

高温矿井深部热源分析与降温措施模拟研究 ——以南方某硬岩铀矿井为例

刘啸尘¹, 康昊宸², 千雨杭¹, 张谦¹

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 首都经济贸易大学, 北京 100070)

摘要: 在全球能源需求不断增长的背景下, 各类型矿产资源的开采速度正在加快。然而随着开采深度的增加, 高温热害问题逐渐凸显。高温热害问题不仅影响各类机械设备的正常运行, 还对矿井安全生产构成了严重威胁。笔者以南方某硬岩铀矿井为例, 分析了矿井热害问题的产生原因及影响; 通过数值模拟等方法, 深入研究了该矿井的围岩热物性参数、矿井地温场及深部热环境等, 分析了该矿井目前存在的问题, 并提出降温技术方案。

关键词: 地下铀矿山; 高温矿井; 热源分析; 降温技术; 数值模拟; COMSOL

中图分类号: X936; TD78; TL75+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0076-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.04.19

在铀矿、煤矿及其他类型矿产资源的开采过程中, 随着开采深度的增加, 高温热害问题日益严重, 矿井热环境已成为矿山行业研究的重要内容^[1-2]。中国高温矿井热害来源主要有井巷围岩散热、地下热流、空气自压缩、地面气候、氧化散热、机械设备散热、爆炸散热和人体散热等^[3-4]。

在矿井热害领域, 主要进行了热环境评价与防治技术研究, 深入研究了矿井热环境现状^[5], 建立了模糊综合矿井热环境评价模型^[6]、高温矿井热环境模糊综合评价模型^[7], 以及熵权-BP神经网络模型^[8]。

铀矿山在矿山地质工作、采矿方法和通风防护技术等方面具有特殊要求^[9]。笔者以南方某硬岩铀矿井为研究对象, 通过现场测试、室内试验和数值模拟, 研究高温矿井热害问题, 深入分析其发生机制和影响因素, 旨在为高温矿井安全生产提供科学、合理的建议。

1 南方某硬岩铀矿井概况

南方某硬岩铀矿井位于长江地区, 矿区山峦起伏, 水系发育, 地形切割较深。区内森林茂密,

竹木丛生, 属温暖潮湿的亚热带气候, 夏季最高温度为 38.4 °C, 冬季最低温度为 -6.2 °C。矿体围岩主要为花岗岩、破碎花岗岩、硅化碎裂花岗岩。该矿床岩体见图 1。目前该矿井采用中央进风两翼回风对角式通风方式, 部分区域采用局部通风方式。

1.1 矿井井下热环境

对该矿井开展了井下热环境现场测试, 测试路径及测试结果见图 2。可以看出, 在 -200 m 中段, 矿井开始出现热害问题; 在 -250 m 中段, 热害问题更严重。因此, 本研究将重点分析 -200 m 及 -250 m 中段的热害问题。

1.2 矿井围岩热物性参数

岩石热导率是岩石传热能力的表征, 岩石的类型不同, 其热导率也不同。一般来说, 它主要受岩石矿物组成、孔隙结构、孔隙流体种类, 以及岩石所处周围环境压力、温度等因素的影响^[10-14]。

该矿床的主要岩石类型为花岗岩。为了获得该矿井围岩热物性参数, 在矿井不同深度处取样, 并利用热线法对标本的导热系数进行测量, 结果见图 3。

收稿日期: 2024-04-30

第一作者简介: 刘啸尘(1992—), 男, 北京人, 学士, 工程师, 主要研究方向为矿山通风。

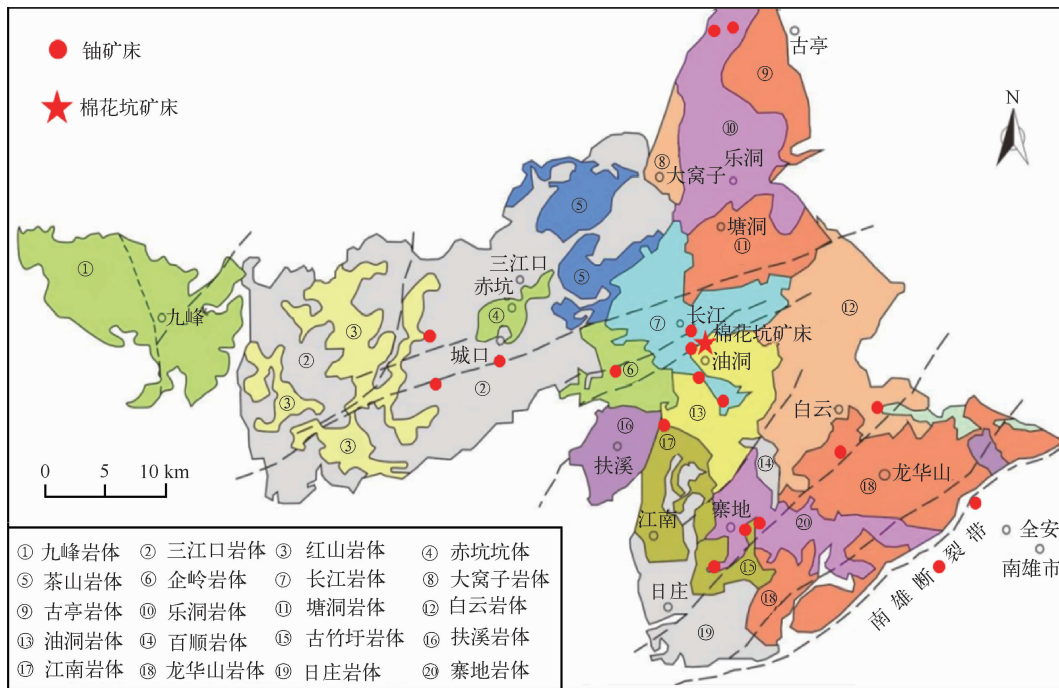


图 1 南方某硬岩铀矿床岩体分布

Fig. 1 Distribution of the rock body of a hard rock uranium deposit in the south of China

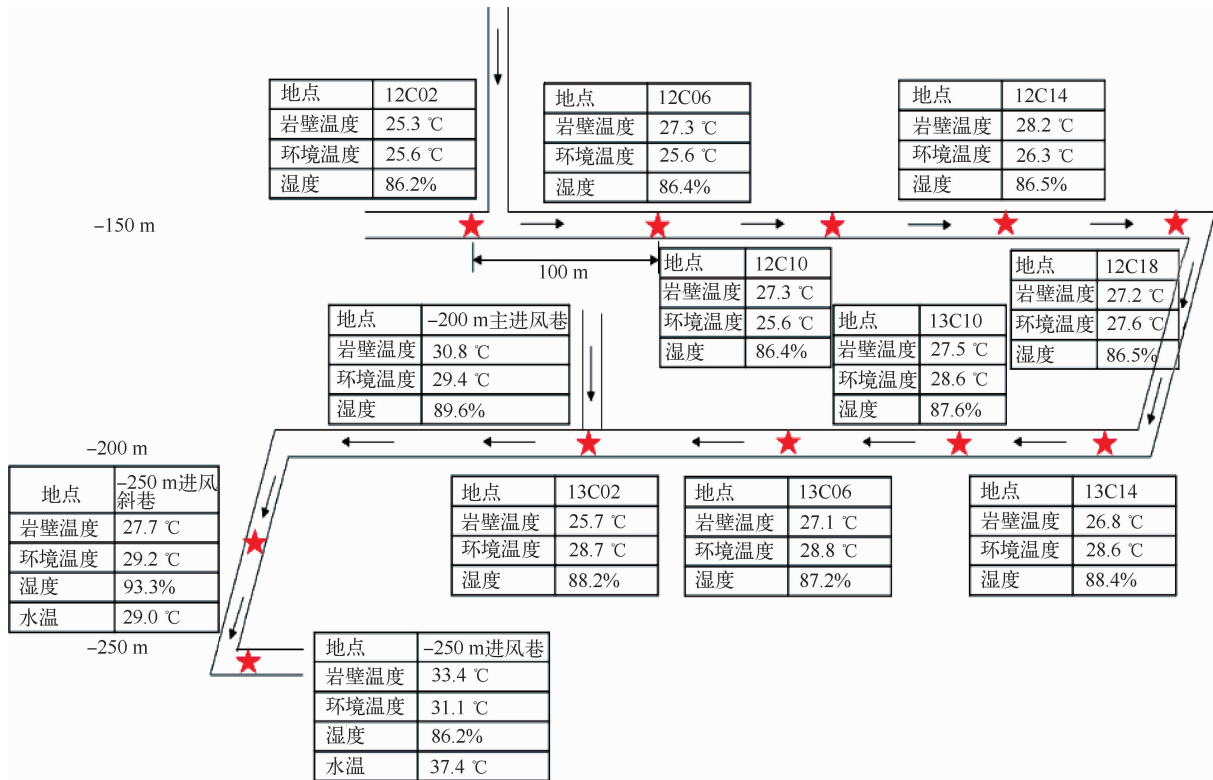


图 2 该矿井井下热环境测试位置及测试结果

Fig. 2 Test locations and results of mine underground thermal environment

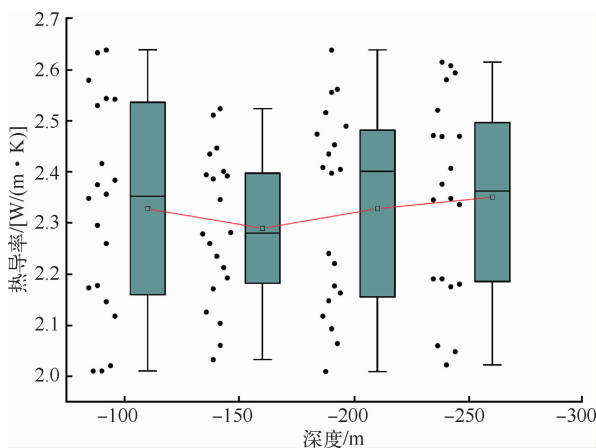


图3 矿井围岩热导率测量结果
Fig. 3 Thermal conductivity of the surrounding rocks of the mine

通过测量不同深度处花岗岩样品的基本物理参数并分析得出,岩样平均密度为 2.83 g/cm^3 ,岩样的平均 P 波波速为 4103 m/s ,岩样的平均孔隙率为 0.43% 。根据花岗岩热导率与孔隙率、含水饱和度和压力的关系^[15],可知花岗岩原岩属于低孔隙率岩石,所以花岗岩热导率随孔隙率的变化并不明显。在原生孔隙或裂隙被水填充后,花岗岩热导率会显著提升。

2 该矿矿井深部热环境分析及降温方案

2.1 该矿矿井热源及散热量分析

为解决矿井高温热害问题,首先需要计算井下围岩散热、机电设备散热、空气压缩热、氧化散热等各种热源的热量,根据散热量确定主要需冷地点(采掘工作面)所需降温冷负荷,进而为矿井降温系统及方案的选择提供决策依据^[16]。

在开采过程中,井下温度受到自然因素和人为因素的影响,其中自然因素在铀矿井作业环境升温中占主导作用^[17]。该矿矿井主要热源由当地大气气温、围岩散热、空气自压缩、井下机电设备散热、围岩运输散热、井下涌水散热等构成。

2.1.1 大气气温

矿井内的空气直接来自地表,地表的大气环境直接影响矿井的热环境,且地表气温随季节呈现周期性变化。地面空气温度的变化规律可用正弦曲线近似表示。对近 2 年该矿矿井入井风流日平均温度进行拟合,结果见图 4。可以看出,该矿井为季节性高温矿井。季节性高温和围岩温度作

为矿井热害的主要影响因素,二者相互调节。主要表现为:夏季气温高于围岩温度,围岩吸热,风温降低;冬季气温低于围岩温度,围岩放热,风温升高^[18]。

根据拟合出的函数图像及函数可得,函数均值为 $21.70 \text{ }^\circ\text{C}$,风温较高。

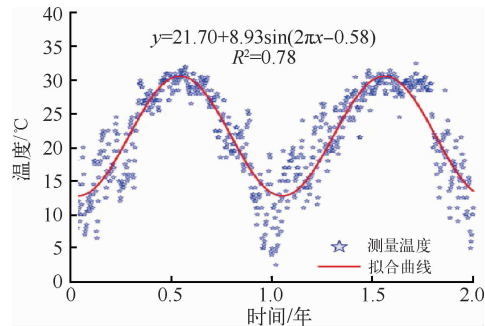


图4 近 2 年该矿矿井入井风流日平均温度变化
Fig. 4 Average daily temperature changes of the inlet air stream of the mine over the past two years

2.1.2 围岩散热

在该矿矿井工作面中, -200 m 水平面的开拓工作从 2020 年开始,通风时间约 3 年; -250 m 水平面的开拓工作从 2021 年初开始,通风时间为 2 年。

巷道围岩不稳定换热系数是指当巷道原始岩温与风流温差为 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 1 m^2 巷道壁面每小时向空气中的散热量。该系数受通风时间、巷道形状等多种因素影响,为了计算简便,通风时间小于 10 年的矿井巷道,不稳定换热系数(K_t)可使用式(1)~式(3)^[19]计算。

$$K_t = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{2aR_0}} \left[\frac{\lambda}{2R_0} + \frac{2\sqrt{\lambda c \gamma / \pi}}{2\sqrt{\tau} \left(1 + \frac{\lambda}{2aR_0}\right)} \right], \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{2S}{U}, \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \frac{\epsilon_m G^{0.8} U^{0.2}}{f}, \quad (3)$$

式中: λ —围岩传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; R_0 —巷道的等效半径, m ; c —围岩的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; γ —围岩密度, kg/m^3 ; S —巷道的净截面面积, m^2 ; U —巷道周长, m ; α —巷道壁面的给热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; G —巷道中的风流质量流, kg/s ; τ —巷道通风时间, s ; ϵ_m —围岩比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$;

f —巷道壁面面积, m^2 。

通过计算可得-200 m水平面的围岩散热量约为66.9 kW, K_1 为0.3; -250 m水平面的围岩散热量约为63.4 kW, K_1 为0.31。

2.1.3 空气自压缩

当可压缩的流体沿着竖向长距离流动时,其自身的压力、温度均会升高,该过程被称作“自压缩”。空气自压缩散热量可用式(4)~式(5)^[20]计算。

$$t_2 = 0.00976t_1(z_1 - z_2)(K), \quad (4)$$

$$Q_a = 0.00976\rho Svc(z_1 - z_2), \quad (5)$$

式中: t_1 、 t_2 —风流在井口、井下的干球温度大小, K; z_1 、 z_2 —风流在井口、井下时的高度坐标, m; c —空气的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ —空气的密度, kg/m^3 ; S —巷道截面积, m^2 ; v —风速, m/s 。

计算可得-200 m水平面散热量约为57.65 kW, -250 m水平面散热量为63.37 kW。另外,当地

的空气并不是完全干燥的,空气在输送过程中会存在着热湿交换,有一定量的水变为水蒸气,该过程会消耗空气中的一部分热量,故现场的实际测量值将低于公式计算结果。

2.1.4 井下机电设备散热

机电设备在工作过程中,通常情况下所消耗的电能仅有一部分做有用功,其余部分转化为热能散发到周围介质中。井下机电设备散热计算式为^{[20]106}

$$Q_d = \sum \varphi N_d, \quad (6)$$

式中: Q_d —井下机电设备对风流的散热量, kW; φ —机电设备散热量折算系数,取0.2; N_d —井下同时使用的机电设备总额定功率, kW。

井下机电设备主要包含凿岩台车、铲运机、除尘风机、局部通风机和照明系统,散热量见表1。可以看出,所有设备总散热量约为130.4 kW。

表1 机电设备散热量

Table 1 Heat dissipation of electromechanical equipment

| 名称 | 型号 | 数量 | 功率/kW | 开工率/% | 散热效率/% | 热量/kW |
|-------|------------|----|-------|-------|--------|----------|
| 凿岩台车 | EBZ200 | 1 | 325 | 58.3 | 20 | 37.9 |
| 铲运机 | WJD3 | 1 | 90 | 58.3 | 20 | 10.5 |
| 除尘风机 | KCS-230D | 2 | 30 | 100 | 20 | 6.0 |
| 局部通风机 | FBDNo. 6.0 | 2 | 75 | 100 | 20 | 15.0 |
| 照明系统 | | | 200 | 100 | 20 | 40.0 |
| 总散热量 | | | | | | 130.4 kW |

2.1.5 围岩运输散热

围岩从工作面开采出来,温度接近原始岩温,在被运输至地面过程中由于温差作用向空气散热。该过程本质上是另一种围岩散热,运输的围岩对风流加热,其散热量计算公式为^{[20]106}

$$Q_k = 0.0024m_k cL^{0.8}(t_s - t_{fm}), \quad (7)$$

式中: Q_k —井下围岩运输过程中的散热量, kW; m_k —井下运输的围岩量, kg/s ; c —围岩的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; L —围岩在运输过程中的巷道长度, m; t_s —对应采面的原始岩温, K; t_{fm} —对应水平面风流平均湿球温度, K。

工作面送出的围岩量约为2 000 t/d,运输路径约为800 m。第一时间挖下来的围岩温度约为37 °C,相对应的风流温度约为30 °C,由

计算可得围岩运输过程中的散热量约为60.89 kW。

2.1.6 井下涌水散热

井下涌水量受地表补给水影响,地表水经岩体加热后涌入作业空间,导致环境温度升高^{[19]145}。根据流体的传热特性,已知矿井涌水在涌出时的水温、水量以及矿井涌水在离开相应巷道的水温,便可通过式(8)计算矿井涌水在巷道中输送时对空气的散热量。

$$Q_w = m_w c(t_{w1} - t_{w2}), \quad (8)$$

式中: Q_w —高温矿井涌水在井下的散热量, kW; m_w —矿井涌水的水量, kg/s ; c —矿井涌水的比热容,取4.18 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t_{w1} —矿井涌水涌出时的水温, K; t_{w2} —矿井涌水排出巷道时的水温, K。

计算可得, -200 m 水平面的涌水散热量为 353.97 kW, -250 m 水平面的涌水散热量为 529.76 kW。

2.1.7 井下人员散热

工人在井下操纵各种机械设备的过程中, 不断向周围环境散热。散热量的大小取决于工人数量、劳动强度以及该强度下连续工作时间, 可由式(9)得出。在休息时, 散热量为 0.09~0.12 kW/人; 在轻度劳动时, 散热量为 0.20 kW/人; 在中等劳动时, 散热量为 0.275 kW/人; 在重体力劳动时, 散热量为 0.47 kW/人(短时间)。

$$Q_i = n_i R_i \quad (9)$$

式中: Q_i —井下工作人员散热量, kW; R_i —井下工作人员人体散热系数, kW/人; n_i —井下工作人员的数量, 人。

作业人员的工种不同, 工作的劳动强度也不同, 本研究将所有的作业人员每日均按照进行重体力劳动强度作业统一处理。每班共有 30 人, 故所有人员散热量为 14.10 kW。

2.1.8 总散热量

综上, 由于大气气温作为入口风温已经被考虑在内, 无需考虑对总热负荷的贡献率, 可得 -200 m 及 -250 m 水平各散热途径对总热负荷的贡献率, 结果见表 2。

表 2 不同散热途径散热量及对总热负荷的贡献率

Table 2 Heat dissipation by different pathways and the contribution to the total heat load

| 散热种类 | -200 m 水平面 | | -250 m 水平面 | |
|----------|------------|-------|------------|-------|
| | 散热量/kW | 贡献率/% | 散热量/kW | 贡献率/% |
| 围岩散热 | 66.90 | 9.78 | 63.40 | 7.36 |
| 空气自压缩 | 57.65 | 8.43 | 63.37 | 7.35 |
| 井下机电设备散热 | 130.40 | 19.07 | 130.40 | 15.13 |
| 围岩运输散热 | 60.89 | 8.90 | 60.89 | 7.06 |
| 井下涌水散热 | 353.97 | 51.76 | 529.76 | 61.46 |
| 井下人员散热 | 14.10 | 2.06 | 14.10 | 1.64 |

2.2 井下热害治理及降温方案

以矿井下某采区开挖一个月的工作面为例, 计算工作面热负荷, 研究降温效果。相关参数: 工作面长度 160 m; 工作面风量 300 m³/min; 工作面进风温 27.3 °C; 工作面进风相对湿度 91%。工作面降温技术指标: 干球温度小于 28 °C; 相对湿度小于 75%。

2.2.1 矿井某工作面散热量计算

2.1 节中计算了 7 种不同的散热量, 其中主要关注的是直接影响工作面环境的热源, 而大气气温作为入口风温已被考虑在内, 无需单独计算。此外, 矸石运输散热已在整体矿井通风计划中考虑, 而不是局部工作面降温需求。空气自压缩虽会产生一定热量, 但相比于其他热源, 其对工作面温度的影响较小。

依据 2.1 的计算结果可知, 整个采区的热负荷主要来源于矿井涌水。为治理井下热害, 先从井下涌水出发, 分析相关水文地质情况, 再提出相

应解决方案。除了统计已知采区的涌水量外, 还采用水文地质比拟法对深部矿坑的涌水量进行预测。

通过对现有矿井的生产巷道涌水情况分析可知, 矿井浅部的涌水量较小, 水温与地表水温基本一致, 对生产影响不大; 150 m 中段以下涌水的主要来源为地下水, 具有温度高、水量大的特点, 会严重影响井下巷道的风流温度。针对井下深部的大量高温涌水问题, 已采用注浆堵水技术+涌水隔离排放方式解决, 通过注浆阻截水源通道后再进行隔离排水。因此无须考虑涌水散热量。

结合工作面内的热源分析, 该采区工作面的冷负荷可根据工作面入口的风流温度、湿度等环境参数的实测值以及工作面内的降温指标计算。考虑到围岩的散热量会随着开挖时间逐渐减小, 本研究以开挖一个月的围岩工作面为研究对象。

围岩散热可基于 2.1.2 中测得的该矿围岩原始岩温、巷道风温以及随通风时间变化的围岩风

流不稳定换热系数计算得到。本采区的主要机械设备除局部通风机布置在通风巷道外,其余设备均布置在采区工作面内,可根据机械铭牌及机电设备计算公式来计算机械散热量。为简化计算,可将所有工人的劳动强度进行统一处理,即所有的作业人员日均进行重体力劳动强度作业,利用 2.1.7 式(9)计算;工作面入口风温为 27.3 ℃,相对湿度为 91%,忽略通风过程中的空气相变,空气吸热量可用式(10)进行计算。

$$Q_a = V_a \rho_a |h_2 - h_1| \quad (10)$$

式中: Q_a —空气所能带走的热量,kW; V_a —空气的体积, m^3 ; ρ_a —空气的密度, kg/m^3 ; h_1 —入口处的空气焓值,查询空气焓湿图可得,为 80.96 kJ/kg; h_2 —出口处空气焓值,查询空气焓湿图可得,为 73.90 kJ/kg。各类散热量计算结果及占比见表 3。

表 3 不同部分散热量计算结果

Table 3 Calculation results of heat dissipation in different parts

| 散热量种类 | 散热量/kW | 散热量占比/% |
|-------|--------|---------|
| 围岩散热 | 19.6 | 12.91 |
| 机械散热 | 86.2 | 56.79 |
| 人员散热 | 1.4 | 0.92 |
| 空气吸热量 | 44.6 | 29.38 |
| 合计 | 151.8 | 100 |

由表 3 可知,通过不同种类散热量,可得该采区工作面的总需冷量为 151.8 kW。冷损系数取 1.2,可计算该采区工作面的冷负荷为 182.2 kW。

2.2.2 矿井某工作面降温方案

该矿矿井某工作面降温流程见图 5,主要包括井下局部制冷机组、末端降温设备、地面冷凝热排放。考虑到该矿矿井目前热害严重但工作面所需冷负荷较小,井下制冷机可选用制冷量较小的局部制冷机,工作面采用空冷器对风流进行冷却,制冷机组的冷凝热通过冷却水排至地面。将该矿井温度较低的地表水收集至水仓,用于解决井下机组冷凝热的排放。井下主要设备布置见图 6。

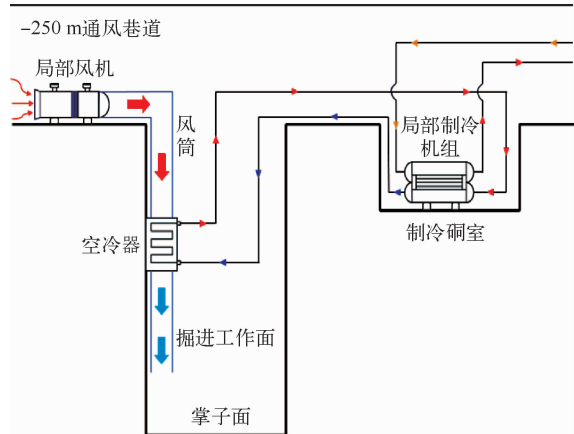


图 5 该矿工作面局部制冷方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of local refrigeration program for the working face

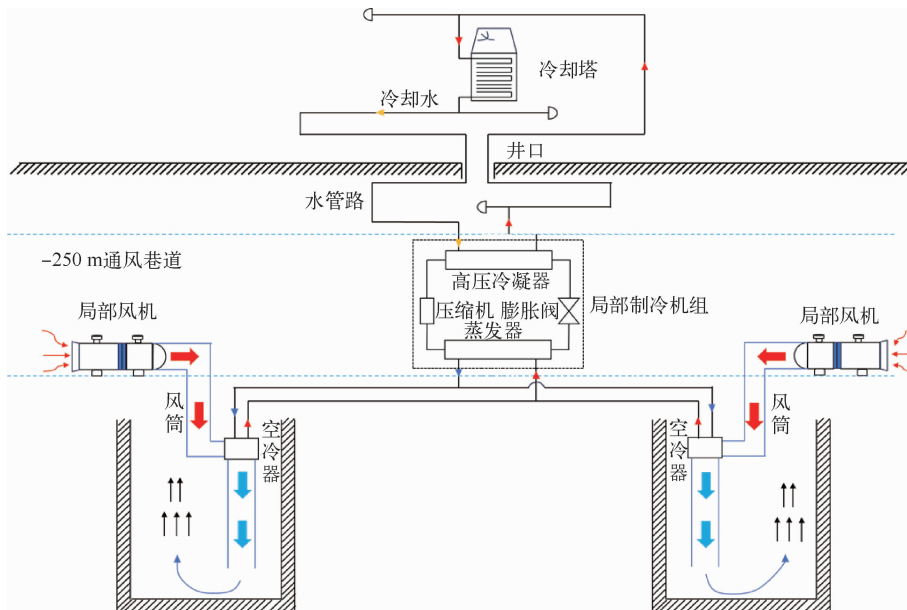


图 6 井下局部制冷设备及水管路布置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of underground local refrigeration equipment and water piping arrangement

3 矿井工作面降温数值模拟研究

3.1 建立掘进工作面通风传热模型

目前井下降温系统还未现场实施,不能实地测量降温系统对工作面环境的影响。因此,通过建立掘进工作面通风传热模型,运用数值模拟方法分析降温系统应用于掘进工作面时,各种影响因素对工作面环境的影响情况。利用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件建立三维模型,该模型主要由围岩和空气组成,围岩的孔隙中存在着液态水和水蒸气;在靠近壁面时,液态水会发生相变,由

液态变为气态,导致空气中的水蒸气浓度增加。

风速的确定应与矿井实际通风相结合^[21]。掘进工作面通风方式与巷道通风方式不同,-300 m 中段的掘进工作面采用压入式通风方式,建立模型的位置位于正在掘进的工作面。数值模型网格的质量与模拟过程及模拟结果密切相关,为了得到精确的模拟结果并减少工作量,必须保证模型网格的高质量。掘进工作面通风传热模型的网格划分情况见图 7。风筒的相关参数见表 4。控制方程为流体力学的连续性方程、流体的动量方程、流体的能量方程和湍流方程。

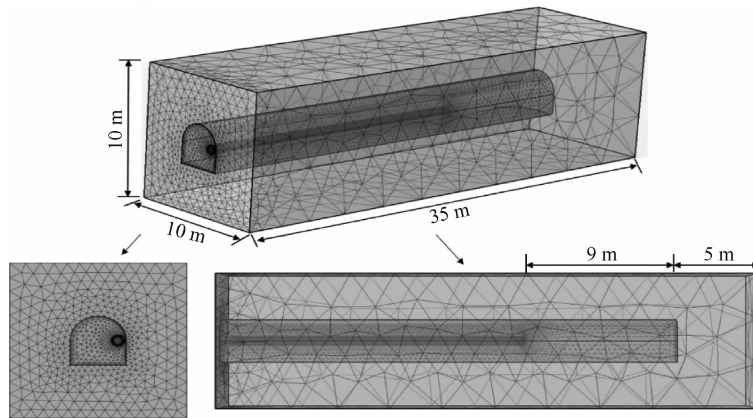


图 7 掘进工作面模型网格

Fig. 7 Digging face model mesh

表 4 模型边界条件参数

Table 4 Model boundary condition parameters

| 边界条件 | 设置类型 | 初始数值 |
|------|-------|--|
| 入口边界 | 速度进口 | $27.3 \text{ m/s}, T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 出口边界 | 自由流出 | $P=0 \text{ Pa}$ |
| 风筒 | 无滑移壁面 | $\lambda=0.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}),$ $c=1.47 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ |
| 巷道围岩 | 无滑移壁面 | $T=37.4 \text{ }^\circ\text{C}, \lambda=2.35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}),$ $c=0.75 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ |

3.2 模型模拟结果

掘进工作面的通风传热影响着工作面的热环境,并直接影响工人的作业舒适度。通风量、开挖深度、风筒布置对工作面环境均有影响。模拟当入口风温被空冷器冷却至 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,掘进工作面的风流流动轨迹和工作面内的温度分布情况,掘进工作面内的风流流动轨迹见图 8,距工作面不同距离的截面温度分布情况见图 9。图中, x 指距工作面纵向距离,白圆点表示风筒位置,进风位置在 $x=9 \text{ m}$ 处,风向在图 8 中表示为由左向右。

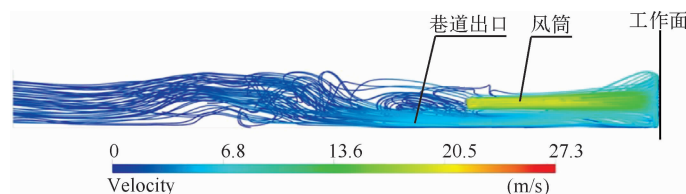


图 8 掘进工作面风流流动轨迹

Fig. 8 Trajectory of wind flow in the digging face

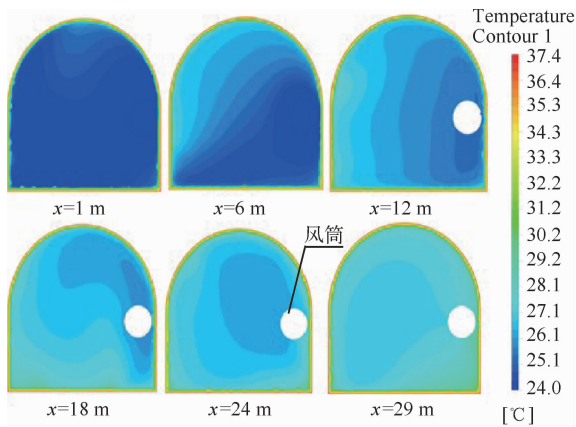


图9 工作面不同位置处温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at different locations on the working face

由图8~图9可知,当低温空气从风筒中输出时,还处于速度较高的状态,随后风速逐渐降低,在工作面附近出现速度骤降现象,且大部分风流仍以原方向流向工作面。风流抵达工作面后转向,朝着巷道出口方向流动,但目前的通风方式下工作面附近风流分布不均匀,不利于工作面围岩与风流之间的换热。由风流的流动轨迹可看出,掘进工作面通风现状不好,导致平面内的温度分布并不均匀。

由图9可知,离工作面较近的区域温度较低,约为24℃,巷道截面的温度随距离的增加逐渐升高;且逐渐呈现出巷道中心温度低,围岩附近温度高的趋势。这是由于较远处的风流较为均匀,传热主要发生在靠近壁面处的风流。

通过数值模拟,分析了通风量、开挖深度、风筒布置位置对工作面环境的影响。风量会影响巷道内风流的流动轨迹,还会增大离工作面较远距离的低温区域;围岩温度主要会影响围岩与风流之间的换热,对工作面内的风流流动轨迹影响不大;当围岩温度过高时,仅降低风筒的出风温度难以满足开采规范的要求,需要结合其他方案对工作面降温;风筒和工作面间的距离对风流流动轨迹和温度分布均有较大影响,最好保持在合适的范围,以10 m为宜。

4 结论

针对矿井深部开采遇到的高温热害问题,通过成因分析、现场测试、室内试验和数值模拟等方

法,对该矿井围岩热物性、温度场、不稳定对流换热系数、地温梯度和深部热环境进行了研究,得到如下结论:

1)该矿-150 m中段未出现热害,而-200 m中段环境温度升高至28~29℃,且湿度显著增加,开始出现高温热害问题。

2)该矿井热源以大气气温和围岩散热为主,是典型的季节性热害矿井。除自然热源因素影响外,该矿以矿井涌水为主要热负荷来源。

3)数值模拟表明,风量会影响巷道内风流的流动轨迹,还会增大离工作面较远距离的低温区域;围岩温度对工作面内的风流流动轨迹影响不大;风筒和工作面间的距离对风流流动轨迹和温度分布均有较大影响。

参考文献:

- [1] 姚韦靖,庞建勇.我国深部矿井热环境研究现状与进展[J].矿业安全与环保,2018,45(1):107-111.
- [2] 郭平业,秦飞.张双楼煤矿深井热害控制及其资源化利用技术应用[J].煤炭学报,2013,38(S2):393-398.
- [3] 牛学军,谭亚辉,苏艳茹,等.我国铀矿采冶技术发展方向和重点任务[J].铀矿冶,2013,32(1):22-26.
- [4] 韩颖,李向威,闫志佳.我国高温矿井热害防治技术研究进展及展望[J].煤炭技术,2023,42(10):186-189.
- [5] 姚韦靖,庞建勇.我国深部矿井热环境研究现状与进展[J].矿业安全与环保,2018,45(1):107-111.
- [6] 欧晓英,杨胜强,于宝海,等.矿井热环境评价及其应用[J].中国矿业大学学报,2005,34(3):323-326.
- [7] 左前明,程卫民,苗德俊,等.基于热害对人影响的高温矿井热环境模糊综合评价[J].煤矿安全,2009,40(7):86-89.
- [8] 秦致远,杨力.基于熵权-BP神经网络的深部煤矿热害风险评价研究[J].安徽工程大学学报,2023,38(3):58-64+94.
- [9] 张树光,孙树魁,张向东,等.热害矿井巷道温度场分布规律研究[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(3).
- [10] ABDULAGATOV I M, EMIROV S N, ABDULAGATOVA Z Z, et al. Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of rocks [J]. Journal of Chemical and Engineering Data: the ACS Journal for Data, 2006,51(1):22-23.
- [11] RAMAZANOVA, A E EMIROV S N. Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of siltstone and dolomite[J]. Bulletin of the

- Russian Academy of Sciences: Physics, 2012, 76 (1):125-127.
- [12] SEIPOLD U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks— a general law[J]. Tectonophysics, 1998, 291(1):161-171.
- [13] KATHARINA A, MARCELLUS S, CLAUDIA F, et al. Thermal conductivity estimation model considering the effect of water saturation explaining the heterogeneity of rock thermal conductivity[J]. Geothermics, 2017, 66:1-12.
- [14] JRAND R, FEHR A, AN-KOCH A, et al. Study of the variation of thermal conductivity with water saturation using nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2011, 116:1-12.
- [15] 郭平业, 卜墨华, 李清波, 等. 岩石有效热导率精准测量及表征模型研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10):1983-2013.
- [16] 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.
- [17] 陈刚, 胡鹏华, 李先杰, 等. 某典型火山岩型铀矿井通风降氡及降温综合措施分析[J]. 铀矿冶, 2019, 38(1):80-84.
- [18] 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.
- [19] 李跃通, 陈延可, 张发亮. 井巷围岩与风流热湿交换影响因素分析[J]. 金属矿山, 2013(1):143-145.
- [20] 舒孝国, 肖福坤. 深部矿井内热源分析[J]. 煤炭技术, 2006(7):105-107.
- [21] 陈刚, 干雨杭, 李先杰. 某铀矿井下作业中段热源分析与降温措施研究[J]. 铀矿冶, 2021, 40(3):219-222+230.

Analysis of Heat Source and Simulation of Cooling Measures in the Deep Part of High Temperature Mine—Taking a Hard Rock Uranium Mine as an Example

LIU Xiaochen¹, KANG Haochen², GAN Yuhang¹, ZHANG Qian¹

(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;

2. Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: Against the background of growing global energy demand, the rate of extraction of various types of mineral resources is accelerating. However, with the increase of mining depth, the problem of high temperature and heat damage is gradually highlighted. The high temperature and heat damage not only affect the normal operation of various types of machinery and equipment, but also pose a serious threat to the safe production of the mine. The causes and effects of heat damage in mines were analyzed. At the same time, taking a hard rock uranium mine in the south of China as an example, through numerical simulation and other methods, the thermal and physical parameters of the surrounding rock of the mine, the geothermal field of the mine and the deep thermal environment were studied in depth, and on this basis, the existing problems of the mine were analysed, and the cooling technology was proposed.

Key words: underground uranium mine; high-temperature mine; heat source analysis; cooling technology; numerical simulation; COMSOL