

高温岩体地热资源模拟与预测方法

万志军¹, 赵阳升^{1,2}, 康建荣^{1,3}

(1. 中国矿业大学 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024;

3. 徐州师范大学 科技处, 江苏 徐州 221116)

摘要: 研究了基于三维稳态热传导理论并忽略对流换热及地质构造等次要因素影响的地温场与地温梯度场的反演方法。该方法可以在大尺度上数值模拟岩体中地温的空间分布状况, 并预测高温岩体地热资源量。以云南省腾冲热海热田为例, 模拟和分析了地质体的地温与地温分布梯度场的特点及其形成原因, 并对热田高温岩体地热资源量进行了预测评价。提出的高温岩体地热资源模拟与预测方法具有重要的理论价值, 研究结果可为热海热田地热资源的开发和利用提供参考。

关键词: 岩石力学; 高温岩体; 地热; 三维数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-0945-05

SIMULATION AND FORECAST METHOD OF GEOTHERMAL RESOURCES IN HOT DRY ROCK

WAN Zhi-jun¹, ZHAO Yang-sheng^{1,2}, KANG Jian-rong^{1,3}

(1. College of Energy and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Department of Scientific Research, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The inversion methods of ground temperature field and ground temperature gradient field based on three-dimensional static heat conduction theory are presented with the influence from those minor factors such as heat convection and geology tectonics and so on. It can be used to simulate the three-dimensional ground temperature field in rock mass and to forecast the geothermal resources quantity of hot dry rock(HDR) on large scale. The paper analyzed the features and the mechanisms of ground temperature field and ground temperature gradient field of Rehai geothermal field in Tengchong, Yunnan province, China. Then the quantity of HDR geothermal resources was forecasted, and the results achieved from the presented simulation and forecast method of HDR geothermal resources of Rehai geothermal field can provide a reference to the geothermal exploitations.

Key words: rock mechanics; hot dry rock (HDR); geothermal; three-dimensional numerical simulation

1 引言

高温岩体地热资源模拟结果是实施地热开发计

划、制定开发方案和确定开发规模最基础的参量, 也是制定国家能源战略和策略最基础的数据。从科学角度讲, 确定高温岩体地热资源的物理参量为地质体(岩体)垂向与水平向温度分布和范围, 或者说

收稿日期: 2003-09-27; 修回日期: 2003-11-25

基金项目: 教育部骨干教师基金资助

作者简介: 万志军(1970-), 男, 1994年毕业于中国矿业大学采矿工程专业, 现为博士研究生、讲师, 主要从事岩石力学和矿山压力方面的教学与研究工作。E-mail: zhjwan@126.com。

是地质体温度的空间分布 $T(x, y, z, t)$ 。要相对准确地获得地温分布特征,最可靠、最直接的方法是通过深钻获得地质体温度。但深钻费用高昂,很难进行普查与详查,地球物理手段也受到技术限制,只能通过极少量的深钻获取极为有限的局部地温分布资料。而采用数值模拟的方法,以已知空间点的分布为基础进行地温分布的反演模拟即可获得区域地热温度场。本文根据这一思路,采用三维热传导模型模拟岩体中地温的空间分布状况,进而对区域地质体地热资源进行预测与评价。

2 模拟理论与方法

地热资源模拟,实际上是以实测地壳空间点温度分布为基础,根据大地构造特征和岩层分布、大地热流以及地下水资源等条件变化的数学、物理与几何模型,采用有限元方法进行数值反演,获取地壳岩体温度场分布;然后,根据区域的温度和岩体热容系数,即可获得区域地质体地热资源量。

地温分布的影响因素有:(1) 热源。研究表明,一般大陆地热异常区的热源是存在于地壳中的岩浆房和岩浆囊。我国长白山、腾冲、羊八井等地热异常区地壳中都存在岩浆房或岩浆囊^[1~6]。岩浆房或岩浆囊的温度为 800 ~ 1 000 。岩浆囊不断向周围岩体传导热量,形成了很大范围的地热异常区。(2) 岩体热传导系数。一般来说,高温岩体地热区深部都是诸如花岗岩、闪长岩和橄榄岩等火成岩岩体,而表层往往有泥岩、砂岩和石灰岩等沉积岩体或土层,由于地温梯度的作用,地表不断散发热量,一般用地球表面热流密度表征。从垂向分析,由于地壳深部火成岩体与浅部沉积岩体热传导系数有较大的差异,因而导致地壳垂向温度分布梯度出现差异。(3) 横向构造。从水平方向来分析,相对于热源的远近,地质构造(如断层带)导致水平方向地温分布有较大差异。(4) 地下水运移。在地壳浅部的沉积岩地层中存在地下含水层,含水层中水的运移,是导致浅部地温复杂分布的另外一个主要因素。

由于上述种种原因,决定了在较大范围的地壳中,地壳温度场是一个相对变化十分缓慢的不均匀的空间温度场。

2.1 岩体温度控制方程

为使问题尽量简化以利于模拟,可以认为:(1) 由于地壳活动及地热迁移速度相对于人类活动来说非常缓慢,因此,地质体温度的空间分布 $T(x, y, z,$

$t)$ 可以看作是一个静态的物理量,在一个相当大的平面展布范围内,其垂向地温分布梯度基本是一致的。(2) 岩体仅以热传导的形式传热,对流形式的传热仅是通过地下水的运移发生的。在许多情况下,依赖地下水运移的对流形式的传热和辐射形式的传热可以不考虑。因此,地壳地热传输的数学模型可以简化为空间热传导数学模型,即

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + W = 0 \quad (1)$$

式中: $\lambda_i (i = x, y, z)$ 为热传导系数, W 为源汇项, T 为温度。

在地热资源反演模拟中,该数学模型对应的边界条件为 2 类:

第 1 类边界条件:

$$T|_{R_1(x, y, z)} = T_0$$

第 2 类边界条件:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} |_{R_2(x, y, z)} = q$$

第 1 类边界条件称为给定温度边界,是强制边界条件。第 2 类边界条件称为给定热流边界,是自然边界条件,且当 $q = 0$ 时,就是绝热边界条件。实际地热资源模拟反演中,上部边界取为给定热流边界,岩层深部取为给定温度边界,四周简化为绝热边界。实测温度点及热源温度点可以认为是给定温度边界,或仅在反演分析中,作为目标函数使用。

2.2 几何与物理模型

地热资源分析几何与物理模型如图 1 所示(图中 $T_1 \sim T_5$ 为实测温度点)。

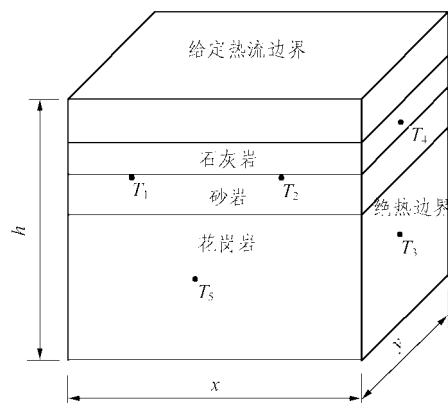


图 1 地热资源分析几何与物理模型

Fig.1 Geometry and physics model for thermal analysis

2.3 岩体热传导方程的离散

采用加权余量的 Galerkin 法对岩体热传导方程

进行离散^[7, 8], 可以得到 n 个联立的线性代数方程组, 按照一般的有限元格式, n 个节点的温度列阵 T_r 可表示为

$$KT_r = P \quad (2)$$

式中: K 为热传导矩阵, 是对称正定矩阵; P 为温度载荷矩阵。

矩阵 K 和 P 的元素由单元相应的矩阵元素集成, 即

$$K_{ij} = \sum_e K_{ij}^e \quad (3)$$

$$P_i = \sum_e P_{wi}^e + \sum_e P_{qi}^e \quad (4)$$

单元矩阵元素由如下各式给出:

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \lambda_r \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega \quad (5)$$

$$P_{wi}^e = \int_{\Omega^e} W N_i d\Omega \quad (6)$$

$$P_{qi}^e = \int_{\Gamma_2^e} q N_i d\Gamma \quad (7)$$

其中, 式(5)为单元对热传导矩阵的贡献, 式(6)为单元热源产生的温度载荷, 式(7)为单元给定热流边界产生的温度载荷。

$N_i(x, y)$ 是 C_0 型插值函数, 具有下述性质:

$$N_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & (j = i) \\ 0 & (j \neq i) \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum N_i = 1 \quad (9)$$

以上就是空间稳定热传导问题有限元的一般格式。

3 应用实例

应用以上的模拟方法, 对云南省腾冲热海热田的地温场特点和高温岩体地热资源进行了模拟研究和预测评价。

3.1 热海热田简况

热海热田位于云南省腾冲城关镇南 11 km, 是云南省西部最大和经济价值最高的地热田, 历史上享有“一泓热海”的盛誉。大量地球物理勘探证

明^[9-12], 热海热田下部 6 ~ 27 km 存在岩浆囊, 其水平展布范围大约 10 km, 该岩浆囊的边界温度可以达到 500 ~ 700^[12, 13], 该区实测地电阻率很低, 约为 5 $\Omega \cdot m$ 。

3.2 模型、边界条件及相关参数

根据图 1 给出的几何与物理模型, 采用稳定温度场模型分析。边界条件为: 模型自地表以下取 10 km, 地表下 6 km 为岩浆囊边界, 在 10 km 处, 取岩浆囊半径为 5 km, 岩浆囊直接影响半径为 25 km, 即计算区域水平方向取 50 km。上边界(地表)为给定热流边界, 热流密度 $q = -100 \text{ mW/m}^2$; 底部为给定温度边界, 岩浆囊中心温度为 1 000^{°C}, 边界温度为 550^{°C}; 四周为绝热边界。

地表下 2 km 以内为风化岩层和碎裂岩层, 其热传导系数较低; 2 km 以下为花岗岩。表 1 是数值模拟采用的岩石热力学参数, 由于花岗岩的导热系数受温度影响显著, 此处用对数函数形式给出^[14]。

表 1 数值模拟采用的岩石热力学参数

Table 1 Thermal and mechanical parameters of rocks in numerical simulation

岩石	密度 /kg · m ⁻³	比热 /kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹	导热系数 /W · m ⁻¹ · K ⁻¹
砂岩	2 082.44	0.768 6	0.878 800
泥质砂岩	1 906.23	0.848 4	0.693 333
泥岩	1 922.25	0.856 8	0.686 400
页岩	2 322.72	0.806 4	1.045 200
灰岩	2 194.57	0.848 4	1.703 867
细砂岩	1 633.91	0.768 6	0.627 467
粗砂岩	1 746.04	0.768 6	0.558 133
花岗岩	2 730.00	1.098 0	3.328 1 - 0.364 lnT

3.3 模拟结果与分析

采用 FORTRAN 语言, 在 Power Station 4.0 编译环境下编制三维数值模拟软件进行了计算, 获得了包含岩浆囊的深度 10 km 和水平展布 50 km 范围内地质体的地温与地温分布梯度场。

(1) 地温与地温分布梯度场特点

图 2 和 3 分别是热田 4 km 水平剖面和岩浆囊中心垂直剖面的地温等值线图。热田 4 km 水平剖面中心温度高达 452^{°C}, 离中心 50 km 处温度仍可达到 436^{°C}, 可见热田面积应远远超过 2 500 km²。按高温岩体地热开发的要求, 钻孔打到 4 km 深度即可满足温度方面的需要。

垂直剖面的地温等值线在浅部由于远离岩浆囊

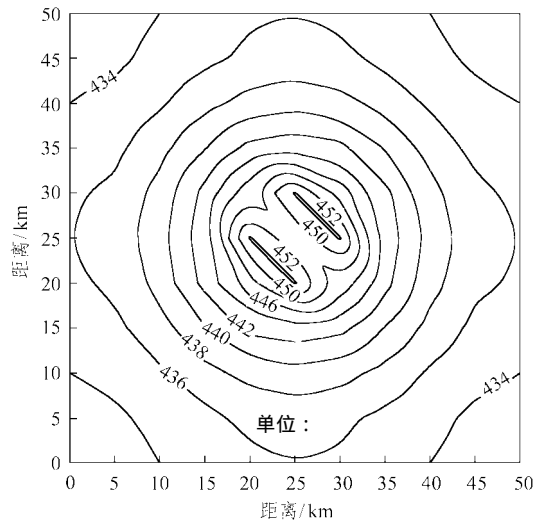


图2 4 km 水平剖面的地温等值线图

Fig.2 Isotherm of horizontal section at depth of 4 km

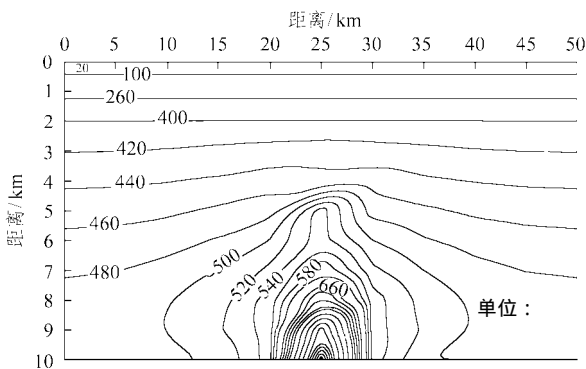


图3 岩浆囊中心垂直剖面的地温等值线图

Fig.3 Isotherm of vertical section by magma chamber's center

而呈水平直线或近似水平直线，深部地温等值线由于受岩浆囊影响明显而呈拱形，且越接近岩浆囊外表面地温等值线曲率越小。

图4是模拟的地温分布梯度线。从图中可以看出：浅部斜率大，深部斜率小，即浅部地温分布梯度大于深部。地表下2 km 以内的地温分布梯度平均达 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ ，这与钻探测温结果比较一致^[3]，而2 km 以下地温分布梯度平均仅为 $1.37\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 。

从图4还可以看出，距岩浆囊中心5~25 km 的地温分布梯度线差别很小，仅岩浆囊中心的地温分布梯度线发生明显变化，证实了前面的“在一个相当大的平面展布范围内，其垂向地温分布梯度基本是一致的”的假设。同时，在选择钻探测温孔位置时对这种现象应予充分考虑。

浅部地温分布梯度大于深部地温分布梯度，主要是由于浅部沉积岩导热系数小而深部花岗岩导热系数大所致。导热系数小则热量不易传导，温度

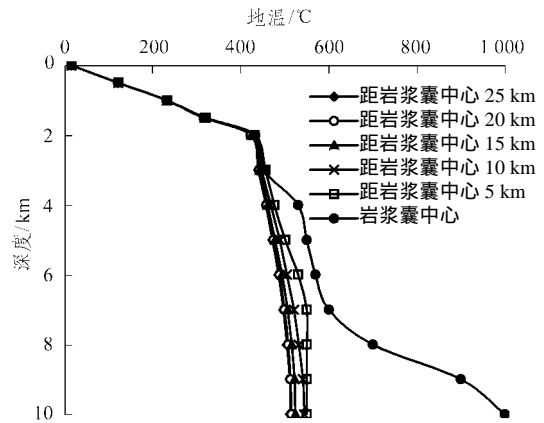
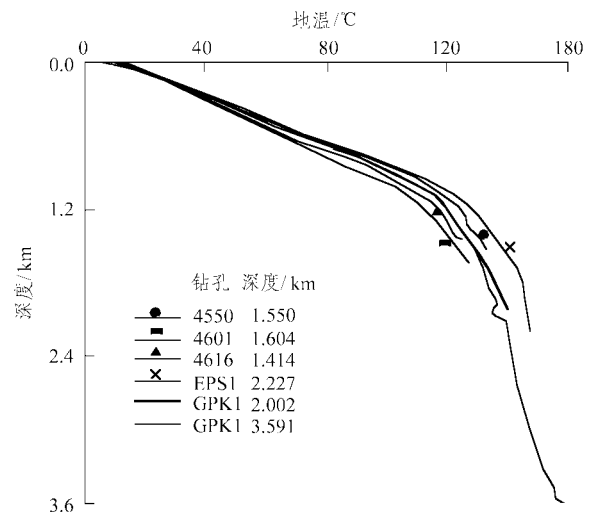


图4 模拟的地温分布梯度线

Fig.4 Simulated gradient curves of ground temperatures

差别大，从而地温分布梯度大，而导热系数大时则正好相反。模拟采用的浅部沉积岩导热系数一般在 $1\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下，仅灰岩和页岩略大；而深部花岗岩导热系数则较大，温度为 $450 \sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，导热系数为 $1.1043 \sim 0.8137\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

这种现象与实测结果是一致的。法国苏尔茨(Soultz)地区进行的高温岩体地热开发研究项目，有以 GPK1 井为中心的5口石油井，实测地温分布梯度线如图5所示^[15]。由图可知：在900 m 以上地温分布梯度为 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ ，900 m 以下地温分布梯度仅为 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ ，即浅部地温分布梯度大，深部地温分布梯度小；5口井的实测地温分布梯度线以 GPK1 井温度分布梯度线为中心，偏离不大。这2个特点与图4中数值模拟的地温分布梯度线是一致的。

图5 法国苏尔茨地区实测地温分布梯度线^[14]Fig.5 Measured gradient curve of ground temperature from Soultz, France^[14]

(2) 资源预测

计算分析表明, 包括该岩浆囊的 10 km 以上截面积为 $2\,500\text{ km}^2$ 的范围内, 地热能总量为 $2.43 \times 10^{22}\text{ J}$ 。考虑有效地热资源提取, 超过 150 可提取的地热能总量为 $1.63 \times 10^{22}\text{ J}$, 等于 $5.2 \times 10^{11}\text{ kW} \cdot \text{a}$ 。如按热电转换效率 17%^[16]来计算, 可发电 $8.8 \times 10^{10}\text{ kW} \cdot \text{a}$, 若装机容量为 $1.0 \times 10^8\text{ kW}$, 可发电 880 a。由此可见, 热海热田的地热资源非常巨大。

4 结 论

(1) 本文将地质体温度的空间分布 $T(x, y, z, t)$ 看作是一个静态的物理量, 忽略地下水运移的对流形式和辐射形式传热, 从而将地壳地热传输简化为空间热传导问题。采用加权余量的 Galerkin 法对岩体热传导方程进行离散, 采用 FORTRAN 语言编制了三维数值模拟软件。

(2) 对热海热田 10 km 深, 水平展布 50 km 范围的温度场进行了模拟。分析了地温与地温分布梯度场的特点, 模拟的地温分布梯度线与实测的地温分布梯度线形状与特点相似。对热田高温岩体地热资源进行的预测表明, 模拟范围内高温岩体可提取的地热能总量为 $1.63 \times 10^{22}\text{ J}$, 若装机容量为 $1.0 \times 10^8\text{ kW}$, 可发电 880 a。

本文提出的高温岩体地热资源模拟与预测方法, 对今后我国进行高温岩体地热开发具有重要的理论价值; 对腾冲热海热田高温岩体地热资源所作的预测结果, 将为该地区地热资源的开发和利用提供重要的参考依据。

参考文献(References):

- [1] 佟 伟, 章铭陶. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1981.(Tong Wei, Zhang Mingtao. Geothermal in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1981.(in Chinese))
- [2] 佟 伟, 章铭陶. 腾冲地热[M]. 北京: 科学出版社, 1989.(Tong Wei, Zhang Mingtao. Geothermal in Tengchong[M]. Beijing: Science Press, 1989.(in Chinese))
- [3] 廖志杰, 赵 平. 滇藏地热带[M]. 北京: 科学出版社, 1999.(Liao Zhijie, Zhao Ping. Yunnan—Tibet Geothermal Belt[M]. Beijing: Science Press, 1999.(in Chinese))
- [4] 陈墨香, 汪集杨, 邓 孝. 中国地热资源——形成特点和潜力评价[M]. 北京: 科学出版社, 1994.(Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. Forming Characteristic and Potential Evaluated of Geothermal Resources in China[M]. Beijing: Science Press, 1994.(in Chinese))
- [5] 刘若新, 樊祺诚, 郑祥身等. 长白山天池火山的岩浆演化[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(3): 226–231.(Liu Ruoxin, Fan Qicheng, Zheng Xiangshen, et al. The magma evolvement of Changbaishan volcano[J]. Science in China(Series D), 1998, 28(3): 226–231.(in Chinese))
- [6] 刘若新. 中国的活火山[M]. 北京: 地震出版社, 2000.(Liu Ruoxin. Active Volcano of China[M]. Beijing: Earthquake Press, 2000.(in Chinese))
- [7] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.(Wang Guoqiang. Applied Engineering Numerical Simulation Technique Application of ANSYS[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1999.(in Chinese))
- [8] 赵阳升. 有限元法及其在采矿工程中的应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.(Zhao Yangsheng. FEM and Its Application in Mining Engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [9] 白登海, 廖志杰, 赵国泽等. 从 MT 探测结果推论腾冲热海热田的岩浆热源[J]. 科学通报, 1994, 39(4): 344–347. (Bai Denghai, Liao Zhijie, Zhao Guoze, et al. Deducing the magma resources by the result of MT sounding in Rehai geothermal field in Tengchong[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(4): 344–347.(in Chinese))
- [10] 刘金诚, 佟 伟, 张宝山等. 腾冲火山地热区的微震观测[J]. 地球物理学报, 1986, 29(6): 547–556.(Liu Jincheng, Tong Wei, Zhang Baoshan, et al. Micro-seismicity investigation of volcano geothermal area in Tengchong[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1986, 29(6): 547–556.(in Chinese))
- [11] 田荣举, 赵晋明. 腾冲火山地区深部构造的地球物理条件[A]. 见: 云南地球物理文集(II)[C]. 昆明: 云南大学出版社, 1998. 127–131.(Tian Rongju, Zhao Jinming. Geophysical conditions of deep tectonic in Tengchong volcano area[A]. In: Selection of Yunnan Geophysics(II)[C]. Kunming: Yunnan University Press, 1998. 127–131.(in Chinese))
- [12] 廖志杰, 尹正武, 贾希义等. 腾冲热海地热的概念模型[J]. 高校地质学报, 1997, 3(2): 212–221. (Liao Zhijie, Yin Zhengwu, Jia Xiyi, et al. Conceptual model of the Rehai(hot sea) geothermal field in Tengchong, Yunnan, China[J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3(2): 212–221.(in Chinese))
- [13] 上官志冠. 腾冲热海地热田热储结构与岩浆热源的温度[J]. 岩石学报, 2000, 16(1), 83–90.(Shangguan Zhiguan. Structure of geothermal reservoirs and the temperature of mantle-derived magma hot source in the Rehai area, Tengchong[J]. Acta Petrologic Sinica, 2000, 16(1), 83–90.(in Chinese))
- [14] 林睦曾. 岩石热物理学及其工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.(Lin Muzeng. Rock Thermophysics and Its Application in Engineering[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.(in Chinese))
- [15] Baria R, Baumgärtner J, Gérard A. Status of the European hot dry rock geothermal programmer[J]. Geothermal Engineering, 1994, 19(1/2): 33–48.
- [16] Pierce K G. An estimate of the cost of electricity production from hot dry rock[J]. Geothermal Resources Council Bulletin, 1993, (9): 197–203.