

深井开采中的热害治理与降温技术应用进展

宋晓彬

河南省新郑煤电有限责任公司 河南 新郑 451100

摘要: 随着浅部矿产资源的日益枯竭, 矿产资源开发不断向地球深部延伸。然而, 深部开采面临严峻的“热害”问题, 即井下环境温度随深度增加而显著升高, 严重威胁矿工健康、设备运行安全及生产效率。本文系统梳理了深井热害的成因机制, 分析了其对矿山安全生产的多重影响; 在此基础上, 全面综述了当前主流的降温技术体系, 包括非人工制冷降温措施(如优化通风、隔热、减少热源)和人工制冷降温技术(如地面集中制冷、井下集中/分散制冷、冰浆降温等); 重点探讨了各类技术的原理、适用条件、优缺点及工程应用案例; 最后, 结合智能化、绿色化发展趋势, 展望了深井热害治理的未来方向, 提出构建“源头控制-过程阻断-末端治理”一体化智能温控系统的构想, 以期为我国乃至全球深部矿产资源的安全高效开发提供理论支撑与技术参考。

关键词: 深井开采; 热害; 降温技术; 人工制冷; 热环境控制; 智能矿山

引言

进入21世纪, 全球矿产资源开发呈现出明显的“三深”(深地、深海、深空)趋势。在我国, 超过1000米的金属矿山数量已逾百座, 部分煤矿开采深度甚至突破1500米。根据地温梯度规律, 地壳平均增温率为每百米2.5~3.0℃, 这意味着在1500米深度处, 原岩温度可高达45~50℃。叠加开采过程中机械设备散热、氧化放热、压缩热等多种热源, 井下作业环境温度极易超过30℃, 甚至达到40℃以上, 形成严重的“热害”。高温高湿的井下环境不仅导致矿工出现热应激、中暑、脱水等生理健康问题, 降低劳动效率与安全意识, 还可能引发电气设备绝缘老化、机械润滑失效、电子元件失灵等一系列安全隐患, 严重制约了深部矿产资源的安全、高效、绿色开发。因此, 如何有效治理深井热害, 构建舒适、安全的井下热环境, 已成为深部采矿领域亟待解决的核心科学与技术难题。本文旨在系统总结深井热害的成因、危害及现有降温技术的应用现状, 深入剖析不同技术路线的适用性与局限性, 并对未来发展趋势进行前瞻性展望, 为相关领域的科研与工程技术人员提供一份全面的参考。

1 深井热害的成因与危害

1.1 热害成因机制

深井热害是多种热源共同作用的结果, 主要可归纳为以下几类: (1) 原岩散热(地热): 这是最根本、最难以控制的热源。地球内部放射性元素衰变产生的热量通过热传导方式向地表散逸, 形成了随深度增加而升高的地温场。开采活动破坏了原有的热平衡状态, 巷道围岩持续向采掘空间散热, 构成持续稳定的背景热负荷。(2) 机电设备散热: 现代矿山高度机械化、自动化, 大

量电机、变压器、空压机、提升机等设备在运行过程中会产生可观的废热。这部分热量直接释放到井下空气中, 是局部高温点的主要成因之一。(3) 氧化放热: 对于含硫矿体或煤层, 矿石、煤炭及围岩中的硫化物、有机物等在破碎暴露后, 与空气中的氧气发生缓慢氧化反应, 释放出化学潜热。虽然单位时间放热量不大, 但具有长期性和累积性。(4) 压缩热: 在采用压入式通风的矿井中, 新鲜风流在风机作用下被压缩, 沿进风井筒下行过程中, 由于静压增加, 其温度会相应升高(干绝热增温), 尤其在超深井中, 这一效应不可忽视^[1]。(5) 人员与照明散热: 虽然单个人员或灯具的散热量较小, 但在人员密集或照明密集的区域, 其总和也不容忽略。(6) 水流散热: 地下水或生产用水在从深部流向浅部的过程中, 也会携带一部分热量进入作业区域。这些热源相互叠加, 使得深井热环境异常复杂, 治理难度极大。

1.2 热害的危害

深井热害对矿山安全生产构成全方位威胁: (1) 对人员健康的危害: 高温环境下, 人体散热困难, 核心体温升高, 引发一系列生理反应, 如大量出汗、心率加快、血压下降等。当湿球黑球温度(WBGT)指数超过安全限值时, 极易导致热痉挛、热衰竭乃至致命的热射病。长期暴露于高温环境还会损害心血管、神经系统功能, 严重影响矿工的职业健康。(2) 对生产效率的影响: 高温高湿环境使人感到极度不适, 注意力难以集中, 体力消耗剧增, 导致劳动生产率显著下降。研究表明, 当环境温度超过28℃时, 工作效率开始明显下滑。(3) 对设备安全的威胁: 高温会加速电气设备绝缘材料的老化, 降低其绝缘性能, 增加短路、火灾风险。同时, 润滑油粘度下

降,导致机械部件磨损加剧;电子元器件的性能和寿命也会因高温而缩短。(4)对矿山经济效益的制约:为了应对热害,矿山不得不投入巨额资金用于降温系统建设与运行,大幅增加了吨矿成本。此外,因热害导致的停产、减产以及安全事故赔偿等间接损失更是难以估量。

2 深井降温技术体系

针对深井热害,业界发展出了一套多层次、多维度的降温技术体系,可大致分为非人工制冷降温 and 人工制冷降温两大类。

2.1 非人工制冷降温技术

此类技术旨在通过管理手段和被动式设计,从源头上减少热量的产生或阻断热量的传递,具有投资省、能耗低的优点,通常作为降温系统的第一道防线。

2.1.1 优化通风系统

一是增大风量:通过提高主扇功率或优化网络结构,增加通过工作面的风量,利用风流带走更多的热量。这是最基础、最常用的手段。二是优化通风网络:采用分区通风、均压通风等技术,缩短通风路径,减少沿途热交换,确保冷风能有效送达热害区域^[2]。三是应用隔热风筒:在向高温区域送风的风筒外包裹隔热材料(如铝箔复合材料),减少风流在输送过程中的吸热升温。

2.1.2 围岩隔热与冷却

一是喷浆封闭:对高温巷道壁面进行喷浆处理,封闭裂隙,减少围岩散热面积和水分蒸发带来的潜热。二是敷设隔热层:在巷道壁面安装隔热板材或喷涂隔热涂料,形成热阻隔层,有效阻断围岩向巷道空间的热传导。

2.1.3 热源隔离与管理:

一是热水疏排:及时疏干并排出高温涌水,避免其成为持续的热源。二是设备选型与布局:选用高效率、低发热量的机电设备,并将其尽可能布置在回风巷道或专用硐室,通过独立风流将其散热直接排走。三是减少爆破热:优化爆破参数,减少不必要的炸药消耗,从而降低爆破瞬间产生的热量。

2.2 人工制冷降温技术

人工制冷技术通过制冷机组主动移除井下热量,是治理深井热害的终极手段。根据冷源制备和输送方式的不同,主要可分为以下几种模式。

2.2.1 地面集中制冷降温系统

该系统将制冷站设置在地面,通过管路将冷冻水(通常为5~7℃)输送到井下各用冷点,再通过空冷器(表面冷却器)与风流进行热交换,实现降温除湿。优点是地面空间充足,便于大型制冷机组的安装、维护和管理;无需解决井下制冷站的防爆、散热和电力供应难题;运行安

全可靠^[3]。缺点是冷水在长距离输送过程中存在显著的冷量损失(沿程热交换和节流损失),尤其是在超深井中,冷损可达30%以上,能效比(COP)急剧下降;需要铺设大口径、高承压的保温管道,初期投资巨大。适用于开采深度在800~1200米左右的矿井,或作为井下制冷系统的补充。

2.2.2 井下集中制冷降温系统

该系统将整个制冷站(包括制冷主机、冷却塔、水泵等)全部或大部分移至井下相对低温的硐室中。优点是彻底消除了冷水长距离输送的冷量损失,系统能效比高;可根据井下热负荷分布灵活调整制冷站位置。缺点是井下空间受限,对硐室的尺寸、支护、通风散热要求极高;制冷机组运行产生的废热需由专门的冷却水系统(通常仍需地面冷却塔)带走,增加了系统复杂性;设备防爆、防腐要求严格,维护困难;一旦发生故障,对生产影响巨大。适用于开采深度超过1200米、热害极其严重的矿井,是目前超深井降温的主流技术路线。例如,南非的Mponeng金矿(深度超4000米)就采用了大规模的井下集中制冷系统。

2.2.3 井下分散式制冷降温系统

这是一种更为灵活的模式,将小型化、模块化的制冷单元(如撬装式冷水机组)直接部署在各个热害严重的采掘工作面附近。优点是冷量输送距离极短,几乎无冷损;系统响应快,调控灵活;单点故障不影响全局。缺点是设备数量多,管理维护工作量大;每个单元都需要独立的冷却水循环和散热解决方案,系统集成度低^[4]。适用于热源分布零散、局部热害突出的矿井,或作为集中式系统的补充,用于“点对点”精准降温。

2.2.4 冰浆降温技术

冰浆降温是一种相变蓄冷技术。在地面或井下制冰站制备出固液两相共存的冰浆(Ice Slurry),然后通过管道泵送至井下用冷点。冰浆在空冷器中融化吸热,其相变潜热远大于同质量冷水的显热,因此载冷能力更强。优点是载冷密度高,可大幅减小输送管道的尺寸和流量,从而显著降低输送能耗和冷损;冰浆本身具有良好的流动性,易于输送。缺点是制冰过程能耗较高;冰浆在输送过程中存在冰晶融化的风险,对管道保温和流速控制要求苛刻;系统较为复杂,技术门槛高。该技术目前仍处于工程示范和推广阶段,被视为下一代深井降温技术的重要方向。加拿大、澳大利亚等国已有成功应用案例。

3 典型工程应用与案例分析

3.1 国内案例:新郑煤电公司

新郑煤电公司井下采掘工作面温度30~35℃,相对湿

度85%–95%。最初采用3台井下分散式制冷降温系统,该系统适用于“点对点”精准降温,对采煤工作面降温效果不佳。后建立2套井下集中制冷降温系统,分别服务于矿井的2个采区,该系统利用矿井乏风闭式冷却塔散热技术,通过防爆制冷机组产生3℃冷冻水,经水泵输送至水力风机组合柜末端散冷装置,实现对局部区域的降温及除湿,系统不消耗水资源、不消耗新风,改造后,采掘工作面温度成功控制在20℃左右,相对湿度控制在70%左右,制冷空调的经济效益主要是维护职工身心健康,提高工作效率,出勤率提升9%,设备故障率降低1.5~2.3倍,确保安全生产。

3.2 国际案例:南非Mponeng金矿

作为世界最深的矿山之一,Mponeng金矿面临着极端的地热挑战。其采用了规模宏大的井下集中制冷系统,在多个水平设置了制冷硐室,总制冷能力超过50MW。冷水被直接送至工作面附近的空冷器。更值得一提的是,该矿创新性地利用了地表污水处理厂的再生水作为制冷系统的冷却水源,实现了资源的循环利用。这套系统每年耗电量巨大,但却是维持其深部开采不可或缺的生命线。

4 未来发展趋势与展望

面对日益严峻的深部开采挑战,深井热害治理技术正朝着智能化、绿色化、高效化的方向发展。(1)智能化温控系统:依托物联网(IoT)、大数据和人工智能(AI)技术,构建覆盖全矿的热环境感知网络。通过实时监测各区域的温度、湿度、热源强度等数据,AI算法可以动态优化制冷系统的运行参数(如制冷量分配、风机转速),实现按需供冷、精准调控,最大化能效。(2)绿色低碳制冷技术:探索利用地热、太阳能等可再生能源驱动制冷系统,或研发新型低GWP(全球变暖潜能值)环保制冷剂,以降低降温系统的碳足迹。冰浆、相变材料(PCM)等高效蓄冷技术的成熟应用也将进一步提升系统

能效。(3)多能互补与余热利用:将降温系统与矿山其他能源系统(如压风、排水)进行耦合。例如,利用井下高温涌水的热能进行地热发电或供暖;回收制冷系统冷凝器的废热用于生活热水或工艺加热,实现能源的梯级利用。(4)一体化协同治理理念:未来的热害治理不应局限于末端降温,而应贯穿于矿山规划、设计、建设和生产的全生命周期。从源头上优化开拓系统以缩短通风距离,从设计上选用低热设备,从管理上强化热源管控,最终与高效的末端人工制冷系统相结合,形成“源头控制-过程阻断-末端治理”的一体化智能温控体系。

5 结语

深井热害是制约深部矿产资源开发的关键瓶颈。本文系统阐述了热害的成因与危害,并全面回顾了从非人工制冷到人工制冷的各类降温技术。研究表明,单一技术难以应对复杂的深井热环境,必须采取综合治理策略。未来,随着智能化、绿色化技术的深度融合,深井降温将从被动应对转向主动预测与精准调控,从高能耗模式转向高效低碳模式。构建一个安全、舒适、节能的深井作业环境,不仅是保障矿工生命健康和矿山安全生产的必然要求,更是实现矿业可持续发展的关键所在。这需要采矿、暖通、自动化、材料等多学科的交叉协作,共同推动深井热害治理技术迈向新的高度。

参考文献

- [1]苏峰.深井开采热害防治降温方案研究[J].矿业装备,2025,(04):63–65.
- [2]郭对明,李国清,李宁廷,等.基于未确知测度理论的深井开采热害综合评价[J].金属矿山,2026,(01):198–207.
- [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(08):28–32.
- [4]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(02):59–63.