

黄金矿山的深井开采高温环境问题措施及展望

李卫国¹, 毕华斌¹, 侯伯允²

¹内蒙古山金昶泰矿业有限责任公司, 内蒙古 包头

²山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 烟台

收稿日期: 2025年9月11日; 录用日期: 2025年10月15日; 发布日期: 2025年11月10日

摘要

黄金矿山开采中的高温热害严重威胁矿山安全与效率。本文针对黄金矿山, 分析了围岩、设备、涌水等主要热源, 阐述了热辐射、传导与对流复合换热机制, 最后针对不同热源问题讨论不同方法效果。研究针对热源问题提出了“疏、堵、降、保、优”的综合治理策略, 涵盖隔热、通风、制冷、个体防护及废热利用等技术。结论指出, 未来需通过系统化、精准化与绿色化的技术集成, 构建黄金矿山经济高效的降温体系, 以实现深部黄金资源的安全绿色开发。

关键词

黄金矿山, 高温热害, 热源分析, 综合治理, 降温技术

High-Temperature Challenges and Prospects in Deep Gold Mining

Weiguo Li¹, Huabin Bi¹, Boyun Hou²

¹Inner Mongolia Shanjin Changtai Mining Co., Ltd., Baotou Inner Mongolia

²Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd., Yantai Shandong

Received: September 11, 2025; accepted: October 15, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

High-temperature heat hazards in gold mining pose serious threats to mine safety and operational efficiency. This study focuses on gold mines, analyzing major heat sources including surrounding rock, equipment, and water inflow, while elucidating the compound heat exchange mechanisms of thermal radiation, conduction, and convection. Corresponding mitigation approaches for different heat sources are discussed. An integrated management strategy of “diversion, blockage, reduction, protection, and optimization” is proposed, incorporating technologies such as thermal insulation,

ventilation, cooling systems, personal protection, and waste heat utilization. The study concludes that future development requires systematic, precise, and green technological integration to establish an economically efficient cooling system for gold mines, ensuring safe and sustainable exploitation of deep gold resources.

Keywords

Gold Mine, High-Temperature Heat Damage, Heat Source Analysis, Comprehensive Management, Cooling Technology

Copyright © 2025 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

随着矿井开采深度的不断增加,深部地下开采是未来矿产资源开发的必然趋势,深部开采中的“三高一扰动”问题愈显突出,深地矿床开采降温与防尘技术相关研究工作迫在眉睫,也是金属矿山安全高效率开采的重中之重[1][2]。中国是世界上高温热害矿井较多的国家之一,就金矿而言,已探明储量中,埋深在1000~2000 m 以内的金矿储量占总储量的 53.2%,非金属矿山也存在相当数量的深井矿山[3]。如此多的热害矿井,如果不研究出成熟、经济、合理的降温技术措施,矿山资源开采将会面临很大的困难,其结果是影响整个国民经济的可持续发展,因此矿井高温热害的治理已成为一个不可忽视且急需解决的问题[4]。

据统计,目前已有的千米深井均已达到一级热害矿井标准。矿井高温环境不仅会影响工作人员身体健康,而且不利于井下设备安全运行以及生产效率提升。随着矿井采深增加,巷道围岩温度随之升高,井下各种热源放热量显著增大,矿井热害治理愈发困难。传统热害治理方法应用于深部矿井时除了面临冷量利用率低、系统维护困难、降温效果不理想等问题之外,还会使得矿井通风与空气调节等环节的能耗显著增加[5]。因此,围绕深部矿井特殊工作环境,进一步变革矿井降温技术是确保矿山安全高效开采的关键。

掌握巷道通风热质传递规律是精准预测巷道风流温度的前提,也是设计科学合理的矿井通风与空气调节措施改善井下热环境的理论基础。风流与巷道围岩之间传热是一个复杂的相互作用、相互影响过程。风流在冷却高温围岩的同时,围岩释放热量加热风流,此过程受到风流流动状态、通风场景、风流和围岩温度等因素的影响[6]-[8]。许多学者在巷道通风传热方面开展了大量研究,其发展脉络包括通风传热经验公式提出、多因数影响通风传热理论研究、通风网络热环境预测、特殊情况通风传热计算、通风系统热环境控制与优化、智能通风调控与节能减排研究多个阶段[9]-[11]。

矿井热害治理一般思路具体来讲:首先开展常规的矿井通风换热和降温分析、井下热源和地质调查,在此基础上对矿井热环境利用 Fluent、VentSim 等仿真模拟软件进行预测和通风网络优化降温;然后,对井下热环境进行评估,当井下热环境没有满足热舒适标准要求时,则根据矿井自身情况选择合适的降温方式,并对其降温效果和降温成本进行分析;最后对采取降温措施后的矿井通风网络进行优化,并再一次对井下热环境进行评估,当井下热环境满足热舒适性标准后,对矿井热能利用展开研究。目前我国高温矿井热害治理主要采取机械制冷降温方式进行降温,虽然取得了一定的效果,但是该方式一般耗能较大、成本较高、系统维护困难。在深部矿井中,由于井巷围岩放热量大、冷凝热排放困难,机械制冷系统不仅制冷效率降低,而且能耗显著增加[12]-[15]。

传统的高温热害治理思路多侧重于单一技术的应用,如增强通风或实施集中机械制冷,虽能在一定

范围内缓解热应力,但在深部开采条件下往往陷入“能耗高、效率低、效果差”的困境[16]。其根本原因在于未能从系统层面协同处理“热量来源、热量输运、热量排除及个体防护”这一完整链条。为此,本文在系统分析深井热源及热交换规律的基础上,创新性地提出“疏、堵、降、保、优”的综合治理框架。该框架并非技术的简单堆砌,而是强调从“源头隔离(堵)、路径调控(疏、优)、末端高效排除(降)和个体安全(保)”进行系统性、多层次的协同干预,旨在打破传统单一技术的局限性,为实现深部矿井热害的绿色、经济、高效治理提供新的理论范式和技术路径。

2. 深井主要高温热源

2.1. 井巷围岩放热

由于围岩持续不断的对井巷内的空气传导热量,在无人因素的影响下巷道内温度接近于巷道内温度。随着矿井深度的增加,岩体温度大致呈线性上升,深度每增加一百米温度约增加 $1.9^{\circ}\text{C}\sim 2.2^{\circ}\text{C}$ 左右。随着风流在井巷内运移,高温围岩影响井巷内空气温度逐渐升高,围岩高温是造成矿井高温的主要原因之一[17]-[19]。

2.2. 机电设备放热

随着现代采矿技术的不断进步,机械化水平逐渐提升,井下机械设备不断增多。随着大型采掘设备的使用,诸多机电设备放热量巨大,在狭窄的井巷中已然成为不可忽视的主要热源。放热机电设备源源不断将一部分电能和化学能转化为热能,对井巷内形成源源不断的热源[20] [21]。

2.3. 井下涌水放热

部分矿井井下存在热水带,热水带可以通过涌水、淋水以及围岩热传导等方式与井巷内部形成热交换。在热水带区域温度远远高于正常工作温度,常见的解决方法可采用隔离、通风降温、利用冷源进行冷热交换等方法。

2.4. 矿井空气压缩热量

矿井风流的压缩热是风流从地表运移至井下深处时,空气受到重力的压缩程度变大。当空气被压缩时,根据热力学第一定律,输入空气系统的能量如果没有以对外做功的形式释放,则会转化为空气的内能,从而导致空气温度升高,往往在矿井深度跨幅较大区域才有较为明显的温度影响。

2.5. 地表空气

在人为干预的情况下,需要将地表空气在风机作用下运移至矿井深处,因而地表大气温度、湿度的变化随之影响到井下温度。气温的季节性的变化也是周期性的,我国最热的时间一般在 7~8 月份,此时由地表流入井巷内时将携带大量热量。在温度较低的矿区冬季的通风甚至反而需要一定程度的加热[22] [23]。

3. 热交换

掌握热交换机制是有效治理矿井热害的理论基础。井下风流与热源之间的热交换主要通过三种形式进行:热辐射、热传导和对流传热。在矿井通风环境中,这三种形式往往同时存在,相互耦合[24]。

3.1. 热辐射

热辐射是指物体因自身温度而以电磁波形式向外发射能量的过程。在矿井中,高温岩壁、机电设备表面等都会持续向周围环境辐射热量。

特点：热辐射不需要介质，可以在真空中传递。其在总热交换量中的占比随岩壁表面温度与风流温度的差值增大而显著增加。

影响因素：辐射换热量主要取决于物体表面的发射率、绝对温度以及相对几何位置。井下岩壁粗糙，发射率较高，具有较强的辐射能力[25]。

3.2. 热传导

热传导是热量通过物体内部或直接接触的物体之间，由高温区域向低温区域传递的过程。在矿井中，这是围岩向风流传热的核心环节。

过程分析：围岩深处的热量通过岩石本身的热传导作用，源源不断地传递至巷道壁面。这个过程遵循傅里叶定律，其传热量与岩石的热导率、岩温梯度以及传热面积成正比。

3.3. 对流传热

对流传热是流体(矿井风流)与固体壁面(巷道围岩)之间由于存在温度差而发生的热交换现象，它是热传导和流体运动的综合结果。

主要形式：在矿井通风中，风流通常处于湍流状态，其对流传热是热交换的主要形式。高温壁面通过热传导将热量传递给紧贴壁面的空气层，流动的风流通过掺混和扰动将这部分热量带走，从而实现持续冷却壁面并加热风流的过程。

影响因素：对流传热系数是衡量换热强度的关键参数，它取决于风流的流速、密度、粘度、热容以及巷道的几何形状和壁面粗糙度[26] [27]。

4. 解决措施

基于上述热源和热交换分析，黄金矿山深部矿井热害治理需采取“疏、堵、降、保、优”的综合降温策略，如图 1 所示。“疏”一般为利用风流将蓄积的热量进行排疏，在黄金矿山通风系统形成后简单高效。“堵”一般针对有热水带的矿区，对异常高温岩壁增设隔热材料，将热量堵在巷道工作区外。“降”可使用冰块、冷水等冷源对高温区域进行冷热交换以达到降温目的。“保”一般在局部高温或个体单点作业时，为作业人员配备冷却服、冰背心等个体防护装备，具有快速、高效的优点。“优”是指随着黄金矿山的开采，热源问题不断变化，相应的解决措施也应该不断优化改进，才能始终保证良好的工作环境。

针对某典型矿山进行深井开采中高温热害问题，在采取以“疏、堵、降、保、优”为框架的综合降温方案后，通过 VentSim 进行仿真模拟，如图 2 所示。在相同的风机能耗下，矿井最深处温度降低 4.6℃，极大改善了高温作业环境。

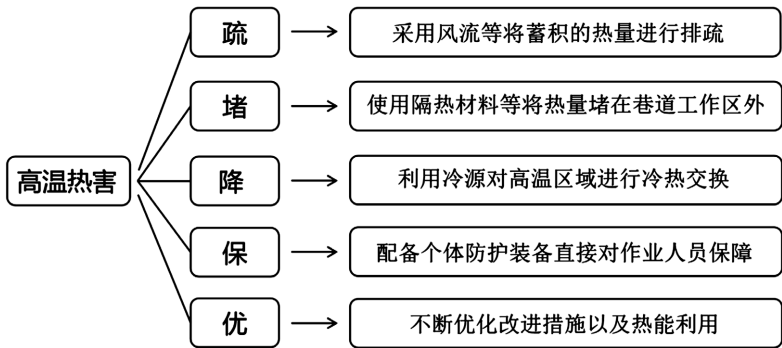


Figure 1. Solution measures of high temperature heat damage
图 1. 高温热害解决措施



Figure 2. VentSim simulation diagram

图 2. VentSim 仿真模拟图

4.1. 通风降温

目前,通风降温仍是黄金矿山经济、首选的降温手段,通风降温可占目前矿井降温方法的 70%以上,其核心是利用风流快速大量携带热量运移。

优化通风系统:采用分区通风,避免新鲜风流污染和串联加热;构建多级机站通风,克服深部通风阻力,保证足够的风量到达作业面。

革新通风方式:在极度高温工作面,可采用局部通风机配合冷水空气冷却器的方式,先对送入工作面的风流进行预冷,再送入工作面,形成“移动式空调”。

合理增加风量:在条件允许下,适当提高工作面的风量,可有效降低风温,改善体感温度。但需注意,风量增加会增大通风能耗,且效果有极限[28]。

4.2. 隔热材料

隔热是从源头上减少热源散热的有效方法,属于“堵”的策略。通常隔热材料的隔热系数在 $0.01\sim 0.2\text{ W(m}\cdot\text{k)}$ 之间,能够大大降低热源的扩散。

应用位置:主要用于隔离高温围岩和高温涌水。可在高温巷道段在其壁面增设隔热材料,能够有效降低。或在热水涌出点采用隔热管道将热水直接引至水仓,避免热水与风流直接接触换热[29]。

效益:虽然初期有投资,但能长期有效地减少围岩放热,降低后续通风和制冷负荷,从全生命周期看具有经济性。

4.3. 冷水降温

当通风无法满足降温需求时,机械制冷冷水降温系统成为主要手段。

系统组成:主要包括制冷机(地面或井下集中设置)、高低压换热器、输冷管路、空冷器等[30]。

对不同降温方案(如地面集中制冷、井下集中制冷、冰冷却等)进行多维度比较,如表 1 所示,(其中:分数:1~5 分,1 最差,5 最好;加权分 = 权重 $\times$ 分数)。

4.4. 个体防护

个体防护:对于无法彻底消除的局部高温点,为作业人员配备冷却服、冰背心等个体防护装备,是保障人员健康最直接、最灵活的措施。

Table 1. Comparative analysis of different refrigeration schemes
表 1. 不同制冷方案对比分析

评估准则	权重	地面制冷	井下制冷	冰冷却
冷却能力	30%	5 (150)	4 (120)	3 (90)
系统可靠性	25%	5 (125)	3 (75)	4 (100)
安装复杂性	20%	3 (60)	2 (40)	1 (20)
对生产的影响	15%	4 (60)	5 (75)	2 (30)
安全性	10%	5 (50)	3 (30)	4 (40)
加权总分	100%	445	340	280

4.5. 改进及热能利用

针对热源问题不断变化问题，不断优化改进相应的解决措施。同时，热能综合利用(废热回收)：转变思路，将矿井热害视为一种资源。可以研究利用热泵技术，从回风流、涌水中提取低品位热能，用于井口防冻、洗浴热水加热、工房供暖等，变“废”为宝，实现节能降耗，是未来深井降温的重要发展方向。

5. 结语

深部矿井高温热害问题是我国矿产资源向地球深部进军所面临的核心挑战之一。本文系统地分析了深井主要高温热源，阐述了巷道内热交换的基本规律，并探讨了综合性的治理措施。

研究表明，深部热害是多种热源共同作用、多种换热方式耦合的复杂结果，其中井巷围岩放热是根本性热源，随采深增加其主导地位愈发凸显。传统的单一通风或地面集中制冷方式在应对深部热害时面临能耗剧增、效率下降的瓶颈。

未来深部矿井热害治理的出路在于：必须摒弃单一技术思路，构建包含“源头隔热(围岩、热水) - 高效通风(输冷) - 精准降温(局部制冷) - 个体防护(最后屏障) - 热能利用(变废为宝)”的综合降温技术体系。依托数值模拟和井下监测系统，实现对矿井热环境的精准预测与智能调控，动态优化通风与制冷系统运行。大力发展冷凝热井下排放技术和矿井低温热能综合利用技术，大幅降低降温系统能耗，推动矿井向绿色、低碳、可持续方向发展。

本文提出的“疏、堵、降、保、优”综合治理框架，不仅是一种技术方案的集成，更对未来制定深部矿井热害治理的技术政策与行业规范具有重要启示。它倡导从规划设计阶段就引入系统性的热环境管理思维，推动从单一的温度限值控制，向涵盖系统能效、热资源回收率及职业健康保障的综合评价体系转变。这一框架的实践与推广，将为我国矿产资源深部安全高效开采提供坚实的理论支撑和技术保障，具有显著的经济、社会和环境效益。

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.
[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(6): 138-141.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 曹秀玲. 三河尖矿深井高温热害资源化利用技术[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
- [13] 胡汉华. 深井高温矿山通风与降温技术研究动态[J]. 金属矿山, 1999(7): 39-41.
- [14] 王明利. 深井高温高湿回采工作面人员热反应及安全作业时长研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2025.
- [15] 陈龙生. 煤矿深部开采综采工作面高温问题的解决方案探讨[J]. 科技信息, 2009(20): 648-649.
- [16] 陈胜利. 徐州矿区煤矿深井高温热害及防治技术[J]. 煤炭科技, 2008(4): 92-94.
- [17] 刘育明, 张爱民, 叶勇, 等. 矿山热应力指标及深井开采热害控制对策[C]//中国工程院. 第 234 场中国工程科技论坛——深部矿产资源高效开发与利用. 2016: 255-267.
- [18] 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]. 武汉: 中南大学, 2025.
- [19] 杨峰. 高温深井巷道新型保温隔热材料试验研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [20] 陈效友. 高温深井降温技术及其经济性研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [21] 高培稳, 户桂民, 王海峰. 深井高地温矿井综放采空区降温防火技术研究与应用[J]. 建筑工程技术与设计, 2018, 2018(3): 108.
- [22] 连海瑛, 严鹏, 冯福康, 等. 二道沟矿深井开采热环境研究[J]. 黄金, 2012, 33(6): 27-30.
- [23] 刘东锐, 刘伟强, 李印洪, 等. 深井高温矿床热害治理实践[J]. 采矿技术, 2017, 17(4): 65-67.
- [24] 贾敏涛, 周伟, 居伟伟, 等. 金属矿深井开采独头巷道热环境模拟技术研究[J]. 现代矿业, 2025, 41(3): 219-223.
- [25] 张士成, 郑旺来. 煤矿深井开采面临的问题与对策[J]. 能源技术与管理, 2016, 41(5): 174-177.
- [26] 何满潮, 郭平业, 陈学谦, 等. 三河尖矿深井高温体特征及其热害控制方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2593-2597.
- [27] 田冬梅, 刘浩震, 姚建, 等. 深井开采环境对人体机能的影响[J]. 矿业研究与开发, 2022(7): 42.
- [28] 赵东, 张海波, 于航, 等. 深井高温高湿工作面热害治理研究及工程应用[J]. 煤矿现代化, 2024, 33(2): 59-63.
- [29] 石乃敏, 沈雁醒. 某地下矿山深井开采降温技术[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(10): 68-71.
- [30] 卢亚菁. 不同开采阶段深井金属矿山热害及其治理方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2015.