



翟海珍, 苏正, 凌璐璐, 等. 2016. 平行多裂隙模型中换热单元体对 EGS 采热的影响. 地球物理学进展, 31(3): 1399-1405, doi: 10.6038/pg20160364.

ZHAI Hai-zhen, SU Zheng, LING Lu-lu, et al. 2016. Impact of heat transfer unit on EGS heat extraction in the multi-parallel fracture model. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(3): 1399-1405, doi: 10.6038/pg20160364.

## 平行多裂隙模型中换热单元体对 EGS 采热的影响 Impact of heat transfer unit on EGS heat extraction in the multi-parallel fracture model

翟海珍<sup>1,2</sup>, 苏正<sup>1\*</sup>, 凌璐璐<sup>1</sup>, 吴能友<sup>1</sup>

ZHAI Hai-zhen<sup>1,2</sup>, SU Zheng<sup>1\*</sup>, LING Lu-lu<sup>1</sup>, WU Neng-you<sup>1</sup>

1. 中国科学院广州能源研究所, 可再生能源重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**摘要** 增强型地热系统(EGS)是开发深层高温地热能的有效途径. 本文在垂直单裂隙模型(SVFM)的基础上构建了平行多裂隙模型(MPFM), 验证了其可靠性及优越性, 创新地提出了换热单元体(HTU)的概念. 将对整体热储层的研究集中于采热基本单元上, 并利用此模型对 EGS 采热过程中裂隙流体及热储层温度场的演化进行模拟. 基于介质分类, 将采热的影响因素分为流体和岩体. 本文针对岩体热储层分别设计多组案例, 分析了岩体 HTU 尺寸及储层初始温度对采热的影响. 结果表明, HTU 的厚度与流体产出温度呈负相关, 但与热储层的热采率呈正效应; HTU 的长度与采出温度和热储寿命呈正相关; 热储层的初始温度也与流体采出温度呈正相关, 对热储寿命影响不大. 因此, 热储层激发越充分, 对流换热越充分, 采热效率越高. 注采策略应与热储层的激发情况相配合, 才能取得较好的热开采效果.

**关键词** 增强型地热系统; 平行多裂隙模型; 垂直单裂隙模型; 换热单元体

中图分类号 P314

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg20160364

**Abstract** Enhanced geothermal system (EGS) is an effective way to explore deep geothermal energy. Based on the knowledge of simple vertical fracture model (SVFM), multi-parallel fracture model (MPFM) is built up and validated. It can basically simulate the evolution of reservoir and fluid temperature field during the heat extraction process, and does not have the limitations on the rock size. In this paper, a concept of heat transfer unit (HTU) has been put forward, which focuses the study of whole heat reservoir on a basic heat extraction unit. By the differences of medium, the affecting factors of heat extraction can be divided into fluid and rock. Several comparison cases, which mainly focus on the scale of HTU and the initial reservoir temperature, have been established to study the influence of the rock on the process of heat mining. The results suggest that the thickness of HTU has a negative effect on the fluid outlet temperature, but has a positive effect on the whole heat extraction rate; the length of HTU has a positive correlation with the outlet temperature and the lifetime of reservoir; the initial reservoir temperature is also of positive effect to the heat production rate, but it has a negligible effect on the lifetime of the reservoir. In conclusion, better heat reservoir stimulation will improve the heat extraction efficiency. Since the heat extraction efficiency is controlled by both fluid and rock, in order to get better result, the injection-production strategy should be matched with the reservoir stimulation result.

**Keywords** EGS; multi-parallel fracture model (MPFM); single vertical fracture model (SVFM); heat transfer unit (HTU)

### 0 引言

深层高温地热是一种高效、稳定、清洁的能源, 具有可近地开发利用且不受天气状况影响的特点, 是极具潜力的新型

可再生能源 (Tester et al., 2006; 徐天福等, 2012; Breede et al., 2013). 增强型地热系统 (Enhanced Geothermal Systems, 简称 EGS) 是开发深层高温地热能的有效途径, 其基本原理是通过钻井钻至高温地热储层, 采用水力压裂等措施激发产

收稿日期 2015-10-29; 修回日期 2015-01-06. 投稿网址 http://www.progeophys.cn

基金项目 NSFC-广东联合基金项目(U1401232)、广东省自然科学基金重大基础培育项目(2014A030308001)和中科院广州能源所所长基金培育项目(y107a41001)联合资助.

作者简介 翟海珍, 女, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事增强型地热系统的研究. (E-mail: zhaih@ms.giec.ac.cn)

\* 通讯作者 苏正, 男, 1980 年生, 博士, 研究员, 主要从事天然气水合物和增强型地热系统数值模拟研究. (E-mail: suzheng@ms.giec.ac.cn)

生人工裂隙网络或使天然节理联通形成高渗透性的裂隙体系,冷流体由注入井注入,在热储层裂隙网络中流动采热,并最终由生产井采出,进入地面的热电转换设备中将热能转化为电能,冷却后的冷流体重新回灌至注入井,实现循环采热发电 (Tester *et al.*, 2006). 自 1974 年美国在芬登山进行了首个 EGS 试验后,英、法、日等国也相继展开了针对 EGS 的研究和开采试验 (Tester *et al.*, 2006; Tenma *et al.*, 2008; Genter *et al.*, 2010; 王晓星等 2012a; Lengliné *et al.*, 2014). 我国近年来也全面开展了地热资源的探测与评估工作 (佟伟等, 1990; 熊亮萍等, 1993; 徐纪人等, 2005; 袁玉松等, 2006; 冯昌格等, 2009; 徐明等, 2011; 曾昭发等, 2012; Feng *et al.*, 2012; 王晓星等 2012b; 苏正等, 2014).

EGS 流动采热过程对地热开采和储层可持续性至关重要,尤其在开采过程中水岩温度场变化关系到热储层开采寿命. 受钻井成本、储层激发及水力循环技术等限制,数值模拟仍是研究 EGS 热开采过程的重要手段. 垂直单裂隙模型 (Single Vertical Fracture Model, SVFM) 是研究 EGS 采热特征的最基础模型,前人研究已经表明垂直单裂隙模型可以充分反映流动和采热过程 (Cheng *et al.*, 2001),其模型的可靠性也在之前的文献中得到了论证 (胡剑等, 2014a). 但热储层中由于激发程度的不同,裂隙的展布情况十分复杂,单裂隙模型难以研究激发程度较高储层中热开采的情况. 因此,本文假设热储层中具有多条裂隙平行等间距展布,建立增强型地热系统的平行多裂隙模型 (Multi-Parallel Fracture Model, MPFM),采用垂直单裂隙模型的解析解对其可靠性进行验证,尝试对不同激发程度的热储层采热过程进行数值模拟研究.

EGS 开发的主要目的是通过流体在地下热储层中的循环,从裂隙岩体中提取地热能,在研究 EGS 开发模型时,基于介质特征,可分为流体和岩体两大影响因素. 流体影响因素主要考虑的是流体的注入温度、水流速率及裂隙宽度,而岩体则主要与热储层激发程度,包括裂隙数量和宽度,及热储层本身的初始温度有关. 研究表明流体注入温度对采热过程中水岩温度场的演化影响不大;水流速率与裂隙宽度对水岩温度场的影响效果一致,与产出温度呈负相关 (胡剑等, 2014a; 胡剑等, 2014b; 凌璐璐等, 2015). 而热储岩体对采热的影响还未进行深入分析,基于模型的对称性,本文引入换热单元体 (Heat Transfer Unit, HTU) 概念,即热储层内被裂隙网络分割成的岩石块体,可认为是裂隙流体流动采热的基本单元. 本文采用平行多裂隙模型,将对整体热储层采热过程的研究集中在换热单元体上进行,分别针对换热单元体的厚度、长度及热储层的初始温度等设置算例,以研究热储岩体的激发程度及温度对流体产出温度及热储寿命的影响.

## 1 模型设计

### 1.1 概念模型

增强型地热系统经过储层激发,其热储层内部为岩石块体和裂隙网络组成的块裂结构. 热储层内裂隙的展布是由岩体应力环境和热储激发方法共同控制的. 热储层岩体成分的

不同性质的差异,周围应力环境的复杂性以及激发方法的差异,会导致岩体内部裂隙展布不均匀 (Tester *et al.*, 2006; 王晓星, 2012b). 但增强型地热系统的采热本质上均表现为流体在裂隙内流动,并从两侧高温岩体中提取热能. 由于 EGS 热流耦合垂直单裂隙模型难以研究激发程度较高储层中热开采的情况,因此本文在垂直单裂隙模型的基础上构建了平行多裂隙模型.

在前人模型基础上 (Gringarten *et al.*, 1975; McFarland and Murphy, 1976; Wunder and Murphy, 1978; Fox *et al.*, 2013; 胡剑等, 2014b), 本文建立的概念模型如图 1 所示. 高温岩体内裂隙平行等间距展布,裂隙宽度为  $\delta$ , 换热单元体厚度为  $D$ , 裂隙长度为  $L$ . 高温岩体初始温度为  $T_{r0}$ , 冷流体由裂隙下方入口处进入裂隙通道,冷流体注入温度为  $T_{f0}$ , 流速为  $u_f$ .

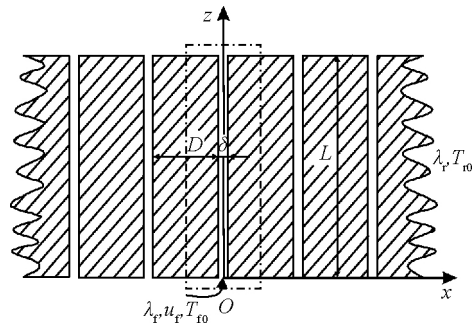


图 1 EGS 平行多裂隙概念模型

Fig. 1 EGS multi-parallel fracture conceptual model

为简化研究,对研究对象作如下假设:①岩体为均质各向同性的不渗透块体,无岩体孔隙流体产出,在低孔渗条件下,该假设可认为近似可靠;②岩体热传导系数较低,水岩界面处热阻忽略不计,即裂隙面上温度与岩体边界温度相等,这一假设的合理性已在很多实际案例中得到证实 (Fox *et al.*, 2013; McFarland *et al.*, 1976; Ogino *et al.*, 1999; Wunder and Murphy, 1978);③裂隙中水流方向为单向,且为匀速;④不考虑系统中的热辐射效应,该假设的合理性已由实验证明 (田鲁鲁, 2009);⑤热开采过程中不考虑热恢复效应 (Fox *et al.*, 2013);⑥忽略温压条件变化对系统热物性的影响,即整个热开采过程中岩体的热传导系数、比热容、密度及流体的密度、比热容等均为常数.

### 1.2 参数选取

热储参数的选取将影响流体的采出温度、热储的温度场分布及热储层的寿命等. 数值模拟方法可以通过量化各参数值,分析不同参数对热开采过程的影响,为工程的实施提供借鉴和参考. 借鉴前人研究的取值水平确定模型的基本热物理参数 (Shaik *et al.*, 2011; Fox *et al.*, 2013; 胡剑等, 2014a; 胡剑等, 2014b), 如表 1 所示.

为研究热储层中岩体换热单元体对采热过程的影响,分别设计控制换热单元体厚度、换热单元体长度和热储层初始温度等参数的对照方案进行分析,各算例间具有一定的对比度和参考价值,算例模型参数设计如表 2 所示.

表 1 基础方案模型参数取值

Table 1 Value of the parameters of the basic model

参数	单位	取值	备注
$T_{r0}$	°C	200	热储层初始温度
$T_{f0}$	°C	60	冷流体注入温度
$\rho_r$	kg/m <sup>3</sup>	2820	岩体密度
$c_r$	J/(kg·°C)	1170	岩体比热容
$\lambda_r$	W/(m·°C)	2.8	岩体导热系数
$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	900	流体密度
$c_f$	J/(kg·°C)	4200	流体比热容
$\lambda_f$	W/(m·°C)	0.609	流体导热系数
$\mu_f$	kg/(m·s)	0.0003	流体黏度
$D$	m	40	换热单元体厚度
$L$	m	500	换热单元体长度
$\delta$	cm	10	裂隙宽度
$u_f$	m/s	0.0001	流体流速

表 2 对照方案的参数设计

Table 2 Parameter designing of comparison cases

影响因素	控制变量	数值	备注	
岩体: 换热单元体	换热单元体厚度 $D$	20 m	基础方案	
		40 m		
		100 m		
		300 m		
		500 m		
	换热单元体长度 $L$	600 m	基础方案	
		800 m		
		1000 m		
		200 °C		基础方案
		热储层初始温度 $T_{r0}$		
280 °C				
		300 °C		

### 1.3 数学模型

考虑到模型区域的对称性,模拟时仅选取基本单元进行计算,即选取图 1 中框选区域的一半作为计算区域。裂隙区将  $x$  方向等分为 2 个网格,  $z$  方向等分为长度 0.25 m 的网格;对于岩石换热单元体区,  $z$  方向等分为长度 0.25 m 的网格,  $x$  方向等分为宽度 0.25 m 的网格。另外,在后面的算例中当  $D > 40$  m 时,为减少网格数量,加快计算速度,  $x$  方向采取分段的方法进行网格划分,将靠近裂隙区的 10 m 等分为宽度 0.25 m 的网格,剩余区域划分为宽度 2.5 m 的网格。

流体入口设为速度入口,并给出流体初始温度,流体出口设为自由流,左边界设为对称面,右边界为界面。岩石上下底面边界设为绝热边界,右边界面设为对称面,左边界为界面。仅考虑流体的对流换热及岩体内的热传导效应,求解连

续性方程和能量方程,方程的相对误差值分别为  $1.0 \times 10^{-3}$  及  $1.0 \times 10^{-6}$ ,绝对误差限值为 1.0。

## 2 计算结果

根据以上方案设计,用 Fluent 软件进行模拟计算,得到基础方案在开采 50 年间的储层温度场变化情况,如图 2 所示。由图可以看出,换热单元体首先在冷流体注入点位置迅速被冷却,随着热开采的进行,冷却区域逐渐向上扩散且  $z$  方向的冷却速度明显快于  $x$  方向。开采 5 年时,换热单元体冷却区域的水平方向已联通,垂直方向温度影响范围大约为 260 m。开采 10 年时,垂直方向降温影响区域扩散至 360 m。开采 50 年时,热储层内已无经济可用热能开采,热储内大部分区域已被冷却至低于 150 °C。若以高温岩体初始温度降低 10% 为界线考察热储寿命,则基础方案的考察温度为 180 °C,其热储寿命为 31.8 年,实际情况下由于热储热恢复效应,热储寿命会稍长。

热开采过程中冷流体不断被换热单元体加热,图 3 所示即为热开采过程中裂隙流体的温度场演化。冷流体在裂隙入口处流入,并在裂隙通道中流动被加热,温度不断升高。由图可以看出,开采进行 5 年时,冷流体被加热约 320 m,温度达到岩体初始温度,之后温度保持不变。开采进行 10 年时,冷流体流经整个流体通道约 500 m 才能达到岩体初始温度。随着开采的进行,冷流体已不能被加热至岩体的初始温度,因此,流体最终以低于 200 °C 的温度被采出。

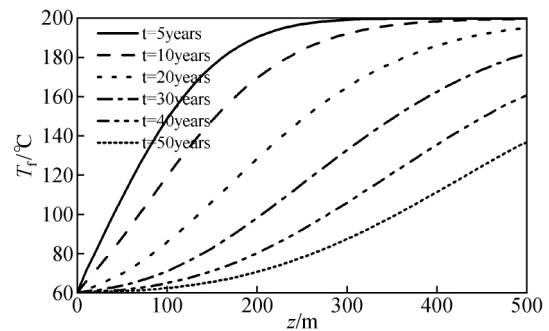


图 3 基础方案热开采进行 5、10、20、30、40、50 年裂隙流体温度演化曲线

Fig. 3 The fracture fluid temperature evolution of the basic case during 50 years heat extraction

热开采进行初期,岩体与流体的温差大,对流换热强度大,流体很快被加热。随着采热过程的推进,岩体温度逐渐降低,岩体与流体的温差逐渐缩小,对流换热强度减弱,流体升温较为缓慢。由图 3 也可看到,在 30 年时,流体的出口温度已降至 183.3 °C,勉强满足 EGS 开发的温度指标,即热储开采寿命略大于 30 年。

### 2.1 换热单元体厚度对采热的影响

换热单元体的厚度与热储层的激发程度密切相关,热储层的激发是建立增强型地热系统必不可少的重要一步,在成功进行钻井后需对热储层进行激发,将热储层中存在的天然节理打开,同时产生人工裂隙,最终形成热储层裂隙网络,以便为流体的流动提供通道。热储层的激发措施不同、程度不

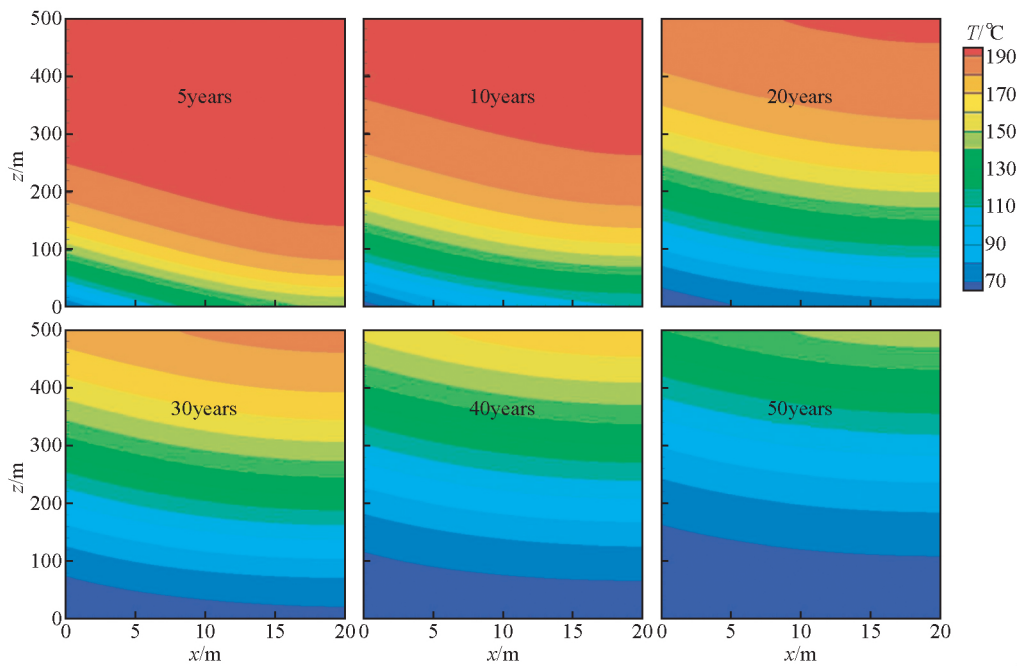


图2 基础方案热开采进行5、10、20、30、40、50年时换热单元体的温度场分布

Fig. 2 The HTU temperature distribution of the basic model after 5, 10, 20, 30, 40 and 50 years heat extraction

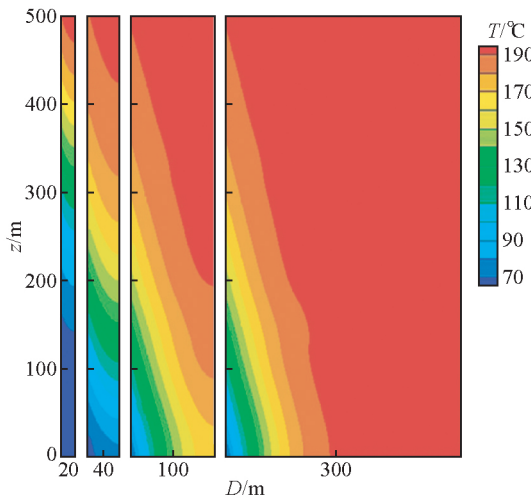


图5 换热单元体厚度对换热单元体温度场的影响

Fig. 5 Effect of the thickness of HTU on the temperature field after 20 years heat extraction, the thicknesses are respectively 20 m, 40 m, 100 m, and 300 m

同, 均会导致热储层中裂隙的展布不同, 即换热单元体的厚度不同, 裂隙宽度各异. 针对裂隙宽度对采热的影响在胡剑等的文章中已经进行了详细的研究(胡剑等 2014a), 本小节将换热单元体厚度作为变量设置算例, 研究换热单元体横向尺寸对采热的影响.

图4a所示为不同换热单元体厚度对应的裂隙流体产出温度随时间的变化. 由图可见换热单元体的厚度对裂隙流体的产出温度影响显著, 随换热单元体厚度的增加流体产出温

度逐渐升高, 当厚度增大到一定程度, 产出温度基本保持不变. 裂隙宽度相同, 流体流速相等时, 产出温度主要由流体与岩体界面的温差决定. 采热初期产出温度相同, 但随着热开采的进行, 厚度较小的换热单元体将会出现热穿透, 整体温度水平加速下降, 产出温度降低.

图4b所示为平行多裂隙模型数值模拟结果与垂直单裂隙模型解析解的对比, 多裂隙模型的换热单元体厚度  $D$  分别为 100 m 和 300 m. 由图可见三条曲线基本吻合, 验证了平行多裂隙模型的可靠性. 其中  $D$  分别为 100 m 和 300 m 的两算例模拟得的产出温度始终略高于垂直单裂隙模型的计算结果, 这是由于垂直单裂隙模型建立时忽略了岩石内部  $z$  方向的热传导. 而对于  $D$  为 100 m 的算例, 在开采后期流体产出温度低于  $D$  为 300 m 的产出温度, 这是由于  $D$  为 100 m 时换热单元体在热开采后期岩体会从底部开始出现热穿透, 并逐渐向上扩散, 无法提供足够的热量. 这也验证了垂直单裂隙模型的局限性, 当换热单元体厚度较小时不宜采用垂直单裂隙模型进行热开采过程温度演化的求解.

图5所示为热开采进行20年时不同厚度的换热单元体温度场分布情况, 由图可见, 换热单元体厚度为 20 m 时, 运行 20 年, 换热单元体内所有区域的热量已经得到了不同程度的开采. 而随着换热单元体厚度的增加, 其采热区域所占比例不断收缩, 明显可以看出蓝色部分所代表的冷却区域逐渐缩小, 当换热单元体厚度为 300 m 时, 仅 1/4 区域的热量得到不同程度开采, 且当储层寿命完结时, 仍有部分热量得不到开采. 因此, 换热单元体越薄, 换热单元体内的热采率越高; 反之, 换热单元体越厚, 换热单元体整体的温度场受裂隙流体影响的区域比例缩小, 岩石芯部热量难以得到开采, 热采率降低.

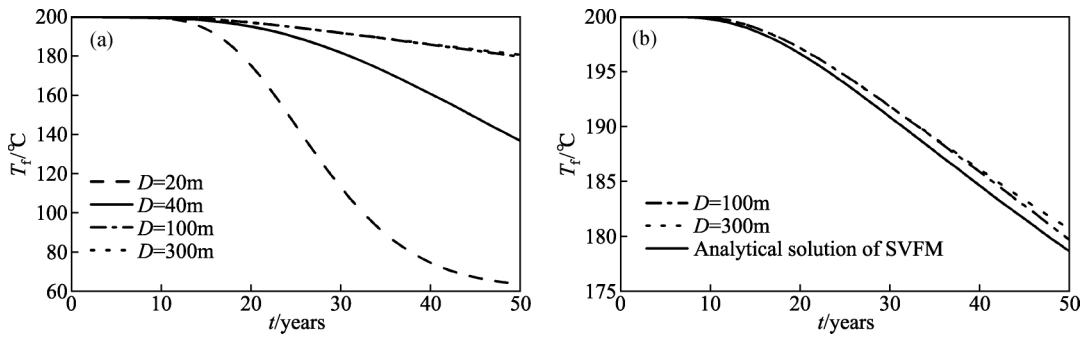


图4 (a) 换热单元体厚度对裂隙流体采出温度的影响; (b) 热开采进行 50 年流体采出温度: 垂直单裂隙模型解析解计算结果对比平行多裂隙模拟结果

Fig. 4 (a) Effect of the thickness of HTU on the outlet temperature, the thicknesses are respectively 20 m, 40 m, 100 m, and 300 m; (b) The outlet temperature during 50 years heat extraction process: the analytical solution of the SVFM vs. the MPFM numerical simulation results, the thicknesses of the HTU are respectively 100 m and 300 m

2.2 换热单元体长度对采热的影响

换热单元体长度与热储层的体积及形状有关. 热储层的体积一般视为注入井与生产井之间的热储立方体体积. 增强型地热系统注入井与生产井的地面间距不宜过大, 地下间距不宜过小, 地下间距取 600 ~ 1000 m 为宜 (Tester *et al.*, 2006; 苏正等 2012). 另外, 换热单元体长度也与热储层激发程度紧密相关. 热储层的热开采过程就是冷流体在裂隙网络中流动及与高温岩体的对流换热过程. 热储层的激发程度会直接影响储层中裂隙网络的展布, 即流体的流动路径. 本小节将换热单元体长度作为变量设置算例, 研究了换热单元体纵向尺寸对采热的影响.

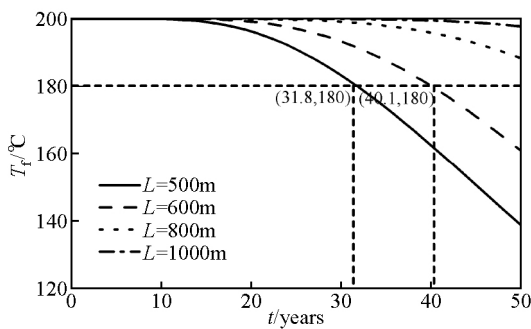


图6 换热单元体长度对裂隙流体采出温度的影响  
Fig. 6 Effect of the length of HTU on the outlet temperature, the lengths are respectively 500 m, 600 m, 800 m, and 1000 m

图6所示为不同换热单元体长度下裂隙流体采出温度 50 年间的变化情况. 由图可见, 随着换热单元体长度的增加, 热开采进行相同时间时流体的热采出温度不断升高, 当换热单元体的长度升至 1000 m 时, 热采出温度基本保持热储层初始温度运行 40 年. 同时, 随着换热单元体长度的增加, 热储层的寿命也在不断延长, 当换热单元体长度为 500 m 时, 热开采进行 50 年时, 流体采出温度已降至

138.6 °C. 当换热单元体长度升至 1000 m 时, 热开采进行 50 年, 流体的采出温度仍高达 197.8 °C, 仍能继续进行热开采. 因此, 换热单元体的长度越长, 流体流动路径越长, 流体可以和岩体发生充分的热交换, 对应的热采出温度越高, 其热储层寿命也越长.

2.3 热储层初始温度对采热的影响

热储层的初始温度是地热田选址的最重要考虑因素, 也是 EGS 开采的最重要影响因素. 高品位的地热资源能够有效降低发电成本 (Tellier and Duchane, 1992; 苏正等 2014). 但同时, 更高的地热温度一般对应着更深的地层, 因此钻井的成本也会随之大大提高, 因此要权衡钻井成本和采热效率, 以得到经济性最佳的方案. 本小节将热储层初始温度作为变量设置算例, 研究了热储层初始温度对采热的影响.

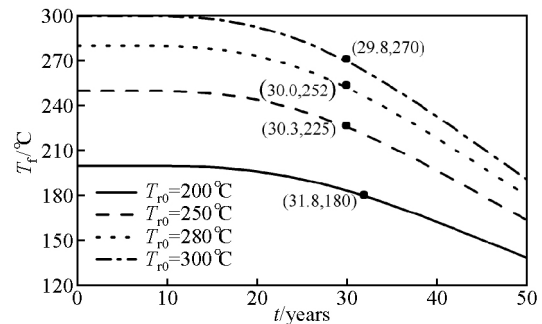


图7 热储层初始温度对裂隙流体采出温度的影响  
Fig. 7 Effect of the initial reservoir temperature on the outlet temperature, the temperatures are respectively 200 °C, 250 °C, 280 °C and 300 °C

图7所示为不同热储层初始温度下热储层开采进行 50 年间的裂隙流体采出温度随时间的变化情况. 由图可见, 裂隙流体的采出温度最初为热储层的初始温度, 随着热开采过程的进行, 流体采出温度呈现下降的趋势. 热储层初始温度越高, 对应的采出温度也越高, 采热后期温度降低的梯度越

大.这是由于热储层初始温度越高,与冷流体的温差越大,对流换热强度越大,越有利于热量的采出,热储层的寿命也会有略有下降,但影响不大.由图可见,四个算例温度下的热储层寿命均约为30年左右,随着热储层初始温度的升高而略有降低.

### 3 讨论

本文假设热储中多裂隙平行等间距展布构建平行多裂隙模型,采用垂直单裂隙模型的解析解验证了模型的可靠性,模型可对激发程度较高的热储层采热过程进行数值模拟研究,考虑了竖直方向的热传导效应结果更为合理.但模型仍有许多不完善之处.首先,热储层内的裂隙展布是复杂多变的(Keller *et al.*, 1995; Novakowski *et al.*, 1995; Li *et al.*, 2015),热储层地温梯度、裂隙的展布方向均会对采热过程的温度场演化产生影响,下一步应细化对热储内裂隙展布的描述,针对热储内的裂隙展布特征,设计相应的模型进行计算.其次,热开采过程中由于周围岩体的温度较高,会对采热部分的岩体有加热效应(Vogt *et al.*, 2012; Fox *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2015),且热开采是较长期的过程,下一步还应将热恢复效应考虑在内(Elsworth, 1989).再次,热储层内的碎裂岩体多为孔渗结构(Shaik *et al.*, 2011; Kalinina *et al.*, 2012; Vogt *et al.*, 2012),热储层内的流体除在裂隙中流动外,还会在多孔介质岩石中产生渗透扩散作用,因此下一步需要考虑岩石的渗透性.

EGS开发的主要目的是通过流体在地下热储层中的循环,从裂隙岩体中提取地热能,基于介质特征将采热影响因素分为流体和岩体分别考虑.前人研究表明流体注入温度对采出温度影响不大,因此可以在发电后的热液余热充分利用后再回注入热储层.裂隙宽度和流体流速对采热的影响效果相同,共同组成流量对采热的影响,流量越大采出温度下降越快.本文研究结果表明热储层的初始温度与流体的采出温度呈正相关,对储层寿命影响不大.换热单元体的尺寸对采热的影响表明热储层的激发程度会显著影响储层的整体热开采率,储层激发越充分,裂隙网络密度越大,流体通道越长,流体与岩体接触面积越大,流动换热越充分,采出温度越高,热储层寿命越长,热开采越高效.

EGS对深层高温地热能的开采与流体和岩体紧密相关,流体的参数以及岩体的激发程度均会直接影响热开采效果.地热田的热开采一般采取控制总流量的注采策略(Tester *et al.*, 2006; 苏正等, 2012; 王晓星等, 2012a; Fox *et al.*, 2013),热储层激发程度不同,对应的裂隙数目、裂隙宽度和换热单元体厚度均不同,每条裂隙内流体流量和流速也不同,EGS的热开采效果是复杂的正负效应叠加的结果,因此仅依靠控制变量法分析模型单一参数对采热的影响不足以表征整体的热开采效应,下一步需要将模型与实际地热田资料相结合,并综合考虑流体与岩体影响因素,分析其对EGS热开采过程的影响.

### 4 结论

本文在垂直单裂隙模型的基础上构建了平行多裂隙模型,并对其可靠性进行了验证,同时创新的引入了换热单元

体的概念,将对整体热储层的研究缩小至由基本换热单元进行.平行多裂隙模型不受岩体尺寸的限制,可对不同激发程度的热储层进行数值模拟研究.采用平行多裂隙模型对EGS采热过程进行数值模拟研究,分别分析了岩体换热单元体的尺寸及热储层初始温度对热储热开采的影响.换热单元体的厚度对流体产出温度及热开采率影响显著,相同流速下换热单元体厚度越大产出温度越高,但整体热开采率低.换热单元体长度与产出温度及热储层寿命呈正相关,延长采热通道可提高采热温度.热储层初始温度越高,其对应的采热温度也越高,而对热储寿命影响不大.综上所述热储层的激发越充分越有利于热储层内的热量的采出.热储层的采热效率是由裂隙流体和热储岩体共同决定的,注采策略应结合热储的激发情况制定,才能达到较好的开采效果.

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

### References

- Breede K, Dzebisashvili K, Liu X L, *et al.* 2013. A systematic review of enhanced ( or engineered) geothermal systems: Past, present and future [J]. *Geothermal Energy*, 1(1): 4.
- Cheng A H D, Ghassemi A, Detournay E. 2001. Integral equation solution of heat extraction from a fracture in hot dry rock [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(13): 1327-1338.
- Elsworth D. 1989. Theory of thermal recovery from a spherically stimulated hot dry rock reservoir [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 94(B2): 1927-1934.
- Feng C G, Liu S W, Wang L S, *et al.* 2009. Present-day geothermal regime in Tarim basin, northwest China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 52(11): 2752-2762, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.010.
- Feng Z J, Zhao Y S, Zhou A C, *et al.* 2012. Development program of hot dry rock geothermal resource in the Yangbajing Basin of China [J]. *Renewable Energy*, 39(1): 490-495.
- Fox D B, Sutter D, Beckers K F, *et al.* 2013. Sustainable heat farming: Modeling extraction and recovery in discretely fractured geothermal reservoirs [J]. *Geothermics*, 46: 42-54.
- Gener A, Evans K, Cuenot N, *et al.* 2010. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS) [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(7-8): 502-516.
- Gringarten A C, Witherspoon P A, Ohnishi Y. 1975. Theory of heat extraction from fractured hot dry rock [J]. *Journal of Geophysical Research*, 80: 1120-1124.
- Hu J, Su Z, Wu N Y, *et al.* 2014a. Analysis on temperature fields of thermal-hydraulic coupled fluid and rock in enhanced geothermal system [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 29(3): 1391-1398, doi: 10.6038/pg20140354.
- Kalinina E, McKenna S A, Hadgu T, *et al.* 2012. Analysis of the effects of heterogeneity on heat extraction in an EGS represented with the continuum fracture model [C]. //Proceedings, 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, CA: Stanford University.
- Keller A A, Roberts P V, Kitanidis P K. 1995. Prediction of single phase transport parameters in a variable aperture fracture [J]. *Geophysical Research Letters*, 22(11): 1425-1428.
- Lengliné O, Lamourette L, Vivin L, *et al.* 2014. Fluid-induced earthquakes with variable stress drop [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(12): 8900-8913.
- Li M T, Gou Y, Hou Z M, *et al.* 2015. Investigation of a new HDR system with horizontal wells and multiple fractures using the coupled

- wellbore-reservoir simulator TOUGH2MP-WELL/EOS3 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 73(10): 6047-6058.
- McFarland R D, Murphy H D. 1976. Extracting energy from hydraulically fractured geothermal reservoirs [C]. //Proceedings of 11th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. New York: American Institute of Chemical Engineers.
- Novakowski K S, Lapcevic P A, Voralek J, et al. 1995. Preliminary interpretation of tracer experiments conducted in a discrete rock fracture under conditions of natural flow [J]. *Geophysical Research Letters*, 22(11): 1417-1420.
- Ogino F, Yamamura M, Fukuda T. 1999. Heat transfer from hot dry rock to waterflowing through a circular fracture [J]. *Geothermics*, 28(1): 21-44.
- Shaik A R, Rahman S S, Tran N H, et al. 2011. Numerical simulation of fluid-rock coupling heat transfer in naturally fractured geothermal system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 31(10): 1600-1606.
- Su Z, Wang X X, Hu J, et al. 2014. The site selection for enhanced geothermal system in China [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 29(1): 386-391, doi: 10.6038/pg20140155.
- Su Z, Wu N Y, Zeng Y C, et al. 2012. Research and development of enhanced geothermal system: A case of Fenton hill in New Mexico (USA) [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 27(2): 771-779, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.02.045.
- Tenma N, Yamaguchi T, Zvoloski G. 2008. The Hijiori Hot Dry Rock test site, Japan: Evaluation and optimization of heat extraction from a two-layered reservoir [J]. *Geothermics*, 37(1): 19-52.
- Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, et al. 2006. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century [R]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Tong W, Mu Z G, Liu S B. 1990. The late-Cenozoic volcanoes and active high-temperature hydrothermal systems in china [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 33(3): 329-335.
- Vogt C, Marquart G, Kosack C, et al. 2012. Estimating the permeability distribution and its uncertainty at the EGS demonstration reservoir Soultz-sous-Forêts using the ensemble Kalman filter [J]. *Water Resources Research*, 48(8): W08517.
- Wang X X, Wu N Y, Su Z, et al. 2012b. Progress of the enhanced geothermal systems (EGS) development technology [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 27(1): 15-22, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.041.
- Wu B S, Zhang X, Jeffrey R G, et al. 2015. Perturbation analysis for predicting the temperatures of water flowing through multiple parallel fractures in a rock mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76: 162-173.
- Wunder R, Murphy H. 1978. Thermal drawdown and recovery of singly and multiply fractured hot dry rock reservoirs [R]. Informal Report W-7405-ENG. 36. Los Alamos: Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California.
- Xiong L P, Hu S B, Wang J Y. 1993. Terrestrial heat flow values in southeastern China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 36(6): 784-790.
- Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y. 2005. Extensional stress field in the central and southern Qinghai-Tibetan plateau and dynamic mechanism of geothermic anomaly in the Yangbajain area [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 48(4): 861-869, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.018.
- Xu M, Zhu C Q, Tian Y T, et al. 2011. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 54(4): 1052-1060, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.020.
- Yuan Y S, Ma Y S, Hu S B, et al. 2006. Present-day geothermal characteristics in South China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49(4): 1118-1126, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.04.025.
- Zeng Z F, Chen X, Li J, et al. 2012. Advancement of geothermal geophysics exploration [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 27(1): 168-178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.

## 附中文参考文献

- 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等. 2009. 塔里木盆地现今地热特征 [J]. *地球物理学报*, 52(11): 2752-2762, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.010.
- 胡剑, 苏正, 吴能友, 等. 2014a. 增强型地热系统热流耦合水岩温度场分析 [J]. *地球物理学进展*, 29(3): 1391-1398, doi: 10.6038/pg20140354.
- 胡剑, 苏正, 吴能友, 等. 2014b. 增强型地热系统垂直裂隙热储热开采过程数值模拟 [J]. *可再生能源*, 32(6): 829-835.
- 凌璐璐, 苏正, 翟海珍, 等. 2015. 西藏羊易 EGS 开发储层温度场与开采寿命影响因素数值模拟研究 [J]. *新能源进展*, 3(5): 367-374.
- 苏正, 王晓星, 胡剑, 等. 2014. 我国增强型地热系统选址问题探讨 [J]. *地球物理学进展*, 29(1): 386-391, doi: 10.6038/pg20140155.
- 苏正, 吴能友, 曾玉超, 等. 2012. 增强型地热系统研究开发: 以美国新墨西哥州芬登山为例 [J]. *地球物理学进展*, 27(2): 771-779, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.02.045.
- Tellier N A, Duchane D V. 1992. 干热岩——一个高温地热概念 [C]. //中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 173-178.
- 田鲁鲁. 2009. 裂隙岩体渗流-传热耦合模型试验及数值模拟研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学.
- 佟伟, 穆治国, 刘时彬. 1990. 中国晚新生代火山和现代高温水热系统 [J]. *地球物理学报*, 33(3): 329-335.
- 王晓星, 吴能友, 苏正, 等. 2012b. 增强型地热系统开发技术研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 27(1): 15-22, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.041.
- 熊亮萍, 胡圣标, 汪集旻. 1993. 中国东南地区实测热流值 [J]. *地球物理学报*, 36(6): 784-790.
- 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 2005. 青藏高原中南部岩石圈扩张应力场与羊八井地热异常形成机制 [J]. *地球物理学报*, 48(4): 861-869, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.018.
- 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 2011. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征 [J]. *地球物理学报*, 54(4): 1052-1060, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.020.
- 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 2012. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展 [J]. *科技导报*, 30(32): 42-45.
- 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等. 2006. 中国南方现今地热特征 [J]. *地球物理学报*, 49(4): 1118-1126, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.04.025.
- 曾昭发, 陈雄, 李静, 等. 2012. 地热地球物理勘探新进展 [J]. *地球物理学进展*, 27(1): 168-178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.