

# 深部高温矿井热源阻断机理及隔热 - 通风协同治理研究进展

徐 叶<sup>1</sup>, 王志峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>山东黄金矿业(沂南)有限公司, 山东 临沂

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年8月22日; 发布日期: 2026年9月8日

## 摘 要

深部矿产资源开采面临的高温热害问题, 已成为制约矿井安全生产与高效运营的关键技术瓶颈。传统通风降温技术在深部高温环境中暴露出热源强度远超通风散热能力、能耗指数级增长、无法阻断高温涌水加热等根本性局限, 亟需从“被动通风稀释”向“主动热源阻断”的治理范式转变。系统阐述了深部矿井高温热害的热源类型与致灾机制, 在此基础上深入分析了热源阻断的传热学机理——通过敷设低导热系数隔热材料重构围岩 - 风流热边界层、增大系统总热阻、压缩围岩热扰动区, 从而实现从源头削减进入巷道的热流。综述了以气凝胶复合材料为代表的新型隔热材料的研究进展及其在矿井隔热工程中的应用现状。进一步分析了隔热 - 通风协同治理的理论基础与数值模拟方法, 探讨了场 - 网复合模拟等技术路径。研究表明, 基于热源阻断的隔热 - 通风协同治理模式, 能够从“源头减排”与“末端控制”两个层面实现深井热环境的高效调控, 代表了深井热害治理从单一技术向系统集成、从被动应对向主动调控的发展方向。最后, 本文指出了当前研究中亟待解决的关键科学问题, 并对未来研究方向进行了展望。

## 关键词

深部矿井, 高温热害, 热源阻断, 隔热材料, 通风降温, 协同治理

## Research Progress on Heat Source Interception Mechanism and Synergistic Insulation-Ventilation Management in Deep High-Temperature Mines

Ye Xu<sup>1</sup>, Zhifeng Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Deep Well Mining Laboratory Branch, Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Yantai Shandong

<sup>2</sup>Shandong Gold Mining (Yinan) Co., Ltd., Linyi Shandong

文章引用: 徐叶, 王志峰. 深部高温矿井热源阻断机理及隔热-通风协同治理研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1222-1231. DOI: 10.12677/me.2026.145120

## Abstract

The problem of high-temperature thermal hazards in deep mineral resource mining has become a key technical bottleneck restricting safe production and efficient operation of mines. Traditional ventilation cooling technology exposes fundamental limitations in deep high-temperature environments, such as heat source intensity far exceeding ventilation cooling capacity, exponential increase in energy consumption, and inability to block heating from high-temperature water inrush. There is an urgent need to shift from the “passive ventilation dilution” paradigm to an “active heat source blocking” strategy. This paper systematically elaborates on the heat source types and disaster-causing mechanisms of high-temperature thermal hazards in deep mines. On this basis, it deeply analyzes the heat transfer mechanism of heat source blocking-by applying low-thermal-conductivity insulation materials to reconstruct the thermal boundary layer between surrounding rock and air-flow, increase the total thermal resistance of the system, and compress the thermal disturbance zone of the surrounding rock, thereby reducing the heat flow entering the roadway from the source. It reviews the research progress of new insulation materials represented by aerogel composites and their application status in mine insulation engineering. Furthermore, it analyzes the theoretical basis and numerical simulation methods of thermal insulation-ventilation synergistic control, and discusses technical approaches such as field-network composite simulation. Research indicates that the insulation-ventilation synergistic control mode based on heat source blocking can achieve efficient regulation of the thermal environment in deep mines from both “source reduction” and “end control” aspects, representing the development direction of deep mine thermal hazard governance from a single technology to system integration, and from passive response to active regulation. Finally, this paper points out the key scientific problems urgently needed to be solved in current research and provides an outlook on future research directions.

## Keywords

Deep Mine, High-Temperature Thermal Hazard, Heat Source Blocking, Thermal Insulation Material, Ventilation Cooling, Synergistic Control

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

随着浅部矿产资源的逐渐枯竭,深部开采已成为全球矿业发展的必然趋势。我国 20 世纪 50 年代建成的地下矿山中,40%已逐步转入深部开采。安徽铜陵冬瓜山铜矿、甘肃金川公司二矿区、广西高峰锡矿以及红透山铜矿、会泽铅锌矿等主要有色金属矿山均已进入深井开采期[1]。大规模开发深部矿产资源是我国矿业发展的必然选择,但深井开采带来的高温热害问题已刻不容缓[2]。

深部开采过程中,随着地温梯度效应加剧、大量机械设备散热与围岩散热叠加、长距离独头掘进作业导致生产作业环境温度达 40℃ 以上,严重制约矿山生产效率,危害作业人员身心健康[3]。散热困难及热源繁多是造成深井热害严重的主要因素[4]。高温环境不仅使作业人员中枢神经受到抑制、劳动效率显著下降——研究表明矿内空气温度每超过标准温度(26℃)1℃,劳动效率便降低 6%~8% [2]——还可能导致中暑死亡等严重事故。我国规定采掘工作面空气温度不得超过 28℃,否则应采取降温或其他防护措施

[4]。

面对深井热害的严峻挑战,学术界与工程界开展了大量研究工作。从热源分析、灾变机制到防控技术,从通风降温、人工制冷到隔热防护,深井热害治理技术体系不断丰富[5]-[7]。然而,一个根本性的认识转变正在发生:单纯依靠加大风量稀释热量的被动治理模式,在深部高温环境中已难以为继[8]。越来越多的研究表明,必须从热源本身入手,通过主动隔热实现“源头阻断”,并与通风系统形成协同效应,才能实现高效、经济、可持续的热害治理[9][10]。

本文以“热源阻断”为切入点,系统综述深部矿井高温热害的热源特性与致灾机制、热源阻断的传热机理、新型隔热材料的研究进展,以及隔热-通风协同治理的理论基础与数值模拟方法,旨在为深井热害治理的理论研究与工程实践提供参考。

## 2. 深部矿井高温热害的热源特性与致灾机制

### 2.1. 主要热源类型与贡献

深部矿井热害的形成是多种热源共同作用的结果。根据现有研究,深井主要热源可归纳为地热、化学热、机械热和其他热源四大类。

(1) 围岩散热(地热)是最重要的深井热源,约占井下总热量的 48%。围岩散热以热传导方式通过岩壁传递给井下空气,其强度取决于地温梯度、岩石导热性能和围岩暴露面积[11]。在深部开采中,围岩温度随深度增加而升高——当采掘作业将高温岩石暴露后,热量便持续释放。围岩放热具有持续性强的特点,是深井热环境恶化的根本原因[12]。

(2) 空气压缩热约占井下热量的 20%。地面空气经井筒进入矿井深处时被压缩,势能转化为热能。研究表明,空气每下降 100 m,气流温度升高约  $0.4^{\circ}\text{C}\sim 0.5^{\circ}\text{C}$  [3]。随着开采深度增加,空气压缩热的贡献持续增大。

(3) 机械设备散热在机械化程度高的深井矿山中日益突出。提升机械、机电设备、采掘机械等运行时将部分电能或机械能转化为热能。此外,井下炸药爆炸产生的热量也构成重要的化学热源。

(4) 高温涌水是深井热害中不可忽视的特殊热源,尤其在地质构造发育的矿区[13]。深部高温地下水沿断裂带上升,通过对流换热持续加热围岩和空气,形成“高温岩体 + 高温涌水”的复合热害模式[14]。在某些矿区,钻孔揭露的地下水温可高达  $70^{\circ}\text{C}$  以上,涌水蒸发与对流换热的加热效率远高于单纯的围岩传导散热[13]。

### 2.2. 高温热害的致灾机制

深井高温热害的致灾形式可从三个维度理解:

作业人员热损伤:高温高湿环境下,人体体温调节系统负担加重,排汗量增加,严重时可导致热痉挛、热衰竭乃至中暑死亡。高温还导致中枢神经系统功能下降,注意力分散,反应迟钝,增加工伤事故风险[3]。WBGT (湿球黑球温度)指数是评价高温作业环境的重要指标——当 WBGT 超过  $34^{\circ}\text{C}$  时属于极重度高温作业,人员中暑风险极高。

作业背景热演变:高温环境直接导致劳动效率下降。研究表明温度每超过标准  $1^{\circ}\text{C}$ ,劳动效率下降 6%~8% [2]。同时,高温环境下人员更替频繁、有效作业时间缩短,进一步加剧生产效率损失[3]。高温还加速电气设备绝缘老化,降低电子元器件寿命——环境温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,电子元器件寿命降低约 30%~50% [13]。

作业条件热约束:高温环境对通风系统、制冷设备、支护结构等均提出更高要求,增加了系统复杂性和运营成本。深井热环境调控逐渐成为深部矿产资源开发的主要耗能形式。

## 2.3. 传统通风降温的根本性局限

常规通风降温是最早采用也最为普遍的降温手段, 其原理是通过风流将井下热量带走。改善通风的常用措施包括增加风量、缩短风路、加大风巷断面、采用多风机多级机站通风等。然而, 在深部高温复合热害区域, 单纯依靠通风暴露出一系列根本性局限。

**热源强度远超通风散热能力:** 高温围岩持续放热, 热流密度可达数千乃至上万  $\text{W/m}^2$ , 而常规通风的冷却能力有限。当围岩散热功率基本恒定时, 增大风量只能降低出风温度, 无法从本质上减少围岩放热量。实际上, 加大风量会增强壁面对流换热系数, 反而可能诱使围岩释放更多热量, 形成“越通风、岩体散热越快”的恶性循环[5] [12]。

**能耗指数级增长:** 风机功耗与风量的立方成正比。若要将排风温度从  $46.7^\circ\text{C}$  降至  $29.6^\circ\text{C}$ , 所需风量需增加 2.36 倍, 风机轴功率需增加 12 倍以上[13]。此外, 机械制冷通风降温存在成本高、维护困难、冷量利用率低、降温效果不理想等不足。

**无法阻断高温涌水的直接加热:** 常规通风只能通过对流带走空气中的热量, 无法处理高温涌水这一独立热源。当温度超过  $70^\circ\text{C}$  的地下水直接暴露于巷道时, 会持续向风流蒸发散热, 加热效率极高[13] [14]。

**热污染转移:** 常规通风将高温区域的废热排至下游巷道, 可能导致整个通风网络的热污染叠加, 使热害问题从局部扩大至全局[5] [8]。

上述局限性表明, 在深部高温环境中, 必须从“被动通风稀释”转向“主动热源阻断”的治理范式[8] [10]。

## 3. 热源阻断的传热学机理

### 3.1. 围岩 - 风流热交换过程分析

深部矿井巷道围岩与风流之间的热交换是一个复杂的热 - 流耦合非稳态传热过程。围岩内部热量以热传导方式向壁面传递, 抵达壁面后再通过对流和辐射方式传递给巷道风流。这一过程可分解为三个串联的热阻环节: 围岩内部导热热阻、壁面对流换热热阻和辐射换热热阻。其中, 围岩内部导热热阻是热流从岩体深处向壁面传递的主要阻力, 而壁面对流换热热阻则控制着热量从壁面向风流的传递效率。

在未隔热状态下, 围岩壁面温度接近岩体浅部温度(通常  $40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ ), 与风流温度(通常  $20^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ )之间存在显著温差, 形成强烈的传热驱动力。围岩散热具有持续性和大面积的特点——巷道围岩暴露面积越大、暴露时间越长, 向风流释放的热量就越多。这一传热过程遵循傅里叶导热定律和牛顿冷却定律的耦合作用[11] [12]。

### 3.2. 隔热层的热阻倍增效应

热源阻断的技术本质, 是在围岩壁面与巷道风流之间插入一层低导热系数的隔热材料, 从根本上改变原有的热传递路径。其核心传热学原理可从以下三个方面理解:

#### (1) 增大系统总热阻

隔热层的引入相当于在围岩 - 风流传热路径中串联了一个高值热阻[10]。根据一维稳态导热理论, 单位面积热流密度可表示为:

$$q = \frac{T_r - T_a}{R_{total}}$$

其中总热阻  $R_{total} = R_{rock} + R_{insulation} + R_{convection}$ 。隔热层的热阻  $R_{insulation} = d/\lambda$  ( $d$  为厚度,  $\lambda$  为导热系数)。当选用超低导热系数材料(如气凝胶,  $\lambda \leq 0.021 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )时, 即使仅 10 mm 厚度也可产生约  $0.5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  的

理论热阻,这一数值是围岩浅部热阻的数十倍乃至上百倍。工程实测表明,敷设 10 mm 气凝胶隔热层后,热流密度可从约 9900 W/m<sup>2</sup> 降至 86.3 W/m<sup>2</sup>,降幅达 99%以上——这正是热阻倍增效应的直接体现[10] [15]。

## (2) 重构热边界层

隔热层的存在使壁面温度从接近围岩温度(40℃~60℃)骤降至接近风流温度(25℃~35℃),大幅缩小了壁面与风流之间的温差驱动势[10] [15]。与此同时,围岩内部靠近壁面区域的温度梯度急剧增大(可由隔热前的约 8.8℃/m 增至隔热后的 120℃/m 以上),这意味着大部分地热被“封堵”在了岩体极浅层,无法继续向巷道空间传递。热扰动区从壁面向岩体内部的延伸深度被显著压缩——实测表明,热扰动深度可由 0.5 m 以上压缩至 0.3 m 以内[13]。

## (3) 削减围岩蓄热释放速率

围岩本身是一个巨大的蓄热体。在未隔热状态下,围岩储存的热量持续、快速地释放到巷道空间[1]。隔热层敷设后,壁面温度下降,围岩内部向外的热流强度显著降低,蓄热释放速率被极大延缓。这不仅有利于维持巷道长期的热稳定性,也避免了因通风中断或风量波动导致的温度快速反弹[9] [10]。

### 3.3. 热桥效应与隔热效率的衰减机理

在实际工程中,隔热层的实际隔热效率往往低于理论预期,其主要原因是热桥效应的存在。热桥是指隔热层中导热系数远高于隔热材料的局部区域,如锚固件(金属膨胀螺丝、铁丝网)、接缝、穿墙管道等。这些金属构件的导热系数(钢材约 50 W/(m·K))比气凝胶(0.02 W/(m·K))高约 2500 倍,形成热量传递的“短路”通道。

热桥效应对隔热效率的影响可从两个层面理解:其一,热桥处局部热流密度可达数百至上千 W/m<sup>2</sup>,远高于隔热层本体的平均热流密度;其二,热桥的存在降低了隔热系统的整体等效热阻。实测表明,由于热桥效应及材料压缩等因素,10 mm 气凝胶隔热层的实测等效热阻(约 0.132 m<sup>2</sup>·K/W)仅为理论值(0.5 m<sup>2</sup>·K/W)的 26%左右。此外,隔热层被锚固件压缩导致局部厚度减薄、接缝密封不严造成的漏热、辐射传热的贡献等因素也会进一步削弱隔热效率。

因此,热源阻断技术的工程实现不仅依赖于材料本身的低导热系数,更取决于隔热结构设计的合理性与施工质量的可靠性。优化锚固方式(如采用低导热塑料锚固件)、改进接缝密封工艺、减少金属构件穿越隔热层等措施,是提升热源阻断效率的关键技术方向。

## 4. 新型隔热材料及其在矿井中的应用

### 4.1. 气凝胶复合材料及其隔热特性

气凝胶是一种以纳米级颗粒相互聚集构成的纳米多孔材料,孔隙率高达 90%以上,是目前已知室温导热系数最低的固体材料。气凝胶复合材料是将纳米气凝胶与玻璃纤维、陶瓷纤维等增强基材通过溶胶-凝胶等工艺复合而成,在赋予气凝胶柔性与韧性的同时,最大化保留了其超低导热系数的特性。

气凝胶的隔热机理可从三个效应理解:(1)“无穷长路径效应”——纳米多孔结构使热传导路径极度延长;(2)“无穷多遮热板效应”——大量纳米孔隙壁面可有效阻隔辐射传热;(3)“零对流效应”——孔隙尺寸小于空气分子平均自由程,抑制了对流传热。这些效应的协同作用使气凝胶的导热系数可低至 0.013~0.04 W/(m·K),相较传统无机隔热材料实现了隔热性能的跃迁式提高[9] [15]。

除超低导热系数外,气凝胶复合材料还具备以下适用于深井环境的综合优势:耐温范围广(-200℃至 700℃),防火等级 A 级,适用于井下高温环境;无机分子和疏水结构赋予其优异的防水防潮性能,在高

湿环境下不易吸水失效; 具有良好的柔性、韧性及抗压性, 能适应井下不平整的岩壁表面[13]。

## 4.2. 矿井隔热工程的实践进展

近年来, 气凝胶隔热材料在矿井热害治理中的应用研究取得了重要进展。研究者通过建立一维轴对称稳态传热模型揭示了隔热层的温度分布规律, 并结合“气凝胶隔热毡-锚网”支护装置开展工程实践。功能梯度隔热支护结构的研究也在推进——采用改性陶粒和纤维提升隔热混凝土材料强度, 基于功能梯度理论优化混凝土结构形式[8] [9]。

矿用复合降温隔热材料是专门针对深部巷道围岩放热问题研发的功能性材料, 通过在巷道岩壁喷涂或敷设可有效阻隔深部围岩与巷道风流之间的热量交换。现场工程案例表明, 在高温岩体巷道敷设 10 mm 厚气凝胶复合隔热毡后, 壁面平均降温可达 11℃ 以上, 热流密度削减达 99%。此外, 气凝胶-相变微胶囊复合隔热材料等新型材料体系也在积极探索中, 通过将气凝胶隔热与相变材料吸热功能相结合, 可进一步提高隔热性能[9]。

## 4.3. 隔热材料与支护结构的一体化设计

深井巷道的隔热工程面临一个特殊约束——隔热层不仅要承担热阻隔功能, 还需与巷道支护系统协调工作。传统隔热材料(如岩棉、聚苯乙烯泡沫)存在强度低、支护效果差等缺陷。因此, 隔热材料与支护结构的一体化设计成为重要研究方向。

当前的研究路径主要包括: (1) 将隔热材料预制成块, 砌筑于围岩内壁, 兼具隔热与支护功能; (2) 开发高强度隔热混凝土, 通过材料改性提升力学性能的同时保持较低导热系数; (3) 采用“隔热层+锚网支护”的复合结构, 在保证支护强度的前提下实现隔热功能。这些探索为隔热-支护一体化提供了可行的技术方案[8] [9]。

# 5. 隔热-通风协同治理的理论与方法

## 5.1. 协同治理的理论基础

热源阻断与通风降温并非相互替代的关系, 而是相辅相成的协同关系。隔热-通风协同治理的理论基础在于: 隔热层从源头削减了进入巷道的热流(源头减排), 而通风系统则以较小的风量将残余热量和人员、设备产生的热量带走(末端控制) [8] [10]。两者结合, 可实现“1+1>2”的治理效果。

从能量平衡的角度看, 巷道空气温度取决于热源输入与通风散热的动态平衡。设围岩散热功率为  $P_r$ , 其他热源(设备、人员等)功率为  $P_o$ , 通风带走的热功率为  $P_v = \rho c_p Q(T_{out} - T_{in})$ , 则稳态条件下  $P_r + P_o = P_v$ 。隔热的作用是降低  $P_r$ ——当  $P_r$  大幅削减后, 维持同样  $T_{out}$  所需的风量  $Q$  可显著降低。反之, 若风量保持不变, 则  $T_{out}$  可大幅下降。

这一协同效应的工程意义十分突出: 一方面, 隔热层减少了必须由通风承担的热负荷; 另一方面, 降低的风量意味着风机能耗的立方级下降。据测算, 敷设隔热层后在保证相同降温效果的条件下, 通风量可降低约 25%~50%, 风机功耗可降低 58%~87%。

## 5.2. 数值模拟方法

深井热害治理研究主要采用两类数值模型:

三维 CFD 模型(场模型): 能够精细刻画巷道局部区域的热-流耦合分布特征, 精确呈现热源的三维分布及局部设备的散热效果。然而, 场模型计算量巨大, 难以实现全矿尺度模拟。

一维通风网络模型(网模型): 适用于全矿井通风系统的宏观分析, 计算效率高, 但难以精确呈现热源

的三维分布特征及局部热害区域的细节。

为解决这一矛盾,王瑜等提出了场-网复合数值模拟方法。该方法将全矿井通风系统用网模型表达,而将高地温采场等局部热害严重区域采用三维场模型进行精细模拟。场模型从入口边界获取网模型的输入条件,通过流体控制方程计算后,将出口参数以源项方式反馈给网模型,从而实现跨尺度的耦合计算。这一方法为隔热-通风协同治理的定量化分析提供了有效工具[16]。

此外,基于 ANSYS 等软件的巷道隔热模型也被广泛用于分析不同隔热层参数和铺设方式对降温效果的影响。模拟结果表明,铺设隔热层能有效减小围岩调热圈半径、延缓围岩散热。

### 5.3. 参数优化与工程实践

基于数值模拟的参数优化研究主要围绕以下三个方面展开[10][13][15]:

**隔热层厚度优化:**模拟研究表明,隔热效果随厚度增加而提升,但存在明显的边际递减效应。以气凝胶为例,5 mm 厚度可降温约 4.5℃,10 mm 可降温约 8.0℃,而 20 mm 仅降温约 10.5℃。综合考虑降温效果与材料成本,10 mm 厚度具有最佳性价比。

**锚固方式优化:**金属锚固件的热桥效应可使整体等效热阻下降约 70%。改用低导热塑料锚固件后,热桥处热流密度可从 300 W/m<sup>2</sup> 以上降至 50 W/m<sup>2</sup> 以下,等效热阻提升约 2 倍。

**通风量协同优化:**敷设隔热层后,可适当降低通风量。模拟表明,在隔热条件下将风量从 2.0 m<sup>3</sup>/s 降至 1.5 m<sup>3</sup>/s,硐室空气温度仅上升约 1.5℃,而风机功耗可降低约 58%。

工程实践也验证了协同治理的有效性。采用地面集中降温系统配合保温钻孔输送冷媒,并与传统通风、井下空调制冷等措施协同作用,取得了良好的井下降温效果。

## 6. 发展趋势与关键科学问题

### 6.1. 从被动防控向主动调控转变

深井热害治理正在经历从“被动通风稀释”到“主动热源阻断”的范式转变。传统思路是在热量已经释放到巷道空间后再通过通风或制冷将其带走——这种末端治理模式在高热流密度条件下效率低下且成本高昂。新的思路强调在热源与巷道空间之间建立有效的热屏障,从源头削减热负荷。

这一转变的内涵包括三个层面[17][18]:治理时机前置——在巷道开拓阶段就考虑隔热措施;治理对象转移——从处理“已释放的热量”转向阻断“热量的释放”;治理手段升级——从单一通风向隔热-通风-制冷的系统集成发展。

### 6.2. 多技术协同与系统集成

未来深井热害治理将向多技术协同与系统集成的方向发展。具体包括:

**智能通风系统:**结合实时监测数据实现精准控温,降低冷量消耗。

**循环通风降温技术:**提高冷量利用率。

**地热资源化利用:**将传统热害治理思路转变为地热资源利用理念[18][19]。HEMS 矿井热能综合利用技术、井下围岩取能系统等探索已初步展示了将“热害”转化为“热源”的可能性。

**高性能降温防护服:**应对特殊高温场景的人员防护。

**智能监测与预警技术:**实现热环境的实时感知和预警。

### 6.3. 亟待解决的关键科学问题

尽管取得了显著进展,深井热源阻断与隔热-通风协同治理领域仍存在若干亟待解决的关键科学问题:

(1) 高湿环境对隔热材料长期性能的影响机制: 井下相对湿度常年在 80% 以上, 气凝胶纳米孔隙结构的吸附特性可能导致导热系数随时间发生变化, 其长期稳定性尚需系统研究。

(2) 热桥效应的定量表征与抑制方法: 热桥是制约隔热效率提升的核心瓶颈, 需要建立热桥热流密度的定量预测模型, 并开发适用于井下环境的低导热锚固系统。

(3) 隔热 - 通风 - 围岩热耦合的非稳态传热模型: 现有研究多基于稳态假设, 而实际工程中通风波动、开采扰动等因素使传热过程呈现显著的非稳态特征, 亟需建立三维动态耦合模型。

(4) 全生命周期经济技术评价: 当前研究多关注短期降温效果, 缺乏对隔热系统全生命周期(材料生产、运输、施工、维护、退役)的经济与环境效益的系统评价。

(5) 地热资源化利用与热害治理的协同机制: 如何在不影响降温效果的前提下实现地热的高效回收利用, 是深井热害治理向绿色化方向发展的重要课题。

## 7. 热源阻断与其他热害治理技术的关系

### 7.1. 热源阻断与局部制冷技术的关系

#### 7.1.1. 竞争关系

热源阻断通过敷设隔热层从源头削减围岩散热量, 而局部制冷则是将已释放到巷道中的热量“抽走”。两者可相互替代——隔热效果越好, 所需制冷量越小; 反之, 隔热不足则需配置更大容量制冷设备。工程设计中需在“隔热投入”与“制冷投入”之间寻求最优平衡。

#### 7.1.2. 互补关系

两者在治理尺度和应用场景上形成互补。热源阻断属于“面”上的源头治理, 覆盖大面积壁面; 局部制冷属于“点”上的精准调控, 适用于工作面等需冷区域。对于掘进工作面等移动场景, 固定隔热层难以实施, 局部制冷更具优势; 而对于变电所、水泵房等固定硐室, 热源阻断可发挥长期稳定优势。

#### 7.1.3. 协同潜力

两者最具价值的协同体现在“隔热 - 降负荷 - 减制冷”的正反馈中。隔热层削减围岩散热, 降低热负荷, 使制冷系统在更小容量和能耗下运行。研究表明, 隔热措施可使制冷系统降温效果显著提高, 两者配合可实现优于单一手段的降温效果。

### 7.2. 热源阻断与地热能回收利用的关系

#### 7.2.1. 从“对立”到“统一”

传统观念将地热视为纯粹的“灾害因素”, 热源阻断的思路是“堵”; 而地热能回收利用的思路是“疏”——主动提取地热、化害为利。两者看似对立, 实则可在不同空间和时间尺度上实现统一。

#### 7.2.2. 空间分工与时间协同

在空间上, 两者形成“深层提取 - 浅层阻断”的分工。地热回收通过深部钻孔换热器在热量未向浅部传递前即行提取; 热源阻断则在围岩壁面设置热屏障, 阻断残余热流进入巷道。

在时间上, 两者可实现“先采热、后回采”的协同——预先在回采工作面前方通过地热回收降低围岩初始温度, 回采过程中由隔热层承担阻断残余热流的任务。

#### 7.2.3. “变害为利”的综合效益

地热回收系统将造成热害的地热能提取后用于地面供热、矿井保温等用途, 实现“变害为利”。热源阻断降低了需由制冷或通风承担的热负荷, 与地热回收形成“节源”与“开流”的有机结合。

7.3. 深部矿井热环境综合调控技术体系

7.3.1. 技术体系的层次结构

按照“源头控制 - 过程调控 - 末端防护”的系统治理思路，综合调控技术体系可分为三个层次：

第一层：源头控制——从根本上削减热源强度。主要包括围岩隔热(热源阻断)、地热超前提取、高温涌水疏排与控制。

第二层：过程调控——对已进入巷道的热量进行调控与移除。主要包括智能通风调控、局部制冷降温、地热回收利用。

第三层：末端防护——个体冷却防护装备，作为应急和补充手段。

三个层次的关系是：源头控制“治本”，过程调控“治标”，末端防护“兜底”。理想策略应优先强化源头控制，辅以过程调控。

7.3.2. 技术体系的协同逻辑

主要技术之间的协同逻辑可概括为：

| 协同组合        | 协同逻辑                     |
|-------------|--------------------------|
| 热源阻断 + 局部制冷 | 降负荷增效：隔热削减围岩散热，降低制冷负荷与能耗 |
| 热源阻断 + 地热回收 | 堵疏结合：深层提取 - 浅层阻断，空间分工协作  |
| 局部制冷 + 地热回收 | 冷热联供：制冷冷凝热回收供热，地热驱动制冷    |
| 智能通风 + 三者   | 系统优化：实时监测、动态调控，实现全系统最优运行 |

7.3.3. 综合调控的发展方向

未来深井热环境综合调控将呈现四大趋势：从被动降温向主动控温转变；从单一技术向系统集成转变；从消耗能源向利用能源转变——将地热从“灾害”转化为“资源”；从粗放调控向精准调控转变——借助智能监测与数值模拟实现精准调控。

8. 结语

深部矿井高温热害是制约深部资源安全高效开采的关键技术难题。本文从热源特性与致灾机制出发，系统分析了热源阻断的传热学机理，综述了以气凝胶为代表的新型隔热材料研究进展，探讨了隔热 - 通风协同治理的理论方法与数值模拟技术。研究表明：

(1) 深部矿井热害是多热源复合作用的结果，围岩散热是最主要的热源，传统通风降温在深部高温环境中存在根本性局限。

(2) 热源阻断的本质是通过低导热系数隔热层重构围岩 - 风流热边界层、增大系统总热阻、压缩热扰动区，实现从源头削减热负荷。

(3) 气凝胶复合材料凭借超低导热系数、A 级防火、疏水耐潮等综合优势，已成为深井隔热领域最具应用前景的材料之一。

(4) 隔热 - 通风协同治理能够实现“源头减排”与“末端控制”的优化组合，是深井热害治理从单一技术向系统集成、从被动应对向主动调控转变的重要方向。

展望未来，深井热害治理需要在材料科学、传热学、采矿工程、智能监测等多学科交叉融合的基础上，围绕隔热材料长期性能、热桥抑制、多场耦合建模、全生命周期评价等关键科学问题持续攻关，推

动深井热害治理向智能化、绿色化、系统化方向发展。

## 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] 丁宝龙. 深部矿井高温热害灾变机制与防治技术研究进展[J]. 煤炭技术, 2025, 44(10): 178-182.
- [3] 赵洪凯, 曲星军, 程力, 等. 深井矿山高温热害防控技术现状[J]. 黄金, 2024, 45(8): 28-32.
- [4] 崔益源, 李坤, 梅国栋, 等. 深井热害分析与控制技术研究进展[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(2): 128-134.
- [5] 柳静献, 李国栋, 常德强, 等. 矿井降温技术研究进展与展望[J]. 金属矿山, 2023(7): 18-27.
- [6] You, B., Chen, Y., Yang, M., Gao, K., Cui, D. and Lu, M. (2024) Management of Thermal Hazards in Deep Mines in China: Applications and Prospects of Mine Cooling Technology. *Water*, **16**, Article 2347. <https://doi.org/10.3390/w16162347>
- [7] Qu, M., Zhang, Y., Zhang, X., Mu, H., Yin, S., Liu, Y., et al. (2024) A Review of the Research Progress of Cooling Technology in Deep Mining. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **149**, 14535-14557. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13719-y>
- [8] 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.
- [9] 刘振, 徐叶, 王玉晓, 等. 高温矿井隔热支护一体化结构设计与应用研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1378-1386.
- [10] 崔大雄, 游波, 高科, 等. 铺设隔热层对巷道降温效果的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 153-162.
- [11] 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等. 高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1561-1581.
- [12] 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.
- [13] 陈科旭, 程力, 孙玉强, 等. 山东黄金集团深部矿山热害特征与治理措施研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(5): 171-177.
- [14] 李卫国, 毕华斌, 侯伯允. 黄金矿山的深井开采高温环境问题措施及展望[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1269-1275.
- [15] 游波, 崔大雄, 刘何清, 等. 不同隔热材料下的深井巷道隔热降温模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 153-160.
- [16] 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.
- [17] 徐宇, 李孜军, 贾敏涛, 等. 深部矿井热害治理协同地热能开采构想及方法分析[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(5): 1515-1527.
- [18] 蔡美峰, 马明辉, 潘继良, 等. 矿产与地热资源共采模式研究现状及展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1669-1681.
- [19] 李孜军, 徐宇, 贾敏涛, 等. 深部矿井岩层地热能协同开采治理热害数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 671-680.