



闫璟泓,王方田,张少华,等. 高温采空区地热抽采方法及抽采效果控制因素研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6):85-90.

YAN Jinghong, WANG Fangtian, ZHANG Shaohua, et al. Study on geothermal extraction method and control factors of extraction effect in high temperature goaf[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6):85-90.

扫码阅读下载

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2022.06.015

高温采空区地热抽采方法及抽采效果控制因素研究

闫璟泓¹, 王方田², 张少华³, 张源², 胡剑宁¹, 刁望杰¹

(1. 中国矿业大学 孙越崎学院, 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 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为合理利用矿井采空区地热资源,提出了一种采空区取热系统及采空区抽采回注地热利用的方法。建立了采空区热储的温度—渗流场数值模型,确定了影响抽采效果的控制因素,揭示了抽采过程中采空区温度场变化规律。采用正交试验—方差分析法,分析了各影响因素对抽采效果的影响程度。研究结果表明:采空区温度场冷锋首先由大孔隙率区域发展至抽采井附近,而小孔隙率区域降温较慢;各因素对抽采效果的影响程度顺序为注射流量>注射温度>抽采井长度>抽采压力。

关键词:高温矿井;采空区;矿山地热;抽采效果;数值模拟

中图分类号:TD727

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2022)06-0085-06

Study on geothermal extraction method and control factors of extraction effect in high temperature goaf

YAN Jinghong¹, WANG Fangtian², ZHANG Shaohua³, ZHANG Yuan², HU Jianning¹, DIAO Wangjie¹

(1. School of Sun Yueqi, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

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

3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to rationally utilize the goaf geothermal resources, a goaf heat extraction system and a goaf extraction and injection geothermal utilization method were put forward. The numerical model of temperature-seepage field of goaf was established. The controlling factors affecting the effect of extraction were determined, and the variation law of temperature field in goaf was revealed in the process of extraction. Orthogonal experiment-variance analysis was used to analyze the influence degree of each influencing factor on the extraction effect. The results show that the cold front in the temperature field of the goaf firstly develops from the area with high porosity to the area near the extraction well, while the temperature drops slowly in the area with small porosity. The order of influence degree about each factor on extraction is injection flow rate > injection temperature > pumping well length > pumping pressure.

Keywords: high temperature mine; goaf; mine geothermal heat; extraction effect; numerical simulation

收稿日期:2022-01-12;2022-03-19 修订

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51974297, 52074266);徐州市重点研发计划项目(KC22283)

作者简介:闫璟泓(2001—),男,河南南阳人,本科,主要从事煤系伴生资源开发研究工作。E-mail:2175197031@qq.com。

通信作者:王方田(1985—),男,河南永城人,博士,教授,博士生导师,主要从事煤矿安全高效绿色开采研究工作。E-mail:wangfangtian111@163.com。张少华(1964—),男,江苏南通人,本科,高级实验师,主要从事矿山压力与控制研究工作。E-mail:zsh883311@163.com。

随着我国煤炭资源开采强度的不断加大,浅部资源日益减少,中东部矿区及西部新建矿井埋深超过1 000 m的煤炭资源占比达50%以上^[1]。采深增加,地温也会逐渐升高,我国煤田地温梯度每100 m升高2.5~3.0℃,其中恒温带深度10~50 m,温度为15~17℃^[2]。据此推算,我国大部分矿井垂深1 000 m处围岩温度可达35~45℃,而部分地热资源丰富的矿井,采深仅400~500 m即可达较高的地温。在高地温环境中人的中枢神经容易失调,从而出现精神

恍惚、疲劳、周身无力等身体反应,这种工作状态易诱发安全事故^[3-4]。同时,矿井地热作为一种煤系伴生资源,其赋存广泛且可稳定供能,若将其变废为宝,作为资源合理开发利用,则能大幅度减少生产经营成本。将采空区视为热储,提取矿井地热资源,为周边建筑提供稳定可持续的地热能,具有重要的经济价值和环境效益,有利于实现“碳达峰、碳中和”目标。

目前,在矿井地热资源开发利用方面,David Banks 等^[5]探讨了英国本土矿井水热利用的开闭环系统及其优劣性。何满潮等^[6]设计了 HEMS 深井降温系统,通过矿井涌水和高温工作面换热,在降温的同时提取利用了矿井地热资源;万志军等^[7]通过向开采水平下钻井并注射高压水压裂干热岩,建设井下的 EGS 系统(增强型地热系统)来提取利用矿井地热资源;薛攀源等^[8]在巷道设计埋管充填体,通过管内流体与围岩的换热来提取矿井地热资源;浦海等^[9]提出通过废弃矿井蓄水储热开发矿井地热资源;朱冬冬^[10]介绍了国内矿井煤矿热泵应用的 3 种系统:回风源、水源及空气源热泵系统。近年来,我国对地热资源利用提出了新的要求,其中“十四五”规划要求因地制宜利用地热能,国家能源局要求 2025 年地热能利用量要比 2020 年提高 50%。为顺应国家政策及绿色开采理念,应充分开发利用矿井地热资源。

笔者创新提出一种煤矿采空区抽水回注提取矿井地热资源的方法,该方法包括地上水源热泵机组及地下采空区取热系统。利用改造过的采空区抽采地热资源可充分利用矿井煤系伴生资源。建立采空区渗流场—温度场耦合模型,确定影响抽采效果的有关因素,研究抽采取热过程中采空区温度场变化,设计正交模拟试验研究各因素影响程度,可为深井地热开发提供一种有效技术途径。

1 采空区地热水抽采技术原理

煤层采空后上覆顶板垮落,在采空区内堆积大量碎胀岩体。由于高温矿井采空区空间巨大,地温高,其中的破碎岩体储有大量热能,且采空区围岩能够持续对破碎岩体传热,使采空区成为一种稳定的热储。为提取采空区热能,提出一种采空区抽采回注方法,该方法基于低温注射流体在破碎岩体中的渗流与对流换热特性,通过不断向采空区内注入冷流并抽出热流实现连续取热,如图 1 所示。

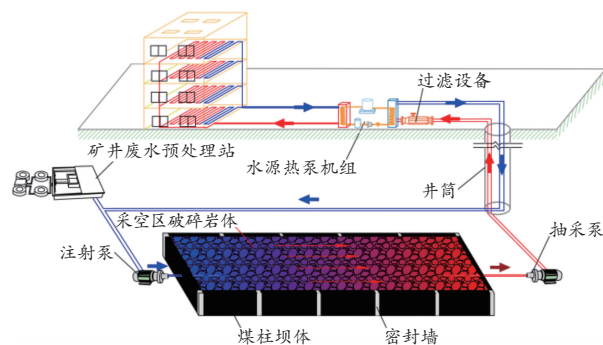


图1 抽水回注方法示意图

1.1 地下采空区取热系统

1) 矿井废水及抽采水处理

将工作面废水或含水层涌水引入矿井废水预处理站中对其进行初步净化。需预先探明矿井水主要污染物,根据污染物成分设置具体处理程序。设置预处理步骤是为了减少矿井废水在输送过程中对设备及管路的腐蚀,从而提高设备服务年限。若预处理后的矿井水腐蚀性仍较强,可在输水管路内部添加防腐涂层来减轻腐蚀。

2) 采空区冷流注射热流抽采

由注射泵将预处理过的矿井水输入采空区中。低温水会和采空区破碎岩体进行热交换,在抽采井处由抽采水泵定压抽采。

因采空区对矿井水有一定的净化作用,由抽采泵采出的热水中腐蚀物质及悬浮物含量少^[11],可在井下采用真空泵抽采地热水,并在地面设置过滤设施,对抽采热水中的砂石等杂质进行过滤。

3) 采空区防渗处理

抽采前需参考煤矿地下水库防渗技术对采空区进行防水防渗处理。煤柱坝体除承受采动应力、水的软化作用及储水压力外,还承受采空区流体运移压力。因此,在地下水库煤柱坝体防渗技术的基础上,需额外考虑流体在采空区内渗流对煤柱坝体的影响。需要建设密封墙来封堵工作面左右两侧巷道,密封墙采用地下水库常用的“T”型结构^[12],采用工字钢和混凝土等材料构建,用锚杆将其与煤柱相连接,并在煤柱与密封墙连接处喷涂混凝土或防渗材料。密封墙主要起承载水压及防渗作用,对采空区储水性能要求较低,主要考虑流体运动对密封墙及人工坝体的影响,可采用相似实验或数值模拟实验方法对采空区渗流进行研究。

1.2 地上水源热泵机组

采出热流经井筒由地面机组设备提升至地上,通过水源热泵技术间接换热(取热不取水)将采出热流的低品位能转为高品位能^[13],为地面供暖。

由于抽采水源与浅层地下水、生活用水的温度和成分差异较大,需要根据抽采热流水温、水质、流量等对热泵机组组件进行改造^[14],以提高热能利用效率。

2 采空区地热水抽采多场演化数值模拟

2.1 模型假设

为了减少计算量,在满足计算精度的前提下,对采空区模型进行简化:

1) 注入采空区内部的流体为单相流(纯水),流体在采空区内流动满足达西定律,注入采空区的流体通过对流换热方式进行热交换。

2) 采空区及其顶底板岩层不会与注入的纯水发生化学反应,从采空区地下水库抽采出的仍是纯水,不包含砂石等杂质。

3) 采空区孔隙率固定,不受流体流动和热膨胀的影响。将外部围岩及煤柱坝体视为渗透率极小的固体。

4) 将采空区与补热围岩的导热视为连续岩体内热交换,不考虑接触热阻。

2.2 采空区抽采系统模型

采空区抽采系统模型底面为 300 m×1 500 m 的长方形。采空区导水裂隙达 70 m,由上到下分为 3 层:断裂带(50 m)、垮落带 I(10 m)、垮落带 II(10 m),如图 2 所示。

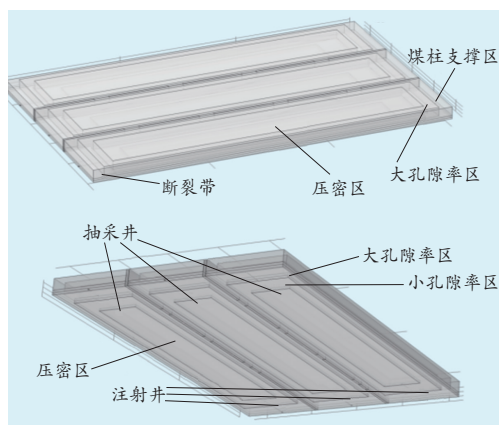


图2 采空区地热水抽采系统物理模型图

由采空区破碎岩体孔隙率分布特征^[15-16],将采空区每层的破碎岩体分为 3 个区域:断裂带包括煤柱支撑区、压密区、大孔隙率区;垮落带包括压密区、大孔隙率区、小孔隙率区。具体孔隙率见表 1。在垮落带 II 布置抽采井及回注井,设置两者井长同为 200 m。为体现出围岩补热效果^[17],采用 3 000 m×2 000 m×200 m 的长方体模拟表示采空区补热围岩。

表1 各区域孔隙率与粒径

类别	区域	孔隙率	粒径/mm
断裂带	压密区	0.08	30
	大孔隙率区	0.40	40
	煤柱支撑区	0.15	30
垮落带 I	压密区	0.10	20
	小孔隙率区	0.30	25
	大孔隙率区	0.40	30
垮落带 II	压密区	0.10	15
	小孔隙率区	0.25	20
	大孔隙率区	0.40	25

2.3 数学模型

采空区地下水库能量守恒方程:

$$\Delta U = Q_w + Q_p - W \quad (1)$$

$$\Delta U = c_m m_m \Delta T_m \quad (2)$$

冷流吸放热公式:

$$Q_w = c_w m_w \Delta T_1 \quad (3)$$

Dupuit 方程:

$$v_w = k \frac{p}{\rho_w g L} \quad (4)$$

围岩补充热量:

$$Q_p = A_2 h \Delta T_2 t \quad (5)$$

由公式(3)、(4)可得冷流抽采热量方程:

$$Q_w = c_w k \frac{p}{g L} A_1 \Delta T_1 t \quad (6)$$

将式(2)、(3)、(6)代入式(1)中可得采空区温差与抽采温差关系:

$$c_m m_m \Delta T_m = c_w k \frac{p}{g L} A_1 \Delta T_1 t + A_2 h \Delta T_2 t \quad (7)$$

式中: ΔU 为采空区损失热量,J; Q_w 为冷流采热量,J; Q_p 为围岩补热量,J; W 为做功量,J; c_m 为采空区破碎岩体的比热容,J/(kg·K); c_w 为冷流比热容,J/(kg·K); m_m 为采空区岩体质量,kg; m_w 为冷流质量,kg; $\Delta T_1 = T_{w1} - T_{w2}$,为注射抽采温差,K; $\Delta T_2 = T_p - T_m$,为围岩与采空区地下水库温差,K; ρ_w 为冷流密度,kg/m³; p 为抽采压力,Pa; A_1 为冷流流经截面面积,m²; A_2 为采空区地下水库与围岩接触面积,m²; v_w 为冷流平均流速,m/s; L 为冷流路径长度,m; h 为围岩与采空区地下水库的表面传热系数,W/(m²·K); k 为采空区地下水库的渗透率,m²; ΔT_m 为采空区温差,K。

由文献[18-19]得水热耦合控制方程:

$$\frac{\partial(\theta \rho_w)}{\partial t} + \nabla(\rho_w v) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(TC_e)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T) + \nabla \cdot (T\rho_w C_w v) + hA_2(T_p - T) \quad (9)$$

$$C_e = (1-\theta)\rho_m C_m + \theta\rho_w C_w \quad (10)$$

$$\lambda_e = (1-\theta)\lambda_m + \theta\lambda_w \quad (11)$$

$$\rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \nabla^2 T_p - hA_2(T_p - T) \quad (12)$$

式中: θ 为孔隙率; v 为流体速度矢量, m/s^2 ; T 为多孔介质温度(采空区岩体及冷流), K ; T_p 为围岩温度, K ; C_m 、 C_p 、 C_e 分别为采空区岩体、围岩及多孔介质比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ_m 、 λ_p 、 λ_e 、 λ_w 分别为采空区地下水、围岩、多孔介质及水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ_m 、 ρ_p 分别为采空区岩体、围岩密度, kg/m^3 ; A_2 为围岩与采空区岩体接触面积, m^2 。

结合式(7)~(12), 可以确定影响抽采温差的相关因素。设采空区尺寸、传热系数、孔隙率等参数为定值, 则抽采压力 p 、初始温度 T_0 、注射温度 T_{w1} 、注射流量 v_0 、抽采井及注射井长度 L_{g1} 、 L_{g2} 同为抽采温度的影响因素。然后, 着重研究抽采压力 p 、注射温度 T_{w1} 、注射流量 v_0 及抽采井长度 L_{g1} 四因素对抽采温度的影响程度。

2.4 边界条件

1) 达西定律边界条件

垮落带 I 处设置抽采井定压抽采, 在相对面设置回注井定流注射, 剩余面作封闭处理。

2) 多孔介质传热边界条件

设置注射井为线热源; 设采空区初始温度为 333.15 K, 梯度为 0.03 K/hm(目前国内最大采深矿井的采空区尚未达到此温度, 但随采深的增大, 采空区可能达到该温度, 作者在此处做合理假设外推)。具体参数见表 2。

表 2 介质参数

类别	区域	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	恒压比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
断裂带	压密区	2.1	650	2 000
	大孔隙率区			1 900
	煤柱支撑区			1 960
垮落带 I	压密区	2.05	700	2 000
	小孔隙率区			1 980
	大孔隙率区			1 920
垮落带 II	压密区	2.15	720	2 050
	大孔隙率区			1 940
	煤柱支撑区			1 920
围岩		1.95	600	1 900
煤柱及上覆岩体		2.0	700	1 950

2.5 网格剖分及无效化验证

网格数目为 15 万~35 万个时模拟结果差异较大, 为 40 万~70 万个时模拟结果变化较小, 温度差异在 0.2 K 以内, 如图 3 所示。采用 45 万个网格数目剖分采空区模型可减少计算量, 同时能保证计算精度。

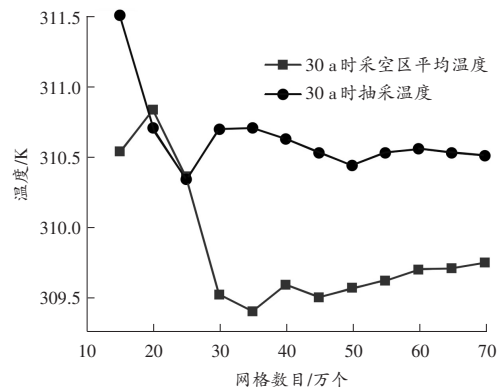


图 3 网格无效化验证图

3 数值模拟结果及分析

3.1 采空区温度场变化规律

参考地热系统的常用参数^[20], 结合煤矿开采实际情况, 对该系统赋予合理的注射流量、注射温度、抽采压力。设置各注射井流量为 0.06 m^3/s , 注射温度为 283 K(矿井浅部含水层涌水温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 左右), 抽采井的抽采压力为 0.3 MPa, 对采空区温度场变化规律进行研究。采空区温度变化情况如图 4 所示。

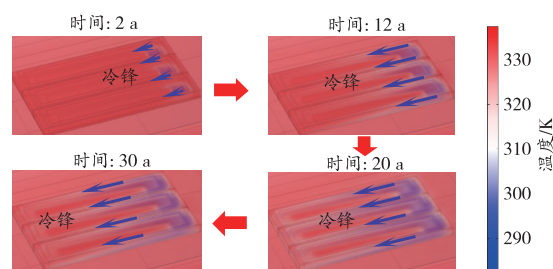


图 4 采空区温度—时间变化图

由图 4 可以看出, 采空区内冷锋的发展趋势, 冷锋首先在注射井附近出现, 随抽采的进行逐渐向抽采井发展, 靠近注射井的破碎岩体温度降低, 且采空区平均温度下降, 抽采寿命降低。

冷锋首先从大孔隙率区域发展至抽采井, 在孔隙率大的区域发展速度较快, 具有较好的导流作用。

3.2 影响因素探究

采用正交试验方法, 探究由 2.3 节分析得出的四因素(抽采压力 p 、注射温度 T_{w1} 、注射流量 v_0 及抽采井长度 L_{g1})对抽采温度的影响程度。

对各因素在合理区间内取值,设计四因素四水平的 16 组实验,见表 3。将注射温度设置为 283~307 K,代表不同情况;浅部含水层涌水温度为 15 ℃ 左右、工作面废水温度为 35 ℃ 左右及两种水相混合得到的水温为 15~35 ℃。抽采压力、抽采井长度及注射流量参数设定,选择参数在合理的范围内浮动,符合工程实际。

表 3 各组实验方案

分组	抽采井长度/ m	注射温度/ K	注射流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	抽采井压力/ Pa
实验 1	110	283	0.02	600
实验 2	110	291	0.04	1 200
实验 3	110	299	0.06	1 800
实验 4	110	307	0.08	2 400
实验 5	140	283	0.04	1 800
实验 6	140	291	0.02	2 400
实验 7	140	299	0.08	600
实验 8	140	307	0.06	1 200
实验 9	170	283	0.06	2 400
实验 10	170	291	0.08	1 800
实验 11	170	299	0.02	1 200
实验 12	170	307	0.04	600
实验 13	200	283	0.08	1 200
实验 14	200	291	0.06	600
实验 15	200	299	0.04	2 400
实验 16	200	307	0.02	1 800

3.2.1 各影响因素指标

根据表 3 各组设置参数进行模拟,得到各组实验的抽采温度在 0~30 a 时间内的变化情况,并根据数据进行绘图,如图 5 所示。

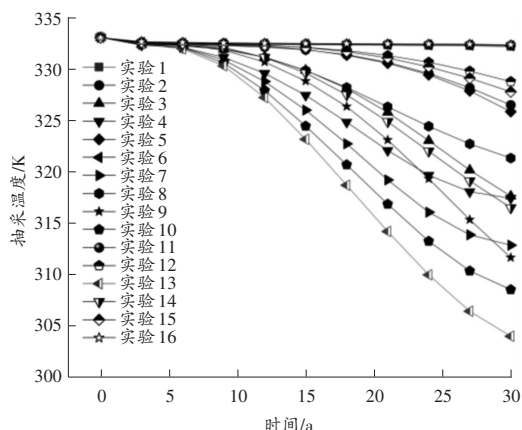


图 5 各实验抽采温度—时间变化曲线

由图 5 可知,各实验在 0~5 a 内均达到 333.4 K 的较高抽采温度,随后呈不同趋势下降。不同实验保持较高温度的时间不同,且呈不同趋势下降。其

中注射流量小的实验抽采温度随抽采时间变化较小,抽采温度较高。

由各组实验 30 a 时的抽采温度终值对影响因素进行方差分析,结果见表 4。

表 4 抽采温度方差分析

因素	离差平方和	各因素平均差方和	F 值	显著性水平
注射温度	91.36	30.45	5.69	影响显著
抽采井长度	36.53	12.17	2.27	有一定影响
注射流量	1 145.29	381.76	71.42	影响非常非常显著
抽采压力	7.62	2.54	0.47	看不出因素对指标的影响

由表 4 可知,各因素对抽采温度的影响程度排序:注射流量对抽采温度影响程度最大,后面依次为注射温度、抽采井长度及抽采压力。

3.2.2 流量对抽采温度的影响

由上述结果分析抽采温度受注射流量影响情况,将不同注射温度的结果分为 4 组,抽采温度—注射流量变化曲线如图 6 所示。

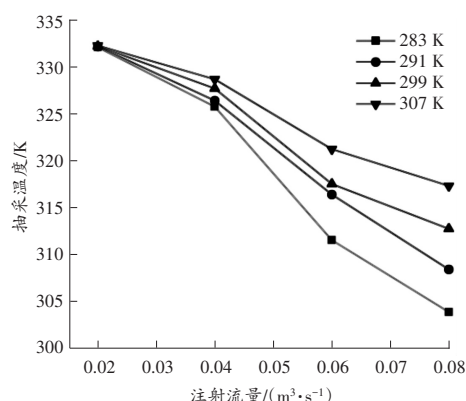


图 6 30 a 时抽采温度—注射流量变化曲线

由图 6 可以看出,不同注射温度下的几组曲线有相同的变化趋势:在 0.02 m^3/s 的注射流量下,所有注射温度下的抽采温度同为 332.5 K,随注射流量的增大,抽采温度减小,减小趋势先增大后减缓。其他 3 个因素对该趋势无明显影响。

注射流量较大,则在采空区热储中吸热的流体较多,且较大流速使冷流未充分换热就由抽采井抽出,使抽热温度降低,总采热量降低。

在较小的流速下适当提高注射流量,可取得较高的抽采温度,若持续提高注射流量,会使抽采温度大幅下降。因此,根据地面热泵机组对热流流量及抽采温度的需求,选择合理的注射流量,以取得较好的取热效果。

3.2.3 注射温度对抽采温度的影响

基于上述 30 a 时的实验结果,分析抽采温度受

注射温度的影响情况,将不同注射流量的结果分为4组,抽采温度—注射温度变化曲线如图7所示。

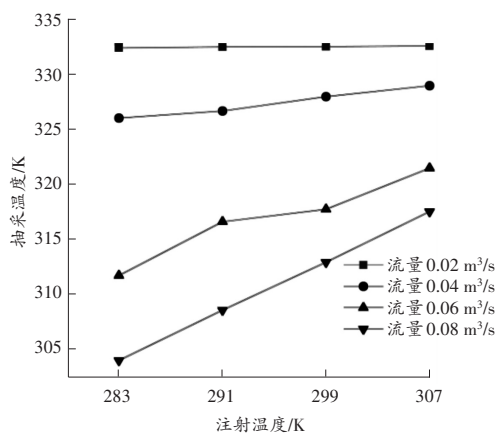


图7 30 a时抽采温度—注射温度变化曲线

由图7可以看出,不同注射流量下的几组曲线有相同的变化趋势,增高注射温度则抽采温度增高,在0.02 m³/s的流量下,抽采温度随注射温度增高较为平稳,在其他抽采流量下,抽采温度增高趋势随流量增大而增高。

在小注射流量下,进入采空区的换热流体少,随着注射温度下降,其抽采温度下降较缓;在大注射流量下冷流循环量大,较低的注射温度(较大温差)使采空区温度下降快,外部围岩不能及时补充热量,抽采温度大幅度下降。抽采井长度及抽采压力的无序变化则对该抽采温度变化趋势无明显影响。

4 结论

1)提出了一种抽采煤矿采空区地热资源的方法,包括矿井水预处理、采空区冷流注入热流采出、采空区防渗、水源热泵等技术方法。

2)研究了采空区温度场变化规律:冷锋首先从大孔隙率区域发展到抽采井附近,而压密区域平均温度变化较小。

3)建立采热数学模型探究影响抽采效果的因素,并设计正交试验,采用方差分析法研究各因素影响程度,从大到小排序:注射流量、注射温度、抽采井长度、抽采压力。其中注射流量起主导作用。

4)降低注射流量可提高抽采温度。选择合理的抽采温度,可满足热泵要求且保持较高抽采效率(采空区曲线斜率),可取得较好的经济效益。

参考文献:

[1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J].煤炭学报,2012,37(4):535-542.
[2] 袁亮.淮南矿区矿井降温研究与实践[J].采矿与安全工

程学报,2007,24(3):298-301.

[3] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
[4] 郭建伟.深热综采工作面制冷降温技术的研究与实施[J].矿业安全与环保,2006,33(1):37-39.
[5] BANKS D,ATHRESH A,AI-HABAIBEH A,et al. Water from abandoned mines as a heat source: Practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom[J]. Sustainable Water Resources Management, 2019,5(1):29-50.
[6] 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.
[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.
[8] 张波,薛攀源,刘浪,等.深部充填矿井的矿床-地热协同开采方法探索[J].煤炭学报,2021,46(9):2824-2837.
[9] 浦海,卞正富,张吉雄,等.一种废弃矿井地热资源再利用系统研究[J].煤炭学报,2021,46(2):677-687.
[10] 朱东东.余热提取技术在煤矿热泵系统设计中的应用[J].煤炭工程,2014,46(5):24-26.
[11] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
[12] 张村,贾胜,吴山西,等.基于矿井地下水库的煤矿采空区地下空间利用模式与关键技术[J].科技导报,2021,39(13):36-46.
[13] 杜建巍.矿井余热回收利用技术方案研究[D].邯郸:河北工程大学,2013:6-7.
[14] 张科利.矿井低品位热能综合利用技术研究及应用[J].煤炭工程,2015,47(7):27-29.
[15] 焦彦锦,朱建芳,耿瑶,等.采空区覆岩“竖三带”孔隙率三维分布研究[J].煤矿安全,2021,52(11):159-165.
[16] 丁文通,史学奇,张国枢.综放工作面采空区“三带”划分的计算机模拟[J].矿业安全与环保,2003(5):12-14.
[17] 张霄,孙玉学,张庆松,等.热补偿条件下双井 EGS 产能和寿命预测方法研究[J].工程科学与技术,2021,53(4):128-139.
[18] KONG Y L,PANG Z H,SHAO H,et al. Optimization of well-double placement in geothermal reservoirs using numerical simulation and economic analysis [J]. Environment Earth Science,2017,76:118.
[19] GUO L L,ZHANG Y B,ZHANG Y L,et al. Experimental investigation of granite properties under different temperatures and pressures and numerical analysis of damage effect in enhanced geothermal system [J]. Renewable Energy,2018,12(6):107-125.
[20] 段云星,杨浩.增强型地热系统采热性能影响因素分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(4):1161-1172.

(责任编辑:陈玉涛)