基于高斯-牛顿法的动态巷道风温场时空耦合特征*

赵旭峰[1]，周嘉乐[2]

（1.山西工程职业学院 资源与安全工程系， 山西 太原 030009；
2.国能包头能源有限责任公司万利一矿， 内蒙古 鄂尔多斯市 017000）

摘要：针对深部高温矿井热害治理中动态掘进巷风温场时空耦合机制尚不明确的难题，构建了动态掘进过程三维非稳态传热模型，引入表征掘进速度的无量纲时间 F_{ov} 与传统无量纲距离 X，建立温度场时空二元关系式 $\Theta(F_{ov},X)$，基于高斯-牛顿法迭代反演得到掘进巷道无量纲温度的时空耦合关系，进一步揭示进风温度对热害调控的非线性作用机制。结果表明：无量纲温度随时间与空间的演化服从指数-二次时变关系（平均相对误差 $MRE=1.1\%$），温度梯度与距离呈正相关，与时间呈负相关；低温送风的初始降温效果显著，但长期通风后风流与围岩逐渐趋近热平衡，降温效率衰减26.3%，降温工程中需结合围岩热控制与局部制冷，以提高降温可持续性；进风温度降低会增强风温的非线性变化特征，使无量纲温度时空耦合模型的 MRE 从1.10%（30 ℃）增至1.81%（20 ℃），但仍满足工程精度要求；近迎头区域风温响应最为敏感，当进风温度从20 ℃升至30 ℃时，近迎头区域总温升幅度较巷道出口区域高42.1%，以迎头风温阈值26 ℃为约束，得出了满足降温要求的动态设计进风温度 $T_{in}^{d}(t)$。

关键词：动态掘进巷；无量纲分析；时空耦合关系；进风温度；高斯-牛顿法

中图分类号：TD727 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)07-0020-10

Research on Spatiotemporal Coupling Characteristics of the Wind Temperature Field in Dynamic Roadways Based on the Gauss-Newton Method

Zhao Xufeng[1], *Zhou Jiale*[2]

(1.Department of Resources and Safety Engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan, Shanxi 030009, China;
2.Wanli No.1 Coal Mine, China Energy Baotou Energy Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: To address the challenge of the unclear spatiotemporal coupling mechanism of the wind temperature field in dynamic excavation roadways during the thermal hazard control of deep high-temperature mines, a three-dimensional unsteady heat transfer model of the dynamic excavation process was constructed. A dimensionless time F_{ov} characterizing the excavation speed and the traditional dimensionless distance X were introduced to establish a spatiotemporal binary relationship $\Theta(F_{ov}, X)$ for the temperature field. The spatiotemporal coupling relationship of the dimensionless temperature in the excavation roadway was obtained through iterative inversion based on the Gauss-Newton method, further revealing the nonlinear mechanism of the effect of inlet air temperature on thermal hazard regulation. The results show that the evolution of the dimensionless temperature over time and space follows an exponential-quadratic time-varying relationship (Mean Relative Error MRE = 1.1%). The temperature gradient is positively correlated with distance and negatively correlated with time. The initial cooling effect of low-temperature air supply is significant, but after long-term ventilation, the air flow and surrounding rock gradually approach thermal equilibrium, and the cooling efficiency attenuates by 26.3%. Thermal hazard control projects should integrate surrounding rock thermal management with localized cooling to improve cooling sustainability. A reduction in the inlet air temperature intensifies the nonlinear variation characteristics of the air temperature, increasing the MRE of the dimensionless temperature spatiotemporal coupling model from 1.10% (30 ℃) to 1.81% (20 ℃), while still meeting engineering accuracy requirements. The air temperature response in the area near the heading face is the most sensitive. When the inlet air temperature rises from 20 ℃ to 30 ℃, the total temperature rise near the heading face area is 42.1% higher than that in the roadway exit area. Taking a heading face air temperature threshold of 26 ℃ as the constraint, a dynamically designed inlet air temperature $T_{in}^{d}(t)$ that meets the cooling requirements was derived.

Key words: Dynamic excavation roadway, Dimensionless analysis, Spatiotemporal coupling relationship, Inlet air temperature, Gauss-Newton method

---

* **收稿日期**：2025-04-07

作者简介：赵旭峰(1987—)，男，山西太原人，硕士，主要从事矿山热害治理及矿山压力与岩层控制研究。E-mail:672721766@qq.com

0　引言

随着煤炭资源开采深度持续向深部延伸，高地温热害已成为制约矿井安全高效生产的核心瓶颈[1-2]。现场实测数据表明，千米以深矿井围岩温度普遍超过 40 ℃，局部构造异常区域可达 50 ℃[3-4]。掘进巷道作为矿井通风系统的最末端，受围岩、机械等多热源耦合作用影响，已成为矿井热害的高危区域[5-7]。

机械制冷是当前深部热害治理的主要手段，而系统制冷量的设计高度依赖巷道风温场的精准预测，但动态掘进过程中巷道的几何形态随掘进进程持续变化，导致围岩-风流非稳态传热过程呈现出显著的时空耦合特征[8-9]。尤其在长距离快速掘进工况下，迎头区域因新鲜风流与高温围岩发生剧烈热交换，易形成“回头热”现象(实测平均风温达 35 ℃)，严重威胁作业人员的健康与作业安全[10-11]。因此，系统揭示动态掘进巷道风温场的时空演化机制，构建融合掘进进程的高精度风温场时空耦合预测模型，对深部矿井制冷降温系统优化设计与热害防控具有重要理论价值与工程意义。

当前国内外针对掘进巷风温场的研究多基于静态几何模型，主要聚焦于单一通风参数或围岩特性的单因素影响规律[12-14]。Sun 等[15]通过相似模拟试验，揭示了周期性通风对温度场的调控阈值与作用机制。Wang 等[16]系统探究了不同通风工况下掘进巷道的风温分布特征，发现进风温度是影响巷道温度场的关键因素。Zhou 等[17]针对通风管道布置方式开展研究，发现双管送风方式能显著改善巷道局部温度，为掘进巷通风系统优化提供了有益参考。

然而，上述研究均未考虑动态掘进过程中通风路径随掘进面推进实时演变的影响，难以从本质上揭示风流场的时空耦合机制。近年来，部分学者尝试引入动网格技术提升模型的动态表征能力。Li 等[18]、Xu 等[19]均采用动网格法结合流固耦合数值模型，分析了掘进巷道的热环境演化特征，发现单纯调节风量对提高降温效果的作用十分有限。Shi 等[20]采用数据继承技术实现了长距离巷道的动态掘进模拟，对比分析了围岩热参数、通风参数及掘进速度对巷道风温场的影响规律。尽管如此，上述研究仍多局限于单一时空尺度分析，尚未建立能够统一描述风温场时空交互演化规律的普适性量化模型。

基于此，本研究采用“动态建模-无量纲分析-参数反演”一体化研究框架，构建普适性的二元耦合公式，描述动态掘进巷道风温的时空演化规律。首先，基于动网格技术构建三维掘进巷道非稳态传热模型；进而引入表征掘进速度的无量纲时间 F_{ov}，结合传统无量纲距离 X，将控制方程转化为时空耦合形式；然后，采用改进高斯-牛顿法(融合列文伯格-马夸尔特优化)反演模型参数，建立无量纲温度时空耦合二元关系式 $\Theta(F_{ov},X)$，揭示进风温度对时空耦合特性的调控机制，为高温矿井制冷降温方案的优化设计提供理论参考。

1　动态掘进巷风温场数值模型构建

1.1　物理模型与基本假设

深部高温巷道环境温度受通风、围岩散热等多方面因素影响，风温场演化过程是一个复杂的非稳态流固热耦合过程。为系统揭示该过程的演化规律，对模型作以下合理假设：围岩物理性质均匀且各向同性，热传导性能稳定；巷道内空气为不可压缩流体；不考虑内摩擦力影响，风流场壁面为无滑移；忽略地下水对温度场的影响。

基于上述假设，以河南某深部矿井为工程背景，建立掘进巷道三维动态风温场模型，如图 1 所示，模型的尺寸(长×宽×高)为 800 m×50 m×50 m，巷道断面为矩形，尺寸(宽×高)为 5 m×3.5 m，风筒断面为正方形，边长为 1.0 m，巷道初掘段长度为 150 m，风筒末端距掘进工作面迎头围岩壁面的距离为 10 m，风筒外壁距相邻巷道壁 0.5 m。

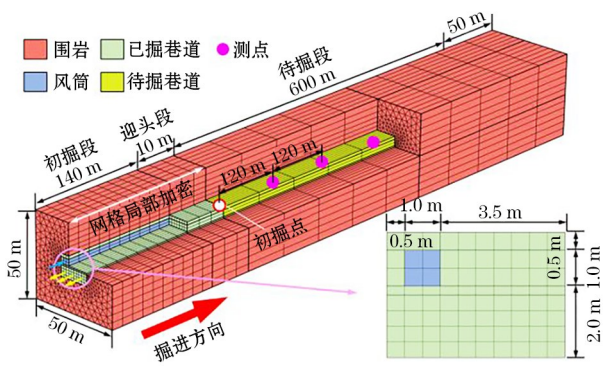


图 1　高温巷道三维动态风温场模型及网格划分

Fig.1　Three-dimensional dynamic wind temperature field model and mesh division of high-temperature roadway

1.2　控制方程及边界条件

1.2.1　控制方程

巷道通风过程中，风筒及巷道内空气流动处于湍流状态，基于质量守恒、能量守恒和动量守恒三大基本定律，推导得出高温巷道通风过程中的流动传热基本方程。

(1) 连续性方程。巷道与风筒内空气流动遵循质量守恒定律,单位时间内任一控制体的风流流入质量等于流出质量,其表达式为:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t}+\nabla(\rho_g \cdot \boldsymbol{U})=0 \tag{1}$$

式中:ρ_g 为空气密度,kg/m^3;t 为时间,s;$\boldsymbol{U}$ 为空气总速度矢量,m/s。

(2) 运动方程。单位时间内,巷道内任一控制体的动量变化等于作用在该控制体上的外力总和,考虑体积黏度与浮力作用时,合并 x、y、z 三个方向上的动量方程得:

$$\rho_g\left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+\boldsymbol{U}\cdot\nabla\boldsymbol{U}\right)=\nabla(\mu(\nabla\boldsymbol{U}+(\nabla\boldsymbol{U})^{\mathrm{T}}))-\nabla\left(\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\boldsymbol{U})\boldsymbol{I}\right)-\nabla p+\rho_g g \tag{2}$$

式中:p 为气体压力,Pa;μ 为气体动力黏度,Pa·s;$\boldsymbol{I}$ 为单位向量;g 为重力加速度,m/s^2。

(3) 能量方程。掘进巷道内风流的能量守恒方程为:

$$\boldsymbol{u}\frac{\partial T_f}{\partial x}+\boldsymbol{v}\frac{\partial T_f}{\partial y}+\boldsymbol{w}\frac{\partial T_f}{\partial z}=\frac{\lambda_g}{c_g\rho_g}\left(\frac{\partial^2 \boldsymbol{u}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \boldsymbol{v}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \boldsymbol{w}}{\partial z^2}\right) \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{v}$、$\boldsymbol{w}$ 分别为速度矢量在 x、y、z 方向上的分量,m/s;T_f 为该单元体的温度,℃;λ_g 为空气导热系数,W/(m·℃);c_g 为气体比热容,kJ/(kg·℃)。

1.2.2 模型参数及边界条件

掘进巷通风过程中,除风流与围岩的对流热交换外,新鲜风流经风筒送至迎头的过程中,与风筒壁及巷道内空气也存在热交换,因此,风筒壁面按具有一定厚度的薄层处理,模型中风筒与围岩基础热物性参数设置见表 1。

表 1 动态掘进巷模型参数

Table 1 Parameters of dynamic excavation roadway model

参数	取值	来源
围岩密度 ρ_{rock}/(kg/m^3)	2 600	实测
围岩导热系数 k_{rock}/(W/(m·℃))	2.0	实测
围岩比热容 C_{rock}/(J/(kg·℃))	880	实测
空气导热系数 λ_g/(W/(m·℃))	0.259	文献[20]
空气密度 ρ_g/(kg/m^3)	1.213	文献[20]
空气动力黏度 μ/(×10^{-5} Pa·s)	1.840	文献[20]
空气比热容 C_g/(J/(kg·℃))	1 012	文献[20]
风筒密度 ρ_d/(kg/m^3)	1 400	文献[7]
风筒导热系数 k_d/(W/(m·℃))	0.171	文献[7]
风筒比热容 C_d/(J/(kg·℃))	1 161	文献[7]

模型周围及底部设置原岩温度边界(50 ℃),风筒入口设置风速边界(15 m/s),巷道出口设置压力边界(0 Pa),巷道掘进速度为 2 m/s,巷道壁面和风筒壁均设为无滑移。此外,为研究进风温度对掘进巷动态风温场的影响,设置风筒进风温度分别为 20 ℃、25 ℃、30 ℃三个方案。

1.3 数值求解与验证

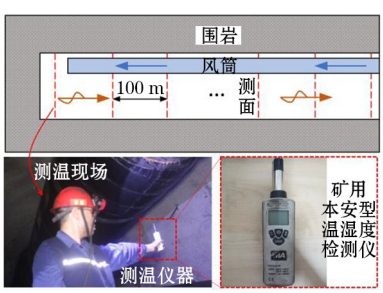
1.3.1 网格划分

由于掘进工作面长度大于断面尺寸,模型长径比较大,非结构化四面体网格在流场计算中收敛性较差,且流体动力学计算对网格精度要求较高,而围岩热传导计算对网格精度要求相对较低。基于此,对巷道流体域采用结构化映射网格划分,围岩域采用三角形网格划分,如图 1 所示。

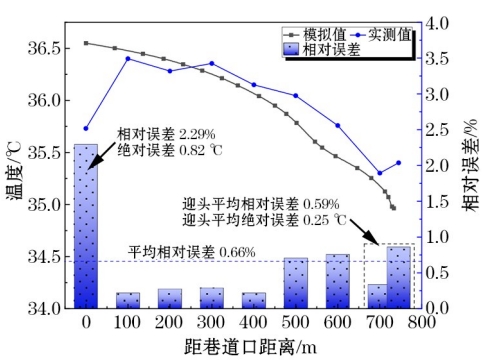
为实现巷道动态模拟掘进,在模型中引入动网格技术,为了保证在计算收敛性的同时降低计算成本,将模型沿掘进方向分为初掘段、迎头段和待掘段三部分,并对初掘段和迎头段进行局部网格加密,以满足流场计算要求。巷道掘进过程中,迎头段以 2 m/d 的速度沿掘进方向位移,初掘段和待掘段同步进行拉伸与压缩,从而实现巷道动态延伸。

1.3.2 数值模型验证

为验证模型准确性,将掘进巷数值模拟结果与河南某矿掘进巷的现场风温测量结果进行对比分析,现场测点布置与风温对比结果如图 2 所示。



(a) 掘进巷风温现场测试



(b) 实测值与模拟值对比

图 2 现场测点布置与风温结果对比

Fig.2 Layout of on-site measuring point and comparison of wind temperature results

由图 2 可知，巷道风温模拟值与实测值的分布规律基本一致，自巷道出口至迎头风温逐渐升高，最大相对误差为 2.29%(绝对误差为 0.82 ℃)，误差主要是由于巷道出口外围巷道新风混入，导致巷道出口实测风温较低。此外，迎头区域因机械设备与作业人员散热，实测风温小幅度升高，迎头处模拟风温平均相对误差为 0.59%(绝对误差为 0.25 ℃)，整体风温模拟平均相对误差为 0.66%，满足工程要求。

2　动态掘进巷无量纲温度时空耦合关系建模

2.1　单值条件无量纲化

风流自风筒流入巷道后，自迎头至巷道出口沿程温度不断变化，同时，受巷道围岩持续加热影响，同一位置的风温随时间不断变化。为揭示高温掘进巷风温场时空演化的普适性规律，对巷道风温场导热控制方程及其单值性条件进行无量纲化处理。此外，由于巷道掘进与风-岩换热同步进行，为反映动态掘进特征，引入与掘进速度相关的无量纲化结果代替传统的非稳态传热的傅里叶数，具体公式如下：

$$\begin{cases}\Theta=(T_{\mathrm{f}}-T_{\mathrm{in}})/(T_{\mathrm{rock}}-T_{\mathrm{in}})\\ X=x/L_0\\ F_{\mathrm{ov}}=Vt/L_0\end{cases}\tag{4}$$

式中：Θ 是无量纲温度；T_{rock} 为围岩原岩温度，℃；T_{in} 为风筒进风温度，℃；x 是测量点距初掘位置的距离，m；L_0 是待掘巷道长度，m；无量纲时间 F_{ov} 受掘进因素影响，$F_{\mathrm{ov}}\geqslant X$；$X$ 为无量纲距离。

2.2　掘进巷无量纲温度时空二元关系

基于动态掘进巷风温场数值模型模拟结果，巷道通风稳定后，无量纲温度与无量纲距离之间符合以 e 为底的指数关系，与 Zhang 等[21-22]的研究结论一致，但仍需进一步考虑无量纲时间的影响。同理，二次多项式能较好地反映动态掘进巷无量纲温度与无量纲时间之间的关系，但无量纲距离对关系式各系数影响显著。因此，在巷道非稳态传热过程中，特定位置的无量纲温度 $\Theta(F_{\mathrm{ov}},X)$ 可表达为时间依赖的修正二次函数关系：

$$\Theta(F_{\mathrm{ov}},X)=A_1(X)F_{\mathrm{ov}}^2+A_2(X)F_{\mathrm{ov}}+A_3(X)\tag{5}$$

$$\Theta(X)=B_1\times\mathrm{e}^{B_2X}+B_3\tag{6}$$

式中，A_1、A_2、A_3、B_1、B_2、B_3 均为待定参数，可由给定的 X 与 F_{ov} 确定。

根据动态掘进巷风温场模拟计算结果，进风温度 $T_{\mathrm{in}}=30$ ℃时，Θ 与 X 关系式中的参数取值见表 2。根据表 2 中不同 F_{ov} 下参数 A_1、A_2、A_3 的取值绘制关系曲线，如图 3 所示。结果表明：参数 A_1、A_2 均与无量纲时间呈指数关系，参数 A_3 与无量纲时间呈二次函数关系，且 R^2 均大于 0.997。由此可知，无量纲温度与无量纲时间、无量纲距离之间存在二元耦合关系式 $\Theta=f(F_{\mathrm{ov}},X)$。将式(5)、式(6)耦合可得无量纲温度 Θ 随无量纲时间 F_{ov}、无量纲距离 X 之间的指数-二次时变关系：

$$\Theta(F_{\mathrm{ov}},X)=(D_1\mathrm{e}^{D_2\cdot X}+D_3)F_{\mathrm{ov}}^2+D_7\mathrm{e}^{D_8\cdot X}+(D_4\mathrm{e}^{D_5\cdot X}+D_6)F_{\mathrm{ov}}+D_9\tag{7}$$

式中：自变量 $F_{\mathrm{ov}}>0$，$X\geqslant0$；$D_1\sim D_9$ 均为待定参数。其中，二次时间项反映非稳态传热的加速效应，源于围岩蓄热与风流对流的非线性交互；一次时间项表征稳态传热阶段围岩与风流的线性热交换；空间指数项 $D_7\mathrm{e}^{D_8\cdot X}$ 描述温度沿巷道轴向的衰减特性；常数项则与环境初始温度有关。

表 2　无量纲温度与无量纲时间关系式参数取值

Table 2　Parameter values for dimensionless temperature and dimensionless time equations

X	A_1	A_2	A_3
0.2	0.101	0.302	0.113
0.4	0.091	0.308	0.083
0.6	0.206	0.502	−0.018
0.8	0.819	1.720	−0.634

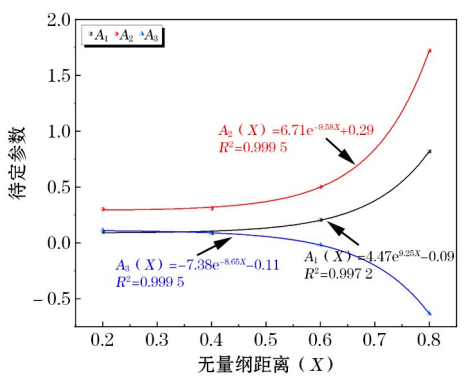


图 3　参数 A_1、A_2、A_3 与无量纲距离的关系曲线

Fig.3　The relationship curves between parameters A_1, A_2, A_3 and dimensionless distance

2.3　基于高斯-牛顿法的时空耦合关系

掘进巷风温场时空演变规律可表示为时间和空间的二元函数。为确定无量纲温度时空耦合关系式中的未知参数值 $D_1\sim D_9$，采用高斯-牛顿法进行参数反演。高斯-牛顿算法是一种经典的非线性拟合算法，在处理非线性问题上具有显著优势，其核心思想是利用当前参数的雅可比矩阵对非线性模型进行

线性近似,通过泰勒展开将非线性问题降维至求解线性最小二乘问题,迭代更新参数直至使得模拟值和实测值之间的残差平方和最小。算法具体流程如下。

给定观测数据(X_i, F_{ovi},Θ_i),构建非线性模型$\hat{\Theta}_i = f(X_i, F_{ovi}, \boldsymbol{D})$,其中$\boldsymbol{D}$为求解参数,参数求解的实质是估计输出值向实际输出值逐步逼近,即最小化残差平方和:

$$\min_{D_i} \sum_{i=1}^{m} (\hat{\Theta}_i - \Theta_i)^2 \tag{8}$$

设$r_i = \hat{\Theta}_i - \Theta_i$,$\boldsymbol{r} = [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_m]^{\mathrm{T}}$,则式(8)可转化为:

$$\min \sum_{i=1}^{m} [r_i(D_1, D_2, \cdots, D_9)]^2 = \boldsymbol{r}(\boldsymbol{D})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{r}(\boldsymbol{D}) \tag{9}$$

利用高斯-牛顿法对式(9)进行迭代求解,则:

$$\boldsymbol{D}^{(l+1)} = \boldsymbol{D}^{(l)} - [\boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}^{(l)})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}^{(l)})]^{-1} \cdot \boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}^{(l)})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{r}(\boldsymbol{D}^{(l)}) \tag{10}$$

式中:l为迭代次数;$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}^{(l)})$为第$l$次迭代时$\boldsymbol{r}$的雅可比矩阵,其元素为残差对各求参数的偏导数。

由于式(10)在求解过程中存在$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{D})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}(\boldsymbol{D})$非正定矩阵的问题,因此使用列文伯格-马夸尔特法对其进行修正:

$$\boldsymbol{D}^{(l+1)} = \boldsymbol{D}^{(l)} - [\boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}^{(l)})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}^{(l)}) + \mu_l \boldsymbol{I}]^{-1} \cdot \boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}^{(l)})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{r}(\boldsymbol{D}^{(l)}) \tag{11}$$

式中:μ_l为阻尼因子;$\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

因此,式(9)中各参数的牛顿迭代形式为:

$$\boldsymbol{D}_{1\sim9}^{(l+1)} = \boldsymbol{D}_{1\sim9}^{(l)} - [\boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}_{1\sim9}^{(l)})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}_{1\sim9}^{(l)}) + \mu_l \boldsymbol{I}]^{-1} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{D}_{1\sim9}^{(l)})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{r}(\boldsymbol{D}_{1\sim9}^{(l)}) \tag{12}$$

3 结果与分析

3.1 动态掘进巷风温场时空演变规律

图4为巷道动态掘进过程中无量纲温度随无量纲距离的演化规律,由图4可知,无量纲温度随距离的增加呈指数衰减(R^2均大于0.98),公式见式(6)。

随着开采时间的延长,沿程温度梯度逐渐减小,当$F_{ov}=0.2$时,指数型系数$B_2=11.49$,温度衰减较快;当$F_{ov}=1.0$时,$B_2=0.68$,温度梯度趋于平缓,B_2降幅为94.1%,表明长期通风后围岩与风流热交换趋于稳定。同时,常数项B_3随F_{ov}增加而增大($B_{3,0.2}=0.203$,$B_{3,1.0}=0.356$),升高了75.4%,反映了围岩的蓄热效应[20],即围岩对风流的累积加热作用。此外,随着开采时间的延长,迎头风温大致呈线性增长趋势,当F_{ov}自0.2增至0.4时,迎头风温增大11.95%。

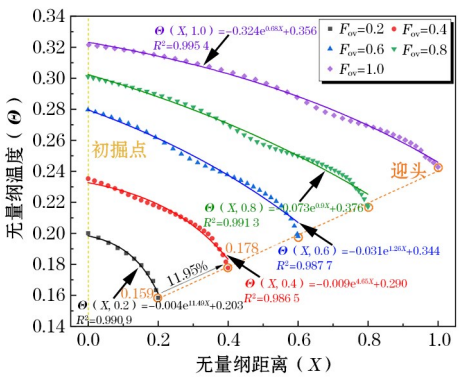


图4 无量纲温度与无量纲距离的关系曲线

Fig.4 The relationship curves between dimensionless temperature and dimensionless distance

图5为不同轴向位置($X=0.2,0.4,0.6,0.8$)处无量纲温度随无量纲时间的演化规律。由图5可知,随着时间的增大,无量纲温度也逐渐升高,两者呈二次函数关系(相关系数R^2均大于0.98),公式见式(5);同一位置的风温在通风初期温升较为显著,随后逐渐平稳。随轴向无量纲距离的增加,风温逐渐降低,当X自0.2增至0.8时,二次项系数A_1绝对值由0.101增至0.819,表明温度梯度随无量纲距离X增加而升高,反映近工作面区域风流与围岩的瞬态换热更为强烈,靠近巷道出口区域的风-岩换热逐渐进入稳态。

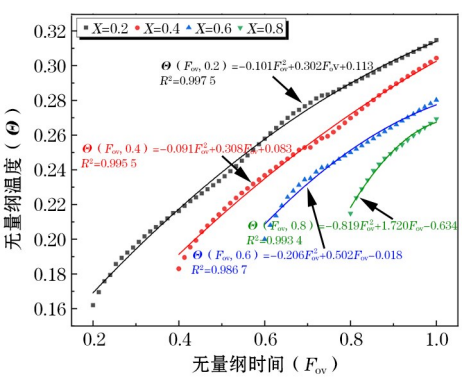


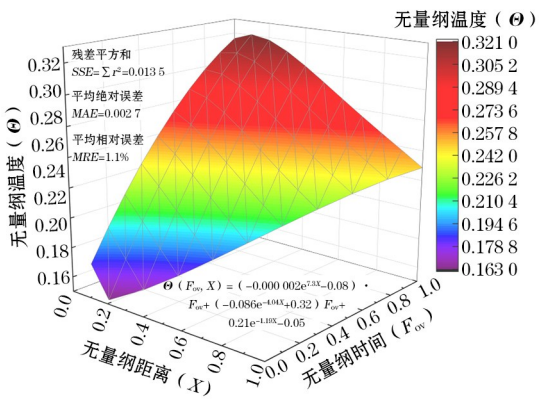
图5 无量纲温度与无量纲时间的关系曲线

Fig.5 The relationship curves between dimensionless temperature and dimensionless time

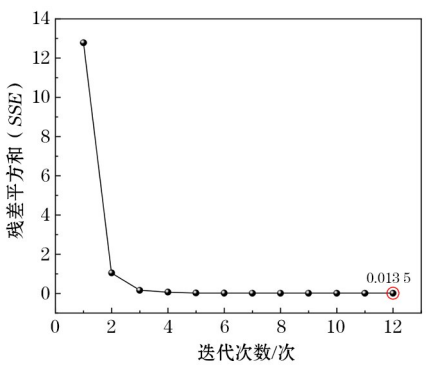
3.2 动态掘进巷风温场的时空耦合特性

通过高斯-牛顿法对式(7)中各参数$D_1 \sim D_9$进行参数反演,得到进风温度$T_{in}=30$ ℃时动态掘进巷无量纲温度时空耦合特征及其收敛性,如图6

所示。由图 6 可知，无量纲温度时空耦合特征曲面分布近似三角形分布，曲面面积自左向右逐渐增大。此外，无量纲温度时空耦合模型的残差平方和（SSE）为 0.013 5，与验证后的动态掘进巷数值计算结果相比，平均绝对误差（MAE）仅为 0.002 7，平均相对误差（MRE）为 1.1%，表明该模型预测精度更高，耦合效果较好。同时由图 6(b)可知，迭代过程中 SSE 单调递减并逐渐趋于稳定，仅需 12 次即可迭代收敛，表明模型收敛快，收敛效果好。



（a）时空耦合特征曲面

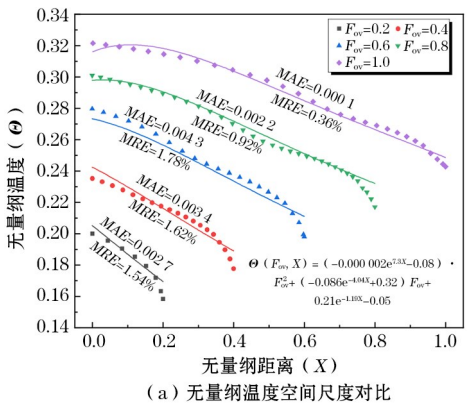


（b）残差平方和单调性

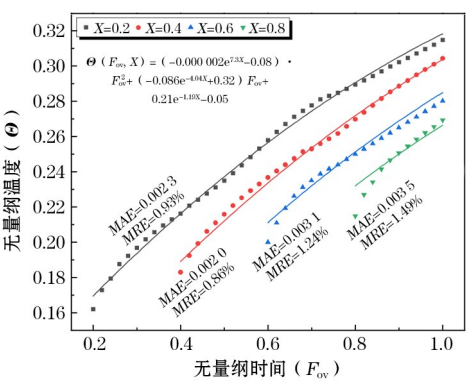
图 6　无量纲温度时空耦合关系及其收敛性

Fig.6　Space-time coupling relationship of dimensionless temperature and its convergence

为进一步分析掘进巷无量纲温度的时空耦合特征，将时空耦合模型预测曲线与数值模拟结果进行对比，如图 7 所示。由图 7 可知，模型预测结果的特征曲线与风温时空变化规律基本一致。空间尺度上，模型在靠近迎头区域的预测误差相对较高。由图 7(b)可知，耦合模型预测结果的误差随距离 X 增大而减小，当 $X=0.8$（近迎头区域）时 $MRE=1.49\%$，当 $X=0.2$（近巷道出口区域）时 $MRE=0.93\%$。这是因为巷道迎头处风流状态复杂，且风流与围岩的非稳态换热更为剧烈。由图 7(a)可知，时间尺度上，掘进初期耦合模型预测结果的误差相对较大（当 $F_{ov}=0.2$ 时，$MAE=0.002\ 7$，$MRE=1.54\%$），但掘进后期模型的预测精度显著提高，当 $F_{ov}=1.0$ 时，$MAE=0.000\ 1$，$MRE=0.36\%$，这在图 7(b)中表现为 F_{ov} 较小时特征曲线与模拟值之间偏差较为显著，主要是由于掘进初期风流与围岩的温差较高，非稳态热交换较为剧烈。



（a）无量纲温度空间尺度对比



（b）无量纲温度时间尺度对比

图 7　时空耦合特征曲线与模拟结果对比

Fig.7　Comparison of space-time coupling characteristic curves and simulation results

3.3　进风温度对动态掘进巷风温场的影响

图 8 为不同进风温度下无量纲温度随无量纲距离的演化规律。由图 8 可知，巷道掘进过程中，无量纲温度 Θ 与风筒进风温度 T_{in} 呈正相关，当进风温度自 20 ℃升高至 30 ℃时，掘进后期（$F_{ov}=1.0$）巷道迎头无量纲温度分别升高 0.015，0.044，而巷道出口附近无量纲温度分别升高 0.020，0.004，表明迎头区域温度对进风温度变化的响应更为显著。此外，随着进风温度升高，无量纲温度梯度逐渐减小，以掘进后期为例，当进风温度自 20 ℃升高至 30 ℃过程中，自迎头至巷道出口无量纲温度温升 $\Delta\Theta$ 分别为 0.119，0.114，0.079。这是由于进风温度升高导致风

流与岩热交换强度降低,符合牛顿冷却定律。

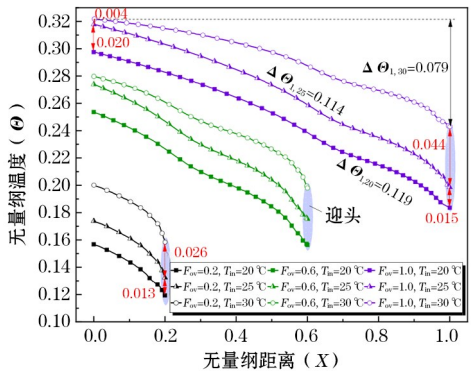


图 8 不同进风温度下无量纲温度与无量纲距离之间的关系曲线

Fig.8 The relationship curves between dimensionless temperature and dimensionless distance at different inlet air temperatures

图 9 为不同进风温度下无量纲温度随无量纲时间的演化曲线。

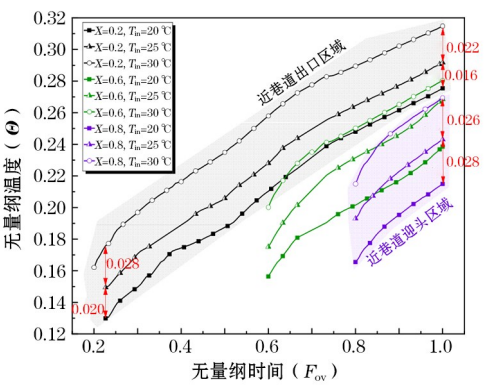


图 9 不同进风温度下无量纲温度与无量纲时间之间的关系曲线

Fig.9 The relationship curves between dimensionless temperature and dimensionless time at different inlet air temperatures

由图 9 可知,随着进风温度升高,近迎头区域温度大致呈等比例升高,当 $F_{ov}=1.0$ 时,近迎头区域($X=0.8$)无量纲温度随进风温度分别升高 0.028 和 0.026,而近巷道出口区域($X=0.2$)无量纲温度随进风温度分别升高 0.016 和 0.022,与近巷道出口区域相比,迎头区域总温升幅度高 42.1%,这是由于近迎头区域受新风持续注入的影响更为显著。此外,掘进初期($F_{ov}=0.22$)近巷道出口区域($X=0.2$)无量纲温度随进风温度分别升高 0.020,0.028,而掘进后期的同一位置的总温升幅度降低至 0.038,降幅达 26.3%,这是由于随着掘进逐渐推进,风流与围岩的热交换时间增加,两者温差逐渐减小,风-岩换热趋近热平衡。这表明低温送风初期降温效果显著,但长期降温后效率衰减明显,冷量损失严重。此外,单纯调节风量或采用围岩隔热降温均存在边界效应递减、降温效果不佳、施工成本高等局限[5,7,11-12],因此深部矿井降温工程中应采用结合围岩热管理与局部制冷降温的综合降温策略,如预先对煤岩体进行注水降温,降低初始热源强度,从而延长低温送风的有效期。

掘进巷迎头作为主要作业空间,风流流动状态复杂,因此进一步分析不同进风温度下迎头风温的变化规律,如图 10 所示。迎头风温 T_b 与掘进时间 t 呈线性正相关,这主要是由于风筒内新鲜风流与巷道内环境风流换热所致。降低进风温度 T_{in} 可使迎头风温大致呈线性降低,以《煤矿安全规程》规定的掘进工作面环境温度阈值 26 ℃为标准[23],推导得出满足降温要求的设计进风温度 T_{in}^{d} 与掘进时间 t 的动态关系式:

$$T_{in}^{d}=0.004\ 6t+23.47,0<t\leqslant 300 \quad (13)$$

由图 10 可知,设计进风温度随掘进时间呈线性升高趋势。

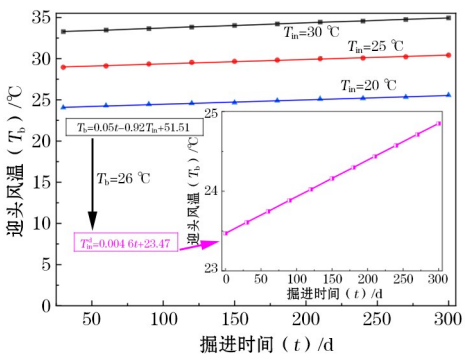


图 10 进风温度与迎头风温的关系曲线

Fig.10 The relationship curves between inlet air temperature and head wind temperature

3.4 进风温度对风温场时空耦合特性的影响

基于不同进风温度下动态掘进巷风温场的数值模拟结果,通过高斯-牛顿法反演得到耦合模型参数 D_1~D_9 及模型拟合精度指标,见表 3。由表 3 可知,当进风温度 $T_{in}=20$ ℃时,参数 D_1 大于 0;当 T_{in} 升至 25 ℃和 30 ℃时,D_1 等于或趋近于 0,使得耦合关系式中的时间二次项系数基本恒定。这与进风温度升高导致风-岩非稳态换热强度降低有关,说明降温工程中过低的进风温度会加剧冷量损失。

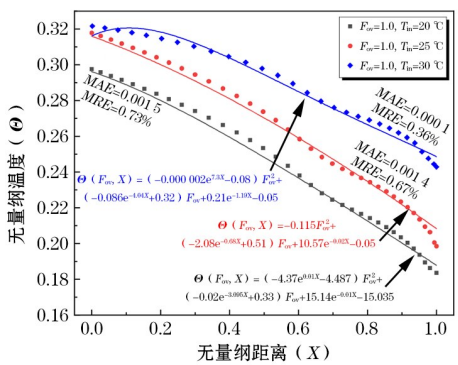
同时，进风温度 T_{in} 的降低使得耦合关系式中常数项 D_9 显著减小，表明降低进风温度对巷道热环境的改善作用显著。由表 3 还可看出，耦合模型拟合精度随进风温度的降低而略有降低，但 *MRE* 均小于 2%，表明该耦合模型对不同进风温度下掘进巷风温动态演化规律的拟合程度较高，具有良好的通用性。

表 3　不同进风温度下参数反演结果及拟合参数

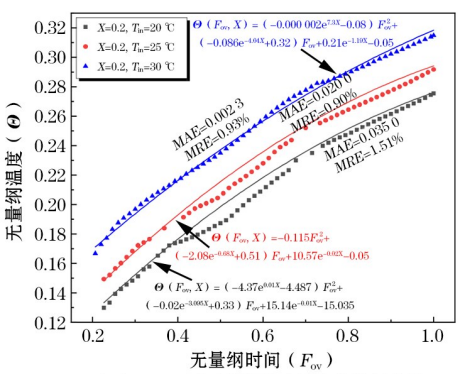
Table 3　Parameter inversion results and fitting parameters at different inlet air temperatures

T_{in}/℃	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	*SSE*	*MRE*/%	*MAE*
20	4.37	0.01	−4.487	−0.020	−3.095	0.33	15.140	−0.01	−15.035	0.328 9	1.81	0.003 7
25	0	22.37	−0.115	−2.080	−0.680	0.51	10.057	−0.02	−9.930	0.024 5	1.60	0.003 1
30	−0.000 002	7.30	−0.080	−0.086	−4.040	0.32	0.210	−1.19	−0.050	0.013 5	1.10	0.002 7

不同进风温度下耦合模型特征曲线如图 11 所示。由图 11 可知，各进风温度下，无量纲温度时空耦合特征曲线与数值模拟得到的风温变化规律基本一致。由图 11(a)可以看出，不同进风温度下特征曲线在近迎头区域数值较大；同时，沿程风温特征曲线的预测误差随进风温度的降低略有增大，这是由于较低的进风温度加剧了风流与围岩之间的非稳态热交换，使风温变化的非线性程度增强，在图 11(b)中表现为：$X=0.2$ 处风温特征曲线随进风温度的降低，*MRE* 从 0.93%升高至 1.51%，*MAE* 从 0.002 3 升高至 0.035。



（a）F_{ov}=1.0 时无量纲温度时空合特征曲线

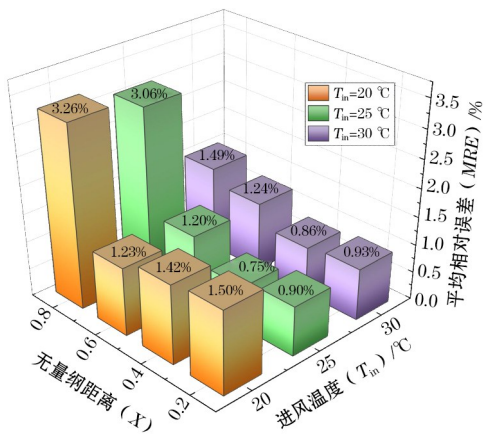


（b）X=0.2 时无量纲温度时空合特征曲线

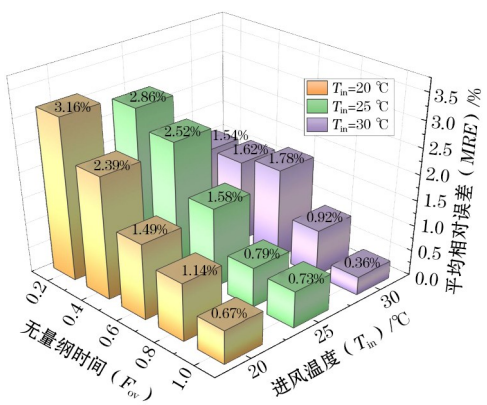
图 11　不同进风温度下无量纲温度时空耦合关系

Fig.11　Space-time coupling relationship of dimensionless temperature at different inlet air temperatures

图 12 为不同进风温度下，无量纲温度时空耦合模型在不同时间与空间尺度下的平均相对误差分布。



（a）不同无量纲距离下的平均相对误差分布



（b）不同无量纲时间下的平均相对误差分布

图 12　不同进风温度下平均相对误差分布

Fig.12　Distribution of mean relative errors at different inlet air temperatures

由图 12 可知，随着进风温度的降低，耦合模型在各时间与空间下的相对误差均增大，这主要是由较低的进风温度使风-岩换热的非稳态程度增强所致。由图 12(a)可知，空间尺度上，近迎头区域温度的平均相对误差较大，且在进风温度较低时更为显

著,随着无量纲距离的增大,*MRE* 在近巷道出口区域略有升高,这可能与巷道出口附近风筒内的低温新鲜风流的扰动有关。由图 12(b)可知,时间尺度上,随着无量纲时间的增大,*MRE* 逐渐减小,且进风温度越低,模型相对误差随时间的变化越明显,掘进初期($F_{ov}=0.2$)的 *MRE* 最大可达 3.16%($T_{in}=20$ ℃),这意味着进风温度的降低加剧了掘进初期风流温度的非线性变化,使得耦合模型 *MRE* 与无量纲时间呈负相关。

4 结论

(1) 本文系统研究了动态掘进巷道风温场的时空演化规律与耦合特性。结果表明:无量纲温度随时间与空间的演化服从指数-二次时变关系(*MRE*=1.1%);巷道沿程温度梯度与无量纲时间呈负相关,与无量纲距离呈正相关。长期通风后($F_{ov}=1.0$),温度梯度衰减速率较初期($F_{ov}=0.2$)降低 94.1%,B_2 自 11.49 降低至 0.68;风流热量随时间逐渐累积,致使常数项 B_3 升高 75.4%,表明时空耦合效应主导围岩-风流非稳态传热过程。

(2) 本研究揭示了进风温度对风温场的非线性调控机制。巷道近迎头区域($X=0.8$)对进风温度变化的响应最为敏感,当 T_{in} 自 20 ℃升至 30 ℃时,近迎头区域总温升幅度较巷道出口区域($X=0.2$)高 42.1%,以《煤矿安全规程》规定的迎头风温阈值 26 ℃为约束,推导得出满足降温要求的动态设计冷风温度 $T_{in}^{d}(t)$。低温送风初期降温效果显著,但长期通风后降温效率衰减至 26.3%,因此,降温工程中需结合围岩热管理与局部制冷降温,以提高降温可持续性。

(3) 本研究验证了时空耦合模型精度与工程适用性。结果表明,进风温度降低会增强风温的非线性变化,使时空耦合模型的 *MRE* 自 1.10%(30 ℃)增至 1.81%(20 ℃),但仍满足工程精度需求。当 $T_{in}=20$ ℃时,掘进初期($F_{ov}=0.2$)的 *MRE* 较高(3.16%),而长期通风($F_{ov}=1.0$)后 *MRE* 降至 0.67%。

参考文献(References):

[1] 万志军,毕世科,张源,等.煤-热共采的理论与技术框架[J].煤炭学报,2018,43(8):2099-2106.
Wan Zhijun, Bi Shike, Zhang Yuan, et al. Framework of the theory and technology for simultaneous extraction of coal and geothermal resources[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(8):2099-2106.

[2] 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 the prevention and utilization of mine geothermal energy[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(10):1632-1651.

[3] 李延河,万志军,于振子,等.平顶山矿区地热地质条件及其成因分析[J].地球物理学进展,2023,38(2):551-561.
Li Yanhe, Wan Zhijun, Yu Zhenzi, et al. Analysis of geothermal geological conditions and its genesis in Pingdingshan mining area[J]. Progress in Geophysics,2023, 38(2):551-561.

[4] 徐宇,王运敏,李孜军,等.深部矿井岩层注水采热协同巷道通风降温数值模拟研究[J].中国有色金属学报,2024,34(10):3518-3531.
Xu Yu, Wang Yunmin, Li Zijun, et al. Numerical simulation on water injection/geothermal exploitation in collaboration with cooling ventilation roadway in deep mines [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(10):3518-3531.

[5] 姬建虎,廖强,胡千庭,等.热害矿井掘进工作面换热特性[J].煤炭学报,2014,39(4):692-698.
Ji Jianhu, Liao Qiang, Hu Qianting, et al. Heat transfer char-acteristics of driving face in heat harm mine[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(4):692-698.

[6] Liu Lindong, Du Cuifeng, Wang Yuan, et al. Simulation experiment research of mine roadway simulating test device with adjustable wind velocity and temperature and humidity [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2023,20(5):4057.

[7] 苟红.高温采掘工作面全生命周期风温预测研究[D].徐州:中国矿业大学,2024:40-58.
Gou Hong. Prediction of air temperature in the whole life cycle of high-temperature mining face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2024:40-58.

[8] 郭平业,朱艳艳.深井降温冷负荷反分析计算方法[J].采矿与安全工程学报,2011,28(3):483-487.
Guo Pingye, Zhu Yanyan. Back-analysis algorithm of cooling load in deep mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2011,28(3):483-487.

[9] 赵林海,李宗利,苟晓斌,等.高温矿井掘进面移动隔热层降温效果研究[J].有色金属(中英文),2025,15(2):315-324.
Zhao Linhai, Li Zongbin, Gou Xiaobin, et al. Study on the cooling effect of moving insulation layer on excavation face of high temperature mine[J]. Nonferrous Metals,2025,15(2):315-324.

[10] Chang Zhangyu, Ji Jingwei, Wang Keyi, et al. Heat absorption control equation and its application of cool-wall cooling system in mines[J]. Journal of Central South University,2021,28(9):2735-2751.

[11] 刘桂平.掘进巷道回头热及其影响因素分析研究[J].矿业安全与环保,2018,45(6):10-14.
Liu Guipin. Analysis of roadway back hot and its influencing factors[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018,45(6):10-14.

[12] 李晓健,贾敏涛,赵旭,等.高温深井矿山独头掘进巷道通风降温机理研究[J].金属矿山,2024(2):271-275.
Li Xiaojian, Jia Mintao, Zhao Xu, et al. Numerical simulation study on ventilation and cooling of deep mine tunnels[J]. Metal Mine,2024(2):271-275.

[13] Zhang Ze, Wang Shuhong, Yin Hong, et al. Fracture seepage and the temperature field distribution of rocks surrounding high-temperature tunnels: a numerical analysis [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources,2022,8(4):1121-1142.

[14] Nie Xingxin, Feng Shanshan, Zhang Shudu, et al. Simulation study on the dynamic ventilation control of single head roadway in high-altitude mine based on thermal comfort[J]. Advances in Civil Engineering,2019:2973504.

[15] Sun Shoubang, Yan Songhong, Cao Xiaoping, et al. Distribution law of the initial temperature field in a railway tunnel with high rock temperature: a model test and numerical analysis[J]. Applied Sciences,2023,13(3):1638.

[16] Wang Junhui, Wan Zhijun, Zhang Hongwei, et al. Effects of thermal water upwelling on microclimate change in the high geo-temperature roadway[J]. Shock and Vibration, 2021:1-14.

[17] Zhou Zhiyong, Cui Yimeng, Tian Long, et al. Study of the influence of ventilation pipeline setting on cooling effects in high-temperature mines[J]. Energies,2019,12(21):4074.

[18] Li Zijun, Liu Huasen, Xu Yu, et al. Numerical analysis on the thermal performance in an excavating roadway with auxiliary ventilation system[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18 (3):1184.

[19] Xu Yu, Li Zijun, Liu Huasen, 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.

[20] Shi Peng, Wan Zhijun, Zhang Yuan, et al. Modeling the dynamic heat transfer behavior during long-distance roadway excavation using the method of moving mesh and data inheritance[J].Case Studies in Thermal Engineering,2025, 69:105906.

[21] Zhang Yuan, Wan Zhijun, Gu Bin, et al. Unsteady temperature field of surrounding rock mass in high geothermal roadway during mechanical ventilation[J]. Journal of Central South University,2017,24(2):374-381.

[22] Zhang Yuan, Wan Zhijun, Gu Bin, et al. Finite difference analysis of transient heat transfer in surrounding rock mass of high geothermal roadway[J]. Mathematical Problems in Engineering,2016,2016:8951524.

[23] 中华人民共和国应急管理部.煤矿安全规程[EB/OL].[2025-03-15]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/15/content_5712798.htm