

干热岩生产井温度场的热力计算

唐志伟¹, 米倡华¹, 安爱明², 张学峰¹

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120)

摘要: 为了研究干热岩生产井产液的保温增效问题, 根据北京市某生产井井身结构特点, 建立了井筒传热计算模型, 利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD) 软件对该生产井探测数据进行了核实, 并在此基础上提出了对干热岩生产井产液温度场影响因素的分析. 结果表明: 生产井三开段底部产水源的产液温度最高, 热储量大, 可使井口出口温度由 333.1 K 提高到 342.3 K; 同等工程参数下, 泵管下入深度增加到 400 m 时, 可使产液井口出口温度提高到 337.6 K, 且下入深度越大, 产液出口温度越高; 产液产速越大, 生产时间越少, 减少了产液热能损失, 产液出口温度变大; 相同泵管深度条件下, 保温材料泵管产液出口温度比常规材料泵管高出 2 K, 可提高生产效率.

关键词: 干热岩; 地热能; 生产井; 温度场

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)04-0644-05

doi: 10.11936/bjtxb2016070079

Calculation of Temperature Field for Hot Dry Rock Production Wells

TANG Zhiwei¹, MI Changhua¹, AN Aiming², ZHANG Xuefeng¹

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: To study the thermal efficiency of hot dry rock production wells producing fluid, according to the structural characteristics of the well depth of a Beijing production wells, the wellbore heat transfer calculation model was established, which verified the geothermal well detection data by using computational fluid dynamics(CFD) software. And on the basis of above research, the analysis of the factors was proposed which affect production well fluid temperature field. Results show that the temperature of the water produced at the bottom of the production well three open section is highest of all, and the heat storage capacity of the water is very big, which makes the outlet temperature of the wellhead increases from 333.1 K to 342.3 K; under the same engineering parameters, when the depth increases to 400 m, it makes the wellhead outlet temperature increase to 337.6 K, and the deeper the depth is, the higher the outlet temperature of the liquid producing will be; as improve produced fluid production rate, the shorter production time and heat loss, the larger outlet temperature of liquid producing; under the same condition pump pipe depth, outlet temperature of the liquid producing for heat preservation material pump pipe is 2 K higher than convention pump pipe material, which improve the production efficiency.

Key words: hot dry rock; geothermal energy; production well; temperature field

收稿日期: 2016-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306005)

作者简介: 唐志伟(1966—), 男, 副教授, 主要从事地热能等可再生能源方面的研究, E-mail: tangzhiw@263.net

干热岩以其清洁、环保、可再生等特点,被世界公认为是缓解未来能源危机和改革国家能源结构的绿色能源。我国干热岩储量丰富,据国土资源部的评价结果显示,我国在3~10 km深处的干热岩可开发利用的能源总量,可折合标准煤 85.6×10^5 亿t,以2%作为浅层干热岩开发利用效率计算,可节约能源总量折合标准煤 1.71×10^5 亿t,约是我国目前年均实际能耗的5200倍,可以极大地改善我国能源消耗的现状^[1],因此,干热岩的开发研究引起国内外学者的广泛关注。刘永贵等^[2]结合地热井单井抽水试验,阐述了井内等效降深的换算方法,为参数计算奠定了基础。Ramey^[3]提出了井筒传热的简化模型,假设油管、套管或环空中有流体流动,而地层没有水流流动,从而得到了井筒温度与井深的关系式,Ramey模型迄今为止仍然被广泛应用。肖香姣等^[4]基于Ramey经典井筒温度计算模型,建立了2种考虑复杂井身结构的温度分布计算模型,与实测资料对比,给出了计算模型的误差对比,分析了井身结构对井筒温度分布计算的影响。朱明等^[5-6]针对地热井的保温增效问题,建立了井筒温度计算模型,分析了生产井热损失敏感性因素的影响。Hasan等^[7-8]根据能量守恒建立了两相流的井筒温度分布模型,提出预测井筒两相流第二界面温度的方法。Rees等^[9]应用数值模拟方法演示了地热井钻井过程中井筒温度和压力变化,并指出了影响井筒生产过程热力变化的因素。Hagedorn等^[10]基于所假设的压力梯度模型,根据大量的现场试验数据反算持液率,提出了用于各种流型下的两相垂直上升管流压降关系式。地热井井筒温度分布受地层、产液、井筒结构等多种因素影响,采用实验方法来验证这些因素对井筒温度的影响难度非常大,因此,数值模拟方法被广泛应用于井筒温度的预测研究中^[11]。本文采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件,结合北京某干热岩项目生产井生产实例,建立了井筒生产结构的物理模型和数学模型,通过对模拟数据和实测数据的核实,分析了干热岩井筒传热结构温度场的分布情况,并在此基础上,阐述了泵管下深深度、保温泵管等因素与生产井井筒温度分布的关系。

1 建立干热岩生产井井筒模型

1.1 假设条件

依据常规干热岩生产井井筒产液换热的特点和本文所述的砂岩生产井的特性,对本文生产井井筒

传热模型做出以下假设:

- 1) 井筒中的水流为一维稳态传热,截面上的流体温度一致。
- 2) 生产液中为单相水,且材料及产液的物性参数不随温度和压强的变化而变化。
- 3) 考虑井筒中因摩擦而引起的对产液的变化。
- 4) 忽略井筒中的产液在垂直方向上的热传导。
- 5) 井筒中自由液面深度距离井口深度为0 m,且液面深度始终不变。

1.2 物理模型

本文结合北京某干热岩生产井施工实例,建立了井身结构模型(如图1所示),地质类型为砂岩地热储层^[12],井身为三开段结构:一开段井身下套管固井,由于泵室的存在,具有较大的内径,热水泵直接在泵室中吸水,并通过泵管输送到地面;二开段井身不进行固井作业,直接下套管,仅封固一开与二开套管重叠部分,采用悬挂器或止水器进行悬挂及裸眼封隔,减少套管中的热水与管外低温水的传热;三开段采用悬挂筛管或滤水管取水,是全井段产水的主要来源^[13]。

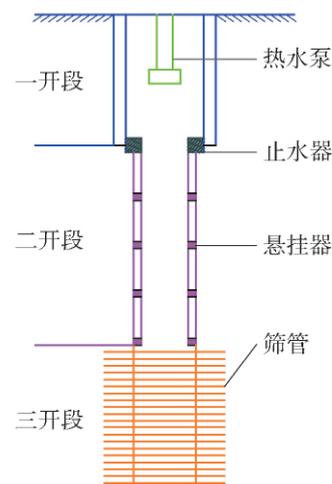


图1 生产井井身结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of production well structure

1.3 数学模型

1.3.1 能量平衡方程

生产井生产过程中,产液沿井筒结构上升时,不断向周围岩石散发热量,其温度逐渐下降,在此过程中,取微元段 dl 产液作为运动热源分析,将坐标系圆点置于生产井井底中心位置处,运动热源仅沿垂直方向运动,且认为其界面上的温度是均匀的,简化对问题的描述,视井筒整体为稳定温度场^[14]。

$$\frac{d^2 t}{dl^2} - \frac{U_{pc}}{\lambda} \frac{dt}{dl} + \frac{Kp\theta dl}{\lambda} = 0$$

式中: dt 为微元段温度梯度, K; dl 为微元段长度, m; U 为运动热源流动速度, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; c 为流体比热容, J/(kg·K); λ 为流体导热系数, W/(m·K); K 为总传热系数, W/(m²·K); p 为微元段周长, m; θ 为流体过余温度, K.

1.3.2 井筒传热系数

这里取生产液一开泵室段传热系数作为说明, 泵管内产液至周围井筒结构依次为产液、泵管、环空、套管、水泥环、地层. 泵管内产液热量从泵管内向周围径向传递时, 将产液假设为一个运动热源, 向周围多层圆柱体传热^[15], 总传热系数 K 计算如下:

$$\frac{1}{K} = \frac{dA_{i_1}}{h_1 dA_{i_1}} + \frac{x_1 dA_{i_1}}{k_1 dA_{i_1}} + \frac{dA_{i_2}}{h_2 dA_{i_2}} + \frac{dA_{i_3}}{h_2 dA_{i_3}} + \frac{x_c dA_{i_3}}{k_c dA_{i_3}}$$

式中: $A_{i_1} = \frac{A_{i_0} - A_{i_2}}{\ln(A_{i_0}/A_{i_2})}$, A_{i_1} 为泵管内径微元段面积,

m^2 ; A_{i_0} 为泵管外径微元段面积, m^2 ; A_{i_2} 为环空内径微元段面积, m^2 ; A_{i_3} 为环空外径微元段面积, m^2 ; x_c 为套管内径, m; x_1 为油管外径, m; h_1 为泵管内流体的热对流系数, W/(m²·K); h_2 为环空内流体的热对流系数, W/(m²·K); k_1 为泵管材料的导热系数, W/(m·K); k_c 为套管材料的导热系数, W/(m·K).

2 工程案例

2.1 基础工程参数

北京市某干热岩生产井属于砂岩热储生产井, 井筒结构与图1所述的结构类似, 生产井成井后所用材料及工程参数如表1所示. 本文下述模拟计算亦采用与工程项目一致的参数, 对影响生产井产液温度分布的因素进行探析.

表1 某生产井工程参数

Table 1 Engineering parameters of a geothermal well

工程参数	取值	工程参数	取值
水层顶深/m	2 300	泵管下深/m	100
地表温度/K	293	地温梯度/(K·m ⁻¹)	0.031 2
一开段深度/m	500	管壁粗糙度/mm	0.002 3
一开段套管内径/mm	334.2	一开段套管外径/mm	359.2
泵管导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	50	水泥环外径/mm	440.2
二开段套管内径/mm	170.3	二开段套管外径/mm	185.3
泵管外径/mm	98.2	泵管内径/mm	86.2
套管导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	50	止水器外径/mm	440.2
二开段深度/m	2 300	产速/(t·h ⁻¹)	100
保温泵管导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	0.015	水泥环导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	1.1
地层导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	1.52	水比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	4 187

2.2 井筒温度分布

该生产井在施工过程中, 提取了地层深度原始地层温度, 生产井成井后, 井筒产液温度分布如图2所示, 其中, 原始地层温度随地层深度呈线性变化, 产液温度远高于相同深度的地层温度. 产液在井筒二开段, 温度下降幅度较小, 这是由于在二开段, 产液温度与地层温度差较小, 所引起的热传递速度较慢. 产液在一开段温度下降幅度较大, 因为在一开段, 井筒半径较大, 产液流动速度较小, 与地层越近温度差越大, 发生热传递的动力越强; 因此, 通过对井筒一开段的改造可以有效地对产液进行保温增效.

3 井筒温度场影响因素

3.1 井筒局部产水部位的影响

由图3数据显示, 该生产井属于砂岩地热储层地质结构类型, 井下三开段为该生产井的主要产水

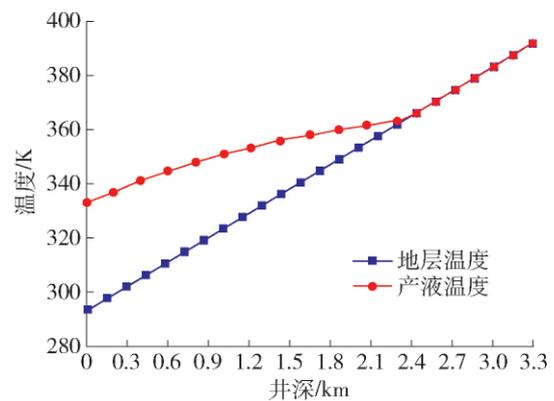


图2 北京某生产井井筒产液温度分布

Fig. 2 Temperature distribution for Beijing geothermal wells wellbore fluid

来源. 不同的地层深度的产水源, 井筒温度分布具有较大的差异. 图3清楚地显示了产水源分别位于

三开段顶部、中部、底部时的温度分布情况,在同等工程参数下,保持一致的产速,产水源位于三开段顶部,产水温度较低,井口产液温度较低,当产水源位于三开段底部时,受地层温度的影响,产水温度较高,产液自身热储量大,可以平衡一部分热损失.产水源在三开段顶部时,井口产液温度为 333.1 K,底部产水源井口的出口温度为 342.3 K,比顶部产水源产液出口温度高 9.2 K.因此,可以通过有效的洗井、地层出砂等措施,控制热并产水部位,提高热井利用效率.

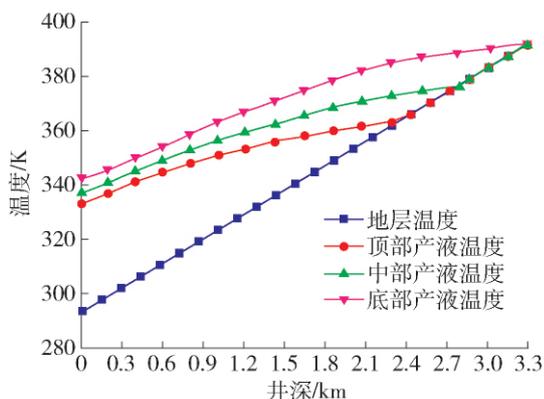


图3 不同部位产水源时井筒产液温度分布
Fig.3 Different parts of the wellbore fluid temperature distribution in produced water

3.2 泵管下入井筒深度的影响

鉴于该生产井生产实例,产液温度在井筒顶层一开段温度下降幅度较大,产液在一开段内,可控制泵管下入井筒的深度,延长泵室的长度,增加热水泵进口产液温度,由泵管输送到地面,从而达到保温的目的.模拟结果如图4所示,由于井筒中自由液面深度与井口深度的距离为 0 m,且液面深度始终不变,井筒温度传热模型处于稳定状态,将泵管下入到泵室 400 m 处,产液温度偏离原有产液温度曲线,其井口出口温度为 337.6 K,比泵管下深 100 m 时的产液温度高出 4.5 K,保温效果比较明显.

3.3 产液产速的影响

对产液的控制,主要取决于生产井的用途,如图5所示,在原始热井生产实例的基础上,取产液产速为 50、100、150、200 t/h 进行计算,井口产液出口温度分别为 323.5、333.1、339.2、344.5 K.可以看出,对于不同的生产井产液速度,井筒产液温度沿地层深度分布具有较大的差异.生产井产液产速越大,产液在井筒中发生热传递的时间越小,在相同地质条件下,可减少产液热损失;当产液产速越小时,产

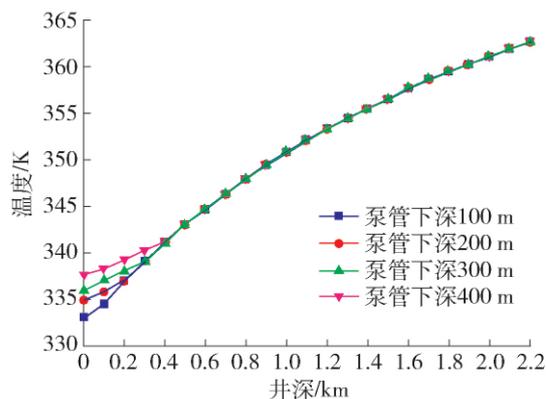


图4 泵管不同下入深度时井筒产液温度分布
Fig.4 Wellbore fluid temperature distribution for owing to different depth

液发生热传递的时间就越长,特别是在一开段,产液与周围底层温差较大,热损失较为严重.因此,在生产井设计过程中,合理控制生产井产液产量,有利于提高生产井的利用效率.

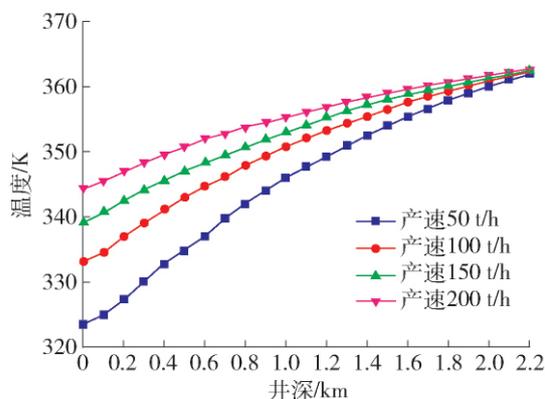


图5 不同产速时井筒产液温度分布
Fig.5 Wellbore fluid temperature distribution in different production speed

3.4 保温材料的影响

如图6所示,采用保温泵管材料和常规泵管材料分别对泵管下深 400 m,描述了生产井井筒产液温度分布情况.常规材料的导热系数为 50 W/(m·K),保温材料的导热系数为 0.015 W/(m·K),保温材料的使用增加了产液发生热传递的热阻,有效地隔离了泵管产液与管外低温流体的接触,减少了产液热能的损失,增加了井口出口温度.常规泵管没有保温效果,产液热损失较大,其产液井口出口温度为 337.6 K,使用保温材料泵管后,该产液井口出口温度为 339.6 K,比常规材料泵管产液温度高出 2 K,因此,在生产井工程中,使用保温材料是对产液保温增效的有效措施.

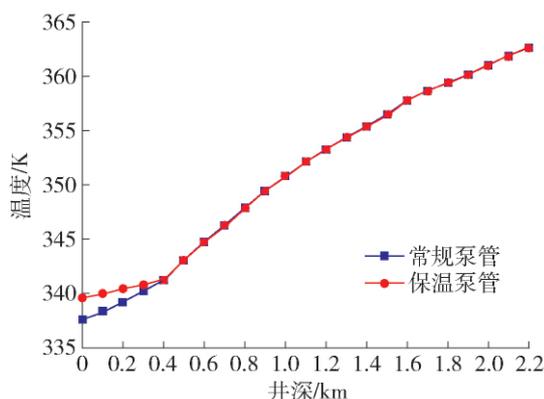


图6 不同泵管材料的井筒产液温度分布

Fig. 6 Wellbore fluid temperature distribution in the different pump pipe material

4 结论

1) 本文提取了北京某干热岩生产井施工及生产实例数据,描述了生产井井筒产液温度的分布情况,解释了温度变化情况的原因。

2) 生产井井筒三开段底部产水源温度最高,产液热储量最大,井口出口温度为 342.3 K;顶部产水源温度相对较低,产液井口出口温度为 333.1 K。井筒局部产水源不同,温度变化明显。

3) 同等工程参数的条件下,将泵管下入井筒 400 m 时,可以提高热水泵进口产液温度,其井口出口温度比泵管下入井筒 100 m 时高出 4.5 K。

4) 根据生产井产液用途,合理地控制生产井产液产速,有利于提高干热岩生产井的利用效率。

5) 使用保温材料泵管,下入井筒 400 m,在相同深度条件下,保温材料产液出口温度比常规材料泵管高出 2 K,使用保温材料是对产液保温增效的有效措施。

参考文献:

[1] 蔺文静,刘志明. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报,2012,33(5): 807-811.
LIN W J, LIU Z M. An estimation of HDR resources in China's mainland [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5): 807-811. (in Chinese)

[2] 刘永贵,王亿管,廉辉民,等. 地热井单井抽水试验等效降深的换算方法[J]. 工程勘察,2016(2): 36-40.
LIU Y G, WANG Y G, LIAN H M, et al. Conversion method of equivalent draw down during pumping test of single geothermal well [J]. Geotechnical Investigation Surveying, 2016(2): 36-40. (in Chinese)

[3] RAMEY H J. Wellbore heat transmission [J]. Journal of

Petroleum Technology, 1962, 14(4): 427-435.

[4] 肖香皎,姜汉桥. 高温高压复杂井身结构气井井筒温度计算方法[J]. 科技导报,2011,29(29): 32-37.
XIAO X J, JIANG H Q. Temperature computational method of complicate bore frame gas well wellbore with high temperature and pressure [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(29): 32-37. (in Chinese)

[5] 朱明,段友智,高小荣,等. 地热井热损失影响因素敏感性分析[J]. 科技导报,2015,33(22): 32-36.
ZHU M, DUAN Y Z, GAO X R, et al. Heat preservation suggestion and heat loss analysis of geothermal well [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(22): 32-36. (in Chinese)

[6] 朱明,段友智. 基于温度场模型的地热井完井管柱结构优化[J]. 科学技术与工程,2015,2(8): 29-32,52.
ZHU M, DUAN Y Z. Completion string structure optimization for geothermal well based on temperature field model [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 2(8): 29-32, 52. (in Chinese)

[7] HASAN A R, KABIR C S, SAYARPOUR M. Simplified two-phase flow modeling in wellbores [J]. Petroleum Science and Engineering, 2010, 2(7): 42-49.

[8] HASAN A R, KABIR C S. Wellbore heat-transfer modeling and applications [J]. Petroleum Science and Engineering, 2012, 21(3): 127-136.

[9] REES S J, HE M M. A three-dimensional numerical model of borehole heat exchange heat transfer and fluid flow [J]. Geothermics, 2013, 46(10): 1-13.

[10] HAGEDOM A R, BROWN K E. Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits [J]. Powder Technology, 1965(4): 475-484.

[11] SPINDLER R. Analytical models for wellbore temperature distribution [J]. Energy and Buildings, 2011, 16(1): 125-133.

[12] 北京市地质矿产勘查开发局. 北京城市地质[M]. 北京: 中国大地出版社,2008: 86-98.

[13] 国土资源部国科司. 地热资源地质勘查规范: GB/T11615—2010[S]. 北京: 中国标准出版社,2010: 17-22.

[14] 刘永亮. 深层地热井施工成井工艺[J]. 中国科技信息,2016(6): 15-16.
LIU Y L. Construction suppling technology for the deep geothermal well [J]. China Science and Technology Information, 2016(6): 15-16. (in Chinese)

[15] 徐家年,王延瑞. 生产井井筒径向热传导研究与计算[J]. 内蒙古石油化工,2015(3): 9-10.
XU J N, WANG Y R. The radial heat transfer research and calculation geothermal wells wellbore [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2015(3): 9-10. (in Chinese)

(责任编辑 梁洁)