



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2507557

引用格式:边梦龙,王文才,李建伟.掘进巷道多热源热流固耦合传热数值模拟[J].科学技术与工程,2026,26(27):11685-11692.

Bian Menglong, Wang Wencai, Li Jianwei. Numerical simulation of heat transfer in heat-solid coupling about multiple heat sources in excavation roadway[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11685-11692.

掘进巷道多热源热流固耦合传热数值模拟

边梦龙¹, 王文才¹, 李建伟²

(1. 内蒙古科技大学安全与应急管理学院, 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 包头 014010)

摘 要 为获得矿井掘进巷道多热源复合影响下传热特性,采用数值模拟方法,依托 ANSYS 中 Fluent、Steady-State Thermal、Static Structural 模块进行热流固耦合传热分析,获得了岩体热流密度、热应变分布与掘进巷道在不同风速、入风温度影响下温度场分布规律。结果表明:热水对岩体与空气温度场产生最重要影响,在热水与岩石交界面存在热流密度和等效弹性应变最大值;空气在热水区加热后,温度曲线阶跃式变化且之后稳定增加;产热矿车对其附近岩石热流密度分布影响较小,但该区域的等效弹性应变值较高。入风温度可以从整体上改变巷道内空气温度场,温度值越低降温效果越好。通过风速增加进行降温具有局限性,如风速从 15 m/s 增加到 20 m/s,绝大部分测点空气温度下降值在 0.7 °C 以下,风速达到一定数值后,通风降温效果非常有限。

关键词 掘进巷道; 热流固耦合传热; ANSYS; 等效弹性应变; 空气温度场

中图分类号 TD782;

文献标志码 A

Numerical Simulation of Heat Transfer in Heat-solid Coupling about Multiple Heat Sources in Excavation Roadway

BIAN Meng-long¹, WANG Wen-cai¹, LI Jian-wei²

(1. School of Safety and Emergency Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

[Abstract] In order to obtain the heat transfer characteristics under the influence of multiple heat sources in mine roadway, numerical simulation method was adopted to analyze the heat transfer of heat and solid coupling by relying on fluent, steady-state thermal and static structural modules in ANSYS, and the heat flux density, thermal strain distribution of rock mass and temperature field distribution law of roadway under the influence of different wind speed and inlet air temperature are obtained. The results show that hot water has the most important influence on the temperature field of rock mass and air, and there are maximum values of heat flux and equivalent elastic strain at the interface between hot water and rock. After air is heated in hot water area, the temperature curve changes step by step and then increases steadily. The heat flux distribution of rock near it is less affected by heat producing car, but the equivalent elastic strain value in this area is higher. The temperature of the inlet air can change the air temperature field in the tunnel as a whole, and the lower the temperature, the better the cooling effect. Cooling by increasing wind speed has limitations, such as increasing wind speed from 15 m/s to 20 m/s, the air temperature drop value of most measuring points is below 0.7 °C, and after the wind speed reaches a certain value, the ventilation cooling effect is very limited.

[Keywords] excavation roadway; heat-fluid-solid coupling heat transfer; ANSYS; equivalent elastic strain; air temperature field

目前,煤炭开采深度已达 1 500 m,金属矿开采深度超过 4 350 m,地热开采深度超过 5 000 m,油气资源开采深度达 8 800 m^[1-2]。正在或计划兴建的大中型金属矿山几乎全部为地下深井矿山,未来十年,中国 1/3 以上的金属矿和 53% 的煤矿开采深度将达到或超过 1 km,部分可达 2~3 km^[3-4]。未来主要矿产开采深度将达到 3 000~5 000 m,深部开采

将成为中国矿产来源的重要组成部分^[5-6]。

矿井深部开采中,面临着高地压、高地温、高渗透压和强烈开采扰动等问题^[7-9]。中国已有上百个金属矿井出现了高温问题,140 余个矿井的采掘工作面风温超过 30 °C^[10-11]。现阶段,在 500~1 000 m 开采深度的煤矿中,高温矿井占比达到 63%^[12-13]。高温热害已成为采矿行业普遍面临的

收稿日期: 2025-10-30 修订日期: 2026-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(52464018,52364006); 内蒙古自治区自然科学基金(2023QN05020)

第一作者: 边梦龙(1986—),男,汉族,内蒙古包头人,博士,讲师。研究方向: 矿井热害防治。E-mail: 243519027@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

难题。

在高温环境下作业,人的体表温度升高,汗液蒸发量增加,血流量加大,心跳加快,疲劳感上升,心理状态开始恶化,高温下暴露时间过长甚至危及生命^[14-15]。据相关统计数据,气温升至 32 ℃ 时劳动生产率会降低 5% 左右,气温升至 34 ℃ 时劳动生产率将会降低 50%, 30 ~ 40 ℃ 气温的采掘工作面比低于 30 ℃ 时的事故率高 3.6 倍^[16-18]。温度升高会削弱岩石的强度和弹性模量,降低其储能极限,岩石不可逆变形和破碎程度加剧,岩体稳定性下降^[19-20]。矿井深部高温环境给人员健康和安全生产带来了严重影响。

掘进巷道由于其独特的空间形态,热量容易积聚,成为井下热害最严重的地方^[21-22]。矿井深部掘进巷道大多为高温高湿空气,湿空气在不同压力、温湿条件下自身状态参数也会发生改变,对传热计算中相关的显热、潜热计算产生影响^[23]。掘进巷道中存在的涌水、产热设备、运输矿石的氧化等都在一定程度上加重了热害^[24]。进行掘进巷道热害治理必须综合考虑以上影响因素。

目前对矿井掘进巷道在多热源复合影响下传热过程的研究较少。为此,应用 ANSYS 中 Fluent、Steady-State Thermal、Static Structural 模块进行热流固耦合传热分析,获得岩体热流密度、热应变分布与巷道在不同风速、入风温度影响下的温度场分布。研究结论可对掌握掘进巷道多热源下温度场分布规律,针对性的热害治理提供重要参考。

1 掘进巷道耦合传热理论模型

随着通风时间的增加,围绕掘进巷道的岩体被冷却,被冷却的岩体区域被称为调热圈。假设围岩均质、各向同性,原岩温度恒定,冷却围岩的温度分布服从傅里叶热传导微分方程,即

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式(1)中: t 为围岩内温度,℃; τ 为通风时间,s; r 为围岩距巷道中心的距离,m; α 为围岩热扩散系数, m^2/s 。

岩体与空气的对流传热量为

$$Q_f = h(t_w - t_f) \times 2\pi r_1 \quad (2)$$

式(2)中: h 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_w 为壁面温度,℃; t_f 为空气温度,℃。

岩体内导热量为

$$Q_w = \frac{2\pi\lambda}{\ln(r_2/r_1)}(t_0 - t_w) \quad (3)$$

式(3)中: λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; t_0 为原岩温度,℃。

在巷道通风过程中,围绕巷道的岩体不断被冷却,经历一段时间通风后,冷却范围基本稳定且变化幅度很小。因为变化幅度较小,且对实际现场影响很小,此时可以将调热圈传热状态考虑为无限接近的稳态导热,岩体内导热与岩壁上空气对流传热量近似相等,即 $Q_f = Q_w$ 。

$$t_w = \frac{\lambda t_0 + h t_f r_1 \ln(r_2/r_1)}{\lambda + h r_1 \ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

矿井巷道中有时会有积水或涌水存在,水会蒸发吸热也会凝结放热,这引起巷道空气的空气压力、温度、湿度等参数的变化,复杂湿环境下传热计算是一个难点。

潜热计算公式为

$$Q_q = h_m \gamma (d_2 - d_1) \quad (5)$$

式(5)中: Q_q 为潜热传热量,W; h_m 为表面传质系数, m/s ; γ 为汽化潜热, kJ/kg ; d_2 为 2 点含湿量, $\text{kg}(\text{水蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$; d_1 为 1 点含湿量, $\text{kg}(\text{水蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$ 。

对于淋湿的巷道,围岩通过淋湿面减弱或阻止传热,其热交换流量为

$$Q_s = (\beta_w - 1) h U (t_w - t_f) \quad (6)$$

式(6)中: Q_s 为热交换流量, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; β_w 为巷道壁面涌水淋湿系数; U 为巷道周长,m。

数值模拟是求解矿井巷道复杂传热问题的方法。流体计算中采用 Navier-Stokes 建立风流流动控制方程组,采用标准 $k-\varepsilon$ (k 为湍动能, ε 为湍动能耗散率) 双方程模型计算其流动特性,连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (8)$$

k 方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (9)$$

ε 方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} G_k - G_{\varepsilon 2} \rho \frac{\rho^2}{k} \quad (10)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) \tag{12}$$

式中: x_i 和 x_j 为坐标; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; p 为湍流有效压力, Pa ; u_i 和 u_j 为流体速度, m/s ; μ 为层流黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_t 为湍流黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k 为湍动能, m^2/s^2 ; ε 为湍动能耗散率, m^2/s^3 ; δ_k 为 k 方程湍流普朗特数; δ_ε 为 ε 方程湍流普朗特数; C_k 为影响系数, $\text{kg}/(\text{s}^3\cdot\text{m})$; C_μ 为经验常数; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为常数,分别为1.43、1.91。

2 现场实验

选取中国山东省夏甸金矿-1 020 m一段新掘进通风巷道作为实验对象。该拱形巷道宽3.5 m,高3.32 m,长65 m,断面11.05 m²。该段巷道原岩温度为40 ℃,岩石密度为2 800 kg/m³,比定压热容920 J/(kg·K),导热系数为3 W/(m·K)。实验巷道中有功率92 kW的铲运机作业,设备发热区域表面温度38.7~41.5 ℃。该段巷道采用压入式通风方式,风筒型号DJK50NO.6.5,风筒直径0.5 m,风筒长50 m,风筒断面0.196 25 m²。风筒入口风速13.7~16.2 m/s,入风温度13.5 ℃。巷道内有热水从岩体内流出,水流量约2 kg/s。

实验中使用温湿度记录仪测试环境温度和相对湿度,使用风速仪测试实验区域风速,使用红外测温仪测试巷道壁面和水体温度。温湿度记录仪型号为RC-4,温度范围为-30~60 ℃,相对湿度范围为0~99%,如图1(a)所示。风速仪型号为AZ 9651,风速范围为0~45 m/s,如图1(b)所示。红外线测温仪型号为希玛ST980,温度测量范围:-50~680 ℃,如图1(c)所示。

实验时每隔5 m布置一个测试断面,每个测试面布置4组测点,监测断面气温、风速、湿度等参数变化,4组测点平均值作为实验值,如图2所示。

实验温度数据如表1所示。表1中距离0 m位置为巷道出口,65 m位置为掘进迎头处。实验时,入风温度为13.5 ℃,入风平均风速为15 m/s。



图1 测试仪器
Fig. 1 Test instruments

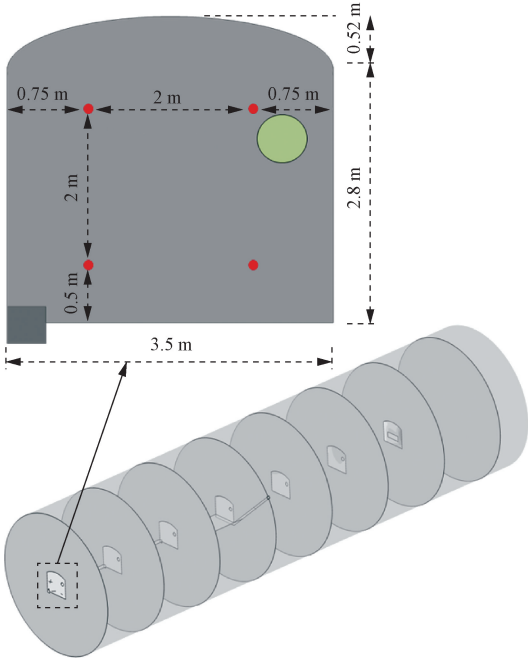


图2 测试断面与测点分布
Fig. 2 Distribution of test sections and test points

表1 实验温度数据表
Table 1 Experimental temperature data

距掘进迎头 的距离/m	温度/℃				
	测点1	测点2	测点3	测点4	平均值
0	16.9	17.6	17.0	17.3	17.2
5	18.5	18.0	18.8	18.3	18.4
10	18.6	18.4	18.9	19.3	18.8
15	18.3	18.6	18.6	18.6	18.5
20	18.2	18.8	18.1	18.5	18.4
25	18.9	18.1	17.6	18.2	18.2
30	18.0	17.9	17.8	17.5	17.8
35	16.3	18.0	17.8	17.9	17.5
40	18.1	17.0	16.4	16.5	17.0
45	17.0	17.1	16.9	15.8	16.7
50	16.0	16.3	16.0	16.5	16.2
55	18.1	20.0	20.0	20.3	19.6
60	14.6	16.2	16.3	15.3	15.6
65	18.0	16.8	18.1	17.1	17.5

3 数值模型与参数设定

3.1 几何模型

根据实测尺寸数据,通过ANSYS软件建立数值模型,如图3所示。该段巷道为新掘进巷道,通风时间较短,围岩传热受影响范围较小,将通风巷道周围10 m岩体作为研究对象。热水从斜上方穿过岩体流入巷道,在巷道底部形成长度为10 m的积水区,该积水区距巷道出口25 m,热水从积水区经排水沟流出。热水入口0.4 m×0.4 m,巷道水深度0.4 m,排水沟0.4 m×0.4 m。新风经过风筒到达作

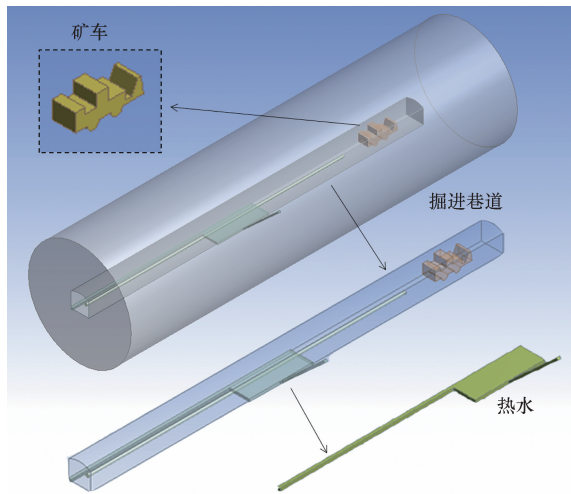


图3 数值模型图

Fig. 3 Numerical model diagram

业地点,距风筒出口 5 m 有一辆矿车,矿车长 5.8 m、高 2.5 m、宽 2 m,矿车后部为散热面。

对模型划分网格,Nodes 为 450 890,Elements 为 2 090 506,网格最大偏斜度 0.84,网格质量可以满足数值模拟需要。

3.2 参数设定

实验中将 Fluent 与 Steady-State Thermal 与 Static Structural 模块耦合,在 Fluent 求解完成后将流场解算结果分别导入 Steady-State Thermal 与 Static Structural 模块中,解算固体区域温度场与热应变。Fluent 中参数设定如表 2 所示。

在数值模拟实验中,风筒入口风速分别设置为 5、10、15、20、25 m/s,风筒入口风流温度分别设置为 10、13.5、17、20.5、24 °C。其中风筒入口风速为 15 m/s 的实验数据与实测风筒入口风速 13.7 ~ 16.2 m/s 时的实验数据进行比较验证。因为热水流速较

表2 Fluent 参数设定表

Table 2 Parameter setting table in Fluent

参数	设定
求解器	压力基求解器
时间	非稳态
重力设置/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	-9.81
湍流模型	标准 $k-\varepsilon$ 模型
入口边界类型	速度入口
入口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5 ~ 25
入口风流温度/°C	10 ~ 24
湍流强度/%	2.9 ~ 3.6
水力直径/m	0.5
岩体外壁面温度/°C	40
水体温度/°C	40
矿车发热面温度/°C	40
出口边界类型	压力出口
迭代步数	1 000

小,对数值模拟结果影响较小,为节约数值计算资源,将水设置为静止状态,水体温度同原岩温度均为 40 °C。

4 实验数据分析

4.1 流固耦合传热温度场分析

在入风温度为 13.5 °C、风速为 15 m/s 条件下,巷道与岩体通风传热达到稳定状态后,温度云图如图 4 所示。

由图 4 可知,靠近掘进头部分因风流温度较低,该区域岩体被冷却范围较大,调热圈范围较大。从巷道纵向截面图来看,调热圈(岩石被冷却范围)的温度场围绕通风巷道呈圆环状分布。在距巷道出口 30 m 位置(截面: $z=30\text{ m}$)是热水影响区域,调热圈的分布范围明显受到热水影响,因为热水与原岩温度相同,该区域调热圈范围较小。在其他区域,各温度区间围绕巷道呈圆环状分布,且分布均匀,变化很小。

Fluent 计算结果导入 Steady-State Thermal 中,计算完成后,岩体区域热流密度分布如图 5 所示。

如图 5 所示,岩体区域热流密度值分布在 $0.009\ 362\ 7\sim 9\ 789.3\ \text{W}/\text{m}^2$,绝大部分区域热流密度在 $1\ 087.7\ \text{W}/\text{m}^2$ 以下。在热水区附近的热流密度值较高,在热水与岩石交界存在热流密度最大值,数值为 $9\ 789.3\ \text{W}/\text{m}^2$ 。从等值面图分布来看,热流密度围绕通风巷道以近似圆环状分布,靠近热水的岩石区域热流密度数值较大。巷道通风时,矿车作业时产生的热量经风流带走,靠近矿车的岩石区域的热流密度分布没有明显变化。靠近热水的岩石区域是热流密度最高区域,也是传热最强烈的区域。

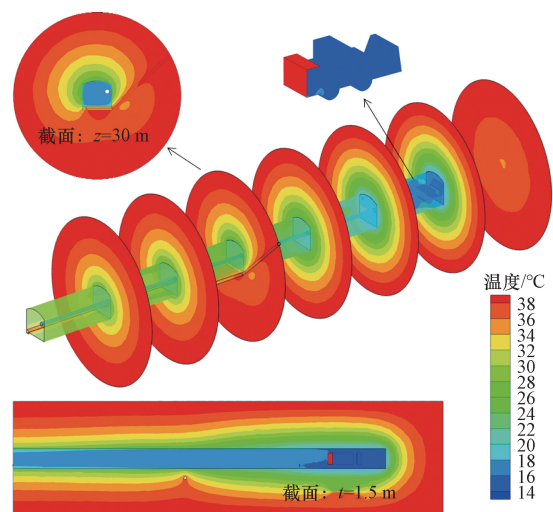


图4 掘进巷道温度云图

Fig. 4 Temperature nephogram of tunnel

在掘进巷道通风过程中,岩体温度不断下降会产生热应变,受温度应力影响岩体会发生微小几何形状或尺寸变化。长期的通风条件下,岩体可能发生裂隙与破坏,影响到安全生产。等效弹性应变可以反映岩体区域热应变强弱程度。Fluent 和 Steady-State Thermal 中的计算结果导入 Static Structural 中,解算完成后,岩体区域等效弹性应变分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出,岩体等效弹性应变数值在

0.000 009 796 9~0.000 545 32 m/m,大部分区域在 0.000 069 299 m/m 以下。在热水和矿车附近的等效弹性应变较高,最大值出现在与热水接触的岩体壁面处,最大值为 0.000 545 32 m/m。受热水、矿车、通风影响较小的模型边缘位置存在热应变最小值。从等值面图分布来看,从巷道出口到热水区,等效弹性应变呈圆环状分布。在靠近热水和矿车的岩石区域,等效弹性应变等值面图分布较为复杂,且距离巷道壁面越近,等效弹性应变数值越高。

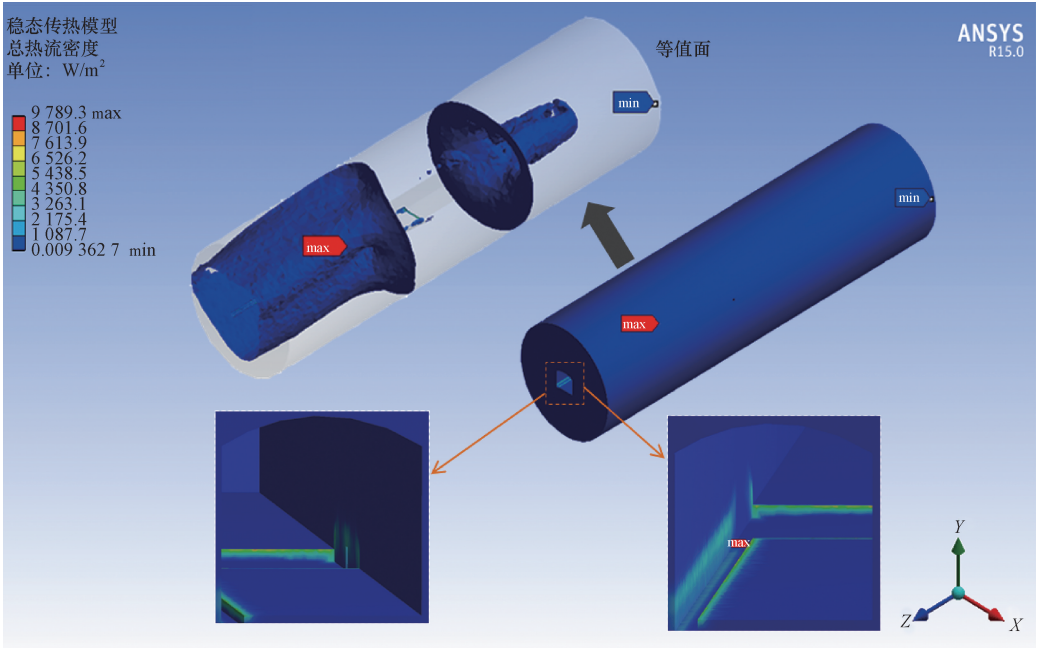


图 5 掘进巷道热流密度分布图

Fig. 5 Distribution of heat flux density in tunnel

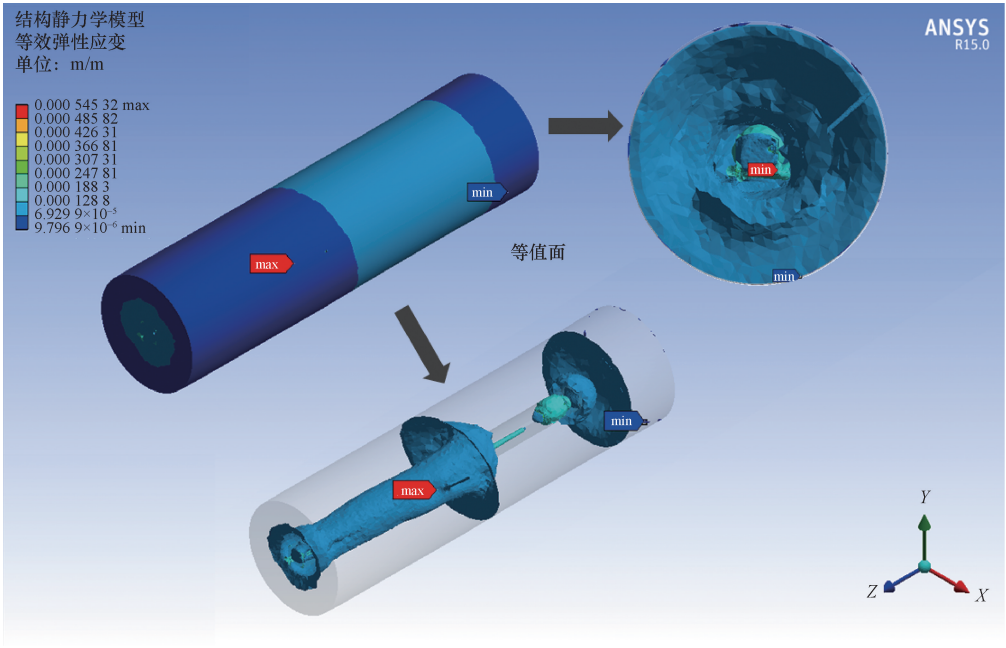


图 6 掘进巷道等效弹性应变分布图

Fig. 6 Equivalent elastic strain distribution diagram of tunneling roadway

4.2 不同入风参数对温度场影响分析

在入口风速 v 为 15 m/s, 入风温度 t_0 分别为 10、13.5、17、20.5、24 °C 条件下, 巷道内各测点温度变化如图 7 所示, 其中纵坐标 0 m 位置为巷道出口位置, 25 ~ 35 m 位置为积水区, 55 ~ 60.8 m 区域有矿车存在, 65 m 位置为掘进头。

如图 7 所示, 入风温度 t_0 分别为 10、13.5、17、20.5、24 °C 条件下, 在 $L=0$ m 时, 空气温度 t 分别为 15.79、18.71、21.63、24.55、27.46 °C; 在 $L=25$ m 时, 空气温度分别为 14.84、17.87、20.9、23.92、26.95 °C; 在 $L=35$ m 时, 空气温度分别为 13.82、16.91、20.03、23.09、26.18 °C; 在 $L=55$ m 时, 空气温度分别为 15.72、18.57、21.4、23.61、26.53 °C; 在 $L=65$ m 时, 空气温度分别为 13.63、16.7、19.78、22.86、25.93 °C; 从各测点数据可以看出, 从在掘进头 ($L=65$ m) 到巷道出口 ($L=0$ m) 总体上空气温度逐渐增加。掘进头处, 通风不良, 导致测点 ($L=65$ m) 温度值较高。在 $L=55$ m 处, 因为受到矿车产热的影响, 测点温度值较高。分析积水区前后温度变化, 可以看出空气经过积水区后, 整体温度曲线有阶跃式上升, 对比 $L=25$ m 和 $L=35$ m 测点数据, 温度上升 0.77 ~ 1.02 °C。

从温度曲线变化可以看出, 矿车产热可对巷道内局部空间空气温度产生影响, 远离矿车区域的空气温度受影响较小。热水对巷道空气温度影响范围更大, 空气在积水区加热后, 温度曲线阶跃式变化且之后稳定增加。在不同的入风温度下, 各条温度曲线等距分布, 这说明, 入风温度的改变可以从整体上改变巷道内空气温度场, 入风温度越低降温效果越好。

在入口空气温度为 13.5 °C, 入口风速分别为

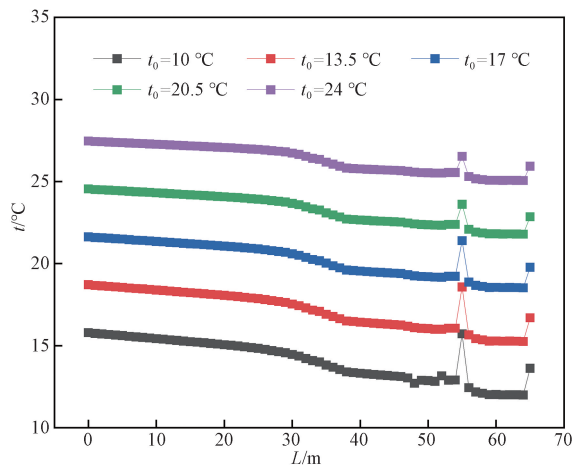


图 7 不同入风温度下巷道空气温度分布

Fig. 7 Distribution of air temperature in roadway under different inlet air temperature

5、10、15、20、25 m/s 条件下, 进行数值模拟实验, 巷道内各测点温度变化如图 8 所示。

如图 8 所示, 入口风速分别为 5、10、15、20、25 m/s 条件下, 在 $L=0$ m 时, 空气温度分别为 22.41、19.9、18.71、18.09、17.53 °C; 在 $L=25$ m 时, 空气温度分别为 21.02、18.76、17.87、17.34、16.9 °C; 在 $L=35$ m 时, 空气温度分别为 19.73、17.68、16.91、16.43、16.02 °C; 在 $L=55$ m 时, 空气温度分别为 20.18、18.97、18.57、18.31、18.14 °C; 在 $L=65$ m 时, 空气温度分别为 20.11、17.67、16.7、16.1、15.55 °C; 在掘进头位置 ($L=65$ m) 和矿车位置 ($L=55$ m), 空气温度较高, 从掘进头到巷道出口 ($L=0$ m), 空气温度整体上在上升。在掘进头和矿车位置的空气温度较高。空气经过积水区后, 温度有阶跃式上升, 对比 $L=25$ m 和 $L=35$ m 测点数据, 温度上升 0.88 ~ 1.29 °C。

空气经过积水区后, 空气温度保持稳定增长, 矿车产热仅对局部环境温度产生影响。从图 8 和图 9 看出, 热水比矿车对巷道空气影响更大。对矿内空气热环境影响最大的是热水, 为控制巷道内空气温度的上升, 应对热水进行隔绝和排出。随着工作面的推进, 矿车工作地点随之改变, 矿车对巷道内热环境影响具有不确定性, 但是其影响范围较小, 通过通风的方法就可以进行控制。

对比不同风速下空气温度的变化趋势, 风速越大, 降温幅度越大, 且降温幅度并不与风速发生同等变化。从图中可以看出, 风速从 5 m/s 增加到 10 m/s, 绝大部分测点空气温度下降 2 °C 以上; 当风速从 15 m/s 增加到 20 m/s, 绝大部分测点空气温度下降 0.7 °C 以下。这说明, 风速达到一定数值后, 通风降温效果非常有限。为实现较好的降温效果, 应设置合理的通风参数。

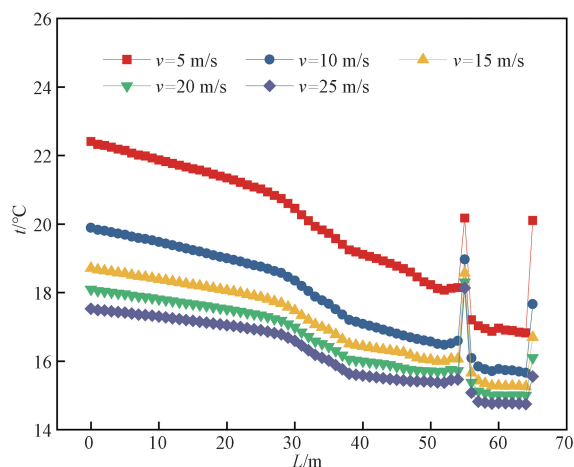


图 8 不同入口风速下巷道内空气温度分布

Fig. 8 Distribution of air temperature in roadway under different wind speed at inlet

4.3 数值模拟结果验证

将入风温度为 13.5 °C,入风风速 15 m/s 条件下的数值模拟实验数据和实测数据对比,如图 9 所示。

如图 9 所示,实测地点有 14 个位置,在 $L=0, 50, 55, 60$ m 四个位置的差值较大,实测值与数值模拟实验值分别相差 -1.2、0.96、2.4、1.7 °C。在其他 10 个地点,两者温度值相差在 0.5 °C 以下。

在实际作业环境中受到多种冷源或热源的影响,这导致两者个别测点差值较大。在 $L=0$ m,受到巷道出口新鲜风流的影响导致该位置实测值较低;在 $L=50 \sim 60$ m 区域,因矿车加热、矿车阻挡风流传热和工人作业活动的影响,使得该区域热量不易散失,实测值与数值模拟值差别较大。因为数值模拟实验的条件非常理想,而实际工作环境会受到多种因素影响。总体上看,除了个别几个位置外,在其他位置数值模拟实验值和实测值相差是比较小的,数值模拟实验可以反映真实作业环境特点。数值模拟实验可以用来分析矿井掘进巷道耦合传热特性。

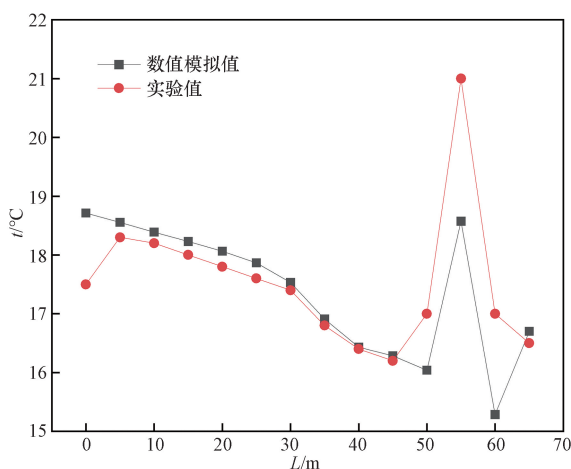


图9 数值模拟数据与实测数据对比

Fig. 9 Comparison between numerical simulation data and measured data

5 结论

(1)调热圈(岩石被冷却范围)的温度场围绕通风巷道呈圆环状分布,其分布范围明显受到热水影响。靠近掘进头部分因风流温度较低,该区域岩体调热圈范围较大。

(2)靠近热水的岩石区域是热流密度最高区域,在热水与岩石交界存在热流密度最大值,数值为 9 789.3 W/m²。在热水和矿车附近的等效弹性应变较高,最大值出现在与热水接触的岩体壁面处,最大值为 0.000 545 32 m/m。在靠近热水和矿

车的岩石区域,距离巷道壁面越近,等效弹性应变数值越高。从热流密度和热应变数值分布来看,靠近热水的岩体区域受温度应力影响发生结构破坏风险较大,其次是靠近矿车的岩石区域。

(3)热水对巷道空气温度场影响范围最大,空气在积水区加热后,温度曲线阶跃式变化且之后稳定增加。矿车产热可对巷道内局部空间空气温度产生影响,远离矿车区域的空气温度受影响较小。

(4)入风温度的改变可以从整体上改变巷道内空气温度场,入风温度越低降温效果越好。风速越大,降温幅度越大,且降温幅度并不与风速发生同等变化。风速从 5 m/s 增加到 10 m/s,绝大部分测点空气温度下降 2 °C 以上;当风速从 15 m/s 增加到 20 m/s,绝大部分测点空气温度下降 0.7 °C 以下。风速达到一定数值后,通风降温效果非常有限。

通过研究掘进巷道多热源热流固耦合传热现象,分析其温度场分布与通风参数相关性,揭示高温岩体、机电设备、巷道空气、热水等多热源之间耦合传热特性,研究成果可以优化矿井通风降温方案,减少矿井热害治理经济投入;可以从热害防控角度优化围岩结构稳定防护方案,丰富矿山压力控制理论,为各类地下矿山热害防治与安全开采提供理论依据和技术指导。

参 考 文 献

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
Xie Heping. Progress in deep rock mechanics and mining theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959-3978.
Xie Heping, Zhang Ru, Zhang Zetian, et al. Deep earth science and deep earth engineering [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959-3978.
- [3] 蔡美峰, 马明辉, 潘继良, 等. 矿产与地热资源共采模式研究现状及展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1669-1681.
Cai Meifeng, Ma Minghui, Pan Jiliang, et al. Present situation and prospect of study on mineral and geothermal resources co-mining model [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1669-1681.
- [4] 王勇, 吴爱祥, 杨军, 等. 深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J]. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1281-1292.
Wang Yong, Wu Aixiang, Yang Jun, et al. Progress and prospect of key theory and technology for deep metal mining [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1281-1292.
- [5] 陈湘生, 武贤龙, 包小华, 等. 基于矿-热共采的深部高温岩层地下巷道硐室建造技术思考[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1660-1668.
Chen Xiangsheng, Wu Xianlong, Bao Xiaohua, et al. Thinking on construction technology of underground tunnel in deep high temperature strata based on ore-thermal co-mining [J]. Chinese Journal of

- Engineering, 2022, 44(10): 1660-1668.
- [6] 王运敏, 李刚, 徐宇, 等. 我国深部矿井热环境调控研究近 20a 进展及展望[J]. 金属矿山, 2023(3): 1-13.
Wang Yunmin, Li Gang, Xu Yu, et al. Progress and prospect of thermal environment regulation in deep mines in China in recent 20 years[J]. Metal Mine, 2023(3): 1-13.
- [7] 梁士昌, 肖杰, 金峰, 等. 榆神深部高强度开采导水裂缝带发育特征[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(32): 13753-13760.
Liang Shichang, Xiao Jie, Jin Feng, et al. Water-conducting fracture zone characteristics of deep and high-intensity coal mining area of Yushen[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(32): 13753-13760.
- [8] 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等. 高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1561-1581.
Guo Pingye, Bu Mohua, Zhang Peng, et al. Research progress on disaster mechanism and disaster prevention of tunnel with high ground temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1561-1581.
- [9] 万志军, 张源, 师鹏, 等. 煤-热共采模式下地热水非常规开采数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1115-1125.
Wan Zhijun, Zhang Yuan, Shi Peng, et al. Numerical simulation study on unconventional geothermal water mining under coal-heat co-mining mode[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1115-1125.
- [10] 崔大雄, 游波, 高科, 等. 铺设隔热层对巷道降温效果的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 153-162.
Cui Daxiong, You Bo, Gao Ke, et al. Analysis of the influence of laying thermal insulation layer on cooling effect of roadway[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 153-162.
- [11] Victor F N. Mixed methods study into social impacts of work-related heat stress on Ghanaian mining workers: a pragmatic research approach[J]. Heliyon, 2021, 7: e06918.
- [12] 孙朋. 基于孔-裂隙的煤层瓦斯抽采热-流-固耦合模型研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(4): 64-73.
Sun Peng. Thermal-hydrological-solid coupling model of coal seam gas extraction based on pore-fracture[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(4): 64-73.
- [13] 赵杰, 金开玥, 裴鹏, 等. 利用充填巷道作矿井降温热汇的可行性研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(2): 213-225.
Zhao Jie, Jin Kaiyue, Pei Peng, et al. Feasibility study on using filling tunnel as heat sink for mine cooling[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(2): 213-225.
- [14] 王珏, 周西华, 白刚, 等. 矿井热宽温度环境人体热健康分区热调节模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(11): 134-139.
Wang Jue, Zhou Xihua, Bai Gang, et al. Zonal thermal regulation model of human thermal health in mine thermal wide temperature environment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(11): 134-139.
- [15] 柳静献, 李国栋, 常德强, 等. 矿井降温技术研究进展与展望[J]. 金属矿山, 2023(7): 18-27.
Liu Jingxian, Li Guodong, Chang Deqiang, et al. Research progress and prospect of mine cooling technology[J]. Metal Mine, 2023(7): 18-27.
- [16] 汪仁建, 翟雪峰, 张永亮, 等. 三维仿真技术在大柳行金矿深井热害治理中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(10): 95-98.
Wang Renjian, Zhai Xuefeng, Zhang Yongliang, et al. Application of 3D simulation technology in heat hazard control of deep well in Daliuxing Gold Mine[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10): 95-98.
- [17] Ran Y J, Peng J, Tian X L, et al. Technologies for heat hazard governance and thermal energy recovery in deep mines[J]. Energies, 2024, 17: 1369.
- [18] Chen X, Zhou X H, Zhong Z L, et al. Study on temperature field and influencing factors of the high geothermal tunnel with extra-long one-end construction ventilation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 191: 108322.
- [19] Lu M, Yu L, Wang M N, et al. A new approach in calculation of heat release during high geothermal tunnels construction considering ventilation time effect[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 194: 108589.
- [20] 詹金武, 杨炽誉, 江松, 等. 热-冲击循环下花岗岩的裂隙及动态力学特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(32): 13944-13954.
Zhan Jinwu, Yang Chiyu, Jiang Song, et al. Investigating influence of fracturing and kinetic properties of granite under high-temperature shock cycling[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(32): 13944-13954.
- [21] 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等. 矿山地热防控与利用研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1632-1651.
Guo Pingye, Bu Mohua, Zhang Peng, et al. Research progress on prevention, control and utilization of mine geothermal energy[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1632-1651.
- [22] Xu Y, Li Z J, Liu H S, et al. Modeling of the dynamic behaviors of heat transfer during the construction of roadway using moving mesh[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26: 100958.
- [23] Li Z J, Xu Y, Li R R, et al. Impact of the water evaporation on the heat and moisture transfer in a high-temperature underground roadway[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101551.
- [24] Zhou X H, Ren X C, Ye X Q, et al. Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high geotemperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103843.