

# 鄂尔多斯油区低温废弃井改造地热井换热参数

颜世龙<sup>1,2</sup>, 余华贵<sup>1,3</sup>, 王鹏<sup>4</sup>, 刘石<sup>1,2</sup>, 温洋<sup>1,2</sup>, 高千<sup>1,2</sup>

(1. 西安石油大学新能源学院, 西安 710065; 2. 西安石油大学石油工程学院, 西安 710065;  
3. 油气田智慧能源与碳中和陕西省高校工程研究中心, 西安 710065; 4. 安东石油技术(集团)有限公司, 北京 100102)

**摘要:** 为有效激活油田休眠资产, 将废弃油气井改造成为同轴套管式换热器提取地热能, 实现能源的接替开发, 以陕北定边县某废弃油井为研究对象, 运用开源多场物理数值模拟软件 OpenGeoSys 的地理管换热模块对其进行换热性能研究, 分析不同循环流量、换热内管直径、换热功率和换热周期等参数对改造井换热性能的影响。结果表明: 换热功率一定时, 15 m<sup>3</sup>/h 的流量既能得到较高的出口水温, 又能保证换热器的长期稳定运行; 换热功率一定时, 直径不同的内管出口端水温的变化幅度仅 0.17 °C; 延米换热功率每增加 50 W, 供暖季季末出口水温降低约 17.55 °C, 平均降幅 0.35 °C/W; 换热功率一定时, 供暖季时长每增加 1 个月, 年最低出口端温度下降幅度增加约 1 °C; 供暖季时长为 4、5、6、7、8 个月时, 供暖季出口端水温进入准稳态所需时间分别为 15、18、21、24、27 年。推荐在鄂尔多斯盆地地区废弃油气井采样同轴套管换热器提取地热能时, 采用每年取热时间为 5 个月, 关井时间为 7 个月的换热周期, 循环流量为 15 m<sup>3</sup>/h, 延米换热功率为 100 W。

**关键词:** 油井改地热井; 同轴换热管; 换热性能

**中图分类号:** TE09 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0009-07

地热能是近年来受到广泛关注的可再生能源, 因其绿色、环保、储量大、分布广泛等优点, 逐渐受到越来越多的重视<sup>[1]</sup>。在“双碳”目标下, 开发地热能可在调整能源结构和推进生态文明建设方面具有重大现实及战略意义<sup>[2]</sup>。鄂尔多斯盆地是中国重要的能源矿产基地, 是油气储量、产量增长最快的区域, 其油气资源主要为低渗透资源, 井网加密、反复改造是低渗透油气藏开发的主要手段, 造成了低渗透油气田总井数、废弃井数量双高。盆地内油区地温梯度普遍小于 3 °C/100 m, 地热资源以中低温岩热型地热为主<sup>[3]</sup>, 资源化利用油气田废弃井是中国未来能源开发中亟须解决的问题。将已不具备油气生产条件的油井改造成地热井, 不仅可以最大限度地开发地下能源, 还能在地热能资源开发过程中节约大量的钻井费用, 而且在一定程度上对当地的环境污染和安全隐患可以进行有效治理<sup>[4]</sup>。

鄂尔多斯盆地油气储层物性条件差, 孔隙度、渗透率双低, 热对流效果差, 可采用增强型地热系统 (enhanced/engineered geothermal systems, EGS)、井下换热器 (borehole heat exchanger, BHE) 等方法进行地热能开采。相比于 EGS, BHE 不需要进行水力压裂, 一方面避免了低渗透储层改造的复杂性和不确定性<sup>[4]</sup>, 另一方面, 油气井在生产周期中数据记录可以为改造后的地热井提供井史参数, 将大大降低地热井的工程风险。鄂尔多斯盆地油气井固有的深度对应了中深层地热的深度, 废弃井原有的井筒装置可作为中深层同轴套管式地理管换热器的外管, 回填材料也无法更换, 改造工程的关键在于确定可改变的参数, 如中心管的尺寸及其物理性能、换热工质及其换热效率、换热与蓄热的周期等<sup>[5]</sup>。

目前, 在中深层套管式地理管换热器换热参数

**收稿日期:** 2024-06-17

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (52174029)

**作者简介:** 颜世龙 (2000—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为地热能开发; 通信作者余华贵 (1979—), 女, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 研究方向为地热能开发、碳利用与封存; 王鹏 (1998—), 男, 陕西汉中, 硕士, 研究方向为同心管换热器、废弃油井换热; 刘石 (1999—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为二氧化碳封存、地热方面数值模拟; 温洋 (2002—), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为二氧化碳示踪与检测; 高千 (1984—), 男, 湖北仙桃人, 工学博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为地热开采、油气开采等领域中与岩石力学相关问题。

的研究中,换热器的尺寸、材料、换热介质等均是可变参数<sup>[6]</sup>,在指导新井部署中意义较大。李娟等<sup>[7]</sup>通过套管式和双“U”型换热器换热性能对比研究,提出延米换热量与管内流速有很大关系,套管式换热器推荐使用的经济流速须从大量的实验或者模拟计算中取得,并结合经济性分析得以确定。刘洪涛等<sup>[8]</sup>通过模拟设计参数对中深层套管式埋管长期换热性能的影响,认为埋管深度越大,换热器取热功能下降的比例越低。蒋坤卿等<sup>[9]</sup>则提出同轴开式换热器的换热性能优于常规闭环结构的埋管换热器,并指出开式换热器的换热功率与孔径、岩石导热系数、含水层渗透率正相关。2022年3月,长庆油田第一口长停井已成功改造为地热井<sup>[10]</sup>,标志着鄂尔多斯盆地油气田长停井改造地热井进入工程实践阶段。本文抽象化了该井及邻区多口废弃井的数据,利用 OpenGeoSys (OGS) 模拟器建立数学模型研究不同因素对换热性能的影响<sup>[11]</sup>,并提出了改造井 1 年中运行 5 个月,关停恢复 7 个月的建议,以期为将来类似油藏废弃井改造提供参考与指导。

## 1 控制方程与数值模型建立

### 1.1 数值模拟原理

OpenGeoSys (OGS) 是由德国亥姆霍兹环境研究中心 (UFZ) 作为研发主体,开发的一款开源软件,至今已有 30 多年的开发历史,并被分别应用于核废物处置、水污染分析、CO<sub>2</sub> 封存和地热能开发利用等多个项目中。

基于有限元原理,将地层和井内套管分别作为两个相互耦合的连续介质。在地层中,存在热传导与热对流,控制方程<sup>[12]</sup>为

$$\frac{\partial}{\partial t} [\epsilon^s \rho^f c^f + (1 - \epsilon^s) \rho^s c^s] T_s + \nabla \cdot (\rho^f c^f v T_s) - \nabla \cdot (\Lambda^s \cdot \nabla T_s) = H_s \quad (1)$$

式中: $T_s$  为地层温度; $\epsilon^s$  为岩石(土)的孔隙度; $\rho^f$  为流体的密度; $\rho^s$  为岩石(土)的密度; $c^f$  为流体 f 的比热容; $c^s$  为岩石(土)的比热容; $v$  为给定地下水的 Darcy 流速; $\Lambda^s$  为水动力作用下的热量扩散系数; $H_s$  为热量生成或者消耗的源汇项。

地层和套管之间存在热交换,上述控制方程的边界条件为

$$-(\Lambda^s \cdot \nabla T_s) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{q}_{nT_s} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{q}_{nT_s}$  为地层和井内套管间的热流密度。

对换热器中的上、下行管路( $k$  为换热器的换热系数, $k=i, o$ )部分,其控制方程为

$$\rho^r c^r \frac{\partial T_k}{\partial t} + \rho^r c^r \mathbf{u} \cdot \nabla T_k - \nabla \cdot (\Lambda^r \cdot \nabla T_k) = H_k \quad (3)$$

式中: $r$  代表循环水; $\mathbf{u}$  代表循环水的流速。

式(3)的边界条件为

$$-(\Lambda^r \cdot \nabla T_k) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{q}_{nT_k} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}$  为垂直于边界表面的单位向量;循环水的水动力热扩散系数  $\Lambda^r$  定义为

$$\Lambda^r = (\lambda^r + \rho^r c^r \beta_L \|\mathbf{u}\|) \delta \quad (5)$$

式中: $\rho^r$  为循环水密度; $\delta$  为厚度; $\beta_L$  为气相与固相导热系数之比; $\lambda^r$  为导热率; $c^r$  为循环水比热容。

管道周围的水泥环透水性差,忽略其热对流过程,则有控制方程为

$$(1 - \epsilon^g) \rho^g c^g \frac{\partial T_k}{\partial t} - \nabla \cdot [(1 - \epsilon^g) \lambda^g \cdot \nabla T_k] = H_k \quad (6)$$

式中:上标 g 表示水泥环。

式(6)的边界条件为

$$-[(1 - \epsilon^g) \lambda^g \cdot \nabla T_k] \cdot \mathbf{n} = \mathbf{q}_{nT_k} \quad (7)$$

利用有限元方法、OGS 软件构建地下换热器模块对上述控制方程组进行离散并求解。在理论分析的基础上,Beier<sup>[13]</sup>推导了可用于深井换热模型的解析解,该解析解考虑了井管中热量的运移以及井管周围岩土体温度的瞬态变化。该解析解基于下列假定:①岩土体初始温度均匀分布;②井管换热功率不随时间发生变化;③无地下水流动;④沿井管方向,岩土体无热传导。Morchio 等<sup>[14]</sup>进一步论证了当深度大于 800 m 时,同轴套管式换热器能够提取更多的地层热量,更适合提取深井的地热能。中深层同轴套管换热器供热系统原理如图 1 所示。

### 1.2 某中低温废弃井同轴套管式换热数值模型建立

目标研究区的主力油层深度 2 300~2 800 m,在钻井过程中,表层套管的水泥一般返至地面,技术套管会下至井底,具有改造成同轴套管式换热的基础条件。由于储层物性差,通常需要实施压裂等技术措施以提高单井产能。压裂等作业会破坏油层段套管的完整性,为防止地层流体进入换热器,改造过程需对油层进行封堵。封堵会造成井底深度变化,结合周边油水井的平均深度,将模型垂向深度确定为 2 680 m。

基于区域地质资料,将地下埋深 2 680 m 垂向从上至下分为白垩系下统、侏罗系中统、侏罗系下统、三叠系上统 4 层段。本研究测定了靖边油田

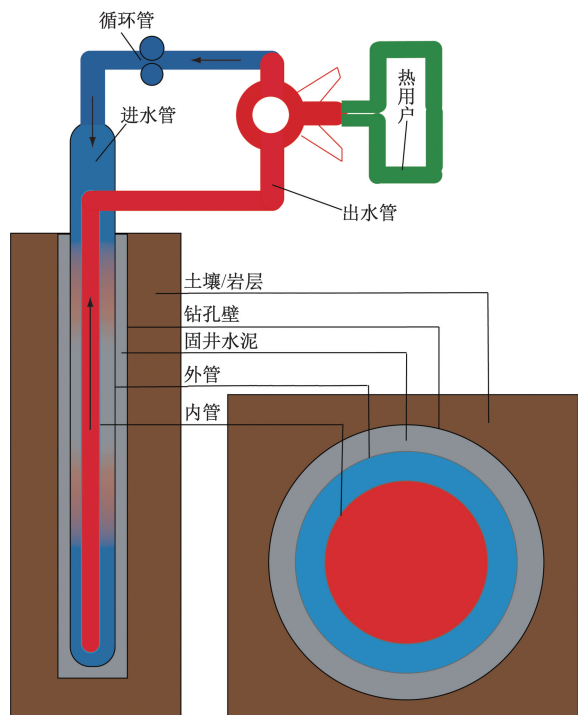


图1 中深层同轴套管换热器供热系统原理

3块岩石样品的导热系数、岩石密度;参考《中深层地热埋管供热系统应用技术规程》(DBJ61-T166—2020)附录A<sup>[15]</sup>、文献<sup>[16]</sup>,结合各岩层中砂岩层、泥岩层的实际厚度,确定了同轴套管式换热数学模型的导热系数、热扩散系数、体积比热容等岩层热物性参数以及岩石密度数据。这一系列参数设定可更好地模拟同轴套管式换热中管内外部的热传递过程,为油田地热能的开发和管理提供理论指导和技术支撑。某中低温废弃井同轴套管式换热数学模型的岩层热物性取值见表1。

李奉翠等<sup>[17]</sup>对30年取热周期结束时中深层埋管换热器不同深度处岩体温度受干扰半径进行了模拟研究,规定温度变化大于0.01℃的最大径向距离为受干扰半径。结果表明,2500m和3000m处的受干扰半径分别为108、112m。为提高模型的运算效率,本文中所建模型的顶底范围仅设为200m×200m。在纵向上,将同轴换热管的长度设为2680m,同时将模型的纵向长度延伸至2800m。设置地表平均温度为10.3℃;井孔套管尺寸内径为124.26mm,套管壁厚7.72mm,套管导热率为40W/(m·℃);中心管直径62mm,中心管壁厚8.3mm,中心管导热率为0.4W/(m·℃);固井水泥热容为1000J/℃,水泥导热率为0.7W/(m·℃),水泥密度为2200kg/m<sup>3</sup>;循环水使用自来水。

表1 某中低温废弃井同轴套管式换热数学模型的

岩层热物性取值

地层	岩性	导热系数/ [W·(m· ℃) <sup>-1</sup> ]	热扩散系 数/(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	体积比热容/ [MJ·(m <sup>3</sup> · ℃) <sup>-1</sup> ]	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
白垩系 下统	砂岩	1.44	0.93	1.55	
	砂泥岩	1.65	0.92	1.79	
	173# 砂岩	1.83			2 386
	模型取值	1.55	0.925	1.67	2 386
侏罗系 中统	砂岩	1.75	0.88	2.01	
	中砂岩	1.38	0.88	1.57	
	砂泥岩	1.72	0.90	1.91	
	泥岩	1.99	1.03	1.93	
	231# 砂岩	2.44			2 234
	337# 砂岩	1.43			2 321
	模型取值	1.71	0.89	1.855	2322
侏罗系 下统	砂岩	1.53	1.50	1.02	
	中砂岩	1.76	1.07	1.65	
	砂泥岩	1.27	0.89	1.43	
	泥岩	1.82	0.92	1.98	
	模型取值	1.70	1.10	1.52	2 070
三叠系 上统	砂岩	2.59	1.20	2.16	
	泥岩	2.13	1.24	1.72	
	C114 细砂岩	1.75			
	FX123 泥岩	1.45			
	FX329 砂岩	1.44			
	L227 砂岩	1.12			
	L157 砂岩	1.47			
	模型取值	2.32	1.24	1.89	2 289

## 2 不同因素对换热性能的影响

在废弃油井改造地热井过程中,因利用了原有钻孔,因此同轴换热器的外管需视为不可改变的基础条件。例如,在陕北地区,深度在2500~3000m的油井其技术套管外径一般为139.7mm,壁厚为7.72mm。因此,研究废弃井改造地热井的换热性能,主要针对可改变的参数,如中心管的大小及其物理性能、换热工质及其换热效率,换热与蓄热的周期等。

### 2.1 内径不同的换热内管对换热性能的影响

在外套管不变的前提下,按照美国石油学会(American Petroleum Institute, API)标准中的油管管径、壁厚进行匹配并模拟,探讨换热管内径对换热性能的影响。为统一尺度,将换热器换热功率固定为100W/m,换热时间设定为120d,分别模拟不同内管直径的出口端、入口端温度变化,模拟结果如图2所示。

模拟结果表明,出口端、入口端的水温均随着内管直径的增加而减小,所以适当减小内管直径有利于换热。由于外管直径不变,内管直径增加,环

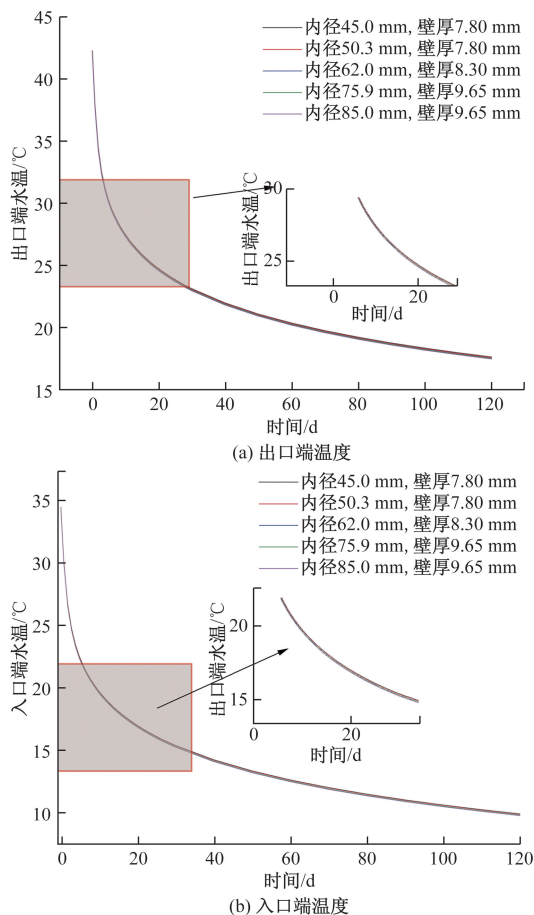


图 2 不同换热管内径下出入口端温度随时间变化

空体积减小,从而环空流速增加,减弱了循环水与岩石(土)介质的换热过程,在一定程度上降低了出水温度,同时,内管直径太大,会增加流体在环空和中心管内的沿程阻力损失,模型中并未涉及。但就模拟结果而言,内管内径对换热管性能的影响并不明显,不同管径下出口端水温的变化幅度仅  $0.17^{\circ}\text{C}$ 。对于该模型,最佳的中心管内径为  $45\text{ mm}$ ,对应壁厚  $7.8\text{ mm}$ 。

## 2.2 循环流量对换热性能的影响

在确定了内、外管的尺寸后,换热工质的循环流量对同轴套管换热器的换热性能也有一定的影响。研究表明,循环水流量超过  $30\text{ m}^3/\text{h}$ ,循环水泵耗功率就会随流量的增加呈现指数型增长,推荐深井地埋管换热系统的循环水流量最大不应超过  $30\text{ m}^3/\text{h}$ <sup>[18]</sup>。对地温条件好的井,井底温度高、出口温度也高的情况下,可以使用较小的流量来获取较高的出水温度,如德国的 Penzlau 地热井,井深  $2\ 786\text{ m}$ ,井底温度  $108^{\circ}\text{C}$ ,进水温度  $35^{\circ}\text{C}$ ,出水温度  $70^{\circ}\text{C}$ ,循环流量仅设为  $6.12\text{ m}^3/\text{h}$ <sup>[19]</sup>。

本文将模型的循环流量设置为  $5\sim 30\text{ m}^3/\text{h}$ ,按

照  $5\text{ m}^3/\text{h}$  的级差设置 6 种情景,在延米换热功率均为  $100\text{ W}$  的情况下分别模拟一个采暖季中不同流速下的出口端、入口端的温度。

出口端的温度变化曲线如图 3(a)所示。随着流量的增加,出水温度呈现先升高后降低的趋势,并且在  $10\text{ m}^3/\text{h}$  时达到最高点。出水温度先升高的原因在于较小的流量条件下,流体在地下热交换过程中得到了充分的加热,因此出水温度随之增加。然而,当循环水流量增加时,导致热交换的充分程度降低,进而导致出水温度开始下降。因此,继续增加流量反而会使出水温度降低。入口端的温度变化曲线如图 3(b)所示。随着流量增加入口端水温持续升高,由于换热功率一定,流量越小,只有通过降低入口温度、增大与地层的温差,从而增大单位质量水在单位时间内的携热量,才能在相同时间内获得足够的热量。在提取热量一定时,较小的流量虽然能得到较高的出口水温,但会导致进出口温差大幅增加,入口水温急剧下降。基于该模型的考虑,为获得较高的出水温度,以及合理的入口温度,推荐循环流量为  $15\text{ m}^3/\text{h}$ 。

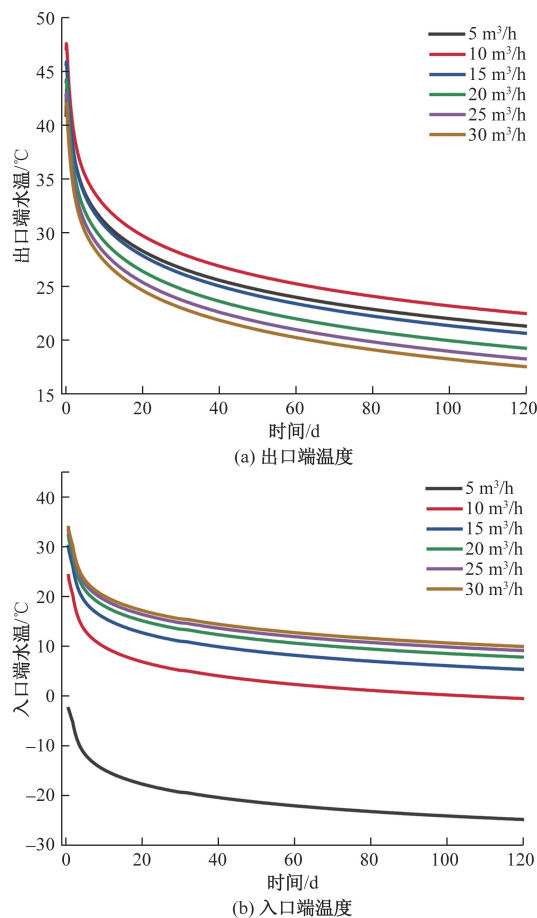


图 3 不同循环流量下出入口端温度随时间的变化

### 2.3 换热功率对换热性能的影响

废弃油井在停井前长时间用于油气开发,关井期间套管与油层中的原油、地层水长期接触,  $H_2S$ 、 $CO_2$ 、以及腐蚀性细菌对套管存在一定的腐蚀,对于这种改造井来说,合理的提取热量也是延长换热器使用周期的一个重要因素。孔彦龙等<sup>[19]</sup>推荐深井同轴换热器最佳的延米换热量在 120 W 左右,本文以该值为基准,模型中设置了 50、100、150、200 W 4 种换热功率,分别进行模拟,以求最佳的换热功率。

模拟结果(图 4)表明,延米换热功率每增加 50 W,供暖季季末出口水温降低约 17.55 °C,平均降幅 0.35 °C/W。当每延米换热功率为 200 W 时,系统在运行约 6 d 后,出水端温度为 8 °C 左右,但入水端温度已经接近 0 °C,会造成热泵系统的强制关闭。而当换热井以 50、100 W/m 连续运行 4 个月之后,出水温度分别约为 36、20 °C。20 °C 的水温通过热泵系统抬升后,基本可以满足供暖的需要。而 150 W/m 工况下运行 120 d,出口端水温已经接近 0 °C,这会对地源热泵的供热性能产生影响,甚至损坏,且入口端的水温已低于 0 °C,不符合实际情况,故延米换热功率大于等于 150 W 的换热工况不推荐使用。延米换热功率为 50 W 的换热工况虽然出入口端的水温都比较高,但水温下降缓慢,改造井的产能没能得到很好地利用。推荐使用延米换热量为 100 W 进行长期运行。

### 2.4 不同换热周期对换热性能的影响

陕北地区年平均气温 9.3 °C,遇到气候异常情况,供暖期略有变化,因此考虑不同供暖周期对换热性能的影响也尤为重要。将模型流量设为 15 m<sup>3</sup>/h,延米换热功率为 100 W,分别设置了开 4 月关 8 月、开 5 月关 7 月、开 6 月关 6 月、开 7 月关 5 月和开 8 月关 4 月 5 种换热周期情形,模拟取热 30 a。

5 种情形下的出口端、入口端水温随时间的变化如图 5 所示。可以看出,其他条件相同时,采热期越长,关井恢复期越短,出口端、入口端温度下降幅度越大。5 种情形的第 1 个供暖季季末,出口端温度分别为 19.24、18.36、17.65、17.04、16.52 °C,在 30 年间分别下降了 4.95、6.10、7.21、8.30 和 9.36 °C,采热时间每增加 1 个月,出口端温度下降幅度增加约 1 °C。

若规定季末出口端温度下降幅度小于 0.1 °C 时进入准稳态阶段,则 5 种情形分别于第 15、18、21、

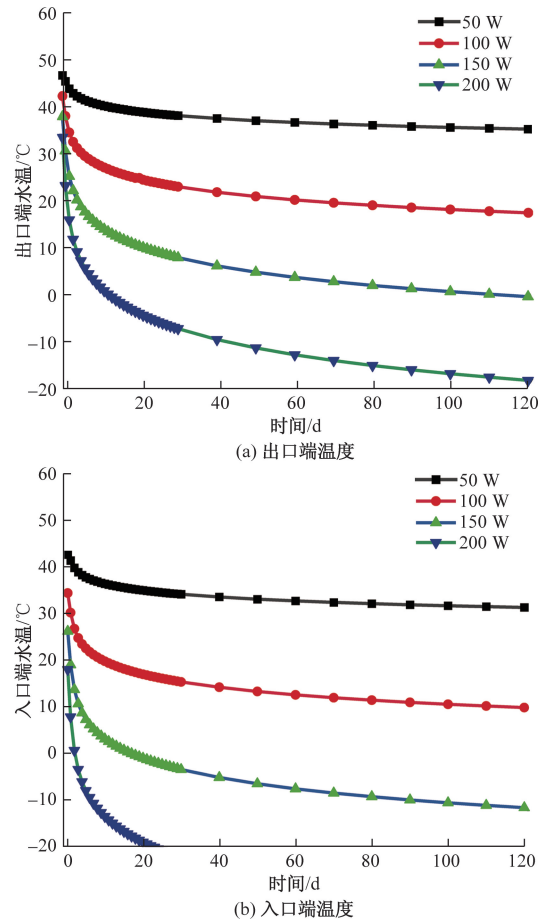


图 4 不同延米换热功率工况下的出入口端水温

24、27 a 进入该阶段。只有开 4 月关 8 月、开 5 月关 7 月两种情形可以使入水端温度在 30 年间都高于 0 °C。结合陕北实际供暖情况,推荐每年取热时间 5 个月,关井 7 个月。

### 3 结论

鄂尔多斯盆地中深层关停油气井较多,由于储层岩石致密,直接采水取热的可行性较低,可利用原有井身结构,改造成深层同轴套管式换热器。本文以主力油藏为二叠纪延长组井深在 2 680 m 左右的废弃井为例,可直接利用原有的外径 139.7 mm、壁厚为 7.72 mm 的技术套管,优先选择内径为 45 mm、壁厚为 7.8 mm 的中心油管开展废弃井改造地热井。

在 OGS 平台中建立了数学模型,通过模拟不同的换热周期、流量和换热功率条件下的出口端和入口端水温变化,得出以下结论。

(1) 换热周期对换热性能的影响:采热期越长,关井恢复期越短,出口端和入口端水温下降幅度越大。推荐每年取热时间为 5 个月,关井时间为 7 个月。

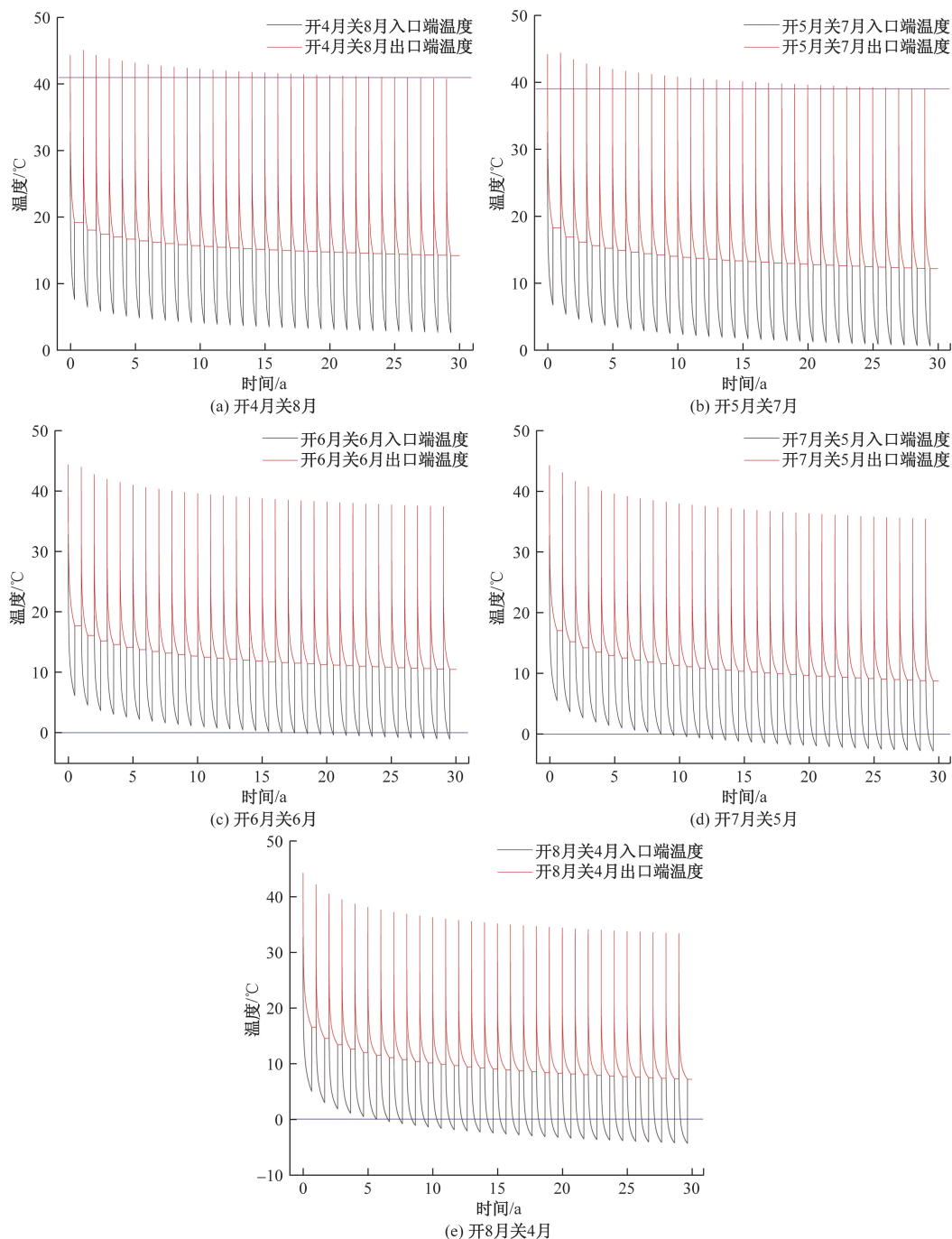


图 5 5 种情形下的出口端、入口端水温随时间的变化

(2)流量对换热性能的影响:随着流量的增加,出水温度先升高后降低,推荐循环流量为  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(3)换热功率对换热性能的影响:延米换热功率每增加  $50 \text{ W}$ ,供暖季季末出口水温降低约  $17.55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,推荐延米换热功率为  $100 \text{ W}$ 。

(4)研究成果证明在鄂尔多斯盆地中深层关停油气井条件下,利用原有井身结构改造成深层同轴套管式换热器的可行性,提出优化的运行参数,为废弃井的高效利用提供了理论依据和实践指导。

## 参考文献

- [1] 秦祥熙,李少华,万龙,等. 不同型式地埋管换热器换热性能的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(12): 215-218.
- [2] 霍超,林倚天,李刚,等. 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, 2023, 23(12): 4917-4927.
- [3] 刘润川,任战利,叶汉青,等. 地热资源潜力评价:以鄂尔多斯盆地部分地级市和重点层位为例[J]. 地质通报,

- 2021, 40(4): 565-576.
- [4] 宋先知, 许富强, 宋国锋. 废弃井地热能开发技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 1-7.
- [5] 姜国心. 被弃油井注采中深层地热能改造及取热研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [6] 杜甜甜, 满意, 姜国心, 等. 套管式中深层地埋管换热器传热建模及取热分析[J]. 可再生能源, 2020, 38(7): 887-892.
- [7] 李娟, 刘少敏, 郑佳, 等. 套管式和双U型换热器换热性能对比[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15081-15087.
- [8] 刘洪涛, 刘俊, 王洋浩, 等. 设计参数对中深层地埋管换热器长期换热性能的影响研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(12): 1594-1601.
- [9] 蒋坤卿, 黄思浩, 李华山, 等. 同轴开式地热单井换热器性能分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(2): 172-177.
- [10] 王路. 中国石油首个长停井地热示范工程项目建成[J]. 天然气与石油, 2022, 40(2): 56.
- [11] 孔彦龙, 黄永辉, 郑天元, 等. 地热能可持续开发利用的数值模拟软件 OpenGeoSys: 原理与应用[J]. 地学前沿, 2020, 27(1): 170-177.
- [12] SHAO H, HEIN P, SACHSE A, et al. Geoenery modeling II: shallow geothermal systems[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016.
- [13] BEIER R A. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger[J]. Geothermics, 2014, 51: 470-482.
- [14] MORCHIO S, FOSSA M, BEIER R. Study on the best heat transfer rate in thermal response test experiments with coaxial and U-pipe borehole heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117621.
- [15] 中深层地热地埋管供热系统应用技术规程: DBJ61/T166—2020[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
- [16] 白奋飞, 魏登峰, 韩伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长油气区地热资源赋存特征及开发利用建议[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 329-339.
- [17] 李奉翠, 韩二帅, 梁磊, 等. 中深层地热井下同轴换热器长期换热性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 194-201.
- [18] 包图雅, 米兰, 马玖辰, 等. 深井地埋管换热器配置参数模拟计算研究[J]. 热科学与技术, 2022, 21(1): 42-50.
- [19] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4741-4752.

## Parameters of Heat Exchange in Geothermal Wells that Have been Retrofitted with Low-temperature Abandoned Wells in the Ordos Oil Zone

YAN Shilong<sup>1,2</sup>, YU Huagui<sup>1,3</sup>, WANG Peng<sup>4</sup>, LUI Shi<sup>1,2</sup>, WEN Yang<sup>1,2</sup>, GAO Qian<sup>1,2</sup>

(1. College of New Energy, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. College of Petroleum Engineer, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. Engineering Research Center of Smart Energy and Carbon Neutral in Oil & Gas Field, Universities of Shaanxi Province, Xi'an 710065, China; 4. Anton Oilfield Services (Group) Ltd., Beijing 100102, China)

**Abstract:** In order to effectively activate the dormant assets of oil fields, the abandoned oil and gas wells are transformed into coaxial cased heat exchangers to extract geothermal energy and realise the successive development of energy, taking a shut-down oil well in Dingbian County, Shaanbei as the study example, the borehole heat exchanger module of the open-source software OpenGeoSys was used to study its heat exchange performance. Effects of different circulation flow rates, inner tube diameters of heat exchanger, power of heat exchanger, and seasonal heat extraction cycles on the performance of the transformed well are analyzed. Results show that when the heat exchange power is fixed, a flow rate of 15 m<sup>3</sup>/h can both obtain a higher outlet water temperature and ensure a long-term stable operation of the heat exchanger, using different diameters, variation of water temperature at the outlet end of the inner tube is only 0.17 °C. For every additional 50 W of heat exchange power per meter, the outlet water temperature at the end of the heating season decreases by about 17.55 °C, with an average decrease of 0.35 °C/W. When the heat exchange power is constant, for every one additional month of a heating season, the annual minimum outlet temperature decreases by about 1 °C, when the heating season is 4, 5, 6, 7, 8 months, the time required for the outlet temperature to reach a quasi-steady state during the heating season is 15, 18, 21, 24, 27 years, respectively. In order to improve the heat exchange performance of the geothermal well, it is recommended that a seasonal cycle of 5 months of heat extraction and 7 months of well shutdown in Ordos Basin Area should be used, with a circulation flow rate of 15 m<sup>3</sup>/h and a heat exchange power of 100 W.

**Keywords:** oil well to geothermal well conversion; coaxial heat exchange tube; heat exchange performance