



济宁煤田地热资源潜力评价及开发利用

史启朋 范建国 石凤凤 王学森 郑慧铭 孟甲 宋帅良

Potential evaluation and development utilization technology of geothermal resources in the Jining Coalfield

SHI Qipeng, FAN Jianguo, SHI Fengfeng, WANG Xuesen, ZHENG Huiming, MENG Jia, SONG Shuailiang

引用本文:

史启朋, 范建国, 石凤凤, 王学森, 郑慧铭, 孟甲, 宋帅良. 济宁煤田地热资源潜力评价及开发利用[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(5): 1149–1162. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.08.02.001

SHI Qipeng, FAN Jianguo, SHI Fengfeng, WANG Xuesen, ZHENG Huiming, MENG Jia, SONG Shuailiang. Potential evaluation and development utilization technology of geothermal resources in the Jining Coalfield[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(5): 1149–1162. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.08.02.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.08.02.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望

Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China
工程科学学报. 2022, 44(10): 1623 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.07.003>

胶东地区矿产与地热资源共采可行性浅析

Feasibility analysis of co-mining of mineral and geothermal resources in the Jiaodong Peninsula
工程科学学报. 2022, 44(10): 1652 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.07.12.002>

深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究

Collaborative mining system of geothermal energy and coal resources in deep mines
工程科学学报. 2022, 44(10): 1682 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.05.07.005>

矿产与地热资源共采模式研究现状及展望

Co-mining of mineral and geothermal resources: A state-of-the-art review and future perspectives
工程科学学报. 2022, 44(10): 1669 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.08.24.001>

增强地热系统研究现状：挑战与机遇

Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review
工程科学学报. 2022, 44(10): 1767 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.07.004>

雄安新区深部碳酸盐岩热储强化增产试验研究

Experimental study of the enhanced stimulation of a deep carbonate thermal reservoir in the Xiong'an New Area
工程科学学报. 2022, 44(10): 1789 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.08.008>

济宁煤田地热资源潜力评价及开发利用

史启朋^{1,2,3}✉, 范建国⁴, 石凤凤¹, 王学森¹, 郑慧铭^{1,2,3}, 孟甲^{1,2,3}, 宋帅良^{1,2,3}

1) 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 济宁 272100 2) 地热清洁能源勘查开发山东省工程研究中心, 济宁 272100 3) 山东省地热清洁能源重点实验室, 济宁 272100 4) 山东能源集团有限公司, 济南 250014

✉通信作者, E-mail:shiqipeng@163.com

摘要 “双碳”目标驱动下,我国将逐渐减少对煤炭、石油等化石能源的依赖,向发展清洁、绿色、低碳能源转型。为合理开发利用矿区地热资源,本文以济宁煤田为研究对象,在查明煤田区地热地质条件的基础上,将煤矿开采以及排水后腾出来的空间作为“热储层”,采用热储法和回收率法计算了各矿山的地热资源量、可采储量,评价地热资源开发利用潜力。研究结果表明:济宁煤田地热资源储量为 1.05×10^{15} kJ,折合标煤 3.60×10^7 t,可采地热资源量为 1.05×10^{14} kJ,折合标煤 3.60×10^6 t,可减少 CO_2 排放量 8.59×10^6 t;煤田内各矿山平均可采资源量潜力为 $6.82\times 10^{10}\sim 3.13\times 10^{11}$ kJ $\cdot\text{km}^{-2}$,地热开发利用程度低,开发利用潜力较大。针对生产矿山总结提出了矿井回风热能利用和矿井排水余热利用 2 种技术方案,针对闭坑矿山提出了“取热不取水”和“取热不耗水”2 种地热利用技术模式。以典型煤矿为例,根据矿山井下巷道开拓空间分布特征,副井、充填孔、巷道井、直排井、地面排水管道及工业广场建筑物的供暖改造条件,阐明了煤田地热开发利用技术,初步建成地热供暖示范工程,可供暖面积 5.0×10^4 m²,年利用地热资源量节约标准煤 118.04 t,减排二氧化碳 281.64 t,实现“取热不耗水”可持续开发利用地热资源的新模式。为矿山地热能综合利用、矿山绿色转型和助力实现“双碳”目标,提供了技术支撑。

关键词 双碳;煤田地热;热储层;导水裂隙带;地热资源评价;开发利用;储能

分类号 TK01

Potential evaluation and development utilization technology of geothermal resources in the Jining Coalfield

SHI Qipeng^{1,2,3}✉, FAN Jianguo⁴, SHI Fengfeng¹, WANG Xuesen¹, ZHENG Huiming^{1,2,3}, MENG Jia^{1,2,3}, SONG Shuailiang^{1,2,3}

1) Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources No.2 Geological Brigade, Shandong Provincial Lunan Geology and Exploration Institute, Jining 272100, China

2) Shandong Engineering Research Center of Geothermal Energy Exploration and Development, Jining 272100, China

3) Shandong Provincial Key Laboratory of Geothermal Clean Energy, Jining 272100, China

4) Shandong Energy Group Co., Ltd, Jinan 250014, China

✉Corresponding author, E-mail:shiqipeng@163.com

ABSTRACT Under the guidance of China's "carbon peaking and carbon neutrality" goals, efforts are underway to optimize and adjust the national energy structure. This involves a gradual reduction in the reliance on traditional fossil fuels such as coal and oil and an accelerated transition to clean, green, and low-carbon energy sources. The rational development and utilization of geothermal resources can significantly reduce greenhouse gas emissions while promoting the green transformation and sustainable development of mining areas. This study uses the Jining Coalfield as a case study, exploring the geothermal geological conditions in the coalfield area. The investigation revealed that the voids left after coal mining and drainage could potentially serve as a "thermal reservoir." The study

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023CXGC010904); 山东省地矿局科技攻关项目(KY202221); 山东能源集团科技计划重点项目(SNKJ2022BJ02-R03)

utilized thermal reservoir and recovery rate methods to calculate the quantity of geothermal resources and the recoverable reserves for each mine within the coalfield, evaluating their development and utilization potential. The findings indicated that the geothermal resource reserves of the Jining Coalfield amount to 1.05×10^{15} kJ, which is equivalent to 3.6 billion tons of standard coal. The recoverable geothermal resource volume was estimated at 1.05×10^{14} kJ or 360000 tons of standard coal. Development and utilization of these resources are projected to reduce CO₂ emissions by approximately 8.59 million tons. The study also determined that the average recoverable resource potential of each mine in the coalfield ranges from 6.82×10^{10} to 3.13×10^{11} kJ·km⁻². This indicates that while the current level of geothermal development and utilization is low, there is significant potential for expansion. For operational mines, two technical schemes were proposed: utilizing mine air return heat energy and mine drainage waste heat to enhance energy efficiency and reduce energy waste. For closed mines, two geothermal utilization models were introduced: “extracting heat without extracting water” and “extracting heat without consuming water,” which can effectively conserve water resources while promoting sustainable geothermal utilization. Using a typical coal mine as a case example, the study examined the development potential of underground mine spaces, including roadways, auxiliary shafts, filling holes, tunnel shafts, direct discharge shafts, surface drainage pipelines, industrial square buildings, and other mining facilities. This approach outlined a comprehensive technical pathway for geothermal development and utilization in the coalfield. A geothermal heating demonstration project has now been preliminarily completed, covering a heating area of 50000 square meters. By utilizing geothermal resources, the project can save 118.04 tons of standard coal annually and reduce CO₂ emissions by 281.64 t per year, establishing a sustainable model of geothermal resource development and utilization that “extracts heat without consuming water.” This research provides crucial technical support for the comprehensive utilization of geothermal energy in mines and contributes to the green transformation of mining operations, aligning with the “carbon peaking and carbon neutrality” goals. The development and utilization of geothermal resources enable mining areas to optimize their energy structure, reduce reliance on fossil fuels, and promote the diversified growth of the local economy. Additionally, this approach enhances the quality of the ecological environment and paves the way for new avenues of sustainable development.

KEY WORDS carbon peaking and carbon neutrality; coalfield geothermal heat; geothermal reservoir; water conducting fracture zone; geothermal resource assessment; development and utilization; energy storage

在“双碳”目标驱动下,我国将逐步减少对煤炭、石油等化石能源的依赖,向发展清洁、绿色、低碳能源转型^[1-2].开展煤田地热资源评价及开发利用技术研究,对优化能源结构、加快推进社会经济绿色低碳高质量发展和助力“双碳”目标实现意义重大^[3-5].济宁煤田总面积约为 1030 km²,累计探明煤炭资源储量位 41.6 亿吨,分布 13 处矿山,是我国主要煤炭基地之一,对社会经济发展做出了重要贡献.煤田开采深度为-150~-1700 m,经过长期持续开采,浅部资源日趋枯竭,已向深部延伸开采,煤矿开采热害严重^[6-13],并在矿井下形成了大面积采空区,其内赋存丰富的水热资源^[14-18].部分矿山已达设计生产年限面临关闭,矿山井下形成的巷道、采空区,工业广场分布的主井、副井、充填孔、巷道井、直排井,排水管道及办公楼、宿舍楼等采矿设施,为矿山地热资源开发利用示范工程建设提供了便利条件.

国外矿山地热利用研究较早,20 世纪俄罗斯顿巴斯煤矿利用水源热泵技术将矿井水温度提升后,用于建筑采暖^[19];荷兰海尔伦市利用靠近城区的废弃矿井作为蓄热系统,提取矿井涌水中恒温

热量对市区多座大型建筑供暖(制冷),供暖(制冷)总面积为 8×10^5 m² 左右,该项目为欧洲乃至全球废弃矿井地热能开发利用发挥了示范作用^[20];加拿大安威廉姆斯矿采用开放式循环系统提取封闭矿井积水的热能,结合热泵技术为矿区周边小区夏季制冷和冬季供热^[21];Banks 等^[22]估算了英国埃格雷蒙特废弃矿井地热静态储能量;Bailey 等^[23]针对英国废弃矿井水排放问题,探讨了回收地热能的可能性,研究发现,矿井水中每小时可回收 4.10×10^{12} J 的热能,而处理矿井水所需电能仅为 2.3 MW·h;Farr 等^[24]利用南威尔士废弃矿井水排放及地温数据,估算出该地区矿井每小时可产生约 6.22×10^{12} J 的地热能,可为约 6500 户住宅进行供暖或制冷;Menéndez 等^[25]评估了 Asturian 废弃矿井地热能的利用潜力,显示矿井地热能利用可为该地区减少 80% 左右的碳排放量.

我国煤田地热资源勘查始于 20 世纪 70 年代,原中国科学院地质研究所地热研究室与原煤炭工业部合作,先后对河北开滦、山东兖州东滩、平顶山和龙口煤矿等进行系统研究,构建了煤田地热学的理论系统框架,阐述了矿区地温分布规律及

类型,建立了矿山稳态测温与近似稳态测温方法^[26];余恒昌^[12]把矿山地热与井下热害治理结合,指出地热水和矿井乏风可以作为地热载体直接利用;张吉雄等^[8]研究了深部矿井地热资源发展潜力以及地热与煤炭资源开采的现状,利用煤炭资源采后空间及生产系统,提出了充填埋管采热、采空区储水采热、采动区封闭采热及深部原位钻井采热4种采热方法;田伟等^[27]针对龙固矿井高温高盐度的矿井水,探讨了矿井水余热资源利用方式,并提出了矿井水处理净化方法;李科燃^[28]针对唐家会矿区原有供热系统能力不足的问题,提出了一种矿井水热源利用方法;王志军等^[29]分析了平顶山煤田矿区热储形成机制,估算了地热水资源量,评价了矿井地热水开发潜力;毕世科等^[30]提出了一种利用矿井原有井巷工程进行矿井地热水开采模型,根据矿区多种余热资源赋存情况,提出了矿山地热资源综合利用方案,结果表明唐口矿山地热资源可服务于矿山和周边 $1.4 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的住宅供暖。

目前,我国煤田区地热资源评价尚未系统开展,关闭/废弃矿井的地热资源开发利用整体处于试验阶段^[31],本文以济宁煤田为研究对象,根据煤田勘探、生产资料,评价了矿山地热资源量、可采资源量和开发利用潜力;提出了矿山地热开发利用技术;同时,以典型煤矿为例,根据矿山井下巷道开拓空间、副井、充填孔、巷道井和直排井分布特征,地面排水管道及工业广场建筑物供暖条件,阐述了煤田地热开发技术,为矿山地热能综合利用及推广提供依据。

1 煤田地热地质条件

1.1 地质背景

济宁煤田位于济宁市中部,总面积约 1030 km^2 ,主要分布奥陶纪马家沟群灰岩,石炭—二叠纪泥岩、砂岩,侏罗纪砂岩和第四纪松散岩层,整体为一向斜构造,轴向东北,向西南倾伏,地层倾角平缓,一般在 $3^\circ \sim 10^\circ$ 之间,向斜南北两翼发育煤层、煤系地层及奥陶纪地层露头.受印支与燕山期构造运动影响,区内断裂构造发育,近南北向主要有孙氏店、八里铺、岱庄和济宁断裂,东西向主要有长沟、菏泽和鳧山断裂,如图1所示.煤田东南部大面积分布燕山期岩浆岩,岩性为细粒橄榄辉长岩,成层状侵入在侏罗系上部,平均厚度为 90.86 m .

1.2 大地热流

煤田内大地热流 $60 \sim 70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,总体呈现西高东低的趋势,高于中国 ($60.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) 和全球

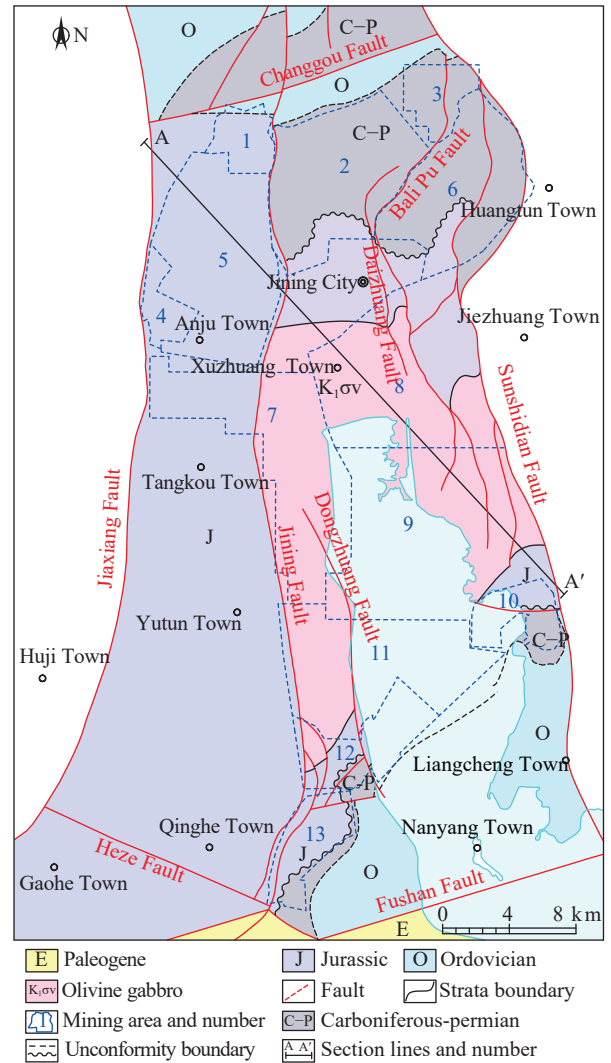


图1 济宁煤田地质图

Fig.1 Geological map of the Jining Coalfield

($64.7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)大陆平均热流,为地热异常区^[32-33],地热资源丰富。

1.3 地温特征

1.3.1 地温梯度特征

济宁煤田地温梯度值在 $0.013 \sim 0.026 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,如图2所示,总体上由东北向西南呈增加趋势,A11-6号钻孔位靠近地下水补给区,地下水循环径流条件较好、盖层厚度较小,地温梯度值低,为 $0.013 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$;X28、C3-5、C11-5和D27-4号钻孔靠近区域性大断裂、盖层厚度较大,远离地下水补给区,地温梯度值大于 $0.024 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

1.3.2 垂向地温变化特征

根据济宁煤田12眼测温孔资料,垂向地温分布特征如下:

(1)多数测温孔地温梯度接近 $0.02 \sim 0.03 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 地温与深度基本呈直线相关,表现为正常大地热流传导为主的地热系统,如图3所示。

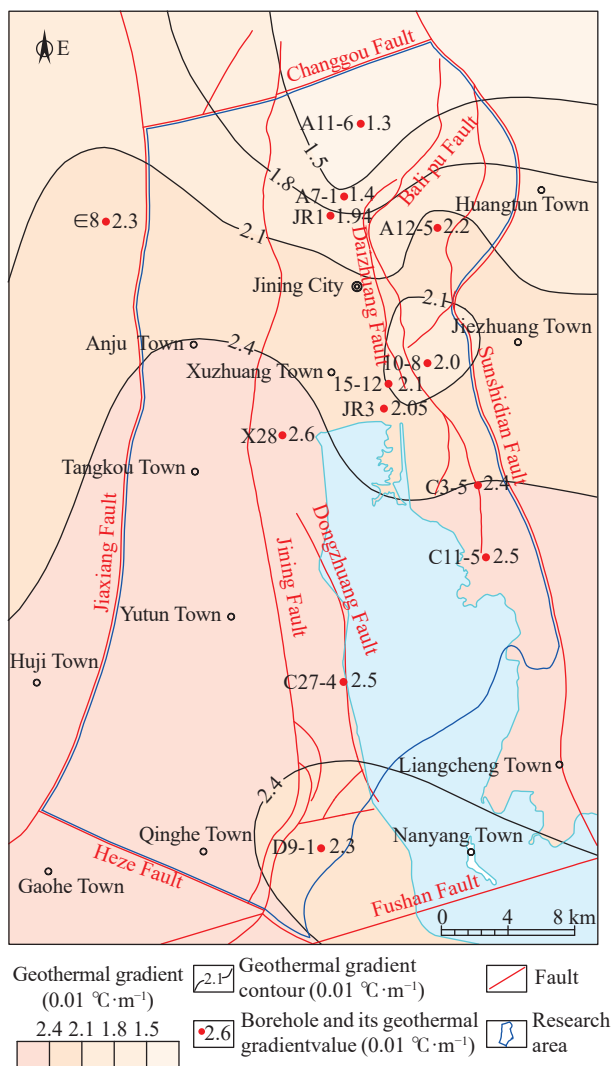


图 2 济宁煤田地温梯度等值线图

Fig.2 Contour map of the geothermal gradient in the Jining coalfield

(2) 靠近地热水补给区的 A11-6、A7-1、A12-5 和 JR1 号钻孔上段测温曲线表现出“下凹”线型, 表明有低温地下水侧向径流通过。

(3) 靠近孙氏店深大断裂的 C3-5 和 10-8 号钻孔测温曲线表现出“下凸”线型, 表明孙氏店断裂切割深度大, 充分沟通深部热源, 深循环地热水沿断裂破碎带上涌, 使测温孔深部增温较大, 呈“下凸”型^[34-36]。

1.4 煤田热储层特征

1.4.1 热储层

根据煤田勘查和生产资料, 济宁煤田石炭—二叠系厚度为 234.69 ~ 602.83 m, 埋深为 229.88 ~ 918.07 m. 可采煤层为 3(3_上)、3_下、6、10_下、15_上、16、17 等, 平均总厚度为 3.1 ~ 12.0 m, 开采深度为 -150 ~ -1300 m. 采空区面积约 90 km², 呈层状分布, 总厚度为 3.10 ~ 11.51 m. 分布 3 煤层顶底板砂岩导水裂隙带和三灰、十灰、十三灰、十四灰等裂

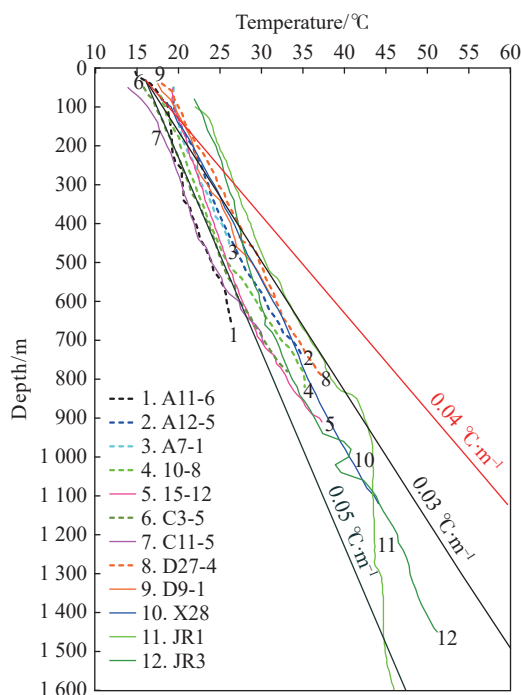


图 3 济宁煤田勘查孔垂向测温曲线图

Fig.3 Vertical temperature measurement curve map of exploration boreholes in the Jining coalfield

隙岩溶含水层段, 水位埋深为 -2.0 ~ 35.05 m, 单井涌水量为 0.02 ~ 443.32 m³·d⁻¹. 以矿山为单元, 将煤矿开采以及排水后腾出来的空间作为“热储层”, 采空区及其导水裂隙带形成了巨大的储水储热空间, 生产大巷沟通了各采区之间的水力联系, 为主要导水通道, 形成了矿山井下“热储层”系统. 各矿山热储层厚度(已采煤层导水裂隙带)计算公式^[37-38]如式(1)所示:

$$H_f = \frac{100M}{3.3n + 3.8} + 5.1 \quad (1)$$

其中: H_f 为导水裂隙带最大高度, m; M 为累计开采煤层厚度, m; n 为煤层层数. 经计算各矿山热储层厚度(导水裂隙带高度)为 26.92 ~ 69.19 m. 目前“热储层”中排水总量约为 4148 m³·h⁻¹, 温度为 26 ~ 42 °C, 煤田中蕴藏地热资源丰富, 如表 1 所示, “热储层”剖图如图 4 所示, 剖面位置如图 1 所示。

1.4.2 盖层

济宁煤田“热储”盖层厚度为 229.88 ~ 918.07 m, 层状连续性好, 主要为第四系、侏罗系和石炭—二叠系石盒子群等, 这些岩石密度较小, 质地较软, 导热性能差, 不利于地热传导上升运移, 是热的不良导体, 共同组成了采煤空间、矿井排水空间和导水裂隙带等“热储层”的保温盖层。

1.4.3 水源

济宁煤田地热水主要源于大气降水入渗形成

表1 济宁煤田各矿山地热资源赋存特征一览表

Table 1 Geothermal resource occurrence characteristics of various mines in the Jining Coalfield

Mine number	Coal-bearing strata characteristics		Minaible coal seam characteristics			Height of water conducting fracture zone/m	Mine drainage volume/(m ³ ·h ⁻¹)	Temperature/°C
	Thickness/m	Buried depth/m	Minaible coal seam	Total thickness/m	Mining depth/m			
1	400.50	626.50	3 (3 _上), 3 _下 , 6, 10 _下 , 15 _上 , 16, 17	11.51	-200—1000	47.89	80.1	26
2	557.57	604.15	3 _上 , 3 _上 , 3 _下 , 6, 15 _上 , 16, 17	7.97	-200—1000	34.73	300.0	26
3	363.74	229.88	3 _上 , 3 _下 , 6, 16 _上 , 17	5.02	-150—800	29.83	54.8	26
4	380.90	567.52	3, 16, 17	8.78	-180—1300	69.19	69.3	26
5	578.09	603.71	3 (3 _上), 3 _下 , 6, 10 _下 , 15 _上 , 16, 17	12.00	-650—1300	49.71	155.5	42
6	602.83	422.20	3 _上 , 3 _下 , 15 _上 , 16 _上 , 17	5.89	-120—1000	34.11	594.7	31
7	325.49	918.07	3 _上 , 3 _下	3.10	-820—1500	34.91	172.3	36
8	498.72	432.03	3 _上 , 3 _下 , 6, 10 _下 , 15 _上 , 16 _上 , 17	10.26	-560—1200	43.24	204.2	32
9	512.34	457.39	3 _上 , 3 _下 , 6, 10 _下 , 12 _下 , 15 _上 , 16 _上 , 17	10.32	-400—1300	39.27	625.0	30.3
10	234.69	294.00	10 _下 , 12 _下 , 15 _上 , 16 _上 , 17	4.43	-150 ~ -400	26.92	200.0	26.3
11	406.56	718.60	3 _上 , 10 _下 , 12 _下 , 16 _上 , 17	5.93	-200 ~ -1200	34.31	705.3	36
12	397.79	659.27	10 _下 , 12 _下 , 16 _上 , 17	9.39	-200 ~ -1200	60.34	767.0	36
13	354.57	426.75	3 _上 , 3 (3 _下), 12 _下 , 16, 17	10.46	-270 ~ -950	56.63	220.0	27

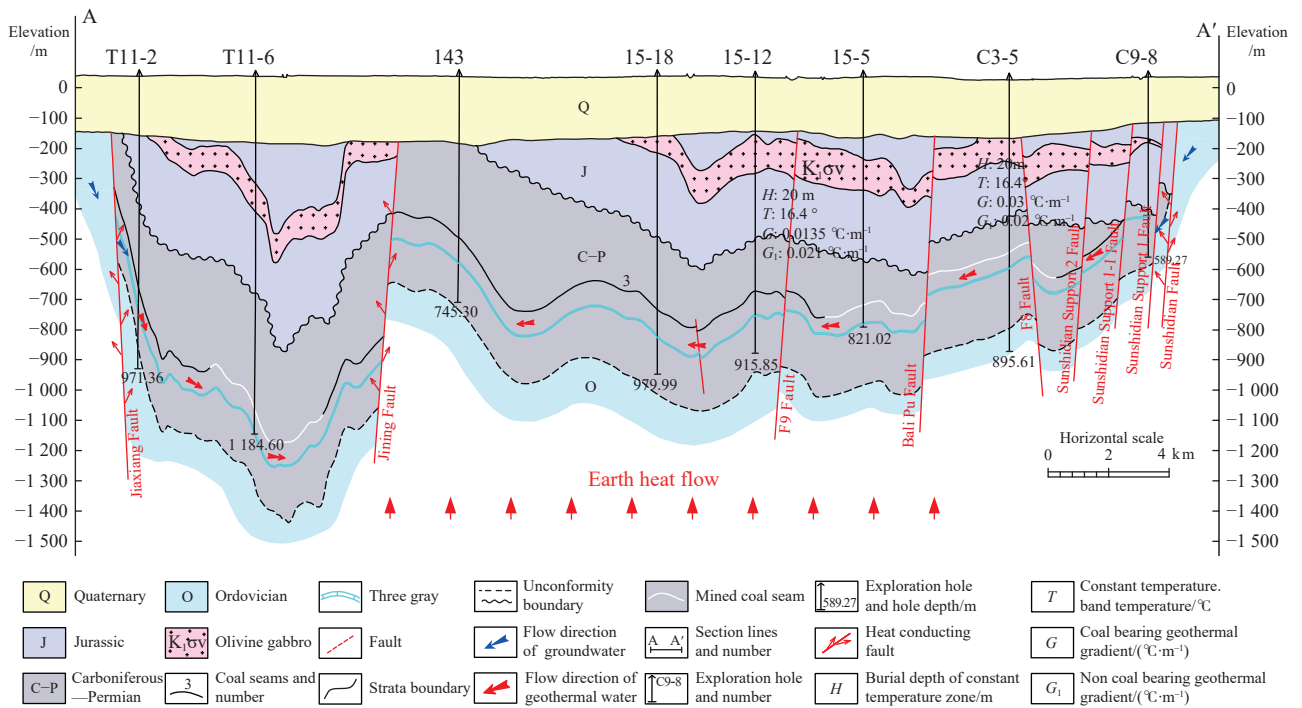


图4 济宁煤田“热储层”剖面图

Fig.4 Profile of the “Thermal Reservoir” in the Jining Coalfield

的浅层地下水,通过煤系地层露头基岩面孔隙、节理、裂隙和断裂等导水通道深循环补给,地下水深循环过程中被周围高温岩体加热至“热储层”,形成地热水.煤田内断裂构造发育,深部奥灰地热水可通过断裂构造上涌,补给“热储层”地热水,如图4所示.

1.4.4 热源

地球内部蕴藏着巨大的热能,无时无刻不在向外释放热量,济宁煤田大地热流值为 60~70 mW·m⁻²,高于中国大陆平均热流值,是地热形成的有利位置,大地热传导聚热是本区的主要热源.孙氏店、济宁、嘉祥和皂山等深大断裂沟通

了上地幔、地壳深部和浅部热流及地热流体的联系,深循环地下水获取深部热流后,沿高渗透性断裂破碎带向浅部运移聚集,导热断裂对流聚热是本区热源之一。另外,在中新生代沉积了巨厚的松散、半固结状沉积物,在不断压实、成岩过程中,会产生一定物理-化学热,也为本区提供了部分热源,研究区热源条件较好。

2 煤田地热资源及潜力评价

采用热储法估算济宁煤田各矿山内储存的地热资源量^[39],计算公式如式(2~4)所示:

$$Q = Q_r + Q_w \quad (2)$$

$$Q_r = Ad\rho_r C_r (1 - \varphi)(t_r - t_0) \quad (3)$$

$$Q_w = (A\varphi d + ASH)C_w \rho_w (t_r - t_0) \quad (4)$$

其中, Q 为热储中储存的热量, J; Q_r 为岩石中储存的热量, J; Q_w 为水中储存的热量, J; A 为计算区面积, m^2 ; d 为热储层厚度, m; ρ_r 、 ρ_w 分别为热储岩石和地热水密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; C_r 、 C_w 分别为热储岩石和地热水的比热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$; φ 为热储岩石的空隙度, 量纲为一; t_r : 热储温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为当地年平均气温, $^{\circ}\text{C}$; S 为弹性释水系数, 量纲为一; H 为计算起始点以上高度, 即水面到热储顶板距离, m。

计算面积 A 、热储温度 t_r 、当地年平均气温 t_0 和水面到热储顶板距离 H 根据各矿山地质、水文地质勘查数据取值; 热储层厚度 d 按前述煤层导水裂隙带高度取值; 孔隙度 φ 依据济宁煤

田主采 3 煤层顶底板砂岩样品物理力学测试报告取值, 弹性释水系数 S 根据煤田采区疏干放水资料估算, 对浅埋的 1、2、3、4、6、10、11、12、13 号矿山孔隙度取值为 0.067, 弹性释水系数取值为 0.0000692, 对深埋的 5、7、8、9 号矿山孔隙度取值为 0.061, 弹性释水系数取值为 0.0000651; 砂岩的比热容 C_r 、密度 ρ_r , 水的比热容 C_w 、密度 ρ_w 依据《地热资源评价方法及估算规程》(DZ/T 0331—2020)^[41] 和研究区热储层实际情况取值。

地热可采资源量 Q_R 采用回收率法进行计算, 公式为 $Q_R = RQ$, R 为回收率。根据《地热资源评价方法及估算规程》^[40], 对于较松散砂岩孔隙型热储, 孔隙率大于 20% 时, 回收率 R 可取 25%; 对于以固结砂岩和花岗岩为代表的火成岩型裂隙热储, 回收率可取 5~10%。含煤地层主要为各类泥岩、砂岩互层, 煤田地热资源开发优先保障煤炭开采, 部分地热资源无法动用, 因此评价中可采系数 R 取值 10%^[1]。

经计算, 济宁煤田各煤矿岩石中储存的总热量为 9.32×10^{14} kJ, 水中储存的总热量为 1.16×10^{14} kJ, 总地热资源量为 1.05×10^{15} kJ, 折合标煤 3.60×10^7 t, 评价结果详见表 2。可采热储量为 1.05×10^{14} kJ, 折合标煤 3.60×10^6 t, 可减少 CO_2 排放量 8.59×10^6 t。本次计算孔隙度采用钻孔岩样物理力学测试结果, 相对煤矿开采后形成导水裂隙带的孔隙度偏小, 煤田地热资源量评价结果偏保守, 煤田内各矿山可采地热资源量为 $1.06 \times 10^{12} \sim 2.26 \times 10^{13}$ kJ, 平均

表 2 济宁煤田各矿山地热资源量计算结果一览表

Table 2 Calculation results of geothermal resources in various mines of the Jining Coalfield

Mine number	A/km^2	d/m	$\rho_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_r/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1})$	φ	$t_r/^{\circ}\text{C}$	$t_0/^{\circ}\text{C}$	S	H/m	$C_w/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1})$	$\rho_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Q_r/kJ	Q_w/kJ	Q/kJ
1	12.4	47.89	2600	878	0.067	26	15.8	0.0000692	591.45	4180	996.78	1.29×10^{13}	1.71×10^{12}	1.46×10^{13}
2	65.62	34.73	2600	878	0.067	26	15.8	0.0000692	569.10	4180	996.78	4.95×10^{13}	6.60×10^{12}	5.61×10^{13}
3	14.69	29.83	2600	878	0.067	26	15.8	0.0000692	206.54	4180	996.78	9.52×10^{12}	1.26×10^{12}	1.08×10^{13}
4	10.05	69.19	2600	878	0.067	26	15.8	0.0000692	560.00	4180	996.78	1.51×10^{13}	2.00×10^{12}	1.71×10^{13}
5	72.22	49.71	2600	878	0.061	42	15.8	0.0000651	596.19	4180	991.44	2.02×10^{14}	2.41×10^{13}	2.26×10^{14}
6	56.59	34.11	2600	878	0.067	31	15.8	0.0000692	415.87	4180	995.34	6.25×10^{13}	8.28×10^{12}	7.08×10^{13}
7	76.79	34.91	2600	878	0.061	36	15.8	0.0000651	905.54	4180	993.69	1.16×10^{14}	1.41×10^{13}	1.30×10^{14}
8	87.11	43.24	2600	878	0.061	32	15.8	0.0000651	428.70	4180	995.03	1.31×10^{14}	1.56×10^{13}	1.46×10^{14}
9	105.05	39.27	2600	878	0.061	30.3	15.8	0.0000651	459.39	4180	995.65	1.28×10^{14}	1.54×10^{13}	1.44×10^{14}
10	15.57	26.92	2600	878	0.067	26.3	15.8	0.0000692	294.27	4180	996.78	9.37×10^{12}	1.24×10^{12}	1.06×10^{13}
11	66.75	34.31	2600	878	0.067	36	15.8	0.0000692	714.27	4180	993.69	9.85×10^{13}	1.32×10^{13}	1.12×10^{14}
12	27.02	60.34	2600	878	0.067	36	15.8	0.0000692	654.94	4180	993.69	7.01×10^{13}	9.27×10^{12}	7.94×10^{13}
13	20.52	56.63	2600	878	0.067	26.8	15.8	0.0000692	426.75	4180	996.78	2.72×10^{13}	3.60×10^{12}	3.08×10^{13}

可采资源量潜力为 $6.82 \times 10^{10} \sim 3.13 \times 10^{11} \text{ kJ} \cdot \text{km}^{-2}$, 目前各矿山地热开发利用程度低, 开发利用潜力较大。

3 煤田地热开发利用及储能技术

济宁煤田矿井主采煤层底板埋深为 150 ~ 1700 m, 井下温度常年恒定, 蕴含着大量低品位能源。生产矿山地热能源一般随着矿井水、矿井回风等排放而散失在环境中, 造成能源浪费; 闭坑矿山地热能深埋于地下采空区和采煤巷道中, 尚未被大规模开发利用。在“双碳”目标的驱动下, 矿山地热作为一种绿色、可再生的资源受到广泛关注。目前生产矿山地热资源开发利用技术应用研究较多, 闭坑矿山地热资源开发利用整体处于试验阶段, 本文将生产矿山热能利用技术总结为矿井回风热能利用和矿井排水余热利用 2 种; 将闭坑矿山地热利用技术分为“取热不取水”和“取热不耗水”2 种。

3.1 矿井回风热能利用技术

针对生产矿井回风恒温(一般乏风温度在 18 ~ 25 ℃)回风量较大、回风口小、风速快等特点, 为了充分利用矿井回风中蕴含的热量, 选用喷淋式热交换器, 提取矿井回风的热量至汇水池, 通过除砂、过滤, 将汇水池中的循环水输送到热泵机组提取水中的热量, 之后循环水再重新送入矿井回风热交换器进行热交换, 循环往复。热泵所提取的热量用于工业广场建筑供暖、井筒保温和洗浴等, 清洁环保无污染, 可有效降低矿山生产耗能, 如图 5 所示。例如在济宁梁宝寺煤矿, 赵志钊等^[41]提出采用 1 台离心式全热回收水源热泵机组, 3 台螺杆空

气源热泵机组和 3 台离心式水源热泵机组提取矿井回风、矿井水中的低品位热能, 转变为供热热能, 为矿区部分厂房、办公、宿舍等面积约 $8.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的建筑供暖, 并提供井筒保温、洗浴等生产、生活必备的热源, 节约了生产成本, 保障了煤矿企业的绿色生产。

3.2 矿井排水余热利用技术

矿井水长期与围岩进行传导和对流换热, 其中蕴含着丰富的低品位热能, 具有很高的开采价值。目前多数矿山在生产过程中, 利用高扬程的卧泵将矿井水提升至地表沉积池, 经水处理后用于矿山生产、生活用水或达标排放, 造成能源浪费。为充分开发利用矿井水地热资源, 本文在已有矿井水水资源利用的基础上提出矿井水余热利用方案: 将沉淀池中的矿井水经过除砂、过滤, 输送至板式换热器提取热量后, 矿井水按原处置工艺流程利用或达标排放。板式换热器提取的热量经热泵机组辅热后, 用于工业广场建筑供暖、洗浴等, 实现节能减排, 促进矿山绿色低碳高质量发展, 如图 6 所示。例如在济宁煤田唐口煤矿, 毕世科等^[31]提出综合开发利用井下地热水和矿井水水热资源, 可满足矿山和周边 $1.4 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的住宅供暖。

3.3 闭坑矿山“取热不取水”地热开发利用技术

矿山闭坑时, 井下分布大面积的采空区和生产巷道, 其内赋存丰富的地热资源。井下水仓、排水管, 主井、副井、充填孔和直排井等采煤设施将不再使用。为充分利用已有采煤设施和开发利用地热资源, 闭坑矿山“取热不取水”地热开发利用

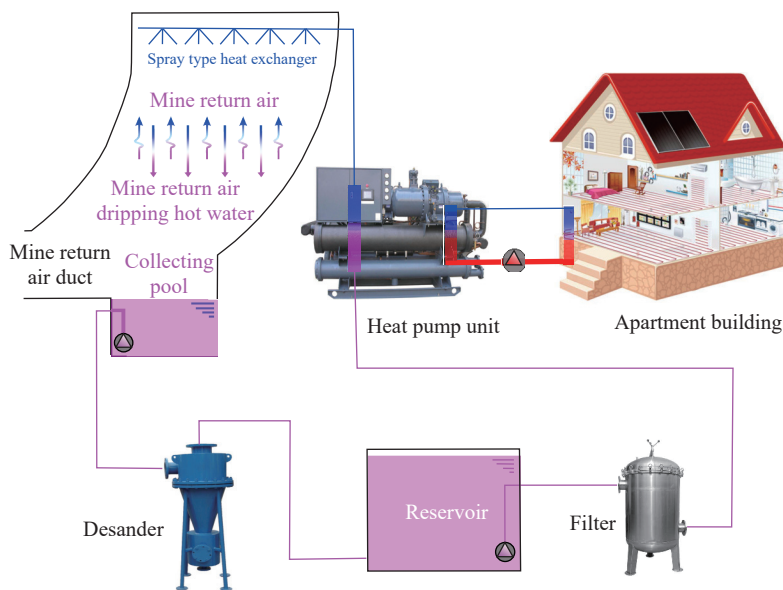


图 5 矿井回风余热利用技术流程图

Fig.5 Technical flowchart for utilizing mine return air heat recovery

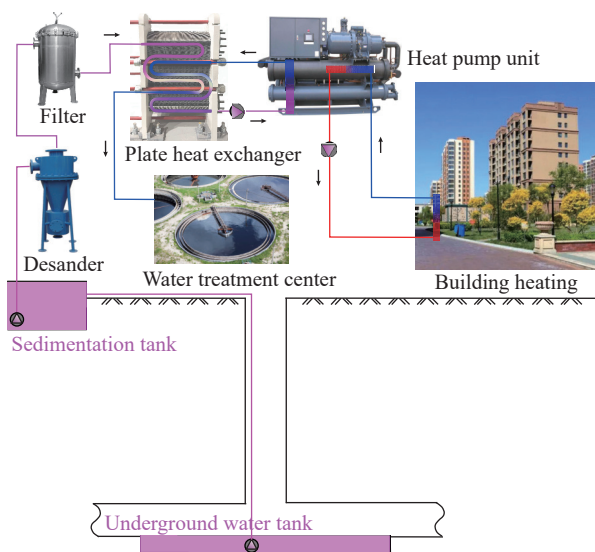


图 6 矿井水余热利用技术流程图

Fig.6 Technical flowchart for utilizing mine water heat recovery

技术方案为: ①改造利用井下巷道、排水管道、充填孔等设施. 调查矿山采煤大巷、工作面、排水管道、充填孔、主井、副井等分布特征, 利用采煤巷道, 改建井下排水管道、使其相互连接, 形成多环路封闭管路; 保留改造主(副)井内的矿山排水管道, 使其成为抽水井, 改造充填孔, 使其成为回灌井, 并连接到井下管路中, 改建成封闭的井下换热系统. ②改建地面供暖设施. 将矿山工业广场建筑物由传统暖气片+空调的供暖制冷方式, 改为节能的风机盘管供暖制冷; 并相应改建供暖管网. ③能源站建设. 根据井下密闭系统换热量和地面建筑物供暖需求, 在矿山已有车间内, 建设安装循环泵、热泵机组、软化水装置等供暖设施, 接入井下换热系统和地面供管网, 并进行运行调试. 井下换热系统与外界只进行换热, 不发生水量交换, 实现闭坑矿山“取热不取水”地热开发利用模式.

供暖时利用循环泵将抽水井中的循环热水输送至热泵机组提取热量, 循环水降温变冷, 经地面管道、回灌井注入井下封闭管道, 汲取采煤工作面和巷道中的热量升温加热, 再经抽水井重复利用. 地源热泵提取的热量用于建筑供暖, 实现闭坑矿山“取热不取水”地热开发利用, 如图 7 所示.

3.4 闭坑矿山“取热不耗水”地热开发利用技术

当矿山闭坑后, 停止排水, 地下热水会快速淹没巷道、采空区、导水裂隙带和各含水层, 矿山中储存大量地热水, 为充分利用这部分地热资源, 闭坑矿山“取热不耗水”地热开发利用技术方案为: ①改造利用井下排水管道、充填孔、巷道井, 保留改造主(副)井内的矿山排水管道、充填孔和巷道

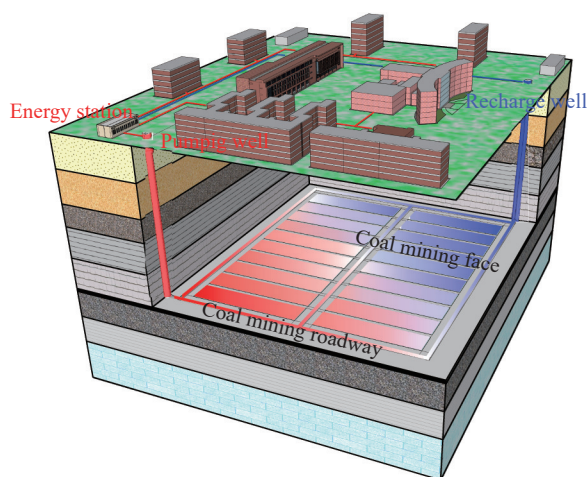


图 7 闭坑矿山“取热不取水”地热开发利用模式图

Fig.7 Schematic diagram of the “heat extraction without water extraction” geothermal development and utilization model for closed mines

井, 并对排水管、充填孔及巷道井底部, 安装滤水管, 将主(副)井内排水管或巷道井改造成为抽水井, 充填孔改造成为回灌井, 如图 8 所示. ②改建地面供暖设施, 将矿山工业广场建筑物由暖气片+空调的供暖制冷方式改为风机盘管供暖制冷, 改建相应的供暖管网. ③能源站建设, 根据改造后抽灌井的采灌量、温度和地面建筑物供暖需求, 建设能源站, 安装板式换热器、热泵机组、循环泵、软化水装置等供暖设施, 接入改造后的抽灌井和地面供暖管网, 并进行运行调试. 抽水井开采的热水经板式换热器取热后, 通过封闭管道、回灌井, 100% 同层回灌至矿山采空区和巷道“热储层”中, 板换热器提取的热量用于工业广场建筑供暖, 实现闭坑矿山“取热不耗水”的地热开发利用新模式, 如图 9 所示.

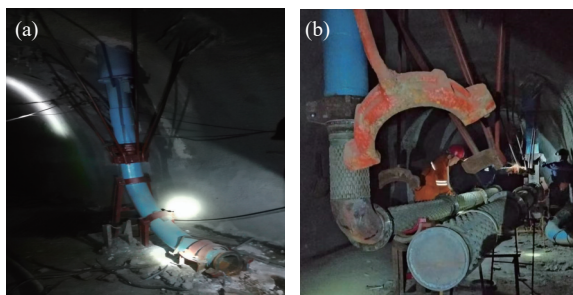


图 8 充填孔改造前后对照图. (a) 改造前; (b) 改造后

Fig.8 Comparison chart before and after filling hole renovation: (a) before modification; (b) after modification

3.5 煤田地热储能技术

目前, 济宁煤田煤矿开采形成地下采空区面积约为 90 km², 各矿山可采煤层总厚度为 3.1 ~ 12 m,

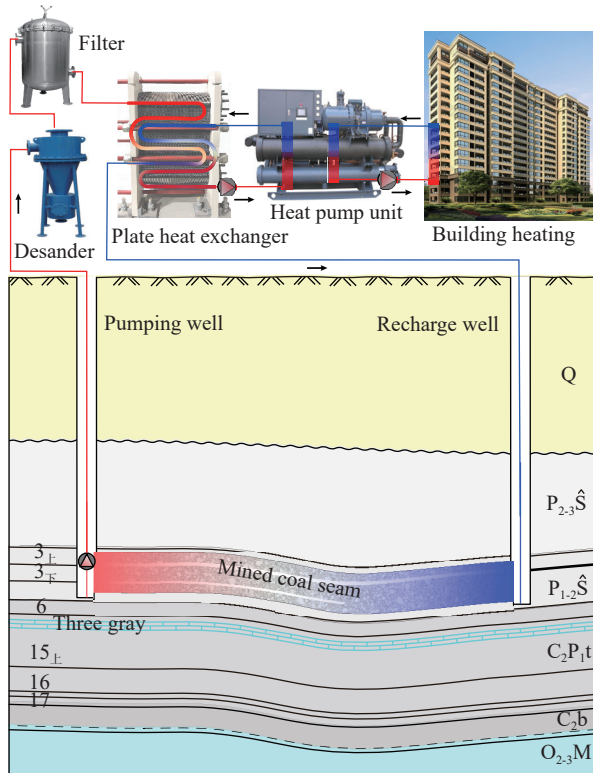


图9 闭坑矿山“取热不耗水”地热开发利用模式图

Fig.9 Schematic diagram of the “heat extraction without water extraction” geothermal development and utilization model for closed mines

平均为 7.8 m, 煤矿开采后将形成大面积的采空区、导水裂隙带和地下巷道系统, 汇水面积较大, 其内将充满地热水资源, 采空区赋存地热水体积约为 $7.02 \times 10^8 \text{ m}^3$, 温度一般为 $26 \sim 31 \text{ }^\circ\text{C}$, 地热水热容量大, 温度适中, 采空区及巷道围岩为石炭—二叠纪砂岩、泥岩, 导热性较差, 适合储能. 利用地源热泵技术, 冬季矿山地热水供暖过程中将室内的冷量通过循环液带入“热储层”进行储存, 以便夏季制冷使用; 夏季制冷的同时将室内热量带入“热储层”储存, 以便冬季供暖使用; 周而复始, 热量在“热储层”中实现跨季节储存和使用. 若冬夏两季“热储层”储能温差按 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 估算, “热储层”每年可利用的地热储能约为 $1.17 \times 10^{13} \text{ kJ}$, 折合标准煤约为 $4.0 \times 10^5 \text{ t}$.

4 案例分析

4.1 技术方案

为科学开发利用矿区地热资源, 本文以济宁煤田内某典型闭坑煤矿为例, 阐明煤田地热开发技术. 该矿山共有地下采空区 11 个, 面积为 15.91 km^2 , 其中 $3_{\text{上}}$ 煤层采空区 7 个, 埋深为 $269 \sim 595 \text{ m}$, 面积为 13.41 km^2 ; $3_{\text{下}}$ 煤层采空区 3 个, 埋深为 $259 \sim$

469 m , 面积为 2.46 km^2 ; 16 煤层采空区 1 个, 埋深为 $479 \sim 514 \text{ m}$, 面积为 0.04 km^2 . 累计动用资源储量为 $5.92 \times 10^7 \text{ t}$, 煤体的密度为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 考虑体积转换系数为 $0.25^{[18]}$, 地下采空区储水量约为 $9.87 \times 10^6 \text{ m}^3$, 温度为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$, 适宜采用地源热泵技术^[42-43], 取热不耗水、同层回灌技术^[44-46], 实现采灌均衡可持续开发利用矿山地热资源. 根据矿山井下巷道开拓空间, 主、副、风井, 充填孔、巷道井和直排井分布特征(图 10), 地面排水管道及工业广场建筑物供暖改造条件(图 11), 地热资源开发利用技术流程为: 通过资料收集获取矿井涌水量、水温、水位埋深等水文地质参数; 对井上、井下进行踏勘, 掌握工业广场需要供暖建筑物的面积和分布情况, 并对巷道井和充填孔井下安装滤水井管, 将其改造成抽水 and 回灌井; 副井内敷设有矿山排水管道, 直排孔是矿山已往排水孔, 连接矿山 -580 m 水平巷道, 在不影响矿山闭坑封井的前提下, 充分利用副井内排水管和直排孔, 将其改成观测孔, 长期监测巷道、采空区水位、温度变化特征; 根据矿井水水样分析测试资料, 评价地热流体质量; 进行地源热泵系统设计和地热供暖示范工程设备选型安装, 包括: 能源站建筑、板式换热器、热泵主机、冷却塔、循环泵、旋流除砂器、定压补水装置, 热源侧供热管网、负荷侧供热管网、建筑末端风机

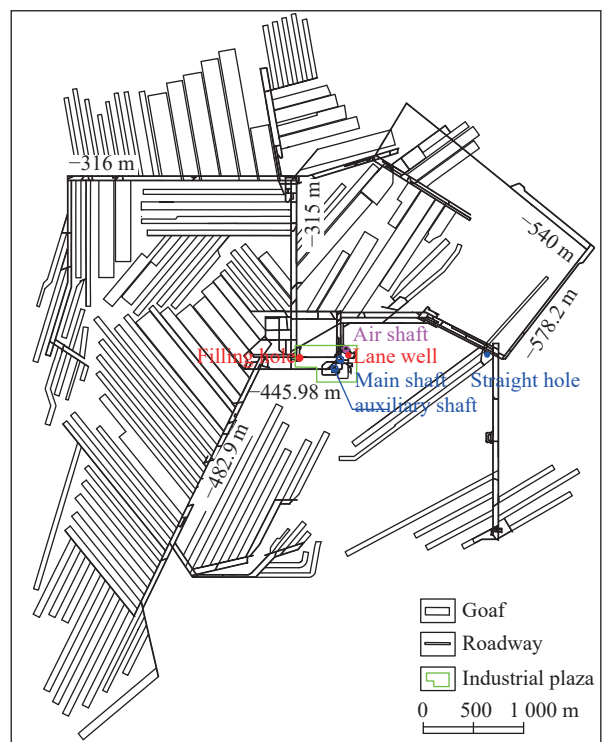


图10 矿山采空区、巷道分布图

Fig.10 Distribution map of goaf and roadways in closed mines

盘管、集控系统选型安装和调试. 冬季地下温度较高, 供暖时由巷道井抽取采区和巷道内储存的 26 °C 地热水, 输送至能源站, 经板式换热器取热和地源热泵辅热后, 对建筑物末端采用风机盘管进行供暖. 被提取温度的地热尾水, 通过管道和充填孔, 100% 回灌至地下采空区, 实现矿山“取热不耗水、尾水同层 100% 回灌”的地热开发利用新模式, 如图 12 所示. 夏季室内温度较高, 制冷时板式换热器和冷却塔吸取由风机盘管、地源热泵循环液携带的室内热量, 巷道井抽取采空区和巷道内地热

水通过板式换热器被加热后, 部分热量通过充填孔回灌至地下采空区进行储存, 待下一个供暖季供暖利用, 部分热量经冷却塔散热到室外空气中.

4.2 示范工程建设

4.2.1 抽灌井改造

该典型矿闭坑时主、副、风井均按设计要求进行了回填封闭, 井下开拓巷道、充填孔、巷道井、直排井和副井内排水管道保留. 巷道井、充填孔位于工业广场, 井间距为 535 m, 均位于矿山-410 m 开拓水平, 井径分别为 $\phi 325$ mm 和 $\phi 219$ mm, 方便

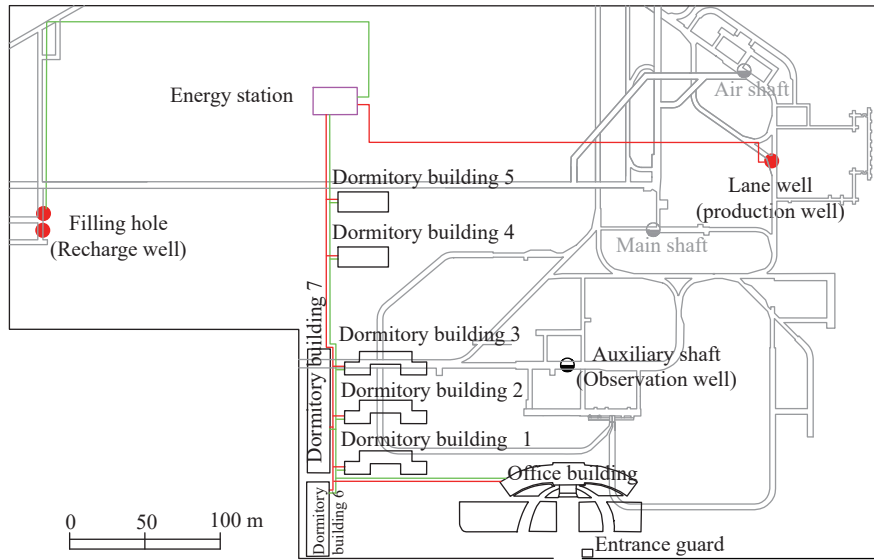


图 11 工业广场地热供暖平面布置图

Fig.11 Layout plan of geothermal heating for the Industrial Plaza

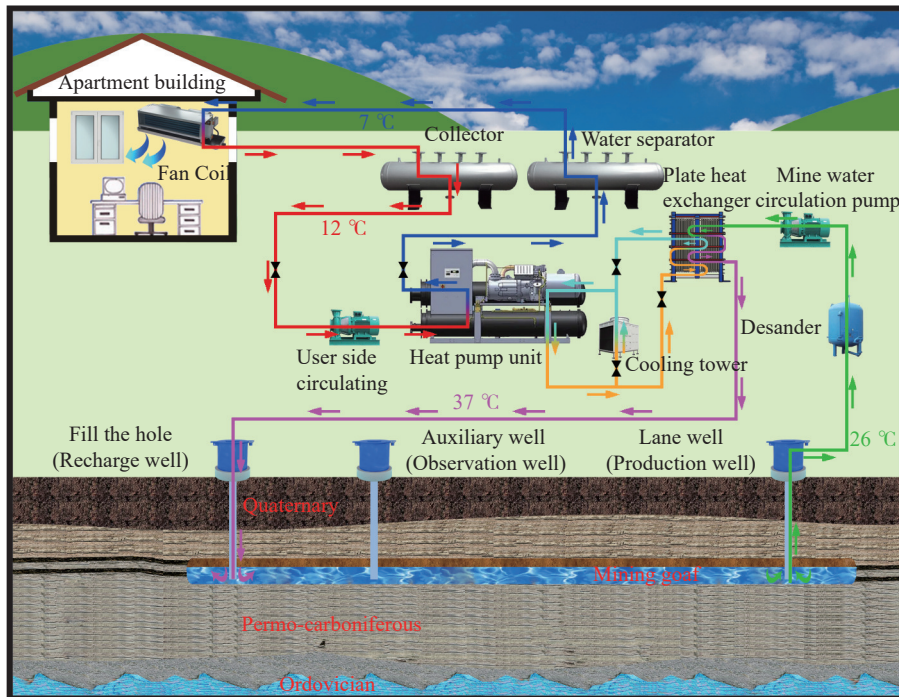


图 12 煤田地热资源开发利用流程图

Fig.12 Flow chart for the development and utilization of coalfield geothermal resources

敷设抽灌管路, 适合改造成为抽、灌井(图 8), 且抽灌井间距适中, 两井之间可保持水力联系, 又避免热突破发生, 矿山闭坑后抽、灌井水位处于上升恢复状态, 目前水位埋深 220 m 左右。直排井位于工业广场西侧 1.38 km, 处于矿山-580 m 开拓水平, 井径为 377 mm, 距工业广场较远, 敷设抽灌管路困难, 将其改造观测井; 矿山闭坑后副井内排水管不能抽水使用, 将其改成观测孔。整个矿山生产其间稳定排水量 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 温度为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4.2.2 供暖(制冷)负荷及设备选型

矿山工业广场 1~7 号宿舍楼、办公室楼等, 总面积约 $5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 需要供暖(制冷)。根据研究区气温、建筑供暖制冷特征和末端形式, 冬季供暖和夏季制冷负荷均取 $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 需要总热、冷负荷均为 3500 kW。因此, 选用两台螺杆式水源热泵, 单台机组制热负荷为 1842 kW, 制热功率为 355 kW, 制冷负荷为 1790.2 kW, 制冷功率为 260 kW, 2 台机组总制热负荷 3684 kW, 总制冷负荷 3580.4 kW, 因矿井水硫酸根含量高, 具有腐蚀性, 为保证热泵机组的正常使用, 需配备换热功率为 3500 kW 的板式换热器进行热交换, 满足建筑供暖(制冷)负荷需求。

4.2.3 热源侧流量

根据所选热泵机组制热、制冷负荷要求, 采用液体吸/放热公式校核热源侧流量:

$$\text{制冷季: } G = 0.86 \times (Q + Q_1) / \Delta t \quad (5)$$

$$\text{供暖季: } G = 0.86 \times (Q - Q_2) / \Delta t \quad (6)$$

其中: G 为热源侧流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; Q 为机组制冷或制热负荷, kW; Q_1 、 Q_2 为机组输入功率, kW; Δt 为利用温差, $^\circ\text{C}$ 。矿井水温为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$, 供暖时机组最低温度在 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, Δt 取 $16 \text{ }^\circ\text{C}$; 制冷时机组最高温度在 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, Δt 取 $11 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冬季供暖时需用水量为 $158 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 矿井水可满足供暖需求。夏季制冷时需用水量 $321 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 矿井水量不能满足需求, 需配备冷却塔联合制冷。一般冷却塔工况为 $32 \text{ }^\circ\text{C} \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$, Δt 为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 为使夏季制冷与冬季供暖使用相同型号潜水泵, 需冷却水量为 $358.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的冷却塔 1 台, 为充分保证夏季室内的制冷效果, 选用的冷却塔的流量为 $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4.2.4 室内末端改造

矿山闭坑前 1~7 号宿舍楼、办公室楼等, 冬季采用燃气锅炉+暖气片供暖, 夏季采用空调制冷, 能耗大运行成本高, 矿山闭坑后燃气锅炉供暖将关停, 逐步改造成矿山热能供暖(制冷), 室内

末端随之也改造成风机盘管, 采用侧送风下回风方式对室内进行供暖(制冷)。

4.2.5 能源站建设

根据前述建筑负荷计算及主要设备选型, 能源站建有两台螺杆式水源热泵, 一台板式换热器、一台冷却塔。同时配备除砂器、软化水箱、定压补水装置、循环泵、热源侧供热管网、负荷侧供热管网、集控系统供暖设备, 对矿山宿舍楼、办公室楼等进行供暖(制冷), 各设备及参数如表 3 所示。

目前已初步建成矿山地热资源供暖(制冷)示范工程, 可供暖(制冷)面积约为 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^2$, 室内供暖温度为 $22 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$, 制冷温度为 $20 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$ 。替代原燃气锅炉+空调供暖制冷, 年可节省成本约 220 万元左右, 节约标准煤 118.04 t, 减排二氧化碳 281.64 t, 节能减排效益突出, 生态改善作用明显, 为闭坑矿山地热资源开发利用及推广应用提供了技术支撑。

5 结论

(1) 本文介绍了济宁煤田地质背景条件、大地热流和地温场特征, 并将煤矿开采形成的采空区作为“热储层”, 阐明了热储层特征及水源、热源条件。初步估算煤田内赋存的地热资源量折合标煤约 $3.60 \times 10^7 \text{ t}$, 可采热储量折合标煤 $3.60 \times 10^6 \text{ t}$, 可减少 CO_2 排放量 $8.59 \times 10^6 \text{ t}$ 。开发利用矿山地热资源为优化能源结构、加快推进社会经济绿色低碳高质量发展和助力“双碳”目标实现提供了支撑。

(2) 采空区及巷道围岩为石炭—二叠纪砂岩、泥岩, 导热性较差, 其内赋存的地热水热容量大, 温度适中, 适合储能。利用地源热泵技术, 实现跨季节储能, 储能温差 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 估算, 济宁煤田“热储层”每年可利用地热储能约为 $1.17 \times 10^{13} \text{ kJ}$, 折合标准煤约 $4.0 \times 10^5 \text{ t}$ 。

(3) 针对生产矿山总结提出了矿井回风热能利用和矿井排水余热利用 2 种技术方案; 针对闭坑矿山提出了“取热不取水”和“取热不耗水”2 种地热利用技术新模式。

(4) 分析了典型煤矿采空区“热储层”特征, 副井、充填孔、巷道井和直排井分布特征, 工业广场建筑物供暖改造条件等, 并采用地源热泵技术利用矿山地热资源对工业广场建筑进行供暖制冷; 采用取热不耗水、同层回灌技术, 实现采灌均衡、可持续开发利用地热资源。建成地热供暖示范工程, 可供暖面积为 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^2$, 每年利用地热资源量节约标准煤 118.04 t, 减排二氧化碳 281.64 t,

表 3 矿井水+地源热泵系统供暖(制冷)主要设备一览表

Table 3 Main equipment for heating (cooling) of mine water and ground source heat pump system

Serial Number	Equipment name	Specifications	Unit	Number
1	Screw type water source heat pump unit	Cooling load of 1790.2 kW, cooling power of 260 kW; Heating load of 1842 kW, heating power of 355 kW		2
2	Air conditioning side circulation pump	Flow of 350 m ³ ·h ⁻¹ , lift of 38 m, power of 55 kW		3
3	Cooling tower	Flow of 400 m ³ ·h ⁻¹	Suite	1
4	Cooling tower side circulating pump	Flow of 400 m ³ ·h ⁻¹ , lift of 24 m, power of 45 kW		2
5	Heat Exchanger	Heat exchange of 3500 kW, material quality 316 stainless steel		2
6	Side circulating pump of plate heat exchanger unit	Flow of 300 m ³ ·h ⁻¹ , lift of 20 m, power of 30 kW		2
7	Make-up water pump	Flow of 11 m ³ ·h ⁻¹ , lift of 44 m, power of 4 kW		2
8	Makeup water tank	Volume of 5 m ³		1
9	Constant pressure water replenishment device	Diameter of 50 mm	Suite	1
10	Cyclone sand remover	Diameter of 300 mm		1
11	Water softening system	Flow of 5 m ³ ·h ⁻¹	Suite	1
12	Submersible pump	Flow of 200 m ³ ·h ⁻¹ , lift of 250 m	Suite	1
13	Energy station building	Renovation of the chemical water workshop		1
14	Heating supply network on the heat source side	Including water intake pipe network, submersible pump, valve, and reinjection filtration device	m	540
15	Load side heating pipeline network	Pipelines, valves, etc., from the computer room to the user building entrance	m	400
16	Centralized control system		Suite	1

节能减排效益突出,为矿山地热能开发利用提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] Wang J Y, Kong Y L, Duan Z F, et al. Geothermal energy exploitation and storage in coal field under the dual carbon goal. *Coal Geol Explor*, 2023, 51(2): 1
(汪集暘, 孔彦龙, 段忠丰, 等. “双碳”目标下煤田区地热资源开发利用与储能技术. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(2): 1)
- [2] Wang S M, Liu L, Zhao Y J, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: A new path for transformation and upgrading of coal mines in the future. *Coal Sci Technol*, 2023, 51(1): 1
(王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发——未来煤矿转型升级新路径. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 1)
- [3] Yuan L. Comprehensive development and utilization of abandoned mine resources, help achieve the goal of “emission peak and carbon neutralization”. *Sci Technol Rev*, 2021, 39(13): 1
(袁亮. 废弃矿井资源综合利用助力实现“碳达峰、碳中和”目标. *科技导报*, 2021, 39(13): 1)
- [4] Guo P Y, Qin F. Preventive measures against heat hazard and its utilization in Zhangshuanglou Coal Mine. *J China Coal Soc*, 2013, 38(Sup 2): 393
(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. *煤炭学报*, 2013, 38(增刊 2): 393)
- [5] Liu Q, Su W, Zhang R Y, et al. Research on coal-geothermal collaborative exploration system in deep mines. *Coal Sci Technol*, 2024, 52(3): 87
(刘琪, 苏伟, 张瑞瑛, 等. 深部矿井煤炭-地热协同开采系统研究. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 87)
- [6] Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources. *J China Coal Soc*, 2017, 42(3): 547
(谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 547)
- [7] Li Q Y, Liu K, Li X B. Sublevel filling method for a heavy orebody in deep mining based on collaborative stoping. *Chin J Eng*, 2016, 38(11): 1515
(李启月, 刘恺, 李夕兵. 基于协同回采的深部厚大矿体分段充填采矿法. *工程科学学报*, 2016, 38(11): 1515)
- [8] Zhang J X, Wang J Y, Zhou N, et al. Collaborative mining system of geothermal energy and coal resources in deep mines. *Chin J Eng*, 2022, 44(10): 1682
(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. *工程科学学报*, 2022, 44(10): 1682)
- [9] Gao H L. Discussion on geothermal field in mining area and its regional characteristics. *Coal Geol Explor*, 1986, 14(3): 37
(高洪烈. 简论矿区地热场及其区域特点. *煤田地质与勘探*, 1986, 14(3): 37)
- [10] Wan Z J, Zhang Y, Cheng J Y, et al. Mine geothermal and heat hazard prevention and control in China. *Dis Adv*, 2013, 6(S5): 85
- [11] Zhang Y, Wang Z J. *Temperature Field of Surrounding Rock in Tunnels and its Experimental Methods*. Xuzhou: China University

- of Mining and Technology Press, 2016
(张源, 万志军. 巷道围岩温度场及其实验方法. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016)
- [12] Yu H C. *Geothermal and Thermal Hazard Management in Mines*. Beijing: Coal Industry Press, 1991
(余恒昌. 矿山地热与热害治理. 北京: 煤炭工业出版社, 1991)
- [13] Chen W, Liang S Q, Liu J. Proposed split-type vapor compression refrigerator for heat hazard control in deep mines. *Appl Therm Eng*, 2016, 105: 425
- [14] Wang J Y, et al. *Geothermics and its Applications*. Beijing: Science Press, 2015
(汪集暘. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社, 2015)
- [15] Deng X. Review and prospect of study in mining geothermics. *Adv Earth Sci*, 1992, 7(3): 20
(邓孝. 矿山地热研究的回顾与展望. 地球科学进展, 1992, 7(3): 20)
- [16] Cai M F, Wu Y Q, Li P, et al. Present situation and ideas of green development of coal resources in Ningxia. *Chin J Eng*, 2022, 44(1): 1
(蔡美峰, 吴允权, 李鹏, 等. 宁夏地区煤炭资源绿色开发现状与思路. *工程科学学报*, 2022, 44(1): 1)
- [17] Cai M F, Ma M H, Pan J L, et al. Co-mining of mineral and geothermal resources: A state-of-the-art review and future perspectives. *Chin J Eng*, 2022, 44(10): 1669
(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. *工程科学学报*, 2022, 44(10): 1669)
- [18] Pu H, Xu J C, Bian Z F, et al. Research status and progress of geothermal energy development and utilization from closed/abandoned coal mines. *J China Coal Soc*, 2022, 47(6): 2243
(浦海, 许军策, 卞正富, 等. 关闭/废弃矿井地热开发利用研究现状与进展. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2243)
- [19] Gao Q. *Optimization Design and Economic Evaluation Analysis of Mine Water Source Heat Pump System* [Dissertation]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012
(高强. 矿井水水源热泵系统优化设计与经济性分析[学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2012)
- [20] Wu J Y. Practice on geothermal energy development and utilization from abandoned coal mine water in Heerlen of Netherlands. *China Coal*, 2020, 46(1): 94
(吴金焱. 荷兰海尔德伦市废弃煤矿矿井水地热开发利用工程实践. *中国煤炭*, 2020, 46(1): 94)
- [21] Hall A, Scott J A, Shang H. Geothermal energy recovery from underground mines. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15: 916
- [22] Banks D, Steven J K, Berry J, et al. A combined pumping test and heat extraction/recirculation trial in an abandoned haematite ore mine shaft, Egremont, Cumbria, UK. *Sustain Water Resour Manag*, 2019, 5(1): 51
- [23] Bailey M T, Gandy C J, Watson I A, et al. Heat recovery potential of mine water treatment systems in Great Britain. *Int J Coal Geol*, 2016, 164: 77
- [24] Farr G, Sadasivam S, Manju, et al. Low enthalpy heat recovery potential from coal mine discharges in the South Wales Coalfield. *Int J Coal Geol*, 2016, 164: 92
- [25] Menéndez J, Loredó J. Low-enthalpy geothermal energy potential of mine water from closed underground coal mines in northern Spain. *E3S Web Conf*, 2019, 103: 02007
- [26] Geothermal Group, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Geothermal characteristics and research methods of coal mines in China. *Coal Geol Explor*, 1976(5): 1
(中国科学院地质研究所地热组. 我国煤矿地温特征及研究方法. *煤田地质与勘探*, 1976(5): 1)
- [27] Tian W, Zheng Y, Shan S L, et al. Desalination technology of well water in high-temperature salt mine and comprehensive utilization of heat energy resources. *Shandong Coal Sci Technol*, 2011(4): 38
(田伟, 郑音, 单绍磊, 等. 高温高盐矿井水除盐工艺及热能资源的综合利用. *山东煤炭科技*, 2011(4): 38)
- [28] Li K R. Mine water waste heat utilization in Tangjiahui Coal Mine. *Coal Eng*, 2020, 52(Sup 1): 24
(李科燃. 唐家会煤矿矿井水余热利用技术研究及应用. *煤炭工程*, 2020, 52(增刊 1): 24)
- [29] Wan Z J, Zhang Y, Shi P, et al. Numerical simulation on unconventional mining of geothermal water in coal-heat co-mining mode. *J China Coal Soc*, 2023, 48(3): 1115
(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. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1115)
- [30] Bi S K, Wan Z J, Zhang H W, et al. Research on development and utilization of geothermal resources in Tangkou Coal Mine. *Coal Sci Technol*, 2018, 46(4): 208
(毕世科, 万志军, 张洪伟, 等. 唐口煤矿地热资源开发及利用研究. *煤炭科学技术*, 2018, 46(4): 208)
- [31] Yuan L, Jiang Y D, Wang K, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China. *J China Coal Soc*, 2018, 43(1): 14
(袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 14)
- [32] Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China(4th edition). *Chin J Geophys*, 2016, 59(8): 2892
(姜光政, 高棚, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版). *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892)
- [33] Tang X Y, Zhong C, Yang S C, et al. Characteristics and influence factors of the present geothermal field forbasins in China's offshore and adjacent areas. *Acta Geol Sin*, 2023, 97(3): 911
(唐晓音, 钟畅, 杨树春, 等. 中国海及邻区盆地现今地温场特征及其影响因素. *地质学报*, 2023, 97(3): 911)
- [34] Wang Z T, Zhang C, Jiang G Z, et al. Present-day geothermal field of Xiongan New Area and its heat source mechanism. *Chin J Geophys*, 2019, 62(11): 4313
(王朱亭, 张超, 姜光政, 等. 雄安新区现今地温场特征及成因机制. *地球物理学报*, 2019, 62(11): 4313)
- [35] Li W W, Rao S, Tang X Y, et al. Borehole temperature logging and temperature field in the Xiongxian geothermal field, Hebei

- Province. *Chin J Geol*, 2014, 49(3): 850
(李卫卫, 饶松, 唐晓音, 等. 河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征. *地质科学*, 2014, 49(3): 850)
- [36] Meng J, Qin P, Shi Q P, et al. Exploration and study on carbonate thermal reservoirs in fault basins: A case from Yutai Sag. *Bull Geol Sci Technol*, 2022, 41(4): 38
(孟甲, 秦鹏, 史启朋, 等. 断陷盆地碳酸盐岩热储勘查及研究: 以鱼台凹陷为例. *地质科技通报*, 2022, 41(4): 38)
- [37] Qiao Q, Niu C, Zhang Y, et al. Prediction of development height of water-conducting fractured zone based on correlation analysis. *Coal Technol*, 2022, 41(10): 151
(乔倩, 牛超, 张艳, 等. 基于相关性分析的导水裂隙带发育高度预测. *煤炭技术*, 2022, 41(10): 151)
- [38] Wei S R, Zhao Y L, Qi C Q, et al. On development law of water conducing fracture zone and overburden failure height in multi-coal seam mining. *J Hunan Univ Sci Technol Nat Sci*, 2022, 37(2): 18
(魏世荣, 赵延林, 戚春前, 等. 多煤层开采导水裂隙带发育与覆岩破坏高度规律. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 37(2): 18)
- [39] Huang X, Zhang H, Wang X W, et al. Characteristics and mechanism analysis of geothermal field in Nanle Sub-uplift, Bohai Bay Basin. *Bull Geol Sci Technol*, 2021, 40(5): 71
(黄旭, 章惠, 汪新伟, 等. 渤海湾盆地南乐地热田特征及其成因分析. *地质科技通报*, 2021, 40(5): 71)
- [40] Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0331—2020 *Specification for Estimation and Evaluation of Geothermal Resources*. Beijing: Geology Press, 2020
(中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0331—2020 地热资源评价方法及估算规程. 北京: 地质出版社, 2020)
- [41] Zhao Z Z, Ma N, Wei W, et al. Primary alysis on water resource heat pump application technology in mine system—Setting liangbaosi coal mine in Jining City as an example. *Shandong Land Resour*, 2013, 29(6): 62
(赵志钊, 马宁, 魏巍, 等. 矿井系统中水源热泵应用技术探析——以山东省济宁梁宝寺煤矿为例. *山东国土资源*, 2013, 29(6): 62)
- [42] Bi Q. *Research on Optimization of Ground Source Heat Pump Parameters in Tianjin Port Ground Source Heat Pump Central Air Conditioning System* [Dissertation]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018
(毕强. 天津港地源热泵中央空调系统地源热泵参数优化的研究[学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2018)
- [43] Lan Z T, Guo J C, Yin H M, et al. Contrastive analysis between ground source heat pump technology and deep geothermal heating. *Coal Geol China*, 2020, 32(8): 44
(兰自亭, 郭精超, 尹红美, 等. 地源热泵技术与深部地热供暖对比分析. *中国煤炭地质*, 2020, 32(8): 44)
- [44] Zhao Z H, Liu G H, Tan X F, et al. Theoretical model of geothermal tail water reinjection based on the equivalent flow channel model. *Hydrogeol Eng Geol*, 2017, 44(3): 158
(赵志宏, 刘桂宏, 谭现锋, 等. 基于等效渗流通道模型的地热尾水回灌理论模型. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 158)
- [45] Shen X L, Li H, Wang W, et al. Q-p curve equation of geothermal well recharge test in the urban area of Mei County, western Guanzhong. *Coal Geol Explor*, 2022, 50(6): 165
(申小龙, 李浩, 王伟, 等. 关中西部眉县城区地热井回灌试验 Q-p 曲线方程探究. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(6): 165)
- [46] Zhao C H, Yang J, Wang S D, et al. Coupling simulation of groundwater dynamics and solute transfer in the process of deep reinjection of mine water. *Coal Geol Explor*, 2021, 49(5): 36
(赵春虎, 杨建, 王世东, 等. 矿井水深层回灌过程量质耦合模拟分析. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(5): 36)