

超深井矿山井下降温技术研究

程东旭,段进超,李华华

(长沙有色冶金设计研究院有限公司)

摘要:针对某超深井矿山井下热害问题,利用 Ventsim™ DESIGN 5.4 三维通风软件对矿山井下通风系统进行通风和热模拟计算,并通过热负荷计算对比需风量焓差,分析得到:矿山一期工程通过加大风量可以降低井下工作面气象环境至国家相关安全规程允许范围内(湿球温度不高于 27 °C)。二期工程通过加大风量不能解决井下高温问题,通过热模拟计算和分析后,根据矿山现状,在 3 个位置设置制冷站并进行核算,得到了每个制冷站所需负荷,最终对各个制冷机组进行了选型。

关键词:深井矿山;热害;矿井降温;通风模拟;降温技术;热模拟;热负荷

中图分类号:TD72

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)08-0040-06

doi:10.11792/hj20240805

引言

随着浅部资源消耗殆尽,矿山向深井发展的趋势越加明显。目前,国内已有几十座矿山开采深度超过 1 000 m,地温热害问题凸显,井下湿球温度达到 30 °C 以上,高温热害问题危及井下工人健康且降低了劳动生产率,随着越来越多的矿山向深部矿体进军,开展深井矿山通风降温技术研究具有重要现实意义^[1-4]。

随着矿山开采深度增加,井下高温热害问题日益凸显,越来越多的学者在井下通风降温技术、制冷降温技术和降温系统等方向进行了相应的研究和应用^[5-8]。李国富等^[9]对非隔热层巷道围岩的热量释放模式、调热圈形成原理等进行了分析研究,推导出隔热降温效果理论解析式及参数,工业试验对比证实巷道采用隔热降温技术后可以获得较好的技术经济效益;刘召胜等^[10]基于三维通风仿真软件对极厚大矿体开展深井通风热模拟,得到该矿山全年通风降温最优方案;王运敏等^[11]依据井下巷道热交换能量方程,分析井下巷道热交换基本规律,得出对巷道入风温度控制可以提高井巷热交换效率,达到降温目的;程力等^[12]通过分析目前井下通风降温技术的不足,提出了一种新型的移动式通风降温除尘技术;王雷^[13]提出一种新型井下分布式制冷降温系统,将制冷机分散布置,节约了保温管道投资,减少了冷量损失,工作面的降温效果显著提高;张健等^[14]提出向巷道围岩中放置冷水管,通过冷水管截流高温的方法来

降低围岩温度以此缓解矿井热害的降温方法;牛永胜^[15]设计了一套井下降温与热能综合利用系统,该系统可以制冷,为高温矿井提供冷源,也可以回收高温矿井井下热能,为地面建筑提供热源;罗勇东等^[16]针对某硫铁矿井下高温掘进问题,采用矿井空压式制冷空调系统和双侧隔热风筒及时排出掘进工作面的热水,使得掘进工作面降温效果显著;朱海亮等^[17]对高效制冷和远距离传热的热泵与动力热管复合系统进行了研究。

综上所述,目前国内金属矿山井下降温以加大风量的通风降温、局部降温措施等方式为主^[18],部分煤矿已采用了空调降温等措施来处理矿山热害。

本文以埋深达 1 200 ~ 1 800 m 某金矿矿体的开采为工程背景,利用 Ventsim™ DESIGN 5.4 三维通风软件对井下开拓系统建模并进行通风模拟,然后利用热模拟分析模块对井下主要放热源和采场工作环境进行热模拟分析,结合现场实际对矿山进行制冷机组的配备,并利用三维通风软件进行核验。经验证,所配备制冷机组可以满足该矿山 -1 860 m 中段人员作业场所的井下气象条件要求,为超深井矿山开采高温热害问题提供了切实可行的实施技术方案。

1 工程概况

1.1 气象条件

该金矿区所处位置属温带大陆性半湿润气候季风区,四季分明,春夏多东南风,秋冬多西北风。根据当地气象站 45 a 的气象资料,区域的历年平均气温 12.5 °C,

极端最高气温 38.9 °C, 极端最低气温 -17 °C。历史月平均气温如图 1 所示。

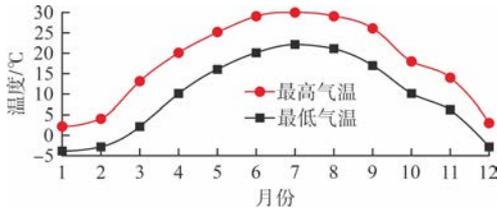


图 1 矿区地表历史月平均气温

Fig. 1 Historical monthly average surface temperature in mining areas

1.2 矿区概况

该金矿南北走向长度约 6.7 km, 矿体属缓倾斜矿体, 主要采用上向水平充填采矿法进行开采, 主副井开拓, 石门长度长, 矿山分 2 期工程建设: 一期工程开拓系统服务至 -1 120 m 中段, 埋深约 1 150 m; 二期工程开采至 -1 120 ~ -1 860 m, 埋深 1 880 m, 属于深井开采。矿区地温随深度增加温度基本呈线性递增, 每百米自然增温约 1.7 °C。根据钻探得到矿区不同埋深

的地温如表 1 所示。

表 1 不同埋深实测地温统计

Table 1 Statistics of measured ground temperature at different burial depths

埋深/m	18	25	100	390	1 000	1 100	1 300	1 500
地温/°C	12.0	15.0	11.6	20.0	32.0	34.0	38.1	40.5

注: 同一深度或不同深度的温度存在差异, 这与测试时的环境温度 and 季节有关。

1.3 通风系统简述

矿区为已生产矿山, 充分利用已有工程的情形下, 新增 2 条回风井作为主回风井, 考虑到矿山采用多中段生产、通风线路复杂、风流难以控制的特点, 采用抽出式通风方式。矿区采用分区通风, 北区采用侧翼对角式通风系统, 南区采用中央对角式通风系统。矿区的通风系统如图 2 所示。其中, 1 号、2 号回风井回风, 其余竖井和斜坡道进风, 总进风量为 1 671 m³/s。三维通风软件模拟得到风量分配结果如表 2 所示。

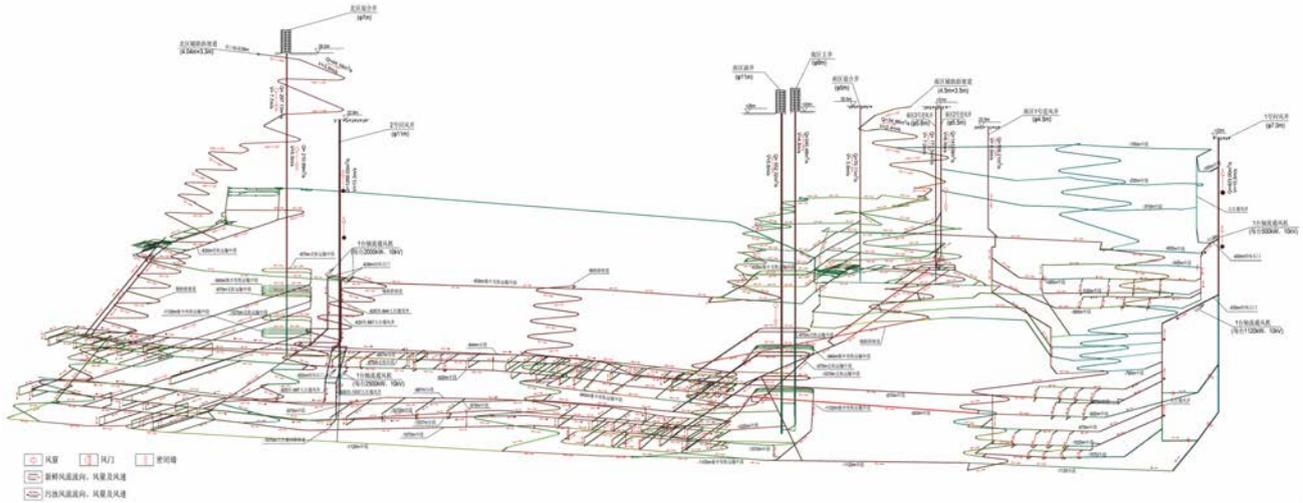


图 2 矿区通风系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the ventilation system in mining areas

表 2 矿区通风系统风量分配结果

Table 2 Air volume distribution for the ventilation system in mining areas

功能	巷道名称	断面面积/ m ²	风速/ (m · s ⁻¹)	风量/ (m ³ · s ⁻¹)	总风量/ (m ³ · s ⁻¹)
进风	北区辅助斜坡道	11.69	3.8	44.16	1 671
	北区混合井	38.48	7.7	297.13	
	南区混合井	19.63	3.9	76.11	
	南区 1 号进风井	15.9	6.9	109.21	
	南区 2 号进风井	23.76	6.0	143.09	
	南区 3 号进风井	24.63	7.0	173.54	
	南区辅助斜坡道	14.77	2.4	34.96	
	南区主井	50.27	4.8	240.48	
	南区副井	95.03	5.8	552.32	
回风	1 号回风井	38.48	10.5	403.00	1 671
	2 号回风井	95.03	13.3	1 268.00	

2 热负荷计算

矿区风量已经考虑了降温风量。为分析矿山通风降温效果, 本文对一期工程和二期工程井下热负荷进行定量计算。井下总放热量如表 3 所示。

开采 -1 120 m 以上矿体时, 根据围岩放热、空气压缩放热、机电设备放热、柴油设备放热、人体放热、井下涌水放热计算全矿井总放热量为 47 284.50 kW。核算考虑降温风量后的总风量为 1 671 m³/s, 焓差为 49 227.66 kW > 47 284.50 kW。故一期工程计算总风量的通风降温能力满足井下降温要求, 但二期工程通风降温不能满足井下降温要求。

表3 井下放热源及放热量汇总

Table 3 Summary of underground heat-releasing sources and heat release

开采时期	序号	井下放热源	放热量/kW
一期工程	1	围岩	12 284.31
	2	空气压缩	18 141.69
	3	机电设备	2 355.61
	4	柴油设备	1 362.54
	5	人体	320.54
	6	井下涌水	12 819.81
		合计	47 284.50
二期工程	1	围岩	23 538.32
	2	空气压缩	24 034.13
	3	机电设备	2 355.61
	4	柴油设备	1 362.54
	5	人体	320.54
	6	井下涌水	34 272.54
		合计	85 883.68

3 热模拟分析

3.1 一期工程开采热模拟分析

根据所计算的井下热负荷,结合矿区年平均气温、恒温层温度、地温梯度、围岩参数等,在考虑降温风量的条件下,采用 VentsimTM DESIGN 5.4 三维通风软件对井下主要放热源和采场工作环境进行热模拟分析。相关的工程环境参数如图3所示。

Simulation	
> Airflow	
> Contaminant	
> Diesel	
> Dust	
> Dynamic	
> Environment	
[RESET]	No
Air Density Compressible Flow	1.15 kg/m ³
Air Density Incompressible Flow	1.15 kg/m ³
Airway Age	10.00 年
Current Year	2010.571
Geothermal Gradient	1.9 C/100m
Rock Density	2,700 kg/m ³
Rock Specific Heat	790.0 J/kgC
Rock Thermal Conductivity	4.38 W/mC
Rock Thermal Diffusivity (Readonly)	2.053 m ² /s 10-6
Rock Wetness Fraction	0.45
Surface Atmospheric Lapse Rate	6.4 C/1000m
Surface Datum Elevation Above Sea Level	59.51 m
Surface Datum of MineGrid	24.00 m
Surface Datum Pressure Barometric	100.6 kPa
Surface Datum Relative Humidity	76.3 %
Surface Datum RockTemp	15.0 C
Surface Datum Temperature Dry Bulb	27.3 C
Surface Datum Temperature Wet Bulb	24.0 C
Surface Temperature Adjust	Yes
> Escape Routes	
> Fire	
> Gas	
> Heat	

图3 井下热模拟工程环境参数

Fig. 3 Environmental parameters for underground thermal simulation engineering

根据热负荷计算和热模拟结果,采场平均干球温度为 18.7 °C ~ 26.9 °C,符合国家相关安全规程要求。部分独头掘进面,未加局扇时,气温普遍为 30.2 °C ~ 34.4 °C,温度较高,增设局扇加强局部通风后,独头掘进面风温可降至 25.6 °C。

根据分析结果,在考虑降温风量的情况下,一期工程井下大部分区域温度满足国家相关安全规程要求,仅部分独头掘进面温度较高,通过局扇加强通风降温,可满足温度要求。因此,一期工程在生产过程中,主要采取通风降温的方式,解决井下地热问题;需重点加强独头掘进面通风降温;局部地温异常地段,必要时可采用冰块或局部制冷机组进行局部降温。

3.2 二期工程开采热模拟分析

二期工程开采主要为南区南部矿体,采用盲混合竖井和斜坡道开拓。由于矿区埋深 1 500 m 时地温为 40.5 °C,结合矿区年平均气温、各季节平均气温、恒温层温度、地温梯度、围岩参数等,对深部矿体开采进行热模拟分析。

在后期对深部开采时,由于 -1 570 m 中段以下矿体矿量较少,因此本次采用开采 -1 570 m、-1 520 m² 个中段进行热模拟分析。相关工程环境参数与图3一致(考虑矿区最热季节干球温度为地表干球温度)。

根据热模拟结果,-1 570 m 中段井下湿球温度分布如图4所示。经模拟解算,中段采场平均湿球温度为 30.1 °C ~ 33.6 °C,不符合国家相关安全规程要求。部分独头掘进面未加局扇时,湿球温度普遍为 43.7 °C ~ 45.3 °C;增设局扇加强局部通风后,独头掘进面风温也不能降至安全规程中有人员作业场所的井下气象条件要求。

根据分析结果,在考虑降温风量的情况下,井下大部分区域温度依旧不满足国家相关安全规程要求。在生产过程中,需要采取制冷机组或冰块的方式,解决深部井下地热问题。

4 二期工程深部开采制冷降温方案

4.1 制冷方案分析

根据深部开采热模拟分析结果,二期工程深部采场和独头掘进工作面在加强通风的情况仍不能满足安全规程中有人员作业场所的井下气象条件要求,考虑制冷降温措施对井下空气进行降温。

目前,国内外常见的制冷措施有冷冻水供冷、冷却器冷却风流的矿井集中空调系统,主要有以下3种类型:①地面集中式空调系统;②井下集中式空调系统;③井上、井下联合式空调系统。

地面集中式空调系统是将制冷站设置在地面,冷凝热也在地面排放,在井下设置高低压换热器将一次冷冻水转换成二次低压冷冻水,最后在用风地点上用冷却器冷却风流。但是,该制冷系统冷水的输送距离过长,该金矿埋深最深达 1 800 m,输送冷水的管道需要进行保温且冷损失大,因此该系统不适用于该深井矿山。

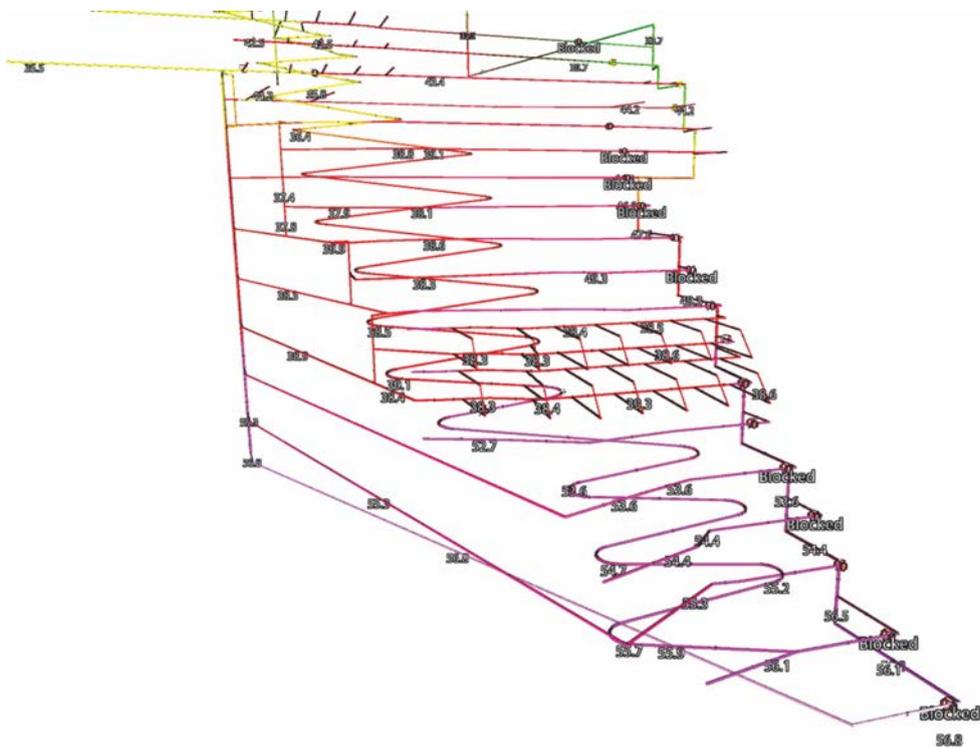


图4 二期井下湿球温度分布示意图

Fig.4 Distribution of wet - bulb temperature underground in Phase II

井下集中式空调系统是将制冷站布置在井下,利用井下回风流排热或冷凝热在地面排放的方式。该制冷方案可直接在井下需降温处对风流进行制冷,冷损失小,考虑到矿山二期工程开采的总进风端距离回风端不远且回风风量较大,本次设计考虑采用井下集中式空调系统,中段附近设置冷风装置对井下风流进行制冷,冷凝热在井下回风巷道中排热。

井上、井下联合式空调系统是指在地面和井下同时设置制冷站,冷凝热在地面集中排放,它相当于两级制冷,井下制冷机的冷凝热借助于地面制冷机冷却系统冷却。但是,该系统过于复杂,设备分散,不便于管理,因此本次设计不考虑此种制冷降温方式。

根据热模拟结果,在井下3个位置设置制冷站,分别为-1070 m中段连接-1070 m与-1170 m中段进风调配井的通风联络道位置、深部盲混合竖井-1070 m中段石门附近、-1070 m中段斜坡道位置。具体制冷装置设置位置如图5所示。

4.2 冷风装置设备选型

根据上述热模拟分析结果,需要设置制冷设备使深部采场及独头掘进面的工作环境满足安全规程要求,且由于模型中没有考虑裂隙水的影响,因此考虑了以下余量措施:①冷风装置余量留有15%的安全系数;②排风湿球温度从24.6℃增加到27℃。

制冷方案为制冷机组放在井下回风端,制冷后冷却水通过管道输送至冷风装置位置,冷风装置包含喷

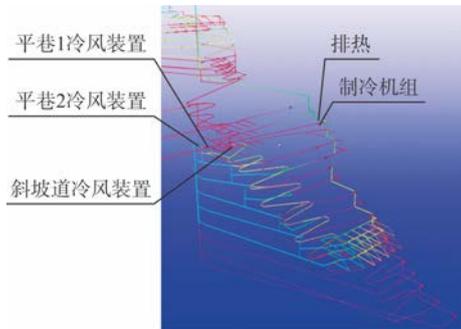


图5 制冷装置设置位置

Fig.5 Designated locations of refrigeration devices

淋装置和除雾器,可以将井下风流通过热交换器将风流制冷,通过风机将风流送至深部采矿工作面,冷风装置工艺设计如表4所示。井下冷却系统(冷风装置、制冷机组和排热冷凝器喷雾室)的典型平面布置图如图6所示。

5 结论

针对超深井矿山井下热害问题,本文提出以Ventsim™ DESIGN 5.4三维通风软件中通风和热模拟模块为依托,建立井下热源热害的三维热模拟分析,得到以下结论:

1) 利用通风软件基于矿山开拓系统对井下需风量和通风系统进行了模拟分析,并考虑热负荷计算及对比风量焓差,分析得到矿山需风量 $1671 \text{ m}^3/\text{s}$ 时可满足一期工程通风降温的需求,但不能满足二期工程

表4 冷风装置设计说明
Table 4 Design specifications for air-cooling device

描述	斜坡道冷风装置	平巷1冷风装置	平巷2冷风装置
总冷却负荷(包括风扇热量)/ MW_{R-BAC}	2.339	7.536	4.055
风扇热增量/kW	39	61	30
设计环境:湿球温度/干球温度/气压计	30.6 °C/31.2 °C/112.7 kPa(a)	30.3 °C/31.1 °C/112.6 kPa(a)	30.3 °C/31.4 °C/112.7 kPa(a)
进气密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1.272	1.272	1.272
冷却水温度/°C(开/关)	6.10/15.39	6.00/16.27	6.00/16.74
冷却水范围/°C	9.29	10.27	10.74
冷却水流速/($kg \cdot s^{-1}$)	60	175	90
风扇负载	48 $m^3/s@600 Pa TP$	113 $m^3/s@400 Pa TP$	55 $m^3/s@400 Pa TP$
风扇功率	39 kW@75 % 总效率	61 kW@75 % 总效率	30 kW@75 % 总效率
空气:湿球温度/干球温度/气压计	21.50 °C/21.88 °C/112.7 kPa(a)	16.61 °C/16.84 °C/112.6 kPa(a)	14.80 °C/15.02 °C/112.7 kPa(a)
水增益/($kg \cdot s^{-1}$)	0.662	2.074	1.095
泵数量:运行/备用		2/1	
泵总负荷		1 170 $m^3/hr@800 kPa$	
泵总功率		325 kWe@80 % 效率	

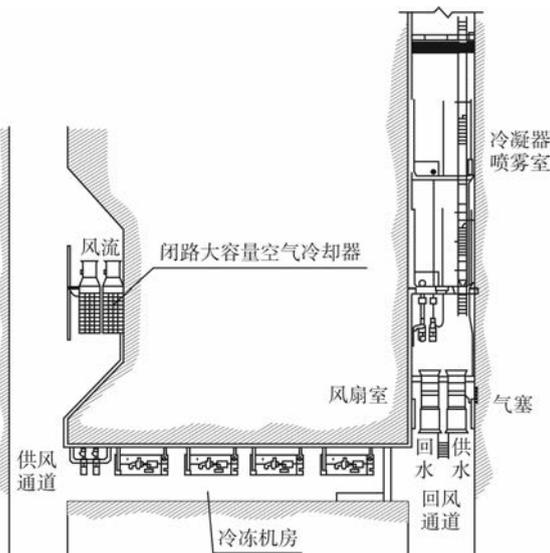


图6 井下冷却系统布置示意图

Fig. 6 Diagram of underground cooling system layout

深部矿体开采时井下工作面温度要求。

2) 二期工程开采时中段采场平均湿球温度为 $30.1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不符合国家相关安全规程要求。在生产过程中, 需要采取制冷机组或者冰块的方式, 解决深部井下地热问题。

3) 根据矿山生产实际, 结合热模拟分析结果, 优选了二期工程深部开采制冷降温方案, 在井下3个位置设置了制冷站, 并对各个制冷机组进行了选型, 制冷方案实施后井下工作面湿球温度可降至 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。

[参考文献]

- [1] 魏诚. 矿山深部开采地温测定及高温热环境分析[J]. 黄金, 2023, 44(6): 30-34.
- [2] 王春耀, 周建, 简俊常, 等. 高温热害矿井通风制冷降温技术[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 244-250.
- [3] 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.
- [4] 孙玉强, 张涛, 陈宜华, 等. 某金属矿山掘进巷道局部降温模拟[J]. 现代矿业, 2021, 37(9): 213-217.
- [5] 张培红, 董清明, 李忠娟, 等. 深部开采矿井通风系统降温效果分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(1): 127-131.
- [6] 刘多文. 新城金矿深井通风降温技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [7] 石乃敏, 潘爱民, 沈雁醒. 某金属矿山深部开采人工制冷降温技术方案分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(7): 161-165.
- [8] 黄永祥. 南非某铂金矿降温系统设计研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 131-136.
- [9] 李国富, 夏永怀, 李珠. 深井巷道隔热降温技术的研究与应用[J]. 金属矿山, 2010(9): 152-154.
- [10] 刘召胜, 朱坤磊, 周育, 等. 极厚大矿床深井开采通风降温技术研究[J]. 金属矿山, 2016(6): 144-148.
- [11] 王运敏, 陈宜华, 贾敏涛. 金属矿山深井高温巷道通风预冷降温技术[J]. 金属矿山, 2013(2): 143-146.
- [12] 程力, 张涛, 汪林红, 等. 新型矿井通风降温技术装置的试验研究[J]. 金属矿山, 2021(2): 209-214.

- [13] 王雷. 一种新型井下分布式矿井整体降温系统[J]. 煤炭科技, 2021, 42(1): 43–46.
- [14] 张健, 蔡茂林, 张鹏妍, 等. 热害矿井巷道围岩冷水截流降温技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54(3): 1–8.
- [15] 牛永胜. 矿井降温与热能利用一体化技术[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11): 84–87.
- [16] 罗勇东, 王海宁, 张迎宾. 矿井高温掘进巷道降温技术研究及应用[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(1): 85–91.
- [17] 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.
- [18] 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.

Research on cooling technology for ultra-deep mine shafts

Cheng Dongxu, Duan Jinchao, Li Huahua

(CINF Engineering Co., Ltd.)

Abstract: Addressing the issue of heat hazards in an ultra-deep mine, the Ventsim™ DESIGN 5.4 3D ventilation software was utilized to simulate and calculate the mine's underground ventilation system. By comparing the required air-flow enthalpy difference through thermal load calculations, it was determined that in the first phase of the mine project, increasing the airflow could reduce the working face's meteorological environment to within the limits allowed by national safety regulations (wet – bulb temperature not exceeding 27 °C). However, in the second phase, increasing the airflow alone could not resolve the high-temperature issue underground. Based on thermal simulation calculations and analysis, 3 refrigeration stations were placed in specific locations according to the current conditions of the mine. The required load for each refrigeration station was calculated, and suitable refrigeration units were selected accordingly.

Keywords: deep mine shaft; heat hazard; shaft cooling; ventilation simulation; cooling technology; thermal simulation; thermal load

(上接第 39 页)

Upgrading and application of the automated digital mine paste filling system

Shi Jiaohua¹, Bi Cheng^{2,3}, Wu Aixiang^{2,3}, Wang Yong^{2,3}, Yin Dongsheng¹, Zhao Xiongwen¹

(1. Tonglushan Cu – Fe Mine, Daye Nonferrous Metals Co., Ltd.;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing;

3. Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines of Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: An analysis was conducted on the issues present in the filling system at Tonglushan Cu – Fe Mine, including low filling concentration, tailings deposition in the feedwell, outdated equipment and instruments, and high pipeline resistance underground. A comprehensive and efficient automated digital mine filling system upgrade plan was proposed. The cost estimate and economic benefit analysis for the upgrade showed an estimated cost of approximately 16.86 million yuan, with a direct reduction in operating and binder costs by 3.113 7 million yuan/a, indicating significant economic benefits. After the upgrade, an industrial trial of paste filling was conducted. The trial results demonstrated that the new paste filling system at Tonglushan Cu – Fe Mine achieved good filling operation indicators, with a filling concentration of 66 % – 69 %, a filling flow rate of 100 – 120 m³/h, and a 17.8 % reduction in unit binder consumption compared to the previous system. This significantly reduced filling costs, improved filling efficiency, enhanced the mining environment, ensured the quality of the fill, and lowered the risk of pipeline blockages and ruptures. The upgrade had a remarkable effect, providing a valuable reference for similar mines.

Keywords: digital mine; paste filling; system upgrade; filling cost; economic benefit; Tonglushan Cu – Fe Mine