

基于烟囱效应的地下建筑通风系统研究

郭 敏¹, 廖义德^{1*}, 谈文鑫¹, 陈 方¹, 刘晓丹²

(1. 武汉工程大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国石油大庆石化公司, 黑龙江 大庆 163714)

摘 要:针对目前地下建筑如隧道、地下车库等通风排气系统采用的机械换气方式, 耗能大、噪音大、效果不佳等缺点, 提出基于烟囱效应利用太阳能的通风系统, 并对其通风效果和换气能力进行了理论分析和数值仿真。计算和仿真结果表明, 此种方式能够较好地达到地下通风换气效果。

关键词:地下建筑; 通风换气; 太阳能; 烟囱效应

中图分类号: TU96⁺2

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.11.022

0 引 言

大型地下建筑如隧道等由于处于地势较低处, 空气往往容易沉积, 特别机动车辆使用的隧道, 受尾气排放的影响, 隧道里的空气质量比较恶劣, 这对经过隧道的人危害较大, 容易引发交通事故^[1]。目前采用的通风方法主要是使用了鼓风机鼓风, 鼓风机安装在隧道顶部, 采用强制排风的方式来促进空气的流通, 这种方式对于比较小的空间有一定的作用, 对较长空间较大的地下建筑就没用明显的用途; 并且鼓风机在鼓风的时候很容易出现自循环的情况, 风机出口的空气很容易串到进口, 这样只能在鼓风机附近造成空气流动, 不能达到换气的效果。大型地下空间采用建造烟囱(竖井)方式, 使室内和外界联通, 然后采用鼓风机将空气排出, 新鲜空气入口等得到补充, 这种方式是较为合理的换气方式。但此种方法消耗能量较大, 鼓风机在隧道的使用寿命内都要运转, 噪音污染严重, 这样消耗大量的能源。

1 烟囱效应原理及换气方案

1.1 烟囱效应

烟囱效应^[2]是从底部到顶部具有通畅的流通空间的建筑物中, 空气(包括烟气)靠密度差的作用, 沿着通道很快进行扩散或排出建筑物的现象。即户内空气沿着有垂直坡度的空间向上升或下降, 造成空气加强对流的现象。目前应用比较成熟的例子是澳大利亚千米“太阳塔”工程, 澳大利亚

EnviroMission 公司正在准备建造一个规模庞大的太阳能风力发电站, 即“太阳塔”工程。

1.2 隧道通风换气方案

如图1所示, 太阳能热水器置于建筑物顶部, 当热水温度达到所需温度时, 循环泵工作, 热水经过保温管传送至隧道底部的烟囱(竖井)口, 通过多层并列带散热片的小直径散热管进行散热, 从而使烟囱底部空气温度升高。空气受热, 密度会发生变化, 其格拉小夫数增加, 使空气沿着竖井上升, 此时底部空气由地下空间内的空气得到填充, 只要实现持续加热, 底部就会吸入大量空气, 而地下建筑内的空气可以通过入口或其他通风口得到补充, 从而起到排气的效果^[3]。

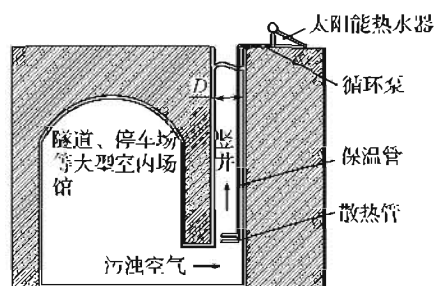


图1 排气竖井(烟囱)及其管道布置

Fig.1 Ventilation chimney and piping layout

太阳能热水器将太阳能直接转换为热能用来加热水, 这样能量的利用率远超过太阳能转换为电能后再转换为热能。目前太阳能热水技术应用比较成熟, 并且也在集体供暖和工程供热中得到实际应用。此种方法是将热能通过水这种介质传递到地下建筑底部, 采用循环的方式, 可以减少能量的损失。

收稿日期: 2010-03-04

作者简介: 郭 敏(1986-), 男, 湖北监利人, 硕士研究生, 研究方向: 结构设计, 流体传动与控制。

指导老师: 廖义德, 教授, 博士, 研究方向: 流体传动与控制, 机电设备设计与制造。*通信联系人

2 理论分析计算

取竖井(烟囱)高 H , 直径为 D , 热水的温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.1 数学模型

取竖井内部一体积为 ΔV 的微元进行分析^[3], 假设竖井底部即进口空气密度为 ρ_{in} , 出口空气密度为 ρ_{out} , 则微元的质量为 $\Delta m = \rho_{\text{in}} \Delta V$, 垂直方向的位移为 z , 浮力为:

$$\Delta F_{\text{浮}} = \rho_{\text{out}} \Delta V g \quad (1)$$

$$\text{有: } \rho_{\text{in}} \Delta V \frac{d^2 z}{dt^2} + \rho_{\text{in}} \Delta V g - \rho_{\text{out}} \Delta V g = 0 \quad (2)$$

整理得:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \left(\frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_{\text{in}}} - 1 \right) g \quad (3)$$

式(1)~(3)中: ρ_{out} 为环境空气密度; ρ_{in} 为烟囱内热空气密度; g 为重力加速度; $\frac{d^2 z}{dt^2}$ 为烟囱内气流上升的加速度.

从式(1)、(2)、(3)中可以看出加速度与密度的关系. 底部加热为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 顶部温度平均为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 密度对应分别为: 1.06 kg/m^3 和 1.205 kg/m^3 . 则

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \left(\frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_{\text{in}}} - 1 \right) g = 1.368\text{ m/s}^2$$

2.2 压强计算

竖井结构处在重力场内, 设进口压力为 p_{in} , 出口压力为 p_{out} , 则有

$$p_{\text{in}} = p_{\text{out}} - \rho_{\text{in}} H \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (4)$$

形成的真空度为

$$\Delta p = p_{\text{out}} - p_{\text{in}} = \rho_{\text{in}} H \frac{d^2 z}{dt^2} = \rho_{\text{in}} \left(\frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_{\text{in}}} - 1 \right) g H = (\rho_{\text{out}} - \rho_{\text{in}}) g H \quad (5)$$

从式(4)、(5)中可以看出真空度与烟囱的高度及进口密度有关系, 提高进口的温度可以使进口密度 ρ_{in} 下降, 使 Δp 增大.

2.3 速度分析

从式(3)中可知 $\frac{d^2 z}{dt^2} = 1.368\text{ m/s}^2$, 假设初始状态进口的速度为 0, 则在出口处有:

$$\begin{aligned} v_{\text{out}}^2 &= 2aH \\ v_{\text{out}} &= \sqrt{2aH} \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 设备处理的有效体积或长度计算

考虑到运行过程中气体在上升过程的能量损

失、沿程压力损失等因数,在稳定后进口速度与出口速度存在一定的差距,此处取一系数 η ,则

$$v_{in} = \eta v_{out} \quad (7)$$

此时的流量为

$$Q = A v_{in} = \pi R^2 v_{in} \quad (8)$$

由式(7)、(8)可知地下空间截面面积为 S ,当设备工作时间为 t 时,隧道有效换气长度 L 为

$$L = \frac{Ql}{S} \quad (9)$$

由式(9)可以根据实际需要布置相应的排风竖井的数量和相隔距离。

2.5 相关参数的确定

利用烟囱效应原理通风换气方式所需功率 P (kW) 为

$$P = \rho Q C(t_w - t_\infty) = \rho A v C(t_w - t_\infty) = \rho \pi \frac{D^4}{4} \eta \sqrt{2aHC}(t_w - t_\infty) \quad (10)$$

将式(10)代入相关参数可以得到不同烟囱高度下达到良好的换气效果时的所需功率与烟囱内经之间的关系曲线如图2所示。

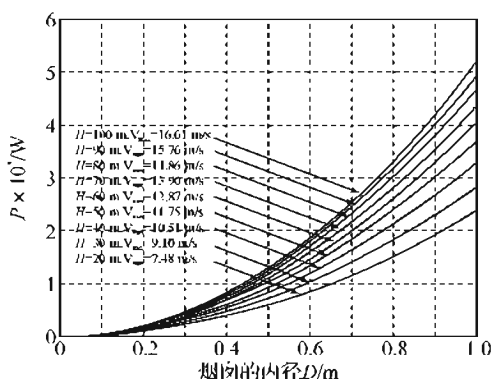


图2 不同高度的烟囱在不同内径下的功率

Fig. 2 The power of device in different height and different diameter chimney

从图2中可知,同一烟囱内经,若要得到大的排量就需要增加烟囱的高度,并且增加功率。

3 仿真

使用 Fluent6.3 软件的 2D 模型进行仿真,竖井高度 H 为 40 m,内径 D 为 1 m,加热方式为在竖井底部两米处井壁加热到 348 K,这样设置比实际的散热量要小,但是也可以有效地抵消由于忽略相关条件的影响,此计算速度应比理论计算速度小^[5-6]。其速度如图3所示,竖井入口速度如图4所示,出口处速度分布如图5所示。

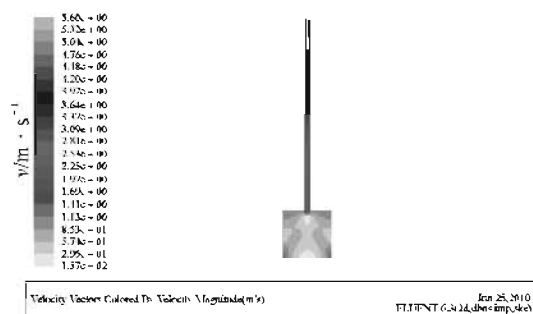


图3 速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector diagram

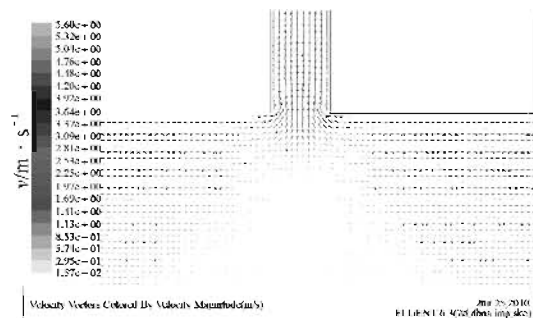


图4 竖井入口处速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector diagram in the inlet of chimney

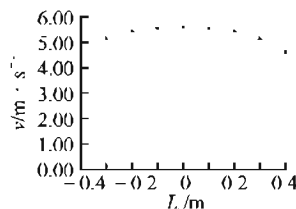


图5 出口处速度分布图

Fig. 5 Velocity scatter diagram of exit

从仿真结果中得知,初始状态出口处的速度可以达到 5.6 m/s,可以推知稳定后进出口的速度都接近该结果,比理论值略小,与预计的相同。

4 理论与仿真分析及能量分配

4.1 空气在烟囱中速度对比

理论与仿真值对比及其偏差如表1所示,分别取烟囱不同过度处的速度进行对比。

表1 理论与仿真值对比及其偏差

Tab 1 The deviation of theoretical value and simulation value

速度	高度 H/m			
	10	20	30	40
理论值/ $m \cdot s^{-1}$	2.62	3.70	4.53	5.23
仿真值/ $m \cdot s^{-1}$	2.71	3.85	4.70	5.60
偏差/%	4.20	4.05	3.75	7.07

通过速度的理论值和速度值比较,最大误差为 7.07%。误差产生的原因^[7]有:①理论计算时,速度系数 η 与实际的环境和设备工艺有一定的关系,一般不会小于 0.5。②仿真时的加热方式与理论原理相同,但是实现方式有一定差异。

4.2 能量利用与分配

太阳能热水器加热 1t 水若需要集热板的面积为 13.68 m^2 , 在非恶劣天气条件下能将水加热至 60°C 左右, 在阳光充足的天气水温可达到 $80 \sim 100^\circ\text{C}$, 能量利用率约为 60%. 1t 60°C 的热水可以为系统提供能量为

$$\begin{aligned} E &= Cm\Delta t = 4.2 \times 10^3 \times 10^3 \times 40 \\ &= 1.68 \times 10^5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

若为一个 20 kW 的系统供能, 使用时间为

$$t = \frac{E}{P} = \frac{1.68 \times 10^5}{20} = 8400 \text{ s} = 2.33 \text{ h}$$

可以通过太阳能热水站的方式来解决热水供应问题. 这样能量使用主要是利用太阳能, 对于天气条件不佳时, 可以采用辅助能源, 如电能加热、锅炉加热等方式配合太阳能使用. 保守估算此种方式通风排气太阳能比例约为 60%. 根据具体的工程, 选用相应的功率.

5 结 语

(1) 利用烟囱效应的通风换气方式与传统的机械换气方式将同体积的空气排到外界所消耗的能量基本相同, 这部分能量属于设备的有用功, 但是机械强制换气方式能量损失较为严重, 并且耗

费的是全部电能. 而烟囱效应的通风换气方式 60% 能量可以由太阳能提供, 这样大大节约其他形式的能量.

(2) 通过理论计算和仿真结果对比, 仿真结果基本上控制在允许的范围. 可以根据室内场所环境来确定烟囱的高度和内经.

此种方式不仅可以用在隧道通风换气, 也适用于地下停车场、大型厂房、大型体育馆、礼堂等场合. 笔者对其原理进行初步探讨, 希望能对实际工程提供参考.

参考文献:

- [1] 杨曼, 彭兴文, 胡文军. 季家坡隧道易燃气体监测分析及安全对策[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(5): 66-69.
- [2] 张靖岩, 霍然, 王浩波, 等. 烟囱效应形成机理的实验[J]. 中国科学技术大学学报, 2006(1): 73-76.
- [3] 李云. 自然通风在建筑中的运用[J]. 内蒙古科技与经济, 2009(3): 93-95.
- [4] 张建涛, 王丁丁. 当代建筑运用“烟囱效应”原理的设计表达[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2007(6): 125-128.

(下转第 90 页)

c. 不同地质条件在外载荷下可能产生最大应变变形是设计参数选取的关键,采用新的材料、新焊接工艺可以更好的保证城市燃气管道的安全性能。

参考文献:

- [1] TSG R0004-2009. 固定式压力容器安全技术监察规程[S]. 国家质量监督检验检疫总局.
- [2] 李鹤林. 油气管道基于应变的设计及抗大变形管线钢的开发与应用[J]. 焊管, 2007, 30(5): 5-11.
- [3] 孟凡刚. X80 钢管道及现场环焊缝焊接技术发展现状[J]. 石油化工设备, 2008, 37(3): 44-49.
- [4] 舒安庆, 王■, 魏化中. 含腐蚀缺陷燃气管道极限载荷的有限元分析[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(2): 102-104.

- [5] 舒安庆, 吴开斌, 魏化中. 燃气管道裂纹扩展 G 判据及分形研究[J]. 机械强度, 2009, 31(5): 837-841.
- [6] 舒安庆, 吴开斌. 城市燃气管道的焊接残余应力分析[J]. 石油化工设备技术, 2007(2): 62-64.
- [7] DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems(2000)[S].
- [8] Alan Glover. X80 Design, Construction and Operation [C]//X80 钢级管线国际技术研讨会会议文集. 北京: 北京石油工业出版社, 2004: 143-198.
- [9] TX 77060 USA. [S]. American Bureau of Shipping. Subsea Pipeline Systems and Resers.
- [10] Bratfos H A. Use of shrain-based EAC for the assessment of flaws in pipeline girth welds subjected to plastic deformations [C]//Proc. Int. Pipe Dreamer's conference, Yokohama: ASME, 2002: 957-985.

Limited state design method based on strain in natural-gas system

SHU An-qing^{1,3}, WU Kai-bin^{2,3}

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Boiler Pressure Vessel Inspection Institute, Wuhan 430015, China;

3. Wuhan Pressure Vessel and Pipeline Safety Engineering Research Center, Wuhan 430074, China)

Abstract: Since the complication of the stress in gas pipeline, the detail design of this method included the limited requirements of strain, local yield-strength matching and accumulated strain were discussed. Some significant conclusions for the construction of gas pipeline were drawn in practice.

Key words: limited strain state; local yield; strength matching; accumulated strain

本文编辑: 陈小平

☆

(上接第 87 页)

- [5] 王泽宇, 冯炼, 张发勇. 竖井烟囱效应作用下的隧道火灾通风数值模拟[J]. 地下空间与工程报, 2006(6): 485-486.
- [6] 常玉锋, 陈锋, 贾沛, 等. 排烟方式对火场人员疏散影

响的数值模型[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(9): 46-49.

- [7] 黄晓曼, 胡英盛. 节能建筑与通风设计[J]. 科技信息, 2009(19): 255.

Study of hypogee vantilation system based on chimmey effect

GUO Min¹, LIAO Yi-de¹, TAN Wen-xin¹, CHEN Fang¹, LIU Xiao-dan²

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wanhun Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Daqing Petrochine Company Plastics Plant, Daqing 163714, China)

Abstract: In order to avoid the high energy consumption, poor effects and noise pollution in the vantilation of hypogee such as tunnel, underground parking, this paper proposed the theory of vontilation based on chimmey effect and used the solar energy. Much theoretical calculation and digital simulation was made for this theory. As the result shows, this system can reach the effect we want completely.

Key words: hypogee; vantilation; solar energy; chimney effect

本文编辑: 陈小平