Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1501-1509
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146149

Hans汉斯

# 超深矿井复杂巷道通风降温探究

**侯伯允**

山东黄金矿业科技有限公司深井开采实验室分公司，山东 烟台

收稿日期：2026年9月4日；录用日期：2026年10月15日；发布日期：2026年11月4日

## 摘　要

**随着矿井开采深度不断增加，地温升高、通风阻力增大及热害问题日益突出，严重威胁作业安全与生产效率。针对超深矿井复杂巷道系统中存在的风流紊乱、热量积聚及降温效果不稳定等难题，本文基于计算流体动力学(CFD)方法，构建巷道三维物理模型，结合动量守恒方程与能量方程，对不同进风温度、风速及巷道结构条件下的风流运移规律与温度场分布进行数值模拟。通过分析整体风流组织特征、局部热环境演化及降温措施的响应效果，揭示关键参数对巷道热环境的影响机制，为优化超深矿井通风系统设计与高效降温技术应用提供理论支撑与实践依据。当风速为0.25 m/s左右时，温度随距离线性升高的函数关系为：C = 26.5 + 0.00732x。研究表明，单纯降低送风温度非最优方案，关键在于优化风流分配。**

## 关键词

**深部矿井，风流分配，数值模拟，降温效果，巷道通风**

# Investigation into Ventilation and Cooling for Complex Roadways in Ultra-Deep Mines

**Boyun Hou**

Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd., Yantai Shandong

Received: September 4, 2026; accepted: October 15, 2026; published: November 4, 2026

## Abstract

**As mining depth increases, issues such as rising ground temperature, growing ventilation resistance, and severe heat hazards become increasingly prominent, posing serious threats to operational safety and production efficiency. To address the challenges of airflow disorder, heat accumulation, and unstable cooling performance in complex roadway systems of ultra-deep mines, this**

文章引用: 侯伯允. 超深矿井复杂巷道通风降温探究[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1501-1509.
DOI: 10.12677/me.2026.146149

**study employs a computational fluid dynamics (CFD) approach to construct a three-dimensional physical model of roadways. By incorporating the momentum conservation equation and the energy equation, numerical simulations are conducted to investigate airflow migration patterns and temperature field distributions under different inlet air temperatures, air velocities, and roadway structural conditions. Through analyzing overall airflow organization characteristics, local thermal environment evolution, and the response effects of cooling measures, the influence mechanisms of key parameters on the roadway thermal environment are revealed. This provides theoretical support and practical guidance for optimizing ventilation system design and implementing efficient cooling technologies in ultra-deep mines. At an air velocity of approximately 0.25 m/s, the temperature increases linearly with distance, described by the function: C = 26.5 + 0.00732x. The results indicate that simply lowering the supply air temperature is not the optimal solution; rather, the key lies in optimizing airflow distribution.**

## Keywords

**Deep Mine, Airflow Distribution, Numerical Simulation, Cooling Effect, Roadway Ventilation**

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

随着科学技术的日益发展，矿井开采深度不断增大。随着矿井深度的增加，岩体温度大致上呈线性上升，深度每增加一百米温度约增加 1.9℃~2.2℃，深度超过 1400 m 时温度可高达 42.63℃。在不施加降温措施的情况下，工人难以在该高温环境下工作，严重影响工人安全、高效生产[1]-[3]。现如今随着浅层地表矿产资源的枯竭，更深的地下矿产开采工作成为必须面对的任务，目前井下降温控制主要受制于通风降温。随着深度的增加，通风要求难度也越高，这就要求通风温度和通风策略合理、有效。合理制定通风参数和线路将大大节约成本和提高降温效果，利用数值仿真模拟方法能低成本获取较为准确的通风策略，从而实现科学保障工人作业环境[4]-[6]。

针对上述问题，国内外学者围绕矿井热环境预测与通风优化开展了大量研究。在理论解析方面，戴旻旻针对深部金属矿构建了通风状况模拟实验平台，对采场内的通风情况进行了研究[7]。张瑞明等人对水平掘进巷道进行通风降温试验，对掘进巷道内的通风速度和温度变化进行了研究[8]。周闯等人对矿井内风流的压力与温度进行模拟得到了二者之间部分变化规律[9]。然而，现有数值研究多聚焦于单一巷道或独立采区，缺乏对全矿井通风网络与热源耦合效应的系统建模；同时，对通风策略的优化往往局限于局部参数调整，未能将降温目标与能耗约束纳入统一寻优框架。超深矿井巷道系统往往具有拓扑结构复杂、分支众多、断面变化频繁等特点，导致风流在运移过程中易产生涡流、回流等紊乱现象，使得热量在局部区域积聚，形成高温热点。传统的经验公式或简化的一维网络解算方法难以精确描述复杂空间内的三维温度场分布及风流–围岩热交换过程，无法为精细化降温提供足够的数据支撑。因此，引入计算流体动力学技术，建立符合实际工况的三维数值模型，对巷道内风流运移规律及温度场演化进行高精度模拟，已成为解决深部矿井热害治理难题的重要手段[10]-[14]。本文旨在通过构建超深矿井复杂巷道的三维物理模型，探究不同通风参数下的热环境响应机制，以期为制定科学合理的通风降温方案提供理论依据与技术参考。

## 2. 模型构建及边界条件

### 物理模型参数及网格划分

将某矿区深部巷道及相关通风连接巷道构建物理模型。依据现场 CAD 图纸为巷道路径，利用 Solidworks 构建等比例巷道模型，包括三个水平中段、斜坡道、2 个回风井如图 1 所示。巷道中段断面设置宽度 4.6 m，高度为 3.2 m；回风井直径均为 3.0 m；溜井直径 4.0 m；进风井直径为 6.2 m。

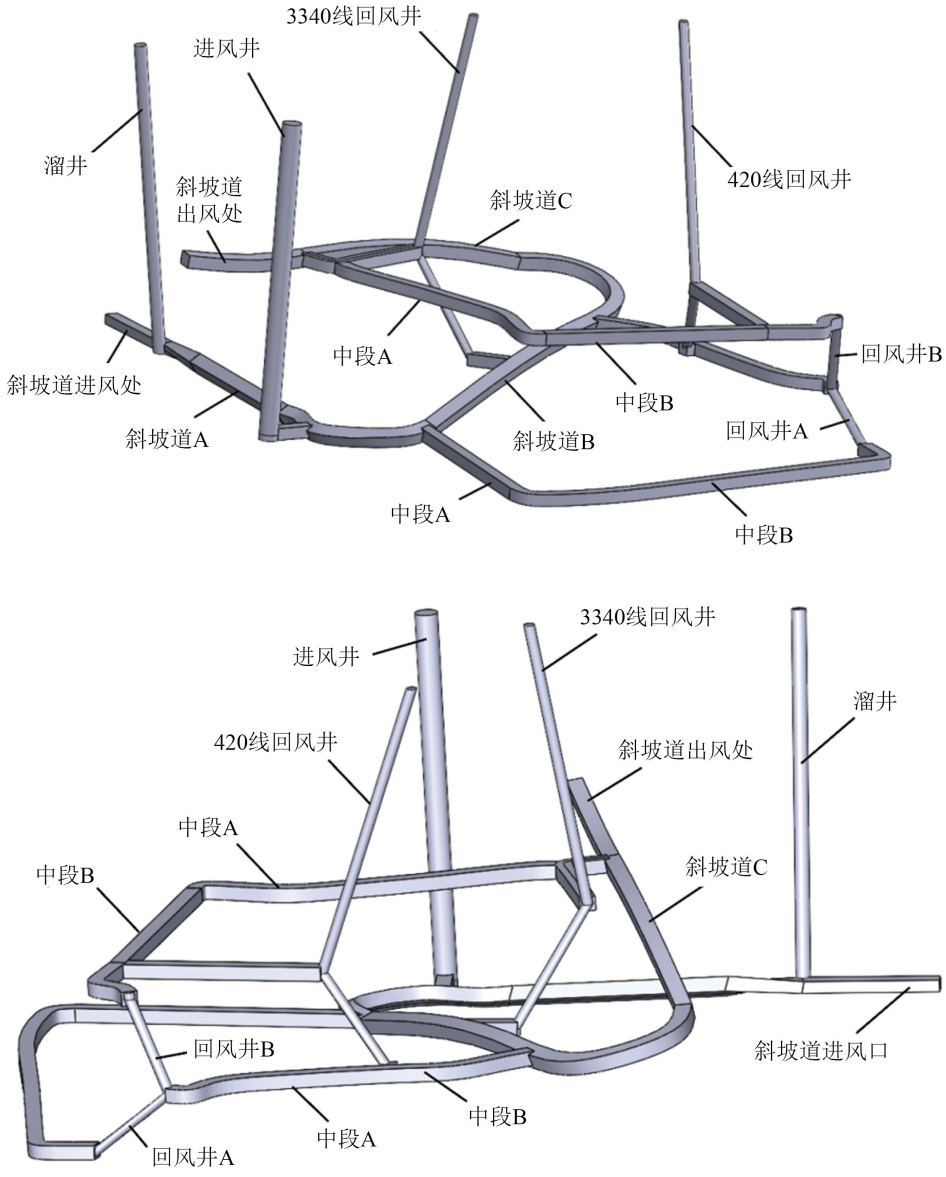



**Figure 1.** Roadway model
**图 1.** 巷道模型

本研究采用 ANSYS ICEM CFD 软件对计算域进行网格划分。网格质量如图 2 所示，网格质量低于 0.3 的不超过 30 个，均处于可接受范围内。

仿真试验物理边界条件如下表 1、表 2 所示。

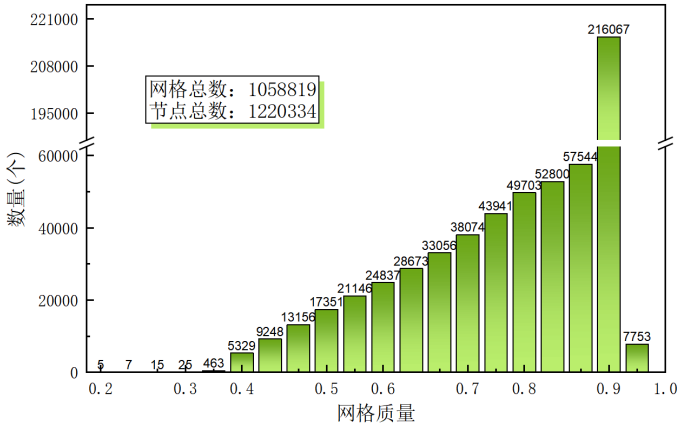



**Figure 2.** Mesh quality statistics
**图 2.** 网格质量统计

**Table 1.** Simulation parameter settings
**表 1.** 仿真模拟参数设置

| 名称 | 选项 | 名称 | 选项 |
|---|---|---|---|
| Time | Steady | Number of Iterations | 5000 |
| Model | *k*-omega SST | Energy | on |
| Options | Production Limiter | Initialization | Standard Initialization |
| Scheme | Coupled | Turbulent Kinetic Energy | 1 |

**Table 2.** Boundary condition settings
**表 2.** 边界条件设置

| 名称 | 风速 | 温度 |
|---|---|---|
| −1080 m 进风口 | 1.8 m/s | 294 K |
| 溜井进风口 | 1.4 m/s | 294 K |
| −980~−1080 m 进风井 | 1.1 m/s | 294 K |

为模拟岩层实际温度情况，对物理模型进行地温梯度设置。地面深度每增加 1 m 温度增加 0.027 摄氏度。地深最小处为最低温度，地深最大处为最高温度，温度区间为 32.88℃~36.24℃，具体地温梯度分布情况如图 3 所示。

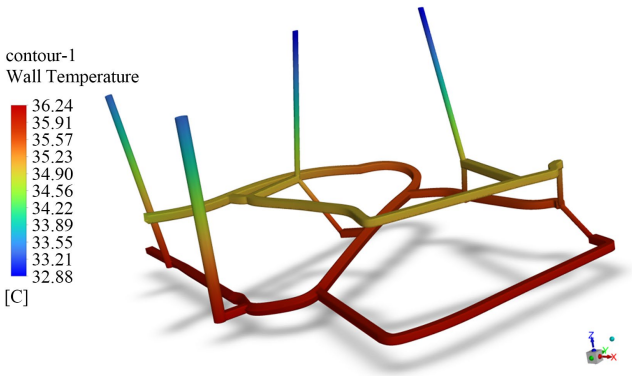



**Figure 3.** Setting of roadway wall temperature
**图 3.** 巷道壁面温度设定

## 3. 巷道风流运移及温度模拟结果分析

### 3.1. 模拟结果分析

#### 3.1.1. 整体风流及温度模拟结果分析

空气的流动情况是影响巷道内温度的主要因素之一，良好的通风情况能够有效降低巷道内的温度。故优先对整个巷道进行通风分析，在斜坡道进风口、溜井进风口和进风井入口处设置温度为21℃风流，在3340线回风井、420线回风井和斜坡道出风口设置为1 atm压强的出风口。风流运移情况如下图4所示：

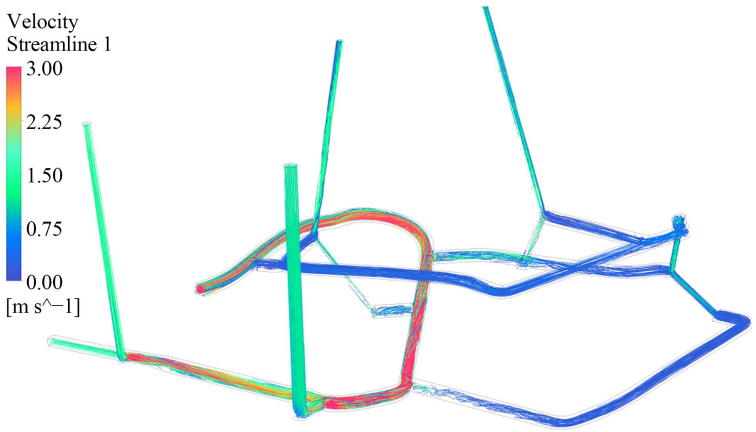



**Figure 4.** Airflow velocity in the roadway
**图4.** 巷道内风流速度

大部分风流在斜坡道内运移，仅有小部分风流进入平巷。整个斜坡道风速在1.5 m/s至3.0 m/s之间，而−1050 m、−1065 m和−1080 m水平中段风速基本小于1.0 m/s，回风井风速在1.5 m/s左右。最大风速出现在斜坡道A和斜坡道B连接处，该位置由三处风流流入并汇集至此处。此时具有较高风速的风流在该位置经过弯曲的斜坡道后，风流的运移方向向斜坡道B方向，绝大部分运移至斜坡道B。因为此时中段A入口方向与来风方向大于九十度，输送的新鲜风流均难以进入−1080 m中段A。低速度风流区域温度明显高于高速度风流区域。

#### 3.1.2. 降温效果分析

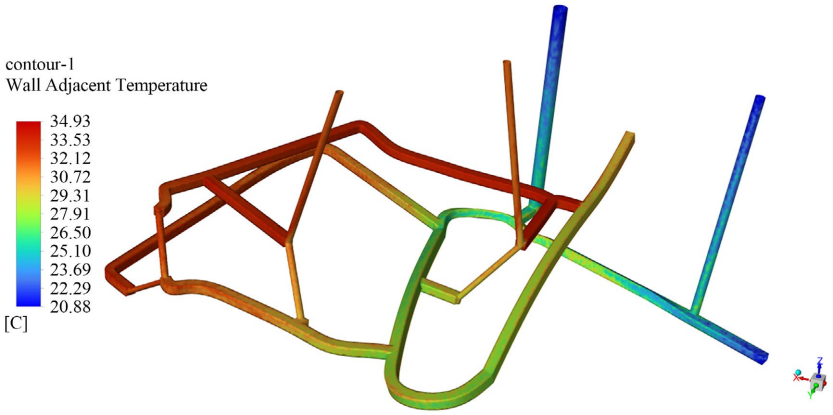



**Figure 5.** Temperature near the roadway wall surface
**图5.** 巷道壁面附近温度

如图 5，在入口风流温度为 21℃时，巷道内风流随着运移时间和运移距离的增加，风流温度逐渐上升。相同风流运移距离下，风速与风流温度升高速度成负相关。在入口风流温度为 21℃时，斜坡道温度基本可降低在 29℃以下温度，但各个中段巷道温度降低效果明显较差。在入口温度降低至 12℃后，斜坡道的温度范围在 12℃~25℃左右，而中段的温度范围在 24℃以上。−1050 m 中段风流入口处温度约为 27℃，由于 1050 中段风速较低，散热能力较差，温度很快升高至 28℃及以上。风流运移至斜坡道后，风流温度很快降至 24℃及以下。风流绝大多数在斜坡道内运移，进入中段的风流太少，导致中段温度升高快。斜坡道内的风流仅携带了较少的热量就运移离开，未能发挥较好的散热作用。仅仅减低风流温度大小不是解决降温问题的最优解决方案，需要进一步优化风流分配才能获得更大的降温效果。

## 4. 不同条件下温度下模拟结果分析

### 4.1. 不同温度风流模拟结果分析

为研究输送的风流温度对巷道内降低温度影响的大小，对输送风流初始温度设置为 12℃、15℃、18℃、21℃，降温效果如下图 6 所示。通过对比不同风流温度下的降温效果，以此分析风流温度对复杂巷道的影响。

通风区域内低温风流难以进入中段发挥降温效果，因为−1080 m 中段 A 入口方向与来风方向大于九十度，输送的新鲜风流均难以进入−1080 m 中段 A。而−1050 m 中段、−1065 m 中段的风流均来自于−1080 m 中段，故仅有少量的低温风流进入中段携带热量，仅仅减低风流温度大小不是解决降温问题的最优解决方案，需要进一步优化风流分配才能获得更大的降温效果。

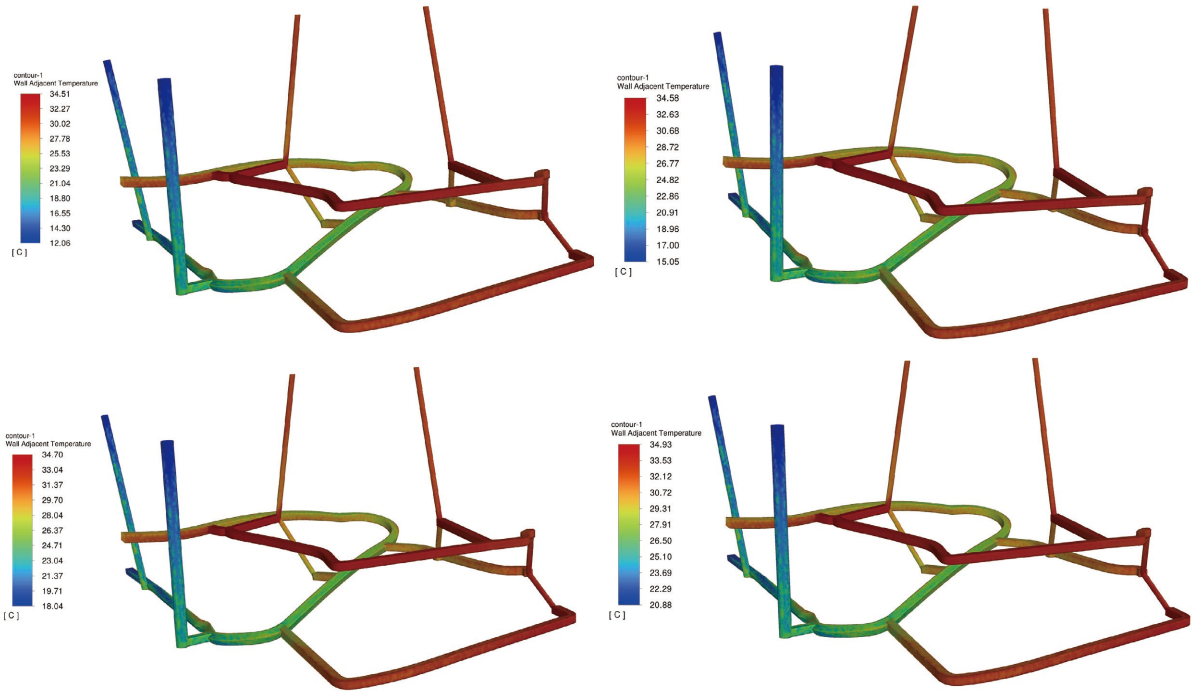



**Figure 6.** Cooling curves at different temperatures
**图 6.** 不同温度降温图

在入口风流温度为 12℃时，斜坡道的温度范围在 12℃~25℃左右，而中段的温度范围在 24℃以上。斜坡道风流不能进入中段巷道进行有效降温，故在通风设计不合理的情况下一味依靠降低温度难以达到

良好的降温效果。在入口风流温度为 15℃时，斜坡道的降温效果较为明显，中段降温效果依旧不明显，仅在溜井和−980~−1080 m 进风井位置有一定的温度下降现象。在入口风流温度为 18℃时，斜坡道温度均可降低至 28℃以下温度，但−1050 m~−1080 m 中段温度降低效果明显较差。−1050 m 和−1065 m 中段温度仍然可达 28℃，−1080 m 中段降至 28℃以下温度。

## 4.2. 局部结果分析

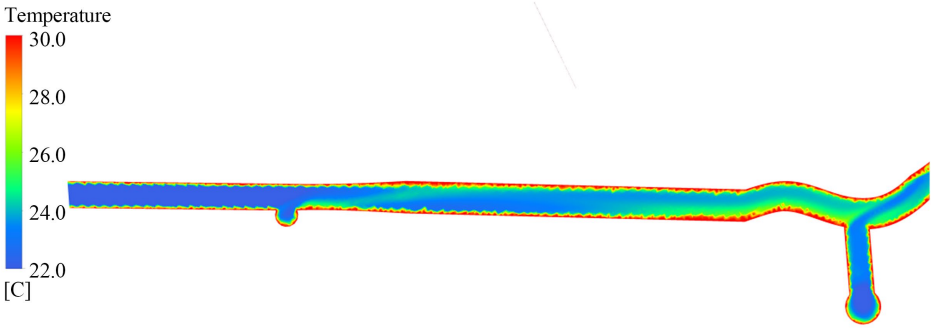



**Figure 7.** Temperature contour map within the roadway
**图 7.** 巷道内温度云图

根据风流矢量云图(图 7)可知，在−1080 m 中段 A、−1080 m 中段 B、−1065 m 中段 A、−1065 m 中段 A 和−1050 m 中段 B 均风量稀少，并且风速过低。由于−1080 m 中段 A 与来风方向角度过大，导致风流虽然较大，但大部分风流难以运移至−1080 m 中段 A，导致与其连通的−1080 m 中段 B、−1065 m 中段 A、−1050 m 中段 A 和−1050 m 中段风量均过小。所以−1080 m 中段 A 入风口处能够得到充分风流是解决该部分风量过低问题的关键。

−1080 m 进风处风速约在 1.5 m/s 左右，在溜井风流汇入后风速增大至 3.0~4.5 m/s 左右，在运移至−980~−1080 m 进风井之前风速趋近于 2 m/s 左右。在−980~−1080 m 进风井风流汇入后，风速最大可达 6.0 m/s。

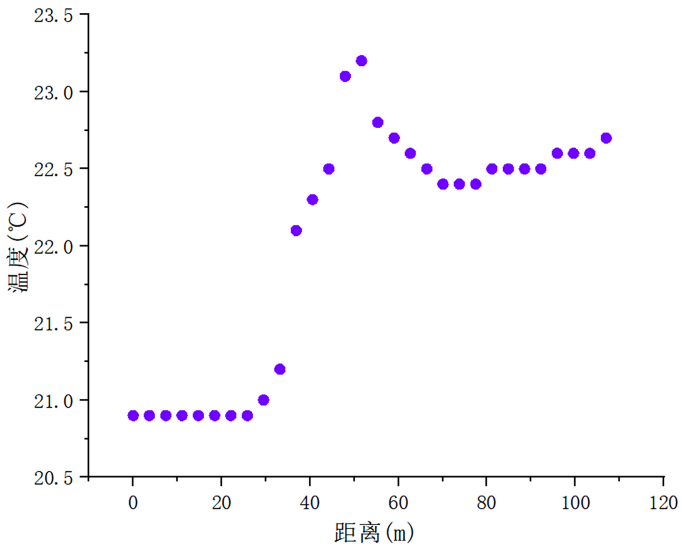



**Figure 8.** Scatter plot of temperature changes in Ramp A
**图 8.** 斜坡道 A 温度变化散点图

如图 8，1080 中段入口的温度维持在 20.8℃左右，因为此时巷道走向平直，风流状态为层流状态运移，与巷道壁面热量难以传递至巷道中心位置。而在运移距离达到三十米左右后温度突然开始上升，最高温度上升至 23℃左右。该位置的温度上升为溜井中风流携带其壁面热量所致。风流受到扰动后，温度在约运移距离为 50 m 的位置达到峰值，温度在运移距离为 70 m 的位置开始逐渐上升。

−1080 m 中段 A 平均温度在 26.3 摄氏度左右，−1080 m 中段 B 平均温度在 26.7 摄氏度左右，温度在 24℃~28℃之间逐渐增大。

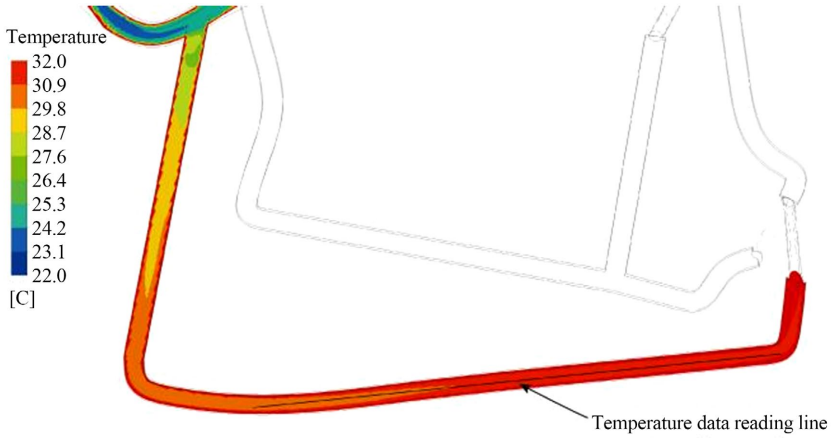



**Figure 9.** Wind speed contour map of the −1080 m intermediate level
**图 9.** −1080 m 中段风速云图

−1080 m 中段与斜坡道交界处的风量分配是三个中段风量大小的关键因素，故而该处的风量分配是巷道中段降温效果的重要影响因素。由图 9 中可看出，风流无法借助巷道形状改变风流方向，难以通过有效的方式进入−1080 m 中段。

在−1080 m 中段 B 走向为直线的部分巷道提取了部分温度参数，温度提取线位置如上图所示，均匀提取 30 个温度值，当风速为 0.25 m/s 左右时，具体结果如下图 10 所示。

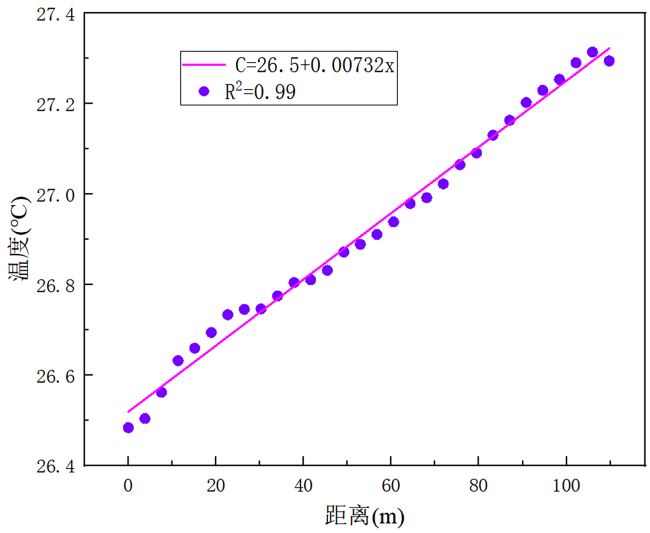



**Figure 10.** Temperature variation along the extraction line at the 1080 m intermediate level
**图 10.** 1080 m 中段温度提取线位置温度变化图

风流初始温度约在21℃左右，风流每向前运移10 m温度约增加0.367摄氏度。由于风流速度较快，风流与壁面接触时间少，风流温度上升不高。相对地，此时风流速度较快，岩石温度释放的热量能被较快携带释放。当风速为0.25 m/s左右时，距离与温度的函数关系为：C = 26.5 + 0.00732x。

−1080 m中段温度范围在23.25℃~28.15℃，由入口风流温度在23℃左右，逐渐增加至出口温度约27.5℃左右。同样的风流运移距离，−1080 m中段明显升温速度明显。

## 5. 结论

在−1080 m中段A、−1080 m中段B、−1065 m中段A、−1065 m中段A和−1050 m中段B均风量稀少，并且风速过低。由于−1080 m中段A与来风方向角度过大，导致风流虽然较大，但大部分风流难以运移至−1080 m中段A，导致与其连通的−1080 m中段B、−1065 m中段A、−1050 m中段A和−1050 m中段风量均过小。所以−1080 m中段A入风口处能够得到充分风流是解决该部分风量过低问题的关键。

巷道内随着风流的运移时间和运移距离增加，风流温度逐渐增大。相同风流运移距离下，风速与风流温度升高速度成负相关。在入口温度降低至18℃后，斜坡道温度均可降低至28℃以下温度，但−1050 m~−1080 m中段温度降低效果明显较差。在入口温度降低至12℃后，斜坡道的温度范围在12℃~25℃左右，而中段的温度范围在24℃以上。在−1080 m中段B位置处，当风速为0.25 m/s左右时，距离与温度的函数关系为：C = 26.5 + 0.00732x。

所研究的通风区域，低温风流难以进入中段发挥降温效果，因为−1080 m中段A入口方向与来风方向大于九十度，输送的新鲜风流均难以进入−1080 m中段A。而−1050 m中段、−1065 m中段的风流均来自于−1080 m中段，故仅有少量的低温风流进入中段携带热量，仅仅减低风流温度大小不是解决降温问题的最优解决方案，需要进一步优化风流分配才能获得更大的降温效果。

## 参考文献

[1] 姚道春. 冬瓜山铜矿矿井通风降温技术方案优化研究[J]. 采矿技术, 2012, 12(2): 44-45+55.
[2] 罗海珠. 矿井通风降温理论与实践[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2013.
[3] 王运敏, 李刚, 徐宇, 等. 我国深部矿井热环境调控研究近20a进展及展望[J]. 金属矿山, 2023(3): 1-13.
[4] 陈宜华, 贾敏涛, 王爽. 矿井通风降温热交换模拟试验装置研究[J]. 现代矿业, 2015, 31(3): 167-168+173.
[5] 刘何清, 吴超, 王卫军, 等. 矿井降温技术研究述评[J]. 金属矿山, 2005(6): 43-46.
[6] 冯伟, 朱方平, 刘全义. 三维仿真软件Ventsim在矿井热害控制中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(6): 776-779.
[7] 戴旻旻. 金属矿深部通风降温数值模拟与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2022.
[8] 张瑞明, 魏丁一, 杜翠凤, 等. 掘进巷道通风降温试验及数值模拟研究[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(9): 51-54.
[9] 周闯, 刘剑, 耿萌, 等. 矿井通风热阻力数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(10): 25-31.
[10] 王瑜, 石晓钧, 景泮印, 等. 深井热害治理场-网复合数值模拟研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(7): 105-113.
[11] 石乃敏, 潘爱民, 沈雁醒. 某金属矿山深部开采人工制冷降温技术方案分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(7): 161-165.
[12] 何茂才, 陈建宏, 永学艳. 深井高温金属矿开采降温方案探讨及应用[J]. 金属矿山, 2011(4): 144-148.
[13] 苏娟, 邢茂. 深井开采高温热害与控制技术[J]. 山西煤炭, 2012, 32(1): 75-77.
[14] 聂进学. 刍议深井高温金属矿开采降温方案的选择[J]. 科技与企业, 2015(16): 117.