

唐口煤矿地热资源开发及利用研究

毕世科^{1,2}, 万志军^{1,2}, 张洪伟^{1,2}, 王明凯³, 王靖超^{1,2}, 刘志刚¹, 王冲⁴

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 力学与土木工程学院 江苏 徐州 221116; 4. 山东唐口煤业有限公司 山东 济宁 272055)

摘要: 为了对山东唐口煤矿矿井深部地热资源进行利用,根据唐口煤矿矿区地质资料和水文钻孔资料,对矿区奥陶系地热资源形成原因和赋存状况进行调查,提出了一种利用矿井原有井巷工程进行矿井地热水开采的模型,根据矿区多种余热资源的赋存情况,提出了矿山地热资源综合利用方案。研究表明:在上覆厚盖层和区内大断裂的影响下,唐口矿区地热资源主要赋存于矿区南部的奥陶系地层,储层地水平均水温44℃,地热水具有腐蚀性但不易结垢;在矿区南部井下硐室钻凿地热井,设计同层两采一灌钻井,抽采的地热水经管道运输至井上,在地面换热站实现集中换热,可满足3 000 m³/d的热水供应;矿区热储层地热资源总量为5.02×10¹⁷ J,并结合矿区矿井排水、矿井回风、矿区生活用水中的可利用热源,可实现日功率为12.45 MW的热量供应。矿井地热资源的开发利用,可以达到节能减排和保护矿区环境的目的,为我国矿山地热发展和绿色矿山建设提供新思路。

关键词: 热害; 地热水; 低位热能; 综合利用; 绿色矿山

中图分类号: TD82

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)04-0208-07

Research on development and utilization of geothermal resources in Tangkou Coal Mine

BI Shike^{1,2}, WAN Zhijun^{1,2}, ZHANG Hongwei^{1,2}, WANG Mingkai³, WANG Jingchao^{1,2}, LIU Zhigang¹, WANG Chong⁴

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Shandong Tangkou Coal Mining Company, Jining 272055, China)

Abstract: In order to utilize deep geothermal resources of Shandong Tangkou Coal Mine from deep ground, based on the geologic data and hydrological drilling data of Tangkou Coal Mine, a survey was made on account of the genetic reason and occurrence condition of Ordovician geothermal resources in the mine, a geothermal water exploitation model was proposed by using existing roadway and shaft in the coal mine. According to the occurrence conditions of different heat sources, an integrated utilization scheme about mine geothermal resource was presented. Research showed that under the influence of thick strata layers and major deep fault, the geothermal resources of Tangkou coal mine was mainly occurred in the Ordovician strata in the south of the mine, the average temperature of geothermal water was 44 °C and the water was corrosive but not easy to scale. Geothermal wells were drilled in the underground drilling chamber, by using the production model of two production wells and one injections in the same layer, the geothermal water was piped to the ground heat exchange station to conduct centralized heat exchange, which can provide a hot water supply of 3 000 m³ per day. The total amount of geothermal resources in thermal reservoir was 5.02×10¹⁷ J, combined with other available resources, mine drainage, mine waste wind and mine life water, it could provide a heat supply of 12.45 MW. Developing and using the mine geothermal resources can reduce the carbon emissions and protect the mine environment, which provides new ideas for the development of mine geothermal science and the construction of green mines.

Key words: heat damage; geothermal water; low-level heat; integrated utilization; green mine

收稿日期: 2017-11-12; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2018.04.033

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674242)

作者简介: 毕世科(1993—),男,山西晋城人,硕士研究生。通讯作者: 万志军,博士,教授,博士生导师, E-mail: zhjwan@126.com

引用格式: 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[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 208-214.

BI Shike, WAN Zhijun, ZHANG Hongwei et al. Research on development and utilization of geothermal resources in Tangkou Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 208-214.

0 引言

地热资源是一种绿色可再生能源,“十三五”期间,国家计划重点推进地热能开发利用。我国地热资源储量丰富,分布范围广,矿山作为地热研究的重要阵地,同时也是人类向地下探索的重要途径。近年来,浅部煤炭资源的逐渐枯竭,矿井采深超千米已成常态,深部热害愈发严重^[1-2]。同时深部热害作为一种地热资源可进行资源化利用,如通过提取矿井涌水中的热量加热洗浴用水等,这就需要针对性的进行矿山地热资源评价,提出可行的矿山地热利用方案^[3-4]。

矿山地热利用经历了由粗犷到集约,由简单到多样的过程。国外矿山地热利用研究较早,并以矿井的排水和废弃矿井涌水利用为主。上个世纪俄罗斯顿巴斯煤矿将矿井排水和水源热泵技术结合起来,经热泵机组提升后,用于建筑采暖^[5]。荷兰海尔伦市利用靠近城区的废弃矿井作为蓄热系统,提取矿井涌水中的恒温热量建造地热发电站^[6]。加拿大安威廉姆斯矿采用开式循环系统提取封闭矿井积坑水的热能,结合热泵技术为矿区周边小区夏季制冷和冬季供热^[7]。此外,德国、挪威、美国等国家均有利用废弃矿井地热能的成功案例。国内矿山地热资源利用并未引起足够的重视,资源浪费现象较普遍。1977年杨家杖子矿改原来锅炉预热的方法,采用采空区和旧巷道的恒定地温预热冷空气,使入风温度由 -25°C 提高到 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$ ^[8];邱建友等^[9]提出了“矿井乏风热能利用装置”,利用井口扩散塔回流热水,并将回收的热量用于井口防冻,此装置在新汶矿业集团孙村煤矿采用。何满潮等^[10]提出高温热害控制 HEMS 技术,提取矿井涌水冷能,将提取的冷量与工作面高温空气进行换热作用,降低工作面的温度和湿度。张永亮等^[11]利用矿山开采出现的地热能作为沼气池加温热源,设计了地热能沼气池加温试验系统。可以看出国内矿山地热的利用多集中于矿井乏风利用,对于矿井排水和深部地热水的主动利用较少。

矿井中的可用热源有矿井排水、地热水、矿井乏风、洗浴排水、空气压缩机冷却水等^[12]。针对矿井中不同热源的特点,结合常规地热能开发的理论和技术,本文以唐口煤矿深部奥灰纪地热水为主要开发对象,提出井下地热井钻采模型和矿井余热综合利用方案,方案以井下硐室为平台,在井下接力钻

井,不仅大幅节约钻井费用,并可改善矿区环境,为我国矿山地热能利用提供新思路。

1 矿井地质概况及热储层评价

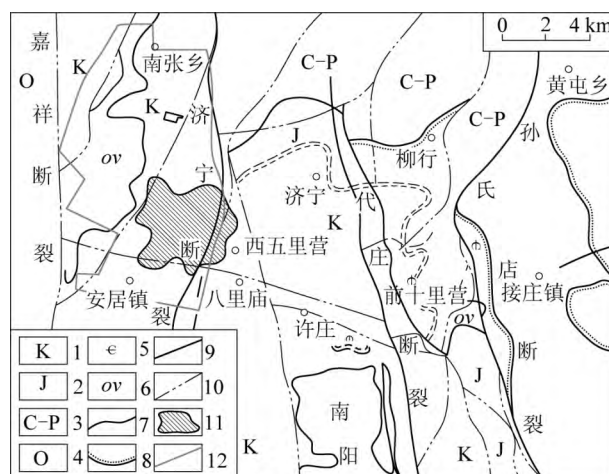
1.1 唐口煤矿概况

唐口煤矿位于济宁市西部,与市区相距 4 km,交通便利,矿井采深 1 000 m,井下热害严重,采煤和掘进工作面夏季温度高达 34°C ,矿井共有 5 个立井,北区工业广场有主井、副井和风井,南区工业广场(在建)有进风井和回风井,矿区员工 3 200 人,建筑面积 25 000 m^2 ,包括办公楼、机修车间、职工宿舍和附属建筑等^[13],矿区冬季供热采用 2 台燃煤锅炉供暖,一个采暖期耗煤 4 200 t。

1.2 矿区热储资源评价

1.2.1 热储层特征

唐口煤矿遥感解译图如图 1 所示,在平面上,在矿区南部存在深埋型低温层状地热田,地面上对应西五里营村以西、刘营、十里铺一带,其中矿井南区工业广场位于地热异常带中^[14]。地热异常带呈不规则椭圆形,面积大于 12.50 km^2 。由矿井地质资料显示,地热异常带处于济宁断裂处,断裂构造密集,深大断裂导通深部热源,为地热水的渗透、存储、地热信息上溢提供良好的构造空间。钻孔测温资料显示 750 m 处平均地温 36.8°C 。



1—白垩系; 2—侏罗系; 3—石炭—二叠系; 4—奥陶系; 5—寒武系;
6—橄榄辉长岩; 7—地质界线; 8—角度不整合界线; 9—已知断裂;
10—遥感解译断裂; 11—地热遥感异常及编号;
12—矿井边界

图 1 唐口煤矿遥感解译图

Fig.1 Remote sensing image of Tangkou Coal Mine

在纵向上,地质结构和地层岩性影响着地温变

化。区内第四系均厚 212.55 m,以黏土、粉砂质黏土、粉砂混粒黏土为主,地温梯度 1.5 °C/hm;侏罗系地层均厚 391.16 m,以砂岩为主,热导率较高,地温梯度 2.15 °C/hm;热储层上部的石炭-二叠系厚度及岩性较稳定,均厚 535.5 m,主要为泥岩、页岩,为含煤地层,地温梯度 2.5~3.0 °C/hm^[15]。

以上 3 组地层形成良好的保温盖层,热盖层厚度 600~1 200 m,总体富水性差,为相对隔水层,且导热性能差,热阻大,是地下热水的良好热储保温盖层。热储层奥陶系石灰岩具有裸露型、覆盖型、埋藏型,形成了不同的补给、迁流、排泄区。地层主要为马家沟群,厚度 500~742 m,主要由石灰岩、夹泥灰岩和钙质泥岩组成^[16]。

从热储概念模型图 2,看出地热资源主要来自上地幔岩浆热源,并受区内嘉祥断裂和孙氏断裂的影响沟通地壳深处的热能,热量传递到奥陶系热储层,在松散盖层和巨厚碎屑岩的阻热保温作用下,将热能存储下来,热储层古剥蚀风化带和裂隙岩溶发育带厚度一般在 200 m 以上,岩溶裂隙发育,连通性较好,为地热水的形成提供了储集、运移空间,是奥陶系热储层的主要含水层位。热储层的富水性极不均匀,一般在构造影响带附近裂隙岩溶较发育,富水性强。

表 1 钻孔参数

Table 1 Parameters of boreholes

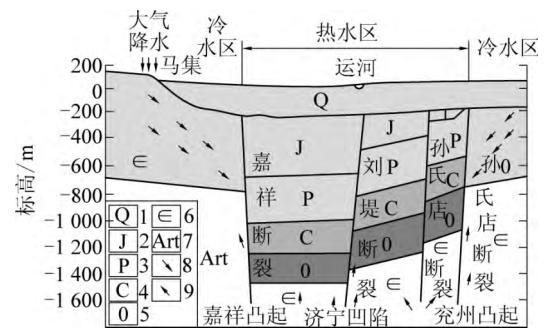
孔号	地点	孔口标高/m	孔深/m	终孔深/m	水温/°C	水量/(m ³ ·h ⁻¹)	水压/MPa	水位/m
O ₂ -1	北区 4305 施工道	-982.0	196.9	1 178.9	42	11.5	9.24	-39.52
O ₂ -2	西部轨道大巷	-973.5	200.7	1 174.2	43	15.0	9.24	-31.02
O ₂ -3	南部轨道大巷	-972.0	186.6	1 158.6	48	52.0	9.54	+1.08

表 2 钻孔水质情况

Table 2 Conditions of water quality

孔号	总硬度/ (mg·L ⁻¹)	pH 值	总碱度/ (mg·L ⁻¹)	阳离子含量/(mg·L ⁻¹)			阴离子含量/(mg·L ⁻¹)		
				Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
O ₂ -1	1400	7.9	139	291	425	2.43	73	1670	170
O ₂ -2	696	10.6	52	263	162	71	89.3	1100	16
O ₂ -3	115	7.3	65.1	70	625	122	464	1 420	79.3

由钻井资料可得,矿区奥陶系热储层平均埋深 1 170 m,在矿井已有巷道下钻进 200 m 即可钻达储层。平面上矿区南部地热水温度较高,验证了遥感观测结果。地热水平均水温 44 °C,为温热水,水温适中,可用于供热取暖、医疗洗浴、水产养



1—第四系;2—侏罗系;3—二叠系;4—石炭系;5—奥陶系;
6—寒武系;7—新太古代泰山岩群;8—补给水;9—深源热水

图 2 热储概念模型

Fig.2 Geothermal reservoir concept model

根据区域水文地质资料分析,储层地热水的主要来源为沉积物形成时保存下来的沉积水,补给源为济宁凹陷区东部、西部和北部的径流补给,地表水和大气降水通过渗流和大断裂向热储层运移,经围岩加热形成地热水^[17]。由于矿区常年的煤层开采,储层上部的越流补给减少,在地热水的开采中应综合考虑。

1.2.2 地热水钻采取样

为了对矿区奥陶系储层地热特征进行探究,在矿井井下巷道中打 3 个水文钻孔,分别对地热水取样分析,具体情况见表 1、表 2。

殖、温室种植等。不同区域储层富水差异性较大,南部矿区在断裂构造的影响下水量和水温都较高。水质特征分析表明,3 个取水点水质差异较大,总体上地热水矿化度大于 2 g/L,地热水呈碱性。腐蚀和结垢是地热开发利用中最普遍存在的

现象之一,根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)中地热流体腐蚀性评价方法,参照工业上用腐蚀系数来衡量地热流体的腐蚀性,并对地热流体中碳酸钙结垢趋势用雷诺兹指数进行评价,评价结果见表 3。

表 3 地热流体腐蚀性和结垢性评价
Table 3 Corrosivity and scaling evaluation
of geothermal fluid

孔号	腐蚀性 系数 K	腐蚀性 评价等级	雷诺兹 指数 RI	结垢性 评价等级
O ₂ -1	-2.700	非腐蚀性水	16.798	不结垢
O ₂ -2	2.709	腐蚀性水	20.015	不结垢
O ₂ -3	3.810	腐蚀性水	13.94	不结垢

注:对碱性水 $K=1.008 [(r(\text{Mg}^{2+})-r(\text{HCO}_3^-))]r$ 为离子含量的每升毫摩尔数;雷诺兹指数 $\text{RI}=2\text{pH}_\text{S}-\text{pH}_\text{A}$, pH_S 为计算出的 pH 值, pH_A 为实测的 pH 值; $\text{pH}_\text{S}=-\lg n[\text{Ca}^{2+}]-\lg n[\text{HCO}_3^-]+K_c$, $n[\text{Ca}^{2+}]$ 和 $n[\text{HCO}_3^-]$ 分别为流体中离子的物质的量浓度, $\mu\text{mol/L}$, K_c 为常数,包括与温度有关的平衡常数和活度系数的复杂常数,常采用图解法来估算,这里 $K_c=1.85^{[18]}$ 。

由水质分析可得,区域内地热水具有腐蚀性但不易结垢,在地热水开采和利用时应针对地热水的腐蚀问题采取相应措施。

2 矿井地热资源化利用模型

2.1 地热井钻采模型

对于奥陶系热储层中的地热资源,笔者提出一种井下钻采地热水模型,根据已有的地质资料,利用矿井原有硐室,在井下施工地热井,通过保温管将地热水送至地面,在地面换热站进行热能转换后将热能供应给用户端,具体实施如下步骤。

1) 地热井选址。参考前期地热勘查资料,地热井应选取在矿区南部井底车场以东和东北部地区。钻井应选择在地层情况探明,地层稳定,服务年限长的巷道或硐室,井孔应规避断层、采空区和正在回采的工作面。综合考虑选择在南轨大巷沿线开凿地热井,为避免水位下降过快并合理控制水位,抽采井间距不小于 500 m。

2) 地热井钻采和回灌。在钻井之前要开挖钻井硐室,在钻井硐室进行钻井施工。模型中钻凿三眼地热井,两眼开采井,一眼回灌井。钻井采用二级结构,裸眼完井法成井。由于钻井区域储层埋层更浅,钻井硐室垂深已达 1 050 m,设计开采井井深 300 m,取水段 100 m,回灌井井深 350 m,同层两采

一灌,终孔井径大于 100 mm。开采模型如图 3 所示,预计井口水温 $\geq 50^\circ\text{C}$,出水量 $\geq 100\text{ t/h}$ 。由于热储为裂隙型灰岩热储,储层压力较大,采用压力回灌的方式进行回灌,回灌量和回灌压力从小到大叠加,直到回灌系统正常运行,回灌系统应注意密封和隔绝空气。

3) 地热井系统动态监测。在钻井硐室安装井口装置和控制监测台,对地热井的水位、水压、水温和水质等同步观测。系统运行后,为避免过采和地表沉降,定期观测地热井的井口标高,降水漏斗范围内的地面和井下测点标高,及时调整抽采和回灌水量。停采期间对地热井水位恢复和储层压力状况进行监测。

4) 地热水运输。钻采的地热水在井下采用保温管道运输,由于地热水井下运输线路较长,运输管道的保温性和抗腐蚀和结垢能力要求较高。钻井自流出的地热水经过井口除砂器初步处理,经管道运输,经过联络巷道、南轨回风巷、南部回风井至地面换热站。

5) 地面换热站综合利用。由于深部地热水腐蚀性较大,在南区工业广场建地面换热站,热水进入地面换热站后,通过换热站内板式换热器和热泵机组将热量转换到供热管网,冷却后的地热水 60% 经处理后经过进风井管路、轨道大巷到井下回灌硐室,由回灌井回灌,30% 地热水可出售用于周边温泉洗浴、医疗保健等,剩余的 10% 由矿区用水消耗。

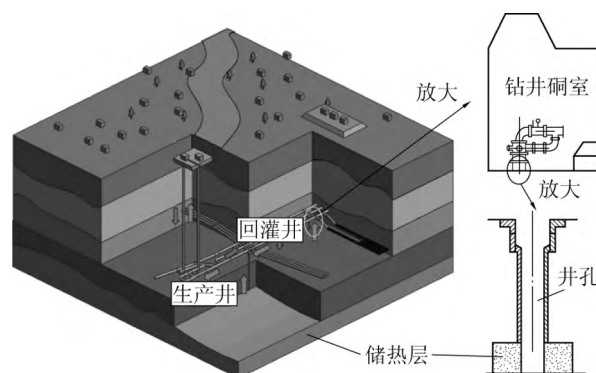


图 3 矿井奥陶系储层地热水钻采模型

Fig.3 Mine Ordovician reservoir geothermal water drilling mode

2.2 地热资源量计算

采用热储法^[19]对热储层的地热资源量进行计算评价,计算区域为矿区南部奥陶系分布区域,热储面积取遥感热异常区域面积 15 km^2 ,热储层埋深取 1 200~1 600 m。奥陶系热储层属于沉积盆地型层状热储层,地热资源量可计算如下:

$$Q_R = \bar{C}Ad(t_r - t_j) \quad (1)$$

式中: Q_R 为地热资源量 kJ ; A 为热储面积 m^2 ; d 为热储厚度 m ; t_r 为热储温度 $^{\circ}\text{C}$; t_j 为基准温度, 当地地下恒温层温度或年平均气温 $^{\circ}\text{C}$; $\bar{C}$ 为热储岩石和水的平均热容量 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

$\bar{C}$ 可由式 (2) 求出, 公式为

$$\bar{C} = \rho_c c_c (1 - \varphi) + \rho_w c_w \varphi \quad (2)$$

式中: ρ_c 、 ρ_w 分别为岩石和水的密度 g/cm^3 ; c_c 、 c_w 分别为岩石和水的比热容 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; φ 为岩石的孔隙度 $\%$ 。

区域内奥陶系热储地热资源总量为 $5.02 \times 10^{17} \text{ J}$ 相当于 $1.72 \times 10^7 \text{ t}$ 标准煤, 资源量可观, 具体见表 4。

表 4 奥陶系热储层地热资源量统计

Table 4 Statistics of geothermal resource in Ordovician reservoir

热储层面积 A/m^2	热储厚度 d/m	岩石密度 $\rho_r/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	岩石比热容 $c_r/$ $(\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	水密度 $\rho_w/$ (kg/m^3)	水的比热容 $c_w/$ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	岩石孔隙 度 $\Phi/\%$	热储温度 $t_r/^{\circ}\text{C}$	基准温度 $t_j/^{\circ}\text{C}$	地热资源量 Q_r/J
15×10^6	400	2 700	920	990.07	4 186.8	0.009	50	16	5.02×10^{17}

2.3 矿井余热综合利用方案

为了对唐口煤矿多种低位热源进行综合利用, 依据矿区各类热源的特点, 提出矿区冬季采暖期矿井地热资源利用方案, 以深部地热水为主, 结合矿井中其他低温热源, 采用热能间接利用和热泵技术实现矿区和附近住宅区域的冬季供暖和水资源利用。

矿井中的可利用热源主要有矿井排水、矿井回风、矿区生活洗浴用水和深部地热水等, 统计结果见表 5, 建设地面水源热泵处理站, 汇总并提取各种热源中的低位热能, 地热综合利用系统如图 4 所示。

表 5 矿井可利用热源统计

Table 5 statistics of mine recoverable heat resources

项目	水(风)量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	特征	日可回收能量/MJ	折合功率/MW
矿井排水	3 000	水温 $(27 \pm 1)^{\circ}\text{C}$	1.26×10^5	1.46
矿井回风 (南风井)	8.64×10^6	风温 $(28 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 相对湿度 $(95 \pm 5\%)$	4.36×10^5	5.05
生活洗浴用水	300	水温 $(35 \pm 1)^{\circ}\text{C}$	2.27×10^4	0.26
深部地热水	3 000	水温 $(55 \pm 1)^{\circ}\text{C}$	4.91×10^5	5.68

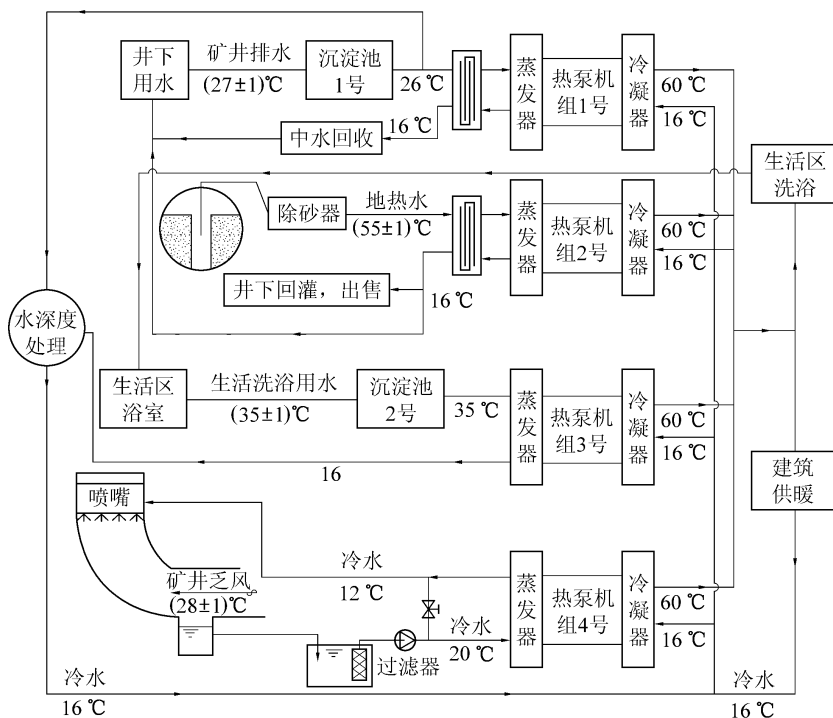


图 4 矿井余热综合利用方案

Fig.4 Integrated utilization of waste heat in coal mine

2.4 模型评价

2.4.1 经济评价

钻凿地热井成本高,风险大,钻井之前需要详实的地质资料作为支撑^[20]。笔者提出一种矿井地热资源利用模型,属于非常规地热开采,矿井的井巷结构、先期地质资料、管道运输系统为地热系统的建立降低很大成本和风险。常规地热井需要在地面凿井,该模型利用矿井已有的井巷工程,钻井费用低,钻井施工周期短,表6是2种方案简要的经济比较。模型在钻井方面节省大量的资金,并可以规避地面施工对周边环境的影响。由于钻探费用经常占到施工总费用中的很大部分,本模型的钻井费用约为新钻地热井费用的1/2。

表6 2种地热水开采方案钻井成本比较

Table 6 Drilling cost comparison of two geothermal water exploration ways

项目	方案	
	矿山地热开采模型	常规地热开采
钻井深度/m	300	1 300
钻井单价/(元·m ⁻¹)	400	1 500
井下管道铺设长度/m	3 000	0
管道单价/(元·m)	300	0
小计	1 020 000	1 950 000

济宁地处暖温带大陆性季风气候区,气候四季分明,年气温低于5℃的天数大于120 d,常用的供暖方式为燃煤,燃气集中供暖。唐口煤矿位于济宁市区西部,矿井冬季需用2台燃煤锅炉来实现矿区供暖和井口防冻。地热利用系统建成之后,可提日供3 000 m³的热水供应,日供热功率12.45 MW,热负荷以60 W/m²估算,中间热损失30%,则可实现14万m²的住宅供暖。采用地热集中供暖,配套管路建成之后,住宅供热每平方米只需地热供暖系统运行成本3元/m²,而当地燃煤供暖运行成本约为12元/m²。

2.4.2 环境影响评价

地热井建设期在井下钻井作业,在巷道中铺设运输管道,地面换热站位于南区工业广场,不会对周边环境造成影响。高温地热水应回收或处理,不可排放至渠道和城市地下水系统。井上埋设管道主要沿周边道路铺设,部分穿越农田,铺设完成后应对原有景观进行修复。

运行时期,取水层位为奥陶系灰岩地层,与当地农业和生活用水主要取水层第四系深层承压水水力

联系较弱,但由于采矿活动影响,济宁市任城区地下水超采矛盾等,应采取回灌措施,并对当地地表进行沉陷观测。项目实施后,年可减少燃煤4 200 t,减少CO₂排放量1.18×10⁴ t/a,对于温室气体减排有良好的环境效益。

2.4.3 社会影响评价

地热能是一种清洁能源,取代传统的冬季燃煤供暖,可以改善矿区和周边村镇的生态环境质量。南区工业广场离市区直线距离仅3 km,模型中设计地热井邻近凤凰台景区、太白楼风景区、京杭大运河和济宁西站。根据《济宁市城市总体规划(2015—2030年)》,该区附近将建设为滨河新区和旅游度假区,发展旅游观光、高档居住、物流客运等功能,疏解旧城区的居住、旅游功能,规划人口20万人,地热资源有广阔的发展利用空间。根据济宁市的地质特征,位于城区南部的济宁二号井和西南部的新河煤矿都存在大规模可利用地热资源,以唐口煤矿地热资源开发模型为例,形成矿井地热利用的“唐口模式”,为我国矿井地热能利用和打造绿色矿山提供新思路。

3 结论与展望

1) 以济宁唐口煤矿矿山地热展开研究,研究了矿山地热的成因,对矿山地热资源总量和品质做出评估,提出以利用井下建筑的地热水开采模型和矿井地热资源综合利用方案,唐口矿山地热资源可服务于矿山和周边14万m²的住宅供暖。

2) 矿井井下地热水开采属于非常规地热开采,不同于地面钻井,井下钻井对钻井工程实施空间限制较大,采动应力和深井地压作用下,地热井井身结构需要特殊的要求,井下地热水回灌也是新挑战。地热水开采会对周围岩体应力分布产生影响,并影响矿井的正常生产。因此关键技术问题是协调煤与地热水的共采工艺、采动影响下的井身结构维护和井下承压地热水的回灌问题。

3) 矿山地热水作为采矿的伴生矿物,开采涉及探采矿产权问题,相关政策和法律应予以支持。矿山地热利用,对于减少碳排放,推动节能减排,建设绿色矿山是一条可行之路,煤矿企业的开采理念发生转变,最终实现煤-水-热的共同开采。

参考文献(References):

- [1] WAN Zhijun, ZHANG Yuan, CHENG Jingyi, et al. Mine geothermal

- and heat hazard prevention and control in China [J]. Disaster Advances 2013 6(S5) : 85-93.
- [2] 张源, 万志军. 巷道围岩温度场及其实验方法 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016: 2-3.
- [3] 黄炳香, 赵兴龙, 张权. 煤与煤系伴生资源共采的理论与技术框架 [J]. 中国矿业大学学报, 2016 45(4) : 653-662.
HUANG Bingxiang, ZHANG Xinglong, ZHANG Quan. Framework of the theory and technology for simultaneous mining of coal and its associated resources. [J] Journal of China University of Mining and Technology 2016 45(4) : 653-662.
- [4] 刘建功. 煤矿低温热源利用技术研究与应 [J]. 煤炭科学技术 2013 41(4) : 124-128.
LIU Jiangong. Study and application of mine low temperature thermal resources utilization technology [J]. Coal Science and Technology 2013 41(4) : 124-128.
- [5] 高 强. 矿井水源热泵系统优化设计与经济性评价分析 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2012: 4-5.
- [6] SCOTT J A, HALL A, SHANG H *et al.* The potential for sustainable energy recovery from a working mine [C] // Proceedings 48th Annual Conference of Metallurgists 2009: 6-23.
- [7] ANDREW Hall, JOHN Scott, HELEN Shang. Geothermal energy recovery from underground mines [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011 15: 916-924.
- [8] 张化远. 地下矿山节能的措施及途径 [J]. 金属矿山, 1981 (11) : 13-15.
ZHANG Huayuan. Energy saving measures and ways of underground mines [J]. Metal Mine, 1981(11) : 13-15.
- [9] 邱建友, 范建国, 莫 技, 等. 矿井乏风热能利用装置: 中国, ZL200820017343.9 [P]. 2009-02-04.
- [10] 何满潮, 徐 敏. HEMS 深井降温系统研发及热害控制对策 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008 27(7) : 1353-1361.
HE Manchao, XU Min. Research and development of HEEMS cooling system and heat-harm control in deep mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (7) : 1353-1361.
- [11] 张永亮, 蔡嗣经, 吴 迪. 矿山地热能沼气池加温系统试验研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012 43(8) : 3270-3273.
ZHANG Yongliang, CAI Sijing, WU Di. Test study on heating system of mining geothermal used in digester [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43 (8) : 3270-3273.
- [12] 魏京胜, 张党育, 岳丰田, 等. 梧桐庄矿热泵系统可用热源分析及利用 [J]. 煤炭科学技术, 2012 40(5) : 120-124.
WEI Jingsheng, ZHANG Dangyu, YUE Fengtian, *et al.* Analysis and utilization on available heat sources of heat pump system in Wutongzhuang Mine [J]. Coal Science and Technology, 2012 40 (5) : 120-124.
- [13] CHENG Weimin, QI Yudong, YU Yanbin *et al.* Integrated utilization of low-grade thermal energy in hot coal mine [J]. Journal of Coal Science and Engineering 2013 19(1) : 26-32.
- [14] 曹洪松, 逯光明, 石 建, 等. 济宁市城区遥感地热异常及其地热田地质特征 [J]. 山东国土资源, 2008, 24 (4) : 29-34.
CAO Hongsong, LU Guangming, SHI Jian, *et al.* Remote-sensing geothermal abnormality and geological characteristics of geothermal fields in districts of jining city [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2008 24(4) : 29-34.
- [15] 李爱军, 张 丰, 王 鹏. 济南部地热资源分析 [J]. 山东国土资源, 2015 31(6) : 30-37.
LI Aijun, ZHANG feng, WANG Peng. Preliminary exploration of geothermal resources in south of Jining City [J]. Land and Resources in Shandong Province 2015 31(6) : 30-37.
- [16] 王 炯. 唐口煤矿深部岩巷恒阻大变形支护机理与应用研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011: 21-22.
- [17] 陈洪年, 李占琪, 董华军, 等. 济宁市城区地热资源分布与开发前景初析 [J]. 地下水, 2008 30(3) : 30-33.
CHEN Hongnian, LI Zhanqi, DONG Huajun *et al.* Geothermal resources distribution and development prospect analyze of Jining Districts [J]. Ground Water 2008 30(3) : 30-33.
- [18] 朱家玲, 姚 涛. 地热水腐蚀结垢趋势的判断和计算 [J]. 工业用水与废水, 2004 35(2) : 23-25.
ZHU Jialing, YAO Tao. Judgement and calculation of trend of corrosion and scaling of geothermal water [J]. Industrial Water and Waste Water 2004 35(2) : 23-25.
- [19] DZ 40—85 地热资源评价方法 [S].
- [20] 朱家玲, 汪健生, 张 伟. 废弃石油井改造为地热井的发展现状 [J]. 地热能, 2013(6) : 3-6.
ZHU Jialing, WANG Jiansheng, ZHANG Wei. Development status of transforming abandoned oil well into geothermal well [J]. Geothermal Energy 2013(6) : 3-6.