

某矿深部回采工作面热害分析及机械降温技术研究

赵文彬¹, 王亚诚^{1*}, 米建强², 高睿², 孟建², 孙胜³

¹山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

²潞安新疆煤化工(集团)有限公司, 新疆 哈密

³山东李楼煤业有限公司, 山东 菏泽

收稿日期: 2025年12月31日; 录用日期: 2026年2月15日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

随着浅部煤炭资源枯竭, 我国煤矿开采深度逐年增加, 深井高温热害问题日益突出, 严重威胁井下作业人员的健康与安全生产。本文以西北某矿深部回采工作面为研究对象, 通过现场实测、理论分析及FLUENT数值模拟相结合的方法, 系统分析了工作面的热害成因及温度场分布规律。研究表明: 导致工作面高温的主要热源为煤体自身散热(占比50%~60%)、采空区遗煤氧化散热、相邻采空区导热及机械设备运转散热, 且热源分布不均导致工作面出现局部高温; 该工作面实际开采深度(350 m)已超过矿井通风降温极限开采深度(293 m), 单纯依靠增大风量降温效果有限; 基于需冷量计算(2534 kW), 选用水冷式集中制冷降温系统(WAT)后, 工作面温度降低3°C~4°C, 有效地将温度控制在26°C以下。本研究为类似地质条件下深部矿井的热害治理提供了理论依据和工程实践参考。

关键词

高温热害, 温度场, 数值模拟, 回采工作面, 需冷量

Study on Heat Hazard Analysis and Mechanical Cooling Technology of Deep Mining Face in a Mine

Wenbin Zhao¹, Yacheng Wang^{1*}, Jianqiang Mi², Rui Gao², Jian Meng², Sheng Sun³

¹College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Lu'an Xinjiang Coal Chemical (Group) Co., Ltd., Hami Xinjiang

³Shandong Lilou Coal Industry Co., Ltd., Heze Shandong

Received: December 31, 2025; accepted: February 15, 2026; published: March 19, 2026

*通讯作者。

文章引用: 赵文彬, 王亚诚, 米建强, 高睿, 孟建, 孙胜. 某矿深部回采工作面热害分析及机械降温技术研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(2): 422-433. DOI: 10.12677/me.2026.142045

Abstract

With the depletion of shallow coal resources, the mining depth of coal mines in China has been increasing year by year. The issue of high-temperature heat hazards in deep mines has become increasingly prominent, posing a serious threat to the health of underground workers and safe production. This paper takes a deep mining face in a northwest mine as its research subject. Through a combination of field measurements, theoretical analysis, and FLUENT numerical simulation, it systematically analyzes the causes of heat hazards in the mining face and the distribution patterns of the temperature field. Research findings indicate that the primary heat sources contributing to high temperatures in the working face are: heat dissipation from the coal body itself (accounting for 50%~60%), heat dissipation from oxidized residual coal in the goaf, heat conduction from adjacent goafs, and heat dissipation from mechanical equipment operation. The uneven distribution of these heat sources leads to localized high temperatures within the working face. The actual mining depth of this face (350 m) exceeds the mine's ventilation-cooling limit depth (293 m), making temperature reduction through increased airflow alone ineffective. Based on cooling demand calculations (2534 kW), the adoption of the water-cooled centralized refrigeration cooling system (WAT) reduced face temperatures by 3°C~4°C, effectively maintaining temperatures below 26°C. This study provides theoretical foundations and engineering practice references for heat hazard management in deep mines under similar geological conditions.

Keywords

High-Temperature Heat Hazard, Temperature Field, Numerical Simulation, Mining Face, Cooling Requirement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

深部开采是保障我国能源供给的必然趋势，然而随之而来的高地温问题构成了严重的矿井热害。当采掘工作面空气温度超过 26°C 时，作业人员的工作效率显著下降，事故率攀升，机械设备故障率增加，严重制约矿井的安全高效生产[1]-[3]。《煤矿安全规程》明确规定，采掘工作面空气温度不得超过 26°C[4]。因此，开展矿井高温热害形成机理及防治技术研究具有重要的理论意义和工程价值。

国内外学者在矿井热害领域已取得丰富成果。国外从 20 世纪 70 年代起，矿井降温理论及技术迅速发展[5][6]。国内研究虽起步较晚，但在地热调查、围岩热物理性质测定、热环境模拟及降温技术装备研发等方面取得了长足进步[7][8]。然而，针对特定矿区深部工作面的热源精准辨识、温度场分布预测及高效经济降温方案优化的系统性研究仍显不足[9]-[11]。

本文以西北某矿 N4107 工作面为工程背景，该工作面开采深度大，春季实测温度已接近或超过 26°C 限值，夏季热害问题更为严峻。研究通过现场实测理清主要热源，利用数值模拟揭示温度场分布规律并预测夏季工况，评估通风降温极限，最终计算需冷量并成功应用机械降温系统，以期类似条件矿井的热害治理提供借鉴。

2. 工作面热害现状与热源分析

2.1. 工作面概况

N4107 工作面位于+750 m 水平, 开采深度 370 m, 煤层平均厚度 8.7 m, 倾角约 9°, 采用综合机械化放顶煤工艺。工作面斜长 240 m, 走向长度 2128 m。地质勘探表明该区域原始岩温超过 35°C。工作面设计风量为 2400 m³/min。

2.2. 热源调查与分析

通过对工作面煤壁温度、风流温度、采空区温度及设备运行状态的系统测定, 识别出四大主要热源:

煤体散热: 工作面煤壁温度分布不均, 中部高、两端低。风流温度与煤壁温度呈强正相关性, 煤体散热是工作面的主导热源, 约占全部热源的 50%~60%。

采空区散热: 采空区内遗煤氧化放热及邻近地质断层导热量大。实测显示支架后部(靠近采空区)温度普遍高于 26°C, 局部达 30°C。

机械设备散热: 采煤机、运输机等设备总功率达 8679.4 kW, 估算散热量约 2603.82 kW, 设备表面温度可达 40°C, 对局部环境造成显著影响。

相邻采空区导热: 工作面回风巷一侧为相邻工作面采空区, 其间留有保护煤柱。实测表明煤柱温度不均, 导致回风隅角及回风巷局部出现高温点, 回风流温度由 25°C 升至 26.4°C 以上。工作面风流温度从进风侧向回风侧总体呈上升趋势, 但受上述多热源不均匀分布影响, 存在明显的局部高温区, 热害问题已然显现。

2.3. 通风降温可行性分析

矿井通风降温的有效性随开采深度增加而降低。引入“通风降温极限开采深度”概念进行判断, 即仅靠通风能使工作面末端风温满足规程要求的最大开采深度[12]-[15]。通过模拟巷道风路法计算, 该矿在春季工况下的极限开采深度约为 293 m。

N4107 工作面实际开采深度为 370 m, 已超过其通风降温极限深度。进一步利用 FLUENT 软件模拟不同风量(1200/2400/3000 m³/min)下的工作面温度场。模拟结果表明, 即使在最大允许风量下, 工作面温度仍难以有效降至 26°C 以下, 尤其在夏季进风温度升高后, 增风降温效果更不理想。因此, 必须采用人工制冷等主动降温措施。

3. 工作面温度场数值模拟与预测

3.1. 模型建立

为方便利用 FLUENT 进行工作面的数值模拟分析, 首先建立工作面及采空区的物理模型。本文利用 Geometry 软件建立工作面及采空区数学模型, 由近工作面进风巷、回采工作面、近工作面回风巷及采空区 4 部分组成。其中进回风巷设置为宽 4.5 m, 高 4 m, 长 30 m; 工作面设置为宽 6 m, 高 4 m, 长 240 m; 采空区宽 240 m, 掘进至 200 m, 高 10 m。在液压支架后部设置长 1 m, 宽 4 m 的三角形, 模拟综采支架与采空区矸石接触区域; 工作面近回风巷处设置一宽 1.5 m, 长 4 m, 高 0.5 m 的长方体仪器, 模拟机械设备, 模型如图 1 所示。

工作面模型 $x = 200$ m 处面为 wall1, 温度设置为 30°C; $y = 0$ m 处面为 wall2, 温度设置为 28°C; $y = 240$ m 处面设置为 wall3, 温度设置为 25°C; 进风端温度设置为 13°C, 建立边界条件。

3.2. 工作面受煤壁温度影响分析

风流在流动过程中, 工作面煤壁温度高, 首先与近煤壁低温风流进行热传递, 近煤壁风流温度升高,

较高温风流进而与距煤壁较远的低温风流进行热传递,与此同时,热量由采空区后部传递至回采工作面,与工作面风流进行热传递,呈现出近煤壁及采空区区域风流温度高,远离煤壁及采空区风流温度低的现象。另外,相邻工作面采空区热量传递至保护煤柱,与风流在上隅角进行热交换,造成上隅角附近风流温度较高。工作面近回风巷处设有一仪器温度较高,该处工作面 0.5 m 高度环境温度上升至 298 K 以上,对仪器附近小范围内环境温度具有影响,对大范围环境温度影响微弱。

由图 2 可以看到,随着与煤壁距离的逐渐增加,煤壁对环境温度的影响逐渐减弱。

工作面上隅角附近,局部温度相对较高,造成局部高温现象,且采空区近工作面区域在该处温度较高,与风流热交换弱,其主要原因在于:当风流流经工作面上隅角时,会出现涡流现象,致使风流与围岩壁面热交换不均匀。另外,采空区接近进风巷处温度较低,近回风巷和工作面中部温度较高,在上隅角同样出现局部高温现象。

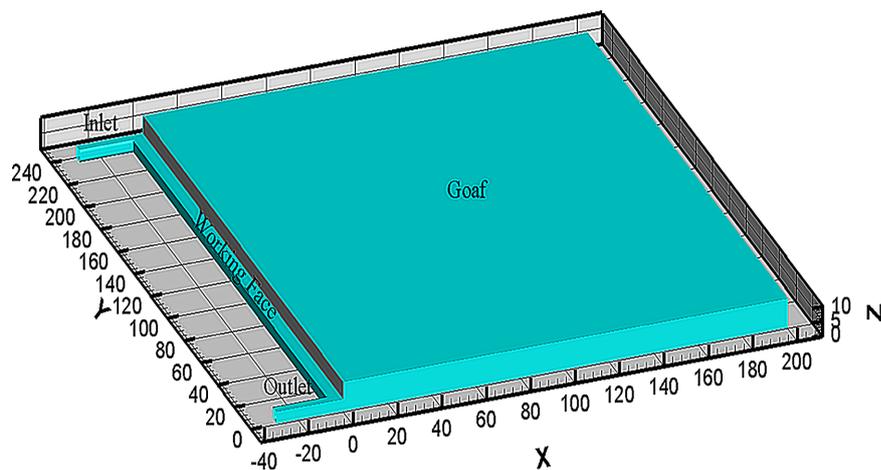


Figure 1. Working face model diagram
图 1. 工作面模型图

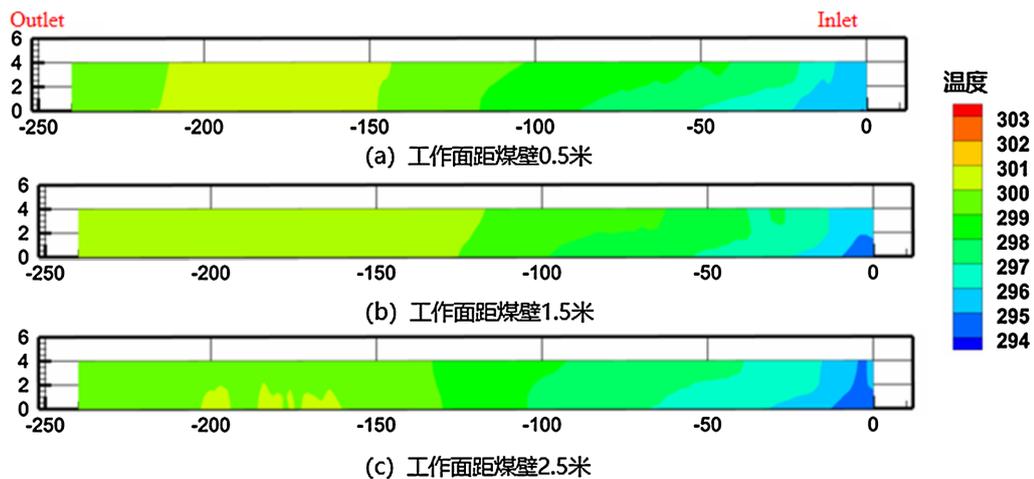


Figure 2. Temperature slice diagram of working face from coal wall
图 2. 工作面距煤壁温度切片图

3.3. 工作面温度模拟预测

数据实际测量时间为春季 3 月份,测量季节大气温度低,进风流受大气及地温影响,温度普遍偏低,

而某矿井处于西北某矿地区，夏季平均气温 32℃，进风流气温将达到 20℃。现利用 FLUENT 软件对工作面夏季温度进行模拟，达到预测的目的。其中，工作面进风流温度设置为 20℃，其他条件不变，探讨工作面夏季热害状况。

由图 3 可看出，工作面温度分布不均匀，仍然呈现出靠近开采煤体和采空区风流温度高，工作面中部风流温度低的现象。靠近开采煤体温度为最高，达到 300 K，并向远离煤体方向呈阶梯式降低。风流由进风端进入采空区后，向采空区深处温度呈阶梯式递增，但受到漏风量的影响，递增程度不均匀，在采空区边缘增温快，向深部增温速度逐渐平缓。工作面进入夏季后，采空区热量增大，向工作面散热范围加深；同时，相邻工作面采空区温度升高，散热增大，更多的热量通过保护煤柱传至工作面，使得大范围内的风流被加热。夏季工作面热源仍以开采煤体为主，同时本工作面采空区及相邻工作面采空区对工作面温度影响增大，由此可见，夏季工作面热害问题更为严重。

对综采支架后 0.5 m 进行温度切片，如图 4 所示。该处为工作面与采空区相接部分，其温度分布

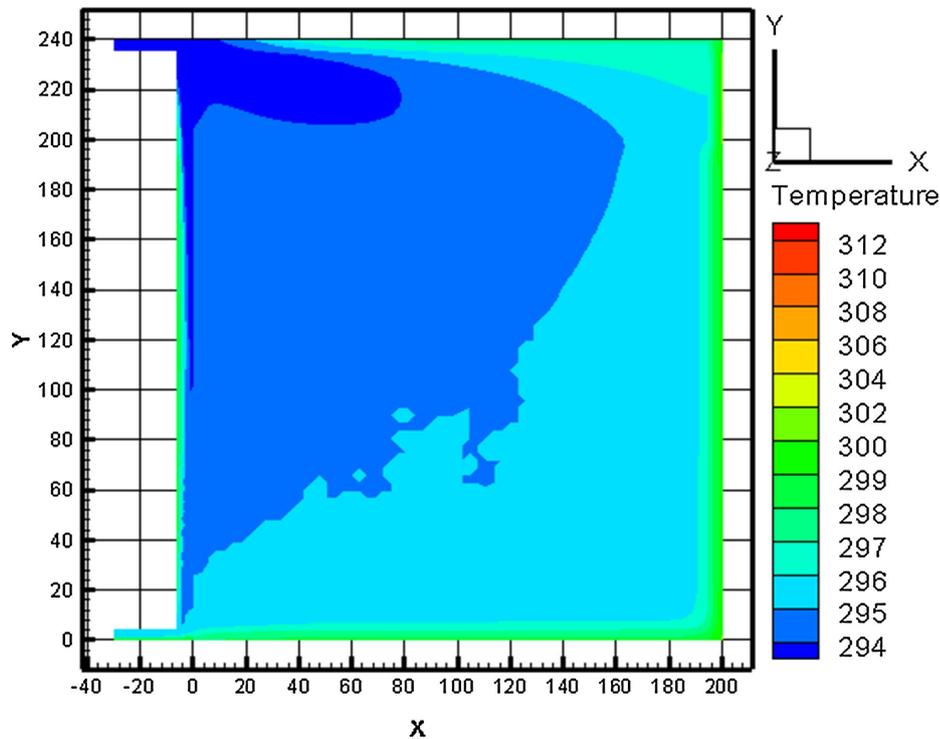


Figure 3. Prediction of temperature distribution in summer working face
图 3. 夏季工作面温度分布预测

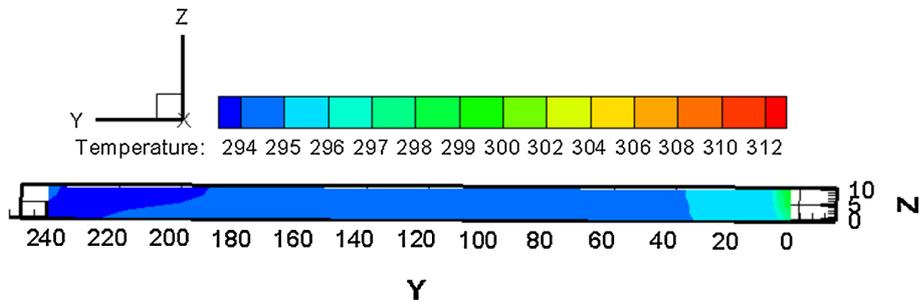


Figure 4. 0.5 m slice after summer shelf
图 4. 夏季架后 0.5 m 切片

可以反映工作面采空区对工作面温度的影响。整体来看,进风端风流温度低,回风端温度高。夏季进风温度高,同时受到采空区热源的影响,在工作面温度逐渐攀升,与春季温度分布相比较,风流温度有升温速度更快,升温 2°C 所用距离更短的特点,采空区对工作面温度的影响相较于春季增大。在工作面回风隅角处,受到涡流现象及相邻工作面采空区的影响,出现热量堆积,温度较高,且相较于春季,加热范围更广,影响更大。在夏季,本工作面采空区及相邻工作面采空区放热同样为工作面高温热害的重要热源。

如图5为工作面z方向 0.5 m 切片,在工作面回风巷附近有一机械设备。由图5可以看出,机械设备周围环境温度达到 312 K ,对附近生产环境造成高温影响,使附近工作人员的舒适度及工作效率降低,但对于大范围温度影响范围较小。

经模拟预测,夏季工作面主要热源为开采煤体、本工作面采空区、相邻工作面采空区及机械设备放热,其中开采煤体热量为工作面主要热源。由于夏季大气变化,工作面进风温度升高,并且夏季采空区附近断层向采空区传递热量增大,相邻采空区传热增加,工作面面临更为严重的热害问题,应采取切实有效的降温措施加以解决。

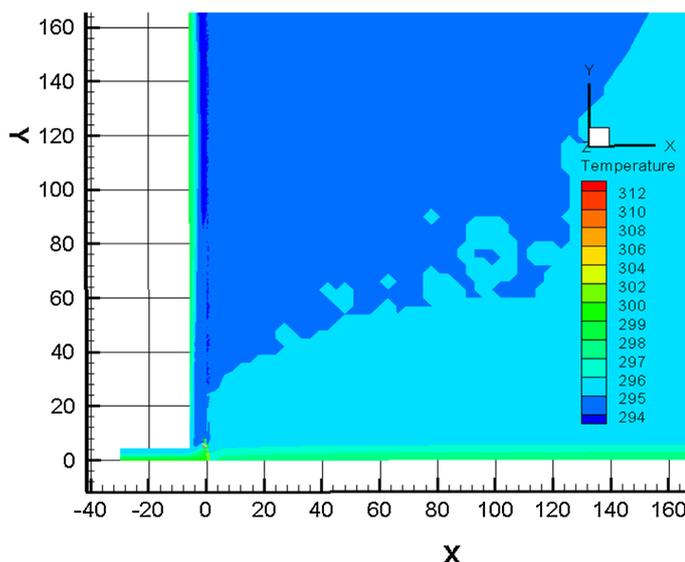


Figure 5. Temperature slice at 0.5 m from the ground in summer
图5. 夏季距离地面为 0.5 m 时温度切片

3.4. 工作面风流模拟

在工作面众多降温措施中,通过调节风量来达到降温目的是最为基础的一种措施。可以利用 FLUENT 软件分别对春季及夏季不同风量下的温度场进行模拟,探讨调节风量对于本工作面降温的有效性。

设置入风温度 13°C ,工作面风量分别为 $1200\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $2400\text{ m}^3/\text{min}$ 及 $3000\text{ m}^3/\text{min}$,模拟工作面春季不同风量下的降温效果,如图6~8。整体来看,风流在煤壁、采空区及相邻采空区、机械设备放热的影响下,温度分布不均匀,在靠近热源处温度较高,向远离热源处阶梯式降低。当进风量为 $1200\text{ m}^3/\text{min}$ 及 $2400\text{ m}^3/\text{min}$ 时,风流在工作面中段温度达到 300 K ,回风温度达到 302 K ,温度较高,两个风量下的温度差距不大;当工作面进风量达到 $3000\text{ m}^3/\text{min}$ 时,进风风温达到 294 K ,且工作面中段及回风温度普遍较高,降温效果不理想。

设置入风温度 20°C ,工作面风量分别为 $1200\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $2400\text{ m}^3/\text{min}$ 及 $3000\text{ m}^3/\text{min}$,模拟工作面夏季不同风量下的降温效果,如图9~11。整体来看,在开采煤体、采空区及相邻采空区、机械设备放热四个

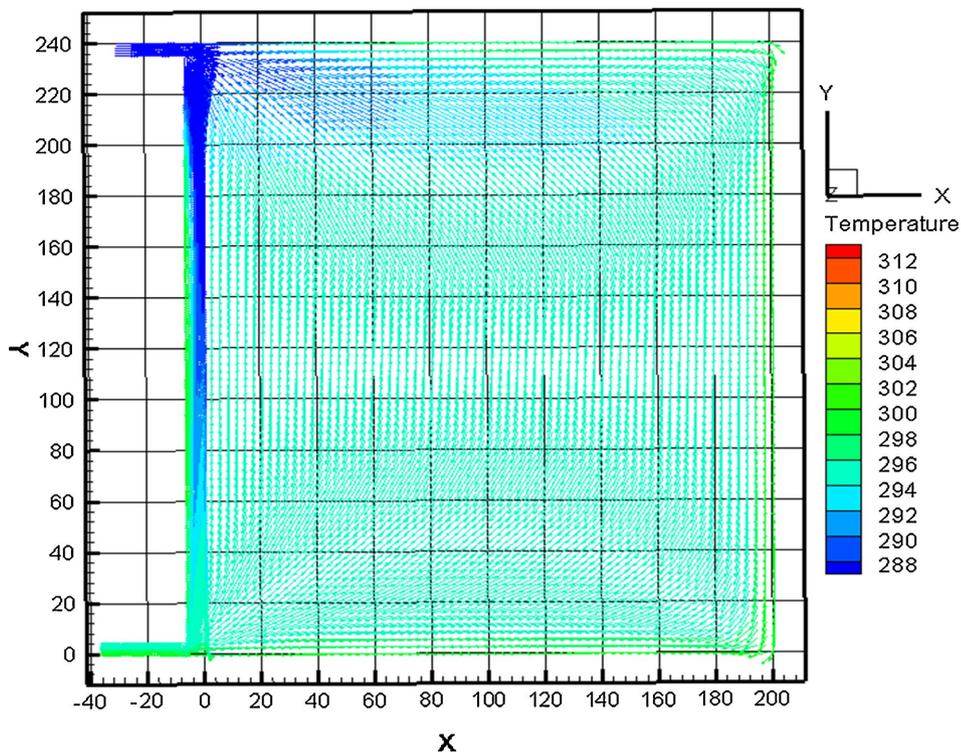


Figure 6. Air flow temperature in spring when air volume is 1200 m³/min
图 6. 春季风量 1200 m³/min 时风流温度

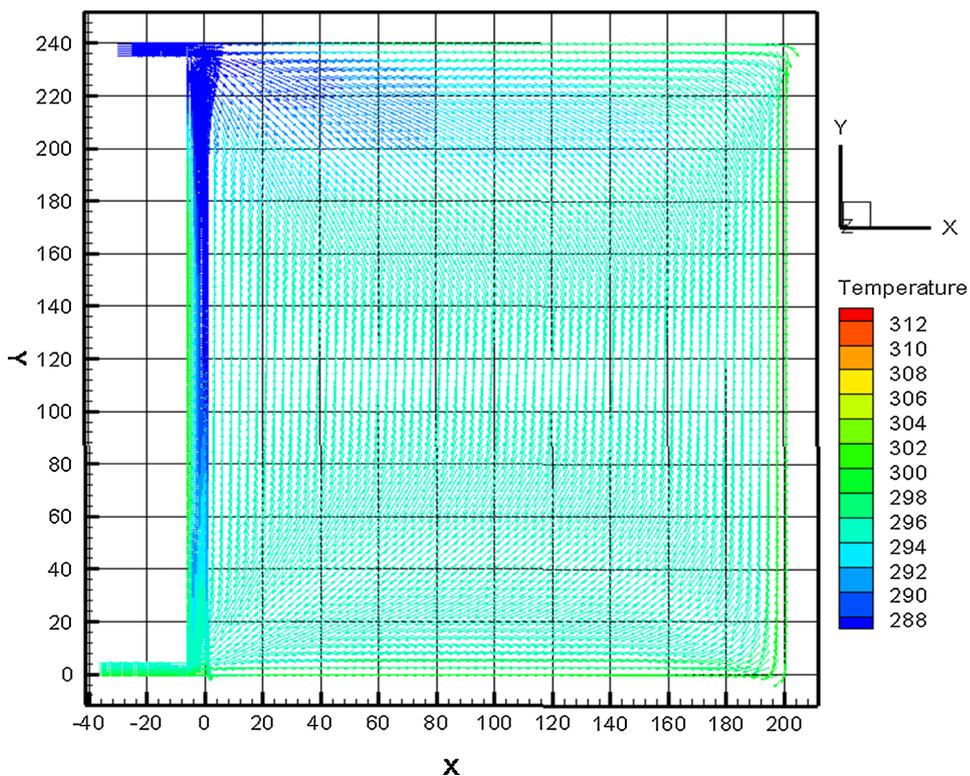


Figure 7. Air flow temperature in spring when air volume is 2400 m³/min
图 7. 春季风量 2400 m³/min 时风流温度

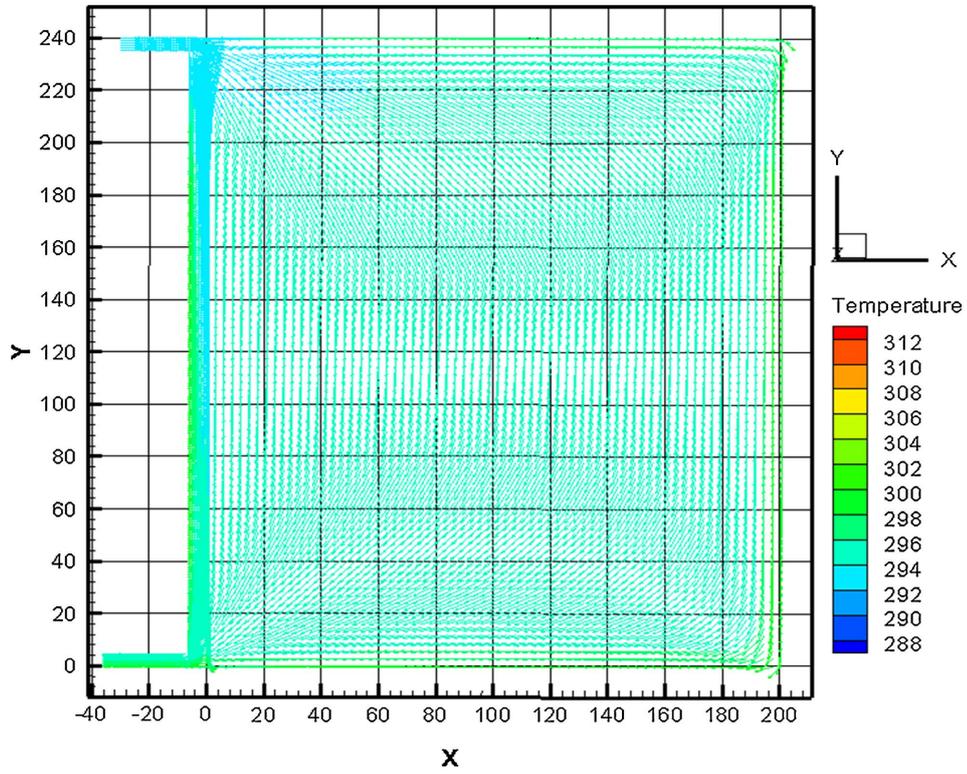


Figure 8. Air flow temperature in spring when air volume is 2400 m³/min
 图 8. 春季风量 2400 m³/min 时风流温度

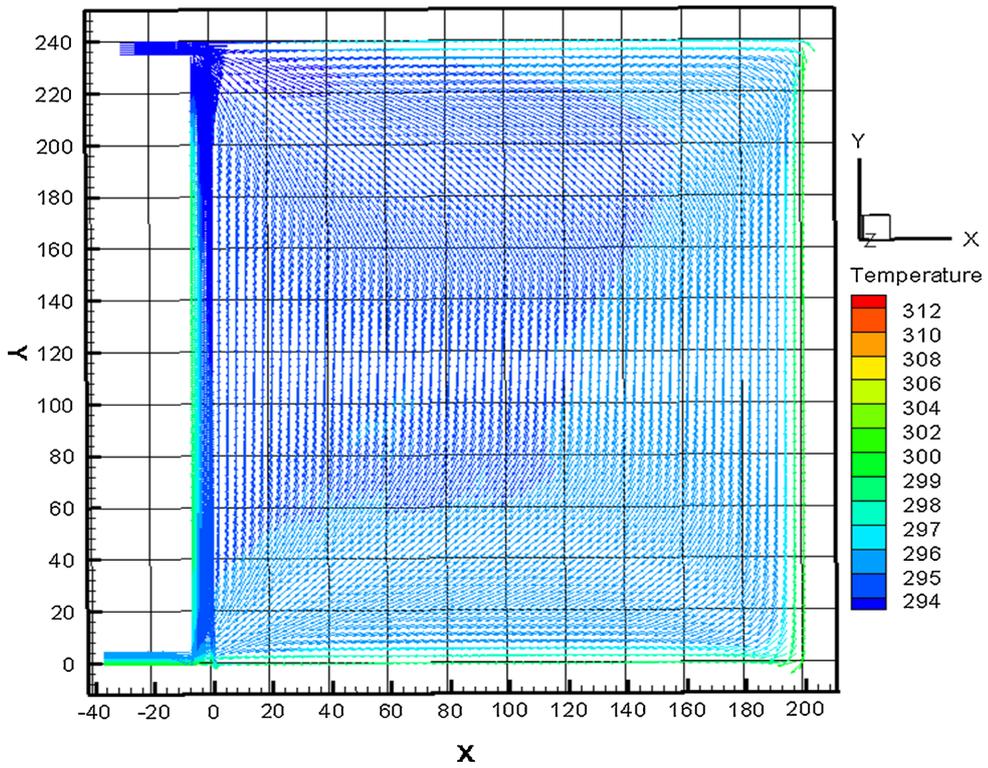


Figure 9. Air flow temperature in summer when air volume is 1200 m³/min
 图 9. 夏季风量 1200 m³/min 时风流温度

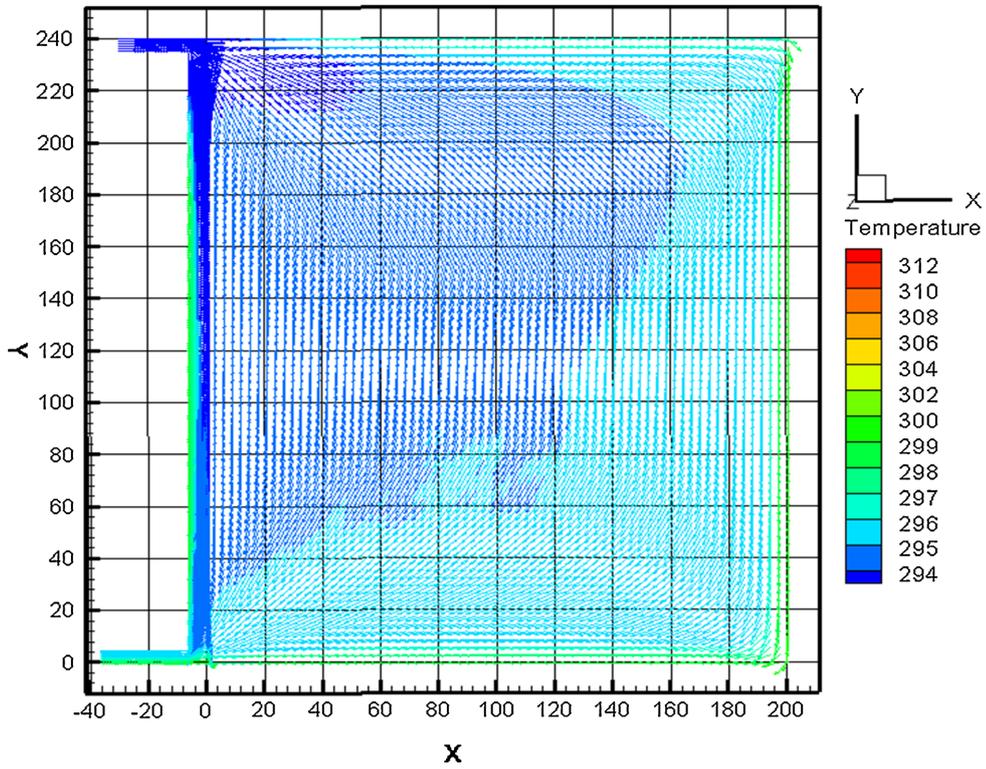


Figure 10. Air flow temperature in summer when air volume is 2400 m³/min
图 10. 夏季风量 2400 m³/min 时风流温度

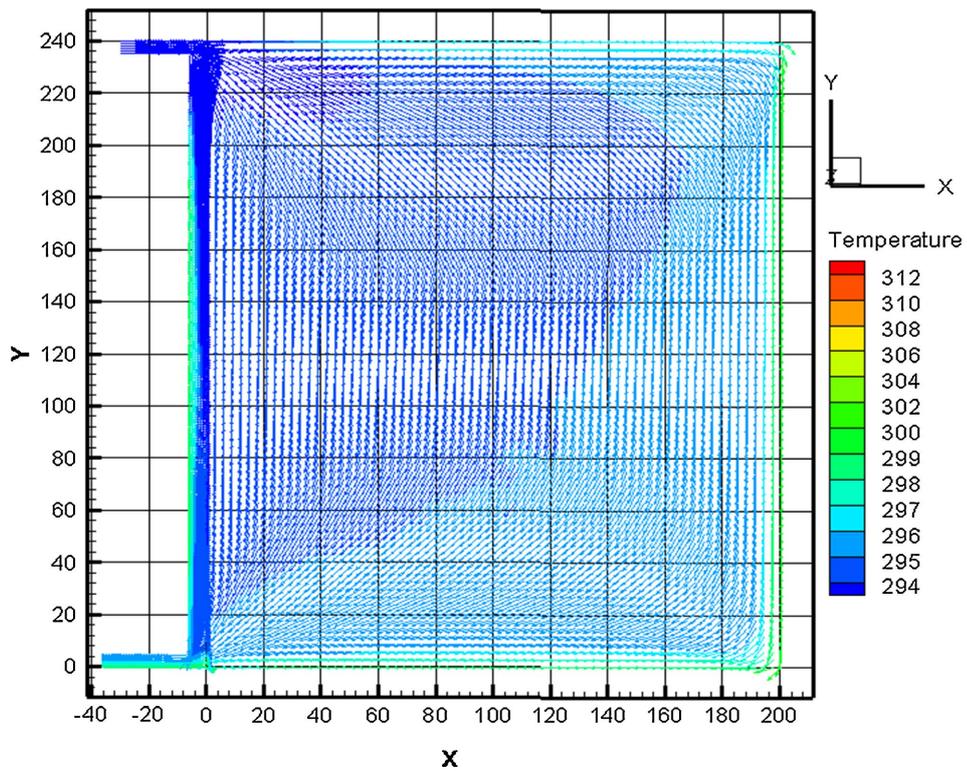


Figure 11. Air flow temperature in summer when air volume is 3000 m³/min
图 11. 夏季风量 3000 m³/min 时风流温度

主要热源的影响下, 风流在工作面上呈现出靠近热源温度高, 并向远离热源处温度递减的特点, 风量为 $1200 \text{ m}^3/\text{min}$ 及 $2400 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 工作面中段温度达到 300 K , 回风温度达到 302 K , 在回风隅角甚至达到 304 K ; 风量为 $3000 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 工作面风流温度同样较高, 未达到理想降温效果。

通过对春季及夏季不同风量下工作面温度的分析, 可以看到利用传统调节风量降温的措施对于该工作面降温效果不明显。为解决工作面热害问题, 应探索其他有效的降温方式。

4. 机械降温方案设计与应用效果

4.1. 需冷量计算

采用焓值计算法进行工作面需冷量计算。计算参数如下: 风流质量流量 $M_B = 44.8 \text{ kg/s}$, 降温前回风口风流焓值 $i_0 = 123.72 \text{ kJ/kg}$, 目标(降温后)回风口风流焓值 $i_1 = 78.56 \text{ kJ/kg}$, 巷道周长 $U = 27.2 \text{ m}$, 冷却段长度 $L = 240 \text{ m}$, 围岩不稳定换热系数 $K_r = 0.003856 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。计算公式如下:

$$Q_{j\text{冷}} = M_B (i_0 - i_1) + K_r U L \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta t = \frac{t + t_0}{2} - \frac{t + t_1}{2} \quad (2)$$

代入数据计算得基本需冷量 $Q_{j\text{冷}}$ 为 2112 kW 。考虑冷量损失及一定裕量, 取备用系数 $k = 1.2$ 则 N4107 工作面设计冷负荷为:

$$Q_{xt} = Q_{jm} \times k = 2112 \times 1.2 \approx 2534 \text{ kW} \quad (3)$$

4.2. 降温方案选择与应用

如图 12 所示, 根据计算冷负荷及矿井实际条件, 选用水冷式集中制冷降温系统(WAT)。该系统采用井下制冷、地面排热模式, 制冷效率高。具体部署为: 在工作面进风顺槽安装 4 台 450 kW 空冷器, 回风顺槽安装 2 台 450 kW 空冷器, 总制冷能力 2700 kW , 满足 2534 kW 的冷负荷需求。

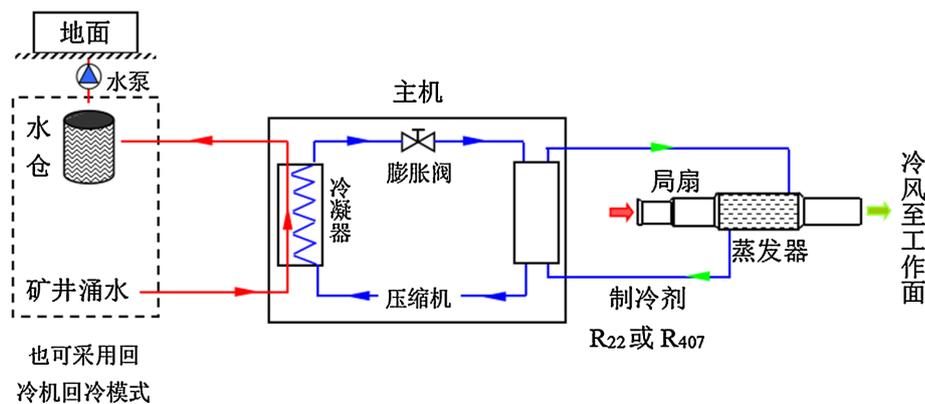


Figure 12. Mine local cooling system flow chart
图 12. 矿井局部降温系统流程图

如图 13 所示, 应用结果表明, 该系统运行稳定, 成功将 N4107 工作面温度降低 $3\text{C} \sim 4\text{C}$, 有效控制 在 26C 以下, 改善了作业环境, 保障了安全生产。

5. 结论

- 1) N4107 工作面高温热害主要由煤体散热、采空区散热、相邻采空区导热及机械设备散热四类热源

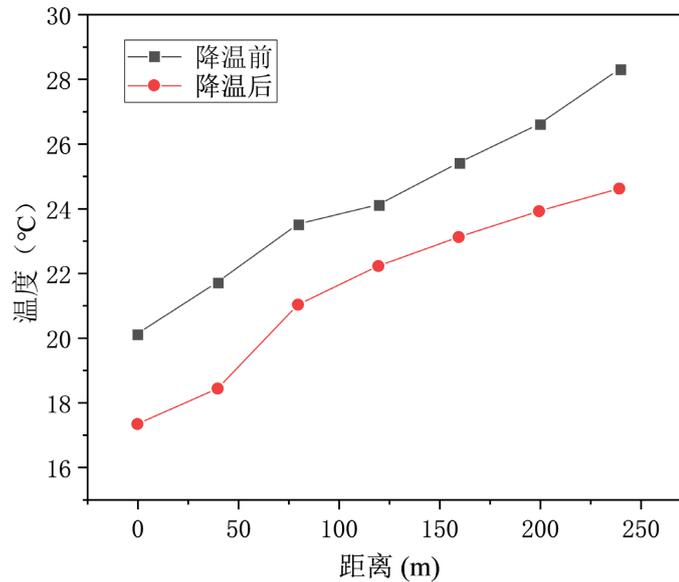


Figure 13. Comparison chart before and after the application of cooling system
图 13. 降温系统应用前后对比图

共同导致，且热源分布不均造成工作面存在局部高温区。

2) 该工作面开采深度(370 m)已超过矿井通风降温极限深度(293 m)，数值模拟证实单纯增大风量无法解决其热害问题。

3) FLUENT 数值模拟能有效反映工作面温度场分布规律，预测结果显示夏季热害问题较春季更为严峻。

4) 基于需冷量计算(2534 kW)选用的 WAT 集中制冷降温系统在现场应用取得了良好效果，为类似深部高温矿井的热害治理提供了可行的技术路径。

参考文献

- [1] 杨嘉雨. 深井高温热害预警与防治方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2026.
- [2] 薛志波, 商博锋, 张嘉伟, 等. 高温井下测井仪热管理系统数值仿真分析[J]. 钻采工艺, 2021, 44(5): 92-96.
- [3] 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.
- [4] Zhu, J., Zhang, H., Ma, G., Tan, Y. and Wang, Y. (2023) Ground Temperature Distribution and Evolution of Lanzhou Subway in the Chinese Loess Plateau. *Case Studies in Thermal Engineering*, **43**, Article ID: 102803. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102803>
- [5] Xu, Y., Li, Z., Li, G., Jalilinasrabad, S., Zhai, X., Chen, Y., et al. (2023) A Thermal Environment Prediction Method for a Mine Ventilation Roadway Based on a Numerical Method: A Case Study. *Case Studies in Thermal Engineering*, **42**, Article ID: 102733. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102733>
- [6] Wang, Y., Zhou, X., Liu, X., Chen, X., Xu, Q. and Wang, Q. (2023) Ambient Temperature Prediction Model and Cooling Requirement Analyze in the High-Altitude Construction Tunnel Passing through the Abnormally High Geothermal Region. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **141**, Article ID: 105360. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105360>
- [7] 严鹏. 二道沟金矿深井开采可控循环通风系统研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [8] 张胜利, 卢晓通, 袁东升. 基于云模型的矿井热害评价体系研究[J]. 黄金, 2022, 43(5): 87-92.
- [9] 藏英涵, 李先福, 吝曼卿, 等. 磷矿井下通风系统风险评估与监测预警研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(11): 115-121.
- [10] 国家安全生产监督管理总局. 煤炭安全规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- [11] 冯康伟. 谢桥矿 2212(1)工作面高温热害防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.

- [12] 杨德源, 杨天鸿. 矿井热环境及其控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [13] 陈赓. 基于 GIS 的顶板岩体稳定性定量评价[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2012.
- [14] 褚召祥. 我国煤矿高温热害防治需求调查分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(4): 199-202.
- [15] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.