第41卷 第10期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 10
2020年10月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Oct., 2020

文章编号:0254-0096(2020)10-0369-06

既有地热单井采暖系统换热量的增强方法

卜宪标[1~3]，冉运敏[1,4]，李华山[1~3]，雷军民[5]，王令宝[1~3]

（1. 中国科学院广州能源研究所，广州 510640；2. 中国科学院可再生能源重点实验室，广州 510640；
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室，广州 510640；4. 中国科学院大学，北京 100049；
5. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司，兰州 730314）

摘 要：针对企业关注的单井换热量提高和优化运行问题，建立地热井内流体的流动换热方程和岩石的能量方程，并与热泵相结合，分析保温材料性能、注入水温度和流量对系统性能的影响。结果表明：地热井采出热功率随保温材料性能的增强而增大，保温材料导热系数从0.21 W/(m·K)减小到0.04 W/(m·K)时，地热井采出热功率从516.62 kW增加到543.92 kW；降低注入水温度可增大热泵输出功率，注入水温度为2.5、5.0、7.5和10.0 ℃时，地热井采出热功率分别为579.86、550.82、521.78、492.74 kW，热泵的输出功率分别为796.70、744.99、694.38、645.14 kW；井内对流热阻远小于岩石导热热阻，流量的增加对于提高换热量的作用较小。

关键词：地热采暖；地热能；热阻；保温；单井；井下换热器

中图分类号：TK52 **文献标志码**：A

0 引 言

冬季采暖特别是化石能源采暖，加重了中国北方地区的雾霾问题。现阶段供暖领域迫切需要开发技术和经济均可行的清洁能源采暖方案。作为清洁可再生能源采暖方案之一，地热采暖特别是水热型地热和浅层地热备受市场重视。单井地热采暖（single well geothermal heating，SWGH）系统是近几年出现的一种新技术，井深一般为2~3 km，采用注入通道和采出通道同轴的结构见图1。SWGH属于全封闭循环，循环流体不与岩石接触，通过金属井壁与岩石换热，避免了腐蚀结垢和回灌等问题，取热不取水，因而备受市场欢迎。SWGH不依赖地下热水资源，在无水或少水的区域均可应用且系统占地小，如能大量推广应用，可有效缓解中国北方的雾霾问题。

目前有关将废弃油气井改造为SWGH的研究较多[1]。孔彦龙等[2]对SWGH的技术原理进行了分析并分几个应用场景评估了其性能。程文龙等[3-6]分析了井深、运行时间、循环工质种类和地温梯度等对SWGH性能的影响。Røksland等[7]对废弃井地热再利用过程中循环工质密度、比热和导热系数对采出流体温度的影响

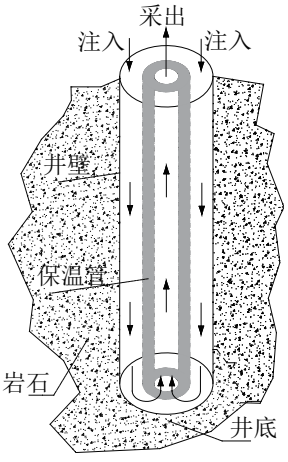

图1 单井地热换热原理图

Fig. 1 Geothermal single well principle diagram

进行了分析。Davis等[8]和Noorollahia等[9]对废弃油井改造为地热井进行发电开展了研究，分析了循环流量对发电功率的影响。崔国栋等[10]研究了水平井获取地热能的可行性，分析了水平井段长度、井底温度和系统运行时间对性能的影响。Caulk等[11]分析了废弃油气井井底温度对系统性能的影响。Alimonti等[12]对利用废弃油气井进行地热发电的问题开展了研究，分析了温度

收稿日期：2018-04-27
基金项目：国家高技术研究发展(863)计划(2012AA053003)；中科院青年创新促进会资助项目(2014332；2017402)
通信作者：王令宝(1986—)，男，硕士研究生、助理研究员，主要从事地热能利用方面的研究。wanglb@ms.giec.ac.cn

分布随井深的变化。Kujama 等[13]通过建立传热方程研究了单井地热的换热情况，讨论了不同速度的循环流体所对应的采出热量。

在实践方面，华北油田新留检 1 井的地热水采灌试验表明[14]：平均井口温度 116 ℃，日产液 1932 m³/d，试验结果表明利用老油井改造为地热井进行地热开发是可行的。目前国内很多企业已涉足 SWGH，并在天津、北京、沈阳、西安和青岛等多地开展了工程实践。在实践过程中遇到最突出的问题是单井换热量少、投资回收期长。对于一口已完钻的地热井，其井深、结构尺寸、岩石物性和地温梯度均已知，在这种情况下企业最关心 2 个问题：一个是通过何种措施可最大程度地提高单井的换热量和地上热泵，另一个是地下热储如何匹配才能使系统运行在最优工况。这 2 个问题关系到投资回收期，更关系到投资者的信心和决策制定。

现有文献鲜见系统解决这 2 个问题，本文通过建立地热井内流体的流动换热方程和岩石的能量方程，并与热泵系统相结合回答这 2 个问题，以期使有意向的企业认识 SWGH 的性能，为 SWGH 的推广和雾霾的解决做出贡献。

1 基本原理及数学模型

1.1 基本原理

单井地热采暖的原理如图 1 所示，系统主要包括岩石、井壁和保温管。井壁和保温管组成的环空部分作为注入通道，保温管作为采出通道，注入通道底部封死。流体从注入通道流入，到达井底后反向从采出通道流出，注入流体通过井的外壁和岩石换热，整个地下系统相当于一个深井换热器(井下换热器)。

1.2 数学模型

数学模型主要包括注入通道和采出通道中流体的流动和换热方程、岩石的能量方程及其相互间的热量传递[15-19]。

1.2.1 采出通道中流体的流动换热方程

$$\frac{\partial T_1}{\partial t}+\frac{\partial(V_1T_1)}{\partial z}=-S_{12} \tag{1}$$

$$S_{12}=\frac{k_L[T_1-T_2]}{\rho A_1 c_p} \tag{2}$$

$$k_L=\frac{\pi}{\frac{1}{2h_1r_1}+\frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{1}{2h_2r_2}} \tag{3}$$

式中，T_1 ——采出通道中流体的温度，℃；V_1 ——采出通道中流体的流速，m/s；S_{12} ——采出和注入通道之间的传热，℃/s；k_L ——单位长度传热量，W/(m×K)；T_2 ——注入通道流体的温度，℃；r ——水的密度，kg/m³；A_1 ——采出通道流通面积，m²；c_p ——水的比热，J/(kg·K)；h_1 ——采出通道内壁对流换热系数，W/(m²·K)；r_1 ——保温管内半径，m；λ_1 ——保温材料的导热系数，W/(m·K)；r_2 ——保温管外半径，m；h_2 ——采出通道外壁对流换热系数，W/(m²·K)。

1.2.2 注入通道中流体的流动换热方程

$$\frac{\partial T_2}{\partial t}+\frac{\partial(V_2T_2)}{\partial z}=S_{12}+S_{23} \tag{4}$$

$$S_{23}=\frac{h_3 2\pi r_3(T_3-T_2)}{\rho A_3 c_p} \tag{5}$$

式中，V_2 ——注入通道中流体的流速，m/s；S_{23} ——流体和井壁之间的传热，℃/s；h_3 ——内井壁对流换热系数，W/(m²·K)；r_3 ——金属井管内半径，m；T_3 ——和流体接触的井壁温度，℃；A_3 ——注入通道流通面积，m²。

1.2.3 岩石的能量方程

$$\frac{\partial T_4}{\partial t}=\frac{\lambda_4}{\rho_4 C_4}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_4}{\partial r}\right)\right],\ r_4\leqslant r\leqslant r_\infty \tag{6}$$

式中，T_4 ——岩石的温度，℃；λ_4 ——岩石的导热系数，W/(m·K)；r_4 ——岩石的密度，kg/m³；C_4 ——岩石的比热，J/(kg·K)；r_4 ——金属井管外半径，m，$r_4=r_3+b_4$，其中 b_4 为金属井壁厚度，m。

1.2.4 对流换热系数

流体和管壁的对流换热系数采用 Dittus-Boelter 公式[20-21]进行计算。注入通道中流体的对流换热系数 h_3 和 h_2 采用式(7)计算：

$$h=0.023\lambda\frac{Re^{0.8}Pr^{0.4}}{d_e} \tag{7}$$

式中，d_e ——水力直径，m。

采出通道中流体的对流换热系数：

$$h_1=0.023\lambda\frac{Re^{0.8}Pr^{0.3}}{2r_1} \tag{8}$$

本文中注入和采出通道中流体的雷诺数 Re、普朗德数 Pr 以及井的结构参数均满足 Dittus-Boelter 公式。

1.2.5 边界条件

岩石传给井壁的热量等于井壁传给流体的热量，三者的接触处采用第三类边界条件给出：

$$h_3(T_3-T_2)\big|_{r=r_3}=\lambda_4\frac{\partial T_4}{\partial r}\Big|_{r=r_4} \tag{9}$$

1.2.6 初始条件

地表温度 T_{biao} 为 15 ℃，地温梯度 T_g 为 27 ℃/km。地

热井规格：井管Φ177.8×6.91 mm，保温管Φ110×10 mm，井深2600 m。岩石密度2800 kg/m^3，比热920 J/(kg·K)，导热系数为3.49 W/(m·K)。每年采暖20周，其他时间岩石恢复温度。

对于单井地热采暖系统，为获取更多热量，注入水温一般较低，因此系统需增加热泵设备，提升采出水温度后用于采暖。由于单井地热系统全封闭，无腐蚀结垢问题。因此，地热井的采出水直接进热泵的蒸发器。地热井的注入水温度等于热泵蒸发器的出水温度。在单井地热采暖工况下(45/40 ℃)，某型热泵的制热系数COP与T_{in}符合式(10)所示关系：

$$COP = 3.53529 + 0.0508T_{in} + 0.0019T_{in}^{2} \quad (10)$$

式中，T_{in}——蒸发器的出水温度，℃。

$$COP = \frac{Q_T}{Q_T - Q_E} \quad (11)$$

式中，Q_T——单井地热采暖系统热泵输出的总功率，kW；Q_E——从地热井采出的热功率，kW。

通过式(10)和式(11)可知Q_T、Q_E、COP和T_{in}的关系，确定热泵的最优运行工况。

2　关键方法

在井深、井结构尺寸、岩石物性和地温梯度均已知的情况下，欲提高单井换热量，从传热学的角度出发有3个措施：1)提高保温材料的性能，减少热损失；2)降低注入水温度，提高传热温差；3)增加注入水流量，降低井内对流换热热阻。

2.1　保温材料性能

已知条件：T_{in}=5 ℃，m=30 t/h，其中m为注入水质量流量。图2是在一个采暖季中，Q_E随λ_1和采暖时间的变化。由图2可知，λ_1越小Q_E越大。λ_1分别为0、0.04、0.10和0.21 W/(m·K)时，对应的一个采暖季平均Q_E分别为550.82、543.92、533.93、516.62 kW。目前很多地热单井采暖工程采用PPR管作为采出井管，其导热系数为0.21 W/(m·K)。市场上较好的保温材料导热系数一般超过0.04 W/(m·K)。两者对比可知，导热系数为0.04 W/(m·K)的材料较0.21 W/(m·K)的，换热量可增加27.31 kW。

以青岛地区为例，假设采暖热负荷为30 W/m^2，则27.31 kW的热量可够约910 m^{2}的建筑采暖。对于地热采暖，按每平方米建筑一个采暖季收费25元计算，则每个采暖季多收采暖费22750元，20个采暖季多收采暖费455000元。从事单井地热采暖的企业可参考上述数据，权衡购置高性能保温材料的投入与对应的收益，做出合理的决策。

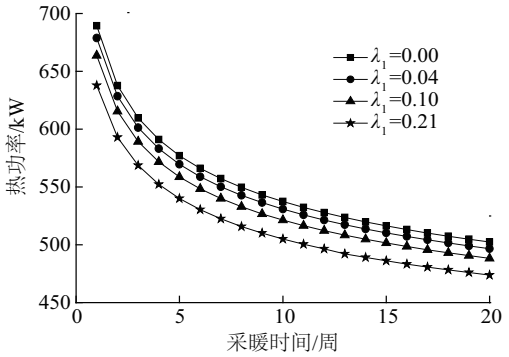

图2　Q_E与λ_1的关系

Fig. 2　Relationship between Q_E and λ_1

图3为采暖开始20周后井内流体温度随井深的变化关系。由图3可知，λ_1越大注入井内流体温度越高，而井口采出水温度越低。这是因为λ_1越大采出通道内流体的热量传递到注入通道内的越多，导致注入通道内流体的温度升高越大，而采出通道内流体的温降越大。λ_1分别为0、0.04、0.10、0.21 W/(m·K)时，对应的井口采出水温度分别为19.47、19.31、19.07、18.66 ℃。

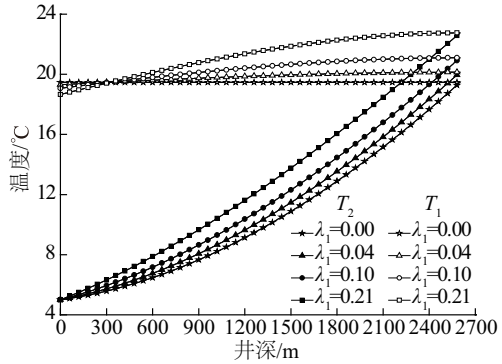

图3　注入和采出通道内的水温变化

Fig. 3　Temperature variations in injection channel and extraction channel

图4所示为井深对单位延米换热功率和注入通道内水温的影响。图中q_L表示单位延米换热功率，可以发现q_L随井深基本呈线性增大的趋势。可见，增大钻井深度是增大单井取热功率的有效手段，但实际工程中还要兼顾经济性。地热井深度每增加1米，q_L增大约0.105 W/m，这是因为岩石温度随井深的增加远大于注入通道内水温随井深的增加，两者之间的传热温差随井深在增大。

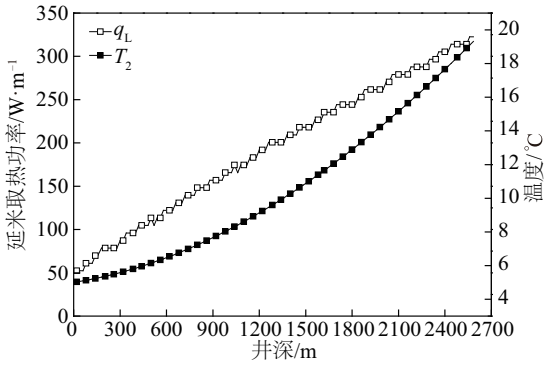

图4 井深对单位延米取热功率与注入通道内水温的影响

Fig. 4 Variations of q_L and T_2 with depth of well

2.2 注入水温度

已知条件：$\lambda_1=0$，$m=30$ t/h。由图5可知，在一个采暖周期内，随着T_{in}的减小，Q_E和Q_T都增大。以整个采暖季的平均Q_E和Q_T作为指标，T_{in}分别为2.5、5.0、7.5、10.0 ℃时，对应的平均Q_E分别为579.86、550.82、521.78、492.74 kW，对应的平均Q_T分别为796.70、744.99、694.38、645.14 kW。上述数据说明，在热泵允许的条件下，应尽可能降低注入水温度，以获得更大的输出热功率。但是，以水作为循环工质，如果注入温度低于0 ℃易导致结冰。在热泵性能和经济性许可的条件下，可采用换热性能较好的防冻液体作为循环注入工质。

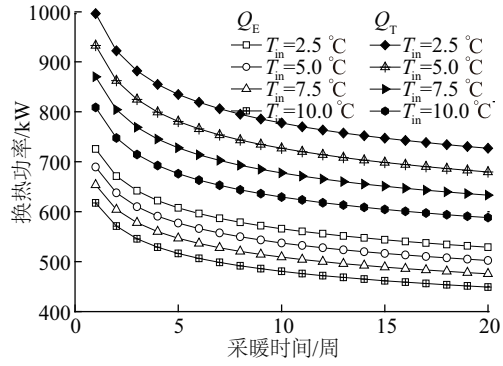

图5 Q_E和Q_T随T_{in}的变化

Fig. 5 Variations of Q_E and Q_T with T_{in}

图6所示为一个采暖季结束时岩石的温度场，Z表示岩石的深度。由图6可知，注入水温度越低，造成的岩石温降越大。靠近井壁的岩石温降大，说明岩石的导热系数小，无法将远处的热量快速传导到近井地带。对于$T_{in}=2.5$ ℃工况，一个采暖季结束时，$Z=500$、1500、2500 m，距离井壁15 m处岩石的温度较未受干扰时分别降低0.03、0.05、0.07 ℃，说明一个采暖季结束，岩石的受干扰范围达到半径15 m。

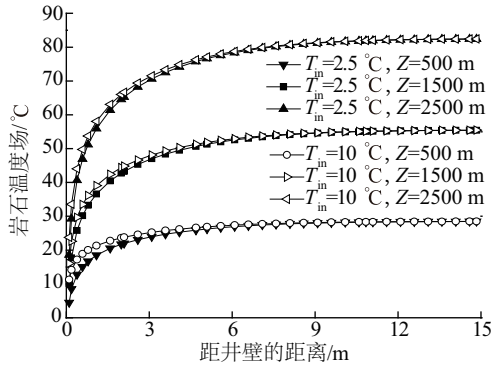

图6 岩石温度场

Fig. 6 Rock temperature field

2.3 注入水流量

已知条件：$T_{in}=5$ ℃，$\lambda_1=0$。由图7可知，Q_E随m的增大而增大。以整个采暖季的平均Q_E来对比，流量为30、40、50 t/h对应的整个采暖季平均Q_E分别为550.82、570.57、582.94 kW。以百分比来衡量，流量为40、50 t/h工况比30 t/h工况下增加的百分比分别为33.33%、66.67%，而平均Q_E增大的百分比分别为3.59%、5.83%。流量的增加伴随着循环注入泵功耗的增加，因此应考虑经济合理的流量。

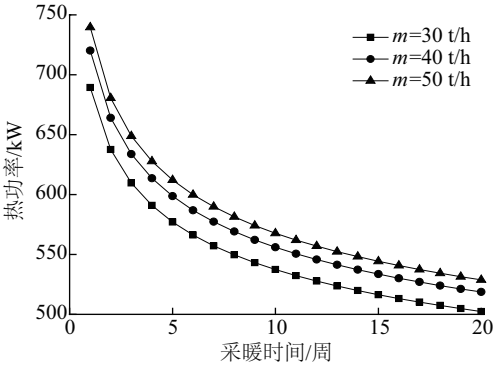

图7 Q_E与m的关系

Fig. 7 Relationship between Q_E and m

通过热阻分析简要说明流量的增幅远大于换热量增幅的原因。岩石向井内传热，其热阻主要包括岩石导热热阻R_R、井壁导热热阻R_S、井内壁流体的对流换热热阻R_H这3个部分。通过对图6分析可知，经过一个采暖季，岩石温度受干扰范围达到半径15 m。按15 m半径计算岩石热阻。井壁的导热系数16.3 W/(m·K)，岩石的导热系数3.49 W/(m·K)，流体按10 ℃计算。$R_S=7.90\times10^{-4}$ m·K/W，$R_R=2.72\times10^{-1}$ m·K/W。

流量为30、40、50 t/h时对应的R_H分别为10.64×

10^{-4}、8.46×10^{-4}、7.07×10^{-4} m·K/W。可见，R_H 和 R_S 的数量相当，都远小于 R_S。热阻主要出现在岩石侧，流量的增加对于减小总热阻所起到的作用微乎其微。因此，想通过增加流量大幅提高换热的做法不可行，但在考虑泵功的条件下，可在经济合理的范围内调整流量。

结合热阻分析图 6 可知，近井岩石存在较大的温度梯度，这说明岩石的导热系数小、热阻大，无法将远处岩石的热量迅速传导到近井处，致使近井处岩石的热量得不到快速补充，造成地热井周围岩石的温度迅速降低，这是单井换热量小的最主要原因。因此，提高单井换热量的有效手段是强化岩石的传热性能，特别是近井地带的岩石，以便将远处岩石的热量快速传导到井内。可在岩石热储中形成流动，比如压裂或选择渗透性好有含水层的地点钻井，通过对流换热解决岩石导热系数小热阻大的问题。

3　结　论

对于一口已经完钻的地热井，企业最关心如何提高单井的换热量和地上热泵与地下热储如何匹配优化运行这 2 个问题。本文建立地热井内流体的流动换热方程和岩石的能量方程，并与热泵系统相结合，分析保温材料性能、注入水温度和注入流量对系统性能的影响，得出如下主要结论：

1）地热井采出热功率随保温材料导热系数的增加而降低，保温材料导热系数为 0、0.04、0.10、0.21 W/(m·K)时，地热井采出热功率分别为 550.82、543.92、533.93、516.62 kW。

2）每延米的换热功率随深度的增加，上部井段每延米换热功率为 50 W/m，而下部井段达到 350 W/m。因此，增加井深是提高换热量的有效手段，但要考虑经济性。

3）注入水温度分别为 2.5、5.0、7.5、10.0 ℃时，从地热井采出的热功率分别为 579.86、550.82、521.78、492.74 kW，热泵输出的总功率分别为 796.70、744.99、694.38、645.14 kW。因此，在热泵允许的条件下应尽可能降低注入水温度，以获得更大的输出热功率。

4）井内对流热阻远小于岩石导热热阻，流量的增加对于减小总热阻所起到的作用微乎其微。因此，想通过增加流量大幅提高换热的做法不可行，但在考虑泵功的条件下，可合理地调整流量。

［参考文献］

［1］ 李克文，王磊，毛小平，等. 油田伴生地热资源评价与高效开发[J]. 科技导报，2012，30(32)：32-41.
LI K W，WANG L，MAO X P，et al. Evaluation and efficient development of geothermal resource associated with oilfield[J]. Science and technology review，2012，30(32)：32-41.

［2］ 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.
KONG Y L，CHEN C F，SHAO H B，et al. Principle and capacity quantification of deep- borehole heat exchangers[J]. Chinese journal of geophysics，2017，60(12)：4741-4752.

［3］ CHENG W L，LI T T，NIAN Y L. An analysis of insulation of abandoned oil wells reused for geothermal power generation[J]. Energy procedia，2014，61：607-610.

［4］ CHENG W L，LI T T，NIAN Y L，et al. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells[J]. Applied energy，2014，118：238-245.

［5］ CHENG W L，LI T T，NIAN Y L，et al. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells[J]. Energy，2013，59：248-254.

［6］ CHENG W L，LIU J，NIAN Y L. Enhancing geothermal power generation from abandoned oil wells from abandoned oil wells[J]. Applied energy，2014，118：238-245.

［7］ RØKSLAND M，BASMOEN T A，SUI D. Geothermal energy extraction from abandoned wells[J]. Energy procedia，2017，105：244-249.

［8］ DAVIS A P，MICHAELIDES E E. Geothermal power production from abandoned oil wells[J]. Energy，2009，34：866-872.

［9］ NOOROLLAHIA Y，POURARSHAD M，JALILINASRABADY S，et al. Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oil field in southern Iran[J]. Geothermics，2015，55:16-23.

［10］ CUI G D，REN S R，ZHANG L，et al. Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission fluid in a horizontal well[J]. Energy，2017，128：366-377.

［11］ CAULK R A，TOMAC I. Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production[J]. Renewable energy，2017，112：388-397.

［12］ ALIMONTI C，SOLDO E. Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger[J]. Renewable energy，2016，86：292-301.

［13］ KUJAMA T，NOWAK W，STACHEL A A. Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy[J]. Energy，2006，31(5)：650-664.

[14] 韦雅珍，王凤清，任宝玉. 华北油区地热排采技术研究[J]. 石油钻采工艺，2009，31(增刊1)：93-95.
WEI Y Z，WANG F Q，REN B Y. Drainage and production by using geothermal in Huabei oil region[J]. Oil drilling & production technology，2009，31(S1)：93-95.

[15] 刘俊，张旭，高君，等. 地源热泵桩基埋管传热性能测试与数值模拟研究[J]. 太阳能学报，2009，30(6)：727-731.
LIU J，ZHANG X，GAO J，et al. Heat transfer performance text and numerical simulation of pile-pipe ground source heat pump system[J]. Acta energiae solaris sinica，2009，30(6)：727-731

[16] 李旻，刁乃仁，方肇洪. 单井回灌地源热泵地下传热数值模型研究[J]. 太阳能学报，2007，28(12)：1394-1401.
LI M，DIAO N R，FANG Z H. Study on numerical heat transfer models of standing column well [J]. Acta energiae solaris sinica，2007，28(12)：1394-1401.

[17] 卜宪标，谭羽非，李炳熙，等. 盐穴地下储油库热质交换及蠕变[J]. 西安交通大学学报，2009，43(11)：104-108.
BU X B，TAN Y F，LI B X，et al. Heat and mass transfer and creep in underground oil storage with cavern [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2009，43(11)：104-108.

[18] HASAN A R，KABIR C S. Modeling two-phase fluid and heat flows in geothermal wells [J]. Journal of petroleum science and engineering，2010，71(1)：77-86.

[19] BU X B，MA W B，LI H S. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells [J]. Renewable energy，2012，41：80-85.

[20] 章熙民，任泽霈，梅飞鸣. 传热学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2001：146-157.
ZHANG X M，REN Z P，MEI F M. Heat transfer[M]. Beijing：China Construction Industry Press，2001：146-157.

[21] 陶文铨. 数值传热[M]. 2版. 西安：西安交通大学出版社，2001：28-47.
TAO W Q. Heat transfer[M]. Second edition. Xi'an：Xi'an Jiaotong University Press，2001：28-47.

ENHANCING HEAT TRANSFER METHODS OF EXISTING GEOTHERMAL SINGLE WELL HEATING SYSTEM

Bu Xianbiao[1-3]，Ran Yunmin[1,4]，Li Huashan[1-3]，Lei Junmin[5]，Wang Lingbao[1-3]

(1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion*，*CAS*，*Guangzhou* 510640，*China*；
2. *Key Laboratory of Renewable Energy*，*CAS*，*Guangzhou* 510640，*China*；
3. *Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development*，*Guangzhou* 510640，*China*；
4. *University of Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100049，*China*；
5. *Lanzhou LS Energy Equip. Int'l Engineering Co.*，*Ltd.*，*Lanzhou* 730314，*China*)

Abstract：To answer the enterprise's concerns about heat transfer enhancement of geothermal single well and system optimization，a mathematical model for heat transfer between rock and geothermal well is developed. The effects of thermal insulation materials and temperature and velocity of injection water on the performance of heating system combined with heat pump are discussed. The results show that：The extraction heat power increases from 516.62 to 543.92 kW when the thermal conductivity of thermal insulation materials varies from 0.21 to 0.04 W/(m·K)；The output power of heat pump can be enhanced by reducing injection water temperature. The extraction heat power and output power of heat pump are respectively 579.86，550.82，521.78，492.74 kW and 796.70，744.99，694.38，645.14 kW when injection water temperature is 2.5，5.0，7.5 and 10.0 ℃；The thermal resistance of convective heat transfer of geothermal fluid in well is far less than the conduction thermal resistance of rock. So，the flow rate of water has a very small influence on the heat transfer.

Keywords：geothermal heating；geothermal energy；thermal resistance；thermal insulation；single well；borehole heat exchangers