

引用格式:何文斌,陈庆刚,杨家宏,等.高海拔金属矿山井下按需通风系统搭建研究[J].有色设备,2025,39(5):84-90.

HE Wenbin, CHEN Qinggang, YANG Jiahong, et al. Research on development of an on-demand ventilation system for underground high-altitude metal mines[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(5): 84-90.

# 高海拔金属矿山井下按需通风系统搭建研究

何文斌<sup>1</sup>, 陈庆刚<sup>2</sup>, 杨家宏<sup>1</sup>, 宁轩<sup>1</sup>, 仁涛<sup>1</sup>, 程竞<sup>2</sup>, 杨理<sup>1</sup>

(1. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 迪庆 674400; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 本研究针对某高海拔金属矿山井下通风系统的当前生产状况进行深入分析,发现高海拔地区井下氧气提供和井下温度保持都具有高海拔地区的特点。基于按需通风理论,构建了一套集风机远程控制与按需通风功能于一体的通风系统。该系统实现了地表对井下通风的远程精准控制及按需通风调节,显著提升了通风效率与能效水平。多作业点的实测数据通过可拓模型进行分析,评价结果与实际情况吻合性较好,证明了本文方法是可行的。在系统投入后,电耗降低15%,有效通风率长期保持在85%以上。本研究为同类矿井通风系统的设计优化提供了有力的理论支撑和实践借鉴。

**[关键词]** 按需通风; 一体化基站; 高海拔金属矿山; 安全生产; 自动控制

**[中图分类号]** TD724

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1003-8884(2025)05-0084-07

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.05.012

## 0 引言

矿井通风系统作为金属矿山开采的关键保障系统,在矿山安全生产中具有不可替代的重要作用。从功能层面而言,矿井通风系统主要承担两大核心任务:①通过机械通风方式向井下作业面输送足量的新鲜空气,为采掘作业提供必要的气源保障;②建立完善的通风网络,有效排除采掘过程中产生的有害气体(如CO、NO<sub>2</sub>等)和悬浮粉尘,将污染物浓度控制在职业接触限值以内。这两大功能的协同作用,不仅确保了井下操作人员的健康安全,同时也为矿山的高效开采提供了基础保障。

普朗铜矿井下通风系统采用多级机站压抽式通风模式,该系统由三级通风机站构成完整的通风网络。具体而言,Ⅰ级机站设置于2个主进风平硐内,承担新鲜风流的压入矿井功能;Ⅱ级机站布置于主要回风水平采场回风天井联络道处,主要实现采场区域的辅扇分风;Ⅲ级机站则位于2个主回风平硐内,负责污风的集中排放。这种分级式通风系统通过各级机站的协同作用,形成了完整的通风回路,确

保了矿井通风网络的稳定性和可靠性。

鉴于矿山地处高海拔地区,受高原气候影响,环境温度常年偏低,冬季极端气温可达-20℃以下。为改善井下热环境,矿山企业设计并建设了完整的余热回收系统。该系统包含2座热泵机房和2座预热机房。热泵机房采用热交换技术,通过回收回风中的低品位热能,经热泵机组提升后用于加热进风平硐的新鲜风流。当热泵系统回收的热量无法满足进风温度要求时,预热子系统中的电加热装置将启动运行,对进风进行二次加热,确保进风温度达到设计要求。这种复合式热回收系统不仅实现了能源的梯级利用,而且有效保障了井下作业环境,为矿山安全生产提供了必要的环境保障。

矿井通风系统虽已建立完整的通风构筑物体系,但其控制方式仍采用传统的人工手动操作模式,存在明显的技术缺陷。具体而言,现有通风构筑物普遍缺乏自动化控制装置,无法实现地表远程监控与智能调控功能。这种控制模式的局限性主要体现在以下2个方面:①操作人员需通过乘车或步行方式到达构筑物现场进行手动操作,显著降低了通风

**[收稿日期]** 2025-02-06

**[基金项目]** 低品位铜多金属资源安全绿色高效开发技术研究与应用(迪庆州三年行动计划202402AB080010)。

**[第一作者]** 何文斌(1990—),男,云南曲靖人,主要从事矿井通风与安全管理工。

系统的响应效率;②由于缺乏可靠的联锁保护装置,加之部分操作人员对现场环境不熟悉,极易引发安全事故。这种落后的控制方式不仅影响了通风系统的运行效率,也对井下作业安全构成了潜在威胁。

## 1 按需通风发展及理念

### 1.1 国内外发展现状

按需通风(Demand-Based Ventilation)理论体系的形成可追溯至20世纪末。1998年,欧洲首次将智能通风理念应用于交通基础设施领域,开发出智能隧道通风(Intelligent Tunnel Ventilation, ITV)系统,并在高速公路和铁路隧道中实现规模化应用。2002年,加拿大研究机构在矿山通风系统可行性研究中首次提出变风量通风(Variable-Oriented Ventilation, VOD)概念。2005年,加拿大矿业公司对挪威和瑞典的ITV系统应用矿山进行实地考察后,将该技术引入加拿大的矿山开采中。然而,早期系统仅能实现单一采矿水平的局部通风调控,在应对多水平、多采场协同作业的复杂矿井环境时,仍存在显著的局限性。

我国矿山按需通风系统的研究与应用相对滞后,特别是在高寒、高海拔特殊环境下的技术体系构建面临诸多挑战。具体而言,在系统架构设计方面,缺乏成熟的按需通风理论模型和设计准则;在技术实现层面,基于三维数据网络的传输与控制系统尚未形成标准化解决方案。与此同时,针对高寒、高海拔地区的热回收技术研究也处于探索阶段。本研究创新性地采用空气源热泵与低温空气源热泵联合系统,实现了井下污风与冬季室外空气余热的梯级回收利用。该技术方案在井口防冻保温、生产生活区域供热等方面的应用在国内尚属首例。

### 1.2 按需通风理念

在矿山生产作业中,风电能耗构成矿山总能耗的重要组成部分。然而,当前我国矿山通风系统普遍存在“监而不控”及“控而不及”的运行弊端。为确保井下供风量,多数矿山采取风机满负荷运行模式,导致总风量虽超越总需风量,但风量分配却难以实现合理化,需风区域常现风量不足或无风状况,甚或引发风量短路现象。鉴于此,以矿山通风系统优化及通风节能为研究基点,开展地下矿山“按需通风”策略的探究,必要且意义深远。

基于通风节能理论的分析表明,风机电动机

的消耗功率 $N$ 与风机风量 $Q$ 之间存在立方关系(即 $N \propto Q^3$ )。据此,当风机风量减少10%时,风机电动机的功率将相应下降33%。由此可见,通过实现矿井的有效通风,减少无效通风量,能够显著降低矿山通风系统的能耗。进而,推动全过程自动化和智能化通风的实现,成为提升矿山能源利用效率的重要途径。

## 2 按需通风控制系统的设计和 network 构建

为优化矿山井下风机的管理流程,提升通风系统的监控效率,矿山在地表全厂中央控制室内集成了一套分布式控制系统(DCS)专用于通风管理。该DCS系统通过实时数据采集与传输技术,将主风机及辅扇风机的运行状态、运行频率、运行电流等关键参数上传至中央控制室。操作人员可在中央控制室实现对风机的远程手动控制,包括正转、反转、启动、停止以及频率设定等操作。然而,当前风机的监控单元均为独立运行,尚未实现连锁控制,亦缺乏与其他设备间的互锁功能。此外,地表余热回收系统配备了一套可编程逻辑控制器(PLC)系统,通过Profibus-DP通讯协议与地表通风控制系统实现数据交互,从而在地表实现对余热回收系统设备运行状态的实时监测。此设计有效整合了井下风机与余热回收系统的管理职能,实现了两大系统的统一监控与协调运行。

根据按需通风的理念,针对本矿山井下通风系统的现状,实施了以下优化措施:①对部分本体损坏的通风构筑物进行了更换,以确保通风系统的完整性和效能;②对位于关键线路上的通风构筑物进行了远程监测与控制系统的改造,以提升通风管理的精准度和响应速度。此外,还构建了全新的通风控制系统,该系统实现了风机、通风构筑物、余热回收系统等与通风相关的全部系统和设备的集中监测与控制。按需通风控制系统的总体架构如图1所示。

按需通风控制系统的网络架构以中控室内的2台核心交换机及其数据接口为中枢。数据接口负责将核心交换机发出的信号转换为相应的通讯协议,并通过光纤介质连接至井下各监控分站,构建起井下监控网络。同时,采用OPC通讯方式将数据接口与地表按需通风三维智能管控系统的采集服务器相连,实现井下监测数据的实时传输至地表处理中心。

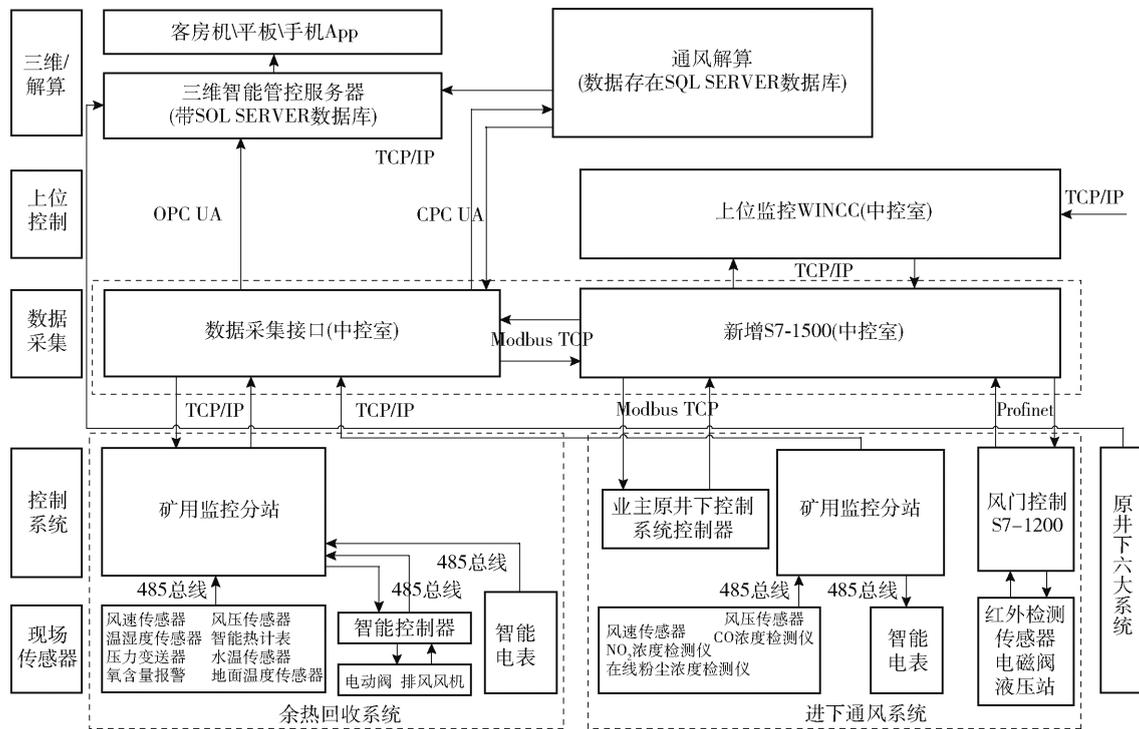


图 1 按需通风控制系统总体架构

Fig. 1 Overall architecture of the demand-controlled ventilation system

井下按需通风控制系统网络构建于 RS485 信号传输的传感器阵列及具备组网能力的矿用一体化监控分站之上。各监控分站负责收集区域内风速、风压、温湿度、一氧化碳浓度、二氧化氮浓度、风机运行状态及智能电表等传感器信号,并通过 RS485 通讯协议实现数据集成。每个监控分站均设计为独立运行单元,互不干扰,确保在井下系统任意部分出现故障时,其他分站仍能维持正常运作,从而显著提升系统整体的可靠性。全部监控分站通过光纤介质实现物理连接,并依托其内置的组网功能,与地表核心交换机共同构建千兆环网结构,实现高速、稳定的数据传输与网络通信。

企业已部署的通风分布式控制系统(DCS)、经改造新增的西门子 S7-1200 系统以及企业原有的六大系统所生成的数据,通过通讯网络整合并上传至新部署的西门子 S7-1500 控制系统,实现了风机、风门及余热回收系统设备的集中统一管理。

按需通风解算系统对采集到的数据进行深入分析及解算,生成控制指令并传达至西门子 S7-1500 控制系统。该控制系统在接收到指令后,综合考虑业主原有的六大系统运行状态,对各类风机、风门及余热回收系统设备进行精准控制。此外,按需通风

三维管控系统提供了井下通风系统的三维可视化展示,增强了系统监控的直观性和便捷性。图 2 是按需通风系统与余热回收和进风预热控制系统改进措施控制系统总体网络拓扑图。

### 3 按需通风控制系统

为稳步且高效地实现本项目井下按需通风目标,在主控制系统中嵌入了手动操作模式与按计划通风操作模式 2 种控制策略。

#### 3.1 手动操作模式

当井下通风系统出现异常时,操作人员可通过监控界面将操作模式切换至全设备手动控制模式或单设备手动控制模式。依据实际需求,操作人员可对全部或特定设备下达控制指令,以确保矿井通风系统迅速恢复至正常状态。

#### 3.2 按计划通风操作模式

在井下通风系统正常运行,采矿生产稳定进行时,全部风机、风门及余热回收系统设备在实现自动控制的基础上,操作人员可通过监控界面启动按计划通风操作模式。在此模式下,设备能够根据预设方案在多种状态下运行,包括交接班、正常生产、检修以及爆破等状态。这些运行状态均经过预先调试,构成了

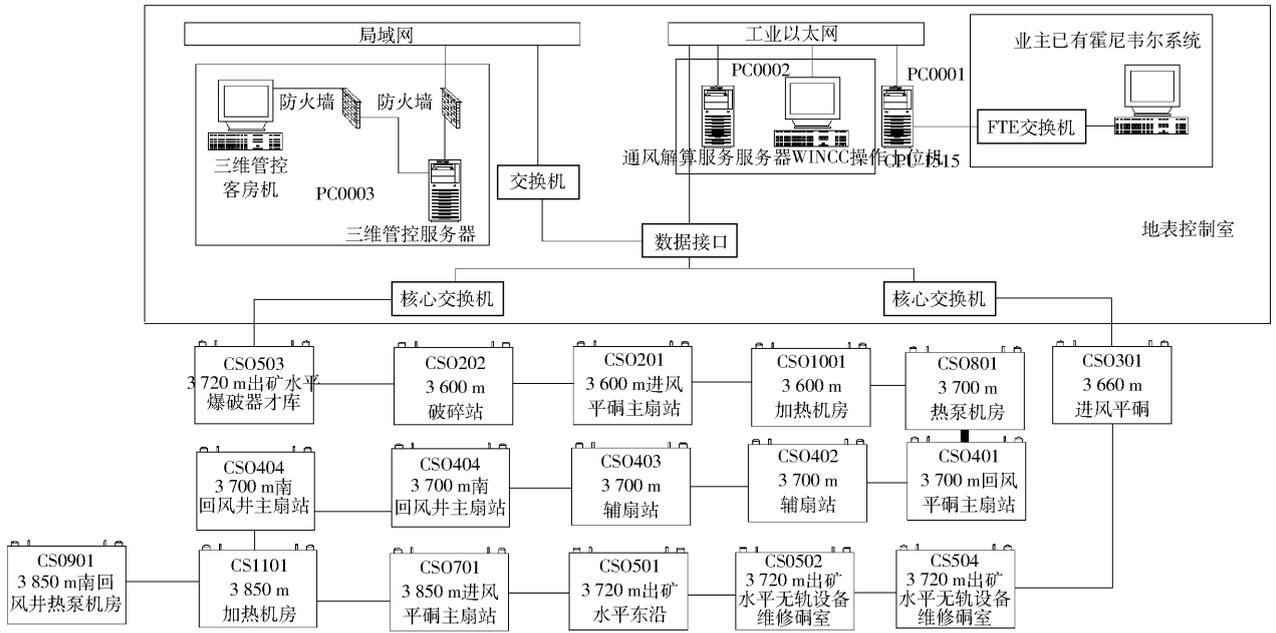


图2 按需通风控制系统总体网络拓扑图

Fig. 2 Network topology of the demand-controlled ventilation system

企业计划生产中的关键环节。该操作模式的设计简洁明了,便于操作人员快速切换和便捷操作。

## 4 实践操作要点

### 4.1 根据现场操作系统定制操作要点

#### 4.1.1 风机控制

制作井下通风系统的 DCS 切换程序设计;在完成切换后,确保了风机状态的无缝切换。同时,按需通风系统实现了对现场风机的全面控制,包括启动、停止以及频率调整的完整控制。此外,设置按需通风系统内部与原 DCS 系统保持一致的风机联锁保护功能。

#### 4.1.2 设备一键工作功能

现场配置完整的通风系统,共计 11 台主扇风机和 26 台辅扇风机。

1) 主扇风机采用频率跟随模式进行启动,具体逻辑如下:①初始启动:3 台并排主扇风机中的中间风机首先按照预设频率启动,当其频率超过预设阈值 +  $x$ Hz 后,左右两侧风机同时启动;②频率同步:3 台风机启动后  $t$  秒,系统开始对比中间风机与左右两侧风机的运行频率,若频率差超过  $x$ Hz,则将中间风机的设定值调整为最低频率 +  $x$ Hz,并设定中间风机的运行目标值为活动目标值,该值将随侧面 2 台风机中最低频率 + 5 Hz 的数值动态调整;③启动

完成:当中间风机的运行目标值再次达到初始设定值时,调整过程终止,主扇风机启动流程完成。

2) 辅扇风机采用时间启动模式,具体逻辑如下:顺序启动,接收启动命令后,辅扇风机依次启动;每台辅扇风机在运行反馈信号返回后开始计时,计时结束后启动下一台辅扇风机。

3) 风机启动完毕后,系统转入计划通风模式,对全部风机的动作频率目标值进行统一调整。具体逻辑如下:①模式选择与设置:白班早会后,操作人员根据会议指令选择计划通风模式,并设定模式的开始和结束时间;②预设值替换:达到预设时间段时,风机按照计划模式的风机输出设定值进行替换;③模式结束:爆破模式结束后,中央指挥室通知操作人员终止当日计划通风模式,全部风机的设定值恢复至计划模式运行前状态。

### 4.2 根据现场安全工艺要求,制定安全操作策略

增加现场安全保护联锁,传感器同现场设备进行联锁:①现场风机同氧含量传感器进行连锁,氧含量低于 20% 时对应区域风机,提高工作频率,保证工作区域人员氧气供应安全;②现场风机同 CO 传感器进行连锁,CO 含量大于 0.002 4% 时对应区域风机提高工作频率,保证工作区域人员作业环境安全;③现场风机同  $\text{NO}_2$  传感器进行连锁, $\text{NO}_2$  含量大于 0.000 25% 时对应区域风机提高工作

频率,保证工作区域人员作业环境安全;④现场风机同 SO<sub>2</sub> 传感器进行连锁,SO<sub>2</sub> 含量大于 0.000 5% 时对应区域风机提高工作频率保证工作区域人员作业环境安全;⑤现场风机同粉尘传感器进行连锁,粉尘含量大于 0.5 mK/m<sub>3</sub> 时对应区域风机提高工作频率,保证工作区域人员氧气供应安全;⑥当现场风机设备检测温度大于设定温度时,设备停机并反馈报警信号;⑦主扇风机同风机传感器进行连锁,将现场的反馈值同风机工作频率进行连锁。在输出频率同反馈风量偏差值大于安全报警值时进行提示。

## 5 通风调控过程设计及节能效果分析

### 5.1 矿井通风系统设计依据与工况条件确定

本次矿井通风系统设计严格遵循普朗铜矿的回采工艺和生产计划安排。为确保设计的准确性和实用性,深入分析了全矿的回采流程、生产节奏以及各工作环节的通风需求。在设计过程中,采用了全矿全天工作时间点统计法,对各个时间段的工作量和

需风量进行了详细测算。该方法综合考虑了不同作业面的开采强度、人员分布、设备运行状况等因素,确保了统计数据的全面性和准确性。基于上述统计结果,进一步确定了矿井的工况条件。工况条件的确定涵盖了通风系统的运行参数、风量分配、风流组织等多个方面,为通风系统的优化设计提供了坚实的数据支撑。井下按需通风工况分类情况见表 1。不同工况下的风量排布见表 2。

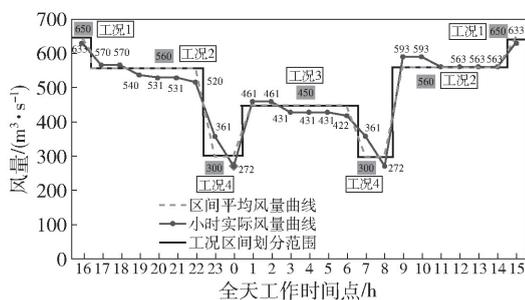


图 3 井下按需通风工况区间划分图

Fig. 3 Division of working conditions for underground demand-controlled ventilation

表 1 井下按需通风工况分类情况

Table 1 Classification of underground demand-controlled ventilation conditions

主要中段	工况 1(全负荷, 风量为 650 m <sup>3</sup> /s)	工况 2(正常负荷, 风量为 560 m <sup>3</sup> /s)	工况 3(一般负荷, 风量为 450 m <sup>3</sup> /s)	工况 4(轻负荷, 风量为 300 m <sup>3</sup> /s)
3 736 m	3 个拉底凿岩工作面 2 个掘进工作面 1 个出渣工作面	2 个拉底凿岩工作面 1 个掘进工作面 1 个出渣工作面	1 个拉底凿岩工作面 1 个掘进工作面 1 个出渣工作面	1 个拉底凿岩工作面 1 个掘进爆破 1 个掘进爆破
3 720 m	16 个出矿作业面 2 个二次破碎作业面 2 个凿岩工作面 1 个出渣工作面	16 个出矿作业面 2 个凿岩工作面 1 个出渣工作面	12 个出矿作业面 1 个凿岩工作面 1 个出渣工作面	6 个出矿作业面 1 个爆破工作面
3 660 m	6 列车工作	6 列车工作	4 列车工作	1 列车工作或停车检修
时间比例	8% (2 h)	50% (12 h)	25% (6 h)	17% (4 h)

表 2 不同工况下的风量排布

Table 2 Airflow distribution under different working conditions

序号	名称	工况 1 风量	工况 2 风量	工况 3 风量	工况 4 风量
1	总进风量	650	564.6	449	298.5
	其中: 3 850 m 进风平硐	261.9	227.2	195.1	121.3
	3 720 m 无轨平硐	68.8	71.5	161.0	101.2
	3 660 m 有轨平硐	59.7	62.2	49.4	40.7
	3 600 m 进风平硐	259.6	203.7	43.5	37.4
2	总回风量	650.0	564.6	449	298.5
	其中: 3 700 m 回风平硐	263.4	230.7	170.0	112.6
	南回风井	361.9	309.2	253.5	160.1
	3 540 m 胶带运输平硐	24.7	24.7	25.5	25.8

## 5.2 计划通风节能效果资金分析

通过前文所述的风机变频调速方案,风机的输

出功率也会降低,意味着实现了节能目标,软件模拟结果见表3。

表3 通风网络年功耗成本统计

Table 3 Annual power consumption cost statistics of ventilation network

经济指标	工况1	工况2	工况3	工况4	合计
各工况点年功耗成本/美元	1 786 318	1 040 096	506 732	135 257	
时间比例/%	8	50	25	17	100
普朗铜矿年功耗成本/美元	142 905	520 048	126 683	22 994	812 630

由表3可以看出,根据井下各中段工作量实时控制风机转速,满足工况风量的要求下,风机的年功耗成本随着风量减下而逐渐降低。如果普朗铜矿全年采取 $650 \text{ m}^3/\text{s}$ 的固定风量(即只采用工况1的供风模式),则矿山的年功耗成本为1 786 318美元,而采用按需通风的年功耗成本为812 630美元,相差973 688美元,合计节约650万元,即每年最大能节省功耗成本54.5%。考虑到国外按需通风系统节能效果以及目前矿山主要风机已采用变频控制措施,预计矿山采用按需通风的年功耗成本能够节约20%~30%,总节约电量为 $6.57 \times 10^6 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,节约电费约355万元/a。此外,采用按需通风模式,矿山可以简化通风管理,降低管理难度,当按需通风模式运行稳定后,预计可减少1~2名通风管理人员,降低人员成本15~30万元/a。本次设计暂按减少1名估算,每年可节省人员成本15万元<sup>[17-18]</sup>。

## 6 结论

本项目针对高海拔矿井氧气稀薄和温度寒冷的情况,通过对通风控制系统进行重新配置。

1)通过在井下布置必需的环境温度监测设施,将井下作业区域温度、氧含量以及有毒有害气体分布情况进行采集,并传入系统中。同时,将现场六大系统中人员数量一并传入系统。

2)根据现场2套系统现场参数以及作业区域人员数量对用风量进行计算及评估,继而调整对应区域内的通风风机及通风构筑物进行控制,完成作业区域内风量及氧含量调整。实现了对全部风机、关键通风构筑物以及余热回收系统的远程集中控制,显著提升了井下通风系统的自动化、数字化和智能化水平。通过集成监控与控制平台,实现了通风管理的转型。

3)按需通风控制系统通过对整个通风网络的

智能管控,实现了远程监测与精细化管理,能够根据生产需求动态调节风量,有效提高了通风效率,减少了漏风现象,显著降低了通风能耗。普朗铜矿应用该系统后,不仅确保了通风系统的稳定性和高效性,而且实现了显著的经济效益,为矿山可持续发展奠定了坚实基础。

### [参考文献]

- [1] 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.
- [2] 黄坚,徐巍,姚宗旭,等.金属矿山智能通风理论与技术[J].有色设备,2021,35(5):89-93.
- [3] 徐刚,侯亚平,金洪伟,等.基于改进AHP-TOPSIS模型的矿井通风系统安全评价方法[J].矿业研究与开发,2023,43(4):166-172.
- [4] 葛启发,于润沧,朱维根,等.按需通风技术在某矿山工程设计中的应用[J].中国有色冶金,2017,46(6):58-63.
- [5] 杨东.基于Citect SCADA软件平台的中色非矿通风管控系统的设计[J].有色矿冶,2023,39(3):18-22.
- [6] 朱必勇,费汉强,史键波.地下金属矿山通风系统可靠性评价模型研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):122-128.
- [7] 葛启发,朱维根,朱瑞军,等.深井难采矿体开采与通风控制技术[J].有色金属工程,2017,7(6):86-89,99.
- [8] 武超.基于层次分析法的矿井通风系统可靠性评价及优化[J].矿业装备,2024(6):132-134.
- [9] 徐巍,葛启发,张维国.基于模糊PID的风机风量控制系统[J].有色设备,2022,36(2):9-13,17.
- [10] 赵晶莹.浅析矿井主通风系统选型[J].有色矿冶,2024,40(4):37-39.
- [11] 邢永亮,曹金龙.煤矿智能化通风安全管控研究[J].工矿自动化,2021,47(S2):52-55.
- [12] 张浩强,刘大可.基于Ventsim的帕鲁特金矿通风网络优

- 化研究[J]. 矿业研究与开发,2024,44(9):131-142.
- [13] 翟建波,葛启发. Fluent 在不同采矿方法下的采场通风模拟研究[J]. 中国矿山工程,2018,47(2):14-19,35.
- [14] 李娜,郭芸杉,骆忠,等. 立式螺旋搅拌磨在云南某铁精矿再磨中的应用[J]. 云南冶金,2024,53(3):78-83.
- [15] 张水平,吝子岩,潘允敬,等. 漂塘钨矿井下智能通风系统的应用研究[J]. 中国矿业,2022,31(8):86-92.
- [16] 武迪俊,赵晶莹. 矿井通风设备的选型分析[J]. 有色矿冶,2020,36(1):41-45,53.
- [17] 魏仁旭,王超. 基于三维软件联合应用进行通风系统优化研究[J]. 云南冶金,2021,50(1):9-12.
- [18] 朱荣成,梁吉佳,李岩,等. 某地下矿开采通风系统设计优化[J]. 云南冶金,2023,52(4):20-25.

## Research on development of an on-demand ventilation system for underground high-altitude metal mines

HE Wenbin<sup>1</sup>, CHEN Qinggang<sup>2</sup>, YANG Jiahong<sup>1</sup>, NING Xuan<sup>1</sup>, REN Tao<sup>1</sup>,  
CHENG Jing<sup>2</sup>, YANG Li<sup>1</sup>

(1. Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd., Diqing 674400, China;

2. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** This study conducts an in-depth analysis on the current operational status of the underground ventilation system in a high-altitude metal mine, identifying the characteristics of oxygen supply and temperature maintenance in high-altitude underground environments. Based on the demand-based ventilation theory, a ventilation system integrating remote fan control and demand-based ventilation functions was developed. This system enables remote and precise control of underground ventilation from the surface, along with demand-based ventilation adjustments, significantly improving ventilation efficiency and energy efficiency. Measured data from multiple workstations were analyzed using an extension model, and the evaluation results showed good consistency with the actual conditions, proving the feasibility of the proposed method. After the system was implemented, power consumption was reduced by 15%, and the effective ventilation rate was consistently maintained above 85%. The study provides a strong theoretical foundation and practical reference for the design and optimization of ventilation systems in similar mines.

**Keywords:** demand-controlled ventilation; integrated base station; high-altitude metal mine; work safety/safe production; automatic control

