



深部矿井热害治理协同地热能 开采构想及方法分析

徐 宇, 李孜军, 贾敏涛, 刘华森, 潘 伟, 李 明, 查道函

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 随着我国矿产资源的开采向地球深部进军, 矿井热害问题愈发严重。井巷围岩放热、空气自压缩、矿井地热水等是造成矿井高温热害的主要原因, 矿井热害不仅会造成人的生理和心理伤害、降低工作效率, 还会引起矿井安全事故频发。深部矿井热害治理时, 传统降温方法存在冷量损失大、降温程度低和运行成本高等问题而不再适用。深部矿井热害治理时需采取“节源开流”的治理方针, 在综合控制热源的基础上, 结合机械制冷与个体防护的方法进行局部降温。建立智能矿井通风系统对人体或设备进行精准控温, 从而缩小治理空间、改善降温效果、提高冷量利用率、降低热害治理成本。矿井地热虽然会造成矿井热害, 但它也是一种绿色环保的地热能资源。矿产地热能协同开采可获取地热能分梯度用于供暖、洗浴、选矿、养殖等多个方面创造经济价值, 同时矿井地热开采还能起到治理热害的作用, 是“变害为利、变废为宝”的重要举措。

关键词: 热害治理; 深部矿井; 协同开采; 矿井地热; 智能通风

文章编号: 1004-0609(2022)-05-1515-13

中图分类号: TD727

文献标志码: A

引文格式: 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-39689

XU Yu, LI Zi-jun, JIA Min-tao, 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-39689

近年来, 随着我国浅部矿产资源逐渐开采耗尽以及开采技术和开采装置逐渐增强, 矿井开采水平逐渐向深部转移, 深部开采将是我国未来资源开发的重要形式且开发潜力巨大^[1-2]。目前, 我国资源勘探深度低于矿业发达国家, 向地球深部进军是我国战略科技需求, 5000 m开采深度将是我国金属矿深部开采中长期战略研究目标^[3]。高地应力、高地温、高岩溶水压是深部矿井开采的典型赋存环境, 高温热害问题是矿井深部开采面临的重要难

题^[4]。据统计, 未来10到15年我国50%铁矿、33%的有色金属矿、53%的煤炭资源将进入千米以下深部开采^[5]。目前, 我国大约已有32座金属矿山开采深度超过1000 m, 超过100多处开采深度超过700 m, 其岩温大都已经超过35℃, 最高温度接近50℃。例如, 安徽江泥河铁矿的岩温为40.9℃, 罗河铁矿西部则达到42℃^[6]。目前, 采掘工作面风流温度超过30℃的矿井已经超过140座^[7]。矿井热害不仅会影响工人劳动效率, 长期在高温环境下作

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808404); 长沙市自然科学基金资助项目(kq2202073); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020zzts197)

收稿日期: 2020-05-15; **修订日期:** 2021-10-25

通信作者: 李孜军, 教授, 博士; 电话: 13787138619; E-mail: anquan@csu.edu.cn

业将影响人体健康,引发各种生理疾病,并容易造成安全事故^[8]。

多年来,为防治矿井热害确保安全高效生产,各种矿井热害治理方法先后被提出。通风降温是最早、最常用的热危害控制方法,但是其降温效果十分有限^[9]。为了提高矿井降温效果,各种机械制冷降温方法相继被学者们提出。CHEN等^[10]提出以空气作为制冷介质进行压缩制冷。孙希奎等^[11]、郭平业等^[12]设计了以水作为制冷介质的制冷系统,通过使用冰水混合物提高制冷系统的制冷量。由于二氧化碳作为制冷介质具有显著优势,ZHAI等^[13]提出了二氧化碳循环降温制冷系统。这些制冷方法虽然能明显地改善矿井环境,但其运行成本普遍较高且设备体积庞大。一些非机械降温方法比如热管降温除湿提高工人舒适度、井巷岩壁喷洒隔热材料减少围岩放热、个体防护服降温、煤层注水预降温、采空区填充体蓄热吸附降温等方法被提出用于矿井热害治理^[14-16]。这些降温方法成本较低,但降温效果有限。目前,虽然矿井采取了许多降温措施来控制井下的空气温度和湿度,但目前的降温装备和降温方法对井下的降温效果仍然不能满足工人对工作环境的要求^[17]。深部矿井开采时,传统的降温方法将面临成本高、效率低、冷量损失大、降温效果差等问题,因此有必要针对深部矿井提出新的降温方法。

深部矿井热害的治理不仅是我国向深部资源开采的技术需求,也是促进我国深部矿山安全绿色高效开采的重要保障。针对深部矿井开采的特征,本文分析了热害特征、传统热害治理方法,提出建立智能矿井通风系统进行精准控温来改善降温效果,降低热害治理成本。深部矿井地热虽然会带来矿井热害的问题,但它也是一种宝贵的再生清洁能源。本文提出了矿井热害治理协同地热能开采的构想,在对深部矿井地热进行开采利用的同时,有效治理矿井热害。

1 热害产生原因及危害

高温热害问题是深部矿井开采无法回避的难题。地下温度随着开采深度的增加而升高,导致深部矿井井下工作环境恶劣,这不仅会降低设备工作性能,缩减使用寿命,还会对井下工作人员的工作

能力和身体健康造成不良影响,同时容易引发生产事故。

1.1 矿井热害成因

矿井热害形成的主要原因有^[18-19]: 1) 井巷围岩放热。井下围岩温度随着距地表的深度增加而上升,常温风流与高温围岩进行热交换而温度升高; 2) 空气自压缩放热。空气由地面经井筒进入地下在自身重力的作用下经摩擦转换为热能使空气温度上升,空气自压缩升温速率为 $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 3) 机电电动设备放热; 4) 矿物氧化放热。岩层采动产生裂隙,矿物与氧气发生氧化反应产生热量; 5) 矿井地热水放热。在大地热流场的作用下地表深层的地下水被加热形成高温矿井热水,矿井热水通过直接加热风流或岩体传热间接引起井下温度变化两种方式引起矿井热害; 6) 其他因素散发热量。比如采空区充填体放热、人体放热、爆炸放热、气候变化等因素不同程度引起矿井温度上升。

随着矿井开采深度的增加,井巷围岩放热、风流自压缩放热、矿物氧化放热和矿井地热水放热都会显著增加,使矿井热害更加严重,热源控制也更加困难。

1.2 热害危害

我国《金属非金属矿山安全规程》规定“井下作业点空气的温度不得超过 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,超过时,应该采取降温措施或其他防护措施”。工作面高温环境会给工人的健康、劳动生产率、设备的安全运行、生产效率等带来严重影响。

人体生理方面,人处于高温环境下会产生一系列生理功能的改变,人的血液循环、消化、神经系统会受到显著的影响。人在正常环境下可以通过生理代谢调节维持各种生理参数正常,但当环境对人体造成的负荷超过人体调节限度时,人的肌体和生理组织会受到损伤,身体温度调节发生障碍,人体大量排汗造成水分丢失,盐、水代谢现出紊乱,血液粘稠增加,肾脏和心脏的负担增加。高温环境下还会造成人的呼吸率和心率加快、血压增加、疲劳度增加、人的中枢神经系统失调等一系列后果。在高温环境中作业人员发病率最高可达正常环境工作的3.61倍^[20]。

人体心理方面,矿工长期处于井下高温恶劣环

境工作时, 工作要求与工作资源难以相匹配, 容易出现逆反心理、惰性心理、从众心理、冒险心理等不安全心理, 出现情绪压抑、脾气暴躁等现象, 这些情绪极易引起不安全行为的发生。有研究表明在矿井环境下疲劳和烦恼临界预防点的综合温度和等效温度分别为 26.14 ℃和 28.48 ℃^[21]。

表 1 南非矿井中工作环境温度与伤亡频次关系

Table 1 Relation between air temperatures and accident rates in South African mine

Working face temperature/℃	Frequency of injuries
27	0
29	0.148
31	0.296
33	0.442

工作效率方面, 高温环境会使人体的疲劳度增加、记忆力下降、注意力不集中、反应略为迟钝, 容易增加事故率^[22]。南非金矿的调查统计资料显示, 矿井空气温度为 28 ℃时, 工作效率最高, 当温度升高时工作效率逐渐降低。此外, 高温环境也会严重影响机械的运行, 降低运行效率, 缩短工作寿命。

在生产安全方面, 在高温高湿矿井中工作的工人, 由于神经系统受到抑制, 对周围环境的注意力、判断力以及反应能力逐渐减退, 导致安全事故率随热害严重程度逐渐上升。根据国外南非深部矿井统计数据发现, 当作业面上的温度超过 29 ℃时, 人员伤亡的事故率将增加, 见表 1^[23]。国内湖南省湘潭市某煤矿 1996~1998 年调查统计也表明, 在矿井工作面温度由 29 ℃上升至 32 ℃时, 工伤频次显著增加, 如表 2 所示^[24]。另外, 高温环境还会导致机械事故率上升。以机电设备为例, 井下机电设备的事故率以温度 30 ℃为标准, 每超过 1 ℃, 设备的故障将增加 1 倍以上^[18]。

2 矿井热害治理

深部矿井开采面临非常严峻的热害问题, 传统制冷降温方法在应用于深部矿井热害治理时降温效果显著降低、运行成本也大幅度上升。因此针对深部矿井的热害治理技术有待进一步的改进和发展。

表 2 湖南省湘潭市某煤矿温度与工伤频次的关系

Table 2 Relationship between accident rate and temperature in coal mine

Temperature/℃	Frequency of injuries
29	0.155
30	0.231
31	0.320
32	0.486

随着信息技术时代的到来, 矿山开采逐渐朝着信息化、智能化的方向发展, 矿井热害治理技术有望通过利用信息化和智能化技术得到突破^[25]。

2.1 传统矿井热害治理方法

目前, 矿井热害治理主要可以分为两类措施, 一类为非机械制冷降温方法, 包括通风降温、隔热疏导、控制热源、个体防护等; 另一类为机械制冷方法, 为利用不同的制冷介质传递冷量吸收井下热量, 比如人工制冷水/冰降温、瓦斯发电制冷降温、热管降温和压缩空气制冷降温等。

非机械降温属于主动降温方法, 一般投资和运行成本相比于机械制冷方式在短期内少, 但需要进行长期部署。非机械制冷方法主要有: 1) 优化矿井开拓方式。缩短矿井通风路线, 减少风流与高温岩体之间的换热量, 例如分区域开拓方式。该方法开拓工作量大、投资高、风井多、降温效果有限, 适用于开拓量大、埋深浅的矿井。2) 优化通风系统增大通风量。避开井下高温区域, 利用低温岩层预冷通风风流^[26]。但是它增加了通风系统复杂程度, 调温巷道不易具备, 前期准备工作量大。3) 利用隔热材料减少围岩热量的释放^[27]。该方法只能在短时间内起到降温效果, 且对材料的防火、防毒等要求较高。4) 使用地下水作为冷源对工作面进行喷洒等方式进行降温。但是其降温效果有限, 增加了井下湿度, 对矿井水文条件要求较高^[28]。5) 使用降温服对人体直接降温。降温服会增加人体负荷、需要间断性补充冷源影响工作效率、容易造成局部冻伤等^[29]。6) 填充功能性相变材料。通过向采空区填充具有载/蓄冷介质的复合材料, 通过其相变吸热降低井下热量。它对添加材料的要求较严格, 容易造成井下环境污染^[15]。7) 还有通过抽采或疏导地下热

水的方式减少地下热水向巷道内散热。

机械制冷方式属于被动降温方法,通过持续向工作面持续提供冷源降低工作面温度,需要有固定的制冷机器与设备。根据制冷站的位置可以分为:井下集中制冷系统、地面集中式制冷系统、井上下联合制冷系统、可移动式制冷系统^[30]。井下制冷方法相比于井上制冷方法优点在于输冷管线较短,输送压力小,减少了冷质输送过程中的冷量损失以及管路维护费用,但是井下制冷面临冷凝热排放困难的问题。而井上制冷方式优点在于主要设备在地面,便于设备维护,但对于深部矿井,其长输送管线导致冷量损失大、输送压力大等问题。井上下联合制冷系统虽然解决了井下排热困难,但其仍需要较长的输送管路,输送管线压力大。可移动式制冷系统则通过减小冷质输送距离减少冷量损失,但是可移动制冷设备受地下空间的限制,其设备较小,制冷量有限,同时也存在冷凝热排放困难的问题。

机械制冷方法根据制冷介质不同可划分为空气压缩式、人工制冷水、人工制冰、二氧化碳制冷^[31-32]。目前,主要制冷降温系统包括:1) HEMS (High temperature exchange machinery system) 降温系统,通过提取矿井涌水中的冷量制成低温水,利用其与高温空气进行换热,使工作面温度降低。该系统对矿井涌出水量和温度要求较高,适用于矿井涌水资源丰富,水质较好的矿井^[33]。2) 冷水/冰制冷降温系统,通过集中制取冷水或者冰浆后通过管路输送至降温区域^[11]。缺点在于冷水输送过程中冷量损失大,长期运行会后产生水垢造成制冷效率降低,容易发生管路堵塞。3) 乙二醇制冷系统,通过溴化锂机组利用瓦斯发电的余热将乙二醇制成低温溶液,然后通过输冷管路将低温乙二醇溶液输送至井下与井下换热器进行换热^[34]。该系统运行成本较低,但乙二醇为有毒物质,其泄漏容易造成人员伤亡事故。4) 热管降温除湿技术,利用相变介质快速传热的特点将布置在矿井围岩蒸发段的热量快速传递至地表冷凝段,实现对井下风流降温除湿的作用^[15]。但其使用条件受限,成本高,增大了通风阻力,降温幅度有限等。5) 长距离循环管路制冷系统,利用长距离循环输送制冷介质对工作面进行持续降温,在制冷介质换热升温后输送至地面对其进行热能提取与回收,实现制冷介质循环利用^[13]。该方法虽然能够持续为井下输送大量冷量并获得一定

的热能,但是该系统前期投资大,管线维护困难,冷量损失大,易发生管路泄露危险。

以上几种传统降温方法各自具备优缺点,受到使用条件的限制。其中,非机械制冷方法往往需要长期部署,前期投入大,但是能起到长期的热害防治作用。而机械制冷方法则能快速降温,但是长期而言,机械制冷降温方法治理成本高于非机械制冷方法。而对于深部高温矿井热害治理时,传统的热害治理方法应用将面临成本高、冷量利用率低、维护困难、降温效果不理想等一系列的问题。因此,针对深部高温矿井的特点,新的热害治理策略和降温方法有待提出。

2.2 深部矿井热害综合治理

深部矿井开采时,由于高温围岩、空气自压缩、矿井地热水等不断地释放大热量,传统单一的热害治理方法将出现降温效果不理想、成本高等问题而不再适用。例如,利用被动的机械制冷降温过程中,由于围岩放热量大、风流初始温度高,冷质在输送过程中冷量损失大导致井下降温效率低、降温效果不佳,此外制冷设备还存在冷凝热排热困难等问题。因此深井热害治理过程中需综合采取多种热害治理方法,实施“节源开流”的治理方针。针对深部矿井热害特征,主要应从以下几个方面改善矿井热害治理效果。

1) 控制热源。浅部矿井热害往往是多种热源因素综合作用的结果,各热源释放较小,因此矿井热源的控制往往被忽视。但深部矿井中,若只是采取被动的机械降温措施进行热害治理,则只能起到“治标不治本”的作用,且制冷效率低、成本昂贵。因此,控制热源是深部矿井热害治理的关键。WEI等^[35]测量了夏甸金矿内主要热源贡献率,发现深部高温矿井内围岩放热是主要的矿井热源,其次是设备放热,另外空气自压缩放热也占很大的放热比重,如图1所示。当矿井存在高温地下水时,高温地下水由围岩裂隙通过水蒸气的方式将潜热和显热传给井下风流也是重要的热源。在这些热源中,设备放热和空气自压缩放热是无法避免的。因此,控制深部高温热源的重点是降低围岩温度、减小地下热水对风流的加热加湿作用。

巷道围岩温度控制是深部高温矿井热害治理的基础。在控制巷道围岩温度后,新鲜风流从地面输

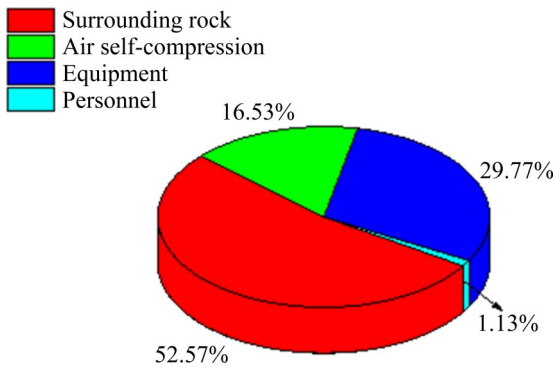


图1 深井内各热源热量贡献率

Fig. 1 Thermal contribution rate of each heat source in deep

送至井下过程中升温幅度减小, 巷道内整体温度将下降, 尤其是矿井主巷内。降低围岩和地热水放热的方法包括: a) 有针对性的对岩壁喷涂矿用隔热防水材料。对主要巷道或局部风流与围岩换热强度较大的区域喷涂隔热防水材料, 减少围岩的散热以及地下热水对风流的加热加湿作用; b) 利用井筒换热技术调节进风井中风流温度。在井筒与岩壁之间注入水或空气等介质对井筒壁进行降温, 或在风流换热强度较大的局部高温围岩处布置换热管路, 如图2所示。在对围岩和风流降温的同时, 换取岩石中的热量; c) 将高温地下裂隙水引导至蓄热池, 减少地热水向巷道散热, 同时收集矿井地热水用于采选矿物; d) 向矿层内或巷道围岩注入冷水降低围岩的温度, 或在巷道下方高温岩层进行地热开采, 在提取地热的同时能有效阻止底部岩层向井巷围岩导热。

2) 改进机械制冷系统。高性能的机械制冷系统是深部高温矿井热害治理的关键。机械制冷是深部矿井热害治理时不可缺少的降温方式, 尤其对于初始岩温较高的掘进巷道。传统矿井机械制冷方法中, 水和空气往往作为制冷介质, 尽管这两种制冷介质廉价、易获取, 但由于空气的热容小、水的降温程度有限等特点, 使这些制冷方法制冷量较小。因此深井高温热害治理需寻找更加理想的制冷介质提高制冷量。传统集中式制冷方式不可避免地会造成输送管线较长, 冷量输送过程中冷量损失大, 造成制冷效率低。制冷设备体积庞大, 散热量高, 占据井下大量的空间。同时随着开采过程中采区的变动, 井下输送冷量管路需经常进行调整。因此, 缩

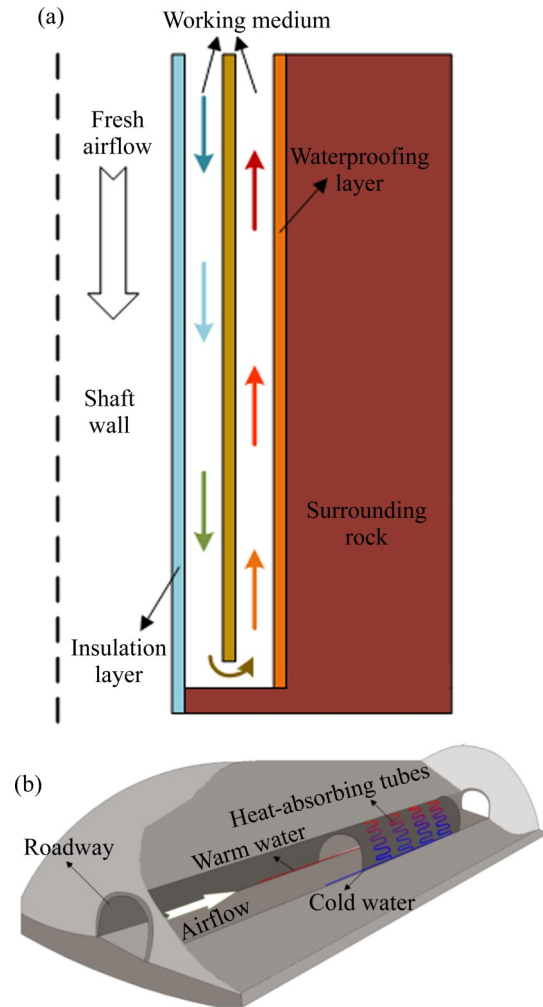


图2 井筒壁面隔热和巷道围岩换热降温方法

Fig. 2 Methods for heat insulation and heat extraction in wellbore and surrounding rock of roadway

小制冷设备的体积, 形成可移动式小型制冷设备, 是减少制冷量在输送过程中的冷量损耗、提高降温效果的重要方式。此外, 缩小降温空间是提高冷量利用率、改善降温效果、降低热害治理成本的重要途径。

3) 使用个体防护服。在高温、高湿的恶劣矿井环境下, 使用个体降温防护服是一种必不可少且十分有效的热害治理方法, 尤其在深部矿井建设初期以及制冷系统尚未建成时。因此, 个体防护服是深部高温矿井热害治理的重要保障。目前的个体降温防护服主要包括气冷式、液冷式和相变材料三种。但是目前的这些个体防护服存在衣服笨重、臃肿、续航能力差等不同的缺陷, 导致使用者活动不便、工作效率低而难以被接受使用。例如, 气冷式降温

提高人体的舒适度,减少冷量的浪费。精准控温能有效减少制冷量,降低热害治理成本,解决井下降温费用昂贵等问题。

3 矿产与地热能协同共采

3.1 矿产地热能协同开采的价值

地热虽然会引起矿井开采过程中的热害问题,但它也是矿产开采过程中的伴生资源。在矿井热害治理时,若对热能加以利用则将是“变害为利、变废为宝”的重要举措。矿产地热能协同开采不仅是治理矿井热害控制热源的有效方法,符合“绿色生态矿山”建设生产要求,同时能创造经济价值^[8]。地热资源根据温度可以分为五个等级,如表 3 所示。矿井地热资源属于水热型地热能,属于低品位能源。矿井地热能可用于洗浴、农业、采暖等多个方面,还可以通过热泵技术进一步转化为高品位热能进行利用。国家《地热能开发利用“十三五”规划》以及《煤炭工业发展“十三五”规划》均提出了推进矿井热能利用项目的建设。2018 年,国家发展改革委、国土资源部、国家能源局等多部门联合发布《关于加快浅层地热能开发利用促进北方采暖地区燃煤减量替代的通知》,要求对地热资源因地制宜开发利用。国家大力支持和发展地热供暖,相关政策建议的出台为地热供暖的规模化开发利用及发展提供政策指引。无论是从资源禀赋还是政策导向来看,矿井地热发展空间巨大。

随着不可再生能源资源量的减少,地热资源作为绿色和可再生能源被各国政府所青睐,地热资源的开发已逐渐成为国内外研究的热点。其中备受瞩目的干热岩开发就是其中一种。干热岩的开发一般

埋深较大,一般存在于 2000~6000 m 之间。但目前干热岩的开采面临勘查钻探成本高、前期投入大、风险大、技术难度大等一系列难题。而矿井地热开采具有显著的技术、资本优势。矿井开采已对矿田地质进行了详细的勘察、可直接为地热开采提供地质参考。此外,矿山现有的井巷措施、钻探设备、开采技术为矿井地热开采做好了先决条件。矿床开采所开拓的井巷为地热开采节省了大量的地热钻探成本,矿井具备完善的电力、给水、运输系统,完善的机械动力设施,为矿井地热开发的探测、掘进、管路铺设等提供完备的保障。矿井地热不仅可以作为矿产伴生资源进行开采,也可以作为废弃矿井继续运营的生产方式。

矿产地热能协同开采具有十分可观的经济价值,它不仅可以开采大量地热能用于生活、生产,还能缓解矿井热害,降低矿井热害治理成本。以淮南矿区地热地质特征为例,吴基文等^[36]根据勘探发现淮南矿区地温梯度为 10.0~40.0 °C/km,平均地温梯度达到 28 °C/km; -2000 m 水平时最高地温达到 82.36 °C,平均大地热流值为 65.50 MW/m²。经计算,淮南矿区热储层资源总量为 2.32×10¹⁶ kJ,按采收率 25% 计算,可采热能储量为 2.64×10¹⁵ kJ,折合成标准煤约 0.9 亿 t。

矿井地热开采所提取的热能可根据各种用途对供热品位需求不同对矿井地热能进行分级梯度利用,如图 4 所示。对于热能较高的部分可直接用于建筑区供暖,或经过水质处理后用于洗浴。当这些热能被初次利用后还具有较高的热能时,可继续用于温室种植、水产养殖、畜牧、家禽养殖等产业。对于冬季存在冻井现象的矿井还可用于井口防冻。矿井水热能被提取后形成的低温水可直接用于热害

表 3 地热资源温度分级表

Table 3 Temperature classification table of geothermal resources

Temperature class	<i>t</i> /°C	Main application
Low temperature geothermal resources: warm water	25–40	Bath, breeding, greenhouse planting, preheat wellhead
Low temperature geothermal resources: low-temperature hot water	40–60	Bath, heating, breeding, thermal springs
Low temperature geothermal resources: hot water	60–90	Bath, heating, physical therapy, hot springs
Medium temperature geothermal resources	90–150	Heating, drying, power generation
High temperature geothermal resources	> 150	Heating, power generation

治理,之后回灌地层用于地热开采。此外,高地温矿井的高地热还有助于矿物的采选,在地高温环境下可对矿物进行原地溶浸,加速矿物与溶浸液间的相互作用,有利于贵金属或贫矿资源进行原地破碎溶浸采矿、提高矿物溶浸和萃取效果。利用高地温环境井下溶浸可实现矿井固体资源绿色流态化开采。

3.2 矿产地热能协同开采方法

矿井地热可以通过开采层蓄热采热、岩层采热以及余热回收三个方面进行矿产地热能协同开采,如图5所示。开采层蓄热采热与岩层采热不仅可以获取地热能,还能起到治理矿井热害的作用。

1) 开采层蓄热采热。矿井对采空区进行充填过程时,向充填区域埋设多层采热管路形成蓄热池。充填区从高温岩体吸收热量后,通过热传导的方式将热量传递给采热管使采热管内的载热介质温度上升。当采热管内的载热介质温度达到预设的蓄热温度后,将载热介质输送至采热设备进行热能提取与利用。为保障采热管输送稳定的热量,各蓄热池进行轮流热输出,保障采热管能充分吸收足够的热量。

2) 岩层采热。为获取高热量的热源,以开采层为基础向岩层下方探测热流密度大的聚热区域。在探明高温地热储存区域后,以采矿地层巷道为基础向开采层较近的高温地热区首先掘进直径较小的换热通道。通过向换热巷道内注入矿井水与高温岩石发生热交换提取岩层热量获得高温热水。当开采层

下方岩体的热量被换热通道不断的提取后,开采层下方以及开采层岩体温度将逐渐降低,开采层巷道内的热害能够得到有效的缓解。当换热通道附近岩石温度下降导致换热通道内的热量提取过低时,可继续向岩层下方掘进新的换热通道获取更高的热源,增加采热强度。

3) 余热提取。矿井内主要的余热有回风余热以及机械余热。空气由井筒进入地下之后,由于沿程围岩散热、高温水源放热、机械设备散热、矿物氧化放热等原因,通过对流换热和辐射换热等作用,风流温度逐渐升高。尤其高温矿井回风井中风流温度较高,可通过在回风井内安装回风余热利用装置提取乏风中的热量。此外,井下各种采掘机械释放的热量以及井下制冷降温后制冷介质内所包含的热量也可利用换热装置对其余热加以利用。

3.3 岩层采热治理矿井热害

为分析矿井岩层采热对矿井热害的影响,本文建立了矿井岩层采热数值模型,模型中左侧为直径5 m的进风竖井,新鲜风流经由进风竖井输送至井下-900 m水平的1[#]和2[#]水平巷道,巷道截面积均为7.5 m²,然后风流经右侧直径为5 m的回风竖井返回至地面。模型中矿井通风量为4710 m³/min,风流初始温度为25℃。在1[#]巷道下方10 m处布置一条直径为0.4 m的圆形换热管道,如图6所示。模型中地层地温梯度为40℃/km,岩石导热系数为4 W/(m·K),质量热容为1300 J/(kg·K),密度为2600 kg/m³。换热管道内持续注入温度为25℃,流量为

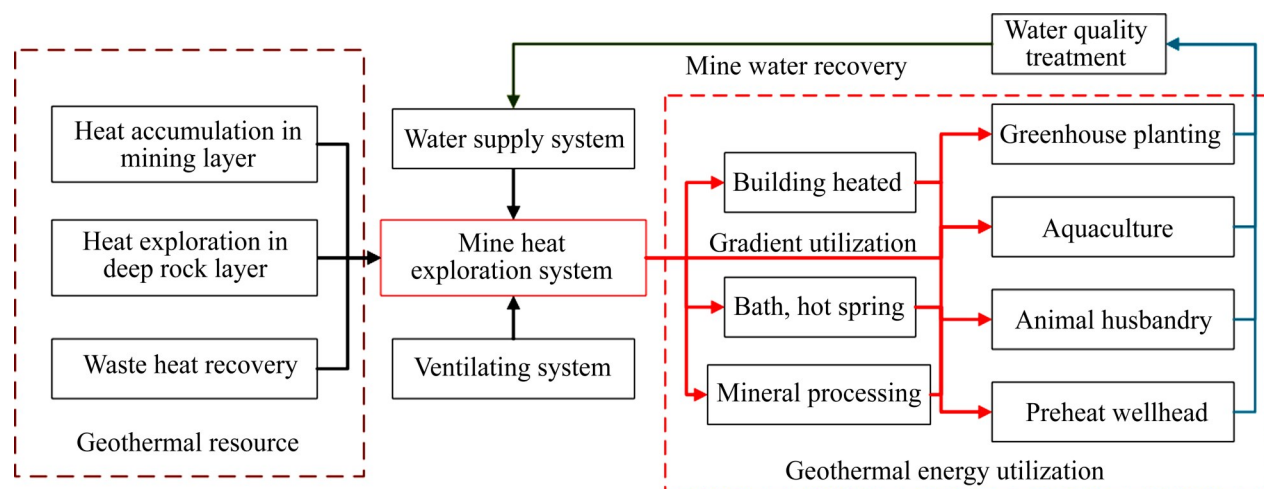


图4 矿井地热能分级梯度利用

Fig. 4 Gradient utilized of mine geothermal energy

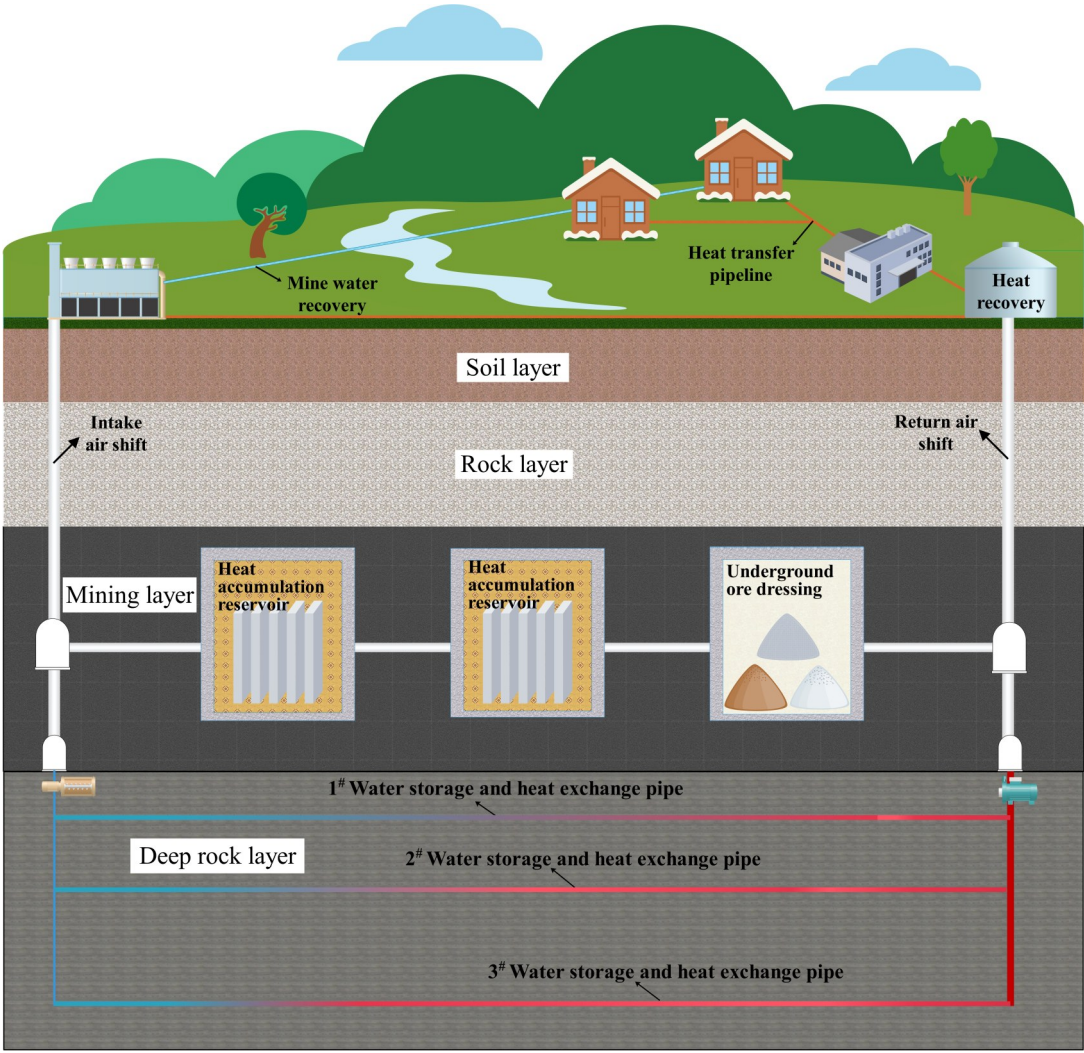


图5 矿产地热能协同开采示意图

Fig. 5 Schematic diagram of synergetic mining for mine geothermal energy

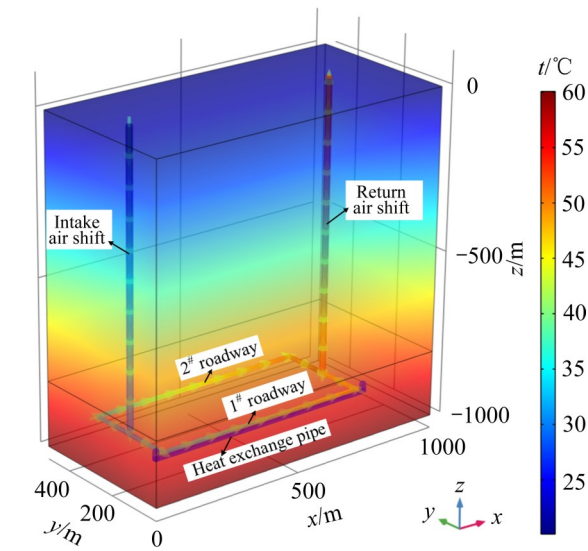


图6 矿井岩层采热物理模型

Fig. 6 Geometry model of geothermal exploitation in mines

226.08 m³/h 的冷水。

图 7 所示为矿井生产第 8 年时岩层地温分布，从图 7(a)可以看出进风井中由于新鲜风流温度低于井筒围岩初始温度，井筒围岩热量被新鲜风流带走，井筒围岩温度显著降低。而回风井顶端处回风风流温度高于井筒围岩温度，在回风流加热作用下井筒围岩温度明显上升。对比图 7(b)与 7(c)可看出，在换热管道的作用下，1[#]巷道与换热管道之间的岩体区域温度发生了明显的下降，而 2[#]巷道围岩仅靠冷风流与围岩换热而降温，因此 2[#]巷道附近的围岩降温幅度和降温范围都明显小于 1[#]巷道围岩。可见通过换热管道加快了围岩冷却速度，同时阻止了深部高温岩体向巷道围岩传热。

矿井巷道内的风流温度随矿井生产年限变化如

图8所示。从图中可以看出,由于新鲜风流在巷道内流动过程中与巷道围岩进行热交换,因此风流温度随通风距离延长而逐渐升高。矿井生产第2年时,2#巷道回风侧风流温度比进风侧高6.4℃。随着通风时间的增加,巷道围岩温度逐渐降低,巷道内风流升温幅度逐渐减小,在第5年时回风侧与进风侧风流温差减小至5.5℃。由于1#巷道下方岩层中布置有换热管道,巷道围岩中的热量被换热管道中的冷水吸收,巷道围岩温度随生产时间降温更

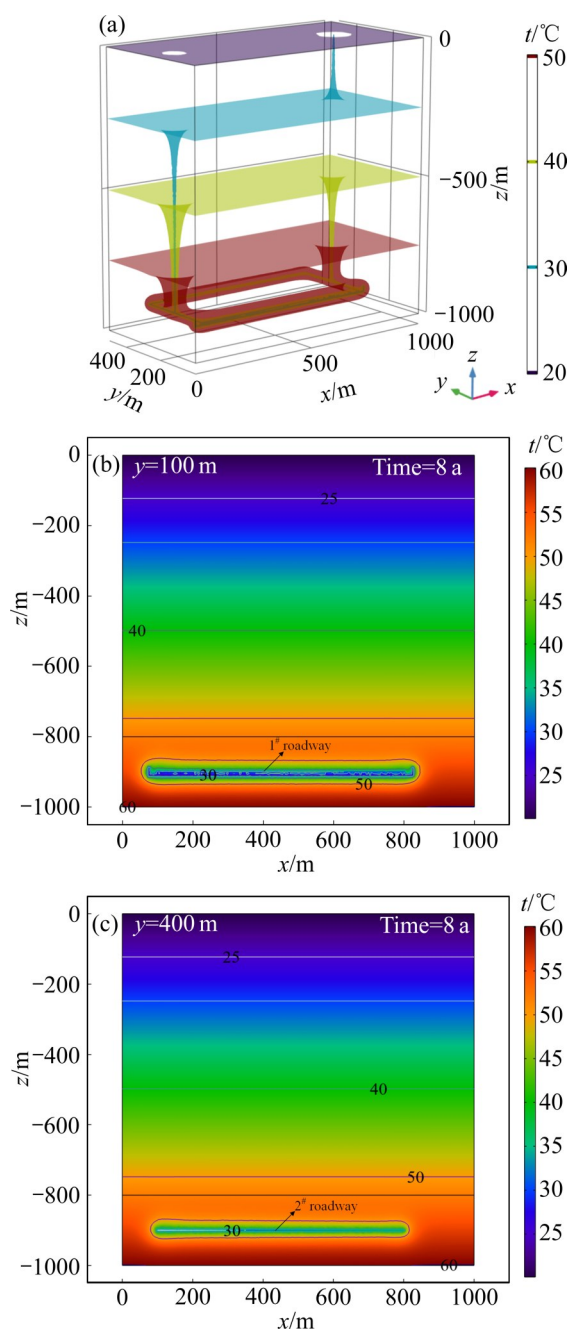


图7 矿井生产8年后岩层地温分布

Fig. 7 Temperature distribution of geothermal reservoir after heat production for 8 a

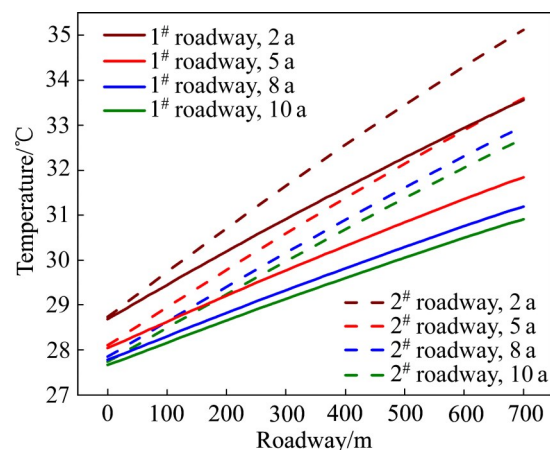


图8 巷道内风流温度变化特征

Fig. 8 Airflow temperature distribution along roadway

快,因此1#巷道内风流温度明显低于2#巷道。在矿井生产的第8年,2#巷道末端风流温度为33.0℃,而1#巷道末端风流温度仅为31.2℃,可见换热管道有效降低了巷道内风流温度,起到了热害治理的效果。

4 结论

随着我国浅部资源的开采殆尽,深部开采将成为常态。矿井热害是限制深部矿井开采的一个重要瓶颈,其治理过程中面临着成本高、治理效果不明显等一系列难题。矿井地热虽然会造成热害,但它也是一种宝贵的热能。矿产地热能协同开采是一种“变害为利,变废为宝”的重要途径,也是一种探索绿色新能源开采的重要举措。

1) 矿井热害是井巷围岩放热、矿井地热水放热、风流压缩放热等多因素综合造成的。在深部矿井中这些热源放热量更大、更难控制,因此,深部高温矿井面临严峻的高温热害问题。长期在高温环境下工作对人体生理、心理、工作效率以及生产安全等多个方面产生负面影响。矿井热害的关注不仅是深部开采的技术需要,也是对广大矿工劳动者的重视。

2) 深部矿井热害治理过程中需采取“节源开流”的综合治理方针,在综合控制热源的基础上,联合机械制冷方式进行局部降温。矿井可通过建立集显示系统、井下检测监控系统、信息分析处理系统、智能控制系统一体的矿井通风系统来智能调控

矿井通风,通过快速调节局部风流,提高冷量利用率,缓解矿井热害。利用人体识别与感应技术对具体目标体进行精准控温,联合移动空气幕等措施对降温区域进行隔离降温,提高局部降温效果,减少冷量损失。

3) 论文提出矿产地热能协同开采的设想,矿井地热开采不仅能带来巨大的经济效益,同时也起到治理矿井热害的作用。矿产地热能协同开采可从开采层蓄热采热、岩层采热和余热提取三个方面进行地热能开采。获取的地热能可分梯度用于洗浴、建筑物供暖、温室种植、水产养殖等多个方面。通过数值模拟表明,巷道围岩采热使巷道内风流温度快速降低,能够有效治理矿井热害。

REFERENCES

- [1] 王金华,谢和平,刘见中,等.煤炭近零生态环境影响开发利用理论和技术构想[J].煤炭学报,2018,43(5):1198-1209.
WANG Jin-hua, XIE He-ping, LIU Jian-zhong, et al. Coal development and utilization theory and technical system of near-zero ecological environment impact[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1198-1209.
- [2] WANG S, SUN L, HUANG L, et al. Non-explosive mining and waste utilization for achieving green mining in underground hard rock mine in China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9): 1914-1928.
- [3] 底青云,杨长春,朱日祥.深部资源探测核心技术研发与应用[J].中国科学院院刊,2012,27(3):389-394.
DI Qing-yun, YANG Chang-chun, ZHU Ri-xiang. Key technology development of deep resources exploration and field experimentation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 389-394.
- [4] 李夕兵,黄麟淇,周健,等.硬岩矿山开采技术回顾与展望[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1828-1847.
LI Xi-bing, HUANG Lin-qi, ZHOU Jian, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828-1847.
- [5] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock, mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16.
- [6] 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 Mei-feng, XUE Ding-long, REN Fen-hua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 41(4): 417-426.
- [7] 万志军,毕世科,张源,等.煤-热共采的理论与技术框架[J].煤炭学报,2018,43(8):2099-2106.
WAN Zhi-jun, BI Shi-ke, ZHANG Yuan, et al. Framework of the theory and technology for simultaneous extraction of coal and geothermal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2099-2106.
- [8] WANG S, REN T, ZHANG T, et al. Hot environment-estimation of thermal comfort in deep underground mines[C]. Proceedings of the 2012 Coal Operators' Conference, 2012.
- [9] WANG P, ZHU K, ZHOU Y, et al. Research and application of controlled circulating ventilation in deep mining[J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 758-763.
- [10] CHEN W, LIANG S, LIU J. Proposed split-type vapor compression refrigerator for heat hazard control in deep mines. Applied Thermal Engineering. 2016, 105: 425-435.
- [11] 孙希奎,李学华,程为民.矿井冰水冷辐射降温技术研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1):105109.
SUN Xi-kui, LI Xue-hua, CHENG Wei-min. Study of cold radiation cooling technology using ice water in mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 105-109.
- [12] 郭平业,秦飞.张双楼煤矿深井热害控制及其资源化利用技术应用[J].煤炭学报,2013,38(S2):393-398.
GUO Ping-ye, QIN Fei. Preventive measures against heat hazard and its utilization in Zhangshuanglou Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S2): 393-398.
- [13] ZHAI X, XU Y, YU Z. Design and performance simulation of a novel liquid CO₂ cycle refrigeration system for heat hazard control in coal mines[J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(3):195-205.
- [14] 陈柳,刘浪,张波,等.基于蓄热充填体深井吸附降温机理[J].煤炭学报,2018,43(2):483489.
CHEN Liu, LIU Lang, ZHANG Bo, et al. Mechanism of backfill thermal utilization adsorption cooling system in deep mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 483-489.
- [15] 初砚昊,柳静献,常德强,等.基于热管输热的矿井地热危害控制试验研究[J].金属矿山,2020(1):108-114.
CHU Yan-hao, LIU Jing-xian, CHANG De-qiang, et al. Experimental study on the mine geothermal hazard control based on heat transfer by heat pipe[J]. Metal Mine, 2020(1): 108-114.
- [16] 何发龙,魏亚兴,胡汉华,等.巷道调热圈半径及其温度场

- 分布的数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(3): 538–543.
- HE Fa-long, WEI Ya-xing, HU Han-hua, et al. Numerical simulation research on radius and temperature field of roadway heat-adjusting layer[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(3): 538–543.
- [17] HAN Q, ZHANG Y, LI K, et al. Computational evaluation of cooling system under deep hot and humid coal mine in China: A thermal comfort study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 394–403.
- [18] 吉春和, 常嘉林. 新型矿井移动式局部降温技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 103–106.
- JI Chun-he, CHANG Jia-lin. New mine mobile local cooling technology and application[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 103–106.
- [19] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 深部煤矿井下智能化分选及就地充填技术研究进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 1–10, 22.
- ZHANG Ji-xiong, TU Shi-hao, CAO Yi-jun, et al. Research progress of technologies for intelligent separation and in-situ backfill in deep coal mines in China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 1–10, 22.
- [20] 李建中, 曾维鑫, 李建华. 人机工程学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 53–57.
- LI Jian-zhong, ZEN Wei-xin, LI Jian-hua. Man-machine engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009: 53–57.
- [21] 李夕兵, 周 健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236–1262.
- LI Xi-bin, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236–1262.
- [22] 游 波, 吴 超, 王 敏. 深井受限空间高温环境影响模拟试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013(11): 31–37.
- YOU Bo, WU Chao, WANG Min. Experimental study on the impact of high temperature to human in confined space of deep mines[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013(11): 31–37.
- [23] 魏小宾. 金渠金矿深井开采通风系统优化改造与热害治理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- WEI Xiao-bin. Research on optimization and renovation of ventilation system and heat harm treatment in deep mining of Jinqiu gold mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [24] 陈安国. 矿井热害产生的原因、危害及防治措施[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(8): 3–6.
- CHEN Guo-an. Formation and harmfulness of heat hazard in mine and its control measure[J]. Journal of Safety Science & Technology, 2004, 14(8): 3–6.
- [25] 李夕兵, 曹芝维, 周 健, 等. 硬岩矿山开采方式变革与智能化绿色矿山构建——以开阳磷矿为例[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2364–2380.
- LI Xi-bing, CAO Zhi-wei, ZHOU Jian, et al. Innovation of mining models and construction of intelligent green mine in hard rock mine: In Kaiyang Phosphate Mine as an example[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2364–2380.
- [26] LIU Y, XIAO Y, CHEN J, et al. A network model for natural ventilation simulation in deep buried underground structures[J]. Building and Environment, 2019, 153: 288–301.
- [27] KANG F, LI Y, TANG C. Numerical study on airflow temperature field in a high-temperature tunnel with insulation layer[J]. Applied Thermal Engineering, 2020: 115654.
- [28] 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 Lian-kun, KANG Tian-he, 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.
- [29] 文 虎, 丁喜梅, 刘长春, 等. 半导体降温服交盖效应的实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(2): 40–44.
- WEN Hu, DING Xi-mei, LIU Chuang-chun, et al. Experimental study on the overlap effect of thermoelectric cooling garment[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(2): 40–44.
- [30] 何国家, 阮国强, 杨 壮. 赵楼煤矿高温热害防治研究与实践[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 101–104.
- HE Guo-jia, RUAN Guo-jia, YANG Zhuang. Research and application on preventive measures against heat disaster in Zhaolou Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 101–104.
- [31] 王诗祺, 王 美. 我国煤矿深井热害成因及治理方法研究进展[J]. 现代矿业, 2018, 34(5): 18–23.
- WANG Shi-qi, WANG Mei. Causes and study progress of governance methods of the heat hazard of deep coal mine in China[J]. Modern Mining, 2018, 34(5): 18–23.
- [32] 贾敏涛, 高 伟, 吴冷峻. 深井矿山局部制冷降温技术研究[J]. 金属矿山, 2018(8): 159–163.
- JIA Min-tao, GAO Wei, WU Leng-jun. Study on the local cooling and refrigeration technique in a deep mine[J]. Metal Mine, 2018(8): 159–163.
- [33] GUO P, HE M, ZHENG L, ZHANG N. A geothermal

- recycling system for cooling and heating in deep mines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 116: 833–839.
- [34] 吴继忠, 刘祥来, 姚向东, 等. 孔庄煤矿集中降温方案的选择与优化[J]. *中国工程科学*, 2011, 13(11): 59–67.
- WU Ji-zhong, LIU Xiang-lai, YAO Xiang-dong, et al. Optimization of centralized cooling schemes in Kongzhuang Coal Mine[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(11): 59–67.
- [35] WEI D, DU C, LIN Y, et al. Thermal environment assessment of deep mine based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 19: 100618.
- [36] 吴基文, 王广涛, 翟晓荣, 等. 淮南矿区地热地质特征与地热资源评价[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2566–2578.
- WU Ji-wen, WANG Guang-tao, ZHAI Xiao-rong, et al. Geothermal geological characteristics and geothermal resources evaluation of Huainan mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2566–2578.

Conceptualization and method for synergetic mining of geothermal energy as solution to heat hazard control in deep mines

XU Yu, LI Zi-jun, JIA Min-tao, LIU Hua-sen, PAN Wei, LI Ming, ZHAO Dao-han

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: As mining engineering proceeds to increasingly greater depths, the heat hazard is becoming more serious caused by the surrounding rock heat release, compressed-air energy and geothermal water. Thermal stresses of the working environment significantly affect physiological and psychological of worker, labor productivity, and the failure likelihood of both equipment and workers, and related damage can cause injuries and fatalities. The traditional cooling method cannot be applied in deep mine because of the loss of cool energy largely, poor cooling effect and high cost. The method of heat source control, mechanical refrigeration and individual protection should be adopted simultaneously to control the heat hazard in deep mine, and an intelligent mine ventilation system needs to be established to control the temperature precisely, improve the cooling power and reduce the cost. Although high geological temperature induce heat hazards during mining, they are also an associated geothermal resource. The thermal energy obtained from the synergetic mining of geothermal energy can be cascade comprehensive utilized for heating buildings, bathing, mineral processing and breeding, which can bring huge economic value to the enterprise. At the same time, synergetic mining of mineral and geothermal energy offers a practicable measure to simultaneously control heat hazards at low cost and explore geothermal energy resources, which is a new ideal way to convert harm into profit and waste into treasure.

Key words: heat hazard control; deep mining; synergetic mining; mineral geothermal; intelligent ventilation

Foundation item: Project(2018YFC0808404) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(kq2202073) supported by Changsha Municipal Natural Science Foundation, China; Project(2020zzts197) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University, China

Received date: 2020-05-15; **Accepted date:** 2021-10-25

Corresponding author: LI Zi-jun; Tel: +86-13787138619; E-mail: anquan@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)