

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.03.14

引用格式: 刘帅,冯守涛,刘志涛,等.层状热储地热井权益保护半径计算探讨[J].中国地质调查,2020,7(3):104-108.

层状热储地热井权益保护半径计算探讨

刘帅^{1,2}, 冯守涛^{1,2}, 刘志涛^{1,2}, 黄松^{1,2}, 黄星^{1,2}, 朱利民^{1,2}

(1. 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院),德州 253015;
2. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心,德州 253015)

摘要:为保证地热资源的可持续开采,防止地热尾水回灌时发生热突破现象,文章系统整理了地热井权益保护半径的计算方法。通过理论推导,发现开采井权益保护半径的计算方法有3个不足之处:(1)公式中参数 f 定义为水比热与热储岩石比热的比值,存在缺陷;(2)热储回收率取值0.15,较为片面,不能代表不同岩性热储回收率的取值;(3)计算时间固定为36 500 d,较为片面,不适用于地热井间歇开采期。针对上述问题,该文重新给定了参数 f 的定义,并将热储回收率和开采时间以变量符号替代,可根据不同热储层和具体开采时间加以确定。通过研究不同回灌井权益保护半径计算方法的适用条件,提出应根据 $(\beta^{-1} - \alpha)$ 与 3λ 的大小关系选择不同的计算公式。对开采井和回灌井权益保护半径计算公式进行对比,发现开采井权益保护半径恒大于回灌井权益保护半径,并以德城区水文家园开采系统和回灌系统为例进行计算,验证了理论推导的结果。

关键词:层状热储;地热井权益保护半径;计算公式;对比分析

中图分类号: P314.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2020)03-0104-05

0 引言

积极推进冬季清洁能源取暖是改善空气质量的重要措施之一,地热资源作为集热能和水资源为一体的可再生新能源和清洁能源,具有清洁环保、储量大、分布广、易开发、利用成本低、稳定可靠等优点,其开发利用受到越来越多学者们的关注^[1-4]。20世纪90年代以来,地热资源开发利用发展迅猛,形成了以天津、陕西、河北、山东为代表的地热供暖区和以北京、东南沿海为代表的温泉旅游与疗养等中深层地热资源直接利用区。至2015年底,全国水热型地热能供暖面积达1.02亿 m^2 ^[5],实现年替代煤290万t,减排二氧化碳750万t,对减轻北方地区冬季雾霾发挥了积极作用。

地热资源大规模集中开采将导致地热水压力不断下降,形成不同规模的地热水降落漏斗,从而影响地热资源的有效开发与利用,地热尾水回灌是解决以上问题的有效途径^[6-7]。但由于采、灌井布

局不合理,在回灌过程中可能会发生热突破现象,造成开采井水温降低,达不到供暖效果。因此,研究地热开采井和回灌井的合理化布局非常重要。

地热井权益保护半径是指以地热井(开采井或回灌井)为中心的圆形区域半径,在这个圆形区域内,在整个开采(回灌)期内,地热井按可开采量正常开采(回灌),地热产出量与流体温度都不会受开采(回灌)的影响。地热井权益保护半径分为开采井权益保护半径和回灌井权益保护半径。地热井权益保护半径为确定开采井和回灌井合理化布局提供了量化依据。

《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》^[8]明确提出了单井开采权益保护半径的概念和计算方法,但在实际工作中发现, f (水比热与热储岩石比热的比值)的定义及给定参考值不太合理,从而造成开采井权益保护半径计算结果往往超出了批复的矿权范围,导致地方政府、地热开发主管部门及社会公众产生疑虑:是开采井权益保护半径的计算结果偏大,还是批复的矿权范围太小?计

收稿日期: 2019-08-15; 修订日期: 2019-11-27。

基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局“山东省地热系列标准编制(鲁地字[2019]34号,编号: KY201945)”项目资助。

第一作者简介: 刘帅(1989—),男,工程师,主要从事地热地质研究工作。Email: 332182068@qq.com。

通信作者 冯守涛(1978—),男,高级工程师,主要从事地热地质研究工作。Email: 515631333@qq.com。

算结果不能对地热资源的合理开发、利用起到技术指导作用。此外,随着地热尾水回灌工作的大规模开展,一些学者也提出了不同的回灌井权益保护半径的计算公式^[9-11],但并未列出适用条件,计算结果以谁为准也有待商榷。为保证地热资源的可持续开发及利用,本文参照以往研究成果,给出了明确的开采井和回灌井权益保护半径的计算公式。

1 开采井权益保护半径

1.1 现有计算方法

《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》^[8]给出了单井开采权益保护半径的定义及计算方法,计算公式为

$$R_{\text{采}} = \sqrt{\frac{36\,500Qf}{0.15H\pi}}, \quad (1)$$

式中: $R_{\text{采}}$ 为地热井开采 100 a 排出热量对热储的影响半径, m; Q 为地热水可开采量, m^3/d ; f 为水比热与热储岩石比热的比值, 为 3 ~ 5; H 为热储层厚度, m。

1.2 原理分析

《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》^[8]给出的开采井权益保护半径公式是根据热量均衡原理推导得出的, 即地热井开采热量 = 热储层损失的热量。若已知物体比热, 可根据公式(2)推导出物体的放热量, 计算方法为

$$Q_{\text{热}} = cm\Delta t, \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{热}}$ 为物体放出(吸收)的热量, MJ; c 为物体比热, $\text{MJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m 为物体质量, kg; Δt 为温度差, $^\circ\text{C}$;

因此, 地热井开采热量可表示为 $c_{\omega}(\rho_{\omega}Qt)(T_1 - T_0)$, 一定范围内热储层损失的热量可表示为 $c_{\alpha}(\lambda\rho_{\alpha}\pi R_{\text{开}}^2H)(T_1 - T_0)$, 则存在以下数学关系式

$$\begin{cases} Q_{\text{采}}t\rho_{\omega}c_{\omega}(T_1 - T_0) = \pi R_{\text{采}}^2H\lambda\rho_{\alpha}c_{\alpha}(T_1 - T_0) \\ \rho_{\alpha}c_{\alpha} = n\rho_{\omega}c_{\omega} + (1-n)\rho_{\text{r}}c_{\text{r}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{采}}$ 为地热水可开采量, m^3/d ; λ 为热储回收率, 无量纲, 松散岩类孔隙热储回收率取值 0.25, 岩溶裂隙热储回收率取值 0.15^[12]; H 为地热井利用热储厚度, m; t 为地热井开采总天数, d; $R_{\text{采}}$ 为开采井权益保护半径, m; $\rho_{\omega}c_{\omega}$ 为流体密度与比热的乘

积, $\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $\rho_{\alpha}c_{\alpha}$ 为热储层平均密度与平均比热的乘积, $\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $\rho_{\text{r}}c_{\text{r}}$ 为岩石密度与比热的乘积, $\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; n 为有效孔隙度, 无量纲; T_1 为开采井流体温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为基准温度, 一般取恒温层温度或多年平均气温, $^\circ\text{C}$ 。

由此得出开采井权益保护半径计算公式为

$$R_{\text{采}} = \sqrt{\frac{tQ_{\text{采}}(\rho_{\omega}c_{\omega})}{\pi\lambda H(\rho_{\alpha}c_{\alpha})}}, \quad (4)$$

式中符号含义同公式(3)。

1.3 存在的问题

通过对比公式(1)和公式(4), 发现公式(1)存在以下 3 个问题。

(1) 公式(1)中 f 为水比热与热储岩石比热的比值, 即 c_{ω}/c_{r} , 不合适, 应改为 $\rho_{\omega}c_{\omega}$ 与 $\rho_{\alpha}c_{\alpha}$ 的比值。

(2) 公式(1)中的 0.15 指的是热储回收率, 但不同岩性的热储回收率取值并不相同, 《DZ 40—85 地热资源评价方法》^[12]中给出松散岩类孔隙热储回收率取值 0.25, 岩溶裂隙热储回收率取值 0.15, 中生代砂岩和花岗岩等火成岩类热储回收率根据裂隙发育情况取值 0.05 ~ 0.1。因此, 公式(1)中规定热储回收率取值 0.15 比较片面。

(3) 公式(1)中的 36 500 指的是 100 a 的开采天数, 但绝大部分地热井只在冬季供暖时使用, 开采天数一般为 120 d/a, 100 a 开采天数应为 12 000 d。

综上, 公式(4)推导过程合理, 表达更为准确、清晰, 可根据不同热储层及具体开采时间, 计算合理的开采井权益保护半径。因此, 建议利用公式(4)进行开采井权益保护半径的计算。

2 回灌井权益保护半径

进行回灌井权益保护半径计算时, 在未发生热突破的情况下, 存在以下两种假设情况: 开采井和回灌井相距较近时, 可将开采井和回灌井看作一个整体系统; 开采井和回灌井相距较远时, 回灌井可看作一个相对独立的系统。

2.1 开采和回灌系统

当开采井和回灌井相距较近时, 可将开采井和回灌井作为一个整体系统, 假设除了开采和回灌的热量外, 系统与外界没有能量交换。此种情况下, 刘志明等^[9-10]推导出以下公式

$$\left\{ \begin{aligned} R_{\text{回}} &= \sqrt{1 - \alpha\beta} \times \sqrt{\frac{Q_{\text{采}} t(\rho_{\omega} c_{\omega})}{\pi \lambda H(\rho_{\alpha} c_{\alpha})}} \\ \alpha &= \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0} \\ \beta &= \frac{Q_{\text{回}}}{Q_{\text{采}}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: $R_{\text{回}}$ 为回灌井权益保护半径, m; $Q_{\text{回}}$ 为地热水回灌量, m^3/d ; T_2 为回灌水温度, $^{\circ}\text{C}$; 其他符号含义同公式(3)。

2.2 回灌单系统

当开采井和回灌井井距较大时, 可将回灌井看作一个独立系统。Gringarten 等^[11]研究发现, 回灌水吸收的热量等于热储层补给的热量。假设回灌井向热储最高温度过渡为线性, 则存在以下公式

$$Q_{\text{回}} t \rho_{\omega} c_{\omega} (T_1 - T_2) = \int_0^{R_{\text{回}}} 2\pi x H(\rho_{\alpha} c_{\alpha}) (T_1 - (T_2 + \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{回}}} x)) dx \quad (6)$$

整理后获得的公式为

$$R_{\text{回}} = \sqrt{\frac{3tQ_{\text{回}} \rho_{\omega} c_{\omega}}{\pi H \rho_{\alpha} c_{\alpha}}} \quad (7)$$

式中: x 为地热水流方向上某一点距回灌井底部平面投影的距离, m; 其他符号含义同公式(5)。

2.3 回灌井权益保护半径的确定

根据开采井和回灌井距离的远近, 分别对采、灌系统和回灌单系统进行了回灌井权益保护半径计算公式的推导, 由于二者界定值的不确定性, 按保守性原则, 应分别按公式(5)、公式(7)进行计算, 取较大值作为回灌井权益保护半径。二者计算结果均为正数, 将公式(5)和公式(7)做除法运算, 得出以下公式

$$\frac{\sqrt{1 - \alpha\beta} \times \sqrt{\frac{Q_{\text{采}} t(\rho_{\omega} c_{\omega})}{\pi \lambda H(\rho_{\alpha} c_{\alpha})}}}{\sqrt{\frac{3tQ_{\text{回}} \rho_{\omega} c_{\omega}}{\pi H \rho_{\alpha} c_{\alpha}}}} = \sqrt{\frac{1}{3\lambda} \times (\frac{Q_{\text{采}}}{Q_{\text{回}}} - \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0})} \quad (8)$$

式中符号含义同公式(5)。

因此, 对于层状热储, 当 $(\beta^{-1} - \alpha) > 3\lambda$ 时, 公式(8)大于 1, 回灌井权益保护半径取较大值, 应按公式(5)计算; 当 $(\beta^{-1} - \alpha) < 3\lambda$ 时, 公式(8)小于

1, 回灌井权益保护半径取较大值, 应按公式(7)计算。

2.4 开采井与回灌井权益保护半径对比

将上述所确定的开采井和回灌井权益保护半径计算公式进行对比计算。

(1) 公式(5)和公式(4)进行对比。由于 $0 \leq \sqrt{1 - \alpha\beta} \leq 1$, 则存在公式(4)恒大于公式(5)。

(2) 公式(7)和公式(4)进行对比。对公式(7)和公式(4)进行除法运算, 得出以下公式

$$\frac{\sqrt{\frac{3tQ_{\text{回}} \rho_{\omega} c_{\omega}}{\pi H \rho_{\alpha} c_{\alpha}}}}{\sqrt{\frac{Q_{\text{采}} t(\rho_{\omega} c_{\omega})}{\pi \lambda H(\rho_{\alpha} c_{\alpha})}}} = \sqrt{\frac{3\lambda Q_{\text{回}}}{Q_{\text{采}}}} \quad (9)$$

式中符号含义同公式(5)。

在地热尾水回灌过程中, 回灌量必定 $\leq$ 开采量, 则 $Q_{\text{回}}/Q_{\text{采}} \leq 1$, λ 取值 0.15 或 0.25, 公式(9)恒小于 1。因此, 公式(7)计算得出的回灌井权益保护半径 $R_{\text{回}}$ 恒小于公式(4)计算得出的开采井权益保护半径 $R_{\text{采}}$ 。

综上, 开采井权益保护半径恒大于回灌井权益保护半径。

3 计算实例

3.1 研究区概况

德城区为山东省德州市的中心城区, 北依京津地区, 南靠济南, 地处天津滨海新区和环渤海经济圈, 总面积为 231 km^2 。该区主要开采热储为馆陶组孔隙型沉积盆地碎屑岩孔隙-裂隙热储, 地表无热流显示, 地热资源类型属热传导型。底板埋深 $1\,200 \sim 1\,800 \text{ m}$, 坳陷区中心埋深较深, 厚度大, 四周埋深较浅, 厚度薄。热储岩性主要为细砂岩、粗砂岩、含砾砂岩和砂砾岩。热储厚度为 $80 \sim 120 \text{ m}$, 占地层厚度的 $37\% \sim 45\%$, 在取水段 $1\,000 \sim 1\,500 \text{ m}$ 深度内, 单井出水量为 $70 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ 。热水矿化度为 $6 \sim 10 \text{ g/L}$, 水化学类型为 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型, 井口水温为 $45 \sim 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 属低温地热资源中的温热水-热水型地热资源^[13-15]。

3.2 计算参数

根据岩性, 热储层岩石的密度和比热采用《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》^[8]中给出的经验值。热储层厚度、回灌前温度和抽水量

采用山东省地勘局第二水文地质工程地质大队在德城区建设的砂岩热储尾水回灌示范工程(水文家园小区)中获取的数据。具体计算参数见表1。

表1 地热井权益保护半径计算参数

Tab.1 Calculation parameters of the rights protection radius of the thermal well

热储层名称	$Q_{采}/(m^3 \cdot d^{-1})$	$Q_{回}/(m^3 \cdot d^{-1})$	H/m	$\rho_w/(kg \cdot m^{-3})$	$c_w/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$\rho_r/(kg \cdot m^{-3})$
馆陶组	1 560	1 560	150	1 000	4 180	2 600
热储层名称	$c_r/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	n	$T_1/(^\circ C)$	$T_2/(^\circ C)$	$T_0/(^\circ C)$	t/d
馆陶组	878	0.3	54	32	13	12 000

3.3 计算结果及讨论

(1) 开采井权益保护半径。按照《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》^[8]提出的公式(1)和本文提出的公式(4),得出开采井权益保护半径分别为1 958.82 m和482.71 m。公式(1)计算结果远大于地热井开采实际影响范围,且远大于地热矿区批复范围;公式(4),计算结果贴近地热井开采实际影响范围,比较合理。

(2)回灌井权益保护半径。经计算, $(\beta^{-1} - \alpha) = 0.54 (< 3\lambda)$ 。因此,回灌井权益保护半径按公式(7)进行计算,结果为418.04 m。为验证结果的准确性,回灌井权益保护半径按公式(5)和公式(7)分别进行计算,结果为353.59 m和418.04 m,取较大值,为418.04 m。因此,根据 $(\beta^{-1} - \alpha)$ 与 3λ 的大小关系确定回灌井权益保护半径计算公式的结论正确。

此外,根据计算结果,回灌井权益保护半径为418.04 m,小于开采井权益保护半径482.71 m。因此,提出的“开采井权益保护半径恒大于回灌井权益保护半径”的结论正确。

4 结论

(1)地热资源开采存在回灌井时,应分别计算开采井和回灌井的权益保护半径。

(2)参照《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》中的规定,对开采井权益保护半径计算公式进行了优化,重新给定了参数 f 的定义,并将热储回收率和开采时间以变量符号替代,可根据不同

热储层和具体开采时间加以确定。

(3)对采、灌系统和回灌单系统分别进行了回灌井权益保护半径计算公式的推导,按保守性原则,应取2个计算结果的较大值。当 $(\beta^{-1} - \alpha) > 3\lambda$ 时,回灌井权益保护半径按公式(5)进行计算;当 $(\beta^{-1} - \alpha) < 3\lambda$ 时,回灌井权益保护半径按公式(7)进行计算。

(4)由公式对比与实例计算得出,开采井权益保护半径恒大于回灌井权益保护半径。

参考文献:

[1] 崔煜烽,张杰,殷焘,等. 鲁东地区地热资源分布规律及勘查定井方法探讨[J]. 中国地质调查,2018,5(2):86-92.

[2] Kang F X. Sustainable yield and its assessment of geothermal reservoirs in China[J]. GRC Trans,2013,37(4):843-852.

[3] 杨询昌,康凤新,王学鹏,等. 砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理——鲁北馆陶组热储典型案例[J]. 地质学报,2019,93(3):738-750.

[4] 王浩,赵季初. 鲁西北平原区地热资源开发对地下水环境的影响[J]. 山东国土资源,2015,31(7):36-39.

[5] 国家发展和改革委员会,国家能源局,国土资源部. 地热能开发利用“十三五”规划[EB/OL]. (2017-01-23). http://www.nea.gov.cn/136035635_14863708180701n.pdf.

[6] He M C, Liu B, Yao L H, et al. Study on the theory of seepage field for geothermal single well reinjection[J]. Acta Energ Solar Sin,2003,24(2):197-201.

[7] 朱家玲,朱晓明,雷海燕. 地热回灌井间压差补偿对回灌效率影响的分析[J]. 太阳能学报,2012,33(1):56-62.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社,2010.

[9] 刘志明,梁继运,刘春雷. 地热回灌条件下流体可采量评价方法[J]. 地下水,2016,38(2):61-63.

[10] 刘志明,王贵玲,蒯文静. 地热回灌条件下单井开采权益保护半径的计算[J]. 地下水,2014,36(6):72,75.

[11] Gringarten A C, Sauty J P. A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow[J]. J Geophys Res, 1975,80(35):4956-4962.

[12] 中华人民共和国地质矿产部. DZ 40—85 地热资源评价方法[S]. 北京:中国标准出版社,1992.

[13] 王彦俊,王贞国,王岩,等. 德州市地热资源开发与保护[J]. 山东国土资源,2005,21(5):31-35.

[14] 张平平,王秀芹. 回灌水温对砂岩热储回灌效果的影响分析——以德州市地热田馆陶组热储为例[J]. 山东国土资源, 2015,31(6):64-67.

[15] 周训,陈明佑,赵维明. 深层地下热水钻井井内动水位升高值的计算[J]. 勘察科学技术,2000(5):33-35.

Discussion on the calculation of the rights protection radius of the geothermal well for stratified thermal reservoir

LIU Shuai^{1,2}, FENG Shoutao^{1,2}, LIU Zhitao^{1,2}, HUANG Song^{1,2}, HUANG Xing^{1,2}, ZHU Limin^{1,2}

(1. No. 2 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources (Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou 253072, China; 2. Geothermal Resources and Reinjection Research Center of Shandong Province, Dezhou 253072, China)

Abstract: In order to ensure the sustainable exploitation of geothermal resources and prevent the occurrence of thermal breakthrough during the process of geothermal water reinjection, the authors systematically summarized the calculation formulas of the rights protection radius of the geothermal well in this paper. Three shortcomings in the calculation method of the rights protection radius of the geothermal well were identified through theoretical derivation. (1) The parameter f , which is defined as the ratio of the specific heat of water to that of thermal reservoir rocks, is defective. (2) The value of the thermal reservoir recovery rate defined as 0.15 is relatively unilateral, which is not applicable for geothermal wells with different lithology. (3) The calculation time is fixed as 36 500 d, which is not appropriate for geothermal wells with interval development. Based on the problems above, the authors redefined the parameter f and used variables to replace the previous thermal reservoir recovery rate and exploitation time, which can be identified according to different thermal reservoirs and specific exploitation time. By comparison of the applicable conditions of different calculation formulas of the rights protection radius of the geothermal well, the authors proposed that different calculation formulas should be chosen based on the relationship of the size between $\beta^{-1} - \alpha$ and 3λ . And by comparison of the rights protection radius calculation formulas for the mining well and the recharge well, it is found that the rights protection radius of the mining well is always bigger than that of the recharge well. Finally, Shuiwen residential area of Decheng district was taken as an example to verify the theoretical results.

Keywords: stratified thermal reservoir; rights protection radius of the geothermal well; calculation formula; comparative analysis

(责任编辑: 刘丹)

=====

著作权使用声明

本刊已许可中国知网、万方数据—数字化期刊群、维普中文电子期刊数据库、超星中文电子期刊数据库、北京中邮阅读网、博看网,等等,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含以上数据库及宣传平台著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。