金属矿深井大盘区密集采场群角联通风系统优化研究*

陈宜华[1,2],杨青[1],谭豪男[1],王晓南[3],熊晓晨[4]

(1.安徽工业大学 能源与环境学院, 安徽 马鞍山市 243000;
2.东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110004;
3.本溪龙新矿业有限公司, 辽宁 本溪市 117000;
4.鞍山五矿陈台沟矿业有限公司, 辽宁 鞍山市 114000)

摘要:针对金属矿深井大盘区密集采场群的规模化开采中,复杂角联通风引发的"高温-污染"耦合难题,构建了"正交试验与控制变量法、Fluent数值模拟、Ventsim通风解算及多元线性回归"的四维分析框架,揭示了穿脉巷风门选择性关闭对风路重构的关键作用。结果表明:各因素对出矿巷温度场的影响重要程度为围岩温度>2#穿脉入风风速>入风温度>0#穿脉入风风速;提出关闭0#穿脉风门、构建"2#进、0#出"贯穿风路的优化方案,该方案使出矿巷风量由10.8 m^3/s增至30.7 m^3/s,区域风速由0.1 m/s增至0.6 m/s,巷道内平均温度降至26.03 ℃。优化方案有效解决了局部串风问题,提高了污染物排放效率,改善了井下作业环境,为类似深井大盘区密集采场群通风系统"精准微创手术式"的调控提供了理论依据与工程实践范例。

关键词:深井高温热害;大盘区采场群;角联通风;风路重构;通风系统优化;数值模拟
中图分类号:TD724;TD722 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0014-11

Study on Optimization of Diagonal Ventilation System of Dense Stope Groups in Large Panel of Deep Well in Metal Mines

Chen Yihua[1,2], *Yang Qing*[1], *Tan Haonan*[1], *Wang Xiaonan*[3], *Xiong Xiaochen*[4]

(1.School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243000, China;
2.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment,
Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;
3.Benxi Longxin Mining Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117000, China;
4.Anshan Chentaigou Mining Co., Ltd., China Minmetals Corporation, Anshan, Liaoning 114000, China)

Abstract: Aiming at the high temperature-pollution coupling problem caused by complex diagonal ventilation in the large-scale mining of dense stope groups of deep well in metal mines, a four-dimensional analysis framework of "orthogonal test and control variable method, Fluent numerical simulation, Ventsim ventilation solution and multiple linear regression" was constructed, which revealed the key role of the selective closing of the wind door in the cross-cut in the reconstruction of the wind path. The results show that the importance of the influence of various factors on the temperature field of the ore drawing roadway is as follows: the surrounding rock temperature > the inlet wind velocity of the 2# cross-cut > the inlet wind temperature > the inlet wind velocity of the 0# cross-cut. The optimization scheme of closing the wind door of 0# cross-cut roadway and constructing 2# inlet and 0# outlet through the wind path is proposed. The scheme increases the wind volume of the ore drawing roadway from 10.8 m^3/s to 30.7 m^3/s, increases the regional wind speed from 0.1 m/s to 0.6 m/s, and reduces the average temperature in the roadway to 26.03 ℃. The optimization scheme effectively solves the problem of local crosswind, improves the efficiency of pollutant discharge, and improves the underground working environment. It provides a theoretical basis and engineering practice example for the regulation of "precise minimally invasive surgery" for the ventilation system of dense stope groups in similar deep wells.

Key words: High-temperature thermal hazard in deep well, Large panel stope group, Diagonal ventilation, Wind path reconstruction, Ventilation system optimization, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2025-06-27
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907205)
作者简介:陈宜华(1963—),男,安徽淮北人,博士,教授,主要从事矿井通风降温研究。E-mail:chenyh_1234@163.com
通信作者:杨青(1999—),男,安徽六安人,硕士,主要从事矿井通风降温研究。E-mail:1370719478@qq.com

0 引言

随着矿井开采深度不断增加,深井高温热害及污染物排出困难已成为制约深井安全高效开采、绿色发展的重大难题[1-2]。大盘区密集采场群布置虽能够有效解决深井规模化开采问题,但盘区出矿巷、凿岩巷道交错布置,连接角度多样,导致通风网络形成复杂的角联分支。在通风系统中,“角联”特指连接两条相对独立进回风线路的分支巷道(如联络巷、出矿巷等),其风流方向不稳定,易受扰动而发生逆转。角联分支的存在,加之开采线路过长,易引发进回风巷风流紊乱;另外,通风构筑物的不合理设置,也会削弱整体通风效果,加剧采场内部的热害及污染物积聚,进而导致炮烟等污染物排放时间延长、生产效率降低[3]。因此,解决深井大盘区密集采场群复杂角联通风问题、改善井下作业热环境,对保障安全生产、维护人员职业健康具有重要意义[4]。

深井高温主要与围岩温度、开采工艺、设备放热等因素有关,其中围岩散热和铲运设备放热最为突出。矿井越深,地热作用越强,裸露的矿岩壁面与周围的空气产生热交换;同时,机电、柴油等设备散热导致作业巷道温度进一步升高,恶化工作环境[5]。工人长时间处于高温环境下,不但会降低劳动效率,还易造成生理上的损伤,严重威胁健康和安全,对矿井的安全生产和高效运行构成严峻挑战[6]。

针对井下作业面污染物控制,彭斌等[7]通过增加风量及改变工作面通风方式,使工作面平均温度从28.41 ℃降至26 ℃。解彬等[8]探究了风速、风温对工作面的降温效果,发现提高进口风速能够有效降低采场温度,当采场风速和进口风温分别为0.25 m/s和22 ℃时,采场风温可降至28 ℃;刘晓等[9]利用Ventsim软件对通风系统优化改造方案进行解算分析,模拟了矿山通风容易和困难时期的工况,以提高风机效率,使风量、风速、温度等满足相关规程和规范要求。

在深井大盘区密集采场群的开采过程中,采场通风风流紊乱、风量分配不均,且通风构筑物设置未充分考虑深井大规模开采的通风需求,易造成作业环境恶劣、污染物难以排出等问题。尽管矿山已采取通风调节措施,例如增设局扇,但此类方法多限于局部优化,面对大规模密集采场群的复杂网络特性,仍缺乏系统性的角联通风解决方案。

综上,本文以某铁矿深井大盘区密集采场群为工程背景,基于通风系统数学模型,构建了“正交试验与控制变量法、Fluent数值模拟、Ventsim通风解算及多元线性回归”的四维分析框架,通过优化风流路径与关键参数,系统性解决采场出矿巷无风、高温、污染物排出困难等问题,为实现采场“按需通风、按质调节”的高效通风模式提供理论依据与技术路径。

1 理论模型概述

1.1 假设条件

为了解决大盘区密集采场群角联通风问题,本次数值模拟作如下基本假设:巷道风流为不可压缩流体,且流动状态为湍流,选用工程中广泛应用的k-ε湍流模型进行求解;考虑到巷道围岩壁面与风流发生热交换,添加能量守恒方程;由于流体被视为单一组分的理想空气,因此不求解组分输运方程。

1.2 基本方程

巷道内部风流的物理条件复杂,影响因素较多,气流在巷道内遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律[10]。

(1) 连续方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}=S_m \tag{1}$$

式中:ρ为气体密度,kg/m^3;t为时间,s;u_x为x方向的速度分量,m/s;x为x方向的空间位置坐标,m;S_m为单位体积内加入到连续相的质量源项或其他自定义源项。

(2) 动量方程。

$$\rho\frac{\partial u_x}{\partial t}+\rho u\frac{\partial u_x}{\partial x}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\rho g+F_x \tag{2}$$

式中:p为流体静压,Pa;τ_{xx}为x方向的黏性应力张量分量,m/s^2;g为重力加速度,m/s^2;F_x为x方向上的外部体积力,N。

(3) 能量方程。

$$\frac{\partial(\rho T_1)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho \boldsymbol{u} T)=\mathrm{div}\left(\frac{h}{c_p}\Delta T\right)+S_t \tag{3}$$

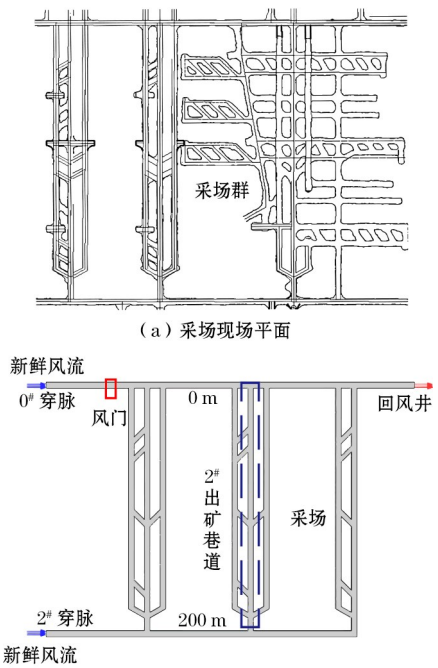
式中:T_1为流体温度,K;$\boldsymbol{u}$为速度矢量,m/s;h为流体传热导系数,W/(m·K);c_p为流体比热容,J/(kg·K);S_t为黏性耗散项,本次不涉及外加体积热源模型,取值为0。

2 模型构建及参数设置

2.1 深井大盘区采场群角联模型

为研究角联通风特性,以某金属矿山大盘区密

集采场群为原型,如图 1(a)所示,根据现场巷道布置,构建如图 1(b)所示的角联通风系统简化模型。以盘区开采区域为研究对象:盘区 0# 穿脉断面为 4.6 m×3.5 m(16.1 m²),长度 300 m;2# 穿脉断面为 4.6 m×3.5 m,长度 260 m;出矿巷断面为 4.4 m×4.1 m(18.04 m²),长度 200 m。0#、2# 穿脉均为进风巷,为整个采场提供新鲜风流;0# 穿脉设有一处风门,尽头连接回风天井。此次研究重点关注区域为 2# 出矿巷道的通风特性。



(a) 采场现场平面

(b) 模型平面

图 1 采场现场平面和模型平面

Fig.1 Site plan and model plan of stopes

2.2 监测断面布置

在采场出矿巷道内沿程均匀布置 4 个监测断面,间距 40 m,具体位置如图 2 所示。为确保数据的准确性,此次模拟采用走线测量法,计算并统计各断面平均风速。

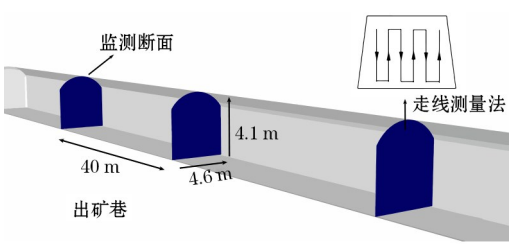


图 2 巷道监测断面

Fig.2 Monitoring sections in the roadway

2.3 边界条件设置及网格划分

本次模拟的边界条件及网格划分见表 1 和图 3。求解时开启能量方程,以探究温度与流场之间的关系;选择标准壁面函数,可以模拟气体与面之间的相互作用;复杂气体环境下选择工程中广泛应用的 k-ε 湍流扩散模型。

表 1 边界条件设置

Table 1 Boundary condition setting

能量方程 (Energy)	湍流方程 (Viscous)	时间步数 (Time)
打开	k-ε 标准双模型	稳态求解
速度(Vclocity)	入口边界	风速设置
绝对速度	速度入口	0# 穿脉 3.770 m/s; 2# 穿脉 2.667 m/s。
出口边界	入风温度/℃	围岩温度/℃
压力出口	24	28.6

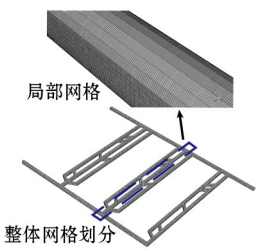


图 3 网格划分

Fig.3 Mesh division

采用结构化网格对计算域进行划分处理。为确保计算精度,网格参数设置如下:全局单元尺寸设置为 1 m,高平滑度优化网格质量;膨胀选项选择总厚度,层数为 10 层,最大厚度为 0.15 m。分别对速度入口和压力出口区域的网格进行局部细化,面尺寸控制在 0.15 m。计算网格的平均偏斜度优于 0.2,满足数值计算精度要求。

3 大盘区采场群角联风温调控研究

矿井通风系统将新鲜风流送入巷道、工作面,稀释并排出井下污染物(热量、有毒有害气体、粉尘等),以满足井下人员工作与安全生产的需求[11-12]。然而,井下巷道错综复杂,拐弯、断面突扩或收缩等局部变化不仅扰动风流的流动状态,亦导致压力损耗[13-14]。在巷道环境突变处,原稳定状态的风流转变为非稳态流动[15],这种状态变化将影响井下通风效果,进而影响内部污染物的稀释和排放[16]。采用计算流体动力学方法,如 Fluent 数值模拟,能够直观、准确地揭示巷道内温度场和速度场的分布规律,对于优化采场污染物排出具有重要意义。

3.1　深部原热环境模拟

深部原热环境是指现场巷道未采取降温措施的原始热环境状态。为验证 Fluent 数值模型的准确性与适用性，将模拟结果与现场实测数据进行比较。原热环境下采场出矿巷温度分布特征如图 4 所示，可以看到出矿巷的温度分布存在明显的不均匀性：进口处断面平均温度为 26.21 ℃，而巷道内部平均温度高达 29.32 ℃，整体温度水平偏高。

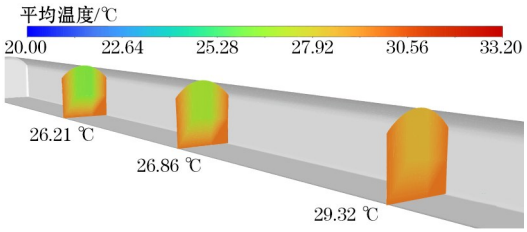


图 4　原热环境下出矿巷道温度分布

Fig.4　Temperature distribution in the ore-drawing roadway under original thermal conditions

3.2　与现场数据对比分析

模拟数据与现场实测数据对比见表 2。在 10 m 处现场实测数据与模拟数据非常接近；20 m、40 m、60 m 处现场实测数据与模拟数据分别相差 0.064 m/s、0.177 m/s、0.107 m/s。造成这种误差的原因主要有两方面：一方面是实际巷道因为超欠挖导致断面形状不规则，宽度并非定值；另一方面，模型建立时假设巷道为断面面积恒定的规则巷道，且未考虑到上下贯通中段引起的局部附加阻力。综合考虑以上因素，虽然实测数据与模拟数据存在误差，但二者变化趋势一致，表明该模型能够准确表征现场风流的流动趋势，模拟结果可为现场通风调控提供可靠依据。

表 2　现场实测数据与模拟数据对比

Table 2　Comparison between measured field data and simulated data

位置/m	现场实测数据/(m/s)	模拟数据/(m/s)
10	0.543	0.546
20	0.317	0.253
40	0.247	0.070
60	0.167	0.060

3.3　影响因素分析

为系统性优化采场热环境、提高污染物排放效率，需分析影响井下温度场的关键因素，主要包括以下 6 个因素。

(1) 进风参数：由 0# 与 2# 穿脉共同构成的通风系统中，总进风量及两条巷道间的风量分配，是决定冷量输入与分布的核心。

(2) 围岩温度：作为决定井下热环境的首要因素，开采爆破导致的新鲜岩面暴露会加剧围岩散热。

(3) 设备放热：作业设备的散热量是重要的局部热源，已纳入此次采场热模拟分析。

(4) 空气自压缩放热：新鲜风流下行过程中，因重力作用产生温升效应。

(5) 入风温度：作为初始边界条件，是影响温度场分布的基础参数。

(6) 其他因素：人员及爆破放热等热源放热量较小，本次模拟暂不考虑；此外，本研究聚焦于穿脉巷调热圈趋于稳定状态下的热环境特征，故忽略入风温度与围岩温度随时间的动态耦合作用[17]。

3.4　正交试验

各因素对巷道温度场的影响程度及作用机理存在差异，不同因素的叠加会造成不同的影响效果，增大模拟结果的不确定性并降低可信度。因此，此次正交试验模拟选取四个关键因素：0# 穿脉风速、2# 穿脉风速、入风温度和围岩温度。每种因素设置三个水平，具体参数见表 3。

表 3　正交试验水平因素

Table 3　Factors and levels of orthogonal test

水平	0# 穿脉风速/(m/s)	2# 穿脉风速/(m/s)	入风温度/℃	围岩温度/℃
1	4	3	22	30
2	3	2	24	35
3	2	1	26	40

根据上述四因素三水平设计，选用 $L_9(3^4)$ 的正交表进行模拟试验。以出矿巷内 100 m 处的作业面区域为例，探究各因素各水平的影响效果。利用 Fluent 软件对表 4 中 9 组工况进行数值模拟，得到各工况下作业面的平均温度。

表 4　正交试验模拟方案及结果

Table 4　Simulation schemes and results of orthogonal test

方案	0# 穿脉风速/(m/s)	2# 穿脉风速/(m/s)	入风温度/℃	围岩温度/℃	断面平均温度/℃
1	4	3	22	30	28.24
2	4	2	24	35	33.30
3	4	1	26	40	37.52
4	3	3	24	40	36.14
5	3	2	26	30	29.23
6	3	1	22	35	33.05
7	2	3	26	35	32.72
8	2	2	22	40	35.92
9	2	1	24	30	29.25

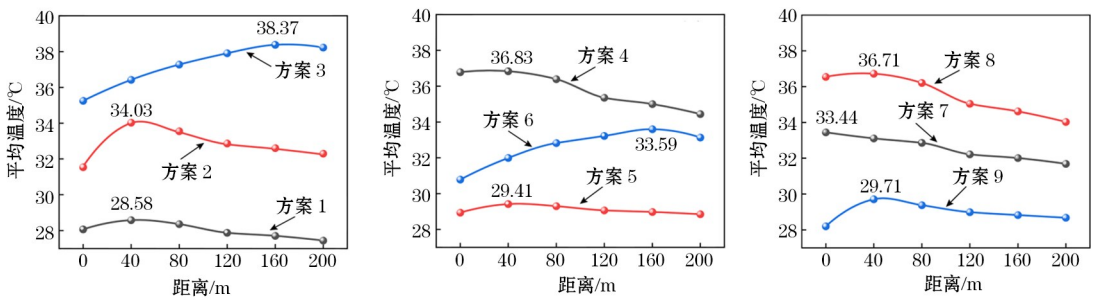
续表

方案	0#穿脉风速/(m/s)	2#穿脉风速/(m/s)	入风温度/℃	围岩温度/℃	断面平均温度/℃
$K1$	33.020	32.367	32.403	28.907	
$K2$	32.807	32.817	32.897	33.023	
$K3$	32.630	33.273	33.157	36.527	
R	0.390	0.906	0.754	7.620	

正交试验的模拟结果及极差(R 值)分析见表 4。通过计算各因素的 R 值,可定量评估其对作业面温度影响的显著性:R 值越大,表明该因素影响越显著。

由表 4 可知,各因素对作业面温度的影响程度存在显著差异,影响的主次顺序为:围岩温度($R=7.62$)>2# 穿脉风速($R=0.906$)>入风温度($R=0.754$)> 0# 穿脉风速($R=0.390$)。由 R 值可得,围岩温度是影响作业面热环境的决定性控制因素,其影响程度远超其他因素,而 0# 穿脉风速的影响可视为次要因素。

为进一步探究不同影响因素组合下出矿巷内的温度场分布规律,绘制了 9 组正交试验工况下,沿出矿巷道内部不同位置断面平均温度的变化曲线,如图 5 所示。



(a) 方案 1~3 模拟温度变化　(b) 方案 4~6 模拟温度变化　(c) 方案 7~9 模拟温度变化

图 5　正交试验模拟温度变化曲线

Fig.5　Simulated temperature variation curves of orthogonal test

由图 5 可知,方案 3,4,8 最高平均温度均超过 35 ℃,其共同特点是岩温较高(约 40 ℃)。方案 1,2,3,5,6,9 温度场呈现先上升后下降趋势。方案 4,7,8 则表现为整体下降趋势,其风速参数呈现一定的规律,特点是两个穿脉风速一致,均为 3 m/s 或 2 m/s,或者 2# 穿脉的风速(3 m/s)大于 0# 穿脉的风速(2 m/s)。基于这一现象提出假设:采场内部的速度场、温度场与两条穿脉的风流差密切相关,且 2# 穿脉的风流影响大于 0# 穿脉。

综合分析表明,在不同风速差的条件下,两条穿脉的入风风速与入风温度对巷道热环境的影响程度存在差异。对出矿巷热环境的影响程度主次顺序为:围岩温度>2# 穿脉入风风速>入风温度>0# 穿脉入风风速,其影响程度呈现显著的梯度特征,为后续开展控制变量研究指明了方向。

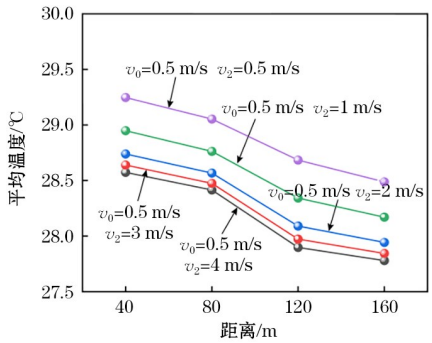
3.5　各因素控制变量试验

控制变量法是一种将多变量、多因素的试验简化为多个单因素试验的研究方法。选取出矿巷内 40 m、80 m、120 m、160 m 处 4 个特征断面的参数进行分析,以断面的平均温度作为数据拟合的依据。

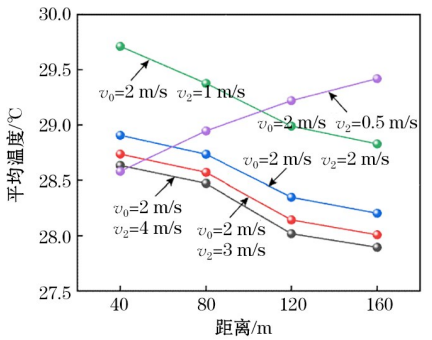
3.5.1　入风风速

入风风速是影响巷道对流换热强度的决定性因素,也是通风降温调控的关键参数。模拟试验中,设置 0# 穿脉风速分别为 0.5 m/s、2 m/s,2# 穿脉风速分别为 4 m/s、3 m/s、2 m/s、1 m/s、0.5 m/s,入风温度为 24 ℃,围岩温度为 30 ℃。工程实践表明,进风巷风门闭合状态下仍存在漏风现象,另外考虑到该巷道的通风需求,故将最低风速设置为 0.5 m/s。不同入风风速组合条件下(0# 穿脉速度为 v_0,2# 穿脉速度为 v_2),沿程各个距离断面的平均温度分布特征如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出,0# 穿脉的入风风速为 0.5 m/s 时,断面平均温度呈现规律性变化,这代表新鲜风流从 2# 穿脉(200 m 处)进入出矿巷,此时没有与内部进行热交换,温度较低,随后风流贯穿整条出矿巷,温度逐渐升高,将内部污染物通过 0# 穿脉排至回风天井。从图 6(b)中可以看出,0# 穿脉风速为 2 m/s 和 2# 穿脉风速为 0.5 m/s 时,温度呈现升高的趋势,代表新鲜风流从 0# 穿脉进入贯穿整条出矿巷,从 2# 穿脉回风,风路不合理,在该风路条件下其他区域会被污风污染;0# 穿脉风速为 2 m/s 和 2# 穿脉风速为 1 m/s 时,整体平均温度相比较其他方案较高,贯穿风流较小,导致热量积聚,降温效率低。



（a）v_0=0.5 m/s，v_2为变量时模拟温度变化



（b）v_0=2 m/s，v_2为变量时模拟温度变化

图 6　不同入风风速下断面的平均温度

Fig.6　The average temperature of the sections under different inlet wind velocities

0#穿脉与2#穿脉速度矢量特征如图7所示，结合图6，发现0#穿脉风速越低，2#穿脉风速越高，越有利于形成“2#进，0#出”的贯穿风流，采场内部的通风效果越好。结合矿山实际情况，提出优化调控方案，具体为将0#穿脉风门关闭，风速设置为0.5 m/s，让新鲜风流从2#进风巷道进入采场，以解决采场角联的通风问题。

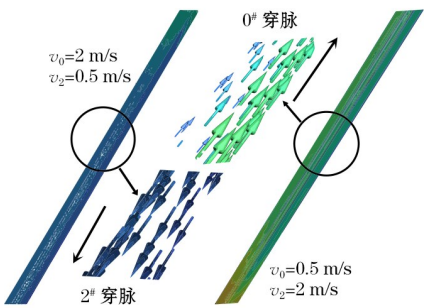


图 7　0#穿脉与2#穿脉速度矢量特征

Fig.7　Velocity vector characteristics of 0# and 2# cross-cut roadway

为定量研究该方案下两条穿脉的风速差对巷道断面温度的影响，取120 m处断面的平均温度进行分析。不同风速差条件下120 m处断面的平均温度见表5。结果显示：随着2#与0#穿脉的风速差增大，120 m处断面平均温度变化趋于平稳，出矿巷内部降温效果逐渐稳定。

表 5　不同风速差条件下 120 m 处断面温度

Table 5　Temperatures of 120 m section under different wind velocity difference conditions

2#与0#穿脉风速差/(m/s)	120 m处断面平均温度/℃	温度差/℃
0.5	28.34	—
1.5	28.09	0.25
2.5	27.97	0.12
3.5	27.90	0.07

将该断面的平均温度与风速差进行拟合，得到公式(4)：

$$T=0.706\ 5e^{-\frac{\Delta v}{1.487}}+27.834\ 7 \tag{4}$$

式中：T为采场出矿巷内的断面平均温度，℃；Δv为2#与0#穿脉的风速差，m/s。

拟合曲线如图8所示，两条穿脉的风速差与巷道断面平均温度呈负幂函数关系；当风速差从0.5 m/s增加至1.5 m/s时，巷道断面温度降低了0.25 ℃；而当风速差从2.5 m/s增加到3.5 m/s时，巷道断面温度仅降低0.07 ℃，这说明随着风速差的增大，温度变化的幅度逐渐减小，曲线趋于平缓，降温效果逐渐减弱。因此，在通风调控中，增大风速差并非最优的控制手段，入风温度等仍是需要协同考虑的重要因素。

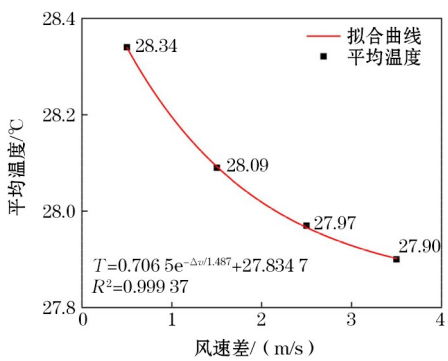


图 8　不同风速差的巷道断面温度拟合曲线

Fig.8　Fitted curve of roadway section temperature with different wind velocity differences

矿山实际生产中，受岩体形变及支护结构等因素影响，巷道壁面摩擦因数呈动态变化，导致风流阻力不断变化。然而，数值模拟中壁面摩擦因数设定为固定值，未考虑现场巷道壁面动态摩擦因数造成的风速衰减。因此，实际到达采场的风速可能低于模拟结果中的风速值。

3.5.2　入风温度

入风温度对巷道温度场的影响主要体现在热传递过程中：低温气流进入巷道后，与周围岩壁、空气

进行热交换,从而达到降温效果。本次模拟设置 2# 穿脉风速为 4 m/s,0# 穿脉风速为 0.5 m/s,围岩温度为 30 ℃,入风风温分别为 18 ℃、20 ℃、22 ℃、24 ℃,各距离断面的平均温度如图 9 所示。

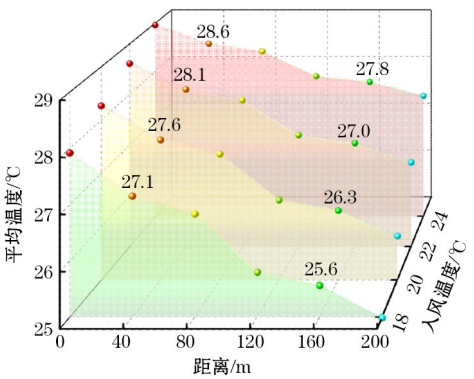


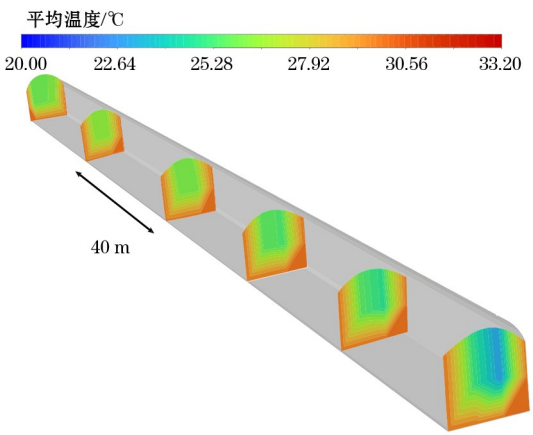
图 9 不同入风温度下断面的平均温度

Fig.9 Average section temperatures under different inlet wind temperatures

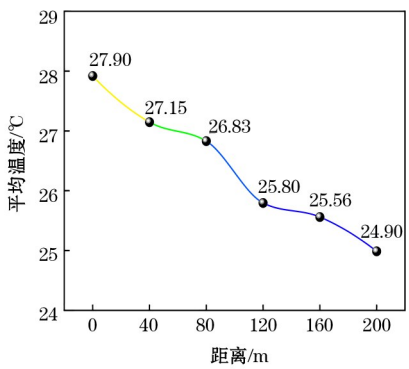
从图 9 可以看出,不同入风温度下断面的温度曲线近似平行,出矿巷温度场变化趋势基本一致。这表明入风温度对巷道各断面的降温效果程度相似。从 2# 穿脉(200 m 处)到 0# 穿脉,温度逐渐升高,且不同工况下沿程各断面的升温幅度相近。这表明入风温度对巷道内不同位置的温度场均产生了影响。

入风温度 18 ℃时出矿巷温度分布特征如图 10 所示。新鲜风流在 200 m 处断面进入出矿巷,在巷道内发生热交换,温度逐渐升高;40 m、80 m、120 m、160 m 处断面的平均温度分别为 27.15 ℃、26.83 ℃、25.80 ℃、25.56 ℃,工作面区域温度符合安全生产要求,采场内部温度舒适。

为了进一步验证入风温度对断面巷道的影响规律,选取不同入风温度条件下 120 m 处断面的平均温度进行分析,具体数据见表 6。



(a) 出矿巷道温度分布云图



(b) 不同距离断面的平均温度

图 10 入风温度 18 ℃时出矿巷道温度分布

Fig.10 Temperature distribution in the ore-drawing roadway with an inlet wind temperature of 18 ℃

表 6 不同入风温度条件下 120 m 处断面温度

Table 6 Temperatures of 120 m section under different inlet wind temperature conditions

入风温度/℃	120 m 处断面平均温度/℃	温度差/℃
18	25.80	—
20	26.49	0.71
22	27.20	0.69
24	27.90	0.70

由表 6 可知,不同入风温度下,120 m 处断面平均温度差值接近,说明不同入风温度对巷道的影响程度相似。将表 6 的数据进行拟合,拟合公式为:

$$T=0.350\ 5T_a+19.487 \tag{5}$$

式中,T_a 为入风温度,℃。

不同入风温度下巷道断面温度拟合曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出,拟合优度 $R^2=0.999\ 7$,入风温度与平均温度呈正线性相关,入风温度越小,巷道断面平均温度越低。

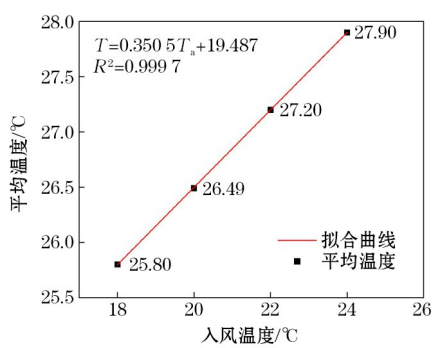


图 11 不同入风温度下巷道断面温度拟合曲线

Fig.11 Fitted curve of roadway section temperature with different inlet wind temperatures

在实际生产中，随通风时间增加，原始岩温调热圈逐渐外移，降低了风流与巷道的热交换损耗。然而，到达出矿巷的风流经过热交换，风流温度有所升高。因此，现场实际风温可能会低于模拟结果预测值。

3.5.3　围岩温度

矿山地热引发的高温热害日益严重，爆破作业导致的新鲜岩面不断暴露，持续影响巷道内温度场的分布[18]。为探究岩温对巷道温度场的影响，在数值模拟中设置围岩温度分别为 25 ℃、27 ℃、29 ℃、31 ℃，2# 穿脉风速为 4 m/s，0# 穿脉风速为 0.5 m/s，入风风温为 24 ℃。

不同围岩温度下断面的平均温度如图 12 所示。从图 12 可以看出，相同距离不同围岩温度的情况下，各曲线间的温度相差较大，这表明围岩温度对出矿巷热环境有显著影响；温度变化最大区间在 100 m 左右，说明在作业面区域降温效果明显，而与入风温度接近的围岩温度变化程度较小。

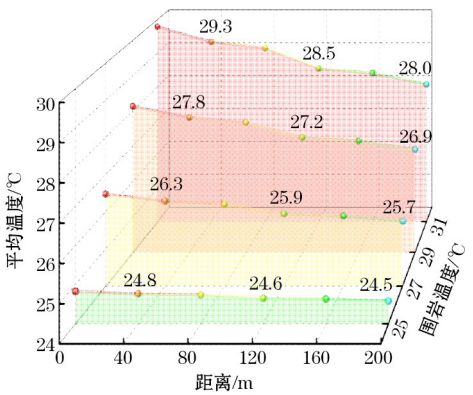


图 12　不同围岩温度下断面的平均温度

Fig.12　Average section temperatures under different surrounding rock temperatures

上述分析表明，围岩温度是影响巷道热环境的决定性控制因素。为进一步揭示其影响规律，选取不同围岩温度条件下 120 m 处断面的平均温度作为关键指标进行分析，统计结果见表 7。

表 7　不同围岩温度条件下 120 m 处断面温度

Table 7　Temperatures of 120 m section under different surrounding rock temperatures

围岩温度/℃	120 m 处断面平均温度/℃	温度差/℃
25	24.64	—
27	25.95	1.31
29	27.24	1.29
31	28.56	1.32

建立断面平均温度与围岩温度的定量关系，对 120 m 处断面的数据进行线性拟合，拟合公式为：

$$T=0.652\ 5T_r+8.327\ 5 \tag{6}$$

式中，T_r 为围岩温度，℃。

不同围岩温度的巷道断面温度拟合曲线如图 13 所示。从图 13 可以看出，拟合优度 $R^2=0.999\ 8$，120 m 处断面的平均温度随围岩温度的增加而增加，呈线性增加关系。对比式(6)与式(5)，发现围岩温度的拟合式斜率(0.652 5)大于入风温度的拟合式斜率(0.350 5)，表明围岩温度对出矿巷内部热环境的影响程度大于入风温度，与前文正交试验结论完全一致。

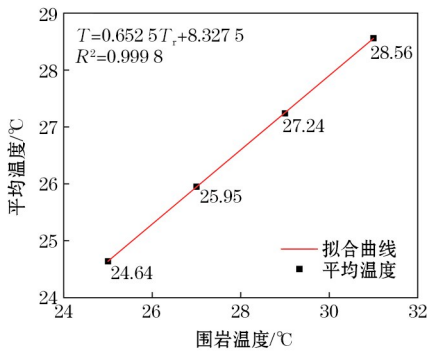
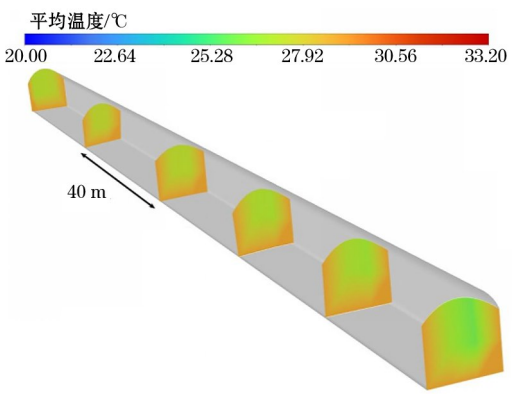


图 13　不同围岩温度的巷道断面温度拟合曲线

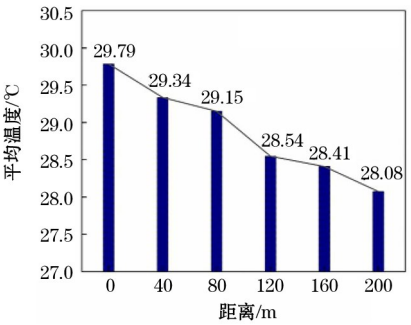
Fig.13　Fitted curve of roadway section temperature with different surrounding rock temperatures

围岩温度 31 ℃条件下出矿巷道温度分布特征如图 14 所示。从图 14 可以看出，40 m、80 m、120 m、160 m 处断面的平均温度分别为 29.34 ℃、29.15 ℃、28.54 ℃、28.41 ℃，各断面依次相差 0.19 ℃、0.61 ℃、0.13 ℃，新鲜风流进入出矿巷与内部空气发生热交换，温度逐渐升高。

在实际生产中，巷道周围岩体的导热系数和散热速率会动态变化，模拟中围岩温度设定为均匀分布，忽略了模型与实际巷道复杂结构对散热的影响。因此，实际巷道内受围岩散热影响的温度可能与模拟存在一定的误差。



(a) 出矿巷道温度分布云图



(b) 不同距离断面的平均温度

图 14 围岩温度 31 ℃时出矿巷道温度分布

Fig.14 Temperature distribution in the ore-drawing roadway with a surrounding rock temperature of 31 ℃

3.6 多元线性回归方程

多元线性回归通过多个自变量来估计因变量。在本次模拟试验中,改变 0# 穿脉的风量、2# 穿脉的风量、入风温度、围岩温度 4 个影响因素,进行 9 组正交试验和 23 组控制变量模拟试验,共得到 32 组不同条件下的温度场数据。从中提取 0# 穿脉风门关闭的工况,以风速差、入风温度、围岩温度、沿程距离作为自变量,以断面平均温度为因变量,拟合得到多元线性回归预测模型:

$$T=1.26-0.116\Delta v+0.3T_a+0.696T_r-0.008L \tag{7}$$

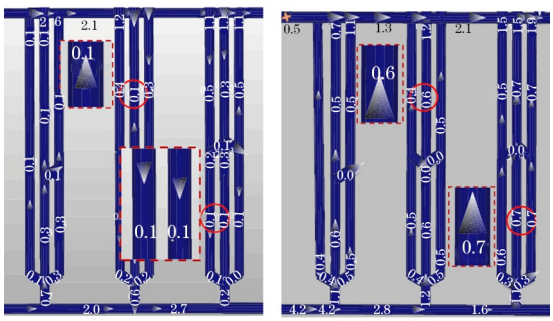
式中,L 为距 0# 穿脉起点的沿程距离,m。

模型拟合优度 R^2 为 0.965,表明风速差、入风温度、围岩温度及巷道位置 4 个变量可以解释巷道温度变化,模型拟合效果良好,预测精度高。

4 角联通风系统优化方案与效果验证

采用 Ventsim 软件对某矿山采场风速进行模拟优化,关闭 0# 穿脉风门,0# 穿脉风速为 0.5 m/s,引导大部分新鲜风流由 2# 穿脉进入采场作业区域,构建有序通风回路,Ventsim 通风优化方案模拟结果如图 15 所示。优化前,采场内部出矿巷部分区域风速仅有 0.1 m/s,风量为 10.8 m^3/s,风路紊乱且回风线路不统一,无法排出污染物;优化后,新鲜风流经 2# 穿脉进入采场,携带污染物后由 0# 穿脉统一回风,出矿巷内平均风速提升至约 0.6 m/s,风量可达 30.7 m^3/s,有效解决了污染物排出、热量积聚等难题。

将优化后的巷道风速差 3.7 m/s、现场的入风温度 20.1 ℃、围岩温度 28.6 ℃、巷道距离代入式(7),计算得出模型预测温度,模拟温度与模型预测温度变化特征如图 16 所示。模拟温度与表达式计算温度的平均差值为 0.19 ℃,平均误差为 0.72%,两者差异处于可接受范围内。



(a) 优化前采场风速 (b) 优化后采场风速

图 15 Ventsim 通风优化前后模拟结果对比

Fig.15 Comparison of simulation results before and after Ventsim ventilation optimization

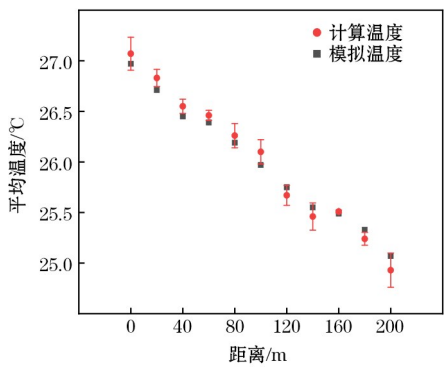
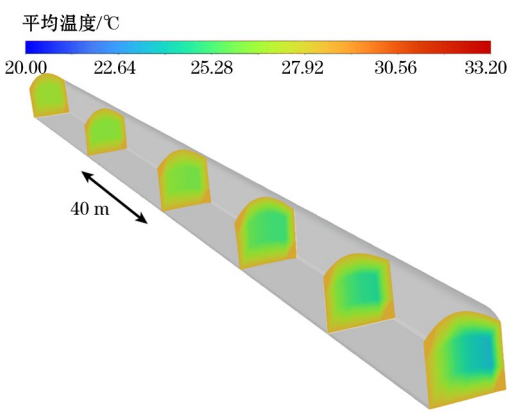


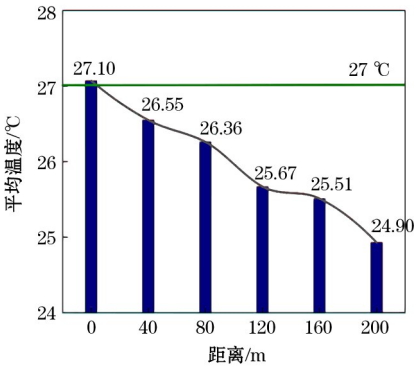
图 16 模拟温度与模型预测温度变化特征

Fig.16 Variation characteristics of simulated and model-predicted temperatures

优化后采场出矿巷断面平均温度分布如图 17 所示。从图 17 可以看出,40 m、80 m、120 m、160 m 断面平均温度分别为 26.55 ℃、26.36 ℃、25.67 ℃、25.51 ℃,温度较为舒适,满足《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)不高于 27 ℃的要求。



(a) 出矿巷道温度分布云图



(b) 优化后的平均温度

图 17 通风优化后出矿巷道温度分布

Fig.17 Temperature distribution in the ore-drawing roadway after ventilation optimization

综合分析，局部巷道连通的复杂性，导致模拟温度与模型预测温度出现微小偏差，但整体趋势保持一致。因此，基于多元线性回归方程的温度预测模型，能够为类似角联通风系统的风温调控提供快速预测支撑。

5 结论

针对深井大盘区密集采场群的复杂角联通风难题，采用现场实测、Fluent 数值模拟与 Ventsim 通风解算相结合的方法，得出如下结论。

(1) 正交试验结果表明，各因素对出矿巷温度场的影响重要程度依次为围岩温度＞2# 穿脉入风风速＞入风温度＞0# 穿脉入风风速。

(2) 控制变量试验结果表明：单纯增大两条穿脉的风速差，对降温的边际效益递减；巷道温度与入风温度、围岩温度均呈正线性相关，且围岩温度的影响更为显著。

(3) 提出关闭 0# 穿脉风门、构建“2# 进、0# 出”贯穿风路的优化方案。该方案使出矿巷风量由 10.8 m^3/s 增至 30.7 m^3/s，区域平均风速由 0.1 m/s 增至 0.6 m/s，巷内平均温度降至 26.03 ℃；基于温度预测模型，模拟温度与计算温度误差为 0.72%，能够为类似采场出矿巷道角联温度提供预测支撑。

(4) 未来的工程应用中，建议采用“固定风路＋动态调控”策略，即固定“2# 进，0# 出”的风路，并根据生产需求动态调节风量，实现按需通风、按质调节；同时将温度预测模型嵌入监控系统，为复杂角联通风系统的智能化、精细化管控提供支持。

参考文献(References)：

[1] 杨旭.不同钻孔注热时序下煤层温度场变化规律研究[J].中国矿业，2024，33(3)：187-195.
Yang Xu. Research on variation law of coal seam temperature field with different borehole heat injection timing[J]. China Mining Magazine，2024，33(3)：187-195.

[2] 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 roadway as mine cooling heat sink[J]. Mining Research and Development，2025，45(2)：213-225.

[3] 杨铁江，徐涛，盛新利，等.姜家窑金矿深部高温热害研究分析与控制[J].中国矿业，2023，32(增刊 1)：436-439＋446.
Yang Tiejiang，Xu Tao，Sheng Xinli，et al. Analysis and control of deep high temperature heat damage in Jiangjiayao Gold Mine[J]. China Mining Magazine，2023，32(Suppl.1)：436-439＋446.

[4] 张亚爽，张京兆，闫振国，等.基于动网格的动态障碍物对巷道风流的影响[J].矿业研究与开发，2025，45(4)：196-203.
Zhang Yashuang，Zhang Jingzhao，Yan Zhenguo，et al. Influence of dynamic obstacles on roadway wind flow based on dynamic grid[J]. Mining Research and Development，2025，45(4)：196-203.

[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.
Yao Weijing，Pang Jianyong. The status and progress of the research on thermal environment of deep mine in China[J]. Mining Safety and Environmental Protection，2018，45(1)：107-111.

[6] 马维清，何磊，臧冀川.深井高温热害对井下作业人员的影响研究[J].建井技术，2021，42(4)：19-26.
Ma Weiqing，He Lei，Zang Jichuan. Study on high temperature disaster influenced to operation personnel in deep mine shaft[J]. Mine Construction Technology，2021，42(4)：19-26.

[7] 彭斌，汤铸，王春霞，等.东山煤矿高温工作面降温技术分析[J].工业安全与环保，2014，40(5)：9-11.
Peng Bin，Tang Zhu，Wang Chunxia，et al. Analysis on cooling technologies for high-temperature working face in Dongshan coal mine[J]. Industrial Safety and Environmental Protection，2014，40(5)：9-11.

[8] 解彬，王海宁，晏江波，等.某矿采掘工作面通风降温措施及数值模拟研究[J].矿业研究与开发，2016，36(5)：105-109.
Xie Bin，Wang Haining，Yan Jiangbo，et al. Numerical simulation and measures of ventilation cooling for an extracting face in a mine[J]. Mining Research and Development，2016，36(5)：105-109.

[9] 刘晓，于曙华，刘邵华，等.基于 Ventsim 的通风系统优化模拟[J].采矿技术，2024，24(2)：250-253.
Liu Xiao，Yu Shuhua，Liu Shaohua，et al. Optimization of ventilation systems based on Ventsim simulation[J]. Mining Technology，2024，24(2)：250-253.

[10] 姚锡文，宋金来，许开立.地下矿山爆破后危险有害气体运移规律及浓度预测分析[J].中国矿业，2023，32(11)：109-115.
Yao Xiwen，Song Jinlai，Xu Kaili. Prediction and analysis of dangerous and harmful gas migration law and concentration after blasting in underground mine[J]. China Mining Magazine，2023，32(11)：109-115.

[11] 李亚俊,李印洪,姚银佩,等.基于巷道风流分布规律的风量计算[J].有色金属(矿山部分),2021,73(2):124-127.
Li Yajun, Li Yinhong, Yao Yinpei, et al. Calculation of air volume based on law of wind flow distribution in roadway [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(2): 124-127.

[12] 宋莹,刘剑,李雪冰,等.矿井巷道风流平均风速分布规律的试验与模拟研究[J].中国安全科学学报,2016,26(6):146-151.
Song Ying, Liu Jian, Li Xuebing, et al. Experiment and numerical simulation of average wind speed distribution law of airflow in minetunnel[J]. China Safety Science Journal, 2016,26(6):146-151.

[13] 惠青龙,郭宏东,李晓刚.基于 Ventsim 的矿井通风网络仿真模拟与方案优化[J].现代矿业,2017,33(6):250-251.
Hui Qinglong, Guo Hongdong, Li Xiaogang. Mine ventilation network simulation and optimization based on Ventsim[J]. Modern Mining,2017,33(6):250-251.

[14] 何东升,陈萌萌,白长江,等.巷道交叉对矿井通风影响的数值分析及实验验证[J].矿业安全与环保,2019,46(1):19-22+27.
He Dongsheng, Chen Mengmeng, Bai Changjiang, et al. Numerical analysis and experimental verification of the influence of roadway crossing on mine ventilation[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2019,46(1):19-22+27.

[15] 杜翠凤,潘浩.基于 UDF 的自然风压对果洛龙洼矿井通风稳定性影响的数值模拟[J].有色金属(矿山部分),2014,66(1):72-76.
Du Cuifeng, Pan Hao. UDF-based numerical simulation of natural wind pressure influence on the ventilation stability in Guoluolongwa Mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2014,66(1):72-76.

[16] 焦灏恺,张西良,李二宝,等.某矿深部矿井通风系统设计与优化[J].现代矿业,2020,36(3):195-197.
Jiao Haokai, Zhang Xiliang, Li Erbao, et al. Design and optimization of a deep mine ventilation system[J]. Modern Mining,2020,36(3):195-197.

[17] 宋文江.矿井调热圈传热特性的数值模拟研究[D].包头:内蒙古科技大学,2023.
Song Wenjiang.Numerical simulation study of heat transfer characteristics of mine heat transfer ring[D]. Baotou:Inner Mongolia University of Science & Technology,2023.

[18] 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.