

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.03.008

西安与咸阳孔隙型热储尾水回灌堵塞机理对比

郑磊,马致远,郑会菊,何丹,李妍

(长安大学环境科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:在分析西安与咸阳两市地质条件、热储环境特征和水化学类型的差异的基础上,采用水文地球化学理论模拟、室内堵塞模拟试验及现场回灌试验多种方法耦合的方法,对西安、咸阳孔隙型热储尾水回灌堵塞机理进行对比研究。动态岩心驱替试验结果表明,在同一温度下,西安回灌模拟试验各个堵塞率均大于咸阳回灌一号井堵塞率。两地化学、微生物堵塞对比显示,西安回灌井水体含铁量高,在回灌过程中产生大量铁细菌及铁类矿物黏泥,而咸阳回灌井水体铁类矿物影响微乎其微。研究表明,在开放环境下,地下水中 Fe^{2+} 与空气中的 O 发生氧化反应生成 Fe_2O_3 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等矿物沉淀,这些胶状沉淀物进入地层后造成了堵塞。试验表明,西安三桥回灌井回灌地层适宜性不及咸阳回灌一号井;且西安三桥回灌井开放式回灌方式加重了化学、微生物堵塞。

关键词:孔隙型热储流体;回灌;堵塞机理;地热资源;西安市;咸阳市

中图分类号:P512.2+2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)03-0040-06

Comparison of clogging mechanism of pore-type heat storage tail water recharge in Xi'an and Xianyang

ZHENG Lei, MA Zhiyuan, ZHENG Huiju, HE Dan, LI Yan

(College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the analysis of the differences of the geological conditions, the environmental characteristics of heat storage and hydrochemical type between Xi'an City and Xianyang City, the author of this paper made a comparative study on the clogging mechanism of pore-type heat storage tail water recharge in Xi'an and Xianyang by coupling methods such as the hydrogeochemical theoretical simulation (PHREEQC), indoor simulation experiment of blockage and field recharge test. The results of dynamic core displacement test show that the blockage rates in the Xi'an recharge simulation experiment were larger than that of Xianyang No. 1 Well under the same temperature. The comparison of chemical plugging and microorganism blockage in the two areas shows that there is a larger amount of iron in the water of Xi'an recharge well, and a lot of iron bacteria and iron minerals would be produced in the recharge process, while there is little impact on the water caused by iron minerals in Xianyang recharge well. Studies have shown that, in an open environment the Fe^{2+} in the groundwater and the O in the air occurs oxidation reaction, producing some precipitation of mineral such as Fe_2O_3 and $\text{Fe}(\text{OH})_3$, etc. A blockage is caused after these gelatinous precipitate go into the geological strata. The experiment shows that the suitability of reinjection formation in the Xi'an Sanqiao recharge well is less than that of Xianyang NO.1 recharge well, and the open recharge way of the Xi'an Sanqiao recharge well increases the chemical and microbiological clogging.

Key words: pore-type heat storage fluid; recharge; clogging mechanism; geothermal resources; Xi'an City; Xianyang City

1 研究背景

深层孔隙型地热资源是宝贵的绿色清洁能源,其开发利用是解决能源紧张和环境污染问题的关键^[1]。但是,过度开采地下热水引发的一系列环境污染、地下热水水位衰减问题严重制约着经济的和谐发展。针对这一状况,比节制性开采地下热水之外更为积极、主动和关键的应对措施是实施地下热

基金项目:陕西省财政厅科技项目(20130422);陕西省自然科学基金基础研究计划(2012JZ5001)
作者简介:郑磊(1989—),男,硕士研究生,研究方向为环境同位素地下水文学。E-mail:groundwater258@163.com

水资源的人工尾水回灌^[2]。然而,国内外众多地热田调查结果显示:有80%的孔隙型热储回灌井出现了堵塞,部分回灌井被迫停滞^[3],因此,解决回灌堵塞问题是现阶段开采利用地下热水的关键。Bedrikovetsky等^[4]曾采用模拟和试验方法模拟了热水中硫酸盐矿物的结垢规律;郑西来等^[5-6]应用矿物平衡模型对浅层热水系统中相关物质的化学沉淀进行了有益尝试;刘雪玲等^[7]对热水悬浮物的形成及堵塞机理做了论述。迄今为止,国内外学界对于浅层及常温孔隙型地下热水尾水回灌堵塞机理做了大量研究,然而,对深层孔隙型热储地热尾水回灌堵塞机理及系统缓减回灌量衰减的综合性研究鲜见报道。鉴于此,笔者在2011—2012年间分别在咸阳、西安两地对采灌井进行地下热水尾水回灌试验,对两地的尾水回灌堵塞机理进行了深入研究,西安三桥回灌井运用开放式回灌方式,其回灌量为24m³/h,咸阳一号回灌井采用密闭式回灌方式,其回灌量为50~70 m³/h。本文以水文地球化学理论模拟与室内堵塞模拟试验及现场回灌试验多种方法耦合,结合西安咸阳城区两地地质条件、热储环境特征和水化学类型的差异,对西安、咸阳孔隙型热储尾水回灌堵塞机理进行了对比研究,试图比较在不同构造单元、不同热储物性、不同回灌方式下其堵塞程度、堵塞机理的同异性,为相似条件地区尾水回灌堵塞机理研究提供研究实例。

2 地质条件对比

西安三桥回灌井位于西安地热田三桥—含元殿断块的西部、渭河断陷盆地内,属西安凹陷中部深凹陷带,其地质构造条件为该区地下热水的储存与运移提供了良好的通道;而咸阳回灌一号井构造位置处于西安凹陷北部缓斜坡区的断阶带南部,构造相对简单,断裂构造主要有南部的近东西向渭河北侧断裂和西部的北西向咸阳—长安断裂。渭河北侧断裂属基岩性分界线,其北为下古生界碳酸盐岩,其南部为元古宇变质岩和印支—燕山期花岗岩类。该断裂南倾67°~80°,最大断距可达700~1 000 m。咸阳—长安断裂,走向北西,倾向西南,倾角70°左右。位于该回灌井西约3 km,断距不大(图1)。两地回灌井所处位置都不在断裂带上,因此具有可比性。

3 回灌井的热储层对比

3.1 热储层的物性特征

西安、咸阳城区大多数开采井和回灌井以蓝田灞河组为主要取水层,因此,就蓝田灞河组物性特征加以论述。西安三桥回灌井的回灌目的层是埋藏深度

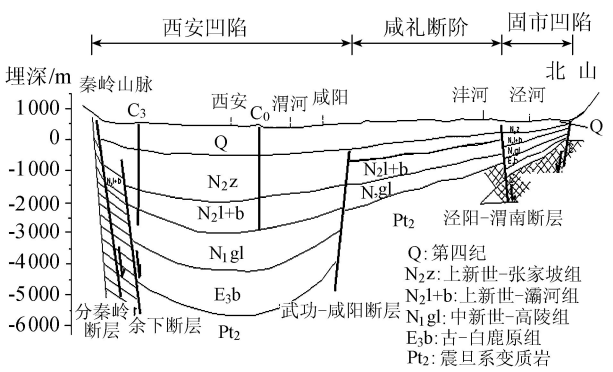


图1 西安凹陷、咸阳-礼泉县断阶剖面示意图

为1 611.90~2 876.60 m的三门组、蓝田灞河组和高岭群组,其中蓝田灞河组埋藏深度为1 637.3~2 851.2 m,厚度为1 213.9 m。据测井解释成果反映,该地层中共有133层砂岩,砂岩总厚度为321.7 m,砂岩总厚度与该地层总厚度之比为26.50%。砂岩孔隙度15.22%~38.94%,渗透率3.65~867.53 mD(1 mD=0.986 9×10⁻⁹ m²)。咸阳回灌一号井的回灌目的层埋藏深度为1 270.7~2 452.15 m的蓝田灞河组,厚度为1 181.45 m。该地层中砂岩共有91层,砂岩总厚度为412.3 m,单层最大厚度19.3 m,最薄厚度0.9 m,砂岩总厚度与该地层总厚度之比为34.90%,孔隙度10.22%~22.44%,渗透率2.06~35.96 mD。由对比可知,西安与咸阳回灌井热储层的厚度相近,但其孔隙度和渗透率都比咸阳大。西安和咸阳蓝田灞河组地层物性特征分布频率进行对比,如图2所示。

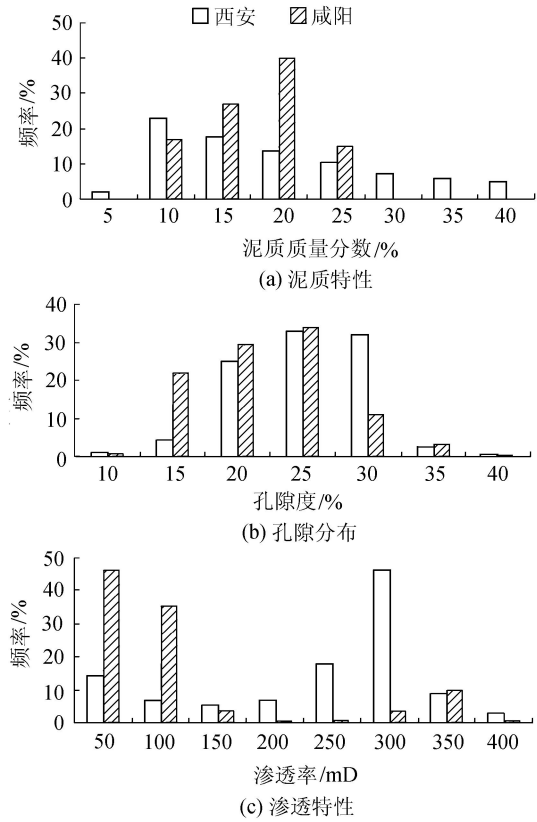


图2 西安和咸阳地区地热井地层物性特征频率分布

对比显示,西安蓝田灞河组地层泥质质量分数主要分布在5%~15%之间,频率为5%~10%,而咸阳城区地热井蓝田灞河组泥质质量分数变化大,数值相对分散,主要分布在10%~20%之间,频率为15%~20%。表明蓝田灞河组泥质质量分数西安比咸阳相对较低(图2(a));西安蓝田灞河组砂岩孔隙度属于中等偏上,渗透率分布主要集中在250~300 mD之间,而咸阳蓝田灞河组砂岩渗透率主要集中在0~100 mD之间,频率为0~50%(图2(b),图2(c)),说明西安比咸阳蓝田灞河组砂岩孔隙度和渗透率都相对较好。为了进一步进行热储物性综合评价分析,应用了模糊数学综合影响评价方法对两地渗透率、孔隙度、断裂关系、泥质质量分数、粒径、胶结程度、砂层总厚度、单层最大厚度、砂层总厚度与该地层总厚度之比、水位下降速度和流量进行了模糊综合评价。模糊综合评价具体步骤为:①建立水质评价因子集合及等级集合;②建立单因子评价矩阵;③确定各因素的权重;④建立水质评价模型,计算评价结果。模糊综合评价结果显示,主观赋值情况下西安三桥地热回灌井的回灌难度排在咸阳全部34口井中第22位,咸阳回灌一号井排在19位,运用客观熵值法结果显示,西安地热回灌井排在27位,咸阳回灌一号井排在23位。因此,西安三桥回灌井进行地热尾水回灌的难度较咸阳回灌一号井的回灌难度更大。

3.2 水化学特征

咸阳回灌一号井和咸阳北开采井与西安三桥开采井、回灌井以及咸阳南职院井水文地质构造单元不同,咸阳北位于关中盆地咸礼断阶,而西安以及咸阳南部位于西安凹陷,构造单元的差异导致水文地球化学类型不同,由图3可知,咸阳回灌一号井与咸阳北部各开采井的水化学类型为Cl⁻·Na⁺型水,而西安回灌井与开采井以及咸阳南部开采井的水化学类型为SO₄²⁻·Cl⁻·Na⁺型水,相对于咸阳北部而言,西安地区的主控阴离子以SO₄²⁻为主,因此在回灌过程中导致可能的化学堵塞类型不同。

3.3 主要成垢离子

根据西安、咸阳主要结垢离子对比分析(表1、图4),咸阳回灌一号井与咸阳北部开采井Ca²⁺和Mg²⁺明显大于西安开采井与回灌井以及咸阳南部开采井,而SO₄²⁻与HCO₃⁻较小,因此咸阳北部地区回灌过程中主要的沉淀矿物可能为方解石,回灌现场

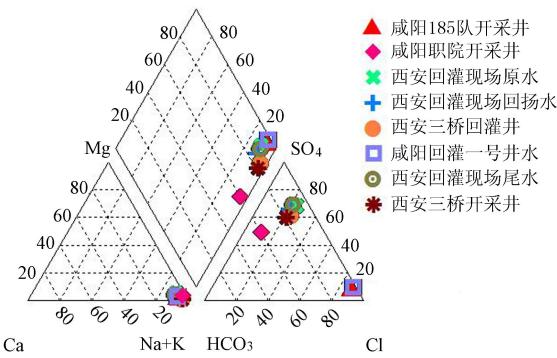


图3 西安、咸阳回灌井、开采井 piper 图

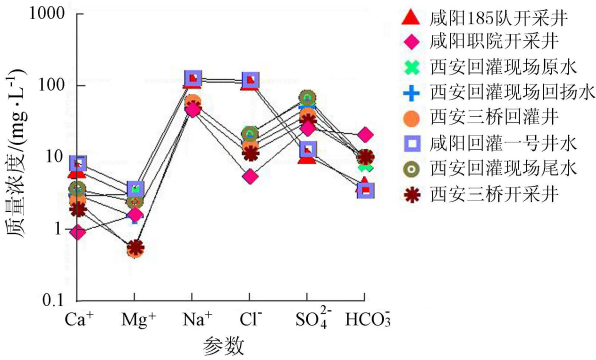


图4 咸阳与西安回灌井、开采井七大离子指纹图

试验所取垢物也证实,地热尾水回灌致堵的沉淀物主要以方解石为主,而西安地区以及咸阳南部可能的主要的沉淀矿物为方解石及石膏^[8]。由图5分析可知,咸阳回灌井与开采井的Sr和可溶性SiO₂大

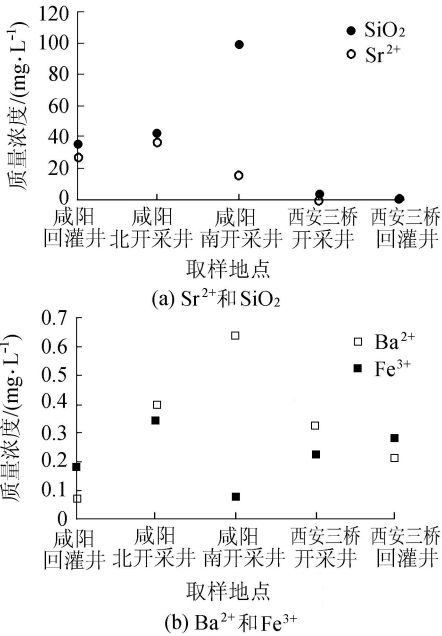


图5 回灌井和开采井成垢离子分布

表1 开采井、回灌井水化学离子质量浓度

取样地点	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)$	$\rho(\text{SiO}_2)$	$\rho(\text{Sr}^{2+})$	$\rho(\text{Ba}^{2+})$	$\rho(\text{Fe}^{3+})$
咸阳回灌井一号	77.86	2931.5	167.3	44.4	4250.5	629.2	207.5	35.1	26.8500	0.072	0.178
咸阳北开采井	43.00	2650.0	132.3	34.6	3828.6	501.9	250.2	42.3	37.2000	0.400	0.344
咸阳南开采井	35.33	1027.5	18.0	19.4	192.8	1200.8	1253.3	99.2	15.9400	0.638	0.080
西安三桥开采井	9.10	1094.7	37.1	6.7	400.6	1508.2	616.3	2.7	0.0005	0.320	0.228
西安三桥回灌井	15.70	1357.0	50.1	6.1	505.2	1825.2	594.9	0.0	0.0009	0.210	0.285

于西安地区,天青石和硅类垢物较西安地区严重, SiO_2 本身不会形成硅类的沉积垢物,但是它起到了晶核作用,当水中存在含有一定的 Ca 、 Mg 、 Al 、 Fe 等金属离子时容易形成硅酸盐垢^[9]。西安回灌井和开采井中 Ba 与 Fe 离子的质量浓度较咸阳回灌井的略高,开放环境下,水中的 Fe 离子易被氧化成 Fe^{3+} 从而生成 Fe_2O_3 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等矿物沉淀,造成堵塞。

4 水文地球化学模拟

4.1 热储环境

热储环境的对比包括热储温度、 pH 值和混入量。西安开采井、回灌井及咸阳职业技术学院井属西安凹陷构造单元,而咸阳回灌一号井和咸阳 185 队井属于咸礼断阶构造单元,由表 2 可得出,根据水文地球化学 (PHREEQC 软件) 模拟结果的热储温度,西安凹陷内热水井较咸礼断阶内热水井热储温度高,混入量小,因此,西安凹陷内三桥回灌井较咸阳回灌一号井更为封闭,回灌难度更大。

表 2 西安、咸阳热储环境对比

城市	热水井	热储温度/℃	热储 pH 值	混入比例
西安	三桥开采井	110	6.58 ~ 6.65	0.270
	三桥回灌井	100	6.53 ~ 6.6	0.216
咸阳	咸阳回灌一号井	70	6.61 ~ 6.75	0.360
	咸阳 185 队	80	6.39 ~ 6.54	0.450
	职业技术学院井	125	6.63 ~ 6.73	0.414

4.2 水质配伍软件模拟结果

西安、咸阳回灌水质静态配伍软件模拟结果 (图 6、图 7) 对比显示,咸阳回灌井静态配伍结果在

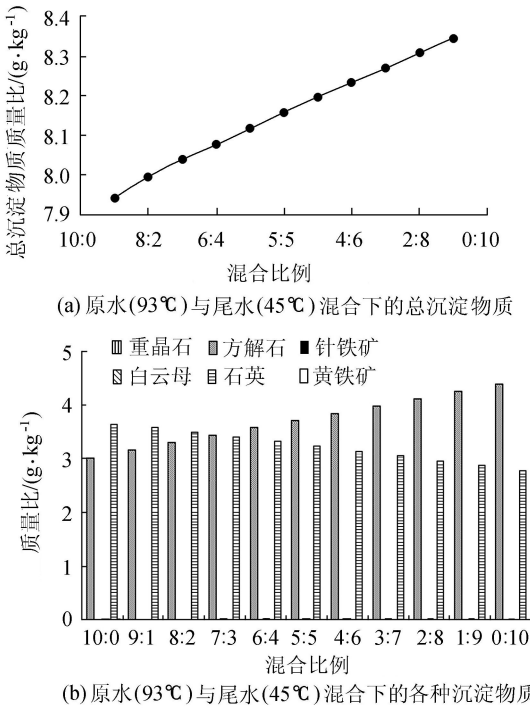


图 7 西安地热尾水与热储热水混合后的静态配伍的模拟结果

原水与尾水混配比达到 6 : 4 时沉淀量达到最大,同时出现冷锋面,其中方解石沉淀量最大,其次为石英,少量尾水混入还会有一部分透闪石沉淀生成;在沉积物中虽然也检出了白云石,但是由于在常温下不能发生白云岩化,地层中的白云石都是地质历史时期的产物^[10],所以在地球化学模拟中未将白云石列入沉积物,因为 Mg^{2+} 质量浓度的降低并不是白云石沉淀的结果。在西安三桥回灌井,随着原水和尾水的比例增加,沉淀量呈线性增加,冷锋面并未出现,其中方解石和石英沉淀量最大,其次为重晶石、针铁矿、白云母和黄铁矿。

5 室内模拟试验

5.1 静态配伍试验

咸阳西安两地静态配伍试验结果见图 8。咸阳回灌井在 50℃ 时尾水、原水水质基本不配伍 (配伍性标准^[11]: $P = 100 \text{ mg/L}$), 而西安三桥回灌井在 50℃ 时配伍性较好,在 30℃ 时水质配伍的结果为配伍。因此西安三桥尾水回灌的水质配伍条件较好,其水质总沉淀量在 50℃ 时比同温度下的咸阳井总沉淀量低 15.41%。

5.2 动态驱替模拟试验对比

西安三桥及咸阳一号回灌井堵塞模拟试验结果如表 3 与图 9 所示,可见,就总堵塞率而言,在同一温度下,西安三桥回灌模拟试验各个堵塞率均大于咸阳回灌一号井堵塞率,50℃ 温度下,西安三桥回灌井化学堵塞率高出咸阳回灌一号井

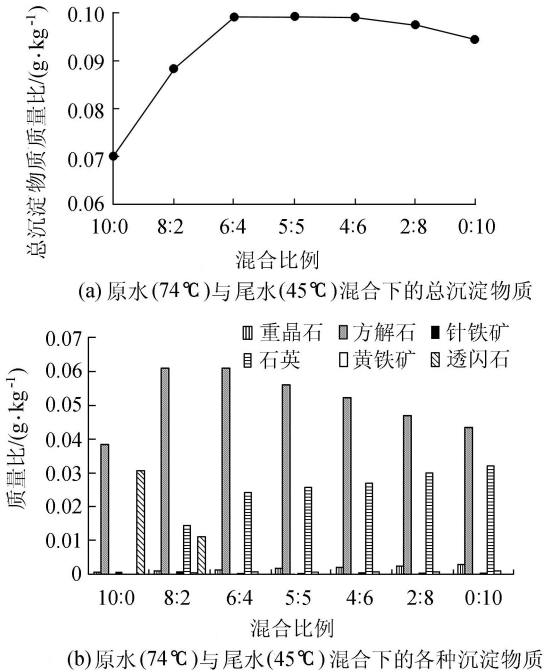


图 6 咸阳地热尾水与热储热水混合后的静态配伍的模拟结果

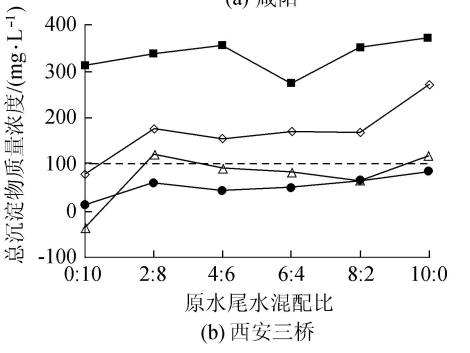
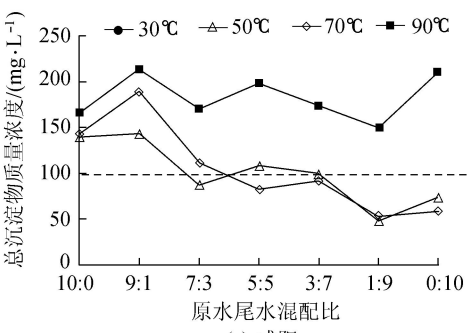


图 8 咸阳、西安回灌井静态配伍试验结果

表 3 咸阳、西安回灌驱替试验结果对比

城市	试验井	类型	堵塞率/%			
			30℃	50℃	70℃	90℃
西安	三桥	化学堵塞	25.53	57.21	75.13	83.56
		悬浮物堵塞	35.97	17.18	9.89	7.18
		气体堵塞	24.55			
咸阳	回灌一号	化学堵塞		26.3	33.4	42.4
		悬浮物堵塞		1.4	8.4	18.5
		气体堵塞		11.5	9.4	6.3

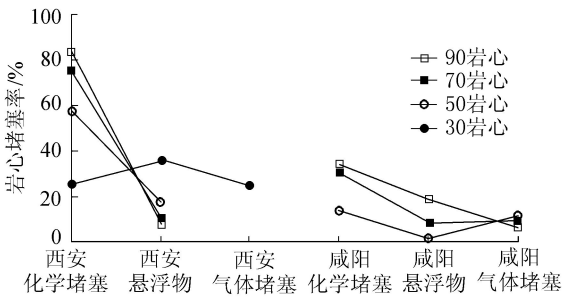


图 9 西安、咸阳回灌驱替试验结果对比

30.91%。表 3 显示,影响西安三桥回灌井较高堵塞率的主要因素为化学堵塞;在开放条件下,Fe²⁺易被氧化成 Fe³⁺生成 Fe(OH)₃ 和 Fe₂O₃ 等矿物沉淀,这些矿物在水中呈现为胶状体,加剧了化学物堵塞。值得注意的是,西安三桥回灌井在实际回灌 30℃ 水温且经过 5 μm 过滤级的条件下,悬浮物堵塞仍占据主位,说明开放环境下悬浮物堵塞影响不容忽视。采用密闭式回灌,提高对悬浮物过滤级数,加大过滤量是保证回灌初期顺利进行的关键。

回灌过程中,微生物的滋生不容小视,微生物的大量繁殖会相互聚集并吸附水中细小的悬浮物颗粒

及微生物尸体,粘附于井壁和孔隙造成堵塞。将西安与咸阳回灌水质中这 3 种微生物进行对比发现,西安三桥回灌井微生物的影响更为严重(表 4)。

表 4 微生物测试对比结果 个/mL

城市	井点位置	腐生菌	铁细菌	硫酸盐还原菌
咸阳	咸阳 185 队	1.4×10 ⁶	25	0
	商贸学院	1.1×10 ⁵	未测	0
	三桥(原水)	1.5×10 ⁵	2.0×10 ⁵	0.9
	三桥(大池)	1.4×10 ⁷		
西安	西安春晓苑		1.8	0.32×10 ⁵
	西安工程技术学院		0	0.7×10 ⁴
	雅荷春天		1.7	0.33×10 ⁵

腐生菌自身细胞大,可在水中大量繁殖生长,为三桥回灌井开放回灌方式下微生物堵塞的主要菌种;硫酸盐还原菌数量上虽在本区数量不多,但其存在可催生异常逸出物的形成;值得一提的是,在开放回灌系统中,铁细菌成为三桥回灌试验中的关键性菌种。

西安及咸阳回灌井热水微生物测试结果对比显示,咸阳 185 队地热井腐生菌含量达 1.4×10⁶ 个/mL,明显大于西安原水(1.5×10⁵ 个/mL)和商贸学院井(1.1×10⁵ 个/mL),而西安三桥回灌井中的大池属完全开放的回灌方式,其腐生菌含量高达 1.4×10⁷ 个/mL,比密闭式回灌方式高出 1 或 2 个数量级,提示腐生菌的繁殖是开放环境微生物堵塞的特征之一。值得注意的是在西安三桥原水、回扬水、尾水中铁细菌分别为 2.0×10⁵ 个/mL、1.1×10⁶ 个/mL 和 1.1×10⁴ 个/mL,高于咸阳密闭式回灌方式 3~5 个数量级,铁细菌能够产生 Fe(OH)₃,可累积成褐铁矿(Fe₂O₃)聚集在细菌周围产生大量棕色黏泥^[12],粘附在井壁周围和孔隙中,造成严重堵塞,从回灌现场取得的大量黏稠状堵塞物充分证明了这一事实。故而,非金属管材的普及应用十分必要,是提高回灌率的主要措施之一。

6 地面设备对比

西安三桥属于开放式大池回灌,在开放环境下,微生物、水质和悬浮物都发生了巨大改变,为回灌带来了很大的阻力,在没有二级过滤、除砂器和除铁曝气等工艺设备的情况下,西安三桥地区的最大回灌量达到 33 m³/h,而咸阳回灌一号井采取了二级过滤和除砂器等设备,并且采取密闭式回灌,大大降低了咸阳地区所面临的回灌难度,最大回灌量高达 60 m³/h。因此,在地热尾水回灌中,为了减小回灌堵塞,通常采用密闭式地面设备对尾水中的悬浮物堵塞、气体堵塞进行去除,现阶段一般采用的地面设备有过滤器、排气罐、除砂器、除铁器等。采取以上设备可对堵塞起到缓解并且有效地增加回灌量。对西

安、咸阳两地区回灌井地面设备配备及相应回灌量进行对比结果显示(表5),尽管西安三桥与咸阳回灌一号井的最大回灌量差异的影响是多方面的,其热储物性、加压程度及地面设备均有贡献,然而开放式与密闭式这两种回灌方式的不同是潜在的不容忽视的因素之一。

表5 西安、咸阳现场设备对回灌量的影响

城市	回灌井位	二级过滤	除砂器	同层回灌	加压/MPa	密闭式	最大回灌量/(m ³ ·h ⁻¹)
咸阳	回灌一号	✓	✓	✓	3	✓	70
	三桥回灌	✓	✓	✓	0.3	×	24
	工程技术学院	×	✓	✓	×	×	<3
西安	雅荷春天	×	✓	×	×	✓	<3
	陕西宾馆	×	✓	✓	×	×	3~5
	曲江春晓苑	✓	✓	×	×	✓	>12

7 结 语

a. 室内模拟试验结果显示,在同一温度下,西安三桥回灌井各个堵塞率均大于咸阳回灌一号井。铁质管道的使用会出现大量铁类物质,在开放条件下,Fe²⁺易被氧化成 Fe³⁺生成 Fe(OH)₃ 和 Fe₂O₃ 等胶状体,加剧了化学物堵塞。值得注意的是,在实际回灌 30℃ 水温且经过 5μm 过滤级的开放式回灌条件下,悬浮物堵塞仍占据主位,说明悬浮物堵塞影响不容忽视。采用密闭式回灌,提高对悬浮物过滤级数,加大过滤量是保证回灌初期顺利进行的关键。

b. 开放回灌环境下,腐生菌和铁细菌大量繁殖,并相互凝集吸附水中细小的悬浮物颗粒及微生物尸体,且大量的铁细菌能够产生 Fe(OH)₃ 累积成褐铁矿(Fe₂O₃)聚集在细菌周围,产生大量的棕色黏泥,粘附在井壁周围和孔隙中,加重了悬浮物堵塞、化学堵塞和微生物本身堵塞程度。因此,采用密闭式回灌方式尤为重要。

c. 西安咸阳回灌对比显示,在回灌试验中,必须进行密闭式回灌,以避免因开放环境造成大量堵塞。

参考文献:

[1] GALLP D L. Aluminum silicate scale formation and inhibition (1): scale characterization and laboratory experiments[J]. Geothermics,1997,26: 483-499.

[2] STEFANSSON V. Geothermal reinjection experience[J]. Geothermics,1997,26:99-139.

[3] 刘久荣. 地热回灌的发展现状[J]. 水文地质工程地质, 2003 (3): 100-104. (LIU Jiurong. The status of geothermal reinjection [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2003(3):100-104. (in Chinese))

[4] BEDRIKOVETSKY P C, MACKAY E J, MONTERIRO P R

S. Laboratory and field prediction of sulphate scaling damage[ED/OL]. [2012-03-06]. SPE 100611. https://thesis. library. adelaide. edu. au/dspace/bitstream/2440/47475/1/hdl_47475. pdf

[5] 郑西来,郭建青. 地热系统中的混合作用及其应用研究 [J]. 西安地质学院学报,1996,18 (4): 53-57. (ZHENG Xilai, GUO Jianqing. Studies of mixing and its application in geothermal systems [J]. Journal of Xi ’ an College of Geology,1996,18 (4): 53-57. (in Chinese))

[6] 毕二平. 地热水与回灌水混合的地球化学模拟:以冰岛 Laugaland 低温热田为例 [J]. 地球科学:中国地质大学学报,1998,23 (6): 631-634. (BI Erping. Geochemical modelling of the mixing of geothermal water and reinjection water: a case study of laugaland low-temperature geothermal field in Iceland [J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences,1998,23 (6): 631-634. (in Chinese))

[7] 刘雪玲,朱家玲. 新近系砂岩地热回灌堵塞机理问题的探讨 [J]. 水文地质工程地质,2009,138 (5): 138-141. (LIU Xueling, ZHU Jialing. A study of clogging in geothermal reinjection wells in the neofene sandstone aquifer [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2009,138 (5): 138-141. (in Chinese))

[8] 钱会,连珺,窦妍. 地下水混合作用的碳酸钙溶解沉淀效应 [J]. 地球科学与环境学报,2007,29 (1): 55-65. (QIAN Hui, LIAN Jun, DOU Yan. Mixing effects of groundwater on CaCO₃ dissolution and precipitation [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2007,29 (1): 55-65. (in Chinese))

[9] 梅平,陈武,刘华荣. 油气田缓蚀阻垢技术研究与应用 [M]. 北京:石油工业出版社,2011.

[10] 陈建生,王婷,陈茜茜,等. 鄂尔多斯自流盆地地下水来源争议问题讨论 [J]. 地质论评,2013,59 (5): 900-908. (CHEN Jiansheng, WANG Ting, CHEN Xixi, et al. Discussion on the origin of groundwater in the Oroids Basin [J]. Geological Review, 2013, 59 (5): 900-908. (in Chinese))

[11] 卞超锋,朱其佳,陈武. 油田注入水源与储层的化学配伍性研究 [J]. 化学与生物工程,2006,23 (7): 48-50. (BIAN Chaofeng, ZHU Qijia, CHEN Wu. Study on compatibility of injected water with reservoir in oilfield [J]. Chemistry & Bioengineering,2006,23 (7): 48-50. (in Chinese))

[12] 王洋,张晓健,陈雨乔,等. 给水管网管壁铁细菌生长特性模拟及控制对策研究 [J]. 环境科学,2009,30 (11): 3293-3299. (WANG Yang, ZHANG Xiaojian, CHEN Yuqiao, et al. Growth characteristics and control of iron bacteria on cast iron in drinking water distribution systems [J]. Environmental Science,2009,30 (11): 3293-3299. (in Chinese))

(收稿日期:2014 - 09 - 09 编辑:高渭文)