

文章编号:1673-9469(2012)03-0066-05

矿井废水回灌工程试验研究

李世峰^{1,2},高文婷¹,牛永强¹,王屹³

(1. 河北工程大学 资源学院,河北 邯郸 056038;2. 河北省资源勘查重点实验室,河北 邯郸 056038;
3. 冀中能源峰峰集团梧桐庄矿,河北 邯郸 056000)

摘要:本文首先论述了梧桐庄矿矿井水回灌的必要性和回灌工程的意义,介绍了地下水回灌的技术方法,然后论证该矿回灌所具备的水文地质条件。在此基础上,进行了将矿井水回灌于奥灰含水层的技术研究,确定了连续回灌与定时回扬回灌试验工程方案,以回灌水位降幅削减值和水量降幅削减值作为回灌效果的评价标准,回灌前后水位降幅削减值3.36 m,量水位降幅削减值 $0.224 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。最后从回灌后水文地质条件、回灌处理水质对含水层的影响和回灌工程方案三个方面进行了矿井水回灌的可行性评价。

关键词:矿井水回灌;降幅削减值;回灌评价;矿井水质;梧桐庄矿

中图分类号:TD743

文献标识码:A

The experimental study on recharge engineering of mine wastewater

LI Shi-feng^{1,2}, GAO Wen-ting¹, NIU Yong-qiang¹, Wang Yi³

(1. College of Resource, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Key Laboratory of Resource and Survey of Hebei Province, Hebei Handan 056038, China; 3. Wutongzhuang Coal Mine, Jizhong Energy Co., Ltd FengFeng Group, Hebei Handan 056000, China)

Abstract: The necessity of mine water for recharging and the significance of recharge engineering about Wutongzhuang Coal Mine were discussed at the beginning of this paper, the technology and method of groundwater recharge were introduced, and then, the hydrogeology conditions of recharge in this mine were discussed. On the basis of above all, the technology study of mine water is recharged to the aquifer in Ordovician limestone was carried out, the program of experimental engineering about continuous recharge and timing recharge about redelivery were firmed. The reduction values of decreasing range about recharge water level and quantity are as evaluation standard on the effect of recharge, the reduction value of water level is 3.36 mm and the reduction value of water quantity is $0.224 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$ before and after recharging. The feasibility of mine water recharge was evaluated from the hydrogeology conditions after recharging, the affect of aquifer and water quality through disposing, and the program of recharge engineering at the end of paper.

Key words: the recharge of mine water; reduction value of decreasing range; recharge evaluation; water quality of mine; Wutongzhuang Coal Mine

梧桐庄煤矿是一个现代化大水矿井,矿井水水质具有以含煤粉为主的高悬浮物特征和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量较高的高矿化度特征,含盐量严重超标,灌溉农田会对土壤和农作物产生不利影响。对于高矿化度矿井水,目前国内应用广泛的方法是脱盐法,而该矿矿井水浓度太高,脱盐处理成本

太大,经济上不合理。因此,提出将处理后的矿井废水向煤系地层下覆奥陶系含水层回灌技术方案,该方案在全国同行业中尚属首例。处理后的矿井废水能否顺利回灌到含水层,以及含水层是否会发生堵塞,都要通过对回灌工程进行试验研究来解决。

收稿日期:2012-06-26

基金项目:河北省自然科学基金项目(D2006000625)

特约专稿

作者简介:李世峰(1963-),男,河北邯郸人,教授,从事矿井地质教学与研究工作。

1 矿井水回灌背景条件

1.1 井田地质与含水层水文地质特征

梧桐庄井田位于峰峰矿区的南部,鼓山断裂隆起的南部倾伏端。井田的东西两侧的地层由于断层的切割相对下降而使井田基岩地层抬起,呈一近似的三角形地垒块段,井田内地层总体走向北东,倾向南东,倾角一般 15° 左右。井田地质构造以NNE向为主,NWW向为辅。该矿为一掩盖区,地层由老至新为奥陶系、石炭系、二叠系及新生界。煤系基底为奥陶系灰岩(简称奥灰),厚度约600 m,岩溶裂隙发育,单位涌水量为 $1.258 \sim 6.438 \text{ L/som}$,富水性强^[1]。奥灰含水层的水质类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 或 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水,矿化度为 $5.2 \sim 5.7 \text{ g/L}$,pH值为 $7.5 \sim 7.6$, $r\text{Na}/r\text{Cl}=0.8$,反映出封闭构造内的水交替停滞状态的水化学特征^[2]。含水层厚度大,介质岩性渗透系数高,透水能力强,补给条件好,比较适合于地下水人工补给,具备回灌、存贮高矿化度水的基本地质构造条件^[3]。并且回灌量总是小于矿井排水量。因此,回灌时,该水文地质单元仍是被补给单元,不会补给相邻水文地质单元,即相邻水文地质单元水质不会受到影响。

1.2 矿井废水水质及对含水层的影响

矿井废水是指因开采煤炭资源而抽排的地下水及矿井涌水的总称,水质类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水,矿化度 5.356 g/L ,水温高达 43°C ,与奥灰含水层的水质类型相同,矿化度值接近,且水温一致,说明矿井排水的主要水源来自奥灰水补给。因此,将排出的废水再通过一定的装置回灌到含水层,使得奥灰水质不会发生大的改变。

2 矿井水回灌工程试验

2.1 回灌方法

在矿井水处理厂附近,施工1口回灌井进行回灌工程试验研究,单井孔深1200 m,回灌目的层为奥陶系中统马家沟组灰岩,奥陶系以上地层全部用套管止水封闭,奥陶系用裸孔有利于回灌和节省费用。单井回灌量为 $258.4 \text{ m}^3/\text{h}$,利用地面标高与奥灰含水层水位标高差(100 m),将经过净化的矿井水回灌至奥灰含水层中储存起来。在井田内部及周边利用已有的观测孔进行水位观测。

2.2 连续回灌试验

自2004年10月16日至20日连续五天对矿井处理水进行首次连续回灌试验^[4],回灌水位 -96.5 m (回灌前的静水位为 -102 m),初始回灌量为 258 t/h ,回灌结束时回灌量约 230 t/h ,五天回灌总量约 28000 t 。连续回灌期间,对回灌量、回灌水位、水位变化等基本数据见表1所示,结果见图1。

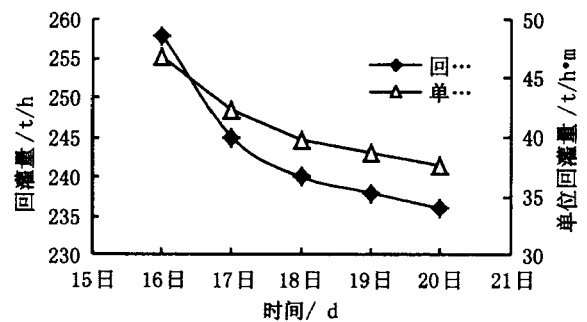


图1 连续回灌量与单位回灌量历时变化曲线

Fig.1 The duration curve of continuous recharge amount and unit recharge amount

表1 连续回灌试验监测数据

Tab.1 The monitoring data of continuous recharge test

时间	回灌量/t·h	回灌水位/m	水位升幅/m	单位回灌量 $q_1/t \cdot (h \cdot m)^{-1}$	回灌效率 $w/\%$
10月16日	258	-96.49	5.51	46.82	62.4
10月17日	245	-96.22	5.78	42.38	56.5
10月18日	240	-95.98	6.02	39.85	53.1
10月19日	238	-95.86	6.14	38.74	51.7
10月20日	236	-95.73	6.27	37.63	50.2

备注: q_0 为抽水条件下的单位流量值($\text{L/h} \cdot \text{m}$),由抽水试验得到 $q_0 = 75 \text{ L/h} \cdot \text{m}$; q_1 为试验单位回灌量($\text{L/h} \cdot \text{m}$),回灌效率 $w = q_0 / q_1$ 。

由表1和图1可以看出,采取连续回灌方式对矿井水进行回灌,随着回灌时间的增长,回灌量会逐渐减小,在10月18日之后趋于平缓,到10月20日回灌量为236 t/h;而单位回灌量由10月16日的46.82 t/h·m减小至10月20日的37.63 t/h·m,同回灌量一样,也是在10月18日之后趋于平缓。回灌水位在矿井水回灌期间基本维持在-96 m左右,正负误差在±0.5 m范围之内,即回灌水位基本为常数。

回灌效率表示了回灌过程中回灌效能,表1数据显示回灌效率由10月16日的62.4%减小至10月20日的50.2%,回灌效率有一定程度的减小,说明回灌过程中所存在的一定程度的堵塞现象,同时也说明回灌目的层介质渗透性比较大,比较适合回灌。

2.3 间断回灌与不定时回扬回灌试验

为了清除堵塞含水层和回灌井的杂质,在进行回灌时必须进行回扬。间断回灌与不定时回扬能够减轻回灌井的堵塞问题,提高回灌效率。为此,自2004年10月25日进行以间断回灌与不定时回扬方式进行矿井水回灌试验。回灌采用间断进行的方式,每回灌4 h,停灌20或30 min,反复进行;回扬则不定时进行,共4次,步骤如下:

第一次是回灌前的洗井,回扬前静水位-102 m,回扬时动水位-117 m。第二次在回灌28 h(包括间歇时间)后回扬,先扬水15 min,接着停15 min,如此进行2回。第三次在继续回灌20 h(包括间歇时间)后回扬,先扬水10 min,接着停10 min,如此进行3回。第四次是在停灌后回扬,此时测得静水位-101 m,回扬的动水位为-118 m。回灌试验监测数据如表2所示。

本次试验回灌进行总时间65 h,除去停灌时间和回扬时间,实灌56 h时,总回灌量约14 600 m³,扬水量792 m³,为回灌量的5.42%。试验结果如图2所示。

由图2可以看出:1)在每段回灌时间内,回灌量都逐渐减小,回灌水位则逐渐上升。而经过20 min或30 min的停灌以后,重新回灌时的回灌量总比前次回灌末期的回灌量略增0.5 m³~1.0 m³,回灌水位则稍下降0.2 m~1.0 m。

2)从各个回灌时段的总趋势来看,在每次回扬之前,回灌量和单位回灌量都是不断减小的,而回灌水位则是不断上升的。如在第二次回扬前的28

h内,单位回灌量从59.23 m³/h·m下降到38.04 m³/h·m;第三次回扬前的20 h内,单位回灌量从49.43 m³/h·m下降到35.51 t/h·m;第四次回扬前的12 h内,单位回灌量从49.33 m³/h·m下降到36.06 m³/h·m。

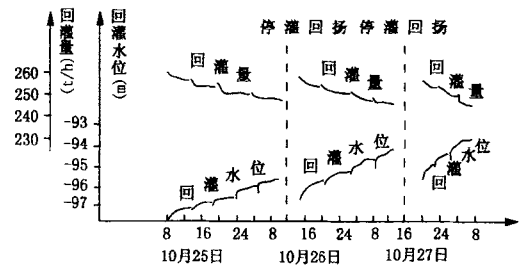


图2 间断回灌和不定时回扬回灌量与回灌水位历时变化曲线图

Fig.2 The duration curve of discontinuous recharge, recharge about redelivery without time and recharge water level

3)不定期回扬能增加回灌量,降低回灌水位,如经过第二次回扬后,单位回灌量从38.04 m³/h·m增加为49.43 m³/h·m;经第三次回扬后,单位回灌量从35.51 m³/h·m增加为49.33 m³/h·m。

4)用此种回灌与回扬方式而引起的回灌前后水位降幅削减值为8 m,由此求得回灌量水位降幅削减值为0.548 × 10⁻³ m/m³,回灌水位降幅削减值为0.143 m/h。

2.4 连续回灌与定时回扬回灌试验

自2004年11月1日进行以连续回灌与定时回扬方式进行矿井水回灌试验,考察连续回灌时间24 h、回扬和连续回灌时间12 h回扬两种方式。

1)连续回灌12 h,回扬一次。每次回扬先扬水5 min,接着停5 min,如此进行三遍。回灌共进行了5次。回灌试验监测数据如表3所示。

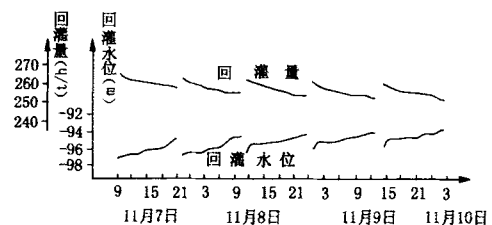


图3 连续回灌及定时回扬回灌量与回灌水位历时变化曲线图

Fig.3 The duration curve of continuous recharge, timing recharge about redelivery and recharge water level

从图3看出,连续回灌的12 h定时回扬方式,回扬频率相对频繁,但回灌量衰减速率和回灌水

位上升速率均较其它两种方式慢,回灌效率相对较高。其原因在于回灌层和回灌井还没有完全堵塞,即被回扬所清除,使单位回灌量得以提高。

本次试验的实际回灌时间 58 h,总回灌量 15 000 m³,回灌前后相比,其回灌量水位降幅削减值为 0.224 m × 10⁻³/m³,回灌水位降深削减值为 0.058 m/h(见表 4)。

2)连续回灌 24 h 左右,回扬一次。每次回扬先扬水 10 min,接着停 10 min,如此进行三遍。试验的实际回灌时间 93 h,总回灌量 23 900 m³,回灌前测得静水位 -101.0 m,动水位 -119.5 m;回灌后测得静水位 -99.2 m,动水位 -119.2 m,回灌前后相比,其回灌量水位降幅削减值为 0.439 × 10⁻³ m/m³,回灌水位降深削减值为 0.113 m/h。

3 回灌工程试验评价

3.1 对水文地质条件的影响

梧桐庄矿矿井水回灌目的层为奥陶系中统马家沟组灰岩,该含水层厚度大,介质岩性渗透系数高,透水能力强,补给条件好,比较适合于地下水

人工补给,具备回灌、存贮高矿化度水的基本地质构造条件,并且回灌量总是小于矿井排水量。因此,在回灌状态下,该水文地质单元对于相邻含水层而言仍是被补给单元,不会补给相邻水文地质单元,即相邻水文地质单元的水质不会受到影响。

3.2 回灌水水质对含水层的影响

矿井水回灌对回灌水水质的要求是既不能污染地下水水源,也不能使回灌井或回灌目的含水层堵塞^[5-6]。

根据回灌水质的要求,结合梧桐庄矿井水水质特点及回灌目的层,本研究提出梧桐庄矿井水进行地下水回灌的水质要求为不高于饮用水对有机指标和浊度的要求,即耗氧量小于 3 mg/L,浊度不大于 5°。

首先对原矿井水进行混凝反应,然后经斜板沉淀,再经石英砂过滤,最后投加二氧化氯消毒,这样既可有效杀灭微生物,杜绝其大量繁殖堵塞回灌井的可能性,又可氧化矿井水中的微量有机物,避免地下水受到污染。即处理后的水质完全满足回灌水水质的要求^[7-8]。

表 2 间断回灌与不定时回扬试验监测数据

Tab. 2 The monitoring data of discontinuous recharge and recharge test about redelivery without time

时间	回灌量/t·h	回灌水位/m	原静水位/m	升幅/m	单位回灌量/t·(h·m) ⁻¹
第二次回扬前的 28 小时(始/末)	206/248	-97.61/-95.48	-102	4.39/6.52	59.23/38.04
第三次回扬前的 28 小时(始/末)	259/247.5	-95.76/-94.03	-101	5.24/6.97	49.43/35.51
第四次回扬前的 28 小时(始/末)	258/247	-95.27/-93.65	-100.5	5.23/6.85	49.33/36.06

表 3 连续回灌与定时回扬试验监测数据

Tab. 3 The monitoring data of continuous recharge and timing recharge test about redelivery

时间	回灌量/t·h	回灌水位/m	原静水位/m	升幅/m	单位回灌量/t·(h·m) ⁻¹
第一次回扬前的 28 小时(始/末)	264/261	-97.33/-95.25	-101.5	4.17/6.25	63.31/41.76
第二次回扬前的 28 小时(始/末)	263/261	-96.89/-95.18	-101.2	4.31/6.02	61.02/43.35
第三次回扬前的 28 小时(始/末)	262/259	-96.35/-95.00	-100.6	4.25/5.60	61.65/46.25
第四次回扬前的 28 小时(始/末)	261/259	-95.45/-94.05	-99.80	4.35/5.75	60.00/45.04
第五次回扬前的 28 小时(始/末)	260/258	-94.69/-93.32	-99.20	4.51/5.88	57.65/43.88

表 4 水位降幅削减值计算表

Tab. 4 The calculation table of reduction value of decreasing range about water level

实际回灌 时数/h	总回灌量 /m ³	回灌前地下水位/m			回灌末地下水位/m			回灌前后 水位降幅 削减值/m	时水位降 幅削减值 /m·h ⁻¹	量水位降 幅削减值 10 ⁻³ /m·m ⁻³
		静水位	动水位	水位 降深	静水位	动水位	水位 降深			
58	15 000	-101.5	-108.3	6.8	-99.0	-109.6	10.16	3.36	0.058	0.224

3.3 回灌工程方案评价

矿井水回灌包括回灌量的确定和回灌方式的选择,因此,矿井水回灌工程方案应该对两个方面进行可行性评价。

1)回灌量可行性评价:2003年以来,梧桐庄矿矿井涌水量逐年下降,目前稳定值为 $400\text{ m}^3/\text{h} \sim 450\text{ m}^3/\text{h}$ 。从模型预测结果看^[9],以 $450\text{ m}^3/\text{h}$ 的速度回灌8~10年,奥灰水的流场不会产生显著变化。若矿井排水67%来自奥灰水,边界水位上升幅度 $0.3\text{ m} \sim 1.2\text{ m}$ 之间;若矿井排水80%来自奥灰水,边界水位上升 $0.2\text{ m} \sim 0.75\text{ m}$,完全不会改变井田奥灰水与井田周边奥陶系地下水的补给关系,井田水动力条件也不会产生明显的变化。

回灌状态下,其它含水层仍在补给井田区,但补给量已减少,说明回灌能有效的节省地下水资源。回灌后,井田外围区的地下水水质也并没有受到很大的影响。从矿区水文地质条件和地质构造分析回灌是可行的。

2)回灌方式评价:梧桐庄矿井水回灌试验研究成果表明,在回灌期间进行回扬可以减轻含水层和回灌井的堵塞,使回灌量和回灌水位得到较好的恢复,确保回灌井正常回灌;以回灌量水位降幅削减值作为回灌效果的评价标准,则最好采用每回灌12h回扬一次的方式。矿井水回灌奥灰含水层试验比较成功,证明矿井水回灌工程方案可行。

4 结语

地下水人工补给成功的必要前提是所补给的含水层要具有足够的厚度和透水性,并且回灌水

的水质要符合要求。通过对梧桐庄矿井田地质构造、水文地质条件、处理水水质和回灌工程方案等方面研究,该矿矿井水经处理后回灌于奥陶系中统马家沟组灰岩含水层,回灌工艺方案正确,技术路线切实可行,效果良好,目前正在建立二期回灌工程。该项目的实施无疑为矿井废水处理找到了一条较好的出路,同时也为含水层保护方案、防止水源枯竭及地面沉降奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李世峰,金瞰昆,赵英凯,等. 聚类判别矿井突水及应用[J]. 矿业安全与环保, 2008(2): 30-32.
- [2] 李福勤,李建红,何绪文. 煤矿矿井水井下处理就地复用工艺及关键技术[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2010, 27(2): 46-49.
- [3] 齐俊启. 高矿化度矿井排水治理新途径[J]. 河北煤炭, 2010(4): 18-19.
- [4] 王屹. 冀中能源峰峰集团梧桐庄矿地下水控制、处理、利用、回灌、生态环保五位一体优化综合技术研究[R]. 项目课题组, 2008, 12.
- [5] 杜新强,冶雪艳,路莹,等. 地下水人工回灌堵塞问题研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 9(24): 973-980.
- [6] 薄宗宗,田玉新. 地下水人工回灌方法及堵塞问题分析[J]. 中国科技博览, 2010(24): 25-26.
- [7] 高亮. 我国煤矿矿井水处理技术现状及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2007(9): 1-5.
- [8] 李志明. 高矿化度矿井水回灌技术分析[J]. 中国煤炭, 2010(11): 111-113.
- [9] 梁盛军,李世峰,李耀华,等. 矿井水回灌后的水位势数值模拟及预测[J]. 矿业工程, 2010, 19(12): 210-214.

(责任编辑 徐博会)

(上接第61页)

参考文献:

- [1] 李思田. 含能源盆地沉积体系[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1996.
- [2] 刘昊年,邓丽丽,龚业超等. 川西坳陷须家河组砂岩中碳酸盐胶结物及形成机制[J]. 天然气技术, 2008, 2(5): 24-28.
- [3] 谢继容,李国辉,唐大海. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 23-28.

- [4] 闫小雄,周立发. 前陆盆地层序地层学研究现状及进展[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(3): 60-64.
- [5] 郑建屏,秦镜蓉,冯建川. 四川盆地晚三叠世煤炭资源地球物理远景调查[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- [6] 郑荣才,朱如凯,翟文亮,等. 川西类前陆盆地晚三叠世须家河期构造演化及层序充填样式[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 246-253.
- [7] 中国煤田地质总局. 中国含煤盆地演化与聚煤规律[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1997.

(责任编辑 刘存英)