超深井开采复杂高阻力通风系统的提质降耗研究*

谭星宇[1,2,3]，唐子龙[1,3]，盛建红[1,3]，李健[4]，江科[1,2,3]，任高峰[2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.武汉理工大学 资源与环境工程学院， 湖北 武汉 430070；
3.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012；
4.中国有色集团抚顺红透山矿业有限公司， 辽宁 抚顺市 113321）

摘要：为解决超深井复杂高阻力通风系统所面临的通风困难、井下作业环境恶化及通风能耗增加等问题，以红透山铜锌矿为研究对象，开展了通风系统的提质降耗研究。采用现场调查、计算分析和实践检验等方法，开展了超深井长走向矿山的复杂低阻力通风网络构建、主扇设置优化及远程智能变频控制等研究和应用工作。通风系统的提质降耗技术方案实施后，全矿通风阻力降低56.39%，主扇数量从4台减至2台，深部进风量增加36.1 m^3/s；通风能耗费用可节约302.3万元/a，取得了显著的节能降耗效果；通风系统7项基本指标实现大幅提升，平均提升20.43个百分点，井下作业环境显著改善。研究结果可为超深井金属矿山通风系统的提质降耗研究提供参考。

关键词：超深井矿山；通风系统；低阻力网络；智能控制；提质降耗

中图分类号：TD724 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)08-0001-07

Study on Quality Improvement and Consumption Reduction of Complex High-Resistance Ventilation System in Ultra-Deep Mines

TAN Xingyu[1,2,3], *TANG Zilong*[1,3], *SHENG Jianhong*[1,3], *LI Jian*[4], *JIANG Ke*[1,2,3], *REN Gaofeng*[2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
3.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China;
4.China Nonferrous Hong Toushan Fushun Mining Group Co.,Ltd., Fushun, Liaoning 113321, China)

Abstract: To address issues such as ventilation difficulties, deterioration of underground working environments, and increased ventilation energy consumption faced by complex high-resistance ventilation systems in ultra-deep mines, a study on quality improvement and consumption reduction of the ventilation system was conducted in Hongtoushan Copper-Zinc Mine. The research and application of complex low-resistance ventilation network construction, main fan setting optimization and remote intelligent frequency conversion control in ultra-deep mines with long strike were carried out by means of field investigation, calculation analysis and practical verification. After the implementation of the technical scheme of quality improvement and consumption reduction of the ventilation system, the ventilation resistance of the whole mine is reduced by 56.39%, the number of main fans is reduced from 4 to 2, and the deep air intake is increased by 36.1 m^3/s. The ventilation energy consumption cost can be saved by 3.023 million yuan per year, and remarkable saving-energy and consumption-reducing effect has been achieved. The seven basic indicators of the ventilation system have been greatly improved, with an average increase of 20.43 percentage points, and the underground working environment has been significantly improved. The research results can provide a reference for the study on quality improvement and consumption reduction of ventilation systems in ultra-deep metal mines.

Key words: Ultra-deep mine, Ventilation system, Low-resistance network, Intelligent control, Quality improvement and consumption reduction

---

* **收稿日期**：2024-10-29
基金项目：国家重点研发计划课题(2022YFC2904002)
作者简介：谭星宇(1989—)，男，湖南韶山人，博士研究生，高级工程师，主要从事深井通风及矿山安全研究。E-mail:738124566@qq.com

0　引言

矿业作为国民经济的基础支柱产业,为社会发展作出了重要贡献。随着浅部矿产资源枯竭,为缓解我国金属矿产资源紧缺的局面,金属矿山开采正逐步转向深井及超深井发展[1-2]。开采深度增加导致通风线路延长、通风阻力增大、通风系统复杂化、原岩温度升高,致使井下作业环境持续恶化、通风能耗不断攀升,严重制约着深部资源的开采。同时,我国 2020 年 9 月提出的“双碳”目标,要求矿山绿色低碳开采,而通风系统是矿山“八大系统”中碳排放量最高的系统之一[3],其节能降耗尤为关键。因此,开展超深井复杂高阻力通风系统的提质降耗研究,对改善井下作业环境、降低通风系统能耗、保障矿山安全生产和企业可持续发展具有重要意义。

近年来,众多学者在金属矿山通风系统优化、矿山热害分析与控制、主通风机节能降耗等方面开展了较多研究。张浩强等[4]利用 Ventsim 软件,开展了帕鲁特金矿通风网络优化研究。王凯旋等[5]针对复杂深埋矿山,开展了通风系统优化数值模拟研究。XIE 等[6]和 DU 等[7]通过热力学参数计算和数值模拟,发现围岩散热是采矿工作面和深部巷道风流温度升高的主要热源。徐宇等[8]提出了深部矿井热害治理协同地热能开采的构想,并对其可行性进行了系统论证。张永亮等[9]基于通风系统远程监控,提出了机械-自然风压交替通风的方法,并将该方法应用于矿山,取得了较好的节能降耗效果。以往的研究中,较少有针对金属矿山超深井复杂高阻力通风系统提质降耗方面的研究。

本文以红透山铜锌矿通风系统为研究对象,通过构建低阻力通风网络、优化主辅扇系统、实行主扇远程智能变频控制等措施,解决红透山铜锌矿超深井复杂高阻力通风系统面临的提质降耗难题,以建立合理、安全、低碳的通风系统。

1　工程背景

辽宁红透山铜锌矿生产规模为 55 万 t/a,矿井深度达 1 657 m(+450～−1 207 m),走向长 3 200 m,开采形成 26 个中段,中段高度为 50～60 m,井下形成了庞大而复杂的通风系统,为典型的超深井开采复杂网络高通风阻力矿山。矿山开拓及通风系统如图 1 所示,新鲜风由一段大竖井、一段小竖井、二段大竖井、二段小竖井进入各生产中段,经中段下盘运输巷进入采掘作业面,污风进入中段上盘回风巷,经 1# 西回风井、2# 西回风井排出地表。

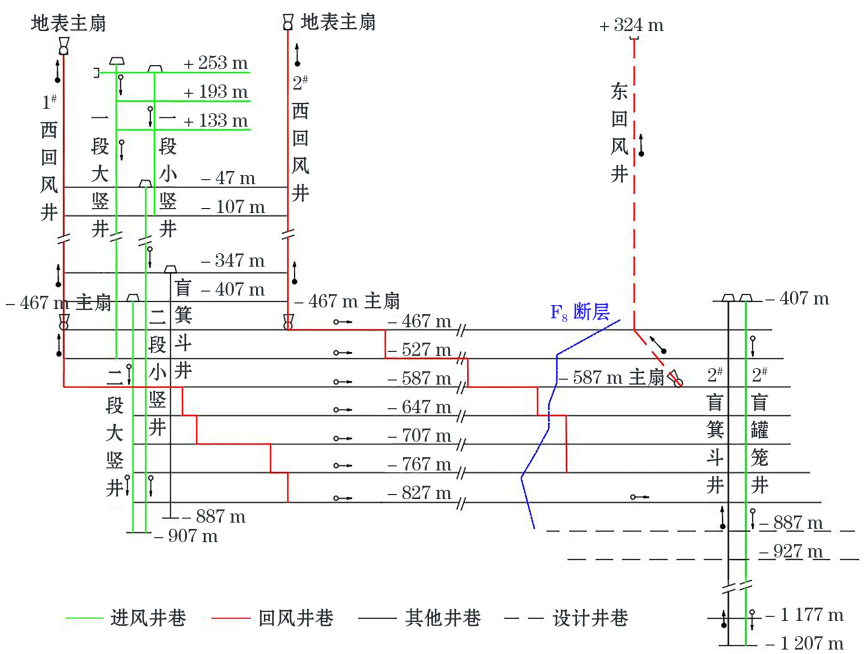


图 1　矿山开拓及通风系统

Fig.1　Mine development and ventilation system

对通风系统进行调查分析,发现该矿山通风系统在提质降耗方面存在以下技术难点。

(1) 通风阻力大,通风困难。矿体纵投影图呈“牛”形,深部矿体严重向东侧伏,目前主要开采区域已转移至 F_8 断层以东(“牛”后腿部分矿体),全矿进回风井均位于西侧,主要利用 2# 西回风井回风,在生产中段形成了长达 2 900 m 的折返风流线路,通风阻力大(5 400 Pa),F_8 断层以东矿体开采通风困难,作业面风量(风速)合格率(60.0%)、风质合格率(75.8%)、作业环境空气质量合格率(55.0%)等不达标。

(2) 深部开采作业场所温度超标。深部(−827 m 以下)探明矿石资源量达 416 万 t,开采深度超过 1 300 m,进风线路长达 3 800 m,占总风流线路长的 60%,未整体规划进风路线和安装送风设备,深部开采作业面的进风困难、作业环境差,作业场所湿球温度高达 31～33 ℃,超过国家标准要求。

(3) 主扇装机容量大,通风能耗高。全矿共安装 4 台主扇(1# 西回风井地表主扇和−467 m 主扇,2# 西回风井地表主扇和−467 m 主扇),通风系统主扇总装机容量大(1 428 kW),部分主扇运行效率低(1# 西回风井地表主扇运行效率为 48.5%、2# 西回风井−467 m 主扇运行效率为 54%),通风能耗高,单位采掘矿石量的通风费用达 8.98 元/t。

2 构建低阻力通风网络

基于理论分析和 Ventsim 仿真模拟,结合矿体形态、生产变化及国家政策要求,以合理布置进回风井、多风路并联降阻、中段集中开采大风量降温为设计原则,构建适应超深井长走向矿井的复杂低阻力通风网络。

2.1 合理布置进回风井

该矿山于 1956 年建矿,建矿初期开采浅部西侧“牛”头部位矿体,全矿进回风井(主井、副井、1# 西回风井、2# 西回风井)均位于西侧,目前已开采至 F_8 断层以东“牛”后腿部分矿体,全矿回风井(1# 西回风井、2# 西回风井)仍布置在西侧,布置不合理。

(1) 新施工东回风井。低阻力通风网络如图 2 所示。由图 2 可知,在矿体东侧 43# 与 45# 勘探线之间新施工东回风井,由+324 m 至−587 m,净直径为 4.0 m。全矿主要利用东回风井回风,少部分污风由 2# 西回风井排出,不再利用 1# 西回风井回风,从而消除长距离折返风流路线,形成标准对角式通风网络。经计算全矿需风量为 145.2 m^3/s,东回风井分配回风量 94.4 m^3/s,2# 西回风井分配回风量 50.8 m^3/s。利用 Ventsim 软件,建立包含东回风井的三维仿真模型,进行风流模拟,施工东回风井前后的通风阻力变化情况见表 1,全矿通风阻力平均可降低 50.7%。

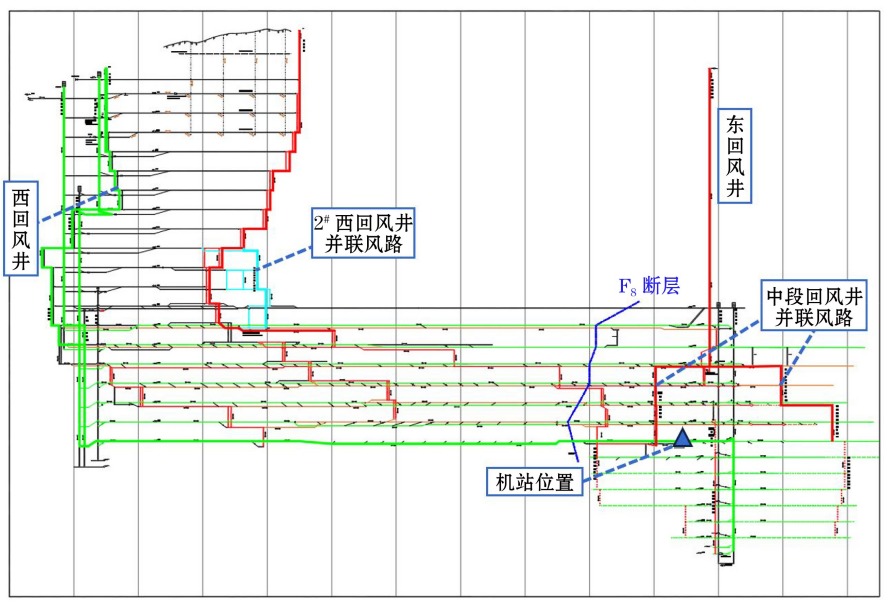


图 2 低阻力通风网络

Fig.2 Low-resistance ventilation network

表 1 通风阻力变化情况统计

Table 1 Statistics on changes in ventilation resistance

具体措施	改变前通风阻力/Pa	改变后通风阻力/Pa	降低幅度/%
新施工东回风井	5 400	2#西回风井风流路线:3 600 东回风井风流路线:1 730	50.7
1#西回风井改为西进风井	460	345	25.0
2#西回风井增设并联风路	2 665	2 275	14.6
中段回风井增设并联风路	660	504	23.6

(2) 1#西回风井改为西进风井。1#西回风井位于全矿西侧,该风井基本失去回风功能,将 1#西回风井改造为西进风井。具体措施为:打开西进风井与-467 m 和-527 m 中段运输巷间的密闭,使西进风井与现有进风井(一段大竖井、小竖井)并联。以 1#西回风井改造为西进风井为变量,运用 Ventsim 软件进行仿真模拟,结果显示西进风井进风量约为 26.0 m^3/s,通风阻力变化情况见表 1,-527 m 以上进风网络通风阻力可降低 25.0%。

2.2 多风路并联降阻

矿井通风总阻力,是指风流从进风井口到回风井口的主要通风路线上的摩擦阻力和局部阻力之和[10],一般摩擦阻力占矿井通风总阻力的 70%~90%,井巷摩擦阻力的计算公式如下:

$$h=\alpha\frac{LP}{S^3}Q^2 \tag{1}$$

式中:h 为井巷摩擦阻力,Pa;α 为摩擦阻力系数,kg/m^3;P 为巷道净断面的周长,m;S 为巷道净断面面积,m^2;L 为巷道长度,m;Q 为井巷通过风量,m^3/s。

由式(1)可知,摩擦阻力与风量的平方成正比,在全矿风量一定时,可通过主要通风井巷增加并联风路以降低井巷通过风量,大幅降低矿井通风总阻力。根据红透山铜锌矿通风网络情况,采取以下降阻措施。

(1) 2#西回风井增设并联风路。2#西回风井(-467 m 至地表)为倒段回风井,风流线路长达 2 200 m,中段间基本为 2 条并行的回风天井,总断面较小(约 7 m^2),通风阻力大。应尽可能将-467 m 以上的废弃井巷与 2#西回风井并联;其中,-167 m 至-467 m 中段有一条原用于可控循环风的风路,东回风井施工后,可解决矿山总风量不足的问题,可控循环风不再使用;因此将循环风路改为回风风路,与 2#西回风井并联。以 2#西回风井是否增设并联风路为变量,分别进行仿真模拟,通风阻力变化情况见表 1,2#西回风井通风阻力降低了 14.6%。

(2) 中段回风井增设并联风路。矿山 F_8 断层以西形成了多条中段回风井,为充分利用东回风井回风,加强 F_8 断层以东地段的通风,在 F_8 断层以东-587 m 至-877 m 之间增设 2 条中段回风井,与现有中段回风井并联。以中段回风井是否增设并联风路为变量,分别进行仿真模拟,通风阻力变化情况见表 1,中段回风井通风阻力可降低 23.6%。

2.3 中段集中开采大风量降温

(1)增大风量降温原理。

随着矿山开采深度的增加,原岩温度升高,围岩散热是金属矿深部巷道风流温度升高的主要热源[7,11]。对于水平巷道,风流与围岩热交换引起的风流温度变化可用下式表达[12]。

$$Gc_p\Delta t=Gc_p(t_2-t_1)=Q_\tau \tag{2}$$

式中:G 为风流质量流量,kg/s;c_p 为空气的质量定压热容,kJ/(kg·℃);Δt 为巷道风流入口和出口的干球温度变化值,℃;t_1、t_2 分别为巷道风流入口和出口的干球温度,℃;Q_τ 为巷道围岩传热量,kW。

巷道围岩传热量 Q_τ 可由下式计算[11]。

$$Q_\tau=K_\tau PL(t_{gu}-t_a) \tag{3}$$

式中:K_τ 为围岩与风流间的不稳定换热系数,kW/(m^2·℃);t_{gu} 为平均原始岩温,℃;t_a 为巷道风流平均温度,$t_a=(t_1+t_2)/2$,℃。

将式(3)代入式(2),可得下式。

$$\Delta t=t_2-t_1=\frac{2K_\tau PL(t_{gu}-t_1)}{2Gc_p+K_\tau PL} \tag{4}$$

由式(4)可知,当平均原始岩温大于巷道入口处温度时,Δt 为正值,即风流温度升高;风流温度升高与风流质量流量成反比,即当经过巷道风量增大时,风流经过巷道后温度升高值减少,因此通过增大风量可达到降温的目的。

(2) 中段集中开采大风量降温的实施。

红透山铜锌矿开采深度大,原岩温度较高,中段走向长,由式(3)可知,巷道围岩传热量大,中段风流由西侧经长距离中段运输巷流至东侧的过程中,温度大幅升高,使 F_8 断层以东部分采掘作业面温度高达 28.5~31.2 ℃。同时,《关于加强非煤矿山安全生产工作的指导意见》(国家矿山安全监察局,矿安〔2022〕4 号)要求“中小型金属非金属地下矿山同时回采的中段数量不得多于 3 个”,红透山铜锌矿同时

回采中段为7个,不满足要求。因此将同时回采中段数量由7个减少至3个,一方面,可以满足国家相关要求,另一方面,生产中段平均风量由20.0 m^3/s增加至48.0 m^3/s,可以降低F_8断层以东采掘作业面的风流温度。利用式(4)进行计算,当西侧中段进风温度为20 ℃时,中段风流到达东侧温度可降低4.6～6.5 ℃。

3 主辅扇及控制

3.1 主扇设置优化方案

基于矿山生产调整和低阻力通风网络优化需求,对主扇系统进行优化,具体如下:由于1#西回风井已改造为西进风井,不再担负回风功能,因此1#西回风井地表主扇(DK45-6-No17 2×132 kW)和−467 m主扇(DK45-6-No19 2×200 km)停用;新施工东回风井后,东回风井承担了2#西回风井的大部分回风功能,2#西回风井仅利用−467 m主扇(DK45-6-No20 2×250 km),地表主扇(DK45-6-No17 2×132 kW)停用;东回风井在−587 m设置主扇,经需风量计算、风量分配、通风阻力计算,选用FKCDZ-8-No28(2×315 kW)风机,经校核可满足−587 m主扇单机运行要求。

对主扇系统进行优化后,主扇数量由4台减少至2台,装机容量由1 428 kW降低至1 130 kW,经现场测试,东回风井−587 m主扇风量约为105 m^3/s,2#西回风井−467 m主扇风量为56 m^3/s,全矿井风量为161 m^3/s,可满足生产要求。

3.2 无风门高风压引射辅扇

针对深部(−827 m以下)开采进风困难,在−827 m中段2#盲罐井附近设置无风门高风压引射通风机站,如图3所示。该通风机站设置在进风路线上,利用引射原理在进风路线上增加通风动力,在不影响进风井巷运输的情况下,促使新鲜风顺利进入深部开采区域。该通风机站主要由引射风机、引射风道、运输巷、运输兼进风巷组成,引射风道出风口与运输巷的夹角取15°。经计算选型,引射风机选用型号为FKCDZ-No17(2×75 kW)的对旋风机,风压为1.2～1.6 kPa,设置无风门高风压引射通风机站后,深部开采形成“抽出为主+压入为辅”的混合式通风系统,可大幅增加深部开采进风量。

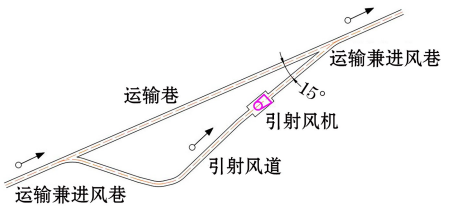


图3 −827 m无风门高风压引射通风机站

Fig.3 −827 m high air pressure ejector fan station without damper

3.3 主扇远程智能变频控制

(1) 风机变频控制节能原理。

风机频率、转速与风机风量、风压和功率的关系见下式[13-14]。

$$\begin{cases} \dfrac{f_1}{f_2}=\dfrac{n_1}{n_2}=\dfrac{Q_1}{Q_2} \\ \left(\dfrac{f_1}{f_2}\right)^2=\left(\dfrac{n_1}{n_2}\right)^2=\dfrac{P_{st1}}{P_{st2}} \\ \left(\dfrac{f_1}{f_2}\right)^3=\left(\dfrac{n_1}{n_2}\right)^3=\dfrac{N_1}{N_2} \end{cases} \tag{5}$$

式中:f_1、f_2为风机的频率,Hz;n_1、n_2为风机的转速,r/min;Q_1、Q_2为风机的风量,m^3/s;P_{st1}、P_{st2}为风机的风压,Pa;N_1、N_2为风机的输出功率,kW。

由式(5)可知,风机风量与频率呈线性关系,风压与频率的平方成正比,功率与频率的立方成正比。因此通过调节运行频率降低风机转速,可同步控制主扇的风量、风压和功率。当降低频率时,风机的输出功率以三次方关系减少,可显著降低风机的能耗。

(2) 主扇远程智能变频控制。

不同作业时段井下作业面数量不同、工作状态不同,全矿井的需风量不同。对红透山铜锌矿不同作业段作业面数量和工作状态进行统计,采用分项计算总风量法计算全矿井的需风量[15],依据式(5)计算出不同时段红透山铜锌矿主扇的运行频率,结果见表2。

表2 不同作业时段的需风量和主扇频率

Table2 Air demand and main fan frequency in different working periods

时间段	班次	采场数量/个	掘进作业面数量/个	其他场所数量/个	通风主要作用	需风量/(m^3/s)	主扇频率/Hz
0:00～8:00	一班	6	6	2	排除粉尘	94.6	34
8:00～12:00	二班	12	14	6	排除粉尘	130.2	46
12:00～16:00	二班	12	14	6	排除炮烟	142.5	50
16:00～24:00	三班	12	8	4	排除粉尘	113.6	40

为实现全矿井按需供风和节能降耗,基于不同作业时段的全矿井的不同需风量,针对红透山铜锌矿的2台主扇(东回风井-587 m主扇、2#西回风井-467 m主扇)建立远程变频控制系统,根据不同作业时段的矿井需风量编写和内置自动变频控制程序,实行主扇分作业时段智能变频控制,形成主扇远程智能变频控制系统,如图4所示。依据式(5),计算得出红透山铜锌矿年通风能耗费用可节约42.8%。

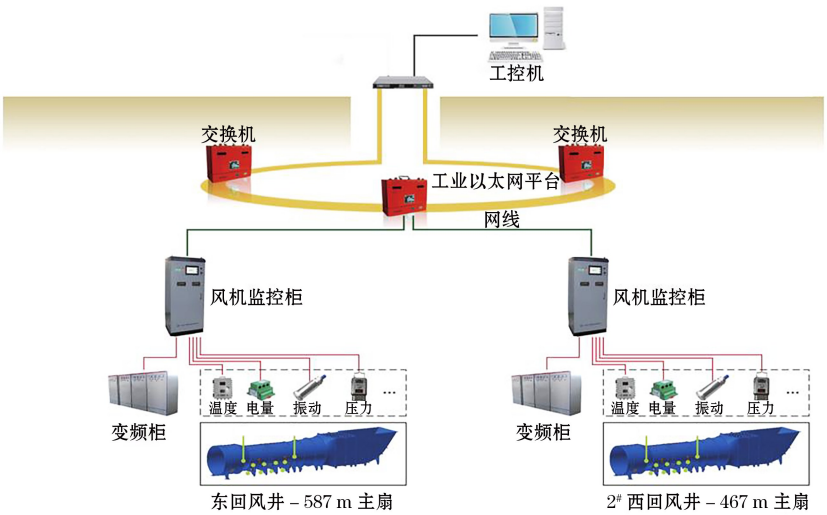


图4 主扇远程智能变频控制系统

Fig.4 Main fan remote intelligent frequency conversion control system

4 提质降耗效果分析

构建低阻力通风网络、优化主辅扇设置、实行主扇远程智能变频控制等提质降耗技术方案实施后,全面分析了红透山铜锌矿通风系统的提质降耗效果。

4.1 提质效果

通风系统提质降耗技术方案实施前后的基本指标对比见表3,表中第6项指标的提升幅度为相对值,其他指标的提升幅度为绝对值。

表3 通风系统提质降耗技术方案实施前后的基本指标对比

Table 3 Comparison of basic indicators before and after the implementation of the quality-improving and consumption-reducing technical scheme for the ventilation system

序号	指标	合格标准/%	实施前/%	实施后/%
1	风量(风速)合格率	65	60.00	85.70
2	风质合格率	90	75.80	93.50
3	作业环境空气质量合格率	60	55.00	85.70
4	有效风量率	60	58.00	78.30
5	风机效率	70	61.90	76.30
6	风量供需比	1.32~1.67	1.22	1.39
7	通风系统综合指标	72	66.00	86.20

由表3可知,各项指标得到了大幅提升,平均提升20.43个百分点。此外,深部(-827 m以下)进风量增加36.1 m^3/s,作业场所温度平均降低7.5 ℃。因此,通过实施通风系统提质降耗技术方案,解决了该矿井东侧(F_8断层以东)及深部(-827 m)采场温度、风量、风质不达标的问题,大幅改善了井下作业环境,保障了矿山的安全开采。

4.2 降耗效果

经主扇风机装置性能分析,通过构建低阻力网络,全矿通风阻力降低了56.39%,通风能耗费用可节约150.2万元/a;通过主扇远程智能变频控制,通风能耗费用进一步节约42.8%(约152.1万元/a)。综上所述,通风能耗费用可节约302.3万元/a,取得了显著的节能降耗效果。

5 结论

本文开展了红透山铜锌矿超深井复杂高阻力通风系统的提质降耗研究,通过构建低阻力通风网络,优化主辅扇设置、实行主扇远程智能变频控制等技术方案和措施,解决了通风系统面临的主要技术难题,取得了显著的节能降耗效果。得出的主要结论如下。

(1) 以合理布置进回风井、多风路并联降阻、中段集中开采大风量降温为设计原则,构建了适应超深井长走向矿井的复杂低阻力通风网络,全矿通风阻力降低了56.39%。

(2) 通过对主扇设置进行优化,在保证全矿井风量供给的前提下,主扇数量由 4 台减少至 2 台,通风能耗费用可节约 150.2 万元/a;通过在深部进风线路上设置无风门高风压引射通风机站,深部进风量增加 36.1 m^3/s;通过主扇远程智能变频控制,通风能耗费用进一步节约 42.8%(约 152.1 万元/a)。

(3) 通风系统提质降耗技术方案实施后,通风系统的 7 项基本指标得到了大幅提升,平均提升 20.43个百分点,井下作业环境显著改善。

参考文献(References):

[1] 古德生,周科平.现代金属矿业的发展主题[J].金属矿山,2012(7):1-8.
GU Desheng, ZHOU Keping. Development theme of the modern metal mining[J]. Metal Mine,2012(7):1-8.

[2] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[3] REN Gaofeng, WANG Wei, WU Wenbo, et al. Carbon emission prediction model for the underground mining stage of metal mines[J]. Sustainability,2023,15(17):12738.

[4] 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.
ZHANG Haoqiang, LIU Dake. Ventilation network optimization of Pakrut Gold Mine based on Ventsim[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):131-142.

[5] 王凯旋,彭俊兴,梁宗霍,等.深部复杂矿井通风系统优化数值模拟研究[J].金属矿山,2023(10):221-230.
WANG Kaixuan, PENG Junxing, LIANG Zonghuo, et al. The investigation on numerical nimulation of deep complex mine ventilation system optimization[J]. Metal Mine,2023(10):221-230.

[6] XIE Zhongpeng. Distribution law of high temperature mine's thermal environment parameters and study of heat damage's causes[J]. Procedia Engineering,2012,43:588-593.

[7] DU Cuifeng, BIAN Menglong. Numerical simulation of fluid solid coupling heat transfer in tunnel[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018,12:117-125.

[8] 徐宇,李孜军,贾敏涛,等.深部矿井热害治理协同地热能开采构想及方法分析[J].中国有色金属学报,2022,32(5):1515-1527.
XU Yu, LI Zijun, JIA Mintao, et al. Conceptualization and method for synergetic mining of geothermal energy as solution to heat hazard control in deep mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1515-1527.

[9] 张永亮,陈喜山.矿区多机站通风监控与自然风压联合应用研究[J].矿业研究与开发,2015,35(1):84-87.
ZHANG Yongliang, CHEN Xishan. Combined application on ventilation monitoring and natural air pressure of multi-machine station in mining area[J]. Mining Research and Development,2015,35(1):84-87.

[10] 吴超.矿井通风与空气调节[M].长沙:中南大学出版社,2008.
WU Chao. Mine ventilation and air conditioning[M]. Changsha: Central South University Press,2008.

[11] 谭星宇,谢贤平,赵艳艳.喷浆支护掘进工作面通风热环境数值模拟[J].安全与环境学报,2021,21(2):576-582.
TAN Xingyu, XIE Xianping, ZHAO Yanyan. Numerical simulation for the thermal environment of the ventilation for the shotcrete support heading face[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(2):576-582.

[12] 杨德源,杨天鸿.矿井热环境及其控制[M].北京:冶金工业出版社,2009.
YANG Deyuan, YANG Tianhong. Thermal environment in mine and its control[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2009.

[13] 袁梅芳.LOGO 分时段变频控制井下主风机转速及输出风量[J].金属矿山,2013(8):138-140.
YUAN Meifang. Control of the underground main fan speed and air output with LOGO time-sharing and frequency conversion[J]. Metal Mine,2013(8):138-140.

[14] 张卅卅,任高峰,张聪瑞,等.深部开采矿井通风智能感知及风机远程集中安全监控系统[J].武汉理工大学学报,2015,37(1):104-108.
ZHANG Sasa, REN Gaofeng, ZHANG Congrui, et al. Intellisense and remote centralized security monitoring system for the ventilation system in deep mining[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2015,37(1): 104-108.

[15] 古德生,唐绍辉,谢源,等.采矿手册(第七卷 矿山安全)[M].长沙:中南大学出版社,2021.
GU Desheng, TANG Shaohui, XIE Yuan, et al. Mining handbook (volume 7 mine safety)[M]. Changsha: Central South University Press,2021.