

深井矿山高温热害防控技术现状

赵洪凯¹, 曲星军², 程力^{3,4*}, 史延超²

(1. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿; 2. 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿;
3. 山东黄金集团有限公司深井开采实验室; 4. 山东省深海深地金属矿智能开采重点实验室)

摘要:随着矿山开拓系统的不断延伸,国内外部分矿山采深已达千米以下,有些矿山在未来几年采深将超过1 500 m甚至2 000 m。在深部开采过程中,随着地温梯度效应、大量机械设备散热与围岩散热、长距离独头掘进作业导致生产作业环境温度达40℃以上,严重制约矿山的生产效率,危害作业人员的身心健康,因此高温热害是深井矿山所要解决的主要技术难题之一。通过资料收集、技术调研等手段,总结出深井矿山所面临的通风问题,主要表现在空气环境较差、总风量不足、通风网络紊乱、通风设备与通风构筑物管理不善、成本较高等方面,指出了深井高温环境对人体、设备、围岩、支护所造成的主要危害,在此基础上总结了常规的通风降温与制冷降温具体方式与主要技术措施建议,研究成果为深井矿山高温热害治理提供了技术参考。

关键词:深地开采;高温热害;深部通风;制冷降温;热害治理

中图分类号:TD724

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)08-0028-05

doi:10.11792/hj20240803

引言

随着中国金属矿山向1 000 m甚至1 500 m以上的深井发展,矿山机械与智能化程度不断提高,矿山机电设备向井下空气散发的热量显著增加。当矿体埋藏深度达到1 500 m时,由于地温梯度效应,原岩温度将达到40℃~50℃,甚至更高,矿井通风工作面临越来越大的困难。同时,由于风流自压缩,每垂直向下流动100 m,其温升约为1℃。统计显示,超过适合人体温度后,温度每增加1℃,工人的劳动生产率将降低7%~10%,重则出现中暑,危及生命,同时井下机电设备故障率增加1倍以上^[1]。因热害而引起安全事故在国内外矿山已有发生,热害已成为与粉尘、顶板冒落、火灾、透水同样严重的矿山井下自然灾害。因此,矿山应充分认识到热害对井下人员身体的危害、工作效率的损害及安全风险的提升。本文在日常工作的基础上,通过资料收集、调研等手段总结了深井矿山高温热害现状、通风现状等,指出了深井降温技术存在的问题,并展望了未来发展方向,以期对深井矿山高温热害防控提供理论指导。

1 深井矿山通风技术现状

根据国内外深井矿山通风系统现状,目前深井矿山通风所面临的问题主要表现在空气环境较差、总风

量不足、通风网络紊乱、通风设备与通风构筑物管理不善、成本较高等方面,具体如表1所示。

2 深井矿山高温危害

进入深部开采后,不可避免地面临矿山高温高湿带来的诸多问题,深井高温高湿环境对人体、设备、围岩、支护等均造成一定的危害,主要表现如表2所示。

3 深井开采降温技术

针对深部开采高温热害所造成的危害,根据国内外通风研究现状,深部开采降温技术主要有常规的通风降温技术与人工制冷降温技术。

3.1 通风降温技术

结合国内外主要的通风降温技术现状,通风降温技术的具体方式与主要技术措施或建议如表3所示。

3.2 人工制冷降温技术

国内外经验表明,当采用常规的优化矿井通风系统、控制热源等通风降温措施难以控制井下高温热害时,可考虑采取人工制冷降温技术。现有的人工制冷降温技术主要有:水制冷空调技术^[15]、人工制冰空调技术^[16]、空气压缩式制冷技术^[17]、液态气体相变制冷^[18-19]、直膨式热泵降温技术^[20]、动力型热管降温技术^[21-22]、涡流管制冷结合微气候矿井降温技术^[23]、热电冷联产空调降温技术^[24]、深井 HEMS 降

收稿日期:2024-04-01;修回日期:2024-05-28

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2019QEE016)

作者简介:赵洪凯(1991—),男,工程师,从事采矿工艺技术研究工作;E-mail:zhaohongkai@sd-gold.com

*通信作者:程力(1987—),男,工程师,从事深井开采高温热害防控与深部地压防控技术研究工作;E-mail:chengli@sd-gold.com

表1 深井矿山通风所面临的主要问题

Table 1 Issues faced by deep mine ventilation

| 面临问题 | 具体表现 |
|----------------|--|
| 空气环境较差 | ①由于地温梯度效应,深井围岩每垂深100 m,可使温度升高0.96℃,千米深井围岩温度将升高9.66℃,围岩的大量散热导致深井通风温度急剧升高; ②随着矿井深度增加,空气被压缩,造成深井空气密度增大,空气自压缩放热量增加; ③深井高温工作面,相对湿度均在85%以上,高温高湿环境导致作业环境含氧量减少; ④由于深部机械化采矿的推广,大量设备投入使用,设备运行过程中温度升高,同时排放尾气,相当于巷道存在“行走的散热源及污染源”,导致巷道作业环境恶劣; ⑤随着开采深度增加,作业需风量也增加,但受限于风机功率、风筒直径等因素,大部分作业面风量风质不达标; ⑥大量深部采掘作业导致井下部分工作面粉尘超标 |
| 总风量不足 | ①根据采掘生产系统及机站设置特点考虑的风量备用系数,需要依靠大量实践经验,不易准确选取,造成总风量需求计算不准确; ②大多数阻力设计无详细计算,设计的通风系统阻力与真实值相差甚远,造成设计总风量与实际风量需求不匹配; ③由于深井矿山所面临的生产压力,深部专用的系统通风井巷等开拓系统工程滞后,造成深部风量不足 |
| 通风网络紊乱 | ①深部通风线路长,特别是深部通风系统工程不完善,存在多个长距离独头作业情况; ②随着深部开拓掘进工程的推进,回风系统线路延长,但矿山已有的回风巷等系统工程断面较小,导致回风系统阻力过大,已无法满足回风量要求; ③部分区域一些措施工程,如充填井或管缆井、溜破系统等,造成风流紊乱,污风串联现象严重 |
| 通风设备与通风构筑物管理不善 | ①由于通风阻力或风量计算产生的误差,风机功率的选择要么偏小,要么冗余量过大,风机安装后一般达不到预期的通风效果; ②随着深部工程的不断推进,通风线路将有所改变,现有机站或通风构筑物的位置已不合理且没有及时调整,通风效果得不到保障; ③深部风门、风窗等通风构筑物设施较多,破损失效严重且经常得不到及时修复,造成深部通风不畅 |
| 成本较高 | 浅井开采的通风费用仅占开采成本的8%左右,而深井通风与降温,其费用可高达20%以上 |

表2 深井高温环境的危害

Table 2 Hazards of high-temperature environments in deep mines

| 危害对象 | 危害表现 |
|---------------------|--|
| 人体 ^[2-3] | ①导致体温调节、水盐代谢、循环系统、消化系统和神经系统的一系列改变; ②超出正常适应极限时,会出现脱水、痉挛、中暑等热生理紧张反应; ③导致作业人员注意力不集中,工作效率降低,安全事故率上升 |
| 设备 ^[4] | ①气温越高,空气密度越小,发动机的实际进气量越小,发动机充气能力及充气系数下降,混合气相对变浓,燃料燃烧不充分,使汽车废气中的有害物质(CO、HC、NO _x 、碳烟)浓度增大,增加了环境污染程度; ②高温易使设备遭受腐蚀,设备内结焦,设备散热效果差; ③电动机散热效果差,使用寿命降低 |
| 围岩 ^[5] | 温度每变化1℃可以产生0.4~0.5 MPa的地应力;深部高温环境必然会引起围岩软化大变形,从而导致巷道塌方灾害 ^[6-7] |
| 支护 ^[4] | ①温度对树脂锚杆锚固性能影响显著,随着温度升高,树脂锚杆锚固力呈现明显递减规律,尤其在30℃~40℃,锚固力下降更为明显 ^[8-11] ; ②温度对材料的腐蚀起到催化作用,在25℃~45℃时,腐蚀速率与温度成正比,高温高湿环境将加剧支护材料的腐蚀(腐蚀速度、程度) ^[12] |

温系统^[25]、分离式热管降温技术^[26]、热-电-乙二醇降温冷却技术^[27]等。

以上的降温方法各有优缺点^[17,28],均有各自的适用条件。在设计深部矿井热害治理方案时,有必要首先开展井下热源调查与现场工程调研,再根据其热害特征与技术条件等选择合适的降温方法。

3.3 其他深井降温技术

其他深井降温方法主要包括预冷进风风流^[29-30]、

隔热分流排热降温技术^[31]、载/蓄冷功能性充填降温方法^[32-34]、水喷雾降温技术^[35]、溶液除湿降温^[36-37]等,以上深井降温技术实际应用较少,目前主要停留在理论分析与设计层面。

4 深井降温技术存在的主要问题

综合国内外已有的通风制冷降温技术,其存在的共性技术问题如下:

表3 通风降温技术的具体方式与主要技术措施或建议

Table 3 Specific methods and main technical measures recommended for ventilation and cooling techniques

| 通风降温技术 | | 主要技术措施或建议 |
|----------|--|--|
| 优化矿井通风系统 | 增加风量 | 增加风量是最为简单且有效的降温措施,因此深部通风可考虑采用大功率风机、大直径风筒的通风设置;同时,对于个别长距离独头作业地点,条件允许情况下,可采用2套风机并联运行等强制措施。但风量的增加存在可行的界限 ^[13] ,资料显示,最经济的通风量为巷道空间体积的56%~84%,井下工作面掘进风速一般以1~1.5 m/s为宜 |
| | 选择合理的通风方式 | 对走向长的矿体,采用分区式和中央对角式通风系统缩短风流路线,降低风流在巷道中的温升。对于回采工作面可采用W形通风方式,使风流在工作面运行路线短,减少与围岩接触时间 ^[14] |
| | 采用合理的通风网络 | 采用数值模拟方法对通风系统进行优化设计,提高优化效率和精度;通过现场测试,了解通风系统实际运行情况,为通风网络优化提供依据;组织专家对通风系统进行评估,提出优化建议和措施 |
| | 改变主扇工作特性 | 通过调整主扇的叶片安装角、转速等优化主扇工作特性,提高通风能力,或通过更换新主扇风机来增加矿井总进风量 ^[14] |
| | 降低巷道通风阻力 | 通过扩刷井巷断面、利用废旧巷道并联回风,清除主要回风井巷内的堆积物或积水等 ^[14] 来降低通风阻力 |
| 控制热源 | 控制围岩散热 | 矿井热量的40%源于围岩散热,当岩温较高时,可采用一些隔热材料喷涂在岩壁上以减少围岩传给巷道中的空气热量 |
| | 控制高温管道放热 | 选择合适的风筒尺寸及材料,防止风筒内高压空气升温;同时,可将其布置在回风巷,或将压缩空气冷却后送入井下;采用具有隔热性能的双层压风风筒,降低掘进巷道的风流与风筒内风流热传递效应 |
| | 控制热水放热 | 改明水沟为暗水沟或有隔热盖板的水沟,以减少对井巷空气的散热量;用排水钻孔预先排出出水点的热水等超前疏放热水措施;将高温排水管设于回风巷 |
| | 减少机械放热 | 将机电设备安置在距离掘进工作面较远的位置;铲装设备不运行时,尽可能停放在回风巷道;尽量用电驱动力代替井下燃油设备动力;实行机电硐室独立通风,专用回风巷道,以加快大型机电硐室散热速率,提高机电设备的运转效率;避免使用低效率机电设备等 |
| | 减少爆破放热 减少氧化放热 | 将爆破时间与采矿、掘进等作业时间错开 及时清理井下废弃的木材和含硫矿石,对含硫围岩喷涂隔热材料进行绝氧隔离等 |
| 加强风流调节 | 一般在作业点附近增设辅扇、局扇等来调节风流,对于局部系统风流调节可考虑风桥、风门、风窗,有条件可以采用矿用空气幕 | |
| 个体保护 | 可考虑给作业人员提供冷却防护服;在条件允许时,使用太空舱;深部每个生产中段可考虑配备空调设备的制冷休息硐室,为作业人员提供良好的休息环境 | |
| 系统管理 | 安排专人对井下风门、风墙等通风构筑物进行管理,确保风门、风墙等构筑物的及时布设与完好无损;加强对溜井、措施井等措施工程的管理,需考虑生产与系统通风的统筹协调,确保不出现局部通风风路短路情况 | |

1) 常规的通风降温技术已无法控制深部高温热害问题。由于深部地温梯度效应,千米以深矿山巷道围岩温度已达38℃以上,同时随着大规模机械设备的投入使用,向空气环境散发出大量热量,进一步增加作业面的温度。而常规的通风降温技术无法降低风源温度,导致降温效果有限,同时增加风量等措施仅能保证风速满足要求,大部分作业区域环境温度依旧在30℃以上,作业环境高温高湿现象依然存在。

2) 制冷降温面临投资较大,技术复杂,后期维修与管理等问题。一套完整的制冷降温系统由多个子系统组合而成,各子系统之间相互作用导致设备相对较多,系统铺设困难,初期投资较大。同时,由于各子系统之间处于协同工作状态,系统较为复杂,往往一

个环节出现问题将导致整套制冷系统无法正常运行,因此后期需要投入大量人力进行维修保养,并需做好系统设备的现场管理。从国内外已有井下制冷降温系统来看,往往制冷降温初期运行较为正常,制冷效果较好,但随着时间的推移,受限于井下高温高湿高腐蚀环境,系统故障率较高,维修不及时,导致系统无法正常工作,长时间处于废弃状态。

3) 深井矿山未考虑地热资源回收利用。现有的研究表明,废热中有80%的热量可以回收利用,但矿山在遇到热害问题时,往往以防护为主,忽视了热害的资源属性。目前,不管是通风降温还是人工制冷降温,均未考虑地热资源的回收利用,大部分热量以废热的形式被排放到空气中而被浪费掉。因此,积极推

动深部“矿-热共采”技术及深部热害资源化利用技术是未来矿山需要考虑的技术发展之一。例如:中国张双楼煤矿使用热泵技术将热害资源利用后,工作面温度降低了7℃,同时每年可节省燃煤11 790 t^[38];德国 Castle Freudenstein 地热项目利用当地矿井水的地热能进行供暖和制冷^[39]。此类矿山地热资源利用案例为深井矿山地热资源的利用提供了借鉴作用^[40-41]。

5 展望

1) 未来深井矿山热害防控技术应改变以往采用单一方式降温的模式,可考虑通风降温与局部制冷降温相结合的方法进行。从风源管控、通风系统调节、作业区域热源控制(如热水排放控制、设备等热源管理)、区域制冷方式、作业管理等多维度推行全流程管理的热害防控技术,从而减少深部热害所带来的生产压力。

2) 随着科学技术的发展,各种新材料的不断研发,适用于深井巷道隔热降温的材料在近些年有了突破性进展。为此,矿山应与各高校科研院所合作,研究导热系数低并具有一定强度的喷浆隔热材料。这不仅能起到隔热降温效果,而且也能起到增强深井高温围岩稳定性的作用。

3) 在制冷降温技术方面,亟须研制更加合理的矿井空调设备和材料,从而提高制冷运行效率,在此基础上设计合理的深井矿山空调制冷降温技术方案,并借助数值模拟手段提前优化制冷参数,从而确定最优的制冷降温技术参数,达到最优的经济效益。与此同时要更加注重人力的投入,安排专人每天进行巡检,确保系统的正常运行。

4) 地热治理技术是未来井下矿山深部的刚性需求,且随着深度增加,热害问题愈加严峻,其需求愈加迫切。研究换热效率高、速度快,冷量传输更远、耗散低的新技术是深部热害防控的技术热点。与此同时,井下高温所产生的低品位热源通过大功率高效热泵技术对其进行富集和综合利用,为矿山热害治理与绿色发展提供了方向。

【参考文献】

[1] 刘金娥,王培植,姚东. 矿井高温高湿环境危害分析及治理措施[J]. 工业安全与环保,2008(9):27-28.
 [2] 高俊勇. 矿井高温高湿环境人员热应激反应实验研究[D]. 廊坊:华北科技学院,2017.
 [3] 吴建松,付明,童兴,等. 高温高湿矿井作业人员热应激评价[J]. 煤炭科学技术,2015,43(9):30-36.
 [4] 郭平业,卜墨华,张鹏,等. 矿山地热防控与利用研究进展[J]. 工程科学学报,2022,44(10):1 632-1 651.
 [5] 吴星辉,李鹏,郭奇峰,等. 热损伤岩石物理力学特性演化机制

研究进展[J]. 工程科学学报,2022,44(5):827-839.

[6] 何满潮,王春光,李德建,等. 单轴应力-温度作用下煤中吸附瓦斯解吸特征[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):865-872.
 [7] 许江,杨孝波,周斌,等. 突出过程中煤层瓦斯压力与温度演化规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(6):1 177-1 187.
 [8] 康长豪. 温度对树脂锚杆锚固性能力学特性影响研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.
 [9] 康红普,崔千里,胡滨,等. 树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J]. 煤炭学报,2014,39(1):1-10.
 [10] 张盛,勾攀峰,樊鸿. 水和温度对树脂锚杆锚固力的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2005,35(增刊1):49-54.
 [11] 胡滨,康红普,林健,等. 温度对树脂锚杆锚固性能影响研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(5):644-649.
 [12] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(6):1 071-1 081.
 [13] 张瑞明,魏天一,杜翠凤,等. 掘进巷道通风降温试验研究[J]. 金属矿山,2018(9):171-175.
 [14] 王海宁,刘菊红. 金属矿山热源散热影响因子及通风降温技术研究[J]. 矿业研究与开发,2012,32(2):71-74.
 [15] 黄瑶瑶. 矿井制冷降温技术发展综述[J]. 科技与企业,2016(6):195.
 [16] 崔忠,冯英博,曹品伟,等. 机械压缩式集中制冰降温技术在煤矿的应用[J]. 煤矿机电,2012(4):111-113.
 [17] 贺黎明. 高温热害矿井环境保障关键技术研究[D]. 西安:西安科技大学,2012.
 [18] 宋东平,周西华,李景阳,等. 高温矿井液态CO₂相变制冷降温技术[J]. 煤炭科学技术,2017,45(10):82-87.
 [19] 辛嵩,张琪,张龙. 赵楼煤矿液氮液氧混合降温可行性研究[J]. 煤炭工程,2018,50(4):13-15.
 [20] 侯江丽,伍玲玲,罗旭照,等. 基于直膨式热泵技术的深井集热降温实验系统[J]. 有色金属工程,2020,10(3):62-68.
 [21] 朱海亮,柳静献,常德强,等. 热泵与动力热管复合的深井热害控制试验研究[J]. 金属矿山,2020(1):101-107.
 [22] 初砚昊,柳静献,常德强,等. 基于热管输热的矿井地热危害控制试验研究[J]. 金属矿山,2020(1):108-114.
 [23] 张洋,辛嵩,姬建虎,等. 涡流管制冷技术在煤矿微气候降温中的应用[J]. 煤矿安全,2014,45(10):113-115,119.
 [24] 耿俊俊,王新民,齐学元. 矿井热环境空调降温技术研究[J]. 科技信息,2008(29):655,645.
 [25] 何满潮,徐敏. HEMS 深井降温系统研发及热害控制对策[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1 353-1 361.
 [26] 张亚平,冯全科,余小玲. 分离式热管在矿井降温中的探索[J]. 煤炭工程,2007(1):50-51.
 [27] 陈密武. 深井矿井热害治理技术[J]. 煤矿安全,2017,48(2):131-134.
 [28] 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.
 [29] 孙浩. 深井采空区和废旧巷道风流预冷降温研究[J]. 金属矿山,2012(11):135-137.
 [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]. 沈阳:东北大学,2015.
 [31] 邹声华,李孔清,张登春,等. 掘进巷道隔热分流排热降温技术的理论与实践研究[J]. 安全与环境学报,2016,16(2):99-102.

- [32] 王美,刘浪,张波,等. 矿山载/蓄冷功能性充填基础理论[J]. 煤炭学报,2020,45(4):1 336-1 347.
- [33] 张吉雄,刘恒凤,周楠,等. 深部矿山相变蓄热功能充填采热构想及技术体系[J]. 采矿与安全工程学报,2023,40(5):933-944.
- [34] 陈柳,刘浪,张波,等. 基于蓄热充填体深井吸附降温机理[J]. 煤炭学报,2018,43(2):483-489.
- [35] 张连昆,康天合,谢耀社,等. 基于液气相变吸热的深井掘进工作面降温数值模拟[J]. 煤矿安全,2018,49(3):182-186.
- [36] 朱哲慧. 潮湿地区溶液除湿空调系统性能及应用[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [37] 段满清. 直接蒸发冷却的数值模拟及应用研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2008.
- [38] 郭平业,秦飞. 张双楼煤矿深井热害控制及其资源化利用技术应用[J]. 煤炭学报,2013,38(增刊2):393-398.
- [39] KRANZ K, DILLENARDT J. Mine water utilization for geothermal purposes in Freiberg, Germany; Determination of hydrogeological and thermophysical rock parameters[J]. Mine Water and the Environment,2010,29(1):68.
- [40] 姚银佩. 深部矿井通风系统调试优化方案与数值模拟分析[J]. 黄金,2022,43(12):44-47.
- [41] 程力,吴钦正,朱明德,等. 局部制冷降温技术在三山岛金矿深部巷道掘进中的应用[J]. 黄金,2021,42(1):37-41.

Status quo of high-temperature heat hazard control and prevention technology in deep mines

Zhao Hongkai¹, Qu Xingjun², Cheng Li^{3,4}, Shi Yanchao²

(1. Sanshandao Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou) Co., Ltd.;

2. Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou) Co., Ltd.;

3. Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd.;

4. Shandong Key Laboratory of Deep-sea and Deep-earth Metallic Mineral Intelligent Mining)

Abstract: With the continuous extension of mining development systems, the mining depth of some mines domestically and abroad has reached below 1 000 m, and in a couple of years, some mines will exceed depths of 1 500 m or even 2 000 m. In the process of deep mining, due to the effects of geothermal gradient, heat release from large amounts of mechanical equipment and surrounding rock, and long-distance single-heading excavation operations, the operation environment temperature can reach above 40 °C. This severely restricts mining efficiency and jeopardizes the physical and mental health of workers. Therefore, high-temperature heat hazards are one of the main technical challenges that need to be addressed in deep mines. Through data collection and technical survey, it is summarized that deep mines at home and abroad face ventilation problems mainly in terms of poor air environment, insufficient total air volume, disordered ventilation networks, poor management of ventilation equipment and structures, and high costs. The main hazards caused by high-temperature environments to humans, equipment, surrounding rock, and support are identified. Based on this, conventional ventilation cooling and refrigeration cooling methods and proposals for key technical measures are summarized. The research findings provide technical references for controlling high-temperature heat hazards in deep mines.

Keywords: deep mining; high-temperature heat hazard; deep mine ventilation; refrigeration and cooling; heat hazard control