

平面非均质性对热储回灌量影响研究 ——以保定市馆陶组为例

王 腾^{1,2}, 胡景宏^{1,2}, 刘常源^{1,2}, 高志前^{1,2}, 唐 玄^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 北京市非常规天然气能源地质评价与开发工程, 北京 100083)

[摘要] 在地热回灌过程中, 部分地热田因回灌水流量远小于设计回灌流量, 常导致地热田面临关停的情况。本文以保定市某区块馆陶组热储为研究对象, 针对回灌过程中注水效果不佳的问题, 分析储层的平面非均质性。利用数值模拟方法, 对热力场与流体力场进行耦合, 分析四种不同非均质地层对热储回灌量的影响, 并建立出最大回灌流量评价方法。模拟结果表明, 随着平面非均质性的增强, 回灌水流量减小, 回灌效果最低可降至均质地层的35%; 回灌井与开采井所处区域的平面非均质性对回灌效果影响为20%~65%。该方法能够对平面非均质性与回灌流量进行合理调整, 有效保证回灌效果, 可拓展到其他地质条件相似的储层使用。

[关键词] 平面非均质性 地热回灌 砂岩热储 数值模拟 馆陶组 保定市

[中图分类号] P314 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)02-0431-10

Wang Teng, Hu Jinghong, Liu Changyuan, Gao Zhiqian, Tang Xuan. The effect of plane heterogeneity on the reinjection flow of geothermal reservoir: A case study of the Guantao Formation in Baoding City[J]. *Geology and Exploration* 2025,61(2): 0431-0440.

0 引言

地热资源是分布在地球内部的地热能、地热流体等, 具有分布广、储量大和可持续利用的优势(张薇等, 2019; 张德龙等, 2022; 霍超等, 2023)。中国地热资源丰富, 已发现地热区3200余处, 是全球地热利用经济效益最好的国家之一。其中, 中低温水热型地热资源占比达89%, 可直接用于供暖、农业种植、医疗服务等领域, 开发潜力巨大(李志成和申娴达, 2014; 王贵玲等, 2020; 马晓东, 2020; 王登峰和王培义, 2021; 王磊, 2023)。

在地热开发过程中, 储层温度和压力随开采时间下降, 导致生产效率降低甚至停产。同时, 地热尾水排放可能污染环境。为解决这些问题, 使地热回灌被广泛应用, 即将常温水资源或地热尾水重新注入热储层。回灌不仅能保护环境、节约成本, 还

能维持地热资源的可持续开发(曹倩等, 2021; 董月霞等, 2021; 陈莹等, 2022; 申小龙等, 2022; 丁蕊等, 2023)。因此, 回灌是地热资源可持续发展的重要措施(冯守涛等, 2019; 赵振等, 2021; 冯波等, 2022; 刘东义等, 2024)。然而, 在实际地热资源开发中仍存在问题。例如, 河北省保定市某区块馆陶组热储区在开发过程中, 部分地热井回灌能力不足, 导致热储压力、温度逐年下降, 甚至部分地热井面临关停。现有研究多关注堵塞、结垢对回灌效果的影响(林建旺和赵苏民, 2010; 叶志伟, 2022), 而地质条件对回灌效果的研究较少(朱慧星等, 2017)。

储层的平面非均质性涉及几何形状、规模、连续性及物性的平面变化, 对地热热储的形成、开发与调整有重要影响。学者们已通过数值模拟软件深入研究了热储层非均质性及其对地热资源开发

[收稿日期] 2024-07-04; **[改回日期]** 2025-01-20; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 科技部雄安新区科技创新专项“雄安地区地热能开发利用的理论与应用研究”(编号:2022XACX0800)资助。

[第一作者] 王 腾(2000年-), 男, 中国地质大学(北京)在读硕士研究生, 石油与天然气工程专业, 主要从事油气田与地热田开发研究。E-mail: wt8616806@email.cugb.edu.cn。

[通讯作者] 胡景宏(1983年-), 男, 2010年毕业于中国石油大学(北京), 石油与天然气工程专业, 获博士学位, 教授, 主要从事油气田与地热田开发工程。E-mail: hujinghong@cugb.edu.cn。

的影响。黄文博等(2014)利用三维数值模拟软件分析了热储非均质性在增强型地热系统(EGS)热开采中的作用,证实了其对开发效果的控制作用;叶志伟(2022)通过二维地质模型探讨了热储层非均匀性对裂隙渗流传热和热能开采的影响;苏玉娟等(2022)则通过非均质性解释了特定地热田的成因机制,并提出了开发与调整方案。

本研究以保定市某区块馆陶组热储为对象,针对回灌注水效果不佳的问题,利用数值模拟方法,结合区域地质参数,建立地层非均质模型,选取井间连线处于高/中/低渗带、井间连线垂直于高/中/低渗带等四种非均质模式,研究不同平面非均质性下的最大回灌水流量差异,以阐明平面非均质性对回灌水流量的影响,改善地热开发中的回灌效果。

1 研究区域概况

研究区域地质构造上位于华北板块渤海湾新生代裂谷盆地冀中拗陷的中西部,由北向南发育

的凸起主要包含:大兴凸起、牛驼镇凸起、高阳低凸起等;主要凹陷包括:霸县凹陷、保定凹陷、饶阳凹陷等(图1)。馆陶组地层在全区稳定分布,由南向北,厚度逐渐增大,沉积粒度逐渐变细,底部主要发育杂色石英与燧石砂岩(刘现川等,2018;朱喜等,2023)。研究区域内馆陶组热储厚度为106~240 m。该地层平均孔隙度约为21%,渗透率为 $0.2\sim 0.6\ \mu\text{m}^2$,属于中低渗透层。热储中部温度为 $47.1\sim 74.93\ ^\circ\text{C}$,岩石密度为 $2600\ \text{kg}/\text{m}^3$,岩石比热为 $878\ \text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,热储比热为 $920\ \text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,水的比热为 $4186.8\ \text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ (沈俊超等,2004)。回灌压力为12 MPa,开采压力为10 MPa,采灌压差为2 MPa。馆陶组自上而下分为馆I段、馆II段和馆III段热储,其中馆III段是主要开发层段,砂岩颗粒较粗,砂层富集,连通性好、出水量大,适合地热开发。研究区域内馆陶组储层岩石结构复杂,砂岩呈互层分布,显著影响储层非均质性。该区域具有地热开发基础,研究价值突出。

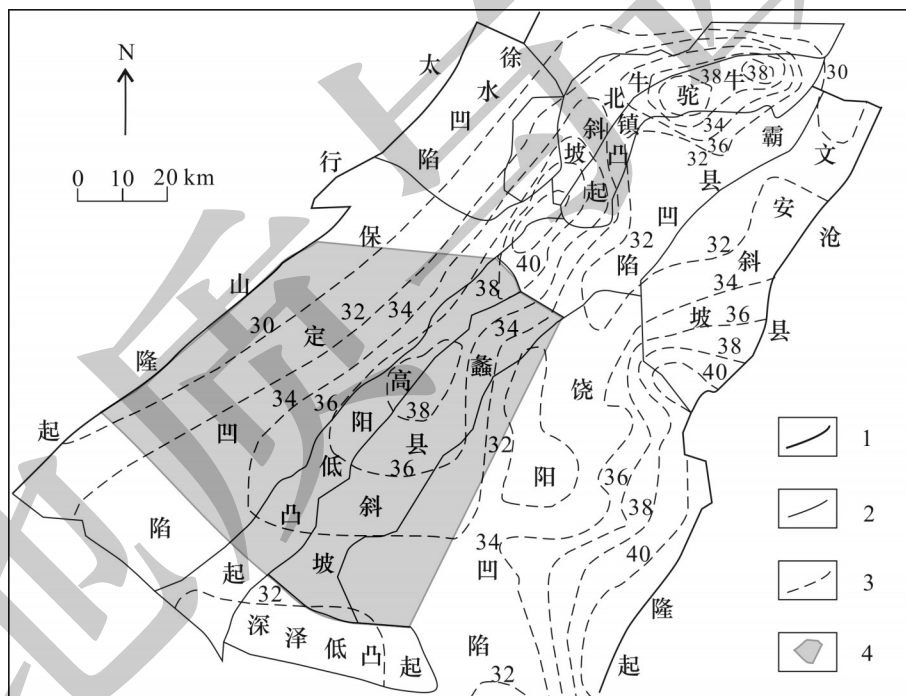


图1 研究区区域地质构造分区及地温梯度等值线图

Fig. 1 Tectonic division and geothermal gradient contours of the research area

1-III级构造单元边界;2-IV级构造单元边界;3-地温梯度等值线($^\circ\text{C}/1000\ \text{m}$);4-研究区域

1-boundary of III-order tectonic unit; 2-boundary of IV-order tectonic unit; 3-geothermal gradient contour($^\circ\text{C}/1000\ \text{m}$); 4-research area

目前研究区域内的地热资源探勘与开发主要为新近系砂岩热储,开发地层主要有两层,上层地热开发集中在馆陶组地层,开发利用深度为1800 m以浅(王贵玲等,2020;朱思雨等,2023)。区块内部多数地热

井为小区供热井,洗浴供水井,水温一般为 $70\ ^\circ\text{C}$ 左右,区域内地热井利用率较低,地热资源浪费严重,可持续性差,地热井开采直接供暖后只进行一次利用,其尾水温度为 $30\sim 40\ ^\circ\text{C}$,地热尾水未进行进一步提取利

用,造成了严重的地热资源浪费,亟需进一步的回灌与开发调整(刘伟坡等,2013)。

2 方案设计

为了研究平面非均质性和对最大回灌水流量

影响,需要建立相应的非均质模型。本热储的平面非均质性主要表现在渗透率平面非均质性与砂体几何形态非均质性,区域内砂体形状主要以席状砂体、透镜状砂体、与条带状砂体为主,对上述平面非均质性进行建模,如图 2 所示。

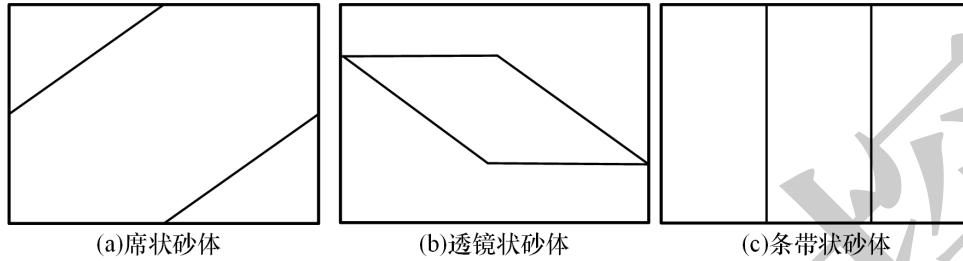


图 2 非均质地层地质模型

Fig. 2 Geological models for heterogeneous strata

渗透率的变化与采灌井位同样会对回灌效果产生一定的影响,将模型区域分为三个区域,即高渗带 K_0 、中渗带 K_1 、低渗带 K_2 。改变开采井和回灌井位置进行模拟,井位与非均质地层的关系按照表 1 的方式进行相应排布。

表 1 实验方案设计

Table 1 Experimental design

地层情况	方案编号	回灌方案
均质地层	0	井间连线处于均质地层的对角线
非均质地层	1	井间连线处于高/中/低渗带
	2	井间连线穿过中渗带
	3	井间连线平行/垂直中渗带
	4	井间连线 45° 中渗带

方案 0 为均质地层,方案 1 与方案 2 非均质形态

为席状砂体,方案 3 非均质形态为透镜状砂体,方案 3 非均质形态为条带状砂体。每一种回灌方案中分别存在 1~3 种非均质情况,分别对应不同非均质情况下不同回灌井的分布情况,在如图 3 所示。图 3a 中,井间连线完全处于渗透率为 K_0 的高渗带之中,则称为井间连线处于高渗带,将中间条带渗透率改为 K_0 和 K_2 ,最后统计出不同非均质模型与井位关系的最大回灌水流量,并与均质地层对比,明确平面非均质性和对回灌效果的影响。该模型在利用于研究区块的同时也可以拓展到其他地区在开发与调整的过程中参考使用。

使用 COMSOL 数值模拟软件中的达西定律模块与多孔介质传热模块进行耦合计算,模型长 $dx=150\text{ m}$, 宽 $dy=100\text{ m}$, 厚度 $dz=10\text{ m}$ 。热储埋深为

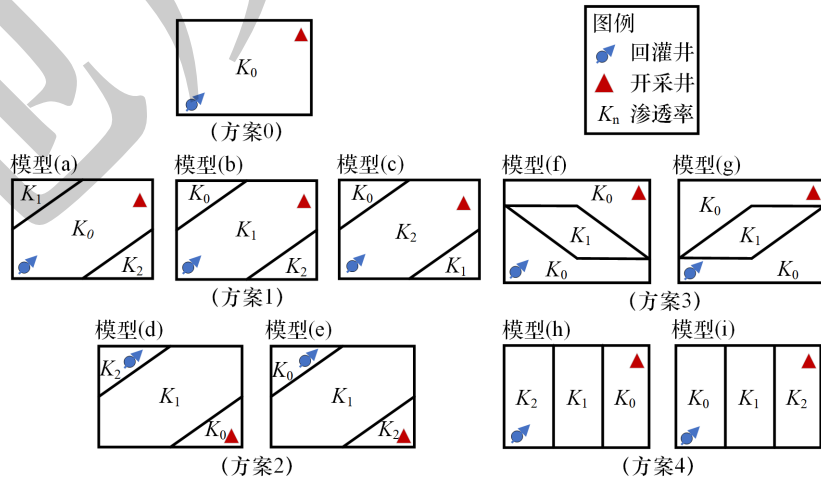


图 3 设计方案示意图

Fig. 3 Design schemes

1000 m, 地层压力 10 MPa, 储层温度 T_0 为 353.15 K, 略高于研究区域开采水温, 回灌水温 T_1 为地热井尾水温度, $T_1=303.15$ K。模型建立四面体网格 3897 个, 三角形网格 1408 个, 边单元 144 个, 顶点单元 16 个, 总网格数为 5465 个。根据研究区块馆陶组地质参数建立地质模型, 模型参数如表 2 所示。

表 2 模型地质参数表

Table 2 Parameters of the geological model

参数名称	岩体导热系数 ($W \cdot dm^{-1} \cdot K^{-1}$)	岩体恒压热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	岩体密度 ($kg \cdot m^{-3}$)	流体密度 ($kg \cdot m^{-3}$)
参数数值	1.76	878	2600	998
参数名称	流体恒压热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	流体导热系数 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	渗透率 (μm^2)	孔隙率
参数数值	4180	0.599	21×10^{-2}	0.21

模型非均质区域的渗透率分别为: 高渗带 $K_0=21 \times 10^{-2} \mu m^2$ 、中渗带 $K_1=14 \times 10^{-2} \mu m^2$ 、低渗带 $K_2=7 \times 10^{-2} \mu m^2$, $K_2=\frac{1}{2}K_1=\frac{1}{3}K_0$,

3 实验结果与对比分析

根据实验方案 0~4, 开展注水回灌模拟研究, 模型如图 4 所示, 模型的横截面积为 $1000 m^2$, 利用达西定律即可通过达西速度求得流量, 对不同条件下的最大回灌流量进行比较分析。

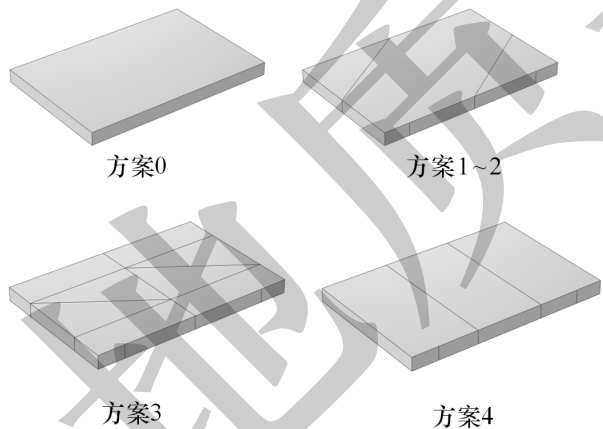


图 4 非均质地层回灌模型

Fig. 4 The reinjection models of heterogeneity strata

3.1 方案 0 井间连线处于均质地层的对角线

方案 0 为均质地层, 模型渗透率均为统一值, 区域渗透率均为 K_0 , 设置回灌井与开采井分别在模型对角线两端, 待模型达到稳态后, 通过模型内部达西速度场分布, 求得平均达西速度。依据达西定律, 当回灌流体、回灌压差、回灌截面积为定值时,

回灌流量仅与模型渗透率有关, 即在方案 0 下内部水流量应为一定值, 当设计回灌水流量大于该值时, 只能通过调整回灌工况来增大回灌流量值。如图 5 所示, 在均质地层模型情况下能通过的最大回灌水流量为 $0.31 L/s$ 。

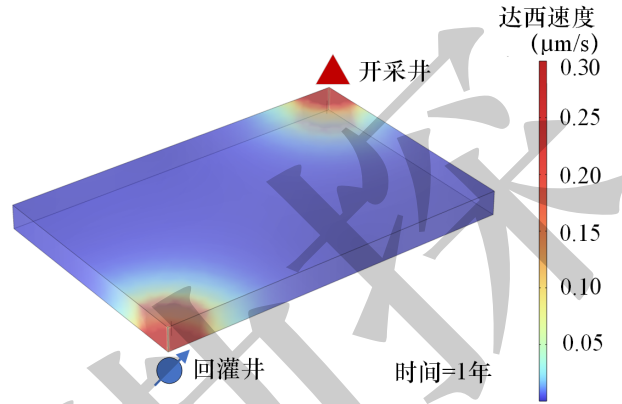


图 5 均质模型达西速度场

Fig. 5 Darcy velocity field of homogeneous models

3.2 方案 1 井间连线处于高/中/低渗带

将回灌模型分割成三个区域, 依照席状砂体特点, 为体现平面非均质性在渗透率上的差异, 分别设置不同的渗透率, 回灌井与开采井分别在模型对角线两端并处于同一渗透率的地层当中, 模拟结果如图 6 所示, 井间连线分别处于 K_0 、 K_1 、 K_2 三种渗透率中。

将其余方案的最大回灌流量与均质模型相比, 得出该地质模型下回灌流量的差异, 通过比较最大回灌流量的下降比例评价储层非均质性对回灌效果的影响。

表 3 方案 1 模拟结果对比

Table 3 Simulation results for scheme 1

地层情况	最大回灌流量 ($L \cdot s^{-1}$)	与均质模型相比 (%)
方案 0 均质地层	0.31	100
方案 1 (a) 井间连线处于高渗带	0.3	96
方案 1 (b) 井间连线处于中渗带	0.2	64
方案 1 (c) 井间连线处于低渗带	0.11	35

从表 3 可知, 随着井间连线上的渗透率逐步降低, 最大回灌流量随之明显下降, 这是因为随着区域内平均渗透率的降低, 回灌流体在热储内的回灌速度逐步下降, 在截面积相同的情况下, 回灌流量也将随之下降, 在渗透率为 K_2 的情况下最大回灌水流量下降约为 65%, 若在该非均质情况下进行回

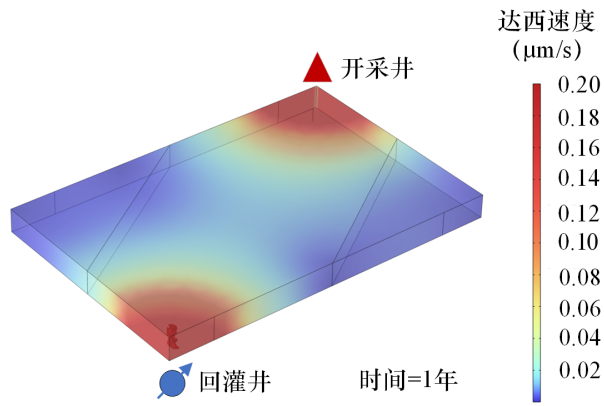


图 6 方案一达西速度场

Fig. 6 Darcy velocity field for scheme 1

灌，回灌效果将大幅降低。井间连线区域渗透率为

K_0 时，最大回灌水流量相较于均质地层仍有所下降，说明在回灌区域内存在非均质区域会影响回灌效果。

3.3 方案 2 井间连线穿过中渗带

与方案 1 相同，储层非均质情况为席状砂体，但回灌井分别处于 K_0 与 K_2 的区域，井间连线穿过渗透率分别为 K_0 、 K_1 、 K_2 的渗透率区域，模拟在回灌作业时由于平面非均质性导致储层渗透率变化较大的情况，模拟结果如图 7 所示，与方案 0 的回灌效果进行对比。

从表 4 模拟结果可知，井间连线穿过不同渗透率的区域时，最大回灌水流量下降幅度约为 49%；在回灌井与开采井所在区域的渗透率为定值时，调换两口井的位置对回灌效果的影响并不明显。

表 4 方案 2 模拟结果对比

Table 4 Simulation results for scheme 2

方案	地层情况	最大回灌流量 ($L \cdot s^{-1}$)	与均质模型相比 (%)
方案 0	均质地层	0.31	100
方案 2	(d) 井间连线穿越中渗带 (回灌井处于低渗带)	0.16	51
	(e) 井间连线穿越中渗带 (回灌井处于高渗带)	0.17	54

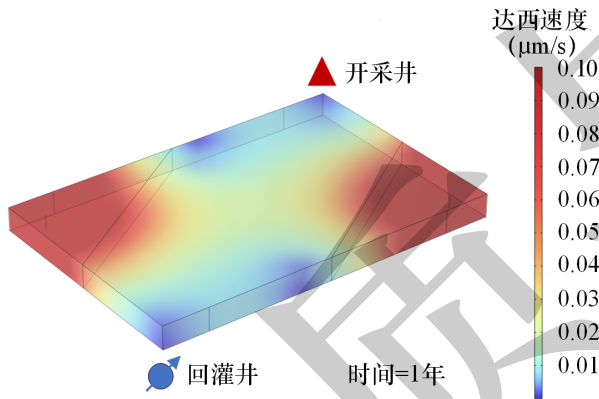


图 7 方案二达西速度场

Fig. 7 Darcy velocity field for scheme 2

如图 8 所示，模型 (b) 与模型 (e) 在非均质性设置上完全相同均为席状砂体，但井间连线的位置不同，两者最大回灌流量对比如表 5 所示。对比两者最大回灌流量可知，在储层非均质性及岩石物性参数相同的情况下，井间连线处于同一渗透带时的回灌效果优于井间连线穿过不同渗透带，回灌效果提升约为 10%。回灌流量主要受到热储渗透率影响，席状砂体渗透率变化幅度较大，当回灌井与或者开采井处于低渗带时，由于渗透率较低导致回灌流量大幅降低，因此，回灌作业中应当尽量优化井网使其连线处于同一渗透率区域

中以提升回灌效果。

表 5 井间连线位置变化模拟结果对比

Table 5 Simulation results of positional changes of well linkages

方案	地层情况	最大回灌流量 ($L \cdot s^{-1}$)	与均质模型相比 (%)
方案 1	(b) 井间连线处于中渗带	0.2	64
方案 2	(e) 井间连线穿越中渗带 (回灌井处于高渗带)	0.17	54

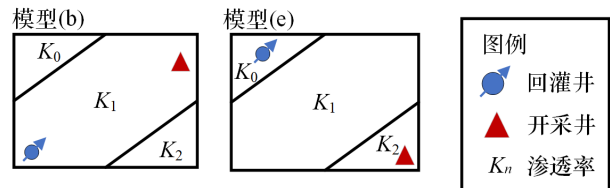


图 8 井间连线位置变化

Fig. 8 Changes of well linkages

3.4 方案 3 井间连线平行/垂直于低渗带

依照透镜状砂体，在模型内部设置一菱形区域，菱形区域内部设置渗透率为 K_1 ，其余区域渗透率均为 K_0 。使井间连线穿过不同渗透率条带并平行或垂直于菱形区域的某条边界，模拟回灌过程中穿过透镜砂体时对回灌效果的影响，模拟结果如图 9 所示。

表6 方案3模拟结果对比
Table 6 Simulation results for scheme 3

方案	地层情况	最大回灌流量(L s ⁻¹)	与均质模型相比(%)
方案0	均质地层	0.31	100
方案3	(f)井间连线垂直中渗带	0.27	87
	(g)井间连线平行低渗带	0.26	83

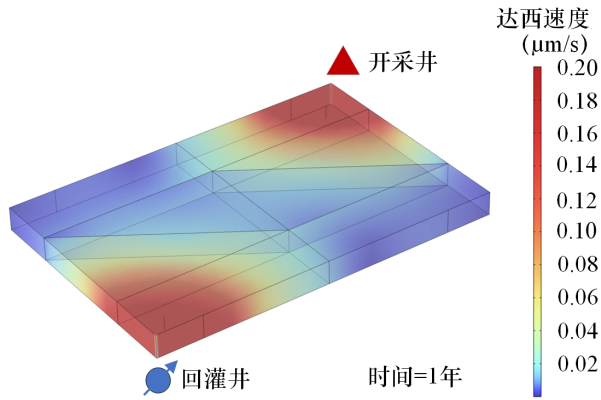


图9 方案三达西速度场
Fig. 9 Darcy velocity field for scheme 3

在透镜状砂体中,井间连线平行或垂直于低渗带时,井间连线上渗透率相近,最大回灌水流量变化幅度不大,对回灌效果的影响有限。如图10所示,对比方案2中(e)模型与方案3中模型,方案2中为席状砂体,其非均质性强于透镜状砂体,通过对比最大回灌水流量的差异分析井间连线上平面非均质性变化引起的回灌效果变化。

图10模型(e)中开采井所在区域的渗透率为 K_2 ,方案3中开采井所在区域渗透率为 K_0 ,由表7中的模拟结果可以看出,存在非均质性的地层中,开采井与回灌井所处的非均质区域的渗透率大小对于回灌效果影响有着极大影响,依据达西定律,当开采井或回灌井所处地区整体渗透率较低时,渗流流量将大幅下降,回灌作业中避免开采井与回灌井区域内存在低渗区域,影响整体回灌效果。

3.5 方案4 井间连线45°于中渗带

依照条带状砂体,将模型区域三等分,设置渗透率 K_0 、 K_1 和 K_2 ,分别将回灌井与开采井设置在模型两端,使井间连线穿过三个不同渗透率的区域且井间连线对于中渗带边界为45°,模拟回灌水流穿过非均质地层情况,模拟结果如图11所示,改变回灌井与开采井所在区域渗透率,对比最大回灌流量,结果如表8所示。由于条带状砂体平面非均质性较强,在方案4中整体回灌效果较差,相较均质模型最大回灌流量下降约50%。

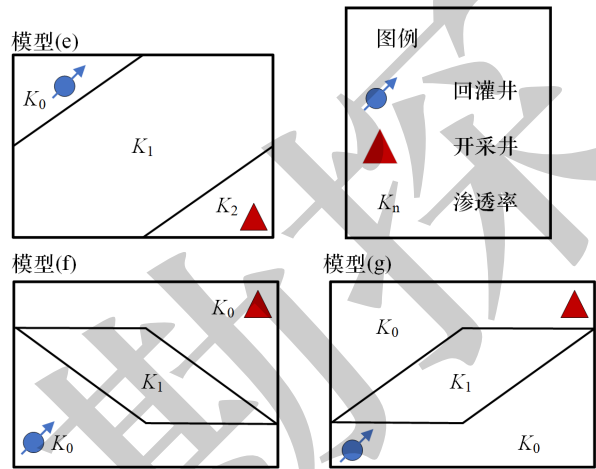


图10 模拟方案对比
Fig. 10 Comparison of simulation scheme

表7 井间连线位置变化模拟结果对比

Table 7 Simulation results of positional changes of well linkages

方案	地层情况	最大回灌流量(L·s ⁻¹)	与均质模型相比(%)
方案2	(e)井间连线穿越中渗带(回灌井处于高渗带)	0.17	54
方案3	(f)井间连线垂直低渗带	0.27	87
	(g)井间连线平行低渗带	0.26	83

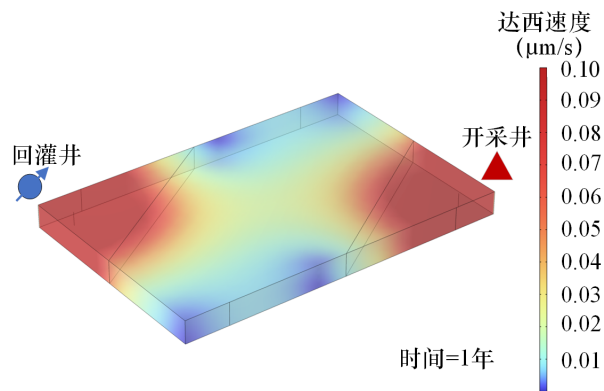


图11 方案四
Fig. 11 Darcy velocity field for scheme 4

如表9所示,图12中本文设计的四种实验模拟结果表明,方案1中尽管只有非均质性的差异,但当地层非均质性增加、渗透率变化时,回灌水流量也

产生显著变化,方案3中整体回灌效果最好,井间连线上平面非均质性变化差异不大时,回灌效果影响较小。方案4与方案2的回灌效果较差,相较均质模型,最大回灌流量下降约50%。由于井间连线上

的非均质区域渗透率较小,回灌水流量在流经区域时将大幅降低,回灌效果不理想,在布设开采井与回灌井时,应防止井间连线上出现低渗透率区域影响回灌效果。

表 8 方案4模拟结果对比

Table 8 Simulation results for scheme 4

方案	地层情况	最大回灌流量(L·s ⁻¹)	与均质模型相比(%)
方案0	均质地层	0.31	100
方案4	(h)井间连线45°于中渗带(回灌井处于低渗带)	0.15	48
	(i)井间连线45°于中渗带(回灌井处于高渗带)	0.16	51

表 9 非均质性面积及渗透率变化对回灌水量的影响

Table 9 Effect of plane homogeneous area and permeability variation on recharge water volume

方案	地层情况	最大回灌流量(L·s ⁻¹)	与均质模型相比(%)
方案1	(a)井间连线处于高渗带	0.3	96
方案2	(e)井间连线处于中渗带	0.17	54
方案3	(f)井间连线垂直低渗带	0.27	87
方案4	(i)井间连线45°于中渗带(回灌井处于高渗带)	0.16	51

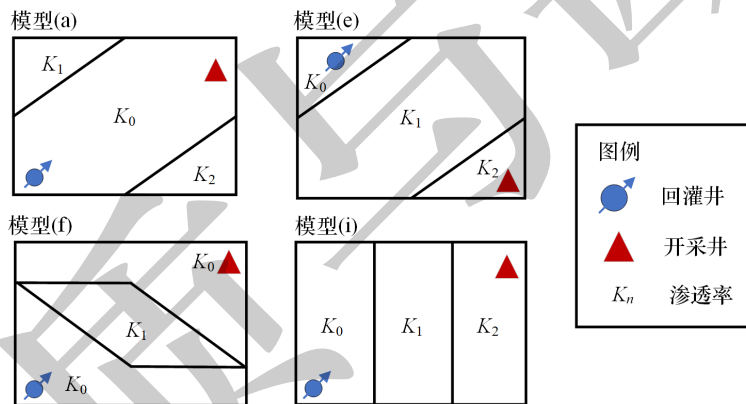


图 12 非均质性面积及渗透率变化

Fig. 12 Changes of plane homogeneous area and permeability

4 结论与建议

(1)研究区块内部平面非均质性较强导致热储回灌效果不佳,随着区块内平面非均质性加强、渗透率的降低,最大回灌水流量也会相应地降低,幅度可达65%,严重影响了热储的回灌作业。

(2)热储平面非均质性的不同形态也会影响回灌效果,井间连线之间的渗透率减小时,回灌效果影响显著,最大回灌水流量可降低30%,较强的平面非均质性会导致回灌效果大幅下降。

(3)在平面非均质性的地层中,井间连线处于同一渗透率区域时,回灌效果优于井间连线跨越不

同渗透率条带,其最大回灌水流量提升约为10%。当开采井或回灌井处于较低渗的条带当中时,最大回灌水流量下降约30%,影响整体回灌效果。

(4)对于存在较强非均质性的热储开采过程中,布设开采井与回灌井时应尽量避免低渗透率区域进行布设,将井位设置于较高渗透率的区域,能够有效保证最大回灌水流量,减少平面非均质性对回灌过程的影响。此外,应避免井间连线跨越不同渗透率条带,回灌作业时,井间连线设置在同一渗透率条带一定程度上能够提升回灌效果。该方法可拓展到其他存在较强非均质性、回灌效率较低的区块使用。

[References]

- Cao Qian, Fang Chaohe, Li Yun, Wang Hanxiong, Fang Qun, Shi Xiangyang. 2021. Development status of geothermal reinjection at home and abroad and its enlightenment [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 43(2):203-211 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ying, Wang Panke, Wu Ye, Ma Qingpo, Yu Li, Shangguan Rui. 2022. Analysis and countermeasures on influencing factors of geothermal well reinjection in Lankao, Henan Province [J]. *Drilling Engineering*, 49(6):146-152 (in Chinese with English abstract).
- Ding Rui, Zhu Chuanqing, Cao Qian, Fang Chaohe, Yang Yabo, Jiang Xiaoxue. 2023. Numerical simulation of buried hill geothermal resources exploitation in Hejian area [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(1):248-256 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yuexia, Huang Hongxiang, Ren Lu, Li Hongda, Du Zhiqiang, E Junjie, Wang Qi, Zhang Xiaoming. 2021. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation in northern Bohai Bay Basin: A case of the Caofeidian geothermal heating project in Tangshan, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3):666-676 (in Chinese with English abstract).
- Feng Bo, Ke Zunsong, Liu Yanguang, Shangguan Shuantong, Li Xiang, Cui Zhenpeng. 2022. Plugging mechanism and plugging removal technologies for enhanced geothermal system reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 42(12):165-183 (in Chinese with English abstract).
- Feng Shoutao, Wang Chengming, Yang Yabin, Song Weihua, Liu Shuai, Zhao Jichu. 2019. Impact assessment of reinjection on sandstone geothermal reservoir: A case study of Northwest Shandong depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(S1):158-167 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wenbo, Chen Jiliang, Jiang Fangming. 2014. Numerical study of EGS heat extraction from stratified heat reservoirs [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2(4):295-304 (in Chinese with English abstract).
- Huo Chao, Lin Yitian, Li Gang, Zhang Jianqiang, Pan Haiyang, Zhao Yue, Wang Dandan. 2023. China's geothermal resource exploration technology research progress under the background of carbon neutrality [J]. *Science Technology and Engineering*, 23(12):4917-4927 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jianwang, Zhao Sumin. 2010. An analysis of the reinjection attenuation of the Guantao Group geothermal reservoir in the Tianjin area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 37(5):133-136 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongyi, Yang Xiao, Han Liu, Jia Chao, Qi Shuming, Wang Hui, Yang Shuo. 2024. Research on the changes of sandstone thermal storage recharge characteristics based on time series parameter analysis: A case study of Linqing City in Shandong Province [J]. *Geology and Exploration*, 60(3):610-621 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xianchuan, Liu Shijuan, Yang Fengliang. 2018. Evaluation of geothermal resources in Gaoyang County [J]. *Coal Technology*, 37(4):44-46 (in Chinese with English abstract).
- Liu Weipo, An Yonghui, Wu Xi, Sha Na, Fu Lei. 2013. Current situation of development and utilisation of geothermal resources in Gaoyang County of Baoding City [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, (2):104 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhicheng, Shen Xianda. 2014. Genesis of the Xinluo geothermal well in Xifeng, Guizhou Province [J]. *Geology and Exploration*, 50(6):1155-1159 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xiaodong. 2020. Efficient exploration and drilling of sandstone-pore type geothermal resources [J]. *Geology and Exploration*, 56(1):173-181 (in Chinese with English abstract).
- Mao Xiang, Wang Xinwei, Guo Shiyan, Bao Zhidong. 2021. Genetic mechanism of geothermal resources in the Gaoyang geothermal field and adjacent areas [J]. *Carsologica Sinica*, 40(2):273-280 (in Chinese with English abstract).
- Shen Junchao, Wang Xuegong, Jia Lanfeng, Gong Lihua. 2004. The differences in the development of the geothermal reservoirs of the Guantao Group and conditions of well completion in the Jizhong and Huanghua depressions [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004(3):40-43 (in Chinese with English abstract).
- Shen Xiaolong, Li Hao, Wang Wei, Cheng Zhouying. 2022. Q-p curve equation of geothermal well recharge test in the urban area of Mei County, western Guanzhong [J]. *Coal Geology & Exploration*, 50(6):165-174 (in Chinese with English abstract).
- Su Yujuan. 2022. Genesis and rational development of typical geothermal field in the Songliao Basin: A case study of Lindian geothermal field [D]. Changchun: Jilin University: 1-159 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dengfeng, Wang Peiyi. 2021. Scheme of acid washing to heat reservoirs in geothermal wells reconstructed from abandoned wells in oilfields [J]. *Geology and Exploration*, 57(2):430-438 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Gao Jun, Zhang Baojian, Xing Yifei, Zhang Wei, Ma Feng. 2020. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7):1970-1980 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, Zhang Wei. 2020. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lei. 2023. Simulation on parameters optimization of middle deep sandstone heat storage and recharge wells [J]. *Science Technology and Engineering*, 23(5):1823-1832 (in Chinese with English abstract).
- Wang Siqi, Zhang Baojian, Li Yan, Xing Yifei, Yuan Wenzhen, Li Jun, Gao Jun, Zhao Tian. 2021. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the northeast of Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3):12-21 (in Chinese with English abstract).
- Ye Zhiwei. 2022. Study on heat extraction and thermal mass migration in heterogeneous geothermal reservoirs [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology: 1-153 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Delong, Guo Qiang, Yang Peng, Lu Tong, Wu Shuo, Weng Wei, Liu Baolin. 2022. Progress in research and application of drilling speed-up technology for granite formation in geothermal wells[J]. *Geology and Exploration*, 58(5): 1082-1090 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 46(2): 255-268 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhen, Qin Guangxiang, Luo Yinfei, Chao Jiahao, Geng Songhe, Zhang Liang. 2021. Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(5): 193-204 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Huixing, Xu Tianfu, Feng Guan hong, Yuan Yilong, Jiang Zhenjiao. 2017. Numerical modeling of the performance of the CO₂-plume geothermal system in a permeability and porosity heterogeneous reservoir [J]. *Acta Energetica Sinica*, 38(7): 1814-1821 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Siyu, Cao Jiawen, Feng Chengjun, Wang Jiming, Meng Jing, Qi Bangshen, Zhang Peng. 2023. Study on fault-slip potential induced by water injection in the deep thermal reservoir of the Gaoyang low uplift, Hebei Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 29(2): 220-235 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xi, Wang Guiling, Ma Feng, Lin Wenjing, Zhang Wei, Zhang Baojian, Jia Xiaofeng, Zhang Hanxiong. 2023. Evaluation of geothermal resources of the Xiong'an New Area [J]. *Earth Science*, 48(3): 1093-1106 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 曹倩, 方朝合, 李云, 王汉雄, 方群, 史向阳. 2021. 国内外地热回灌发展现状及启示[J]. *石油钻采工艺*, 43(2): 203-211.
- 陈莹, 王攀科, 吴焯等, 马青坡, 于丽, 上官锐. 2022. 河南兰考地区地热回灌影响因素分析及对策[J]. *钻探工程*, 49(6): 146-152.
- 丁蕊, 朱传庆, 曹倩, 方朝合, 杨亚波, 江晓雪. 2023. 河间潜山地热资源开发方案数值模拟[J]. *地球学报*, 44(1): 248-256.
- 董月霞, 黄红祥, 任路等, 李洪达, 杜志强, 鄂俊杰, 王琦, 张晓明. 2021. 渤海湾盆地北部新近系馆陶组地热田特征及开发实践——以河北省唐山市曹妃甸地热供暖项目为例[J]. *石油勘探与开发*, 48(3): 666-676.
- 冯波, 柯尊嵩, 刘彦广, 上官拴通, 李翔, 崔振鹏. 2022. 增强型地热系统储层堵塞机理及解堵技术进展[J]. *天然气工业*, 42(12): 165-183.
- 冯守涛, 王成明, 杨亚宾, 宋伟华, 刘帅, 赵季初. 2019. 砂岩热储回灌对储层影响评价——以鲁西北拗陷地热区为例[J]. *地质学报*, 93(S1): 158-167.
- 黄文博, 陈继良, 蒋方明. 2014. 热储分层影响EGS采热的数值模拟研究[J]. *新能源进展*, 2(4): 295-304.
- 霍超, 林倚天, 李刚, 张建强, 潘海洋, 赵岳, 王丹丹. 2023. 碳中和背景下中国地热资源勘查技术研究进展[J]. *科学技术与工程*, 23(12): 4917-4927.
- 林建旺, 赵苏民. 2010. 天津地区馆陶组热储回灌量衰减原因探讨[J]. *水文地质工程地质*, 7(5): 133-136.
- 刘东义, 杨霄, 韩鑫, 等. 2024. 基于时序参数分析的砂岩热储回灌特征变化研究——以山东临清市为例[J]. *地质与勘探*, 60(3): 610-621.
- 刘现川, 刘仕娟, 杨风良. 2018. 高阳县地热资源评价[J]. *煤炭技术*, 37(4): 44-46.
- 刘伟坡, 安永会, 吴玺, 沙娜, 付雷. 2013. 保定市高阳县地热资源开发利用现状[J]. *科技创新导报*, (2): 104.
- 李志成, 申娴达. 2014. 息烽新梦地热井成因浅析[J]. *地质与勘探*, 50(6): 1155-1159.
- 马晓东. 2020. 砂岩孔隙型地热资源高效勘查成井[J]. *地质与勘探*, 56(1): 173-181.
- 王刚, 宋佳, 王盼盼, 秦国强. 2022. 浅层地热能开发回灌井施工技术研究——以郑州市东、西部新城区为例[J]. *钻探工程*, 49(6): 153-161.
- 毛翔, 汪新伟, 郭世炎, 鲍志东. 2021. 高阳地热田及邻区地热资源形成机制[J]. *中国岩溶*, 40(2): 273-280.
- 沈俊超, 王学工, 贾兰凤, 公利华. 2004. 冀中拗陷-黄骅拗陷馆陶组热储发育差异性及其成井条件[J]. *水文地质工程地质*, (3): 40-43.
- 申小龙, 李浩, 王伟等, 成舟颖. 2022. 关中西部眉县城区地热井回灌试验Q-p曲线方程探究[J]. *煤田地质与勘探*, 50(6): 165-174.
- 苏玉娟. 2022. 松辽盆地典型地热田成因机制及合理开发利用研究[D]. 长春: 吉林大学: 1-159.
- 王贵玲, 高俊, 张保健, 邢一飞, 张薇, 马峰. 2020. 雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J]. *地质学报*, 94(7): 1970-1980.
- 王登峰, 王培义. 2021. 油田废弃井改造成地热井的水层酸洗方案研究[J]. *地质与勘探*, 57(2): 430-438.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. *地质前缘*, 27(1): 1-9.
- 王磊. 2023. 中深层砂岩热储回灌井参数优化模拟[J]. *科学技术与工程*, 23(5): 1823-1832.
- 王思琪, 张保健, 李燕燕, 邢一飞, 袁文真, 李郡, 高俊, 赵甜. 2021. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制[J]. *地质科技通报*, 40(3): 12-21.
- 叶志伟. 2022. 非均匀热储工质载热运移机理与热能抽采理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学: 1-153.
- 张德龙, 郭强, 杨鹏, 卢彤, 吴焯, 翁炜, 刘宝林. 2022. 地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与应用进展[J]. *地质与勘探*, 58(5): 1082-1090.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. *中国地质*, 46(2): 255-268.
- 赵振, 秦光雄, 罗银飞, 晁嘉豪, 耿松鹤, 张亮. 2021. 西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险[J]. *水文地质工程地质*, 48(5): 193-204.
- 朱慧星, 许天福, 封官宏, 袁益龙, 姜振蛟. 2017. 孔渗非均质性对CO₂羽流地热系统功能影响数值模拟研究[J]. *太阳能学报*, 38(7): 1814-1821.
- 朱思雨, 曹佳文, 丰成君, 王继明, 孟静, 戚帮申, 张鹏. 2023. 河北高阳低凸起深部热储层回灌注水诱发断层失稳危险性探讨[J]. *地质力学学报*, 29(2): 220-235.
- 朱喜, 王贵玲, 马峰, 藺文静, 张薇, 张保健, 贾小丰, 张汉雄. 2023. 雄安新区地热资源潜力评价[J]. *地球科学*, 48(3): 1093-1106.

The Effect of Plane Heterogeneity on the Reinjection Flow of Geothermal Reservoir: A Case Study of the Guantao Formation in Baoding City

WANG Teng^{1,2}, HU Jinghong^{1,2}, LIU Changyuan^{1,2}, GAO Zhiqian^{1,2}, TANG Xuan^{1,2}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083; 2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083)

Abstract: In the process of geothermal reinjection, some geothermal fields are facing shutdown due to the reinjection water flow being much smaller than the designed. This work took a block of Guantao Formation geothermal reservoir in Baoding City as the research area in order to solve the problem of lower water injection during the reinjection process. Numerical simulation software was used to couple the thermal field with fluid dynamic field, and numerical simulation calculations were carried out for four different non-homogeneous strata to establish the evaluation method of maximum reinjection flow rate. The results show that the maximum reinjection water flow decreases with the intensification of planar heterogeneity, and the reinjection effect decreases as low as 35% of that in homogenous strata. The planar heterogeneity in the area between reinjection and production wells can affect reinjection effectiveness by 20% to 65%. This method can reasonably adjust the planar heterogeneity and reinjection flow rate, and effectively ensure the reinjection performance, which can be extended to other reservoirs with similar geological conditions.

Key words: plane heterogeneity, geothermal reinjection, sandstone geothermal reservoir, numerical simulation, Guantao Formation, Baoding City