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.中国矿业大学能源科学与工程学院　徐州　221008；
2.太原理工大学采矿研究所　太原　030024；
3.徐州师范大学科技处　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。以云南腾冲热海热田为例，模拟和分析了热田地下 10 km 以浅，水平展布 50 km 见方（2 500 km^2）范围地温场与地温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。文章提出的高温岩体地热资源的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利用提供重要参考。

关键词：高温岩体；地热；三维数值模拟；预测；热海热田
分类号：P314，TK521　　**文献标识码**：A

Simulation and Forecast Method of Geothermal Resources in Hot Dry Rock

Wan Zhijun[1]　Zhao Yangsheng[1、2]　Kang Jianrong[1、3]
（1.College of Mineral and Energy Resources, China University of Mining & Technology, Xuzhou, 221008, China;
2.Mining technology institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China;
3.Deptment of Scientific Research, Xuzhou Normal University, Xuzhou, 221116, China)

Abstract：This paper studied inversion method of ground temperature field and ground temperature gradient field based on 3D static heat conduction theory. The method ignores the influence from those minor factors such as heat convection and geology tectonics and so on, and it can be used to simulate the three dimensional ground temperature field in rock mass and forecast the geothermal resources quantity of HDR on large scale. The paper simulated and analyzed the features and its mechanism of ground temperature field and ground temperature gradient field of Rehai geothermal field in Tengchong, Yunnan province of China. The simulated area is in the upper 10 km depth beneath the ground and 50 km (2 500 km^2) on the horizontal distribution. Then the quantity of HDR geothermal resources was forecasted. The presented simulation and forecast method of HDR geothermal resources in the paper has very important academic value, and the research conclusions of Rehai geothermal field will provide very important references for geothermal exploitation.

Key words：hot dry rock (HDR); geothermal; 3D numerical simulation; forecast; Rehai geothermal field

高温岩体地热资源量的模拟与评价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量的物理参量为：地质体（岩体）垂向温度分布与水平温度分布和范围，或者说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

本项目得到教育部骨干教师基金的资助。
作者**万志军**简介，男，33 岁，在职博士生。1994 年中国矿业大学采矿工程专业毕业，现任讲师，从事岩石力学和矿山压力方面的研究。

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孔获取极为有限的局部地温分布资料。而采用数值模拟方法，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数值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量进行预测与评价。

1 模拟理论与方法

地热资源量的模拟，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，岩层分布，大地热流，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，此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以下 4 个方面：

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在 800~1 000 ℃之间。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、橄榄岩等等火成岩岩体，而表层往往有泥岩、砂岩、石灰岩等等沉积岩层或土层，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的热传导系数有较大的差异，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的较大差异。

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。

1.1 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输运发生的。在许多情况下，依赖地下水运移的对流形式的传热可以不考虑，辐射形式的传热也可以不考虑。则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。

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

式中：λ_i 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两类：

第一类边界条件：即 $T|_{R_1(x,y,z)} = T_0$

第二类边界条件：即 $\frac{\partial T}{\partial n}|_{R_2(x,y,z)} = q$

第一类边界条件称为给定温度边界，是强制边界条件。第二类边界条件称为给定热流边界，也叫自然边界条件，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，做目标函数使用。

1.2 几何与物理模型

地热资源评价反演计算的几何与物理模型如图 1 所示。

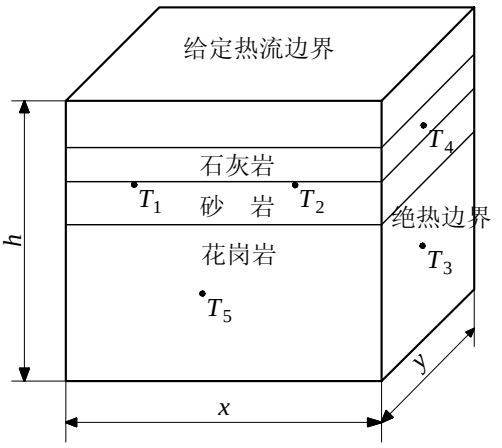


图 1 地热资源分析几何与物理模型

Fig.1 Geometry and physics model for thermal analysis

1.3 岩体热传导方程的离散[7、8]

采用加权余量的 Galerkin 法对岩体热传导方程

进行离散，可以得到 n 个联立的线性代数方程组，用以确定 n 个结点温度 T_{ri}，按照一般的有限元格式，可表示为：

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{P} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{K}$ 是热传导矩阵，是对称正定矩阵，$\boldsymbol{P}$ 是温度载荷矩阵，$\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{r}}$ 是结点温度列阵。矩阵 $\boldsymbol{K}$ 和 $\boldsymbol{P}$ 的元素由单元相应的矩阵元素集成：

$$K_{ij} = \sum_{e} K_{ij}^{e} \tag{3}$$

$$P_i = \sum_{e} P_{Wi}^{e} + \sum_{e} P_{qi}^{e} \tag{4}$$

单元矩阵元素由下列各式给出：

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

$$P_{Wi}^{e} = \int_{\Omega^e} W \cdot N_i \,\mathrm{d}\Omega \tag{6}$$

$$P_{qi}^{e} = \int_{\Gamma_2^e} q \cdot N_i \,\mathrm{d}\Gamma \tag{7}$$

其中，各式的物理意义为：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，具下述性质：

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

以上就是空间稳定热传导问题有限元的一般格式。

2 应用实例

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

2.1 热海热田简况

热海地热田位于云南省腾冲县清水区和荷花区朗蒲乡，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 范围内存在岩浆囊，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]。该区域实测地电阻率很低，约为 5 Ω·m。

2.2 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。边界条件和区域为：模型自地表以下，选择 10 km，地表下 6 km 为岩浆囊边界，在 10 km 处，取岩浆囊半径 5 km，岩浆囊直接影响范围半径取 2.5 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 mW/m^2；底部为给定温度边界，岩浆囊中心温度为 1 000 ℃，边界温度 550 ℃；四周为绝热边界。

地表下 2 km 以内取做风化岩层和碎裂岩层，其热传导系数较低；2 km 以下取为花岗岩体。表 1 是模拟采用的各岩层的有关物理与热力学参数，由于花岗岩的导热系数受温度影响显著，此处用变量形式给出。

表 1 数值模拟采用的岩石热力学参数

Table 1 Thermal and mechanical parameters of rocks

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	2082.44	0.7686	0.8788
泥质砂岩	1906.23	0.8484	0.693333
泥 岩	1922.25	0.8568	0.6864
页 岩	2322.72	0.8064	1.0452
灰 岩	2194.57	0.8484	1.703867
细砂岩	1633.91	0.7686	0.627467
粗砂岩	1746.04	0.7686	0.558133
花岗岩	2730.0	1.098	3.3281-0.364ln$T$

2.3 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，水平展布 50 km（面积 2 500 km^2）范围内地质体的温度场与地温梯度场。

2.3.1 地温场与地温梯度场特点

1）图 2 和图 3 分别是 4 km 水平剖面地温分布图和岩浆囊中心垂直剖面的地温分布等值线图。热田 4 km 水平剖面中心温度高达 452 ℃，离中心 50 km 处温度仍可达到 436 ℃，可见热田面积应远远超过 2 500 km^2。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。

2）图 4 是地温分布梯度线。其特点是：浅部斜率大，深部斜率小，即浅部地温梯度大于深部。地表下 2 km 以内的地温梯度平均达 20 ℃/100 m，这

与钻探测温结果比较一致[3]，而 2 km 以下地温梯度平均仅为 1.37 ℃/100 m。

从图 4 还可以看出，距岩浆囊中心 5~25 km 以内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。

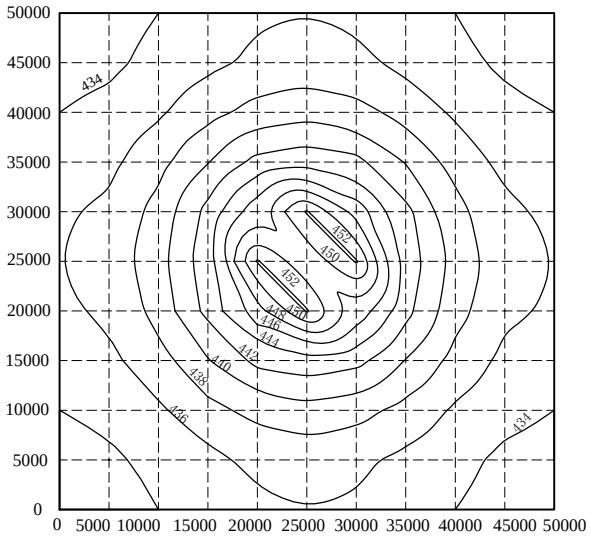


图 2　4 km 水平剖面地温分布图

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

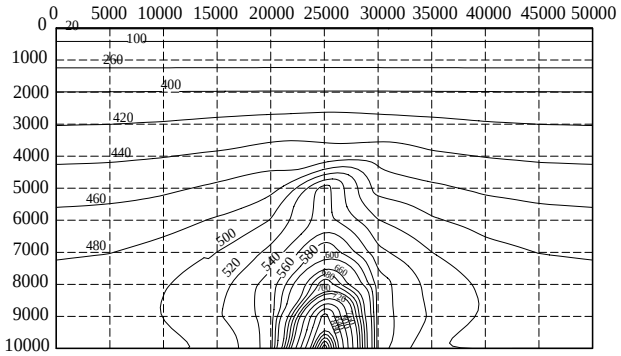


图 3　岩浆囊中心垂直剖面的地温分布曲线

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

3）浅部地温梯度大于深部地温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，温度差别大，从而地温梯度大，而导热系数大时则正好相反。模拟采用的岩石导热系数，浅部沉积岩导热系数一般在 1 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ 以下，仅灰岩和页岩略大；而深部花岗岩导热系数则较大，温度从 450~1 000 ℃变化时，导热系数在 1.1043~0.8137 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ 之间。

这种现象与实测结果是一致的。法国苏尔茨（Soults）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，实测地温剖面如图 5[14]。在 900 m 以上地温梯度为 10.5 ℃/100 m，900 m 以下地温梯度仅为 2.1 ℃/100 m，同样是浅部地温梯度大，深部地温梯度小；其次，5 口井的测温曲线以 GPK1 井测温曲线为中心，偏离不大。这两个特点与图 4 中数值模拟的地温分布梯度线是一致的。

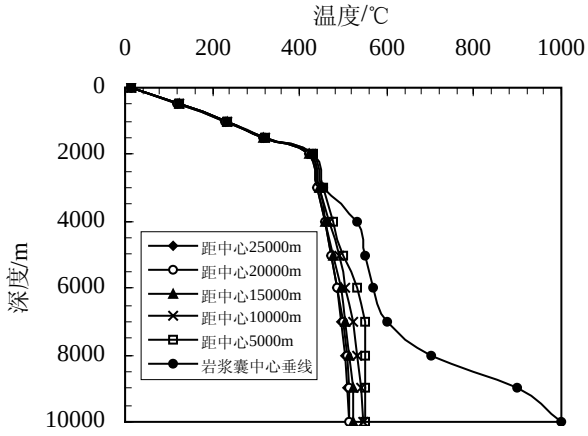


图 4　模拟的地温分布梯度线

Fig.4　Simulated gradient curve of ground temperature

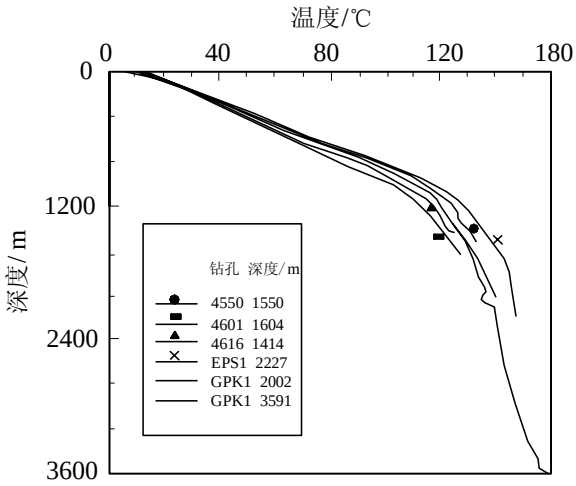


图 5　法国苏尔茨地区实测地温分布梯度线[14]

Fig.5　Measured gradient curve of ground temperature from Soults, France

2.3.2　资源量预测

进一步的计算分析表明，包括该岩浆囊的 10 km 以浅截面积 2 500 km^2 的范围内，热能总量为 24 300×10^{18} J，即 22 925 quads。考虑有效地热资源提取，超过 150 ℃的可提取的地热资源量为 16 300×10^{18} J，即 15 377 quads，等于 5.2×10^7 万 kW·a。如按热电转换效率 17%[15]计算，可发电 8.8×10^6 万 kW·a，若装机容量 1 亿 kW，可发电 880 年。可见热海热田的地热能源资源量非常巨大。

3 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的传热和辐射形式的传热，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 见方范围的温度场进行了模拟。分析了地温场与地温梯度场的特点，模拟的地温梯度分布线与实测地温梯度分布线形状与特点相似。对热田高温岩体地热资源量进行的预测表明，模拟范围内高温岩体地热资源量为 $16\,300\times10^{18}$ J，若装机容量按 1 亿 kW 计，可发电 880 年。

本文提出的高温岩体地热资源的模拟与预测方法，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量所作的预测结果将对该区地热资源的开发利用提供重要参考。

参考文献

[1] 佟伟、章铭陶等编，西藏地热[M]，北京：科学出版社，1981

[2] 佟伟、章铭陶，腾冲地热[M]，北京：科学出版社，1989

[3] 廖志杰、赵平等，滇藏地热带[M]，北京：科学出版社，1999

[4] 陈墨香、汪集旸、邓孝主编，中国地热资源——形成特点和潜力评价[M]，北京：科学出版社，1994

[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

[6] 刘若新著，中国的活火山[M]，北京：地震出版社，2000

[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

[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

[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

[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)：574~556

[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]，云南地球物理文集(II)[C]，云南大学出版社，1998

[12] 廖志杰、尹正武、贾希义等，腾冲热海地热田的概念模型[J]，高校地质学报，1997，3(2)：212~221

[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

[14] R. Baria， J. Baumgärtner， A. Gérard， Status of the European Hot Dry Rock Geothermal Programme[J]，地熱技術，1994，19(1&2)：33~48

[15] K. G. Pierce, An estimate of the cost of electricity production from Hot-Dry Rock[J]， Geothermal Resources Council Bulletin， 1993，(9)：197~203