

文章编号:1000-582X(2011)07-125-06

热辐射在倾斜通道热流场的作用

霍岩, 郜冶, 武红梅, 邹剑峰

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对热辐射是通道内热流场的重要影响因素之一,采用实验和数值计算方法对倾斜角度为 10° 、 20° 和 30° 的两端开口通道内热流场进行了研究。使用基于大涡模拟(LES)求解浮力驱动 N-S 方程的数值模拟方法求得的模拟结果和实验值吻合较好。通过使用耦合热辐射模型的数值计算结果和忽略热辐射的数值计算结果分别与实验结果进行对比分析的方法发现,在热源一定的条件下,对于倾斜角度在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 之间的通道,热辐射使通道上部高温区域的温度降低,随着倾斜角度的增大,热辐射对通道低端开口上壁面附近的影响作用减弱,而倾斜角度对于热辐射在通道高端开口上壁面附近的作用则影响不大,同时,在通道倾斜角度为 30° 时,热辐射使通道内高温区域向高端开口方向倾斜,并使通道高端的下部温度升高。整个实验和计算结果可为倾斜通道内热流场的理论研究提供参考依据。

关键词:热辐射;斜通道;浮力;大涡模拟

中图分类号:TU111.19

文献标志码:A

Effect of thermal radiation on thermal flow field in inclined tunnel

HUO Yan¹, GAO Ye¹, WU Hong-mei¹, ZOU Jian-feng¹

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin,
Helongjiang 150001, P. R. China)

Abstract: The thermal radiation is the main factor affecting internal thermal flow field in a tunnel. This paper studies on two open ends of a channel inclined with angles of 10° , 20° and 30° by experiments and numerical simulations. The experimental data agree well with the predicted results by using Large Eddy Simulation (LES) to solve N-S equations driven by the buoyancy flow. And the influence of thermal radiation on thermal flow field of tunnel with inclination angles from 10° to 30° at same heat source is obtained by comparing the experiment results and numerical resolutions of coupled with radiation model and without radiation model. Thermal radiation makes temperature near the upper wall of tunnel drop, and the influence of thermal radiation on bottom end of tunnel declines with the inclination angle increasing. However, the inclination angle has a little effect on temperature near the ceiling of the top end of tunnel. Simultaneously, the higher temperature zone leaning to the top end due to the thermal radiation is obtained, and the temperature at the bottom of the upper part of the tunnel increases. The findings of the study are important references for theory research of thermal flow field in inclined tunnels.

Key words: thermal radiation; inclined channel; buoyancy; large eddy simulation

收稿日期:2011-01-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(HEUCFT1002);高等学校博士学科点专项科研基金(20060217001)

作者简介:霍岩(1980-),男,哈尔滨工程大学博士后,主要从事火灾动力学方面的研究,(E-mail)huoyan205@@126.com。

坡型隧道、矿井巷道和地铁出入口等是典型的具有一定角度的倾斜通道,其内发生火灾时,热烟气由于浮力的作用在冷热气体之间产生压力差,使热烟气沿着通道顶端流向起火点以外的区域,其流动与传热是一个非常复杂的过程^[1],并且会对人员的生命安全产生巨大的威胁^[2]。为了了解火灾发生时通道内的流场运动规律,Carvel 和 Beard^[3]采用实验方法研究了隧道形状及通风对火源热释放速率的影响。Olivier^[4]采用缩比模型研究了隧道内的烟气流动控制。Wang 等^[5]对顶部有开口的隧道进行了全尺寸火灾实验,并对隧道顶部开口温度和烟气流动进行了研究。由于通道内的火灾流场涉及燃烧学、流体力学、化学动力学、多项流和热辐射等学科,因此增加了其模型研究的难度,而其中的辐射换热在倾斜通道内流场中具有很重要的地位,很多情况下热源附近的热量都主要通过辐射的方式传递,从而影响着流场的温度和热空气的流动状态^[6-8],而且,早期未考虑辐射的通道火灾模型^[9-10]目前已无法满足工程准确度的要求。由于辐射换热过程和流动等是相互耦合的,热辐射对倾斜通道内流场的影响很难用实验来直接测量得到,因此,为了对大倾角时隧

道内火灾时热流场中的辐射起到作用有所了解,笔者利用文献[11]中的缩比模型斜通道流场实验结果,并使用基于大涡模拟技术的场模拟方法,通过耦合热辐射模型的数值计算结果和未考虑热辐射的数值计算结果分别与实验结果进行对比分析的方式,得出了热辐射对于倾斜通道内热流场的作用和影响,从而为倾斜通道内火灾模型的研究提供了参考依据。

1 斜通道内热流场的实验装置

两端开口的斜通道净尺寸为 3.0 m (长)×0.8 m (宽)×1.0 m (高),整个通道的倾斜角度为 θ ,热源为一功率为 1 500 W 的电热炉,放置于通道底部中间位置(图 1(a)(b)),Pt 电阻温度传感器分布在通道中心线上(图 1(b)),其测量精度为 $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,通道倾斜时热电阻 A 在低端开口位置, F 在高端开口位置, E 在距高端开口 0.5 m 处。热源在数据采集系统启动 2 min 后通电加热 42 min 后停止加热,1 h 后停止温度采集。2 次温度采样间隔 1.7 s。环境温度在 20~21 $^{\circ}\text{C}$ 变化。

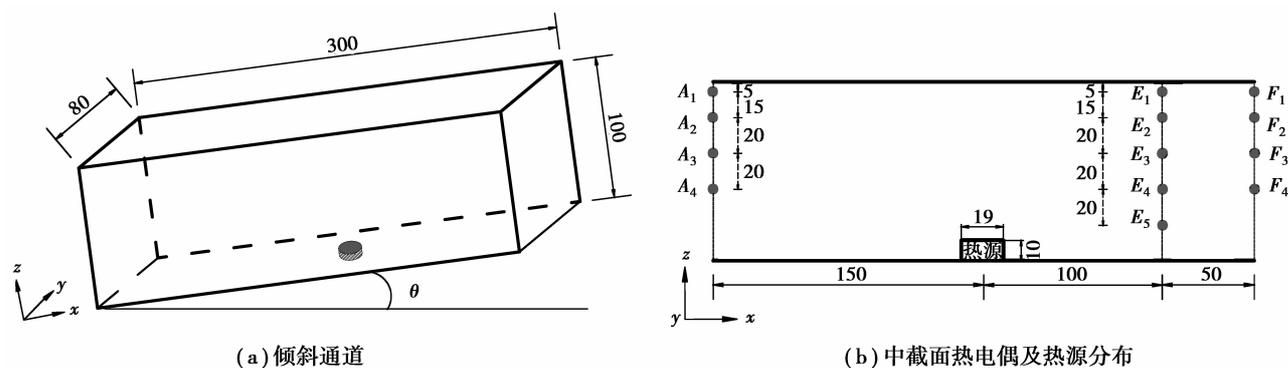


图 1 倾斜通道示意图(单位:cm)

2 数学模型与计算设置

通道内的流场主要为热浮力驱动的低马赫数流动过程,为对其进行准确的模拟,选择美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的数值软件 FDS (Fire Dynamic Simulator)^[12-13]为平台对倾斜通道内流场进行模拟。其主要求解适用于低马赫数的浮力驱动流方程^[14],其主要方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{V}|^2 - \mathbf{V} \times \boldsymbol{\Omega} \right) + \nabla p - (\rho - \rho_{\infty}) \mathbf{g} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{V}) - \frac{d p_0}{dt} = \dot{q} + \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T - \nabla \cdot \mathbf{q}_r, \quad (3)$$

$$p_0(t) = \rho \mathcal{R} T, \quad (4)$$

式中: ρ 为气体的密度; \mathbf{V} 为气流速度矢量; \mathbf{g} 为重力加速度矢量; h 为显焓; T 为气流温度; t 为时间; p 为压力; p_0 为环境大气压力; $\boldsymbol{\Omega}$ 为旋度张量; k 为热传导率; \dot{q} 为体积热释放率; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量; \mathbf{q}_r 为辐射

热通量; \mathcal{R} 为气体常数。

考虑耦合热辐射计算时,辐射热传递通过求解非散射灰体的辐射输运方程得到

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \kappa(\mathbf{x}) [I_b(\mathbf{x}) - I(\mathbf{x}, \mathbf{s})], \quad (5)$$

式中: \mathbf{s} 是射线方向单位矢量; $I(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ 是沿射线方向的辐射强度; κ 是吸收系数; I_b 是黑体辐射强度。

固体壁面视为灰体漫射表面,离开壁面的辐射强度为

$$I_w(\mathbf{s}) = \epsilon I_{bw} + \frac{1-\epsilon}{\pi} \int_{\mathbf{s}' \cdot \mathbf{n}_w} I_w(\mathbf{s}') |\mathbf{s}' \cdot \mathbf{n}_w| d\Omega, \quad (6)$$

式中: $I_w(\mathbf{s})$ 是壁面辐射强度, ϵ 是发射率; I_{bw} 是壁面黑体辐射强度; \mathbf{n}_w 是壁面上的单位法向量。

辐射的求解采用类似于对流研究中采用的有限体积法 (FVM) 来求解,把单位球划分成有限数量个离散立体角,每一个计算网格内辐射输运方程的离散形式是通过对方程 (5) 在相应的立体角内 $d\Omega$ 对整个网格积分得到

$$\int_{\Omega'} \int_{V_{ijk}} \mathbf{s} \cdot \nabla I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) dV d\Omega = \int_{\Omega'} \int_{V_{ijk}} \kappa(\mathbf{x}) [I_b(\mathbf{x}) - I(\mathbf{x}, \mathbf{s})] dV d\Omega, \quad (7)$$

辐射热流矢量定义为

$$\mathbf{q}_r(\mathbf{x}) = \int_{4\pi} \mathbf{s} I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) d\Omega. \quad (8)$$

则,能量方程中的辐射损失源项可表示为

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}_r(\mathbf{x}) = \kappa(\mathbf{x}) (U(\mathbf{x}) - 4\pi I_b(\mathbf{x})), \quad (9)$$

式中, $U(\mathbf{x}) = \int_{4\pi} I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) d\Omega$. (10)

计算采用 Smagorinsky 亚格子模式的大涡模拟 (LES), Smagorinsky 常数取 0.20; 同时,在低马赫数条件下,为便于数值计算,近似将能量方程中的源项结合进了散度限制方程中。所有的空间量采用二阶有限差分法离散,时间的微分项则以显性二阶 Runge-Kutta 法离散化。至于 Poisson 方程式形式的总压力 (Total pressure) 微分方程式则利用快速傅立叶变换法 FFT (Fast Fourier Transform) 直接求解。热辐射计算中,把单位球划分成 104 个离散立体角,大约需要增加 20% 的计算机 CPU 运行时间。

根据搭建实验通道所用的材料将其边界条件的密度、热传导率和比热分别设置为 545 kg/m^3 、 $0.14 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 和 $1.21 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。为排除计算边界对通道开口处的影响,将计算区域在通道两端开口处沿 X 轴向通道外各延长 0.5 m,扩大区域的

边界条件为 1 个大气压力。采用规则化网格对整个计算区域进行网格划分,划分密度为 $N_x \times N_y \times N_z = 160 \times 32 \times 40$ 。整个计算过程是在 FDS5.3 软件上完成的。

3 结果与分析

通道倾斜角度 $\theta = 10^\circ$ 、 20° 和 30° 时各测点温度实验值和数值计算结果对比如图 2-4 所示。实验值是通过第 900 次采样到第 1200 次采样平均得到的,数值解为通道流场达到稳定状态后,取计算结果在一段时间内 (100 s) 温度的平均值。由图中可以看出,考虑辐射时的计算结果与实验值符合较好,所有测点处的温度相对误差均在 7% 以内,同时,热辐射会使通道上部的高温区域温度降低。图 2 表明,在通道低端开口处,未考虑辐射的计算结果仅在倾斜角度 $\theta = 10^\circ$ 时高估了通道上壁面的温度 33% 左右,而在 $\theta = 20^\circ$ 和 30° 时的结果偏差几乎均为 0,这说明热辐射仅在倾斜角度较小时对低端开口上壁面附近的影响较大,这是由于随着通道倾斜角度增大,由热源处产生的热气流遭到通道顶端阻挡后不再向两侧均匀流动,而主要向上侧开口流动,下侧开口逐渐转变为以外界气体流入通道为主,因此温度的变化减小,热辐射的作用减弱;由图 3、4 可以看出,在不同的倾斜角度条件下,热辐射均使通道高端上壁面附近温度降低,在 $\theta = 30^\circ$ 时热辐射使高端开口下部附近温度升高。对应不同倾斜角度 θ ,在通道高端开口中心处忽略热辐射所造成的温度偏差百分数 $\chi = \frac{T_{\text{no radiation}} - T}{T} \times 100\%$ 随通道的高度 z 的变化如图 5 所示。由图中可以看出,在通道的高端开口处,随着倾斜角度的增大,热辐射所造成的上壁面附近的温度损失始终保持在 26% 左右,同时,热辐射使高端开口下部附近温度的增加量由 0% 逐渐升高至 6%。

图 6 给出了倾斜角度 $\theta = 30^\circ$ 时的斜通道内流场达到稳定状态后的某一时刻 (500 s) 中截面 ($y = 0.4 \text{ m}$) 上的温度和流线投影分布。由图中可以看出,未考虑热辐射作用时的温度场比考虑热辐射作用时的温度场值高,同时,考虑热辐射作用时的高温区域向通道高端倾斜幅度较大,通道内的流动以低端开口流入和高端开口流出为主,而未考虑热辐射时的高温区域倾斜幅度很小,倾斜通道高端开口以下部流入和靠近通道上壁面附近区域流出为主。这是由于当通道倾斜角度较大时,热气流在浮力的作

用下做垂直向上运动,因此热源产生的高温区域会向通道上端开口倾斜,此时由于热辐射的作用使高温区域下侧附近的空气升温并由高端开口向外运动,因此最终导致的结果是高温区域向通道高端倾斜的幅度增大,同时高温区域由于对流换热和热辐

射的同时作用致使温度降低,这也正是导致在倾斜角度较大时未考虑热辐射作用的计算结果会高估计通道上壁面附近温度同时也过低估计下壁面附近温度的主要原因。

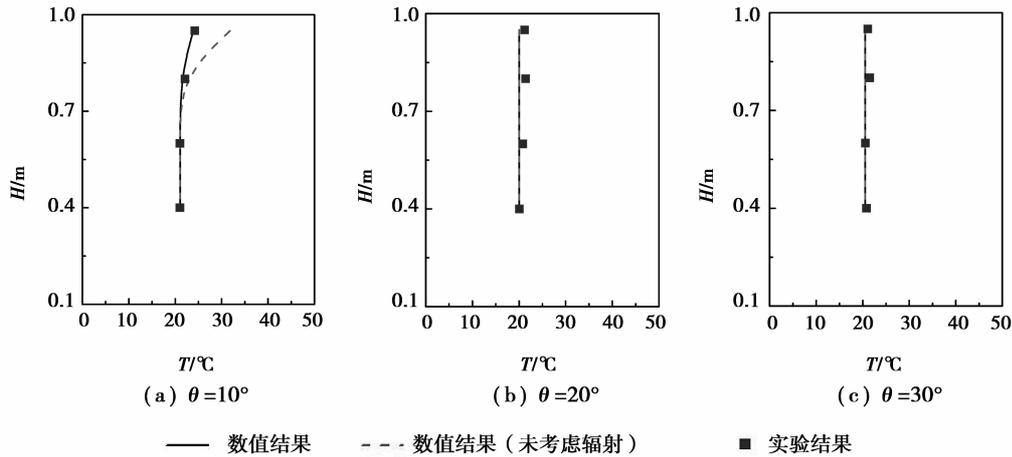


图 2 热电偶 A 各测点温度的计算结果和实验值比较

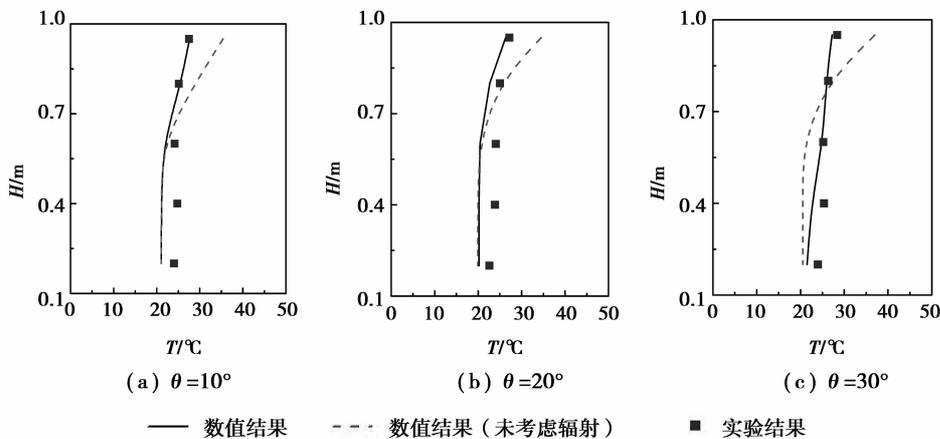


图 3 热电偶 E 各测点温度的计算结果和实验值比较

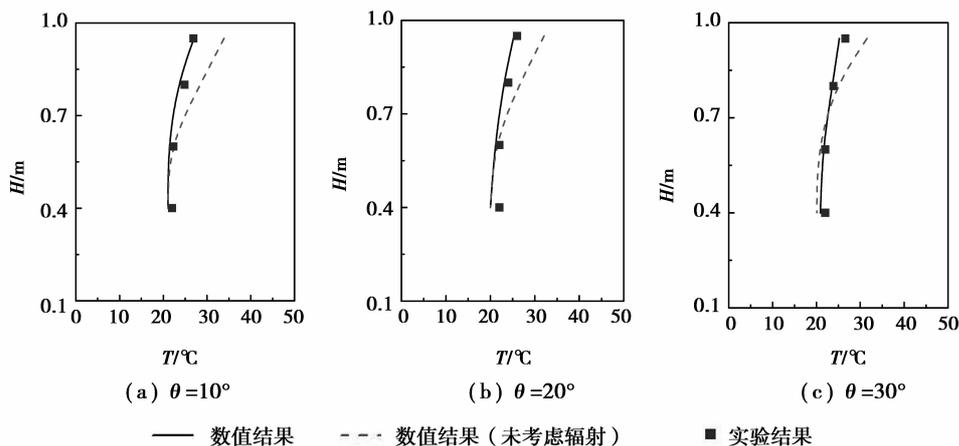


图 4 热电偶 F 各测点温度的计算结果和实验值比较

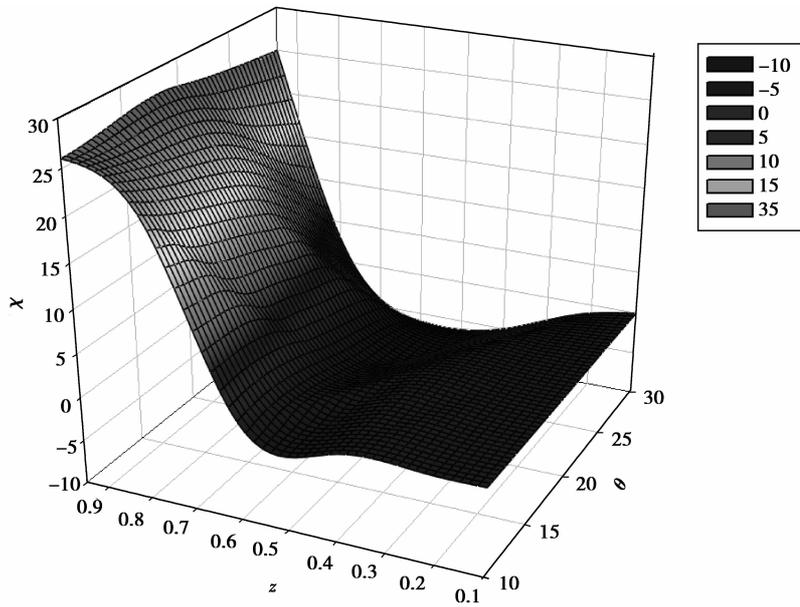


图 5 χ 随倾斜角度变化

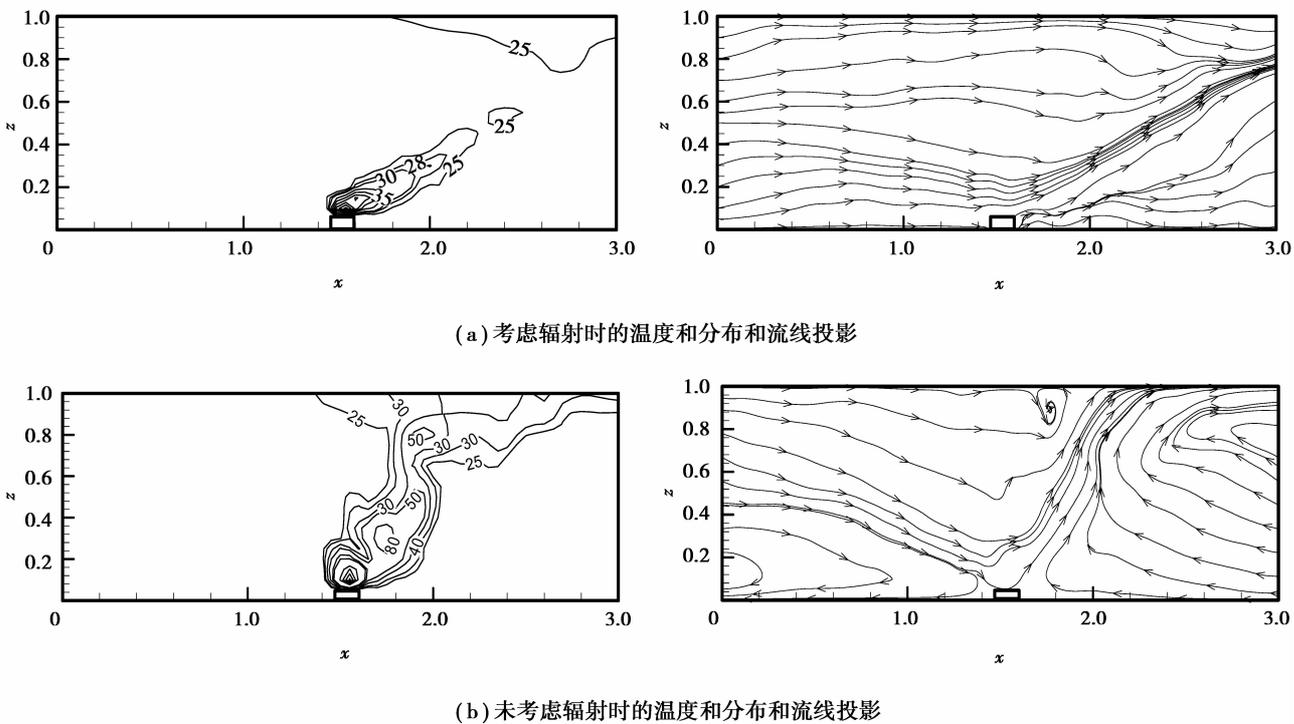


图 6 $\theta=30^\circ$ 时通道中截面上等温线和流线投影分布 ($y=0.4\text{ m}$)

4 结 语

在一定热源的条件下,通过对两端开口通道在倾斜角度 $\theta=10^\circ$ 、 20° 和 30° 时,耦合热辐射模型和未考虑热辐射时的数值计算结果分别与实验结果进行对比,可得到如下相关结论:

- 1) 热辐射会使通道上部的高温区域温度降低;
- 2) 在通道低端开口处,热辐射仅会在倾斜角度较小时造成上壁面附近的温度损失,当倾斜角度超过 20° 时,热辐射的影响作用消失;
- 3) 在通道的高端,随着倾斜角度的增大,热辐射对通道上壁面附近温度的影响变化不大;

4)当通道的倾斜角度 $\theta=30^\circ$ 时,热辐射使高温区域向高端开口倾斜的幅度增大并使通道高端的下部附近温度升高。

参考文献:

- [1] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2006.
- [2] MIGOYA E, CRESPO A, GARCIA J, HEMANDEZ J. A simplified model of fires in road tunnels. Comparison with three-dimensional models and full-scale measurements[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(1): 37-52.
- [3] CARVEL R O, BEARD A N, JOWITT P W. The influence of tunnel geometry and ventilation on the heat release rate of fire [J]. *Fire Technology*, 2004, 40(1): 5-26.
- [4] VAUQUELIN O. Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an “air-helium reduced scale model”: principle, limitations, results and future [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23: 171-178.
- [5] WANG Y F, JIANG J C, ZHU D Z. Full-scale experiment research and theoretical study for fires in tunnels with roof openings[J]. *Fire Safety J*, 2009, 44(3): 339-348.
- [6] KUMAR S, COX G. Mathematical modeling of fires in road tunnels [C] // 5th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels / BHRA, 1985:61-76.
- [7] 叶会华, 李明, 李文华, 等. 辐射换热对巷道中火灾烟气流场的影响[J]. *煤炭学报*, 2003, 28(5): 482-485.
YE HUI-HUA, LI MING, LI WEN-HUA, et al. Effect of the thermal radiation transfer on the flow-field of mining-fire period in mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(5): 482-485.
- [8] 杨高尚, 彭立敏, 安永林, 等. 公路隧道行车及横通道间距的研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2007, 52(2): 186-191.
YANG GAOSHANG, PENG LIMIN, AN YONGLIN, et al. Study on spacing between vehicles and passages of road tunnel [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2007, 52(2): 186-191.
- [9] COX G, KUMAR S. A numerical model of fire in road tunnel [J]. *Tunnels & Tunnelling*, 1987, 19 (3): 55-60.
- [10] 邹剑峰. 有限开口空间内热流体力学问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2008.
- [11] MCGRATTAN K B, HOSTIKKA S, FLOYD J E. *Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide*[M]. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [12] MCGRATTAN K B, BAUM H R, REHM R G. Large eddy simulation of smoke movement [J]. *Fire Safety Journal*, 1998, 30(2): 161-178.

(编辑 郑洁)