

中文引用格式:游波,王思奇,高科,等. 高温矿井围岩隔热巷道非稳态温度场研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(1):81-87.

英文引用格式:YOU Bo, WANG Siqu, GAO Ke, et al. Research on transient temperature field of surrounding rock in thermal insulation roadways of high-temperature mines[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 81-87.

高温矿井围岩隔热巷道非稳态温度场研究^{*}

游波^{1,2,3}教授,王思奇¹,高科^{**2}教授,唐明云³教授,韩巧云¹副教授,宋昱辰¹

(1 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2 辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁 葫芦岛 125105;

3 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0557

基金项目:国家自然科学基金资助(52174179);辽宁工程技术大学矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室基金资助(JSK202204);煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金资助(JYBSYS202401);2025年湖南省研究生科研创新重点项目(CX20251510)。

【摘要】 为探究铺设泡沫浆体隔热层对高温矿井围岩温度场的影响,利用傅里叶定律建立围岩-隔热层-巷道非稳态传热微分方程及泡沫浆体隔热层-巷道二维非稳态传热微分方程,运用有限差分法离散求解微分方程,以探究铺设泡沫浆体隔热层后的围岩温度变化及初始温度对泡沫浆体隔热层的影响。结果表明:由于泡沫浆体隔热层导热系数小,随着时间的变化,温度易趋于稳定;与泡沫浆体隔热层相邻的岩层间的温度差值较大,且泡沫浆体隔热层厚度越大岩体温度越高,可见铺设泡沫浆体隔热层阻碍了一定热量向巷道传递,使岩体温度梯度增加;当泡沫浆体隔热层初始温度更接近风流温度时,泡沫浆体内部温度变化梯度较小,可在较短时间内达到稳态。

【关键词】 高温矿井; 围岩; 隔热巷道; 非稳态; 温度场; 泡沫浆体

Research on transient temperature field of surrounding rock in thermal insulation roadways of high-temperature mines

YOU Bo^{1,2,3}, WANG Siqu¹, GAO Ke², TANG Mingyun³, HAN Qiaoyun¹, SONG Yuchen¹

(1 School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and

Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic

Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao

Liaoning 125105, China; 3 Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining Ministry of

Education, Anhui University of Science and Technology, Ministry of Education,

Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to explore the influence of laying foam slurry insulation layer on the temperature field of surrounding rock in high temperature mines, the heat transfer differential equation of unsteady surrounding rock and the two-dimensional unsteady heat transfer differential equation of foam slurry insulation layer were established by using Fourier's law. The finite difference method was used to solve the

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0081-07; 收稿日期:2025-09-11; 修稿日期:2025-11-20

** 通信作者:高科(1983—),男,山东莱芜人,博士,教授,主要从事矿井智能通风与应急方面的研究。E-mail:gaokelntu@163.com。

differential equations, so as to explore the temperature change of surrounding rock after laying the foam slurry insulation layer and the influence of initial temperature on foam slurry insulation layer. The results show that the temperature tends to be stable with time due to the small thermal conductivity of the foam slurry insulation layer. The temperature difference between the rock strata adjacent to the foam slurry insulation layer is large, and the larger the thickness of the foam slurry insulation layer, the higher the temperature of the rock mass. It can be seen that the laying of the foam slurry insulation layer hinders the transfer of a certain amount of heat to the roadway so that the temperature gradient of the rock mass increases. When the initial temperature of the foam slurry insulation layer is closer to the air flow temperature, the temperature gradient inside the foam slurry is smaller and the temperature can reach a steady state in a short time.

Keywords: high-temperature mine; surrounding rock; thermal insulation roadways; transient state; temperature field; foam slurry

0 引言

由于地下蕴含大量热能,深层围岩热量向巷道传递使得巷道环境温度升高,对作业人员的生理、心理造成极大影响。现有降温技术从阻碍热量向巷道传递的角度,在支护过程中对巷道围岩表面喷注低导热系数材料,以降低巷道环境温度。但高温矿井内的传热过程较为复杂,温度分布的计算方程不易求解,而通过计算机编程可解决此问题^[1],利用计算机计算围岩隔热巷道传热数学模型,可得到隔热层最佳物理参数,为实际应用提供相应的理论支撑。

诸多学者对此开展了研究,如吴强等^[2]采用有限单元法计算了巷道围岩的温度场。赵靖^[3]利用 Ansys fluent 软件模拟了潮湿巷道与风流间的热湿交换,并通过试验分析进风速度、温度及湿度对围岩温度场的影响,最终得到围岩传热系数、传湿系数计算公式。高佳南等^[4]采用数值计算法得出地面温差、采掘深度及围岩导热系数对温度场有较大影响。针对围岩喷注隔热混凝土后围岩散热的阻断效果,相关学者以理论分析、实际环境为基础,利用数值计算分析围岩温度场的影响因素,如吕逸飞等^[5]通过仿真模拟证明隔热材料与空气夹层具有协同作用。游波等^[6-7]选取 5 种不同材料参数进行隔热模拟,发现了隔热材料的物理性质对围岩温度场及风流温度的影响。薛韩玲等^[8]讨论了水玻璃膨胀蛭石材料对调热圈及风流温度变化的影响。张树光等^[9]探讨了通风、围岩物理参数、隔热层参数等对热圈温度场的影响。姚韦靖等^[10]选定衬砌热导率等参数为影响因素,通过正交试验分析拟合出壁面温度、调热圈半径的热学参数公式。综上所述,现有研究较侧重于巷道围岩数学模型中围岩导热系数、风流对

流换热系数等参数的计算,喷注隔热材料的阻热效果研究主要集中于铺设厚度、导热系数等影响因素,另外,为方便计算围岩温度值,研究过程中多假定温度为与时间无关的稳定状态,而对巷道-隔热层-围岩温度场分布及其随时间变化过程和隔热材料初始温度对温度场的影响还鲜有研究。

因此,笔者拟利用傅里叶定律建立一维非稳态围岩传热微分方程及泡沫浆体隔热层二维非稳态传热微分方程,观察铺设泡沫浆体隔热层后的温度变化,以及泡沫浆体初始温度对隔热巷道围岩温度场的影响,从保护隔热材料角度出发,延长其时效性及明确巷道围岩隔热时空演化特征,以期为高温矿井降温措施的选取提供理论参考。

1 隔热巷道围岩非稳态温度场

1.1 泡沫浆体隔热圈隔热机制

巷道隔热技术作为一种绿色、低碳的新型降温方法正在不断发展完善。在高地温矿井内铺设隔热材料形成隔热层后,不仅加固了巷道围岩的稳定性,还减少了新风热污染^[11]。由泡沫、固废等材料制成的泡沫浆体隔热材料具有轻质、导热系数低、承载强度大等性能优势,可满足矿井使用要求。

根据传热学及热力学理论,将围岩隔热巷道简化为圆筒壁的导热问题。无隔热巷道为单层圆筒壁,隔热巷道结构(图 1)可看作多层圆筒壁,热量以热传导的形式从围岩深部向隔热层(注浆层、喷浆层)传递,最后与巷道风流发生热交换。

1.2 隔热圈传热方程及定解条件

假定围岩隔热巷道为轴对称圆形,各热物理性质稳定,不考虑环向传热,围岩无内热源,得到常物

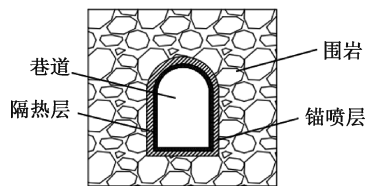


图 1 隔热巷道围岩

Fig. 1 Surrounding rock of thermal insulation roadways

性,无内热源的极坐标系下一维非稳态温度场控制方程见下式:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} \right) \tag{1}$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t 为温度, $^\circ\text{C}$; τ 为时间, s ; λ_i 为导热系数, 其中, i 为第 i 种材料, λ_1 为喷浆层的导热系数, λ_2 为围岩的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; r 为极坐标系中的径向长度, cm 。

高温矿井下等温圈最终都趋同于圆形^[12],因此,在图 1 基础上假定隔热巷道为圆形巷道,巷道内径为 r_0 ,隔热支护层外径为 r_1 ,围岩外径为 r_2 。结构均质且各向同性,相关热物理参数 λ 、 ρ 、 c 等保持不变。根据经验公式^[13],假设初始围岩的温度符合第 1 类边界条件: $t(r, \tau) \mid_{\tau=0} = t_0$ 。边界条件如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r} = h(t - t_f) & (r = r_1) \\ t^+(r, \tau) = t^-(r, \tau) & (r = r_2) \\ \lambda_1 \frac{\partial t^+}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t^-}{\partial r} & (r = r_2) \\ t(r = r_3, \tau) = t_0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: t_0 为原岩温度, $^\circ\text{C}$; t_f 为风温, $^\circ\text{C}$ 。

1.3 隔热巷道围岩温度场

有限差分法是一种近似数值解法,搭建的数学建模便于准确计算。使用有限差分法将极坐标和时间离散化,假设空间步长为 Δr ,时间步长为 $\Delta \tau$,定义网格点 $r_i = i\Delta r$, $\tau_n = n\Delta \tau$; $i = 0, 1, \dots, I$; $n = 0, 1, \dots, N$ 。

对于时间导数使用前向差分:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \approx \frac{t^{n+1} - t^n}{\Delta \tau} \tag{3}$$

对于空间导数使用中心差分:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} \approx \frac{t(r + \Delta r) - 2t(r) + t(r - \Delta r)}{2\Delta r} = \frac{t_{i+1}^n - 2t_i^n + t_{i-1}^n}{(\Delta r)^2} \tag{4}$$

将式(3)、式(4)代入式(1)得到:

$$t_i^{n+1} = t_i^n + \frac{\lambda_i}{\rho c} \cdot \Delta \tau \cdot \left(\frac{1}{r_i} \frac{t_{i+1}^n - t_{i-1}^n}{2\Delta r} + \frac{t_{i+1}^n - 2t_i^n + t_{i-1}^n}{(\Delta r)^2} \right) \tag{5}$$

边界条件离散化为:

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{t_{i+1}^n - t_{i-1}^n}{2\Delta r} = h(t_i^n - t_f) & (r = r_1) \\ t_i^{n+1}(\tau) = t_i^n(\tau) & (r = r_2) \\ \lambda_1 \frac{t_{i+1}^{n+1} - t_{i-1}^{n+1}}{2\Delta r} = \lambda_2 \frac{t_{i+1}^n - t_{i-1}^n}{2\Delta r} & (r = r_2) \\ t_i^n(r = r_3, 0) = t_0 \end{cases} \tag{6}$$

对于显式有限差分法,稳定性条件为:

$$\frac{\alpha \cdot d\tau}{dr^2} \leq \frac{1}{2} \tag{7}$$

式中 α 为热扩散率, m^2/s 。

1.4 隔热巷道温度场解算结果

利用 Matlab 语言编写求解隔热巷道温度场。泡沫混凝土试块材料性质参数见表 1,围岩温度设为 30°C ,巷道内风流温度设为 20°C ,风流换热系数为 $25\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

表 1 材料参数值

Table 1 Material parameter values

参数值	$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\lambda_i/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
泡沫混凝土	602	1 000	0.121 5
原岩	2 330	880	2.64

将各参数代入式(6)得到计算结果小于 0.1,证明此程序可满足稳定性条件。在贵州某矿山正常通风、无其他异常热源干扰的条件下采用浅孔快速测温法测量不同深度的温度,温度测量范围为 $-25 \sim +50^\circ\text{C}$,最小分度值为 0.1°C ,以确保所测得的温度能真实反映矿井围岩温度状况,并进行长期连续监测。通过数值求解得到 r_0-r_2 处各时刻下的温度值,在铺设泡沫浆体隔热层 20 cm 时选取 $r = 15\text{ cm}$ 处、围岩 $r = 500、800\text{ cm}$ 处温度随时间变化曲线,将求解到的围岩层、泡沫浆体隔热层温度随时间的变化与实测值对比(图 2),可以看出,各位置处各时刻的温度实测值和计算值差值均较小,均在 0.5°C 以内,证明所建的围岩-泡沫浆体隔热层-巷道非稳态温度场热交换模型的正确性。因而该模型可准确计算出高温矿井围岩-围岩-巷道各位置、各时刻的温度值(图 3)。为进一步探究泡沫浆体隔热层厚度对围岩温度场的影响,计算不同泡沫浆体隔热层厚度

时围岩不同位置的温对比如图 4 所示。

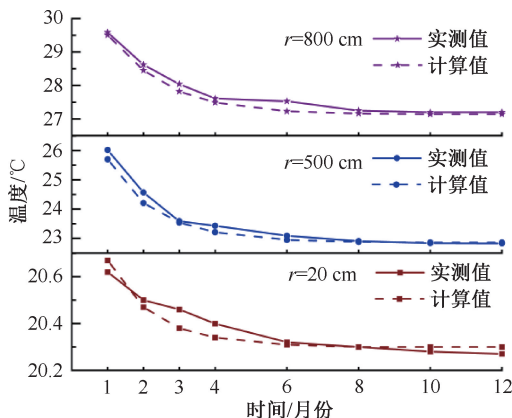


图 2 温度实测值和计算值对比

Fig. 2 Comparison of measured and calculated temperature values

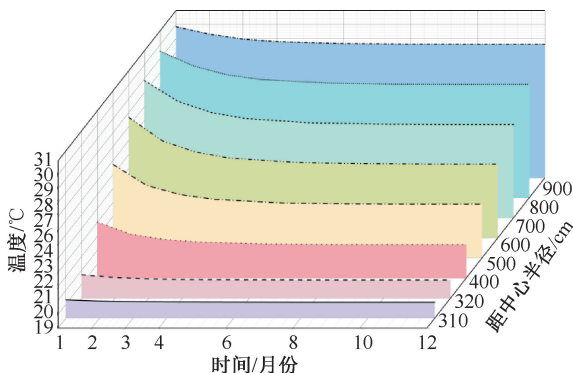
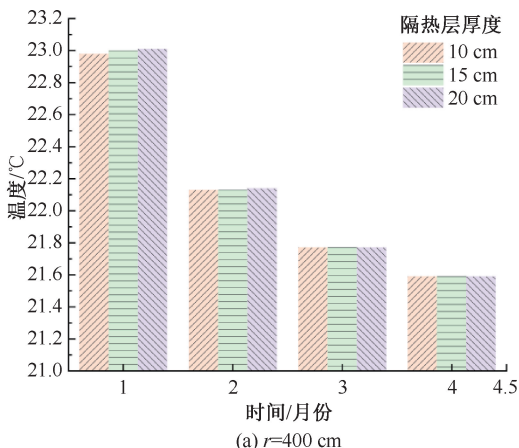


图 3 隔热层 20 cm 时各位置各时刻的温度值

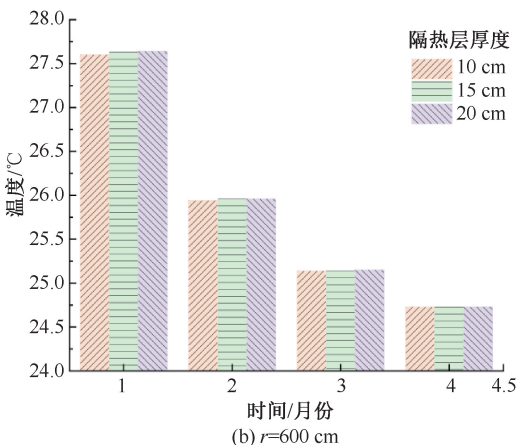
Fig. 3 Temperature values of each position at different times for 20 cm thick insulation layer

由图 3 和图 4 可知:泡沫浆体隔热层由于导热系数小,随时间变化温度变化较小,间隔差值较小且趋于稳定,隔热巷道可在 8 个月后基本达到稳定状态;隔热巷道达到稳态时泡沫浆体隔热层温度更接近空气层温度,可见:风流的对流换热更易于影响隔热层,泡沫浆体隔热层温度稳定趋向于风流温度。高温矿井原岩温度在初期温度梯度较大,随时间增加逐渐均匀并趋于稳定;在岩层较深处时温度变化较小,越靠近巷道温度变化越大,且靠近巷道的相邻岩层间的温度差值较大,可见与泡沫浆体隔热层相邻使岩体温度梯度增加,说明泡沫浆体隔热层使得围岩和巷道之间的温度梯度显著减小,巷道内的温度变化更加缓慢,改善了巷道内的温度环境。

高温矿井泡沫浆体隔热层铺设厚度越厚围岩层不同位置处温度越高,表明厚度的增加阻碍了一定的热量向巷道传递,同时,在巷道内侧更易受到与风



(a) $r=400$ cm



(b) $r=600$ cm

图 4 不同厚度隔热层时各位置各时刻的温度对比

Fig. 4 Comparison of temperature values at each position and time for insulation layers of different thicknesses

流的对流换热影响。泡沫浆体材料在矿井内高温高湿环境下内部结构如孔结构易受到影响,而导致材料隔热失效。但从工程成本和占用空间角度考虑,泡沫浆体隔热层铺设厚度应尽量轻薄,因而选取 15 cm 厚度为佳。后续将以提升泡沫浆体热物理参数为研究重点,达到高温矿井降温隔热的“性价比”最优化。

2 泡沫浆体隔热层非稳态温度场

2.1 泡沫浆体多孔材料隔热机制

泡沫浆体多孔材料的隔热效果主要由于它的微观结构和传热机制。泡沫浆体除固体骨料外存在大量的气孔,气孔内通常是空气或其他低导热性气体,其导热系数远低于固体材料,从而降低了泡沫浆体的有效导热系数,显著降低热量的传导。同时,泡沫浆体的结构使得在热量传递过程中需要绕过大量孔隙,在固体骨料中传导,从而增加传热路径,有效降

低热量的传递速率。

2.2 泡沫浆体传热方程及定解条件

固气多孔材料的能量平衡关系见下式：

$$\frac{\partial \rho c t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \rho_a c_a u t}{\partial x} + \frac{\partial \rho_a c_a v t}{\partial y} + \frac{\partial \rho_a c_a w t}{\partial z} \right)$$

(8)

式中 $u、v、w$ 分别为 $x、y、z$ 方向上的速度分量, m/s 。

假设隔热巷道的泡沫浆体为均匀介质,且各向同性。泡沫浆体气泡较小,其中对流换热忽略不计。得到下式：

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right)$$

(9)

初始条件为 $t(x,y,\tau) \mid_{\tau=0} = t_c$,边界条件如下：

$$\begin{cases} [(1-\theta)\lambda_s + \theta\lambda_a] \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(t - t_f) \\ t(x=l,y,\tau) = t_c \\ t(x,y,\tau=0) = t_c \end{cases}$$

(10)

式中： λ_s 为泡沫浆体隔热材料中浆体材料组成部分的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ； λ_a 为泡沫浆体隔热材料中气体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； θ 为泡沫浆体隔热材料的孔隙率, %； t_c 为泡沫浆体隔热层初始温度温度, $^{\circ}\text{C}$ ； l 为 x 方向上泡沫浆体隔热层的长度, m 。

2.3 泡沫浆体隔热层温度场

将坐标和时间离散化,假设空间步长为 $\Delta x、\Delta y、\Delta z$,时间步长为 $\Delta \tau$,定义网格点 $x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z, \tau_n = n\Delta \tau; i = 0, 1, 2, \cdots, I; j = 0, 1, 2, \cdots, J; k = 0, 1, 2, \cdots, K; n = 0, 1, 2, \cdots, N$ 。

对于时间导数使用前向差分：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \approx \frac{t^{n+1} - t^n}{\Delta \tau}$$

(11)

对于空间导数使用中心差分：

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \approx \frac{t(x+\Delta x,y) - 2t(x,y) + t(x-\Delta x,y)}{2\Delta x^2} = \frac{t_{i+1,j}^n - 2t_{i,j}^n + t_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} \\ \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \approx \frac{t(x,y+\Delta y) - 2t(x,y) + t(x,y-\Delta y)}{2\Delta y^2} = \frac{t_{i,j+1}^n - 2t_{i,j}^n + t_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \end{cases}$$

(12)

将式(11)、式(12)代入式(9)得到：

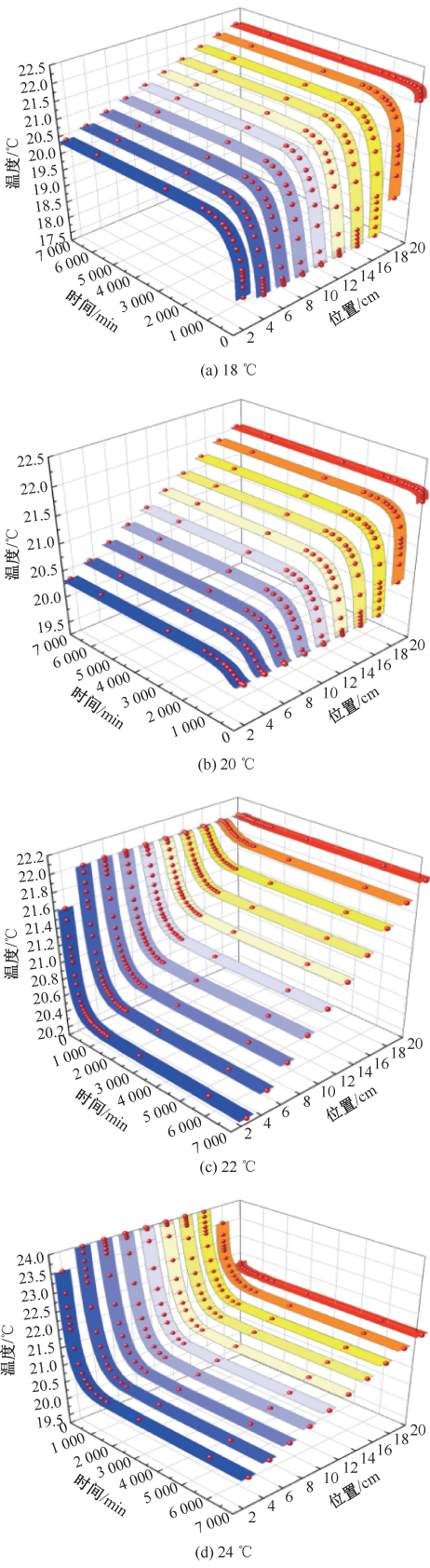


图 5 泡沫浆体不同初始温度下隔热层温度值
Fig.5 Temperature values of insulation layer under different initial temperatures of foam slurry

$$\rho c \frac{t^{n+1} - t^n}{\Delta \tau} = \lambda \left(\frac{t_{i+1,j}^n - 2t_{i,j}^n + t_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{t_{i,j+1}^n - 2t_{i,j}^n + t_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right) \quad (13)$$

边界条件离散化为:

$$\begin{cases} [(1-\alpha)\lambda_s + \alpha\lambda_a] \frac{t_{i+1,j,k}^n - t_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} = h(t - t_f) \\ t(x=l, y, \tau) = t_0 \\ t(x, y, \tau=0) = t_0 \end{cases} \quad (14)$$

2.4 泡沫浆体隔热层温度场解算结果

在满足稳定性条件下,使用 Matlab 编写代码并进行数值计算。隔热巷道泡沫混凝土材料性质参数设置见表 1,泡沫混凝土初始温度分别设为 18、20、22、24 ℃,巷道内风流温度设为 20 ℃,风流换热系数为 25 W/(m·K),得到的结果如图 5 所示。

由图 5 可知:当泡沫浆体隔热层初始温度为 18 ℃时,泡沫浆体隔热层与风流接触的一侧由于对流换热温度逐渐上升,趋向于风流温度维持稳定,而与高温矿井围岩接触的一侧,由于围岩温度为 22 ℃与泡沫浆体隔热层温度相差较大,温度由两侧逐渐向内侧传导,因而泡沫浆体隔热层中间位置温度梯度较小,在 720 min,泡沫浆体隔热层温度传导由内侧向外侧温度逐渐以一定温度梯度升温,隔热巷道在 1 200 min 趋于稳定。当泡沫浆体隔热层初始温度为 20 ℃时,泡沫浆体隔热层与风流温度相同,泡沫浆体隔热层内侧至中间温度变化梯度较小,外侧温度上升梯度较大,温度由泡沫浆体隔热层外侧逐渐向内侧传递,隔热巷道整体在 720 min 时温度趋

于稳定。

当泡沫浆体隔热层初始温度为 22 ℃时,泡沫浆体隔热层与岩层温度相同,泡沫浆体隔热层中间至外侧温度变化梯度较小,温度由泡沫浆体隔热层外侧逐渐向内侧传递,泡沫浆体隔热层中间至内侧由于风流温度较低温度梯度较大,泡沫浆体隔热层整体在 840 min 时温度趋于稳定。当泡沫浆体隔热层初始温度为 24 ℃时,泡沫浆体隔热层与风流、围岩接触后两侧逐渐降温向中间传递,与风流接触侧降温梯度较大,中间位置温度降低梯度较小且易达到稳定,泡沫浆体隔热层整体在 1 200 min 时温度趋于稳定。

3 结 论

1) 泡沫浆体隔热层由于导热系数小,随时间变化温度变化较小,间隔差值较小且趋于稳定,隔热巷道可在 8 个月后基本达到稳定状态。原岩外层温度变化较小,越靠近内层温度变化越大,且靠近内层相邻岩层间的温度差值较大。可见:与泡沫浆体隔热层相邻使岩体温度梯度增加,说明泡沫浆体隔热层阻碍了高温矿井为围岩向巷道的热传导。

2) 当泡沫浆体隔热层初始温度更接近风流温度时,围岩温度场可以在较短时间内达到稳态,且温度变化梯度较小,泡沫浆体内部温度变化小不易造成微损伤,有利于泡沫浆体的隔热效果更持久。

3) 文中研究重点在隔热巷道隔热层的隔热效果,而仅初步探讨泡沫浆体的热物理参数,在未来需要进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] 孙培德. 深井巷道围岩地温场温度分布可视化模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增 2): 222-226.
SUN Peide. Visualization simulation of temperature distributions in geothermal field of surrounding rock of deep mine tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S2): 222-226.
- [2] 吴强, 秦跃平, 郭亮, 等. 巷道围岩非稳态温度场有限元分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 604-607.
WU Qiang, QIN Yueping, GUO Liang, et al. Analysis of unsteady temperature field in wall rock by finite element method[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(5): 604-607.
- [3] 赵靖. 矿井围岩与风流热湿交换若干问题的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
ZHAO Jing. Experimental research on heat and humidity exchange between rock wall and airflow in mine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [4] 高佳南, 李超, 吴奉亮, 等. 巷道入口风温季节性变化下围岩温度场及其影响因素分析[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(6): 19-24.
GAO Jia'nan, LI Chao, WU Fengliang, et al. Analysis of temperature field of surrounding rock and influencing factors under the seasonal variation of air temperature at the entrance of roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection,

2021, 48(6): 19–24.

- [5] 吕逸飞, 邱进伟, 邹云. 多层隔热下工作面进风巷围岩传热特性[J]. 中国矿业, 2024, 33(5): 143–151.
LYU Yifei, QIU Jinwei, ZOU Yun. Heat transfer characteristics of surrounding rock in air inlet laneway of working face under multi-layer heat insulation[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 143–151.
- [6] 游波, 崔大雄, 刘何清, 等. 不同隔热材料下的深井巷道隔热降温模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 153–160.
YOU Bo, CUI Daxiong, LIU Heqing, et al. Simulation study on heat insulation and cooling of deep shat tunnel with different heat insulation materials[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 153–160.
- [7] 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 influence of laying heat insulation layer am coding effect of roadway[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 153–162.
- [8] 薛韩玲, 郭佩奇, 彭俊杰, 等. 高地温掘进巷水玻璃膨胀蛭石隔热围岩传热与降温特性[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(6): 997–1 005.
XUE Hanling, GUO Peiqi, PENG Junjie, et al. Characteristics of airflow temperature decline and heat transfer from surrounding rock of digging tunnel insulated by waterglass/expanded vermiculite in high temperature mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(6): 997–1 005.
- [9] 张树光, 常剑, 王宏伟. 高温巷道调热圈特性及对隔热支护结构的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 179–185.
ZHANG Shuguang, CHANG Jian, WANG Hongwei. Characteristics of heat-adjusting ring and the influence of thermal insulation support structure in high-temperature roadway[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 179–185.
- [10] 姚韦靖, 刘宇, 庞建勇, 等. 围岩与隔热结构热学参数对巷道温度场影响的正交数值模拟[J]. 安徽建筑大学学报, 2023, 31(5): 45–52.
YAO Weijing, LIU Yu, PANG Jianyong, et al. The orthogonal numerical simulation of the effect of surrounding rock and heat insulation structure thermal parameters on roadway temperature Field[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2023, 31(5): 45–52.
- [11] YOU Bo, WANG Siqi, YANG Ming, et al. Simulation study of heat transfer in the space under the clothing of mining ventilation suits in typical human labour positions[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 208: DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109423.
- [12] 张一夫, 谢倩楠, 董子文, 等. 巷道断面形状对围岩散热规律的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2 595–2 601.
ZHANG Yifu, XIE Qiannan, DONG Ziwen, et al. Study on the influence of roadway cross-section shape on heat dissipation of surrounding rock[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(6): 2 595–2 601.
- [13] 周佳媚, 沈文杰, 朱宇, 等. 铁路隧道施工期冰块降温技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 44–52.
ZHOU Jiamei, SHEN Wenjie, ZHU Yu, et al. Research on ice block cooling technology during railway tunnel construction[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 44–52.



作者简介: 游波 (1986—),男,湖南娄底人,博士,教授,主要从事矿井热害防治与职业安全健康方面的研究。E-mail:494907336@qq.com。