

天津沧县隆起蓟县系雾迷山组热储尾水回灌地温场变化特征分析

魏永民^{1,2}, 王 娟¹

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要: 为保证地热资源的可持续利用, 减缓热储压力下降速度, 天津市已开展多年回灌工作, 大量的低温流体进入热储层后对温度场是否会产生不利影响不得而知。本文以天津沧县隆起为研究区, 选取采灌量最大的蓟县系雾迷山组热储层为研究对象, 通过多年恢复期的稳态测温工作, 结合水位埋深观测数据, 对回灌井内热储层段温度变化特征进行了分析, 并定性的论述了储层热源补给来源。研究结果表明, 回灌流体的进入会改变井筒的温度场, 年度恢复期内, 回灌井井筒温度逐步回升, 回升速率由快变慢; 恢复末期, 储层流体温度呈逐年下降趋势。储层在恢复初期以热对流或弥散作用为主, 温度恢复迅速, 后期以热传导为主, 温度恢复缓慢。

关键词: 尾水回灌; 温度场; 稳态测温; 雾迷山组储层; 热传递

引 言

在实现“双碳”目标的大背景下, 新型清洁能源—地热资源的开发与利用得到了广泛关注。天津市是我国地热开发最成熟的地区之一, 距今已经有 80 年的地热利用历史。作为热能载体, 地热流体并非取之不尽, 长时间持续地、过度地开采会带来热储压力下降等问题。为保证地热资源可持续利用, 采取回灌式开采已经达成共识。天津市于 80 年代开始进行回灌研究, 2000 年以后开始大规模尾水回灌, 回灌率与回灌量逐年上升。回灌强度的增大, 大量低温流体进入热储层后对温度场的影响逐渐得到关注。蓟县系雾迷山组热储地热资源因具有温度高、水质好、易回灌等优势, 从 20 世纪 90 年代起逐渐成为天津地区开发利用的主要热储层。截至 2021 年 10 月, 天津市雾迷山组地热井共 311 眼, 雾迷山组热储采灌系统 128 处, 开采量 $3\ 017.66 \times 10^4 \text{ m}^3$, 回灌量 $2\ 433.65 \times 10^4 \text{ m}^3$, 回灌率 80.65%, 回灌量和回灌率逐年增加。本文选取蓟县系雾迷山组热储层, 以 SR9 井为例, 通过多年恢复期的稳态测温工作, 对回灌井内热储层段温度变化特征进行分析, 并对储层热源补给来源进行探讨。

1 区域地质背景

1.1 地质构造特征

天津市大地构造位置处于 I 级构造单元柴达木—华北板块的华北陆块(Ⅱ), 纵跨了燕辽裂陷带(Ⅲ₁)和华北盆地(Ⅲ₂)两个次级构造单元。两者以宝坻断裂为界划分为 IV 级构造单元: 断裂以北为蓟唐裂谷(Ⅳ₁), 进一步划分为三个 V 级构造单元, 断裂构造以近东西向为主, 北东向和北西向次之; 断裂以南为新生界覆盖区, 是中新生代以来的断陷、拗陷盆地, 进一步划分为冀中拗陷(Ⅳ₂)、沧县隆起(Ⅳ₃)和黄骅拗陷(Ⅳ₄)三个 IV 级构造单元, 整体上呈现为北东向两拗一隆的构造格局。

沧县隆起位于冀中拗陷东侧, 并以断裂为界, 其东以沧东断裂与黄骅拗陷为邻。受北东向和北西向断裂及地层分布控制, 沧县隆起进一步划分出潘庄凸起、双窑凸起、白塘口凹陷、小韩庄凸起、大成凸起和王草庄凸起等六个 V 级构造单元(图 1)。沧县隆起自古近纪开始一直强烈隆升, 直至上新世—第四纪才被覆盖, 主体部位普遍缺失古—中新统。沧县隆起主要由中、新元古界和古生界组成, 中生界大多缺失, 新生界沉积厚度为 1 000~1 600 m, 缺失古近系。

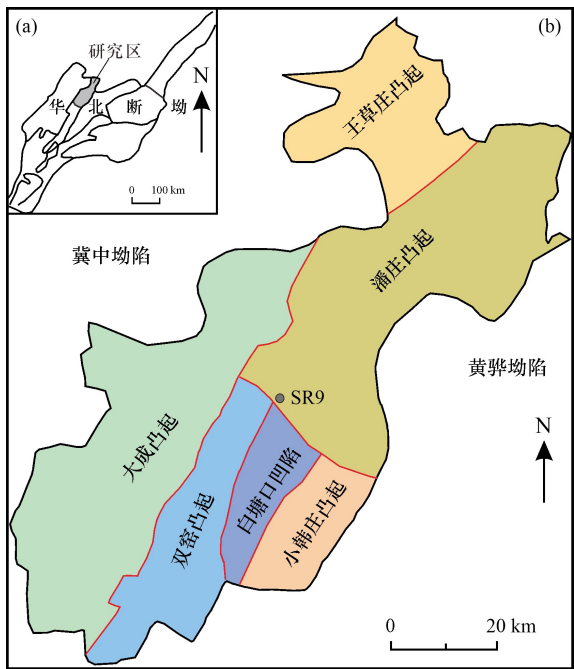


图1 沧县隆起构造分区图(据文献[4-5]修改)

1.2 地温场特征

地壳浅部地温场的主要影响因素有盖层厚度、基岩埋深形态、构造形态、断裂活动、地层岩性、地下水活动和岩浆活动等。沧县隆起地热资源属于沉积盆地型地热资源,地幔生热与基岩的放射性衰变产热主要通过热传导加热储层,上部沉积盖层的隔热特性对热储层起到保温效果,深部基岩储层通过基岩裂隙及断裂导水导热通道进行的热对流作为有益补充。沧县隆起地温场分布特征主要受基底构造形态控制,凸起部位为背斜,核部岩性主要为奥陶系及蓟县系的石灰岩和白云岩,导热率较高,将深部热流能传送到基岩顶板,使盖层平均地温梯度达到3.99℃/100m。在沧东断裂和白塘口断裂两个导水断裂处,雾迷山组储层水温高出其它部位10℃左右,表明研究区局部受到了地下热水沿断裂上涌影响。

1.3 储层特征

中元古界蓟县系雾迷山组属于岩溶裂隙型热

储层,在研究区广泛分布,顶板埋深在1 000~3 000m,仅在白塘口凹陷内白塘口西断裂与白塘口东断裂之间埋深较大,顶板埋深超过了3 000m。雾迷山组从上至下共分为4段,由于厚度比较大,一般将上部三、四段作为一组热储层,下部一、二段作为另一组热储层。三、四段岩性以深灰色粗晶白云岩、燧石条带白云岩为主,孔、洞、缝发育,裂隙率5.0%~13.4%,是重要的地热流体储集层。三、四段单井涌水量100~200m³/h,井口稳定流温77~103℃。三段底部分布有厚度稳定的砖红色泥质白云岩,隔水性好,是三段与二段的分层标志。一、二段为富镁碳酸盐岩层段,其中一段尚未有钻井揭露,二段岩性以灰色、深灰色白云岩、硅质条带白云岩为主,有泥质夹层,孔隙率4%~7%,该层岩溶裂隙发育,储存空间大,富水性好,单井涌水量100~180 m³/h,井口流温2~103℃。

雾迷山组水化学类型主要为Cl·HCO₃·SO₄-Na、Cl·SO₄·HCO₃-Na和Cl·SO₄-Na型,矿化度1 400~4 200 mg/L,沿径流方向逐渐增大。

2 研究方法

2.1 地热井概况

SR9地热井位于天津市河东区天津地热院内,成井于2002年。该井为四开定向井,采用了裸眼成井工艺,取水目的层为蓟县系雾迷山组,成井井深3 155m,成井时井口流温82℃,井身结构及钻遇地层见表1、2。从2002年开始,对SR9井进行尾水回灌,地热尾水温度平均温度约为42℃。具体情况见表3。

表1 SR9井身结构

井段	深度/m	井径/mm	工艺
一开	0~237.73	339.7	套管
二开	237.73~1 634.90	244.5	套管
三开	1 634.90~2 686.43	177.8	套管
四开	2 686.43~3 155.00	152.0	裸眼

表2 SR9井钻遇地层简表

地层	岩性特征	底板埋深/m
Q	灰色、深灰色、棕黄色、棕红色的粘土、砂质粘土与灰色、黄色、灰黄色的粉砂、粉细砂、细砂、中细砂互层。	527
Nm	灰色、棕黄色、棕红色杂色的泥岩与灰黄色、灰色、灰绿色的粉砂质泥岩互层	1 227

O	以浅灰色、灰色、灰黄色、青灰色的灰岩为主,上部含海绿石、灰黄色条带	1 256
ε	中、上部以鲕状灰岩、泥质灰岩夹泥质条带灰岩为主,下部主要以紫红色泥岩、灰色灰岩为主	2 431
Qb	上部为棕红色白云质泥灰岩,下部以紫红色为主,泥晶质,较坚硬,含钙,部分夹有灰绿色薄层灰岩。底部为海绿石英砂岩和石英砂岩,夹一层杂色页岩	2 686
Jxw	为巨厚层灰、深灰色的白云岩夹薄层灰质白云岩和泥质白云岩。	3 155(未穿)

表 3 SR9井回灌情况

10⁴ m³

年	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
灌量	27.5	10.8	7.5	9.1	2.4	12.5	29.9	26.0	34.5	37.2	26.8	16.7	20.6	24.7	33.4

注:2003、2009年未回灌。

2.2 稳态测温

天津地区供暖时间为每年11月初至次年3月底,在此期间,采灌系统将开采井内地热流体抽出经过换热后将尾水灌入回灌井中。尾水回灌破坏了地层原始的热平衡状态,当非供暖期停灌后,地层受到内部热源加热,温度将逐步恢复。为了解井筒温度场垂向上的变化特征,分析回灌对储层温度场的影响和不同时期热储动态温度变化规律,天津市地热资源动态监测项目选取停灌后、供暖前及恢复中期对回灌井进行稳态测温工作。

自2012—2018年,SR9井已连续7年在非供暖期进行了稳态测温工作。稳态测温在2012—2014年停灌后和供暖前各测一次,2014年之后增加了中期的监测。由于该井回灌时间较长,井底逐渐堆积锈皮沉屑,导致测井深度逐年减小。具体测温情况见表4。

表 4 SR9井稳态测温情况

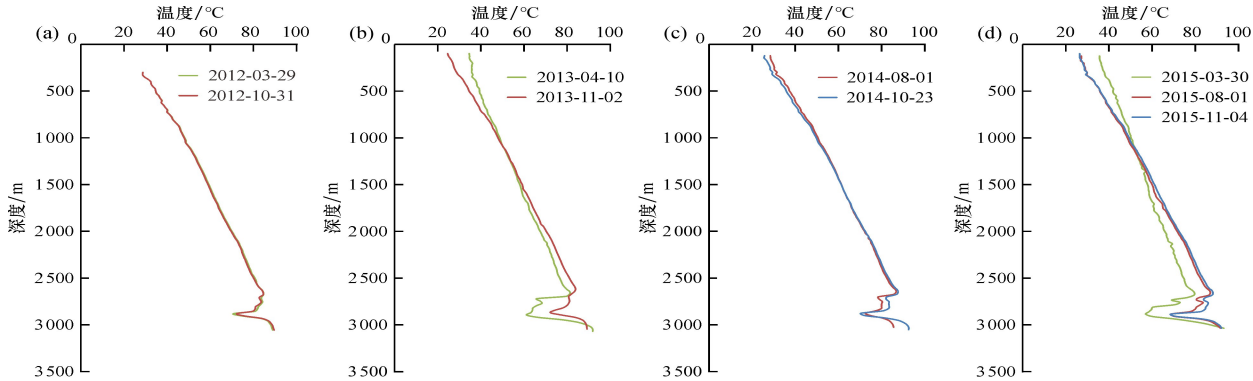
年	测温日期	测温深度/m
2012	3月29日	3 058
	10月31日	3 062

年	测温日期	测温深度/m
2013	4月10日	3 079
	11月2日	3 056
2014	8月1日	3 041
	10月23日	3 063
2015	3月30日	3 036
	8月1日	3 028
	11月4日	3 031
2016	3月24日	3 032
	7月29日	2 986
	10月26日	2 979
2017	4月11日	2 894
	7月23日	2 883
	10月17日	2 979
2018	4月10日	3 016
	7月27日	2 784
	10月18日	2 976

3 温度场变化特征分析

3.1 地热井多年测温曲线

根据SR9地热井的稳态测温记录,绘制了不同年份的测温曲线,如图2所示。



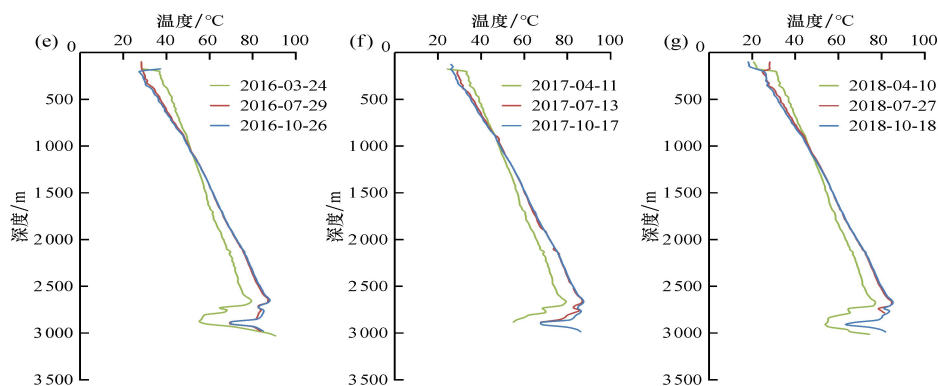


图2 2012—2018年度测温曲线

3.2 测温曲线特征

SR9井静水位埋深为150~185 m,液面深度以上测温曲线反映的是井筒内空气的温度,主要受外界气温影响。井筒内流体温度可分为两段,即上部均匀增温段和下部储层低温段:

(1)上部均匀增温段:该段测温曲线变化较为均匀,温度随深度增加而增加,变化趋势与本区的地温梯度变化趋势一致。曲线上小的波动被认为是地下径流和各层岩石热导率变化所导致。

(2)下部储层低温段:自2 700 m深度开始,温度随深度的增加明显下降,在2 875 m处温度降至最低,直至底部形成了一个低温带。该段深度与雾迷山组热储层深度基本一致,为回灌目的层。雾迷山组岩性为大段巨厚的白云质灰岩,热导率较大,在天然状态下该热储层地温梯度应呈均一化。回灌导致大量低温流体进入此段储层中,形成了温度低值区。

3.3 年内变化特征

SR9井筒内温度在停灌后逐步回升,前期回升速度远大于后期。年内测温曲线在1 000 m深度上下形成一个交汇点,多年测温曲线表明该层位水温基本不变,对应温度为回灌温度。200~800 m段曲线上的小波动基本无变化,1 600~2 400 m段曲线上的小波动基本消失。从表2可知,200~800 m段地层为第四系和新近系明化镇组上段,该段孔隙发育,地下径流活跃,形成的小波动年内变化较小;1 600~2 400 m段地层为寒武系,该段主要为灰岩和泥岩互层,测温曲线上的小波动是泥岩和灰岩的热导率相差较大形成的,随时间推移热导率差异影响逐渐减小,直至末期基本消失。

3.4 多年变化特征

根据测温曲线年内变化可知,井筒温度在恢复末期温度回升幅度极小,回灌前几天的温度都可作为储层恢复末期温度。雾迷山组为岩溶裂隙型储层,裂隙最发育处灌入的低温流体最多,测温曲线上呈现最低值。2012—2018年恢复末期储层最低温度变化结果表明,SR9回灌井储层流体温度呈逐年下降的趋势(图3)。

由于难以对回灌井周围温度场进行有效监测,当前对于尾水回灌对储层温度场在水平方向上的影响范围可采用基岩储层冷锋面运移公式计算。

$$D = \sqrt{\frac{3q_i \rho_w \beta_w}{\pi b (\rho_a \beta_a)}}, \quad (1)$$

式中: D 为冷锋面运移距离(m); q_i 为前*i*年累计回灌量(m^3); b 为热储层有效厚度(m); $\rho_w \beta_w$ 、 $\rho_a \beta_a$ 分别为流体和热储层比热容和密度乘积($\text{KJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。持续的回灌使冷锋面逐渐外扩,当冷锋面达到开采井时会造成井口流温降低。

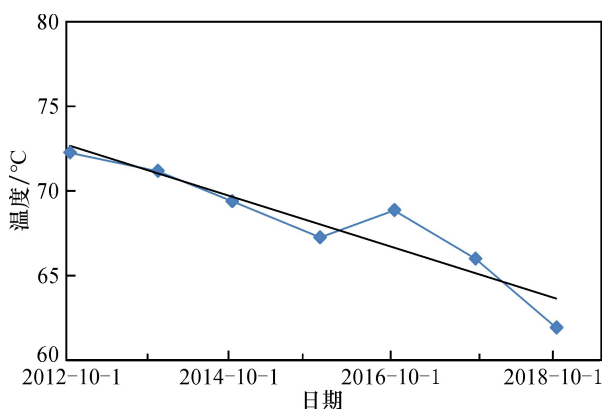


图3 SR9井储层流体温度变化趋势

3.5 影响因素分析

回灌井温度场的变化主要受到回灌量和回灌温度的影响。针对SR9井恢复期内温度回升值和回灌量及回灌温度的关系,本文进行了相关性分析。由于SR9井历年平均回灌温度为42℃,将其作为一个定值,得到了温度回升值通回灌量的关系曲线及经验公式(图4、5)。图4显示点呈离散形式,表明年度回灌量和温度回升值相关性较小;图5中累计回灌量和温度回升值拟合较好,表明在回灌温度恒定的条件下温度回升值主要受到累计回灌量的影响。

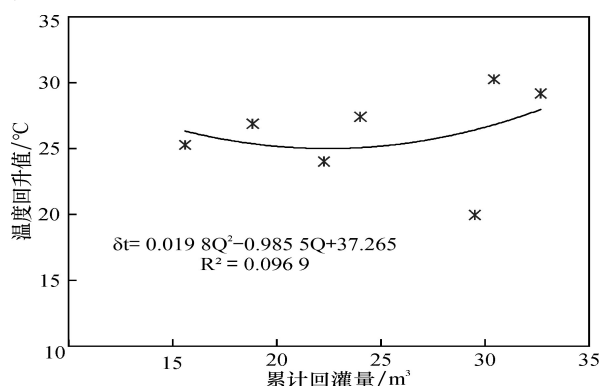


图4 年度回灌量和温度回升值关系

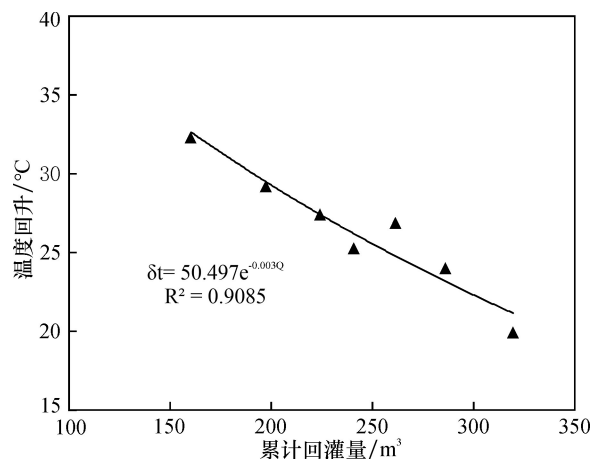


图5 累计回灌量和温度回升值关系

4 温度恢复来源

刘志涛等研究表明,储层温度恢复热量主要

来源于水平方向上的热量传递。根据传热机理可将储层热量来源分为热传导、热对流和热弥散。由于目前难以获取储层岩石的内部结构、温度场和流场的具体变化数据,本文只进行定性分析。

4.1 热传导

热传导是物体各部分之间在不发生相对位移时,依靠物体内部分子、原子及自由电子等微观粒子的运动而产生的热量传递。其公式如下:

$$Q = A\lambda G_i \cdot t, \quad (2)$$

式中: Q 为热量(J); λ 为物质热导率($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$); G_i 为地温梯度; A 为热传导面积(m^2); t 为热传导时间(s);横向上的地温梯度可根据公式(3)进行计算。

$$G_i = (T_1 - T_2)/D. \quad (3)$$

式中: G_i 为横向地温梯度; T_1 为储层温度($^{\circ}\text{C}$); T_2 为SR9井储层稳定温度($^{\circ}\text{C}$),根据测井资料储层温度取82℃; D 为冷锋面运移距离(m)。

由于稳态测温深度不一,本文选取数据最全的2015—2017年度进行分析。2015—2017年累计回灌量分别为 $240.90 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $261.50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $286.20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据SR9井区域测井资料,热储层有效厚度取80 m。根据天津市山岭子地热详查报告,流体和热储层比热容与密度乘积分别取 $4.18 \times 10^3 \text{ KJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$ 和 $2.53 \times 10^3 \text{ KJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$ 。

物质温度的变化和热量的关系如下:

$$Q = \Delta T m \beta, \quad (4)$$

式中: Q 为热量(J); ΔT 为温度变化量($^{\circ}\text{C}$); m 为物质的质量(kg); β 为比热容($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$);

联合公式(2)和(4)可得:

$$\Delta T m \beta = A\lambda G_i \cdot t. \quad (5)$$

假设热传导作用为储层温度恢复的主要来源,由于面积、质量、热导率和比热容不变,温度增幅应与地温梯度和时间的乘积成正比。测温计算结果显示,区间温度增幅比值远大于地温梯度与时间乘积比值(表5)。由此可知,热传导对储层温度回升并未起主导作用,起主导作用的是热对流或热弥散。

表5 2015—2017年温度区间增幅比值和地温梯度与时间乘积比值计算结果

年	测温日期	冷锋面运移距离/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$	地温梯度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1})$	区间增温幅度比值	地温梯度与时间乘积比值
2015	3月30日	218.02	55.87	0.119 850	112.90	1.28~2.27

年	测温日期	冷锋面运移距离/m	温度/℃	地温梯度/(℃·m ⁻¹)	区间增温幅度比值	地温梯度与时间乘积比值
	8月1日		67.16	0.068 066		
	11月4日		67.26	0.067 608		
2016	3月24日	227.15	54.14	0.122 644	34.93	1.28~2.71
	7月29日		68.46	0.059 605		
	10月26日		68.87	0.057 800		
2017	4月11日	237.64	53.48	0.120 013	50.08	1.26~2.16
	7月13日		66.00	0.067 328		
	10月17日		66.25	0.066 276		

4.2 热对流

热对流是流体各部分之间发生相对位移时,冷热流体相互混渗所引起的热量传递。研究显示,影响热对流的因素众多,包括渗流速度、压力梯度、界面效应、黏性耗散、浮生力、变物性等。王如宾等认为单裂隙中温度场中的温度是渗流场中渗流流速的函数,渗流速度变化越大,温度场的分布变化也越大;冯雨晴等认为干热岩裂缝宽度越大、距离越长,流体升温越快;康建宏等通过对多孔介质内黏弹性流体的热对流稳定性研究认为,随着 Rayleigh 数的增加,热对流的流场从单个涡胞逐渐演化为多个不规则单元涡胞,最后发展为混沌状态;程龙认为热对流作用随着压力梯度的增加而增大。上述因素给对流换热的计算带来很大困难,目前的理论结果基本都是简化后得到的。

4.3 热弥散

热弥散是含水层热量运移中的一种换热现象。介质孔隙内水流速度的脉动会引起热量平均化,从而导致换热效果的增强,使多孔介质中的热量运移表现出许多独有的复杂性,即弥散效应。热弥散的机理十分复杂,弥散效应与流体在介质通道内的流速、固体骨架、流体的物性以及多孔介质的结构等因素有关,理论研究难度大。目前,对弥散效应的研究还处于探索阶段,各种计算公式中都存在可调的经验常数,这些可调的经验常数因试验条件或数值模拟结果而异。

综上所述,在地质条件和地热流体不变的情况下,压力梯度作为影响热对流和热弥散的共同主要因素,两者的作用随压力梯度增加而增大。在 2019—2020 年期间,对 SR9 井进行了多点次水位埋深观测,以最小观测值作为水位稳定埋深计

算流体压力梯度,公式为:

$$I = (H - h)/L, \quad (5)$$

式中: I 为压力梯度(无量纲); H 为水位埋深(m); h 为水位稳定埋深(m), L 为压力损失距离(m)。压力梯度变化情况见图6,从图中可以看到恢复初期压力梯度大于后期,即热对流或热弥散作用主要体现在恢复初期。

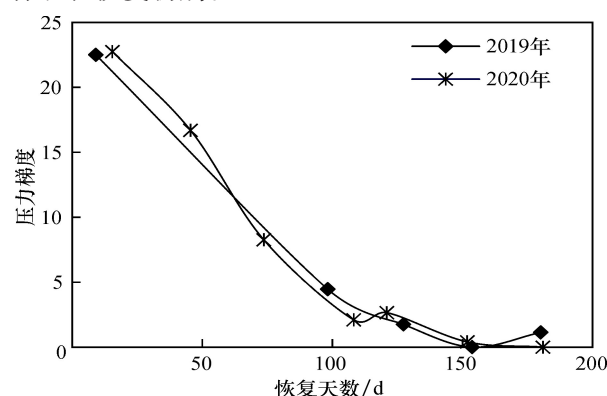


图6 SR9井流体压力梯度变化

结合储层温度恢复曲线可知,SR9井储层在恢复初期以热对流或弥散作用为主,温度迅速恢复,后期以热传导为主,温度恢复缓慢(图7)。

表6 2015—2017年储层温度累计增幅

年	恢复时间/d	累计增幅/℃
2015	15	13.87
	138	25.16
	234	25.26
2016	9	12.14
	129	26.46
	223	26.87
2017	26	11.48
	130	24.00
	217	24.25

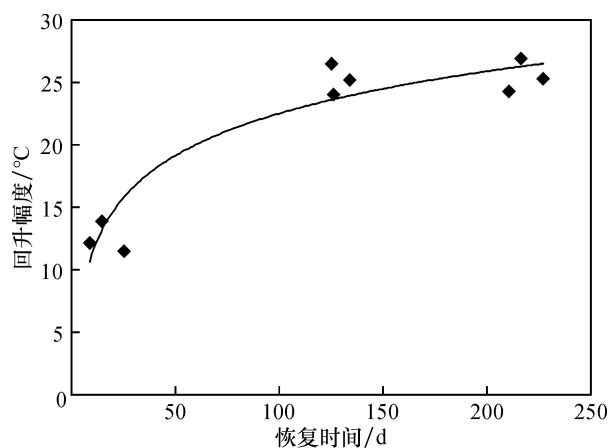


图7 储层温度恢复曲线

温流体进入井筒后改变了回灌井周围的地温场,特别是在储层段形成了低温区。在停灌期间储层温度有所恢复,但大量的回灌仍导致地热井储层温度呈下降的趋势,在回灌温度恒定的条件下温度回升值主要受到累计回灌量的影响。

(2)储层温度恢复热量主要来源于水平方向上的热量传递,热对流或热弥散在储层温度回升中起到了主导作用,使储层温度在停灌后迅速回升。

(3)持续的回灌使冷锋面逐渐外扩,为避免过早出现热突破现象,在今后的地热资源开发过程中应重视采灌井的布局。

5 结论

(1)雾迷山组回灌井的稳态测温研究显示,低

参考文献略

雄安新区最深4500米地热井开钻

中国石油天然气集团公司华北油田公司

7月15日,位于雄安新区安新县人民政府东北侧的地热试验井——安热1井正式开钻。这口地热井设计井深4500米,由华北油田具体实施,完钻后不仅是雄安新区、更是河北省内最深地热井。

安新县境内蕴藏丰富的地热资源,按照油田前期资源评价,安新县城范围内总地热资源储量达20.6亿吉焦,总地热水量达2.74亿立方米。

2024年,华北油田按照雄安新区打造绿色城市发展典范规划,设计部署了安热1井、安热2井两口地热勘查井,投用后可供暖周边1000米内学校、住宅、政府办公楼等建筑33万平方米。安热1井和安热2井作为中国石油开启雄安地热市场的重要勘查井,不仅对于建设生态雄安、绿色雄安具有探索性意义,更是雄安新区建设方关注的焦点。

今年以来,华北油田坚定不移走生态优先、绿色发展之路,不断壮大绿色能源产业,加快发展新质生产力,推动绿色转型,助力碳达峰碳中和。尤其是在推进地热能利用方面,积极拓展北京、冀中(雄安)地区市场,打造京津冀地热利用“主攻队”。为积极开拓雄安地热市场,华北油田立足于中国石油早期在安新县域的二维地震和三维地震资料,快速落实构造特征和地层展布,科学编制地热利用开发方案,精心准备钻井工作,加快推进雄安新区地热项目示范样板建设。

下一步,华北油田将以中深层地热资源为基础,浅层地热资源利用为补充,油田余热利用为特色,积极打造中国北部地区最大地热利用市场,推动油田向“热田”转型升级。