

金属非金属矿山深井通风关键技术 与工程实施对策

Key Technologies and Engineering Implementation Strategies for Ventilation in
Deep Metal and Non Metal Mines

杨卓明, 朱瑞军, 陈庆刚(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:介绍了金属非金属深井开采通风系统面临的主要困境,论述了深井通风的关键问题,并探索制定了工程实施方案。深井智能的关键在于建立统一的环境监测评估系统、降尘制冷系统、通风能耗综合判定系统以及通风构筑物智能控制系统,并根据不同的采矿工艺条件,进行合理的采准工程设计,提高风流风量、冷量有效利用率。实施深井智能通风工程是金属非金属矿山可持续、高效、安全发展的保障。

关键词:深井开采;可控循环风;智能按需调控;系统架构

中图分类号: TD724 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0079-04

Abstract: This article introduces the main difficulties faced by the ventilation system of metal and non-metal deep well mining, discusses the key issues of deep well ventilation, and explores the development of engineering implementation plans. The key to deep well intelligence lies in establishing a unified environmental monitoring and evaluation system, dust reduction and refrigeration system, comprehensive judgment system for ventilation energy consumption, and intelligent control system for ventilation structures. Based on different mining process conditions, reasonable mining engineering design is carried out to improve the effective utilization rate of air flow and cooling capacity. The implementation of deep well intelligent ventilation engineering will be the guarantee for the sustainable, efficient, and safe development of metal and non-metal mines.

Key words: deep well mining; controllable circulating air flow; VOD system; system structure

1 前言

国内金属非金属矿山是矿产资源供应的保障基地,是工业发展的压舱石。随着浅部资源的枯竭,金属非金属矿山逐渐步入了深井开采阶段,受地温梯度与空气自压缩放热的影响,围岩以及环境的温度会持续上升,这将给采矿活动带来新的挑战。

围岩以及工作环境温度的升高带来最为直接的影响是采矿空间环境的恶化。在矿井通风系统中,空气在机械动力的作用下,在井巷空间有序流动,稀释生产烟尘并将其排出地表。在此过程中,巷道围岩会与流动空气持续换热,其是矿井气候的自然温度调节器,当浅部开采的时候,无论进风温度高或者低,在气温调节的机制影响作用下,矿井生产空间温度一般会维持在较低的水平,但是随着围岩温度的

变高,这种换热机制势必会产生严重的负面影响。

金属非金属矿山从浅到深的过程,矿井通风主要的任务从排尘排烟,向排湿排热转变,通风系统演化如图1所示。通风任务变化,其必将引起通风方法与通风模式发生重大改变。目前相关学者在深井制冷等方面进行了一定的探索与研究^[1-3],本文在相关技术分析的基础上,对深井通风关键技术以及工程设计实施方案进行一定的探索研究。

2 深井通风关键技术

根据 GB 16423—2020《金属非金属矿山安全规程》,改善作业环境条件的主要手段为加强通风与制冷。在矿井实际生产中,人体会同时接触空间环境与巷道底板,即深井工作面环境微气候需综合考虑工作环境温湿度、巷道壁温以及通风风速。而矿

[作者简介] 杨卓明(1989—),博士,高级工程师,主要从事矿井通风与矿山设计工作。

[基金项目] 科技部十四五国家重点专项资助;金属矿超深规模化智能通风降温技术与装备 2023YFC2907205。

[引用格式] 杨卓明,朱瑞军,陈庆刚.金属非金属矿山深井通风关键技术与工程实施对策[J].中国矿山工程,2024,53(1):79-82.

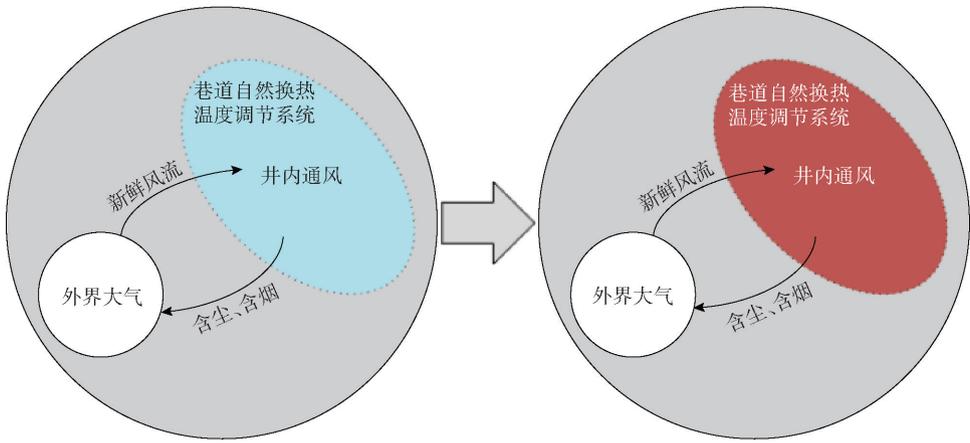


图1 矿井通风系统演化

井工作环境的温湿度受到大气温湿度、地温梯度以及换热强度多方面因素的影响,巷道壁温同样与原岩温度,表面水蒸发强度,以及风流温度息息相关,井下微气候是一个多指标、多因素综合影响的气象模型。因此,改善井下微气候环境,需要根据不同的环境工况,选择不同的技术手段,形成不同的工程方案。

深井开采环境条件改善的技术手段主要有加强通风、喷雾以及机械制冷。加强通风可以快速排湿排热,可以增强对流,通过加快人体表面汗液以及巷道壁面水分蒸发从而降低体感温度与岩体壁温;喷雾降温是在风流中喷射常温微小水滴,通过增湿等焓降温的原理达到空气调节的目标;机械制冷通过空调系统直接降低环境的温湿度,其关键在于如何快速高效排热。对于不同调节手段的适用性,目前虽没有量化的判定条件,但普遍认知是,加强通风适用于岩石温度小于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深井开采条件,当岩温进一步升高,进入超深井开采阶段,则必须采用喷雾甚至机械制冷措施。

通风在深井制冷中有着不可替代的作用,其不仅承担着排湿、排热、增强对流作用,且在机械制冷系统中,是载冷、输冷以及蓄冷介质,因此,通风是深井工作气候再造的关键。在较长的通风路线影响作用下,如何大幅度加强通风,以及在复杂多因素耦合作用下,如何控制并有效分配矿井风量,是深井通风的两个核心问题。

2.1 可控循环风流利用

深井开采阶段,受高地温影响,矿井岩壁表面的蒸腾效应将十分显著。井下作业空间为半密闭型空间,若通风不畅,空气会快速呈现为饱和湿度状态,

岩壁的表面蒸腾效应以及人体的排汗机制将会失效,岩壁、环境以及人体的核心温度将急剧上升,从而影响人的心理以及生理健康。反之,若井下具有良好的通风条件,风流不仅会快速地驱替湿热空气,而且能够增强岩壁以及人体表面的对流效应。因此,在深井开采阶段,加强通风是改善微气候环境参数最为直接的手段,但随着采深的增加,通风线路的增长,矿井通风阻力将进一步增大,单位空气的输运能耗在增加,此时若加强通风,则意味着矿井总风量地大幅上升,根据式(1)可知,矿井总通风能耗将呈现指数上升趋势。

$$W = R \times Q^3 \quad (1)$$

式中, W 为矿井通风能耗; R 为矿井风阻,表征矿井通风阻力系数,其随着通风路线的增长而变大, Q 为矿井总风量。

在不大幅增加矿井通风总能耗的前提下,如何提高工作面的风速,是深井开采加强通风的核心关键,可控循环风的利用是具有工程可行的方案。

矿井通风的主要目的是稀释烟尘、排热、排湿,其中“稀释”的作用是利用紊流使得有毒有害气体以及灰尘在空间上均匀分布,避免局部积聚,以免形成“危环境”,由于烟尘和有毒有害气体在浓度上的积累效应,这就形成了在矿井通风禁止串联通风的规定。从本质安全角度上讲,若风流已经将粉尘以及尾气浓度稀释到安全浓度以下,或者冲洗过工作面的风流不含有粉尘与尾气,其即可串联进入其他工作面持续担任排热、除湿以及增强对流的任。基于这一原则现有金属非金属矿山生产可以在不增加矿井总风量的情况下大幅度地提高工作面风速,即通过提高矿井风流的有效利用率,加强深井开采矿

井通风。

2.2 多因素耦合作用下的智能控风

在从深井到超深井过度阶段以及超深井开采阶段,受沿程岩壁蒸发效应影响,空气湿度在不断增加,且随着风速增加到一定程度,风速与对流蒸发率的相关性在不断下降^[4]。因此,井下微气候再造需要结合通风、喷雾以及机械制冷两种或者三种技术手段进行风流的智能控制,改变风流供给的温度与湿度,以适应井下不同的生产工况^[5-6]。

喷雾制冷的效率受水温、空气温度、空气湿度三个因素影响,相比于单纯通风降温的仅限于岩壁和人体表面流蒸发效应,喷雾降温技术手段将这一效应扩大到了整个空间。若水温低于空气温度,其会给整个系统带来一定的冷量。喷雾制冷优势是扩大了对流降温范围,同时发挥了一定的传热降温的作用,实施喷雾制冷的关键是通过初始风流的温湿度、水雾的温湿度以及目标环境风流的温湿度确定风量以及喷雾强度。

机械制冷(含吸附除湿)是利用相变以及传热原理,降低空气温度、湿度,输出干热空气或者干冷空气,相比于通风与喷雾制冷,机械制冷有着较高的换热效率与废热排放效率,但其能耗较大,这就要求在生产实际中需精确控制除湿强度与冷量的输出,使得工作面进口空气满足相关需求的基础上实现最大限度的节能。机械制冷(除湿)应充分结合通风降温与喷雾降温,形成较为经济的气象环境改造方案。

在深井开采中,初期可以通过加强通风,增强对流强度改善环境温度降低体感温度。随着采深的增加,输入空气温度与湿度在同步增大,需要喷雾制冷扩大对流范围,当温湿度进一步增大,需要利用吸附除湿甚至机械制冷手段对输入空气进行预处理,降低其温湿度。理论上讲,无论是喷雾制冷还是机械制冷,其本质均是根据风流供给的温湿度,对风流进行改性,并在此基础上综合空气温度、湿度、岩壁温度以及换热效率,精准地风速控制。总而言之,进行

多因素耦合作用下的风流属性与风速精准控制,是实现超深井开采经济高效制冷的关键。

3 工程实施对策与智能控风系统架构

加强通风的可行性方案是可控循环风的利用,在矿山工程上,需对涉及有矿尘、相关动力设备尾气的有效控制。例如,在尘源控制与除尘方面,可以在铲运机以及相关矿石输运设备上安设负压集尘装置,在溜井等固定产尘点上方安设自动井盖,隔绝矿尘传播路径;在尾气控制方面,可将现有的燃油设备替换为电力设备,不仅可以杜绝尾气的排放,减小发热量,而且可以利用制动能量回收,大幅降低运营成本。更重要的是在设计中,同时需要根据不同的采矿方法进行采准工程调整,使巷道工程适用于充电设备可实现制动能量回收,且可使风流在不同的工作面进行有效循环。

对于深井喷雾、除湿以及制冷系统的构建,同样需要在设计阶段提出与之适应的开拓系统与采准工程,以期实现高效排湿排热,在此基础上进而建立完善的井下微气候调控系统。此系统应包含有新风监测系统、风流改性系统、风流智能控制系统、乏风监测系统以及智能反馈调控系统,系统构架如图2所示。

深井制冷的起点为工作面风流供给参数的确定,针对井下风温预测这一问题,相关学者通过论计算、数值模拟以及相似实验等手段做了大量的研究,研究成果井下风温的预测值,对矿井初期通风系统以及机械制冷系统的设计具有一定的指导意义^[8]。但在生产实际中,在季节周期以及突发气象事件的影响作用下,风流供给参数在发生着复杂不可预测的动态变化,需通过传感装置,形成可靠的新风监测系统,为风流调控提供基础数据。

开发风流参数智能解算系统,需根据围岩温度、传热系数、通风能耗、除湿制冷效率等多因素进行风流调控方案智能解算,为按需通风系统与风流改性系统提供边界条件,这是微气候调控系统的智能核心。在系统实际运行中,需要对调控后的目标风流

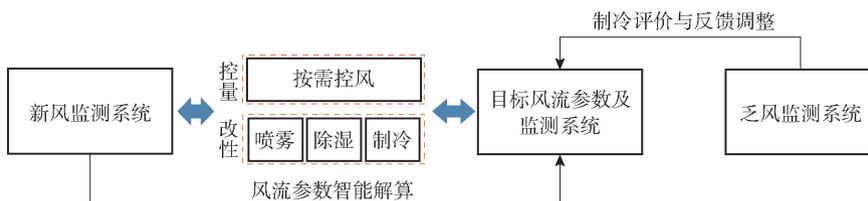


图2 深井微气候调控系统构架

参数进行实时监控,根据监测参数对风流调控方案进行动态调整,形成自纠偏智能系统。

建立制冷评价与反馈调整系统,系统将基于乏风风流参数监测数据,进行工作面微气候及制冷效果评估,对工作面供给目标风流参数进行优化,以期在保障用风安全的基础上,实现风流与冷量的高效利用。

4 结论

在深井开采阶段,排湿排热以及微气候再造已替代排尘排烟成为了通风系统的主要任务。针对这一任务,加强通风与风流智能控制是深井开采微气候再造的关键,是保障金属非金属矿山安全运转的重要技术手段。相关工程的实施涉及有设计理念的改变、监测系统的优化以及风流智能调控的建设,具体总结如下:

(1)加强通风是深井开采阶段最为直接的降低人体感温度,综合考虑控制通风能耗这一要素,可控循环风的利用具有一定可行性。可控循环风不经要结合不同的采矿方法进行采准工程调整,在巷道空间上形成循环通路,而且需增设除尘隔尘设施,进行内燃设备替换,这就要求在矿井以及新开采区域设计之初进行统筹规划,制定实施可行的工程方案,矿山企业的低水平技改建设。

(2)在步入超深井的过度阶段以及超深井开采阶段,必须依据井下生产环境,对供给风流进行智能调控,建设完善的进回风流气象参数监测系统、按需通风系统以及风流改性系统,并在以节能为核心的智能决策方案的指导下进行风流的动态调控。整个系统建设的原则是要充分提高冷量与风量的有效利

用率,减小不必要的空气巷道冷热交换,即风流改性系统的建设需尽可能靠仅用风点,在工程允许的条件下,避免建设进风井口风流制冷系统,这就要求在矿井设计时,建设高效排湿排热系统。

(3)在设计与工程实施过程中需要“因矿制宜”,充分考虑恒温层以及地表天然冷源利用的可行性,不能搞“一刀切”,一个模式全面推广,要充分平衡技术先进性与经济性,要根据矿体的赋存条件开发与之适应的智能风流调节系统,充分利用通风、喷雾制冷与机械除湿制冷各方面的优势。

[参考文献]

- [1] 张睿冲,谢承煜,周科平. 高温深井通风降温技术的适用条件研究[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(6): 888 - 895.
- [2] 王大伟. 黄金矿山深井制冷通风技术应用研究[J]. 世界有色金属, 2020(8): 130 - 131.
- [3] 聂兴信,赵好瑞,付小艳,等. 基于大风流综合净化技术的深井可控循环通风系统研究[J]. 金属矿山, 2021(2): 201 - 208.
- [4] 贺兴龙,闫珉,史顺平. 基于唯象理论的蒸发速率的分析与启示[J]. 大学物理, 2015, 34(2): 61 - 65.
- [5] 王运敏,李刚,徐宇,等. 我国深部矿井热环境调控研究近 20 a 进展及展望[J]. 金属矿山, 2023(3): 1 - 13.
- [6] 张爱民,马俊生. 深井大规模矿山通风制冷有效性研究[J]. 矿冶, 2015, 24(S1): 5 - 9.
- [7] 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.
- [8] 陈庆刚,葛启发,曹亮,等. 基于 Ventsim Visual 高海拔矿井按需通风热模拟研究[J]. 有色冶金节能, 2020, 36(3): 30 - 35.
- [9] 赵元昌,张坤生. 充填采矿技术应用和存在的问题[J]. 世界有色金属, 2019(16): 61 - 62.
- [10] 吴季洪. 我国充填开采技术发展现状与展望[J]. 山西焦煤科技, 2022, 46(1): 7 - 11.
- [11] 杨庆元,魏诚. 地下金属矿山充填采矿技术分析[J]. 冶金管理, 2023(4): 84 - 88.
- [12] 肖祖荣,王贻明,张敏哲,等. 磷石膏露天坑胶结堆存边坡稳定性分析[J]. 金属矿山, 2022(8): 212 - 218.
- [13] 卢宏建,梁鹏,杜英男,等. 金属矿山露天坑尾砂胶结充填治理[J]. 金属矿山, 2017(4): 36 - 40.
- [14] 李梓光. 露天采坑内尾矿充填体力学性能监测研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2010.
- [15] 吴岩佩,和学衡,王能跃,等. 新型胶凝材料充填配合比优化研究[J]. 黄金, 2023, 3(44): 12 - 15.
- [16] 杨晓炳,高谦,武栓军,等. 低成本充填采矿技术研究进展以及固结粉推广应用展望[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2019, 34(4): 59 - 63, 9.
- [17] 温震江,高谦,杨志强,等. 金川镍渣充填胶凝材料力学性能与水化机理[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(4): 1074 - 1082.

(上接第 52 页)