# 基于循环推进算法的采煤工作面围岩温度场 数值模拟研究

秦跃平,郭铭彦,唐 飞,刘 强,张冀昕,侯浩楠,赵 微

(中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院,北京 100083)

摘 要:随着浅部赋存煤炭资源的日益枯竭,深部开采已经成为煤炭资源开发的新常态。深部高温高湿的热环境将危害作业人员健康,增加机电设备故障率,极易引发井下安全事故。高温围岩作为采煤工作面的最主要热源之一,长期以来其散热量计算依赖于拟合经验式,缺乏科学合理的计算方法。基于傅里叶定律和能量守恒定律,建立了采煤工作面二维围岩温度场非稳态数学模型,运用有限体积法对模型进行了离散,提出了以坐标间断移动来模拟实际割煤进刀过程的循环推进新算法,显著提高了动态推进条件下高温采煤工作面围岩散热的计算精度。随后以单个节点为例详细介绍了循环推进算法流程,基于 Visual Studio 编程平台自主开发了数值解算程序,并结合工程背景开展了采煤工作面高温围岩温度场及散热规律的数值模拟研究与实测验证工作。结果表明:模拟结果与现场实测数据变化趋势基本一致,平均相对误差为 6.15%;在连续循环割煤过程中,围岩温度场呈现周期性变化特征;在一个循环周期内,各区域围岩散热强度在进刀循环开始时达到峰值,随后不稳定换热系数开始快速下降,且下降趋势逐渐减缓;传统的拟合经验式忽略了割煤循环过程中围岩散热强度随时间的改变,高估了围岩散热能力;在热害严重的采煤工作面,通过适当减缓进刀速度或采用截深更浅的采煤机刀头可有效减少围岩散热。 关键词:采煤工作面;围岩散热;围岩温度场;循环推进算法;不稳定换热系数

中图分类号:TD727 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2025)01-0409-12

## Numerical simulation of temperature field in surrounding rock of coal mining face based on cyclic advancement algoritm

QIN Yueping, GUO Mingyan, TANG Fei, LIU Qiang, ZHANG Jixin, HOU Haonan, ZHAO Wei

(School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology -Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the increasing depletion of shallow coal resources, deep mining has become the new normal for coal resources development. The high temperature and high humidity thermal environment in deep mines jeopardizes the health of operators, increases the failure rate of electromechanical equipment, and is very likely to cause safety accidents underground. As one of the most important heat sources in the coal mining face, the heat dissipation calculation of high-temperature surrounding rock has long relied on fitting empirical equations and lacks a scientific and reasonable calculation method.Based on Fourier's law and the law of energy conservation, a two-dimensional non-stationary mathematical model

QIN Yueping, GUO Mingyan, TANG Fei, et al. Numerical simulation of temperature field in surrounding rock of coal mining face based on cyclic advancement algoritm[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 409–420.



<sup>收稿日期: 2024-01-09 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0046
基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC2904100); 国家自然科学基金面上资助项目 (51574249)
作者简介: 秦跃平 (1964→), 男, 山西夏县人, 教授。E-mail: qyp@cumtb.edu.cn
通讯作者: 唐 飞 (1997→), 男, 安徽阜南人, 博士研究生。E-mail: 2769133677@qq.com</sup> 

**引用格式:**秦跃平,郭铭彦,唐飞,等.基于循环推进算法的采煤工作面围岩温度场数值模拟研究[J].煤炭学报,2025, 50(1):409-420.

of surrounding rock temperature field in the coal mining face was established, and the model was discretized by the finite volume method. Then a new algorithm of cyclic advancing was proposed to simulate the actual coal cutting process by the intermittent movement of the coordinates, which significantly improves the calculation accuracy of heat dissipation of hightemperature surrounding rock in coal mining face under dynamic advancing conditions. Subsequently, the cyclic advancing algorithm process was introduced in detail with a single node as an example, and the numerical solution program was developed independently based on the Visual Studio programming platform. Finally, we carried out numerical simulation and verification of the temperature field and heat dissipation law of the high-temperature surrounding rock in the coal mining face in conjunction with the engineering background. The results show that: the simulation results are basically consistent with the trend of the field measured data, and the average relative error of the model is 6.15%. During the continuous cycle of coal cutting, the temperature field of the surrounding rock shows the characteristics of cyclic change. Within a cycle, the heat dissipation intensity of the surrounding rock in each region reaches the peak at the beginning of the coal cutting cycle, then the unstable heat transfer coefficient begins to fall rapidly, and the downward trend gradually slows down. The traditional fitting empirical formula neglects the change of the heat dissipation intensity of surrounding rock with time in the process of coal cutting cycle, and overestimates the heat dissipation capacity of surrounding rock. In the coal mining face with serious thermal damage, the heat dissipation of surrounding rock can be effectively reduced by appropriately slowing down the feed rate or adopting the cutter head of the coal miner with a shallower cut-off depth.

**Key words:** Coal mining face; Heat dissipation of surrounding rock; Temperature field of surrounding rock; Recurrent propulsion algorithm; Unstable heat transfer coefficient

### 0 引 言

随着浅部赋存煤炭资源的逐渐枯竭和能源需求 量的日益增加,我国矿山开采深度正以 10~15 m/a 的 速度快速向深部延伸<sup>[1-3]</sup>。据资料统计,我国煤田平均 地温梯度为 2~4 ℃/hm,开采深度的增加使得地温快 速上升,矿井热害问题日益突出<sup>[4-6]</sup>。持续的高温高湿 环境不仅会增加井下机电设备故障率,还会破坏人体 热平衡,危害矿工的身体健康,严重制约了矿井的安 全生产<sup>[7-9]</sup>。高温围岩作为造成井下热害的最主要热 源,其散热量往往超过其他所有热源的总和<sup>[10]</sup>。因此, 深入研究高温围岩温度场及其散热变化规律,对科学 指导矿井热害治理具有重要的意义。

现阶段,国内外学者对巷道围岩散热特性开展了 大量的研究。前苏联学者舍尔巴尼<sup>[11]</sup>基于无量纲分 析法首次提出了围岩与风流间不稳定换热准数的概 念,并分析了其与毕渥数 *Bi*、傅里叶数 *Fo* 之间的函 数关系;YAKOVENKO 等<sup>[12]</sup>采用 Laplace 变换法理论 求解了巷道围岩与风流间的热交换方程;孙培德<sup>[13]</sup>和 岑衍强等<sup>[14]</sup>分别通过采用推导解析和曲线拟合回归 的数学方法,总结得到了不稳定换热系数与时间相关 的计算经验式;高建良等<sup>[15]</sup>建立了考虑水分蒸发的围 岩传热数学方程,分析了不同场景下水分蒸发对围岩 温度场的影响;张一夫等<sup>[16]</sup>基于有限体积法研究了巷 道断面形状特征对围岩散热特性的影响,发现围岩调 热圈半径随通风时间呈指数变化,并随形状因子的增 大呈线性增加趋势;杜翠凤等<sup>[17]</sup>基于传热学稳态导热 理论,简化了巷道围岩调热圈导热模型,推导得到了 调热圈半径与温度的计算式。此外,宋东平、朱帅和 易欣等<sup>[18-20]</sup>也都分别通过数值计算和现场观测相结 合的方法对巷道围岩传热过程进行了研究,为现场热 害防治提供了技术指导。

虽然前人的研究工作已经取得了许多进展,但研 究对象很少涉及采煤工作面。由巷道围岩散热规律 推导和拟合而来的经验式,被直接应用在采煤工作面 的热源计算和风温预测研究中,使得计算结果与现场 情况产生偏差,无法满足采煤工作面热害防治工作的 实际需求<sup>[21-23]</sup>。如何模拟采煤工作面的动态推进特 性,是其围岩散热计算的最大难点。鉴于此,笔者提 出一种全新的循环推进算法,通过坐标的间断移动来 模拟采煤工作面实际的循环割煤过程。基于傅里叶 定律和能量守恒定律建立采煤工作面围岩温度场二 维非稳态数学模型,然后通过有限体积法对模型进行 了离散求解,最后以一个割煤循环作业过程为例,对 不同时刻围岩温度场和不稳定换热系数等参数的演 变规律展开分析,为更精确模拟采煤工作面间断推进 时的围岩温度场提供了参考和依据。

#### 1 采煤工作面围岩温度场数学模型

在综采工作面中,采煤机在工作面内往返循环割 煤。以工作面一次割煤进刀全过程为研究对象,沿工 作面倾向,任意选取一采煤截面,将采煤作业划分为 2个阶段,即割煤进刀阶段和围岩冷却阶段,其中割煤 进刀阶段在短时间内完成,而后采煤机继续移动,进 行下一截面的割煤作业,直至完成一次工作面全长的 割煤进刀过程。在此期间截面上新暴露高温围岩与 风流之间持续进行热交换,并逐渐冷却。为了准确模 拟上述过程,采取不同的建模策略对两阶段围岩散热 过程进行模拟,首先建立围岩冷却阶段的二维围岩温 度场非稳态数学模型,然后通过提出的循环推进算法 来模拟割煤进刀阶段围岩温度场的变化情况。

#### 1.1 导热控制方程

为研究采煤工作面围岩散热规律,突出主要影响 因素之间的关系,做如下假设<sup>[24-25]</sup>:①采煤工作面围 岩温度场为无内热源温度场;②围岩性质为非均质且 各向同性;③将选取的作业截面简化为矩形;④顶、 底板和煤壁与风流间热交换条件一致;⑤围岩原始岩 温为常值。

基于上述假设,如图 1 所示,可确定围岩温度场 解算范围。以煤壁中心水平线为 x 轴,垂直于顶底板 方向直线为 y 轴,建立二维直角坐标系。根据傅里叶 定律和能量守恒定律,可建立采煤工作面围岩温度场 二维非稳态导热控制方程<sup>[26]</sup>,如式 (1) 所示。

$$\iint_{D} \lambda_n \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) d\sigma = \iint_{D} \rho_n c_n \frac{\partial T}{\partial \tau} d\sigma \tag{1}$$

式中: T 为围岩温度,  $\mathbb{C}$ ; x、y 为坐标变量, m;  $\lambda_n$  为各 层围岩的导热系数, W/( $m \cdot \mathbb{C}$ );  $\rho_n$  为各层围岩密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_n$  为各层围岩比热, J/(kg ·  $\mathbb{C}$ );  $\tau$  为时间, s; D为积分区域面积, m<sup>2</sup>。





的远距离恒温边界,其温度等于原始岩温,为第1类 边界条件; $\Gamma_2$ 、 $\Gamma_3$ 和 $\Gamma_4$ 分别表示煤层顶板、底板以及 新暴露煤壁与风流间的对流换热边界,为第3类边界;  $\Gamma_5$ 、 $\Gamma_6$ 则表示采空区侧的顶底板与采空区后方岩体的 换热边界,边界上垂直y轴方向热通量几乎为0,可视 为绝热边界。此外,在初始时刻,围岩温度为原始岩 温。因此,可确定温度场初始条件与各边界条件的数 学表达式如下:

$$\begin{cases} T_{\tau=0} = T_{gu} \\ T |_{\Gamma_{1}} = T_{gu} \\ \lambda_{n} \frac{\partial T}{\partial y} |_{\Gamma_{2}} = \alpha \left( T |_{\Gamma_{2}} - T_{f} \right) \\ \lambda_{n} \frac{\partial T}{\partial y} |_{\Gamma_{3}} = \alpha \left( T |_{\Gamma_{3}} - T_{f} \right) \\ \lambda_{n} \frac{\partial T}{\partial x} |_{\Gamma_{4}} = \alpha \left( T |_{\Gamma_{4}} - T_{f} \right) \\ \lambda_{n} \frac{\partial T}{\partial y} |_{\Gamma_{5},\Gamma_{6}} = 0 \end{cases}$$

$$(2)$$

式中: $T_{gu}$ 为围岩原始岩温,  $\mathbb{C}$ ; $T_{f}$ 为选取作业截面处 风流平均温度,  $\mathbb{C}$ ;  $\alpha$  为围岩与风流间对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot \mathbb{C})$ 。

式 (1) 和式 (2) 联立构成了完整的采煤工作面二 维围岩温度场非稳态数学模型。

#### 2 有限体积法离散

#### 2.1 网格划分

如图 2 所示,以三角形为基本单元,对采煤工作 面围岩温度场解算区域进行网格划分<sup>[27-28]</sup>。网格疏 密程度需根据解算区域内围岩温度变化情况而定。 在温度变化剧烈区域需对网格进行加密处理,而在温 度变化平缓的区域网格划分则应相对稀疏。因此采 用等比划分的方式,加大顶底板以及煤壁周边围岩区 域的单元密度,以提高计算结果精度和程序运行速度。



Fig.2 Grid division diagram

2.2 方程离散

有限体积法的基本思想是通过对控制体积的积 分来实现对方程的离散<sup>[18, 29]</sup>。

首先利用格林公式可将式(1)化简为

$$\oint_{C} \left[ \lambda_n \frac{\partial T}{\partial x} dy - \lambda_n \frac{\partial T}{\partial y} dx \right] - \iint_{D} \rho_n c_n \frac{\partial T}{\partial \tau} dx dy = 0 \quad (3)$$

式中:C为积分区域边界。

任取图 2 中一内部节点 m 进行分析, 如图 3 所示, 节点 m 共有 6 个相关单元, 组成了多边形区域 abcdef。 图中各虚线分别为过各相关单元重心且平行于节点 m 对边的直线。虚线围成的多边形区域 ABCDEF 即 为 m 的节点控制区域。



图 5 內即印息空前区域 Fig.3 Internal node control area

因此,可建立节点 m 在其节点控制区域内的热平 衡方程,且热平衡方程可分解为 6 项之和,每一项对 应各个子控制区域的贡献。

$$\sum_{e=1}^{6} Q_{m}^{e} = \sum_{e=1}^{6} \left[ \lambda_{n} \frac{\partial T_{(e)m}}{\partial x} \Delta y_{(e)m} - \lambda_{n} \frac{\partial T_{(e)m}}{\partial y} \Delta x_{(e)m} - \rho_{n} c_{n} \frac{\partial T_{(e)m}}{\partial \tau} S_{(e)m} \right] = 0$$
(4)

式中:  $Q_m^e$ 为第 e 个子控制区域对节点 m 热平衡方程 的贡献;  $\Delta x_{(e)m}$ 、 $\Delta y_{(e)m}$ 分别为节点 m 第 e 个子控制区 域对应边界在 x、y 方向上的投影长度, m;  $T_{(e)m}$ 为第 e个子控制区域内温度的平均值,  $\mathbb{C}$ ;  $S_{(e)m}$  为第 e 个子控 制区域的面积,  $m^2$ 。

在任一内部三角形单元 ijm 中,已知节点坐标分 别为  $(x_i, y_i)$ 、 $(x_j, y_j)$ 、 $(x_m, y_m)$ ,节点温度分别为  $T_i$ 、 $T_j$ 、  $T_m$ ,三角形面积为 S,则可引入三角形单元中关于温度 的线性插值函数为

$$T = \frac{1}{2S} \left[ (a_i + b_i x + c_i y) T_i + (a_j + b_j x + c_j y) T_j + (a_m + b_m x + c_m y) T_m \right]$$
(5)

其中,

$$a_{i} = x_{j}y_{m} - x_{m}y_{j}, b_{i} = y_{j} - y_{m}, c_{i} = x_{m} - x_{j}$$
  

$$a_{j} = x_{m}y_{i} - x_{i}y_{m}, b_{j} = y_{m} - y_{i}, c_{j} = x_{i} - x_{m}$$
  

$$a_{m} = x_{i}y_{j} - x_{j}y_{i}, b_{m} = y_{i} - y_{j}, c_{m} = x_{j} - x_{i};$$
  

$$S = (b_{i}c_{j} - b_{j}c_{i})/2$$

将式 (5) 代入式 (4) 中, 可得到三角形单元 *ijm* 对 其 3 个顶点 *i*、*j*、*m* 的热平衡方程, 写成矩阵的形式可 表示为

$$\begin{bmatrix} Q_i \\ Q_j \\ Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ k_{ji} & k_{jj} & k_{jm} \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ii} & n_{ij} & n_{im} \\ n_{ji} & n_{jj} & n_{jm} \\ n_{mi} & n_{mj} & n_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \\ \frac{\partial T_j}{\partial \tau} \\ \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \end{bmatrix}$$
(6)

其中,

$$\begin{aligned} k_{pp} &= -\frac{\lambda_n}{3S} \left( b_p^2 + c_p^2 \right); k_{pq} = k_{qp} = -\frac{\lambda_n}{3S} \left( b_p b_q + c_q c_p \right); \\ n_{pp} &= -\frac{20S}{81} \rho_n c_n; n_{pq} = n_{qp} = -\frac{8S}{81} \rho_n c_n; \\ (p,q=i,j,m,p \neq q) \end{aligned}$$

同理,可计算得到边界三角形单元对其所关联边 界节点的贡献。采用矩阵的形式表示为

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ii} & u_{ij} \\ u_{ji} & u_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix}$$
(7)

其中,

$$u_{ii} = u_{jj} = \frac{4}{9} \alpha S_{\rm b}; u_{ij} = u_{ji} = \frac{2}{9} \alpha S_{\rm b}; v_i = v_j = -\frac{2}{3} \alpha S_{\rm b} T_{\rm f}$$

式中:S<sub>b</sub>为边界三角形单元对应边界上的投影长度,m。

在计算区域内进行搜索,将所有三角形单元在同 一节点上的贡献进行叠加,以合成该节点处热平衡方 程的整体形式,建立以温度为未知量的节点线性方程。 然后对计算区域内每个节点都做相同的处理,最终建 立由所有节点线性方程联立组成的线性方程组,采用 高斯消元法对方程组进行求解<sup>[30]</sup>,即可得到不同时刻 围岩温度场变化规律。

#### 3 循环推进算法

通过前文的计算可得到选定作业截面上围岩温 度场在围岩冷却阶段随时间的演化规律。之后在割 煤进刀阶段,采煤机开始进行下一次割煤进刀过程, 此时作业截面会沿采煤方向推进一个截深的距离 L, 整个计算区域内所有网格节点也会相应的平移一个 截深的距离 L。围岩温度场网格节点的平移示意,如 图 4 所示。



Fig.4 Translation diagram of grid nodes

随着网格的移动,各节点温度也发生改变。要计 算节点平移后的温度变化,就首先需要确定节点平移 后在原网格区域内所处位置。以单个节点 P<sub>1</sub>为例, 具体介绍如何实现这一过程,假定其平移后节点为 P<sub>2</sub>, 与点 P<sub>1</sub>相比, P<sub>2</sub> 纵坐标保持不变,横坐标增加 L。

首先判断节点平移后所处的放射线区间。如图 5 所示,将平移后的节点设为 *i*,选取计算区域内任意一 条放射线,设其与最内层分界线和最外层分界线的交 点分别为 *j*、m,由此获得以 *i*、*j*、m 为顶点的三角形区 域。利用式 (5)中的三角形面积公式可计算得到三角 形 *ijm* 面积 *S*。若 *S* 为负值,如图 5a 所示,则说明此 时 *i*、*j*、m 三点的顺序为顺时针方向,*P*<sub>2</sub> 超过所选取的 放射线;若 *S* 为正值,如图 5b 所示,则 3 点顺序为逆 时针方向,此时 *P*<sub>2</sub> 并未超过此条放射线,由此可确定 *P*<sub>2</sub> 所处放射线区间。

然后判断节点平移后所处层区间。如图 6 所示, 同样的将平移后的节点设为 *i*,选取计算区域内任意 一条层分界线,设层分界线与 *i* 所处放射线区间的交 点分别为 *j*、m。判断三角形 *ijm* 面积 *S* 的正负,若 *S* 为负值,如图 6a 所示,则 *i*、*j*、m 三点顺序为顺时针方 向,此时 *P*<sub>2</sub> 超过所选取的层分界线;若 *S* 为正值,如 图 6b 所示,则 3 点的顺序为逆时针方向,此时 *P*<sub>2</sub>并 未超过此条层分界线,由此可确定 *P*,所处层区间。



图 5 节点平移后所处的放射线区间





图 6 节点平移后所处层区间的确定

Fig.6 Determination of layer interval of nodes after translation

通过以上2个步骤,可判断出平移后节点P<sub>2</sub>所 处矩形单元。

最后判断节点平移后所处三角形单元。如图 7 所示,每个矩形单元均可划分为 2 个三角形单元,仍 将平移后的节点设为 *i*,并将矩形单元的右下顶点和 左上顶点分别设为 *j*、*m*。判断三角形 *ijm* 面积 *S* 的正 负,若 *S* 为负值,如图 7a 所示,则 *i*、*j*、*m* 三点的顺序 为顺时针方向,此时 P<sub>2</sub>位于右上三角形单元;若 S 为 正值,如图 7b 所示,则 3 点的顺序为逆时针方向,此 时 P<sub>2</sub>位于左下三角形单元。





Fig.7 Determination of triangular element after node translation

如图 8 所示,通过上述过程,最终可确定节点平移后所处三角形单元 *ABC*,其 3 个顶点温度分别为 *T<sub>A</sub>*、 *T<sub>B</sub>*、 *T<sub>C</sub>*。





根据式(8)即可计算得到平移后节点P2的温度为

 $T_{p_2} = (S_2/S_0)T_A + (S_3/S_0)T_B + (S_1/S_0)T_C \qquad (8)$ 

式中:  $S_0$  为三角形 *ABC* 的面积,  $m^2$ ;  $S_1$  为三角形 *ABP*<sub>2</sub> 的面积,  $m^2$ ;  $S_2$  为三角形 *BCP*<sub>2</sub> 的面积,  $m^2$ ;  $S_3$  为三角 形 *ACP*<sub>2</sub> 的面积,  $m^2$ 。

最后对所有节点均重复上述操作,即可计算得到 割煤进刀后围岩温度场分布规律。

#### 4 程序设计

基于 Visual Studio 编程平台设计编制了循环推进条件下采煤工作面围岩温度场解算程序,程序结构



Fig.9 Flowchart of program structure

流程图如图9所示。

#### 5 工程实例分析

羊场湾煤矿位于宁夏回族自治区灵武市,矿井年 产量1200万t,是宁东能源化工基地主力生产矿井之 一。随着开采向深部延伸,矿井各采煤工作面高温热 害问题日益凸显。在此,选取羊场湾煤矿13采区 130208采煤工作面为研究对象,开展高温采煤工作面 围岩温度场数值模拟研究,模拟所需工作面基础参数 及围岩热物性参数分别见表1、表2。

#### 5.1 模型验证

为了验证模型的正确性,如图 10 所示,以 50 m 为间距在 130208 采煤工作面布置了 5 个测点,持续 观测了一个完整的割煤循环周期内 (4 h) 各测点处风 流温度和煤壁温度的变化情况,测温仪器分别采用干 湿球测温计和矿用红外测温仪。以 1 号测点为例,表 3 展示了部分测温数据。考虑到在不同作业截面处风 流温度的差异对煤壁温度的影响,先通过式 (9) 将不 同时刻煤壁温度实测和模拟数据 T<sub>w</sub>转换为无因次煤

表1 工作面基础参数									
Table 1   Basic parameters of the working face									
参数	控顶距/m	采高/m	长度/m	原始岩温/℃	对流换热系数/(W・m <sup>-2</sup> ・℃ <sup>-1</sup> )	每刀进尺时间/h	每刀进尺长度/m	风流平均温度/℃	
取值	5.9	3.8	200	34	19.8	4	0.865	23.6	
来源	实测	实测	实测	实测	文献[31]	规程	规程	实测	

#### 表 2 工作面煤系地层岩石热物性参数

Table 2 Thermal property parameters of coal measures rock at face

		导热系数/	密度/	比热/	
岩性	半均厚度/m	$(\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot {}^{\circ}\!\mathbf{C}^{-1})$	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$(\mathbf{J} \cdot \mathbf{kg}^{-1} \cdot \mathbf{C}^{-1})$	
细砂岩	14.9	2.64	2 358.3	985.33	
煤	8.3	0.67	1 337.1	1 026.67	
细砂岩	5.2	2.64	2 358.3	985.33	
粉砂岩	4.4	2.81	2 287.6	1 024.02	

壁过余温度 θ<sub>w</sub>, 再将各测点实测数据与模拟结果进行 比较。

$$\theta_{\rm w} = \frac{T_{\rm w} - T_{\rm f}}{T_{\rm gu} - T_{\rm f}} \tag{9}$$

式中:  $T_w$ 为煤壁或围岩壁面温度,  $\mathbb{C}$ ;  $\theta_w$ 为无因次煤 壁过余温度。

图 11 展示了各测点处无因次煤壁过余温度实测 数据和模拟结果的比较。结果表明,模拟结果和现场 观测数据变化趋势基本一致。为了更清楚的反映模 型精度,图12分析了5个测点处无因次煤壁过余温

measured data



图 10 测点布置示意

Fig.10 Schematic diagram of measurement point arrangement 度平均值与模拟结果间的相对误差。可以发现,在初 始时刻,模型偏差相对较大,这与通风早期煤壁温度 的剧烈下降有关,同时采煤机割煤过程中持续的喷雾 作业也进一步增大了初始时刻的测温误差;随着通风 时间的延长,煤壁温度变化逐渐趋于平缓,此时模型

Table 3 No.1 measuring point field observation data 时间/h 0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 风流温度*T*<sub>€</sub>/℃ 22.3 22.3 22.4 22.3 22.5 22.5 22.3 22.6 22.4 22.6 22.6 22.7 煤壁温度 $T_w/\mathbb{C}$ 30.1 29.4 28.3 27.6 27.3 26.9 26.2 25.6 25.3 24.9 24.7 24.5 1.0 1号测点 0.9 12 2号测点 10.52 0.8 3号测点 4号测点 10 无因次煤壁过余温 0.7 5号测点 0.6 模拟结果 相对误差/% 8 0.5 7.01 6.45 0.4 6 5.5 0.3 0.2 4 4.16 0.1 3 0 1 2 4 2 时间/h 0 1 2 3 4 时间/h 图 11 模拟结果与实测数据对比 Fig.11 Comparison between simulation results and 图 12 相对误差分析

表3 1 号测点现场观测数据

Fig.12 Relative error analysis

415

报

(10)

误差也相对较小;在各个时刻模型相对误差的平均值 为 6.15%。考虑到采煤工作面现场测试条件的复杂性 及偶然误差,此误差在可接受范围内,这在一定程度 上验证了本文中建立的围岩温度场数学模型的准 确性。

#### 5.2 进刀过程中围岩温度场变化规律

为了获得更准确的模拟结果,连续模拟了 10次 循环进尺条件下围岩温度场的变化情况,并展示了第 10次进刀过程中不同时刻的围岩温度分布结果。如 图 13 所示,在初始时刻,割煤进刀作业完成,工作面 向前推进了一个截深的距离,此时新的煤壁及围岩顶 底板生成,壁面温度趋近于原始岩温。在其后方,先 前形成的顶底板已经与风流持续换热数小时,围岩内 部初步冷却形成冷却圈。随着通风时间的延长,新生 成的煤壁和顶底板也逐渐开始冷却,在通风 0.2 h 后, 煤壁平均温度降低至 30.1 ℃,在通风时间 4 h 后,煤 壁平均温度降低至 25.8 ℃,已经基本冷却。在现有的 一些计算采煤工作面围岩散热的经验式中,通风时间 往往是一个十分重要的参数,但正如上述分析可知, 采煤工作面不同区域围岩通风冷却时间与冷却程度 有着显著差异,传统经验式取工作面平均通风时间来 计算围岩散热的方法显然是不够准确的<sup>[32-33]</sup>。此外, 130208采煤工作面为放顶煤工作面,其顶板位于煤层 中,煤的导热系数比岩石要小得多,因此顶底板围岩 温度分布并不对称,导热系数更小的顶板冷却速率更 快,围岩温度也更低。

#### 5.3 围岩与风流间不稳定换热系数

根据传热学原理, 当原始岩温和空气温度变化, 而其他所有因素一定时, 围岩壁面过余温度 *T*w<sup>-</sup>*T*f</sub>与 原始岩石过余温度 *T*gu<sup>-</sup>*T*f</sub>在任何时间都存在一个正 比关系, 但其比例系数会随着时间变化, 这一比例系 数即为围岩与风流间不稳定换热系数, 它是指当围岩 与风流间温差为 1 ℃ 时, 单位时间内单位面积围岩壁 面向风流释放或吸收的热量<sup>[10]</sup>, 与围岩热物性参数、 工作面尺寸、通风时间等影响因素有关, 被广泛的应 用在井下围岩散热计算中<sup>[32,34]</sup>, 其值可由式 (10) 确定。

 $K_{\rm \tau} = \alpha \frac{T_{\rm w} - T_{\rm f}}{T_{\rm gu} - T_{\rm f}}$ 



图 13 不同时刻围岩温度分布云图



式中: $K_{\tau}$ 为围岩与风流间不稳定换热系数, $W/(m^2 \cdot \mathbb{C})_{\circ}$ 

实际计算中, 需利用围岩壁面平均温度 $\overline{T_w}$ 来计 算 $K_r$ , 已知工作面截面上围岩壁面周长为U且被划分 为n段, 壁面上各节点温度用 $T_i$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ )表示, 每段长度为 $U_i$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 则围岩壁面平均温度可 由式(11)计算。

$$\overline{T_{w}} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{T_{i} + T_{i+1}}{2} \frac{U_{i} + U_{i+1}}{2U}$$
(11)

分别计算在若干连续割煤循环中采煤工作面顶、 底板围岩以及新暴露煤壁在不同时刻围岩与风流间 不稳定换热系数,结果如图 14 所示。





由图 14 知,随着连续割煤作业的循环进行,采煤 工作面各区域围岩与风流间不稳定换热系数的值呈 现周期性变化。每一次进刀循环开始,新生成的高温 顶底板与煤壁暴露在空气中,此时不稳定换热系数 处于峰值。此后随着通风时间的增加,工作面各区域 不稳定换热系数均呈现不同幅度的降低。其中煤 壁的不稳定换热系数变化最为剧烈,由初始时刻的 19.8 W/(m<sup>2</sup>・℃)在4h内快速降低到 5.0 W/(m<sup>2</sup>・℃) 以下。顶底板处不稳定换热系数变化趋势一致,均较 为平缓,但底板围岩散热强度显著高于顶板,这与工 作面顶底板围岩散热时,需充分考虑工作面所处煤 系地层煤岩体热物性参数的非均质性,分区域计算工 作面内不同位置处围岩散热强度。

#### 5.4 围岩累计散热量

根据牛顿冷却公式,围岩累计散热量可由式(12) 计算:

$$Q = \sum K_{\tau} U L \left( T_{gu} - T_{f} \right) \Delta \tau$$
 (12)

式中: Q为围岩散热量, J; L为工作面长度, m; Δτ为围

岩散热时间,s。

图 15 展示了连续进刀割煤循环过程中围岩累计 散热量的变化规律。随着时间的延长,围岩累计散热 量迅速增加,且呈现明显的周期性特征。在一个割煤 循环周期内,围岩累计散热量随时间的增长趋势逐渐 放缓,这与围岩散热强度的下降有关。将本研究与已 有的一些采煤面围岩散热计算方法进行了比较,其中 方法1将采煤机割煤作业简化为连续匀速过程,基于 移动坐标系建立了稳态条件下的采煤工作面围岩散 热模型[35];方法2的计算结果则来自于传统的拟合经 验式[33]。对比结果表明,在最初的一段时间里,3种计 算方法得到的围岩累计散热量是比较接近的,但由于 忽略了割煤循环过程中围岩散热能力随时间的改变, 方法1与方法2计算得到的围岩累计散热量均随时 间趋于线性增长,而在一定程度上高估了围岩的散热 能力。通过上述对比分析也进一步佐证了本文中提 出的循环推进算法更加符合实际采煤过程,显著提高 了采煤工作面围岩散热的计算精度。





#### 5.5 进刀速度对围岩散热的影响

在截深取固定值时,进刀速度可由进刀时间表示。 进刀时间越长,平均进刀速度越慢;反之,平均进刀速 度越快。在截深为 0.865 m,进刀时间分别为 1、2、3、 4 h 时,计算得到了采煤工作面内平均不稳定换热系 数及围岩散热各参数的变化情况,如图 16、图 17 所示。

由图 16 知,随着进刀速度的增大,采煤工作面平 均不稳定换热系数波动周期逐渐减小,围岩散热强度 峰值略有上升,变化并不显著,但散热强度的谷值明 显升高。如图 17 所示,通过拟合可以发现,围岩散热 强度峰值和谷值均随进刀速度变化而线性增大,但进 刀速度的改变对散热强度谷值的影响要大得多。这 是因为当割煤进刀速度加快时,采煤工作面内新暴露 围岩冷却时间会相应的缩短,围岩无法得到充分冷却,

煤 10 平均不稳定换热系数/(W・m-<sup>-</sup>- •C<sup>-1</sup>) 9 8 7 6 5 0 2 3 4 5 6 7 8 时间/h 1 h 2 h -• 3 h ----- 4 h

炭

学











因此其平均散热强度也更大。围岩总散热量则随进 刀速度的加快呈现抛物线趋势变化,增长速率逐渐减 缓。因此,在地热严重的采煤工作面可以适当减缓进 刀速度,以在一定程度上缓解高温状况。

#### 5.6 进刀截深对围岩散热的影响

当进刀时间取4h,采煤机截深分别取0.6、0.8、1.0和1.2m,其余条件不变时,截深的改变对围岩散 热各参数的影响如图18、图19所示。

由图 18、图 19 可知,在一个进刀循环中,随着采 煤机进刀截深的增加,采煤工作面内围岩与风流间平 均不稳定换热系数逐渐增大,围岩散热强度的峰值与 谷值均呈线性趋势增加,且进刀截深的改变对散热强 度峰值的影响更为显著。这是因为采煤机截深越大, 割煤时新暴露出来的高温顶底板岩壁的面积就越大, 单位时间内围岩散热总量也随之呈线性趋势升高。 在进刀截深为 0.6 m 时,围岩散热量为 226.6×10<sup>6</sup> J,而 当进刀截深为 1.2 m 时,围岩散热量增加至 248.8× 10<sup>6</sup> J,因此,在热害显著的高温采面,可以选择截深更 浅的采煤机刀头以减少围岩散热。



图 18 进刀截深对平均不稳定换热系数的影响

Fig.18 Influence of cut-off depth on the average unsteady heat transfer coefficient



#### 6 结 论

1) 建立了采煤工作面二维围岩温度场非稳态数 学模型, 并基于有限体积法进行了离散。提出了利用 坐标间断移动来模拟采煤工作面实际割煤进刀过程 的循环推进算法, 相较于传统计算方法显著提高了围 岩散热计算精度。

2) 在连续循环割煤过程中, 围岩温度场及其散热 强度呈现周期性变化特征。在一个循环周期内, 各区 域围岩散热强度在进刀循环开始时处于峰值, 随后不 稳定换热系数的值快速下降, 且下降趋势逐渐放缓。 传统的拟合经验式忽略了割煤循环过程中围岩散热 强度随时间的改变, 高估了围岩散热能力。

3) 随着进刀速度的加快和进刀截深的增加, 围岩 散热强度的峰值和谷值均线性增长。围岩总散热量 随进刀速度的加快呈抛物线趋势增长, 增长趋势逐渐 减缓, 随着进刀截深的增加线性增长。在热害严重的 采煤工作面, 适当减缓进刀速度或采用截深更浅的采 煤机刀头可有效减少围岩散热。

#### 参考文献(References):

[1] 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.

[2] 何满潮,郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策[J]. 岩石力学与 工程学报, 2013, 32(12): 2377-2393.

HE Manchao, GUO Pingye. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2377–2393.

 [3] 许献磊,马正,陈令洲.煤矿地质灾害隐患透明化探测技术进展与 思考[J].绿色矿山,2023,1(1):56-69.
 XU Xianlei, MA Zheng, CHEN Lingzhou. Progress and thinking of

transparent detection technology for hidden geological hazards in coal mines[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 56–69.

[4] 贾海林,项海军,郭明生,等. 深热井巷热害隔离材料复配体系及性 能研究[J]. 材料导报, 2022, 36(20): 156-165.

JIA Hailin, XIANG Haijun, GUO Mingsheng, et al. Study on combined system and performance of the thermal insulation material applying to high temperature strata tunnel in deep coalmine[J]. Materials Review, 2022, 36(20): 156–165.

- [5] 邹声华,李孔清,张登春,等. 掘进巷道隔热分流排热降温技术的理论与实践研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 99-102. ZOU Shenghua, LI Kongqing, ZHANG Dengchun, et al. On the airpartition for cooling with the heatinsulated plate[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(2): 99-102.
- [6] 武强,刘宏磊,曾一凡,等. 我国绿色矿山建设现状与存在问题及对 策建议[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 25-32.
  WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 25-32.
- [7] 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.
- [8] 张波,薛攀源,刘浪,等. 深部充填矿井的矿床-地热协同开采方法 探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2824-2837.
   ZHANG Bo, XUE Panyuan, LIU Lang, et al. Exploration on the method of ore deposit-geothermal energy synergetic mining in deep backfill mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2824-2837.
- [9] 聂兴信,王廷宇,孙锋刚,等.高温矿井热湿环境对人体机能的影响
   [J].金属矿山,2020(4):186-193.

NIE Xingxin, WANG Tingyu, SUN Fenggang, et al. Influence of heat and humidity environment on function of human body in high temperature mine[J]. Metal Mine, 2020(4): 186–193.

[10] 刘伟,梁书菲,黄庆威,等. 周期性风温下矿井巷道围岩换热教学 实验装置研制[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(7): 28-34. LIU Wei, LIANG Shufei, HUANG Qingwei, et al. Development of teaching experimental device for heat exchange in surrounding rock of mine roadway under periodic wind temperature[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(7): 28-34.

- [11] 舍尔巴尼. 矿井降温指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.
- [12] YAKOVENKO A K, AVERIN G V. Determination of the heattransfer coefficient for a rock mass with small Fourier numbers[J]. Soviet Mining Science, 1984, 20(1): 52–56.
- [13] 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(S2): 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.
- [14] 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]. 阜新矿业学院学报, 1987, 6(3): 105-114.
   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 (Natural Science), 1987, 6(3): 105-114.
- [15] 高建良,徐文,张学博. 围岩散热风流温度、湿度计算时水分蒸发的处理[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 951-955. GAO Jianliang, XU Wen, ZHANG Xuebo. Treatment of water evaporation during calculation of temperature and humidity of airflow caused by heat release from surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 951-955.
- [16] 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): 2595-2601.
  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): 2595-2601.
- [17] 杜翠凤,边梦龙,何少博,等. 基于稳态导热的矿井调热圈半径与 温度的计算方法[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(1): 28-33.
  DU Cuifeng, BIAN Menglong, HE Shaobo, et al. Formulas of radius and temperature for heat-regulating circle based on steady heat conduction[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(1): 28-33.
- [18] 宋东平,周西华,白刚,等. 高温矿井主动隔热巷道围岩温度场分 布规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 107-113. SONG Dongping, ZHOU Xihua, BAI Gang, et al. Study on temperature field distribution law of surrounding rock in active thermal insulated roadway of high temperature mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 107-113.
- [19] 朱帅, 吴世跃, 朱世昕. 巷道围岩调热圈厚度分析及实测[J]. 煤炭 技术, 2017, 36(5): 142-145.
  ZHU Shuai, WU Shiyue, ZHU Shixin. Analysis and actual measurement on temperature distribution of heat adjustment circle of wall rock in roadway[J]. Coal Technology, 2017, 36(5): 142-145.
  [20] 易欣, 王振平, 宋先明, 等. 矿井季节性热害治理技术探讨[J]. 工业

安全与环保, 2015, 41(8): 63-66. YI Xin, WANG Zhenping, SONG Xianming, et al. Study on governance technology of seasonal heat hazard in the mine[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(8): 63-66.

 [21] 李文福, 宋战宏, 张红卫, 等. 一级热害区回采工作面移动风冷降 温技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(5): 93-97.
 LI Wenfu, SONG Zhanhong, ZHANG Hongwei, et al. Moving refrigeration and cooling technology for coal mining face at the first level heat damage area[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(5): 93-97.

 [22] 刘琪,苏伟,张瑞瑛,等. 深部矿井煤炭-地热协同开采系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 87-94.
 LIU Qi, SU Wei, ZHANG Ruiying, et al. Research on coal-geo-

thermal collaborative exploration system in deep mines[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 87–94.

- [23] 王长彬. 高家堡煤矿热源分析与首采工作面风温预测研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(11): 210-212.
   WANG Changbin. Heat analysis and initial mining surface air temperature prediction research on gaojiapu coal mine[J]. Coal Techno-
- logy, 2016, 35(11): 210-212.
  [24] 秦跃平, 宋怀涛, 吴建松, 等. 周期性边界下围岩温度场有限体积 法分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1541-1549.
  QIN Yueping, SONG Huaitao, WU Jiansong, et al. Numerical analysis of temperature field of surrounding rock under periodic boundary using Finite Volume Method[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1541-1549.
- [25] KANG F C, LI Y C, TANG C A. Numerical study on airflow temperature field in a high-temperature tunnel with insulation layer[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115654.
- [26] LIU W, QIN Y P. Multi-physics coupling model of coal spontaneous combustion in longwall gob area based on moving coordinates[J]. Fuel, 2017, 188: 553–566.
- [27] SONG H T, CHEN Q L. Dimensionless analysis of soil temperature field of shallow subway tunnel[J]. Energy and Buildings, 2022, 259: 111900.
- [28] 孔松, 吴建松, 郭伟旗, 等. 掘进工作面围岩温度场的无因次分析
  [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2016, 35(6): 576-580.
  KONG Song, WU Jiansong, GUO Weiqi, et al. Dimensionless analysis of the temperature field of surrounding rock in heading face[J].
  Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(6): 576-580.
- [29] SONG Y P, QIN Y P, YAN L X, et al. Endothermic relaxation be-

havior of gangue in longwall gob; Bidirectional heat transfer model and its simulation validation[J]. Fuel, 2023, 346; 128349.

- [30] CAI Y B, ZHANG Y L, QI Q J, et al. Optimization of numerical simulation algorithm for spontaneous combustion in goaf *via* a compression storage and solution method of coefficient matrix[J]. Fire, 2022, 5(3): 71.
- [31] 高佳南, 吴奉亮. 巷壁与风流间对流换热系数计算及敏感性分析
  [J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 211-217.
  GAO Jianan, WU Fengliang. Calculation and sensitivity analysis of convective heat transfer coefficient between roadway wall and airflow[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 211-217.
- [32] 吴学慧, 陈凡, 王义江, 等. 建井期间平巷冷风输送系统的冷损失
  [J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2593-2599.
  WU Xuehui, CHEN Fan, WANG Yijiang, et al. Cold ioss of supply chilled air for level roadway drifting during mine construction[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2593-2599.
- [33] 汪杰,毛国勇,陈海琴.采煤工作面降温系统布置方式优化研究
  [J]. 工矿自动化, 2018, 44(12): 43-48.
  WANG Jie, MAO Guoyong, CHEN Haiqin. Research on optimization of layout method of cooling system on coal face[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(12): 43-48.
- [34] 杜翠凤, 杜帅, 王九柱, 等. 高温高湿巷道内不稳定换热系数影响 因素分析及模型建立[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(11): 91-98.

DU Cuifeng, DU Shuai, WANG Jiuzhu, et al. Analysis on influencing factors of unstable heat transfer coefficient in high temperature and high humidity roadway and model establishment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(11): 91–98.

[35] 秦跃平, 党海政, 曲方. 回采工作面围岩散热的无因次分析[J]. 煤炭学报, 1998, 23(1): 62-66.
 QIN Yueping, DANG Haizheng, QU Fang. Dimensionless analysis

on heat dissipation of rock surrounding in coal face[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(1): 62–66.