

文章编号: 1004-4051(2023)09-0110-09

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230458

煤-热共采模式下矿井地热水开采及智能调度技术研究

李延河^{1,2}, 万志军², 于振子³, 张源², 张波³,
甄正², 赵东⁴, 师鹏²

(1. 平顶山天安煤业股份有限公司, 河南 平顶山 467009;

2. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

3. 炼焦煤资源开发及综合利用国家重点实验室, 河南 平顶山 467009;

4. 平顶山天安煤业股份有限公司十矿, 河南 平顶山 467009)

摘要: 为响应我国“碳达峰、碳中和”战略目标, 实现能源绿色清洁转型, 开发深部矿井地热水资源具有重要意义。以平煤十矿为背景, 利用热储体积法, 评价了矿区地热水开发潜力, 结果显示矿区地热水蕴藏热能 7.63×10^{17} J, 折合标煤 26.1 Mt, 动态地热流体可采量折合标煤 1.01 Mt/a, 具有较高开发潜力。基于此, 在煤-热共采理论及框架的基础上, 提出了矿井地热水开采方法, 并提出了一种基于地面热负荷的地热水开采智能调度技术。通过计算矿区热负荷, 设计了矿井地热水开采方案, 并进行了现场工业性实验。实验结果表明, 开发利用矿井地热水可满足平煤十矿矿区 17 万 m^2 的冬季供暖及 7 000 余名职工日常洗浴, 同时可减少燃煤约 10 327 t/a, 折合 CO_2 排放量 2.69×10^4 t/a, 为企业带来 693.8 万元的经济效益。因此, 深部矿井地热水开采具有良好的安全效益、经济效益、社会效益与环境效益, 可为我国“双碳”目标的实现贡献力量。

关键词: 煤-热共采; 地热水; 热负荷; 矿区供暖; 井筒防冻; 高温矿井

中图分类号: TD82 **文献标识码:** A

Mining geothermal water extraction and intelligent scheduling technology under coal-heat co-mining mode

LI Yanhe^{1,2}, WAN Zhijun², YU Zhenzi³, ZHANG Yuan², ZHANG Bo³,
ZHEN Zheng², ZHAO Dong⁴, SHI Peng²

(1. Pingdingshan Tianan Coal Mining Co., Ltd., Pingdingshan 467009, China;

2. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

3. State Key Laboratory of Coking Coal Exploitation and Comprehensive Utilization, Pingdingshan 467009, China;

4. No.10 Mine of Pingdingshan Tianan Coal Mining Co., Ltd., Pingdingshan 467009, China)

Abstract: The development of deep mine geothermal resources is of great significance in response to China's strategic goal of "carbon peaking and carbon neutrality" and achieving a green and clean energy

收稿日期: 2023-06-24 责任编辑: 聂虹

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号: 51674242, 52074266)

第一作者简介: 李延河(1973—), 男, 汉族, 河南修武人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地热地质相关工作, E-mail: DB22020050P41@cumt.edu.cn。

通讯作者简介: 万志军(1970—), 男, 汉族, 四川青神人, 教授, 博士生导师, E-mail: zhjwan@126.com。

引用格式: 李延河, 万志军, 于振子, 等. 煤-热共采模式下矿井地热水开采及智能调度技术研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(9): 110-118.

LI Yanhe, WAN Zhijun, YU Zhenzi, et al. Mining geothermal water extraction and intelligent scheduling technology under coal-heat co-mining mode[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(9): 110-118.

transformation. Based on the context of Pingdingshan No.10 Mine, the geothermal water development potential in the mining area is evaluated by using the method of thermal reservoir volume, and the results show that the geothermal water in the mining area has a thermal energy of 7.63×10^{17} J, equivalent to 26.1 Mt of standard coal, the dynamic geothermal fluid extractable quantity is equivalent to 1.01 Mt of standard coal per year, indicating a high development potential. Based on this, a method for extracting geothermal water from mines is proposed based on the theory and framework of coal-heat co-mining, along with an intelligent scheduling technology for geothermal water extraction based on ground heat load. By calculating the thermal load of the mining area, a geothermal water extraction scheme for mines is designed, followed by on-site industrial experiments. The results indicate that the development and utilization of geothermal water from mines can meet the winter heating needs of an area of 170 000 m² in Pingdingshan No.10 Mine and provide daily bathing for over 7 000 employees, while reducing coal consumption by approximately 10 327 tons per year, equivalent to a CO₂ emission reduction of 26 900 tons per year, bringing about an economic benefit of 6.938 million RMB to the company. Therefore, deep mine geothermal water extraction has significant benefits in terms of safety, economy, society, and environment, making a valuable contribution to achieve China's "carbon peaking and carbon neutrality" goals.

Keywords: coal-heat co-mining; geothermal water; thermal load; mining area heating; shaft anti-freezing; high temperature mine

0 引言

随着我国长期对煤炭资源的高强度开采, 东部矿井浅部煤炭资源逐渐枯竭, 东部矿区煤炭深井开采成为常态^[1-2]。然而, 深井开采伴随的井下高温环境对矿工的身体健康、设备服役性能及寿命产生不利影响, 严重制约着煤矿安全高效生产^[3]。因此, 深井热害治理已成为矿山向深部发展的关键科学难题^[4-6]。

近年来, 在我国“碳达峰、碳中和”的时代背景下, 矿区治霾减排持续推进, 太阳能、风能、地热能等清洁资源被大力开发^[7-9]。华北型煤田区赋存了丰富的中深层水热型地热资源^[10-11], 鉴于此, 对矿区地热水资源进行综合开发利用, 通过提取地热水中的热量用于矿区供暖、洗浴等, 来代替部分燃煤锅炉, 不仅能有效降低碳排放、减少雾霾污染, 还能够提高资源利用率、改善井下高温环境, 并推进矿山可持续发展与绿色低碳转型, 具有显著的社会效益、经济效益和环境效益^[11-14]。

目前, 针对矿井地热水开发与利用已有部分学者进行了相关研究。万志军等^[15-16]提出了煤-热共采的理念与技术框架, 系统地介绍了矿井地热水开采各步骤的具体工艺与地热水利用的具体方法, 并提出了根据地面用热情况对地热水开采进行智能调度和调峰出力。HALL等^[17]提出在冬季将矿井地热水提取热量进行供暖, 夏季将热量传入回水中进行制冷的地热水利用方法。AL-HABAIBEH等^[18]通过地源热泵利用废弃矿井中的地热水进行供暖与制冷, 并分析了该系统的长期利用效率。CHUDY等^[19]计算了废弃矿井中地热水蕴含的能量, 以及开发地热

水资源对减少碳排放的重要作用。VERHOEVEN等^[20]构建了矿井地热水开采、利用、储能、通信等多系统可持续能源结构。BAO等^[21]通过分析基岩地质、采矿条件与能源储量, 计算了利用矿井地热水产生的效益。王艳艳等^[22]基于模糊综合权重法构建了地热水资源梯级开发利用模式评价体系。针对矿井输水自动控制系统, 宫学东等^[23]以PLC作为控制核心设计了矿井疏水自动控制系统, 采用传感器监测水泵、水仓等处状态, 实现了自动控制、实时监控、系统保护等功能。徐卫峰等^[24]为矿井疏水与自动控制系统设计了一键自动启停、多水仓水泵联合运行流程, 并利用避峰就谷运行方式减少了系统能耗。

以上研究表明, 合理开发利用矿井地热水资源具有显著效益。然而地面热负荷受到季节影响, 一味大量开采会导致地热储层遭受破坏, 降低地热井服务年限。基于此, 本文提出了基于地面热负荷的矿井地热水开采智能调度技术, 分析了矿区地热水开发潜力, 介绍了地热水自适应开采方法, 明确了矿井热冷负荷, 设计了地热水生产系统, 讨论了地热水开采工业性试验效果。

1 矿井地热资源评价

1.1 矿井概况

平煤十矿位于河南省平顶山市东部, 距市中心约5 km。井田东西走向长4 km, 南北倾斜宽5.13 km, 井田面积20.52 km²。根据矿井资料, 矿井位于地温异常区, 其平均地温梯度为3.4 °C/hm, 局部地温梯度高达4.6 °C/hm。同时, 区域内碳酸盐岩发育广泛, 赋存大量高压岩溶热水, 温度长期稳定在50~52 °C, 从

而加剧了工作面高温热害;且在煤层开采过程中,还易引发突水事故。

1.2 矿井地热水资源量及开发潜力评价

为了分析矿井地热水的开发潜力,利用热储体积法,对平煤十矿、平煤十二矿北侧与首山一矿西南侧矿区内的地热资源量进行估算。根据地质数据与地层资料,设置该区域热储面积为 68.98 km²、厚度为 200 m、水头高度为 350 m,其他参数见表 1。

表 1 矿区地热水参数

Table 1 Parameters of geothermal water in mining area

类别	数值
地热水平均温度/℃	50
地热水密度/(kg/m ³)	1 000
地热水比热容/(J/(kg·℃))	4 200
基准温度/℃	14.9

地热水资源量计算见式(1)。

$$Q_w = AD\rho_w c_w \phi (T_w - T_s) \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水的密度,kg/m³; c_w 为水的比热容,J/(kg·℃); A 为计算区域地表面积,m²; D 为计算深度,m; T_w 为指定体积内水的平均温度,℃; T_s 为基准温度,℃。

为分析地热水开发潜力,利用估算法计算该区

域地热水静态可采量,见式(2)。

$$Q_s = Q_w \times R_e \quad (2)$$

式中: Q_s 为地热资源静态可采量,J; R_e 为资源回采率,无量纲,取 0.15。

利用最大允许沉降法计算动态可采量,见式(3)。

$$Q_D = \frac{4\pi \times T_D \times J}{\ln(6.11T_D \times \frac{t}{\mu R_k^2})} \quad (3)$$

式中: Q_D 为地热流体动态可开采量,m³/a; T_D 为导水系数,取 7.3×10⁵ m²/a; J 为计算区中心水位降深,取 100 m; t 为开采时间,取 20 a; μ 为热储释放系数,无量纲,取 0.1; R_k 为开采区半径,取 3 000 m。

结合式(1)~式(3)可得:平煤十矿地区地热水蕴藏热能为 7.63×10¹⁷ J,折合标煤 26.1 Mt;地热水资源静态可采量为 1.14×10¹⁷ J,折合标煤 3.9 Mt;动态地热流体可采量为 1.995 8×10⁸ m³/a,即 2.95×10¹⁶ J/a,每年折合标煤 1.01 Mt。综上,平煤十矿地热水资源储量巨大,具有较高开发潜力。

2 矿井地热水开采与智能调度

2.1 矿井地热水开采方法

为合理开采地热水资源,保证资源合理利用,需根据矿井地质条件与矿井生产条件设计矿井地热水抽采方法,如图 1 所示。

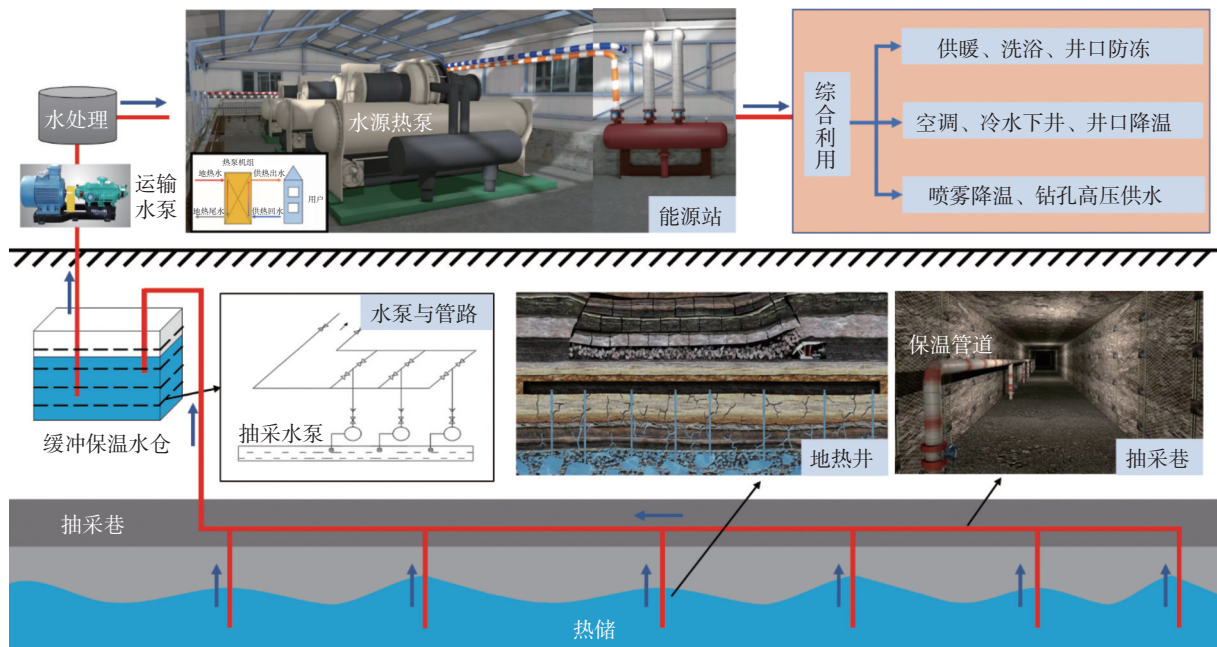


图 1 矿井地热水开采与利用方法

Fig. 1 Mining and utilization method of geothermal water in mine

首先,通过前期探放水试验确定地热储层地热水分布“甜点区”,根据该区域划分抽采靶区。依托矿井现有巷道布置,在靶区范围内选择合适巷道作

为抽采巷,沿该巷底板轴向向热储层钻多个地热水抽采井,形成地热井群系统。每个地热井建设完成后需要先进行封井,随后自地热井布置保温运输管

道,经缓冲保温水仓后运输至地面,保温水仓应满足容纳水泵正常运行1~2h抽采的全部地热水量,并划分低水位、中水位、高水位、极限水位。采用两趟输水管路(一用一备),水仓设置三组水泵(一用一备一检修),以负压抽采方法抽水。提升到地面的地热水通过地面水源热泵装置进行换热,并根据地面各处需水量与热负荷合理分配冷热水。在整个抽采过程中需实时监测地热井水压与水温变化,防止水压下降太大导致巷道底板破坏,以及水温下降太快影响地热水资源的可持续利用。提升至地面的矿井地热在换热后用于矿井地面工业广场供暖、工人洗浴以及矿井防冻,最终结合水量需求制定地热水抽采方案。

2.2 矿井地热水智能调度技术

为保证地热井服务年限,提高供热效率,实现矿井地热水开采的智能调度,提出了基于地面热负荷的矿井地热水智能调度技术,该技术主要由负荷数据库与智能调度控制系统组成。

因地面热负荷量从每日至每年都呈现较为规律性变化,但实时的负荷变化传递到系统内具有滞后性,因此将每日的负荷数据集中建立负荷数据库,基于该数据库预先确定每时刻的地热水初始需水量,以此预防负荷量在昼夜或季节更迭时发生较大变化影响系统正常工作,在负荷偏离数据库时采用自适应开采技术进行调整。

地热水开采智能调度原理如图2所示,具体为:水仓中地热水水位一般应处于低水位至高水位间,当负荷变动时,需水量产生变化,导致水仓中水位出现较大变动,为保证水仓水量维持正常范围,通过控制水泵、管路的启停使其满足当下负荷。当需水量大于单水泵供水量时,水仓内水位下降,在下降至中水位时,开启备用泵、备用管路协同工作,在水位到达极限水位时,停止备用泵与备用管路;当单水泵供水量满足需水量时,则单泵持续运行,当水仓水位达到高水位时水泵暂停运行,在水位到低水位时重启水泵供水。若出现最大供水量无法满足预计需水量,可通过提前向地面蓄水池蓄水维持正常工作。

依据技术原理,构思了矿井地热水自适应开采系统,其结构如图2和图3所示,主要以PLC为控制核心,辅以各类型传感器采集信息数据。为保证系统初始运行,需在系统内输入初始热(冷)负荷,该数值主要根据供暖区域热(冷)负荷需求以及区域季节气候共同确定。同时,各类传感器实时采集目标区域气温、矿井地热水水温、水量、水压等参数,并建立相关数据库。然后将数据库中的数据输入到地面

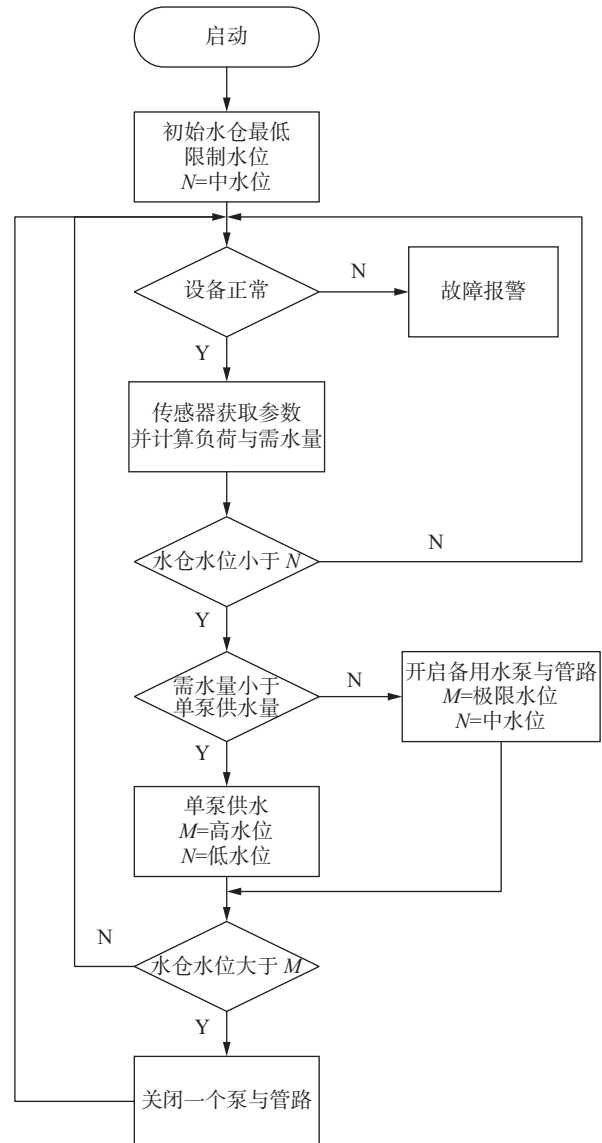


图2 矿井地热水开采智能调度技术原理

Fig. 2 The principle of intelligent scheduling technology for mine geothermal water mining

监控中心,以此计算区域热(冷)负荷需求以及供给端供热量等。此外,利用工业以太网将总需水量传输到井下PLC控制中心,通过水仓处液位传感器、防爆摄像机监测水仓容量,水泵处压力、真空度、轴温、流量传感器判断水泵状态,结合需水量的变化确定开采方案,进而调整水泵、管路、地热井电动阀门来改变生产策略。需要注意的是,数据库中的各类自动更新和迭代,从而实现矿井地热水记忆抽采、实时监控采、智能调控。

2.3 矿井地热水开采方案

2.3.1 矿井热负荷及需水量分析

为了准确地设计整套开采方案,需要结合矿井实际用热需求,对矿井热负荷进行精准计算。经现场调研分析,冬季矿井主要用热需求为地面17万m³

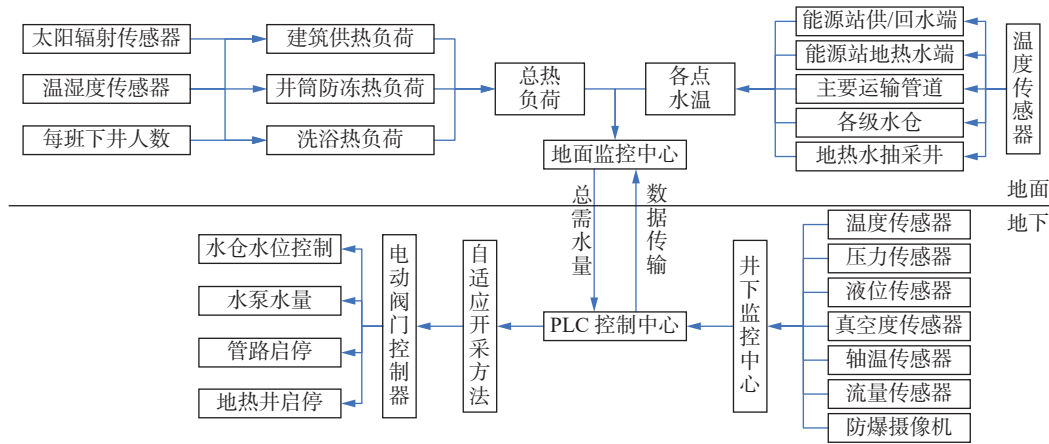


图 3 地热水开采智能调度系统结构

Fig. 3 Geothermal water mining intelligent scheduling system structure

建筑采暖、井筒防冻与职工洗浴，其中，职工洗浴用水为地热水沉淀净化后直接利用，不需要考虑热负荷问题。

为了保证地热水开采的智能调度，采用度时数法思想^[25]，根据室外实时温湿度、太阳辐射、室内目标温度等参数，精准计算实时供暖热负荷，则冬季矿区采暖负荷计算见式(4)。

$$Q_h = KS(T_i - \frac{R \times a_s}{a_w} - T_o) \quad (4)$$

式中： Q_h 为冬季矿区采暖负荷，W； K 为外围护结构传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； S 为外围护结构面积， m^2 ； T_i 为室内目标温度， $^\circ C$ ； T_o 为室外温度， $^\circ C$ ； R 为太阳辐射强度， W/m^2 ； a_s 为外表面太阳辐射吸收系数，无量纲； a_w 为外表面传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

井筒防冻所需热负荷计算见式(5)。

$$Q_a = \alpha G \gamma C_p (T_a - T_o) \quad (5)$$

式中： Q_a 为井筒防冻所需换热负荷，kW； α 为热量损失系数，无量纲，取 $\alpha=1.10$ ； G 为井筒进风量， m^3/s ； γ 为空气容重，由 $\gamma=101325/[287 \times (t+273.15)]$ 计算， kg/m^3 ； C_p 为空气定压比热容， $kJ/(kg \cdot K)$ ，取 $1.005 kJ/(kg \cdot K)$ ； T_a 为井口房冷热风混合温度， $^\circ C$ 。

该地热水开采方法通过水源热泵利用矿井地热水进行换热，以上计算为热泵制热负荷，经热泵矿井地热水所提供的热负荷计算见式(6)。

$$Q_n = \frac{(Q_h + Q_a) \times COP}{COP - 1} \quad (6)$$

式中： Q_n 为矿井地热水所提供的总热负荷，kW； COP 为热泵制热工况的循环性能系数，取4。

根据式(6)计算出的矿井地热水热负荷，结合进回水温差可以得到实时的需水量，计算见式(7)。

$$G_{wp} = 3.6 \times \frac{Q_n}{\Delta t_{wp} \times c_w} + G_s \quad (7)$$

式中： G_{wp} 为需水量，t/h； Δt_{wp} 为矿井水进回水温差， $^\circ C$ ； G_s 为矿井洗浴需水量。

经调研，平煤十矿目前南工业广场与北一工业广场为主要的需热地点，其建筑外围护结构传热系数 $K=19.8 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 、外表面太阳辐射吸收系数 $a_s=0.48$ 、外表面传热系数 $a_w=23.26 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 、南工业广场外围护结构面积 $S_S=25000 m^2$ 、北一工业广场外围护结构面积 $S_N=1120 m^2$ 、室内目标温度 $T_i=18 ^\circ C$ 、井口房冷热风混合温度 $T_a=2 ^\circ C$ 。为便于计算，此处取冬季负荷最大时太阳辐射强度 $R=381.02 W/m^2$ 、 $T_o=-3 ^\circ C$ （平均最低气温）或 $-7 ^\circ C$ （极端最低气温），进回水温差假设为 $\Delta t_{wp}=25 ^\circ C$ ，根据式(4)~式(7)计算，其极限热负荷值与需水量见表2，根据智能调度技术思想可以利用以上公式计算每一时刻需水量从而实时调整生产方式。

2.3.2 地热水开采方案

根据平煤十矿前期的地质勘查与现有的技术条件，-890 m水平的33190工作面和33200工作面为地热水开采“甜点区”，选择在这两个工作面的机巷底板巷打井开采地热水。

表 2 平煤十矿地热水利用热负荷与需水量

Table 2 Heat load and water demand of geothermal water utilization in Pingdingshan No.10 Mine

位置	Q_h/kW	Q_a/kW	Q_n/kW	$G_s/(t/h)$	$G_{wp}/(t/h)$
南工业广场	6 502.9	1 540.2	8 043.1	0.0	275.7
北一工业广场	2 248.0	2 528.5	4 776.5	25.0	188.8

1) 地热井位置及结构设计。地热井位置主要依据探放水实验选择在热储层富水区, 33190/33200 机巷底板巷全长 1 350 m, 共设置 10 个地热井, 地热井之间间隔 150 m, 具体布置方案如图 4 所示。根据热储位置设计地热井深 150 m, 采用二开结构, 具体如图 5 所示。其中, 前 20 m 利用孔口管进行固井, 0~70 m 为一开, 直径为 127 mm, 采用套管水泥环护井, 70~150 m 为二开, 直径为 113 mm, 采用裸眼完井。

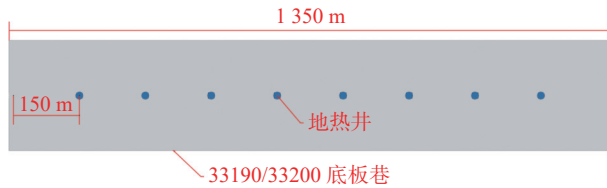


图 4 33190/33200 底板巷地热井布局示意图
Fig. 4 Layout diagram of geothermal wells in 33190/33200 floor roadway

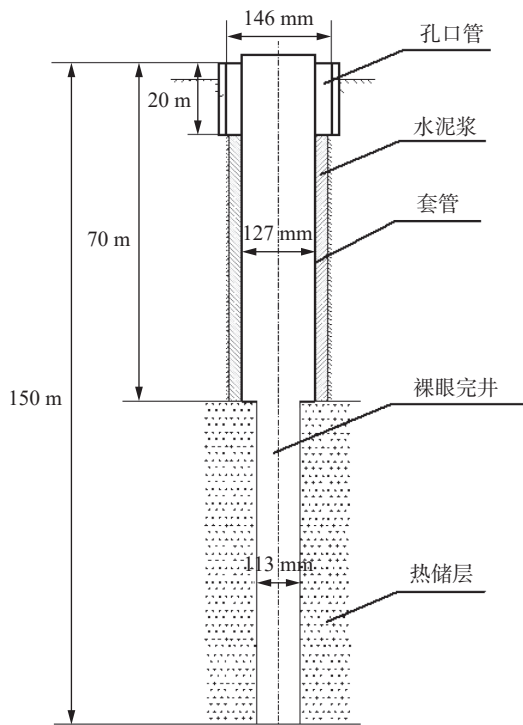


图 5 地热井井深结构示意图
Fig. 5 Structure diagram of geothermal well depth

2) 管网布置。根据矿井巷道、硐室布置与水泵提升能力, 采用梯级接力提升方式, 将地热水从地热井抽出后先提升至-870 m 水仓, 后经-320 m 水仓, 最后通过乘人斜井提升至地面。为降低地热水输送过程中的热损耗, 降低热污染, 选择玻璃棉+不锈钢板的管路保温结构, 保温材料厚 20 mm。

3) 中转水仓、水泵及热泵机组。两处水仓主要作用为汇集地热水, 并起到缓冲续存的作用。-870 m

水仓断面积 10 m², 水仓长 64 m, -320 m 水仓断面积 10 m², 水仓长 92 m, 两处水仓处均设置三组水泵(一备一用一检修)。地面设置高温离心式水源热泵机组(两用一备)。

3 地热水开采工业性试验及评价

3.1 地热水开采工业性试验

基于地热水开采方案进行工业性试验, 对平煤十矿工业广场现有供暖系统进行升级改造, 采用水源热泵系统进行换热, 矿井地热水开采工业性试验布置如图 6 所示。为保证系统使用寿命, 矿井水从南副井出来后, 先输送至矿井南净水厂的沉淀池中, 再运输到热泵机组进行换热供暖与洗浴, 换热后排至南工业广场净化水厂的石英砂处理车间中, 再运往地面用水点进行利用, 南工业广场供暖总体布置如图 7 所示。

为验证地热水开采合理性, 在地面沉淀池出口处布置了温度监测装置, 在 33190 机巷底板巷地热井布置了水压监测装置, 采集了 2021 年与 2022 年冬季地面热泵进口前水温与地热井口水压数据, 结果如图 8 所示。由图 8(a) 可知, 受季节影响地面水温有一定波动, 但总体均在 42~46 °C, 仅需使用热泵机组提升 5~10 °C 的热量就能满足需要, 热泵效率高, 能够满足矿区 17 万 m² 供暖、全体员工洗浴与井口防冻; 由图 8(b) 可知, 地热井水压整体呈下降趋势, 但变化较小, 最终稳定在 1.7 MPa 左右, 证明抽采方案稳定可靠。

3.2 效益分析

1) 经济效益。通过地热水进行矿区供暖与洗浴, 实现了矿区 17 万 m² 的冬季供暖, 与当地传统燃煤供暖 15 元/m² 的成本相比, 地热供暖系统运行成本仅 3 元/m², 每年可节约 203.5 万元; 经处理的地热水可满足矿区 7 000 余名职工每日洗浴用水, 相较于锅炉加热洗浴用水每年平均可节约 328.9 万元。

2) 安全效益。通过对矿井井筒进行防冻措施, 可防止低温天气下井筒淋水结冰导致的井筒提升能力下降与通风断面减小的问题, 大幅提升矿井安全能力。

3) 环境效益。通过利用地热水资源每年大约可减少燃煤 10 327 t, 可实现年减少 CO₂ 排放量 2.69×10⁴ t, 在碳排放交易市场中按平均 60 元/t 的价格计算可实现的经济效益为 161.4 万元。对于温室气体减排有良好的环境效益。

4) 社会效益。开发矿井地热水资源, 实现了资源的最大化利用, 增加了绿色能源在能源结构中的占比, 是积极响应“碳达峰、碳中和”国家能源发展



图 6 矿井地热水开采工业性试验布置

Fig. 6 Industrial test layout of geothermal water mining in mine

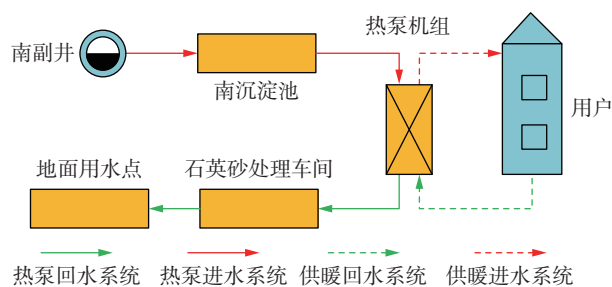


图 7 南工业广场供暖总体布置图

Fig. 7 Overall heating layout of south industrial square

战略的体现,对我国能源结构调整战略具有重要推动作用。

4 结论

1)平煤十矿地热资源量丰富,且开发潜力巨大。利用热储体积法对矿井地热水资源量进行了计算,

结果显示,储层地热水蕴藏热能为 7.63×10^{17} J,折合标煤 26.1 Mt。利用估算法及最大沉降法对地热水开发潜力进行了评价,结果显示,其静态可采量为 1.14×10^{17} J,折合标煤 3.9 Mt,动态可采量为 2.95×10^{16} J/a,折合标煤每年 1.01 Mt。

2)提出了矿井地热水开采与智能调度技术,计算了矿井工业广场热负荷,基于此,设计了地热水开采方案,减小了巷道底板突水风险,实现了矿井地热水的资源化利用。

3)现场进行了矿井地热水开采工业性试验,结果表明,地热水开采利用方案稳定可靠,可满足矿区 17 万 m^2 供暖与矿井全体职工洗浴的需求,可取得直接经济效益 532.4 万元,间接经济效益 161.4 万元,具有良好的安全效益、经济效益、社会效益与环境效益。

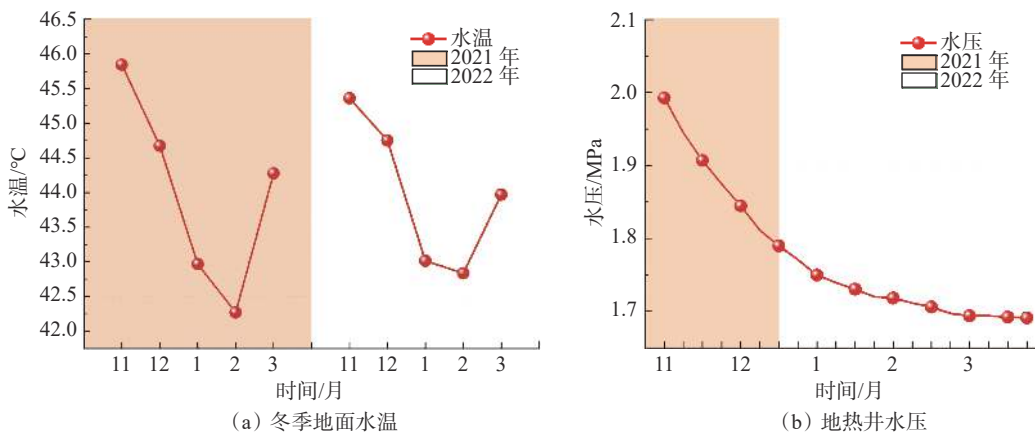


图 8 地面水温与地热井水压监测图

Fig. 8 Monitoring diagram of surface water temperature and geothermal well water pressure

参考文献(References):

- [1] 彭苏萍,张博,王佟.我国煤炭资源“井”字形分布特征与可持续发展战略[J].*中国工程科学*,2015,17(9):29-35.
PENG Suping, ZHANG Bo, WANG Tong. China's coal resources: octothorpe shaped distribution characteristics and sustainable development strategies[J]. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(9): 29-35.
- [2] 侯慎健,王佟,张博,等.对新时代中国煤炭资源勘查工作发展思路的探讨[J].*西安科技大学学报*,2019,39(2):341-346.
HOU Shenjian, WANG Tong, ZHANG Bo, et al. Development of China's coal resources exploration in the new era[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(2): 341-346.
- [3] 曲玮,宋爱华,张海东,等.矿井热害治理防护措施的研究进展[J].*环境与职业医学*,2009,26(6):589-592.
QU Wei, SONG Aihua, ZHANG Haidong et al. Technical progress of protective measures against the heat hazard in mine[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2009, 26(6): 589-592.
- [4] 袁亮.深部采动响应与灾害防控研究进展[J].*煤炭学报*,2021,46(3):716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716-725.
- [5] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].*煤炭科学技术*,2016,44(1):39-46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 39-46.
- [6] 李化敏,付凯.煤矿深部开采面临的主要技术问题及对策[J].*采矿与安全工程学报*,2006,23(4):468-471.
LI Huamin, FU Kai. Some major technical problems and countermeasures for deep mining[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2006, 23(4): 468-471.
- [7] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].*煤炭学报*,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [8] 桑树勋,袁亮,刘世奇,等.碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J].*煤炭学报*,2022,47(4):1430-1451.
SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1430-1451.
- [9] 侯正猛,熊鹰,刘建华,等.河南省碳达峰与碳中和战略、技术路线和行动方案[J].*工程科学与技术*,2022,54(1):23-36.
HOU Zhengmeng, XIONG Ying, LIU Jianhua, et al. Strategy, technical route and action plan towards carbon peak and carbon neutrality in Henan Province[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(1): 23-36.
- [10] 王贵玲,蒯文静.我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J].*地质学报*,2020,94(7):1923-1937.
WANG Guiling, LIAN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1923-1937.
- [11] 曹锐,多吉,李玉彬,等.我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望[J].*工程科学学报*,2022,44(10):1623-1631.
CAO Rui, DUO Ji, LI Yubin, et al. Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1623-1631.
- [12] 蔡美峰,马明辉,潘继良,等.矿产与地热资源共采模式研究现状及展望[J].*工程科学学报*,2022,44(10):1669-1681.
CAI Meifeng, MA Minghui, PAN Jiliang, et al. Co-mining of mineral and geothermal resources: a state-of-the-art review and future perspectives[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1669-1681.
- [13] 张吉雄,汪集暘,周楠,等.深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究[J].*工程科学学报*,2022,44(10):1682-1693.
ZHANG Jixiong, WANG Jiyang, ZHOU Nan, et al. Collaborative mining system of geothermal energy and coal resources in deep mines[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1682-1693.
- [14] 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.
- [15] 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 Zhijun, BI Shike, 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.
- [16] 万志军,张源,师鹏,等.煤-热共采模式下地热水非常规开采数值模拟研究[J].*煤炭学报*,2023,48(3):1115-1125.
WAN Zhijun, ZHANG Yuan, SHI Peng, et al. Numerical simulation on unconventional mining of geothermal water in coalheat co-mining mode[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 48(3): 1115-1125.
- [17] HALL A, SCOTT J A, SHANG H. Geothermal energy recovery from underground mines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2): 916-924.
- [18] AL-HABAIBEH A, ATHRESH A P, PARKER K. Performance analysis of using mine water from an abandoned coal mine for heating of buildings using an open loop based single shaft GSHP system[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 393-402.
- [19] CHUDY K. Mine water as geothermal resource in Nowa Ruda Region(SW Poland)[J]. *Water*, 2022, 14(2): 136.
- [20] VERHOEVEN R, WILLEMS E, HARCOUËT-MENOU V, et al. Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling[J]. *Energy Procedia*, 2014, 46: 58-67.
- [21] BAO T, MELDRUM J, GREEN C, et al. Geothermal energy recovery from deep flooded copper mines for heating[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 183: 604-616.
- [22] 王艳艳,洪梅,付博,等.基于模糊综合权重法的地热水资源梯级利用模式评价[J].*水电能源科学*,2016,34(5):30-33.
WANG Yanyan, HONG Mei, FU Bo, et al. Evaluation of geothermal

- water resources cascade utilization mode based on fuzzy comprehensive weighting method[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(5): 30-33.
- [23] 宫学东, 陈威, 朱亚坤. 煤矿强排自动控制系统设计[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(5): 75-78.
- GONG Xuedong, CHEN Wei, ZHU Yakun. Design of automatic control system of forced drainage of coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(5): 75-78.
- [24] 徐卫峰, 杨建旗, 陈霏, 等. 煤矿井下排水系统自动化改造及控制策略优化[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(2): 190-192.
- XU Weifeng, YANG Jianqi, CHEN Pei, et al. Automatic reform of underground drainage system and optimization of its control strategy in coal mine[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(2): 190-192.
- [25] 薛汇宇, 孙育英, 王伟, 等. 基于供需匹配的空气源热泵-风机盘管供暖系统变水温控制方法研究[J]. *建筑科学*, 2019, 35(12): 137-143.
- XUE Huiyu, SUN Yuying, WANG Wei, et al. Study on the variable water temperature control method of air source heat pump and fan coil heating system based on supply and demand matching[J]. *Building Science*, 2019, 35(12): 137-143.