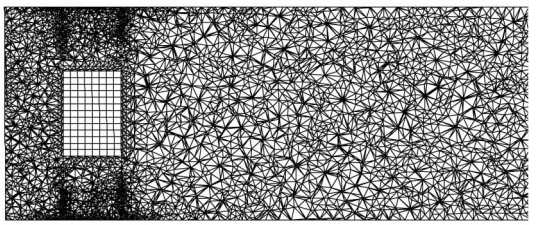


图 2 y 向某断面局部网格质量

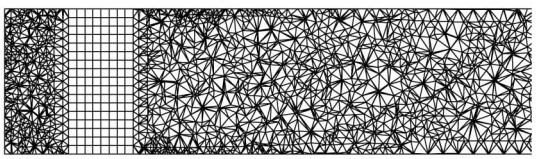


图 3 z 向某断面局部网格质量

根据本流动的特点，模拟时在近壁区采用标准壁面函数，湍流区采用标准 K-ε 模型。

物理模型的两端是开口状态，四周的壁面是绝热壁面，给定无滑移边界条件。模型内的主气流沿 x 方向流动，流动的进口给定速度边界条件，出口给定出流边界条件。热气流有两股，距模型入口端口 7.2 m 处分别从两侧进入，热风口的构造形状类似 90°弯头，热气流入口直径为 1.2 m，为了与后面将要讨论的实验系统相对应，在距模型入口端口 10 m 处设有热气流的回风口，回风口直径也为1.2 m。热气流进口及出口的中心轴线距模型底面的高度均为 2 m，热气流出流方向平行于 x 轴，热气流沿平行于 x 轴的方向进入狭长空间。热气流的回风口给定出流边界条件。由于流动是开口状态下的流动，因此模型内的压力呈常压状态。虽然所计算的对象是相对高温的非常温工况，但在所计算的温度范围内空气密度变化不大，本文忽略了空气密度变化的影响，将该流动状况近似看作是不可压缩流动。

2 模拟结果分析

2.1 工况 1 的模拟结果

工况 1 的边界条件：通风量 $L=250\ \mathrm{m^3/s}$，进风温度为 15 ℃；热气流风量为 93 $\mathrm{m^3/s}$，热风温度为 360 ℃。输入边界条件后，计算得到了空间内的温度分布。在计算结果中选取 3 个有代表性的断面进行分析，其中，$x=35$ m 处 yz 断面的温度分布如图 4 所示；$z=4$ m，$z=8$ m 处 xy 断面的温度分布分别如图 5，6 所示。通过分析计算结果可知，yz 断面的温度分布具有对称性，即 $z=4$ m 和 $z=12$ m 处 xy 断面的温度分布几乎相同。从图 4 可以看出，$z=8$ m 处的 xy 断面即为对称面。

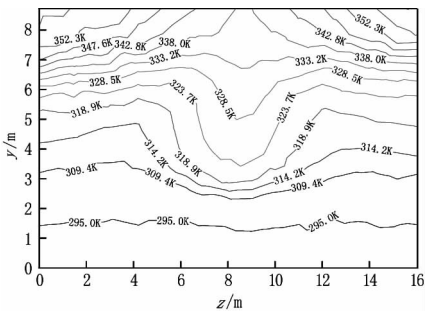


图 4 $x=35$ m 处 yz 断面的温度分布($L=250\ \mathrm{m^3/s}$)

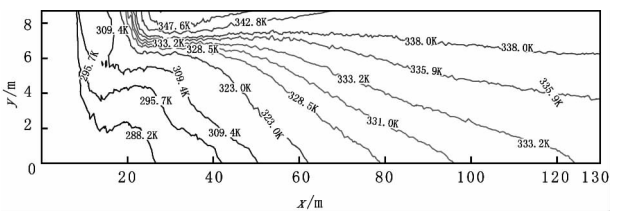


图 5 $z=4$ m 处 xy 断面的温度分布($L=250\ \mathrm{m^3/s}$)

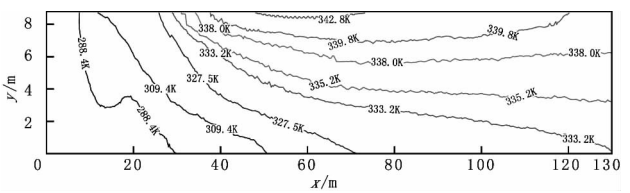


图 6 $z=8$ m 处 xy 断面的温度分布($L=250\ \mathrm{m^3/s}$)

从图 5，6 可以看出，狭长空间上游侧有热源作用时，在机械通风的情况下，沿气流方向下游侧的断面温度分布趋于均匀。

2.2 工况 2 的模拟结果

工况 2 的通风量 $L=200\ \mathrm{m^3/s}$，其他条件同工况 1。为了对比分析，截取了与工况 1 中几个对应的断面进行温度分布分析。温度分布如图 7～9 所示。

比较工况 2 与工况 1 的计算结果可以看出：在热源强度不变（热气流参数不变）的情况下，减少狭长空间内的机械通风量时，空间内各对应点的

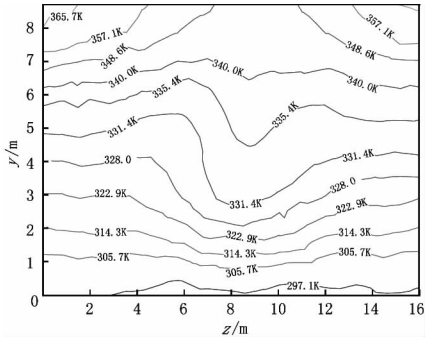


图 7 $x=35$ m 处 yz 断面的温度分布($L=200$ m³/s)

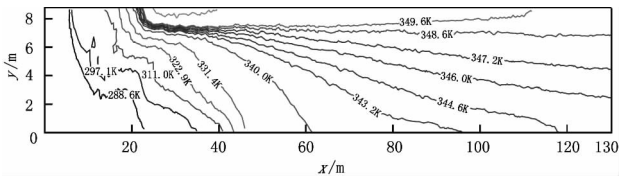


图 8 $z=4$ m 处 xy 断面的温度分布($L=200$ m³/s)

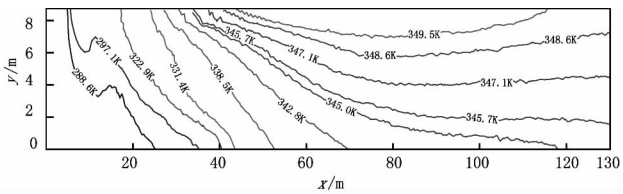


图 9 $z=8$ m 处 xy 断面的温度分布($L=200$ m³/s)

温度均有不同程度的升高,并且下游横断面的温度分布趋向均匀。

2.3 工况 3 的模拟结果

工况 3 的通风量 $L=400$ m³/s,其他条件同工况 1。同样也截取了与工况 1 中几个对应的断面进行温度分析。温度分布如图 10~12 所示。

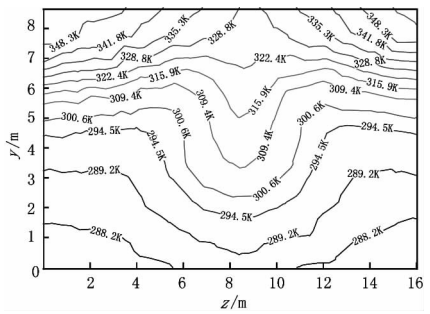


图 10 $x=35$ m 处 yz 断面的温度分布($L=400$ m³/s)

通过分析比较工况 3 与工况 1 的断面温度分布图可以看出,在热源强度不变(热气流不变)的情况下,随着通风量的增大,各断面对应点的温度均降低,下游断面垂直方向的温度梯度增大。

通过综合分析以上 3 个工况的计算结果可以

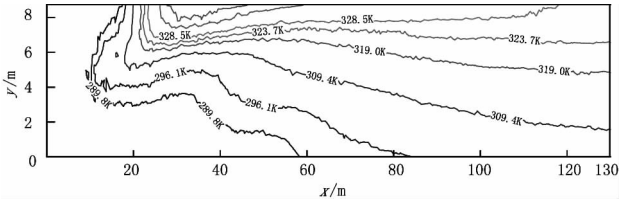


图 11 $z=4$ m 处 xy 断面的温度分布($L=400$ m³/s)

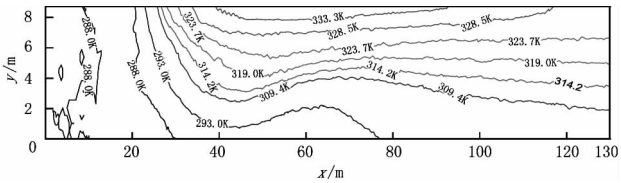


图 12 $z=8$ m 处 xy 断面的温度分布($L=400$ m³/s)

看出,通风量对断面的温度分布影响比较大。通风量越大,断面对应点的温度越低,下游横断面垂直方向的温度梯度越大。这是由于通风量越大,其横断面的气流速度就越大,冷、热气流在空间内的流动时间就越短,冷、热气流的混合及换热就越不充分,反之亦然。

3 实验验证

3.1 实验系统及实验方法

为了验证计算结果的正确性,笔者进行了相关的实验研究。通过分析黏性流体力学实验的相似准则[2],并结合该流动状况的特点,最终选用弗劳德数 Fr 作为指导本实验的相似准则[1]。弗劳德数 Fr 的表达式为

$$Fr=\frac{v}{\sqrt{gl}} \tag{1}$$

式中 v 为气流速度,m/s;g 为自由落体加速度,m/s²;l 为特征长度,m。

根据实验模型与原型的弗劳德数相等的原则,有

$$\frac{v^2}{gl}=\frac{v'^2}{g'l'} \tag{2}$$

式中 上标"′"代表模型。

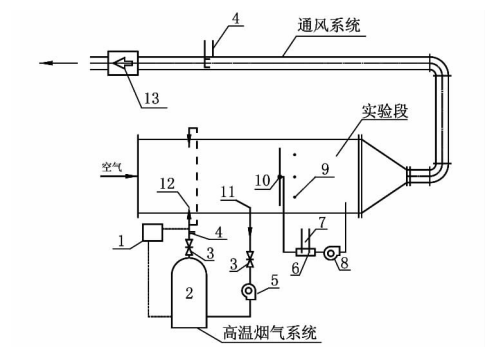
设自由落体加速度比例尺 $C_g=\frac{g'}{g}$,几何比例尺 $C_l=\frac{l'}{l}$,速度比例尺 $C_v=\frac{v'}{v}$。根据式(2)可以得出:

$$\frac{C_v^2}{C_gC_l}=1 \tag{3}$$

为满足实验流态处于雷诺自模区的要求,通常 C_l 不小于 1/12[3],本实验取 $C_l=1/12$,且 $C_g=$

1。由式(3)可得出 $C_v=0.2887$。风量比例尺 $C_G=C_vC_l^2=0.002$。由于本文重点研究温度场的分布及其变化情况，为了真实地反映温度场的变化规律，将温度比例尺 C_T 取为 1。

实验装置如图 13 所示。热气流由热风炉提供，热气流从实验段的两侧送入，热风炉燃烧所用的空气来自实验系统内，回风口仅设一个(如图 13 中的 11 所示)，为满足不同风量的要求，本实验系统的通风机采用直流调速风机。由于受实验条件的限制，只将实验段的断面完全按照几何比例尺设计，实验段下游侧的断面未按比例尺设置，实验时只在 $x=2.9$ m 处的 yz 断面(即图 13 中编号 9 所处的断面)上进行了温度测量，在该断面上共选择了 9 个测点，测点布置如图 14 所示。其对应的模拟对象的断面即为 $x=35$ m 处的 yz 断面。断面温度采用高灵敏度的热电偶及温度记录仪等二次仪表测量；热气流温度由 K 型热电偶及控制器(图 13 中的 1)上配备的显示仪表来测量；热气流流量及通风量采用梳形管(图 13 中的 4)及压力计测量。



1 控制器　2 热风炉　3 闸板阀　4 压力(流量)测量装置　5 风机
6 取样盒　7 干、湿球温度计　8 取样风机　9 热电偶　10 取样管
11 回风口　12 高温烟气入口　13 直流调速风机

图 13　实验装置示意图

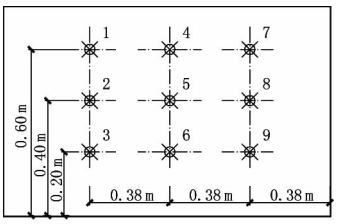


图 14　断面温度测点布置

3.2　实验验证及分析

将模拟计算的 3 个工况根据相似准则进行了实验研究，实验时所对应的风量分别为 0.501，0.402，0.801 m^3/s。图 4，7，10 中对应点的计算结果与实验结果分别如图 15～17 所示。可以看出，实验值与模拟计算值有个别点存在偏差，主要是由于模拟计算时对模拟对象作了一些假设，并且实验台也不可能与模拟对象完全相符所致。如高温烟气的进风管就无法按照相同的比例尺进行设置，因此模型与原型的高温烟气的流速就不符合所要求的比例尺，使得两者的气流组织不同，因此造成了一定的偏差。另外，模拟计算时忽略了辐射的影响，而实验时未采取防止辐射的措施。虽然个别点存在偏差，但整体来看，计算值与实验值吻合较好，计算结果是可信的。

4　结论

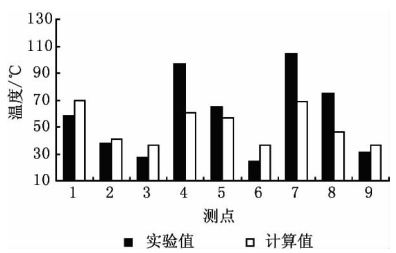


图 15　工况 1 实验值与计算值的对比

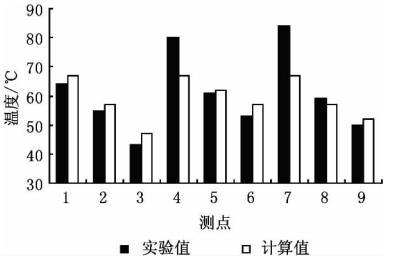


图 16　工况 2 实验值与计算值的对比

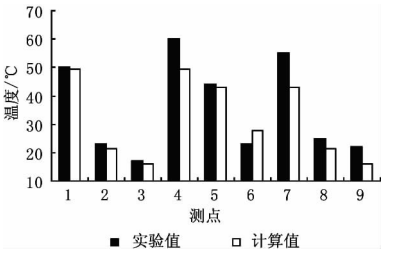


图 17　工况 3 实验值与计算值的对比

4.1　在非常温工况的狭长空间，采用机械通风的方式能有效排除空间内的余热。随着通风量的增大，各个断面对应点的温度均降低。通风量越大，断面对应点的温度越低，下游横断面垂直方向的温度梯度越大。

4.2　通过对比计算结果和实验结果可知，计算值与实验值吻合较好，计算结果是可信的。

参考文献：

[1]　刘乃玲. 细水雾特性及其在狭长空间降温效果的研究[D]. 上海：同济大学，2006

[2]　费祥麟. 高等流体力学[M]. 西安：西安交通大学出版社，1989

[3]　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[R]. 上海：同济大学，2003