三鑫金铜矿地层储冷降温技术研究*

胡勇[1]，刘东锐[2]，高航[1]，张忠传[2]，廖宁[2]，钟生元[2]

（1.湖北三鑫金铜股份有限公司， 湖北 大冶市 435100；
2.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对三鑫金铜矿井下高温热害问题，基于地层储冷技术，依托矿山恒温带废弃巷道构建预冷系统，冬季储冷、夏季释冷，可实现井下风流整体降温。通过理论计算，结合该地区地温情况，最终形成经济可行的综合降温方案；采用Ventsim软件对通风系统进行模拟优化，验证所选方案的可行性。结果表明：矿山预冷线路选定为线路一，该线路通风阻力为801.71 Pa，可匹配K40-6No.18型风机，确保冷能高效输送；通风系统优化前，模型底部中段夏季风路温度为29.5 ℃，优化后降至25.3 ℃，降幅达4.2 ℃，起到了较好的降温效果。现场应用表明，采取地层储冷降温优化后，深部中段各测点的平均湿球温度降低至24.62 ℃，平均风速提升至1.27 m/s，降温后的风路温度满足低于27 ℃的规程要求。

关键词：深井热害；地层储冷降温；预冷线路；数值模拟

中图分类号：TD861 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)01-0031-08

Study on Stratum Cold Storage Cooling Technology for Sanxin Gold-Copper

HU Yong[1], *LIU Dongrui*[2], *GAO Hang*[1], *ZHANG Zhongchuan*[2], *LIAO Ning*[2], *ZHONG Shengyuan*[2]

(1.Hubei Sanxin Gold-Copper Co., Ltd., Daye, Hubei 435100, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In view of the problem of high-temperature thermal hazard in the underground of Sanxin Gold-Copper Mine, a pre-cooling system was constructed based on the stratum cold storage cooling technology, utilizing the abandoned roadways in the mine's constant temperature zone for cold storage in winter and cold release in summer, which can achieve the overall cooling of underground airflow. Through theoretical calculations combined with the local geothermal conditions, a cost-effective comprehensive cooling scheme was finally formed. The Ventsim software was used to simulate and optimize the ventilation system to verify the feasibility of the selected scheme. The results show that the mine's pre-cooling line is selected as Line 1, with a ventilation resistance of 801.71 Pa, which can be matched with the K40-6No.18 fan to ensure efficient cold energy transmission. Before the optimization of the ventilation system, the temperature of the air path in the bottom level of the model in summer is 29.5 ℃, and after optimization, it drops to 25.3 ℃, with a reduction of 4.2 ℃, achieving a good cooling effect. Field application shows that after the optimization of stratum cold storage cooling, the average wet-bulb temperature of each measuring point in the deep level drops to 24.62 ℃, and the average wind speed increases to 1.27 m/s, and the temperature of the air path after cooling meets the regulatory requirement of being lower than 27 ℃.

Key words: Deep well thermal hazard, Stratum cold storage cooling, Pre-cooling line, Numerical simulation

0 引言

矿产资源是社会发展和科技进步的重要物质基础，随着浅地表资源的开采殆尽，深部资源的开发愈发紧迫。然而在进行深部资源开采的过程中，往往需面对“三高一扰动”的复杂影响，尤其是在高温环境下，高温恶劣环境严重制约作业人员的正常活动，不仅作业效率大打折扣，还使得事故发生率显著上升，这对生产活动的顺利开展产生了极大阻碍，是目前矿山开采亟待攻克的难题[1-3]。深井热害的治理研究受到诸多国家的重视，南非等非洲国家明确规定，井下工作温度（湿球温度）需限定在28 ℃以内。在我国，相关规定指出：井下工人持续作业时，湿球温度不得高于27 ℃，一旦超出此标准，就必须采取相应的通风降温措施；而当湿球温度超过30 ℃时，则应当立即停止作业活动，以保障井下作业的安全

* **收稿日期**：2024-12-25
作者简介：胡勇（1985—），男，湖北恩施人，硕士，高级工程师，主要从事矿山采矿、安全、通风技术研究。E-mail:shutongxs521@163.com
通信作者：高航（1990—），男，满族，辽宁铁岭人，工程师，主要从事矿山采矿、安全、通风技术研究。E-mail:530471462@qq.com

与工人的健康[4-5]。

目前国内外降温措施主要有增加风量、人工制冷降温、预冷夏季进风风流、个体防护和地层储冷技术等[6-7]。众多学者对此进行了研究,李鸿蔚等[8]利用热管换热器能回收余热的特点,提出利用矿井空调系统,实现空气冷热系统的内部循环利用;王君健[9]在某铂金矿地表布置了一套制冷系统及配套冷却塔,实现冷却水和空气向井下的输送;程春龙[10]针对某硫铁矿的高温掘进问题,利用制冷空调系统和双层隔热风筒,使得掘进工作面风流平均温度由34.7 ℃降低至 26 ℃;郭忠磊等[11]采用理论计算和模拟仿真方法,模拟不同供风温度和供风量条件下巷道温度场的变化情况,分析得出最佳制冷参数,并开展制冷系统的设备选型和现场应用。可以发现,矿井降温技术按照原理可分为两类:一是机械制冷技术,是一种利用现代空调技术来解决深部矿井高温热害的降温技术,制冷效果较好,但是投入较大[12-14];二是非机械制冷技术,是一种通过优化通风系统为矿井开采提供降温的方式,主要包括优化矿井开拓布置、优化通风线路、增大风量、受控循环通风、压气动力等[15-17]。

深井降温措施众多,但大部分都是采用机械制冷,虽然能高效降低工作面环境温度,但是其成本较高、系统布设繁琐。而地层储冷技术可根据矿山的特点,运用矿山现有工程、设备的同时,达到较好的降温效果[12]。因此,本文针对湖北三鑫金铜矿井下通风特征,利用地层储冷技术,降低矿山深部工作面作业温度,为同类型矿山提供一种经济可行的井下降温方案。

1 矿山通风系统现状及存在问题

湖北三鑫金铜股份有限公司(简称三鑫金铜矿),位于湖北省大冶市,属亚热带季风气候,冬天冷夏天热,平均气温 17.0 ℃,夏季极端高温达 40.3 ℃,冬季极端低温达 −11.3 ℃。三鑫金铜矿经过三十多年的开采,开拓深度已达 1 050 m,进入了深井开采范畴[18-19]。

矿山采用中央进风两翼回风的中央对角式通风系统,副井(断面积 17.63 m^2)、主斜井(断面积 7.92 m^2)、17 线充填井(断面积 9.62 m^2)进风,两翼的鸡冠咀 30 线风井(断面积 12.57 m^2)和桃花嘴 7 线风井(断面积 9.12 m^2)回风。设计采用多级机站的抽出式通风方式,新鲜风流经副井进入鸡冠咀和桃花嘴矿区各中段下盘脉外运输巷,洗刷本中段各回采、掘进工作面形成污风,而后经空区向上排入上中段上盘回风平巷,在多级机站风机的作用下,污风汇聚至 30 线和 7 线回风井并排出地表。通风系统设计如图 1 所示。

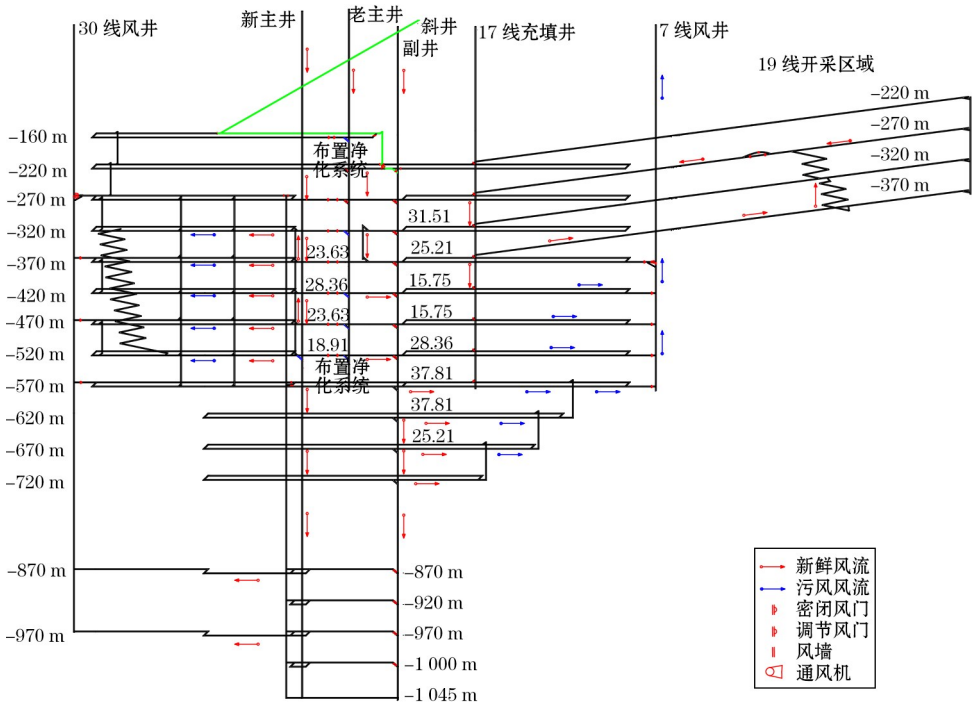


图 1 通风系统

Fig.1 Ventilation system

矿山现有5台主扇,其中鸡冠咀－270 m中段2台主扇(并联),桃花嘴－370 m中段1台主扇,主要通风机型号均为FCDZ-6-NO22;桃花嘴－570 m中段1台主扇(暂未运行),主要通风机型号为K40-8-№22;桃花嘴－620 m中段1台主扇,主要通风机型号为K40-4-№12。另外矿井有2台辅扇辅助通风,分别位于鸡冠咀－270 m中段溜井回风巷、桃花嘴－570 m中段盲回风井。

随着矿山深部多个中段逐步投入生产矿井,夏季深部作业面温度超过规程限值,通过对三鑫金铜矿深部巷道温度进行监测,发现同一中段的作业面气温基本相同,差值约为0.5～1.2 ℃,目前三鑫金铜矿－600 m水平深度以下区域,夏季多个作业点空气温度超出27 ℃,部分区域温度更高。

2 矿井地层储冷降温技术

地壳的温度变化主要受太阳辐射以及地球内部产生的热量影响,在地壳浅部随太阳辐射而产生温度变化,叫做变温层;太阳辐射影响随深度的增加而减弱,达到一定深度后这种影响即接近于消失,此时地壳的温度基本保持恒定,称为恒温层;地壳更深部受地球内部热量影响,温度随深度增加而增加,称为增温层[20]。地层储冷技术则是利用恒温层特性,将地热能与风能相结合,将冬季空气中风的冷能储存于地下恒温层内,春秋两季采取相应措施减少冷能释放,夏季则可以将储存的冷能提取出来,通过预冷巷道,用于井下通风降温[21-23]。

为使储冷效果达到预期的效果,首先需要确定预冷巷道的长度和面积,从而规划合适的预冷线路,然后计算预冷线路的通风阻力,最终确定预冷风机的型号。

2.1 地层储冷降温参数计算

(1) 空气预冷计算。

预冷巷道的长度,可按公式(1)计算:

$$L=2.3\frac{3\ 600Q\gamma c_p}{KP}\lg\frac{t_r-t_0}{t_r-t_1} \tag{1}$$

式中:L为预冷巷道的长度,m;γ为冷空气重率,γ=1.20 kg/m^3;Q为进风量,按井下开采需要风量的1.2系数考虑,m^3/s;c_p为空气定压比热,取0.240 3 kcal/(kg·℃);K为热交换系数,kcal/(m^2·℃·h);P为预冷巷道的周长,m;t_r为岩体温度,℃;t_0为空气进入巷道前的温度,℃;t_1为空气预冷后的温度,取2 ℃。将c_p=0.240 3 kcal/(kg·℃)、γ=1.20 kg/m^{3}代入式(1)得:

$$L=\frac{2\ 387.62Q}{KP}\lg\frac{t_r-t_0}{t_r-t_1} \tag{2}$$

预冷巷道的面积计算公式为:

$$S=\frac{2\ 387.62Q}{K}\lg\frac{t_r-t_0}{t_r-t_1} \tag{3}$$

(2) 热交换系数。

岩体与空气的热交换系数K是岩体内部热传导系数λ与岩体向空气散热系数α的综合系数。由于岩体与空气间的热交换需要一定时间,该系数随着初冬到深冬冷却圈的变化而变化,不同时间和气温的同一条预冷巷道,其K值也有所不同,预冷计算通常以冬季最低温度的热交换系数为基础。以冬季最低温度时冷空气流经预冷巷道后,达到2 ℃的预冷巷道长度来计算热交换系数K。

一般情况下,可根据岩石性质和巷道风速,按下式求算预冷巷道的热交换系数:

$$K=\frac{8.7\lambda}{1.33+\frac{\lambda}{V^{0.8}}} \tag{4}$$

式中:λ为岩体的导热系数,kcal/(m^2·℃·h);V为巷道风速,m/s。

根据该区域地温情况,预冷风量按照51 m^3/s计算,热交换系数为0.349 4 kcal/(m^2·℃·h),巷道周长为11.66 m,进风温度为35 ℃,岩温取20 ℃,预冷后的温度为26 ℃,则需要的预冷面积为14 267.61 m^2,预冷巷道长度为1 223.64 m。

2.2 预冷线路选择

根据矿山通风特征,结合现场勘察发现,矿山斜井以及－160 m中段已回采完毕,现无人员出入和工程施工,且斜井和－160 m中段内常年温度为20 ℃左右。根据矿山的以上特点,结合国内类似矿山的工程实例[24-26],采用地层储冷方案为整体降温方案,同时利用冰雾机进行局部降温,即利用上部水平废旧巷道及相关工程,对进风风流进行预冷,降低进风风流的温度,达到整体降温的目的。对于局部异常高温区域,采用冰雾机送风至作业采场或工作面,以降低作业面温度。

线路一:热空气从主斜井进入井下,至－160 m中段后,经该中段12线平巷至14线预冷点预冷(见图2)后,再通过14线天井进入－220 m中段副井(见图3)附近。在联巷附近安装预冷风机,在副井石门顶板安装导风板,将预冷风流与副井进风混合后进入井下,可供预冷长度约为1 252 m,预冷面积为14 452.45 m^2。

线路二:热空气从主斜井进入井下,至-160 m中段后,经该中段21线平巷预冷点预冷后,再通过斜坡道进入-220 m中段22线附近。在副井石门安装预冷风机,在副井石门顶板安装导风板,将预冷风流与副井进风混合后进入井下,可供预冷长度约为1 886 m,预冷面积为17 445.5 m^2。

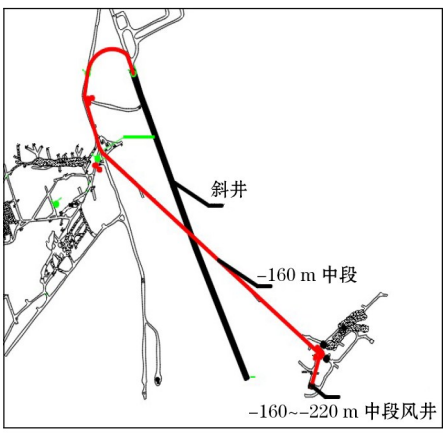


图2 斜井和-160 m中段预冷线路

Fig.2 Inclined shaft and -160 m middle section pre-cooling line

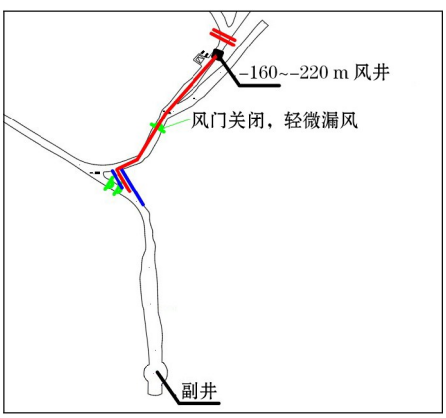


图3 -220 m中段预冷线路

Fig.3 -220 m middle section pre-cooling line

两条预冷线路的优缺点对比见表1。通过表1可知,为了不影响-220 m中段的生产运输,避免生产污风对新鲜风流的污染,预冷路线选择线路一。

表1 两条预冷线路优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of two pre-cooling lines

线路	优点	缺点
线路一	①线路明确,不影响-220 m中段的生产运输。 ②通风能耗更低,不易被生产污风污染。	①需要对巷道及天井进行扩帮 ②预冷长度及面积只刚好满足需求
线路二	①无需对井巷进行扩帮 ②并联通风,线路长度大,预冷效果更好。	①线路长,通风阻力大,通风能耗高。 ②路线经斜坡道,影响-220 m中段的生产运输。

由于地层储冷系统春、秋两个季节需要停止预冷风机,封闭预冷巷道,待夏天投入使用,为了不影响井下的通风,可在如图4所示的蓝色圆圈位置(颜色标识见电子版)设置风门,封闭-160 m中段的风路,打开箭头所示的风门,使得斜井风流能够顺利进入井下。

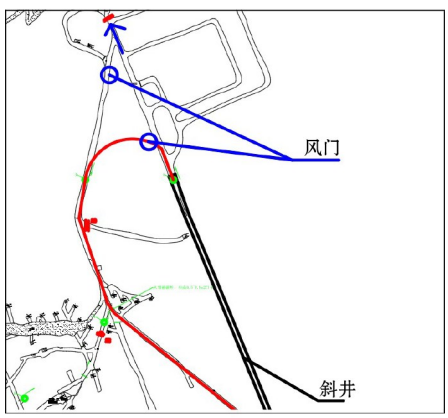


图4 春、秋两季风门构筑情况

Fig.4 Construction of dampers in spring and autumn

2.3 预冷线路通风阻力计算

根据预冷线路一的规划,按照51 m^3/s的风量,计算预冷线路的通风阻力,计算结果见表2。

线路的沿程摩擦阻力为490.21 Pa,则总阻力为801.71 Pa(包括局部阻力、风机处的阻力以及自然风压)。因上部为开采结束中段,扩刷工作难度大,无合适的位置处置废石,实际可采用多风路平行通风,以降低风阻。

表2 预冷线路一的摩擦阻力

Table 2 Friction resistance of pre-cooling line one

节点	地点	巷道长度/m	巷道断面积/m^2	巷道周长/m	摩擦因数	风量/(m^3/s)	摩擦阻力/Pa
1~2	主斜井井口至-160 m井底	380	11.30	12.65	0.020 0	51.00	173.30
2~3	斜井井底至-220~-160 m井口	594	8.53	10.99	0.007 1	51.00	194.24
3~4	预冷风井	60	9.00	12.00	0.020 0	51.00	51.38
4~5	预冷风井井口至副井井口	218	8.53	10.99	0.007 1	51.00	71.29
总计							490.21

2.4　预冷线路风机选型

预冷巷道在夏季升温过程中会损耗大量冷能。因此，为保障预冷巷道的预冷效能得以持续，在冬季时，需即刻对预冷巷道与主风路间的联络道予以封堵，并同时启动预冷风机，借助风机的运转牵引地表冷空气流入预冷巷道，从而实现岩温的有效降低。待至春、秋季，则关停预冷风机，并再次封堵预冷巷道，以便在夏季能够将储存的冷能输送至井下以供使用。经系统计算，预冷风机所需提供的风量应为 51 m^3/s，通风总阻力达 801.71 Pa。经对风机选型表进行查阅，并充分考虑矿山的实际生产状况，最终选定型号为 K40-6No.18 的风机(功率 90 kW)。此风机的全压特性曲线以及主扇运转时实际工况点的风量为 55 m^3/s，风压为 920 Pa，其风机叶片的安装角度为 29°，风机效率可达 82.5%，详情见图 5。

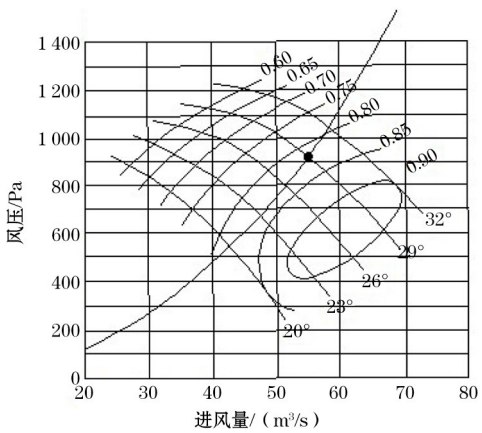


图 5　K40-6No.18 风机全压特性曲线及工况点

Fig.5　Total pressure characteristic curves and working condition point of K40-6No.18 fan

风机采用的电动机功率 N_e 可按式(5)计算：

$$N_e=\frac{M\cdot H_t\cdot Q_f}{1000\eta_t\cdot\eta_e} \tag{5}$$

式中：M 为电机备用系数，轴流式取 1.1～1.2，离心式取 1.2～1.3；η_t 为电机功率，取 0.90～0.95；H_t，Q_f，η_e 分别对应困难时期工况点的风压、风量和效率。

将数据代入式(5)，计算可得 N_e=898.82 kW，查阅风机选型表，选择的 K40-6No.18 风格功率 90 kW＞71.02 kW，可以满足矿井降温的需求。如图 6 所示，在－220 m 中段石门位置做了相应的改造，用于安装预冷风机。

根据系统降温方案设计，－160 m 中段的通风改造工程为在旧巷增设 5 道密闭墙，－220 m 斜坡道增设 1 道风门；－220 m 中段的通风改造工程为砌筑 12～14 线之间的密闭墙，并将副井石门风门移至三岔口外部。密闭墙用来隔绝预冷风路与其他风路的连接，保证预冷过程不受其他热源或风流的影响。

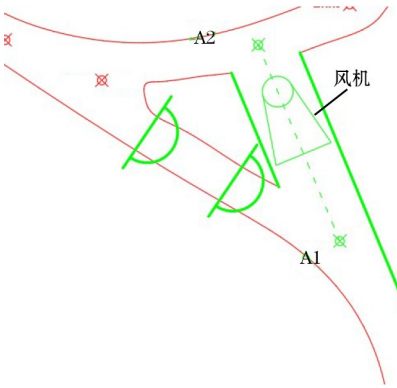


图 6　风机硐室

Fig.6　Fan chamber

3　风路模拟研究

为了验证预冷降温方案的有效性，以防风机采购以及风路改造后难以达到预期效果，从而对矿山产生相应经济损失，本文采用 ventsim 风路模拟软件对井下热流、湿度和降温过程进行建模和三维模拟，分析通风网络优化的有效性，合理减少通风和采矿成本，图 7 为矿山井下风路模型。

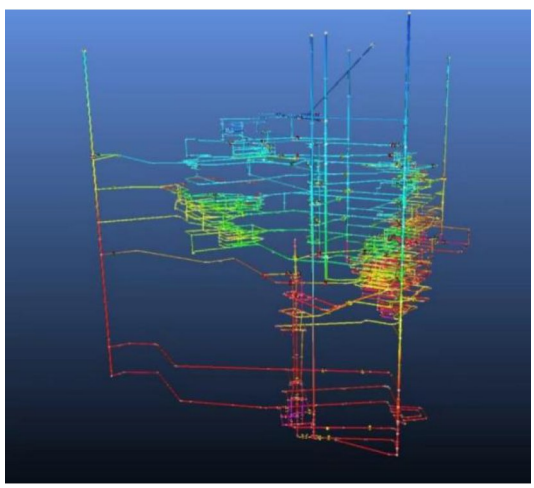


图 7　矿山井下风路模型

Fig.7　Mine underground airway model

图 8 为优化前模型底部中段夏季风路的风温，图 9 为优化后模型底部中段夏季风路的风温，优化前底部中段风路温度为 29.5 ℃，优化后风路温度达 25.3 ℃，风路温度降低了 4.2 ℃，可见通过上述降温措施，起到了较好的降温效果。

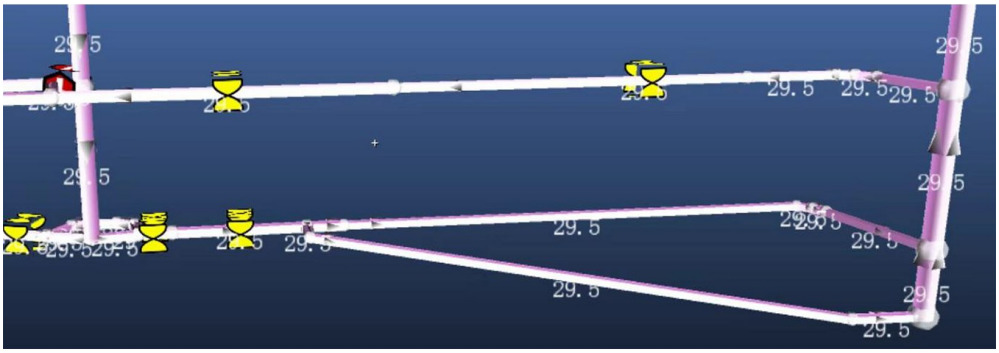


图 8 优化前底部中段夏季风路温度(单位:℃)

Fig.8 Temperature of the summer air route in the bottom middle section before optimization (unit:℃)

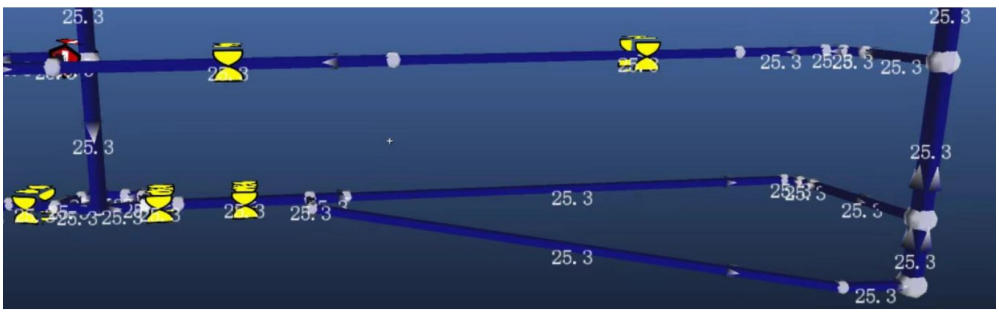


图 9 优化后底部中段夏季风路温度(单位:℃)

Fig.9 Temperature of the summer air route in the bottom middle section after optimization (unit:℃)

4 应用效果分析

2023 年年底在三鑫金铜矿完成了预冷降温所需的所有工程准备工作,该系统于 2024 年 7 月中旬正式投入使用,采取地层储冷降温措施后,预冷的风流进入深部中段,使井下工作面温度降低。在采取降温措施前后深部中段各测点工作面温度和风速对比见表 3。相对于采取降温措施前,采取地层储冷降温措施后,各测点的平均湿球温度降低 12.54%,平均风速增加 17.59%,效果显著,降温后的风温满足低于 27 ℃的规程要求。

表 3 深部中段各测点采取降温措施前后湿球温度和风速对比

Table 3 Comparison of wet-bulb temperature and wind speed at each measuring point in deep sublevels before and after the implementation of cooling measures

测点位置	采取降温措施前		采取降温措施后	
	湿球温度/℃	风速/(m/s)	湿球温度/℃	风速/(m/s)
1	28.80	1.14	24.50	1.24
2	27.50	1.10	24.50	1.26
3	28.40	1.08	24.60	1.28
4	27.60	1.05	24.80	1.28
5	27.70	1.11	24.60	1.31
6	28.90	1.00	24.70	1.24
均值	28.15	1.08	24.62	1.27

5 结论

(1) 基于地层储冷技术,依托矿山恒温带废弃巷道构建预冷系统,冬季储冷、夏季释冷,可实现井下风流温度整体降低;局部辅以冰雾机降温,形成经济可行的综合降温方案。

(2) 通过理论计算,结合该区域地温情况,确定预冷巷道长度为 1 223.64 m,面积为 14 267.61 m^2,优选预冷线路一,该线路通风阻力为 801.71 Pa,可匹配 K40-6No.18 型风机(功率 90 kW),确保冷能高效输送。

(3)模拟结果表明,通风系统优化前模型底部中段夏季风路温度为 29.5 ℃,优化后降至 25.3 ℃,降幅达 4.2 ℃,起到了较好的降温效果。

(4) 现场应用表明,采取地层储冷降温措施优化后,深部中段各测点的平均湿球温度降低至 24.62 ℃,平均风速提升至 1.27 m/s,降温效果显著,符合安全规程要求。

(5) 建议进一步在-160 m 中段增设高压喷雾系统,利用水仓水源强化风流冷却,提升降温效率。本研究验证了地层储冷技术在深井高温治理中的适用性,为同类矿山提供可推广的技术路径。

参考文献(References):

[1] 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.
WANG Yunmin, LI Gang, XU Yu, et al. Research status and prospect of thermal environment regulation of the deep mine of China in the past 20 years[J]. Metal Mine,2023(3):1-13.

[2] 张成法.夏甸金矿井下深部开采通风降温研究[D].青岛:山东科技大学,2020.
ZHANG Chengfa. Study on ventilation and cooling of deep mining in Xiadian Gold Mine [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology,2020.

[3] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向2035年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4):476-486.
GUO Qifeng, CAI Meifeng, WU Xinghui, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deepmetal mines toward 2035[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(4):476-486.

[4] 季德阁.高温巷道冷水截流降温围岩温度分布规律研究[D].焦作:河南理工大学,2022.
JI Dege. Study on temperature distribution law of surrounding rock with cold water interceptionand cooling in high temperature roadway[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2022.

[5] 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(8):28-32.
ZHAO Hongkai, QU Xingjun, CHENG Li, et al. Status quo of high-temperature heat hazard control and prevention technology in deep mines[J]. Gold,2024,45(8):28-32.

[6] 韩颖,李向威,闫志佳.我国高温矿井热害防治技术研究进展及展望[J].煤炭技术,2023,42(10):186-189.
HAN Ying, LI Xiangwei, YAN Zhijia. Research progress and prospect of heat damage prevention technology in high temperature mines in China[J]. Coal Technology,2023,42(10):186-189.

[7] 孟华,罗骋,吕旭,等.某金属矿通风系统优化的模拟研究[J].采矿技术,2024,24(5):242-246.
MENG Hua, LUO Cheng, LYU Xu, et al. Simulation study on the optimization of the ventilation system in a metal mine[J]. Mining Technology,2024,24(5):242-246.

[8] 李鸿蔚,王海宁,胡天寿,等.金属矿井智能通风平台开发与应用[J].金属矿山,2024(9):181-189.
LI Hongwei, WANG Haining, HU Tianshou, et al. Development and application of intelligent ventilation platform for metal mines[J]. Metal Mine,2024(9):181-189.

[9] 王君健.高温掘进巷道通风与局部隔热耦合降温机理与技术研究[D].长沙:中南大学,2023.
WANG Junjian. Study on the mechanism and technology of coupled cooling of ventilation and partial thermal insulation in high-temperature excavation tunnels [D]. Changsha: Central South University,2023.

[10] 程春龙.高温矿井掘进工作面围岩温度场分布规律及降温技术研究[D].长沙:中南大学,2023.
CHENG Chunlong. Study on the temperature field change law and cooling technology of surrounding rock in high temperature mine working face [D]. Changsha: Central South University,2023.

[11] 郭忠磊,崔嵛,王春龙.局部制冷降温技术在井下长距离掘进中的应用[J].黄金科学技术,2024,32(5):916-925.
GUO Zhonglei, CUI Yu, WANG Chunlong. Application of local refrigeration and cooling technology in underground long-distance excavation tunnel [J]. Gold Science and Technology,2024,32(5):916-925.

[12] 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.
ZHANG Liankun, KANG Tianhe, XIE Yaoshe, et al. Numerical simulation on heading face cooling of deep coal mine based on liquid-gas phase transition technology[J]. Safety in Coal Mines,2018,49(3):182-186.

[13] 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.
CUI Zhong, FENG Yingbo, CAO Pinwei, et al. Application of concentrated ice-making cooling technology by mechanical compression in coal mine [J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology,2012(4):111-113.

[14] 徐宇,李孜军,贾敏涛,等.冷循环便携式半导体降温服设计及制冷性能分析[J].中国安全生产科学技术,2022,18(4):40-46.
XU Yu, LI Zijun, JIA Mintao, et al. Design and refrigeration performance analysis of portable semiconductor cooling garment with cold circulation[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(4):40-46.

[15] 周福宝,魏连江,夏同强,等.矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现[J].煤炭学报,2020,45(6):2225-2235.
ZHOU Fubao, WEI Lianjiang, XIA Tongqiang, et al. Principle,key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2225-2235.

[16] 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 Chinses Journal of Nonferrous Metals,2022,32(5):1515-1527.

[17] 李孜军,徐宇,贾敏涛,等.深部矿井岩层地热能协同开采治理热害数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):671-680.
LI Zijun, XU Yu, JIA Mintao, et al. Numerical simulation on heat hazard control by collaborative geothermal exploitation in deep mine [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(3):671-680.

[18] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
ZHAO Xingdong. Research progress and development trends in deep gold mine mining[J]. Gold,2024,45(8):1-18.

[19] 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]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2019,41(4):417-426.

[20] 刘晓燕,赵军,石成,等.土壤恒温层温度及深度研究[J].太阳能学报,2007(5):494-498.
LIU Xiaoyan, ZHAO Jun, SHI Cheng, et al. Study on soil layer of constant temperature[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2007(5):494-498.

[21] 张宏乐,张昭喜,李宗,等.提煤立井井塔除尘降温协同治理方法研究[J].煤炭技术,2024,43(9):178-182.
ZHANG Hongle, ZHANG Zhaoxi, LI Zong, et al. Study on synergistic treatment method of dust removal and temperature reduction in shaft tower of coal lifting shaft[J]. Coal Technology,2024,43(9):178-182.

[22] 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.
LIU Jingxian, LI Guodong, CHANG Deqiang, et al. Present situation and prospect of mine geothermal hazard control technology[J]. Metal Mine,2023(7):18-27.

[23] 闫昊阳.矿井水源热泵系统换热器传热特性及系统性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
YAN Haoyang. Heat transfer characteristics of heat exchanger and performance study of heat pump system in mine water source[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2023.

[24] 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.

[25] 程东旭,段进超,李华华.超深井矿山井下降温技术研究[J].黄金,2024,45(8):40-45.
CHENG Dongxu, DUAN Jinchao, LI Huahua. Research on cooling technology for ultra-deep mine shafts[J]. Gold, 2024,45(8):40-45.

[26] 许卫军,冯福康,刘冠胜,等.基于 Ventsim 的凌源矿业公司通风系统优化及应用[J].黄金,2019,40(6):27-34.
XU Weijun, FENG Fukang, LIU Guansheng, et al. Optimization and application of the Ventsim-based ventilation system of Lingyuan mining company[J]. Gold, 2019,40(6):27-34.