

深部矿井季节性通风风流与围岩换热特性

岳高伟^{1,2}, 李敏敏^{1,2}, 许梦飞^{1,2}

1. 河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室, 焦作 454000

2. 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454000

摘要 针对矿井通风入口风流季节性差别大的现象, 对不同季节通风巷道风流温变规律进行现场测试, 建立巷道围岩-风流换热的数学物理模型, 数值模拟通风风流与围岩的换热特性。研究表明, 风流在煤巷中流动过程中不断与围岩进行热交换, 进而导致风流温度不断升高, 但在工作面段风流升温缓慢, 数值计算结果与实测结果相吻合。不同季节通风巷道内风流升温效果差别明显, 入口风流温度越低, 风流在巷道内流动相同距离时, 温度越低, 但温升越大。

关键词 换热; 风流温度; 季节性通风; 深部矿井

随着矿井开挖深度不断增加, 矿井热害问题也越来越突出。相关数据表明, 围岩温度随着开挖深度成线性增长, 增长幅度约为 $2\sim 4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}^{[1]}$ 。且煤巷各种热源中, 围岩散热占主导地位^[2]。针对围岩-风流换热问题, 舍尔巴尼^[3]、平松良雄^[4]等提出了井巷围岩与风流的不稳定换热系数理论, 岑衍强等^[5]在其基础上计算出不稳定换热系数的理论解, 使得矿井风流温度预测向电算化、实用化迈出了可喜的一步。随后, 许多学者采用数值模拟方法对巷道中的风流温度进行研究^[6-8], 但主要是对巷道局部(如掘进工作面处)风流进行建模, 对整体巷道的围岩-风流传热问题鲜见报道^[9-12]。而且, 由于季节不同, 矿井通风风流温度差异较大, 因此研究围岩向风流的传热规律, 预测矿井风流温度, 为井下降温技术的实施提供理论依据, 成为矿山热害治理中亟待解决的问题。

本文通过建立整体巷道围岩-风流换热的数学物理模型, 数值模拟不同季节(即不同入口风温下)巷道内风温变化规律。

1 矿井热害及通风风流温度测试

以淮南朱集西矿为例, 井田位于安徽省淮南市。该区测温孔地温梯度为 $2.44\sim 3.01^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 平均地温梯度 $2.78^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 属地温梯度正常区。区内中深部存在正常地温背景下的高温区, 一级高温区($\geq 31^{\circ}\text{C}$)一般在 $-504\sim -630\text{ m}$ 以下, 二级高温区($\geq 37^{\circ}\text{C}$)一般在 $-701\sim -880\text{ m}$ 以下, 具有相当大程度的热害。

1.1 矿井围岩温度测试

该区11-2煤层-906 m围岩温度可达 40°C 以上, 围岩随

径向深度变化, 随着径向深度增大, 围岩温度逐渐升高, 当达到 25 m 左右时, 围岩温度趋于稳定, 大约在 41°C (图1)。图2为巷道不同位置围岩温度日变化测试结果。从图2可以看出, 围岩面温度随时间有所变化, 但温差变化不大。

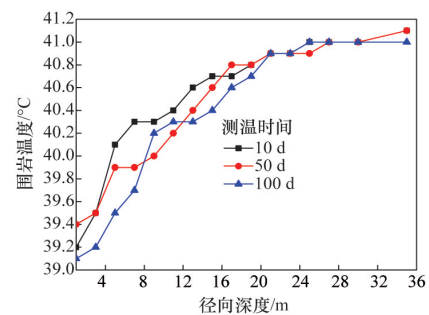


图1 围岩温度随径向深度变化

Fig. 1 Temperature variation of surrounding rock with radial depth

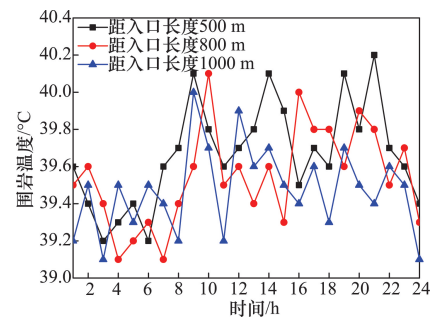


图2 巷道围岩温度日变化测试结果

Fig. 2 Daily temperature variation of roadway rock

收稿日期: 2015-05-18; 修回日期: 2015-06-17

基金项目: 河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室开放基金项目(2013KF-01); 河南省科技攻关计划项目(142102310268); 中国博士后科学基金项目(2013M531673)

作者简介: 岳高伟, 副教授, 研究方向为矿业安全与防治, 电子信箱: mxlygw@163.com

引用格式: 岳高伟, 李敏敏, 许梦飞. 深部矿井季节性通风风流与围岩换热特性[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 195-199; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.032

1.2 矿区季节气温变化规律

淮南朱集西矿位于东经 116°38'12" ~ 116°45'43", 北纬 32°52'25" ~ 32°55'45"。该区属过渡带气候, 为季风温暖带半湿润气候, 夏季炎热, 冬季寒冷, 季节性气温差别大。2013 年不同月份平均气温变化规律如图 3 所示, 2013 年平均气温近 20℃。从图 3 可以看出, 矿井通风风流温度存在季节性变化, 而且不同季节通风气流温差可达 30℃。因此, 有必要对矿井不同季节通风风流在井下的温度变化特性进行研究。

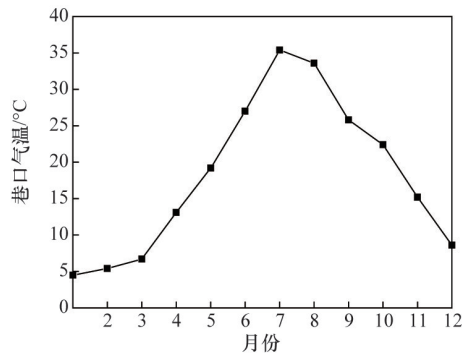
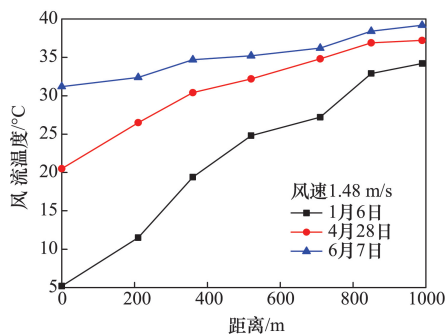


图 3 淮南朱集西矿区气温季节性变化

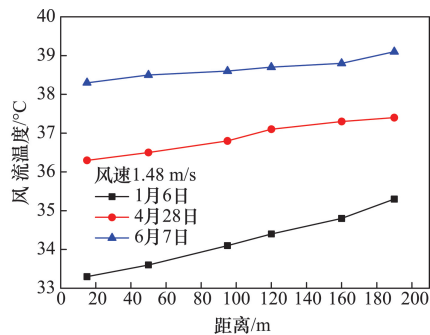
Fig. 3 Seasonal variation of air temperature in Zhujixi mining area

1.3 井下风流温度测试

在通风巷道和采煤工作面安装温度探头(高 1.5 m, 距巷帮 1.5 m), 分别在 2013 年 1 月 6 日(日均温度 5.1℃)、4 月 28 日(日均温度 19.7℃)、6 月 7 日(日均温度 30.2℃)测试通风风流的温度变化规律, 结果见图 4。



(a) 进风巷



(b) 工作面

图 4 风流温度变化

Fig. 4 Variation of airflow temperature

2 巷道围岩-风流换热模型

2.1 数理模型的建立

建立朱集煤矿拱形断面巷道模型(图 5), 巷道横截面宽为 5 m, 半圆拱半径 3.7 m, 直墙高度 1.7 m。巷道整体模型进风巷道长 1000 m, 采掘工作面长 200 m, 回风巷长 100 m。

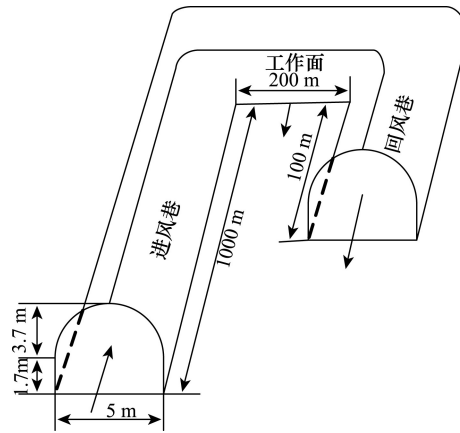


图 5 巷道整体模型

Fig. 5 Model of the entire roadway

2.2 基本理论

受围岩散热影响, 巷道通风风流满足的连续性方程、动量方程和热扩散方程分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \rho g \vec{k} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = K_a / (\rho C) \nabla^2 T \quad (3)$$

式中, ρ 是气流密度; t 为时间; \vec{v} 是速度矢量; \vec{k} 为垂直方向的单位向量; g 为重力加速度; μ 为风流的动力黏性系数; K_a 和 C 分别为风流热传导系数和定容比热; T 为气流温度。

2.3 边界条件

该物理模型选取巷道进口处为入口边界, 回风面出口处为出口边界; 入口边界条件设置为速度入口, 出口边界条件设置为压力出口, 围岩壁处为无滑移绝热恒温壁边界条件。

2.4 网格划分

采用 Fluent 前处理器 GAMBIT 对模型进行网格划分。利用 Tgrid 的方法, 网格间距选取为 1 m, 对几何模型进行整体网格划分。应用有限差分法和交错网格离散控制方程组, 选取基于压力的稳态求解器, 采用 SIMPLE 算法求解离散方程组。

3 数值模拟结果及分析

在进风巷道内, 实测围岩温度在 39.1~40.2℃, 平均温度约为 39.6℃。围岩与风流换热系数为 10.75 W/(m²·℃), 入口风流密度 1.2 kg/m³, 空气的定压比热 1.01 kJ/(kg·℃), 风流的

动力黏性系数 1.8×10^{-5} Pa/s。工作面煤体温度略高于围岩温度,取 41°C 。入口风速设定为 1.5 m/s。

3.1 模拟-测试结果对比分析

为与实测结果对比,分别设定入口风温为 5 、 20 、 30°C ,数值模拟巷道与工作面风流温度变化规律。获取高 1.5 m、距巷帮 1.5 m 位置沿巷道及工作面的风流温度,绘制其风温变化曲线图及实测散点图(图6)。从图6可看出,数值模拟结果

与实测结果基本吻合,误差在 $-2.4\sim 3.5^\circ\text{C}$,说明数值模型合理。模拟结果和实测结果均表明,在进风巷内,随风流运动,围岩不断与风流发生热交换,进而导致风流温度升高,且随巷道长度增大,风流温度逐渐增大至接近围岩温度。而在工作面,虽然风流温度逐渐升高,但升高幅度较小,这是因为风流温度与煤岩温度相差越小,热交换越弱,因而温升不大。

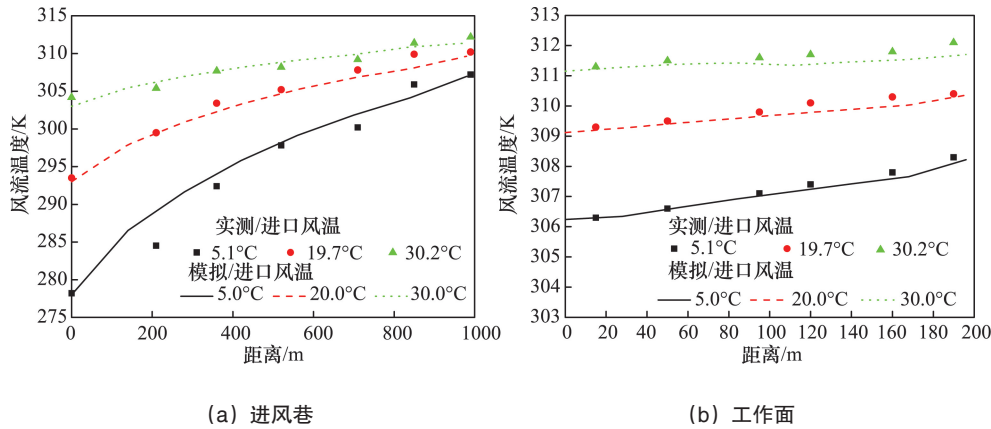


图6 沿进风巷/工作面风温变化

Fig. 6 Variation of airflow temperature in the ventilating roadway and working face

3.2 季节性通风风流与围岩换热分析

以入口风速 1.5 m/s、入口风温 20°C 、围岩温度 41°C 为例,数值分析进风巷及工作面风温变化特征。截取巷道 1.5 m 高

处巷道-工作面风流温度变化云图(图7),可以看出,沿进风流方向,受围岩温度影响,风流温度逐渐升高(图8)。

图9为进风巷不同位置断面风温等值线图。

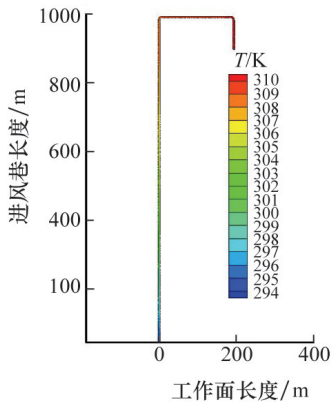


图7 风流温度变化

Fig. 7 Cloud chart of airflow temperature

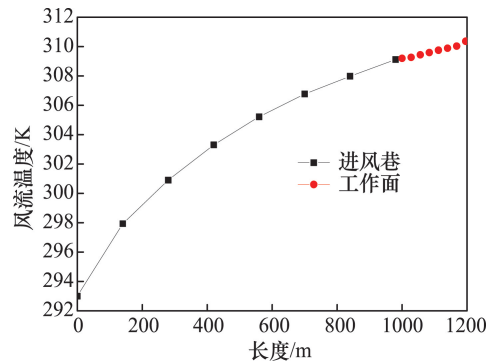


图8 巷道 1.5 m 高处风流温度变化

Fig. 8 Variation of airflow temperature at the height of 1.5 m

由图9可以看出,风流在围岩处发生热交换,导致接近围岩处风温较高,而后温度较高的风流逐渐与内侧低温风流热交换,使得巷道内风流温度均升高。但从图9也看出,巷道断面中心部分的风流温度虽然也逐渐升高,但其温度低于边部温度,如图10所示。

由图3淮南朱集西矿区气温季节性变化规律,按月份对其气温统计平均,可得不同月份平均气温:1—2月平均气温

约 6°C ,3月和11月平均气温约 10°C ,4月平均气温约 15°C ,10月平均气温约 20°C ,5月和9月平均气温约 25°C ,6—8月平均气温约 30°C 。以不同月份的气温平均值为巷道入口风温,数值模拟不同入口风温条件下的巷道围岩与风流换热规律,得到风流温度随流向的温度变化规律(图11)。从图11可以看出,在风流速度一定时(1.5 m/s),无论是在进风巷还是在工作面,风流温度均随流动距离增大而升高,尤其是在风流进

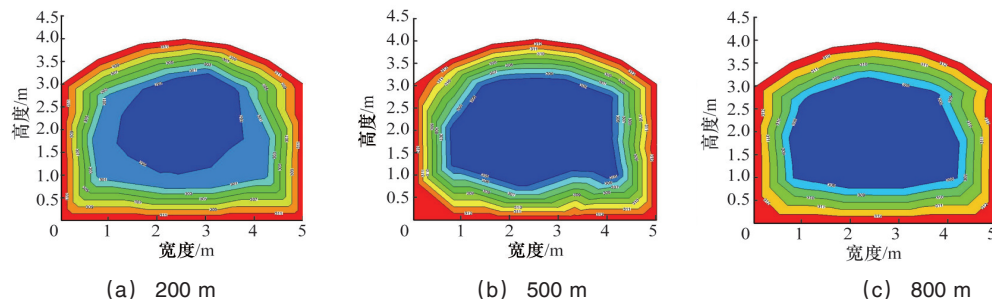


图9 进风巷断面风温等值线

Fig. 9 Contour map of airflow temperature at different roadway sections

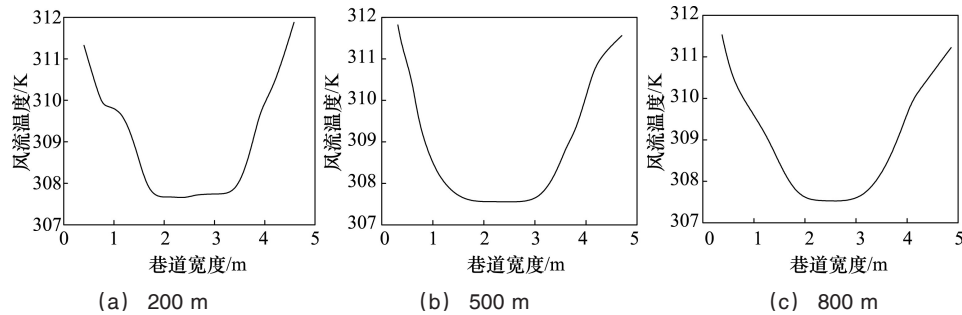


图10 进风巷断面1.5 m高处风温

Fig. 10 Airflow temperature at the height of 1.5 m at different roadway sections

入进风巷初始阶段,风流升温较快,而在工作面,风温变化很小。同时从图11可以看出,不同月份(不同入口风温),在巷道内风流升温效果差别明显,即入口风温越低,在巷道内流

动相同距离时,升温越高(图12),如在进风巷980 m处、入口风温279 K时,风流升温可达28.96 K;而入口风温303 K时,风流升温可达8.39 K。

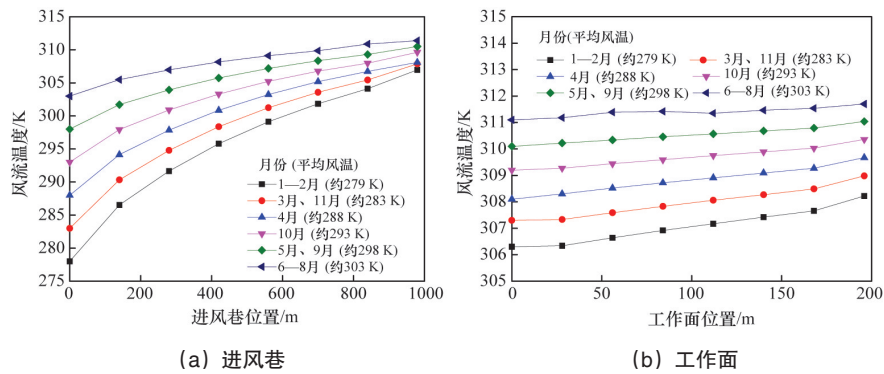


图11 不同月份通风风流温度变化规律

Fig. 11 Variation laws of airflow temperature in different seasons

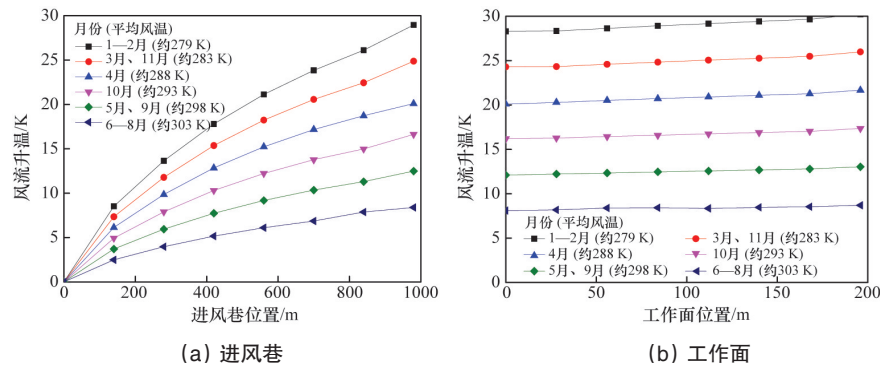


图12 不同季节通风风流温升规律

Fig. 12 Airflow temperature rising laws in different seasons

4 结论

以淮南朱集西矿为例,在不同季节对通风风流沿巷道的温度变化规律进行测试,建立巷道围岩-风流换热的数学物理模型,数值模拟了不同入口风速条件下巷道内风流的升温特征,研究结果表明:

1) 随着围岩径向深度增大,围岩温度逐渐升高,当达到25 m左右时,围岩温度趋于稳定,大约在41℃。巷道围岩温度日变化不大,平均约为39.6℃。

2) 淮南朱集西矿井通风风流温度存在季节性变化,不同季节通风气流温差可达30℃。

3) 数值模拟结果与实测结果基本吻合,误差在-2.4~3.5℃,说明数值模型合理。在巷道内围岩与风流发生热交换,导致风流温度逐渐升高。在工作面,风流温度升高幅度较小。

4) 风流在围岩处发生热交换,巷道断面中心部分的风流温度虽然也逐渐升高,但其温度低于边部温度。

5) 巷道内风流升温效果季节性差别明显,即入口风速越低,风流在巷道内流动相同距离时,升温越高。

参考文献(References)

- [1] 孙树魁,张树光.埋深对井巷温度场分布影响的研究[J].辽宁工程技术大学学报,2003,22(3):301-302.
Sun Shukai, Zhang Shuguang. Distribution rule of temperature field with burying depth in heat harmful mine[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(3): 301-302.
- [2] Su Zhaogui, Jiang Zhongan, Sun Zhangqiang. Study on the heat hazard of deep exploitation in high-temperature mines and its evaluation index [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009(1): 414-419.
- [3] 舍尔巴尼 A H. 矿井降温指南[M]. 黄翰文,译.北京:煤炭工业出版社,1982:125.
Шербань А Н. The mine cooling guide[M]. Huang hanwen, trans. Beijing: China coal Industry Publishing House, 1982: 125.
- [4] 平松良雄. 通风学[M]. 刘运洪,译.北京:冶金工业出版社,1982:59-109.

- Hiramatsuyoshio I. Sturdy of ventilation[M]. Liu Yunhong, trans. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1982: 59-109.
- [5] 岑衍强,胡春胜,侯祺棕.井巷围岩与风流间不稳定换热系数的探讨[J].辽宁工程技术大学学报,1987,6(3):105-113.
Cen Yanqiang, Hu Chunsheng, Hou Qizong. Investigation into unsteady heat transfer coefficient K between the surrounding rock of mine wells or lanes and airflow[J]. Journal of Liaoning Technical University, 1987, 6(3): 105-113.
- [6] 孙勇,王伟.基于Fluent的掘进工作面通风热环境数值模拟[J].煤炭科学技术,2012,40(7):31-34.
Sun Yong, Wang Wei. Numerical simulation on thermal environment of ventilation for mine roadway heading face based on fluent software[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(7): 31-34.
- [7] 赵成龙,陈喜山.基于Fluent的独头巷道通风降温的数值模拟研究[J].现代矿业,2011(2):33-36.
Zhao Chenglong, Chen Xishan. Study on numerical simulation of ventilation and temperature drop in heading face based on fluent[J]. Modern Mining, 2011(2): 33-36.
- [8] 杨德源,杨天鸿.矿井热环境及其控制[M].北京:冶金工业出版社,2009.
Yang Deyuan, Yang Tianhong. Thermal environment and its control in mine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [9] 孙浩.深井采空区和废旧巷道风流预冷降温研究[J].金属矿山,2012(11):135-137.
Sun Hao. Research on the air pre-cooling of deep mine's goaf and old roadway[J]. Metal Mine, 2012(11):135-137.
- [10] 刘景秀,李慧,周磊.干燥巷道围岩传热对平巷风流温度影响研究[J].金属矿山,2011(8):147-150.
Liu Jingxiu, Li Hui, Zhou Lei. Influences of wall rock heat transmitting on airflow temperature in dry roadway[J]. Metal Mine, 2011(8): 147-150.
- [11] 高建良,魏平儒.掘进巷道风流热环境的数值模拟[J].煤炭学报,2006,31(2):201-205.
Gao Jianliang, Wei Pingru. Numerical simulation of the thermal environment at working face of diving airway[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 201-205.
- [12] 周西华,王继仁,单亚飞,等.掘进巷道风流温度分布规律的数值模拟[J].中国安全科学学报,2002,12(2):19-23.
Zhou Xihua, Wang Jiren, Shan Yafei, et al. Numerical simulation of the rule of airflow temperature distribution in drifting tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(2):19-23.

Heat transfer characteristics of seasonal ventilation and surrounding rock in deep mines

YUE Gaowei^{1,2}, LI Minmin^{1,2}, XU Mengfei^{1,2}

1. Open Laboratory of Key Discipline of Deep Mine Construction of Henan Province Colleges and Universities, Jiaozuo 454000, China

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract There exists large seasonal difference in entrance airflow temperature in mine ventilation. This paper tested temperature variation in roadway ventilation in different seasons, and established a mathematical heat transfer model of the surrounding rock and airflow to numerically simulate their heat transfer characteristics. The results show that the airflow exchanges heat with the surrounding rock along its path in the roadway, leading to continuous increase of the airflow temperature, which increases slowly in the working face. The numerical simulation results are consistent with the measured results. The variation of airflow temperature is significantly affected by seasonal difference, and the lower the airflow temperature at the entrance is, the larger the temperature change is under the same airflow distance in the roadway. This study reveals the heat transfer characteristics of mine ventilation and may provide references for ventilation cooling technologies.

Keywords heat transfer; airflow temperature; seasonal ventilation; deep mine

(责任编辑 陈广仁)