矿 床 地 质
1994年 MINERAL DEPOSITS 第13卷 第1期

陕西金堆城斑岩钼矿成矿过程中热及流体传输的计算模拟*

任启江 郭国章 冯祖钧 方长泉 解晓军
（南京大学地球科学系，南京）

提 要：在对陕西金堆城斑岩钼矿成矿地质背景和矿床地质详细研究的基础上，运用定点等积测量方法，建立了成矿过程中渗透率分布的概念模型。根据质量、动量、能量守恒定律，建立了控制微分方程组。运用有限元方法，求解数学模型，得到了热流体运移的流函数和温度分布值，进而求出流速和热流值。将前述理论应用于金堆城矿区成矿过程中温度场和流体场的研究，取得了满意的计算模拟结果。为进一步研究斑岩钼矿的形成过程，提供了有意义的信息。与国外同类研究相比，在渗透率分布模型的建立、数值解的方法及程序设计等方面，亦有一定特色。

主题词：斑岩钼矿 热及流体传输 有限元 计算模拟

1 前言

成矿过程的计算模拟是当代矿床成因理论研究的一个重要组成部分。国外学者对斑岩铜钼矿床成矿过程的研究始于70年代。1977年Norton首先发表了深成环境下传热传质过程的计算模拟结果[9]。同年，Cathles运用有限差分方法计算模拟了火成岩侵入对地下水运移过程的影响；并据此讨论了斑岩钼矿的成因[10]。1982年，Norton又针对美国亚利桑那州斑岩铜矿产出的地质背景，进一步研究了小岩体冷却过程中传热传质的理论模式[11]。本文首先简介了计算模拟的原理和方法。然后根据对金堆城斑岩钼矿裂隙系统、矿床地质、成矿地质背景的综合研究结果，建立了矿床的地质模型、渗透率时空分布的概念模型。在此基础上对与之相应的控制微分方程组进行有限元分析，完成了体系温度场和流体场的数值模拟，恢复了成矿过程中地下水运移路径。从而了解岩体的侵位深度、规模、形态、产状与矿化的关系。与前人的类似成果相比，本项目的研究特色是：

（1）地质模型和渗透率分布模型是建立在对矿区有关资料的研究和实测数据的分析基础之上。（2）参数选择和计算结果与现代活动地热体系的实测值（Henley等，1983）[12]进行了对比和检验。（3）考虑了渗透率在空间和时间上分布的不均一性，针对不同的岩性采取不同的热导率、密度、比热等参数。（4）在针对流场方程和温度方程的不同特点进行有限元分析时，分别采用了Ritz方法和Galerkin方法，有限元方程组求解方法和存贮方法相

* 国家自然科学基金资助项目，编号 49070101
任启江 男，54岁，教授，矿床学专业。邮政编码：210008
1992-12-24收稿，1993-4-30修改回

http://www.kcdz.ac.cn/

适应，所编程序可读性强，结构化特点突出，最大限度的节省了计算机内存空间。

本项研究的地质模型、渗透率分布模型和成果的地质解释等主要由任启江等负责，数学模型及其数值解和程序编制主要由郭国章等负责，计算机程序设计成果将另行发表。本文着重论述模拟的地质解释。

2 计算模拟的原理与方法

本文计算模拟的不是斑岩钼矿形成的全过程，只是对斑岩体周围的温度场和地下热水体系的流体场进行数学物理分析。假如斑岩体周围的地下热水沿着连续的通道(岩石中的裂隙、孔隙等）流动，驱动的能源是高温的斑岩体（上升岩浆及其冷凝产物)。由于斑岩体不断与围岩进行热交换，造成了一定区域范围内温度梯度，致使流体出现密度梯度，引起热对流。在这种情况下，尽管对流与热传导可同时出现，但在渗透率较高的岩石中，对流散热是热传输的主要形式。热传输过程遵循物质运动的三条定律，即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。

2.1 动量方程

流体流动所遵循的动量守恒定律在多孔介质中表现为 Darcy 定律，其数学形式可从 Navier-Stokes 方程推导得出。

设流体的密度为 ρ、粘度为 μ、介质的渗透率为 k，则 Darcy 定律可表示为：

$$\vec{q}=-\frac{k}{\mu}(\nabla P-\rho\vec{g}) \tag{1}$$

（1）式中 $\vec{q}$ 为渗流速度（或 Darcy 流速），$\vec{g}$ 为重力加速度，P 是压强(静水压)。以 Darcy 定律为基础，通过一系列数学推导[1]、[2]、[3]，可得下式（2）：

$$\frac{1}{k}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right)=-\frac{g}{\mu}\cdot\frac{\partial\rho}{\partial x} \tag{2}$$

（2）式中 ψ 为流函数。

如果 $\rho=\rho(x、z、t)$ 已知，则（2）式是关于 ψ 的 Poisson 方程。利用（2）式，按照给出的第一类、第二类边界条件，便可得到求解流体场的数学模型。求解出 φ 后，即可计算渗流速度 q_x、q_z，进而求出平均实际流速 $\overline{v}$：

$$\overline{v}=\vec{q}/n \tag{3}$$

n 为孔隙度

2.2 温度方程

在所研究的地质条件下，能量传输的主要方式是传导和对流。

对于热传导可按 Fourier 定律得出相应点上通过单位截面积的热流量(热流强度) $\vec{q}_{cond}$ 为：

$$\vec{q}_{cond}=-K_m\nabla T \tag{4}$$

（4）式中 K_m 为岩石的热导率，T 为温度。

若流体的比热为 C_f，密度为 ρ_f，流体速度为 $\vec{q}_f$，则由于流体运动而引起通过垂直于速度 $\vec{q}_f$ 的单位面积的热对流量 $\vec{q}_{conv}$ 为：

$$\vec{q}_{conv}=C_f\ \rho_f\ \vec{q}_f\cdot T \tag{5}$$

综合（4）、（5）式，得总热流密度

$$\vec{q}''_n=-K_m\nabla T+C_f\ \rho_f\ \vec{q}_f\cdot T \tag{6}$$

在上部地壳中，除岩浆侵入带来主要热量外，还应考虑放射性衰变热、结晶释放热、水岩反应生成热等（Norton，1977）。若用系数 a 来表示这三种热量的总和，在区域R内的总热量：

$$E_R=\int_R(C_m\rho_m T+aT)\,dv \tag{7}$$

（7）式中 C_m、ρ_m 分别为岩石的比热和密度，并假设 C_m、ρ_m 为常数。

根据能量守恒定律，通过一系列数学推导[2]、[4]、[5]、[6]，可得到能量方程：

$$(C_m\rho_m+a)\frac{\partial T}{\partial t}+C_f\rho_0\vec{q}\cdot\nabla T=K_m\nabla^2T \tag{8}$$

对式（8）给出适当的边界条件和初始条件，按照矿区的地质模型，便可求解。

由于本文的地质模型考虑的是非均值各向同性介质，解析方法无能为力，故采用了有限元求解方法，编写了利用Galerkin有限元求解温度场的FORTRAN结构化程序。限于篇幅，本文对于计算步骤不再论述。

3 地质模型与渗透率时空分布模型

3.1 地质模型

地质模型是根据对矿床成矿地质背景和矿床地质-地球化学特征的综合研究结果提出的。

金堆城斑岩钼矿位于华北地台南缘。矿体主岩为花岗斑岩和部分已变质为角岩的中元古界熊耳群安山玢岩（夹板岩、凝灰岩）。由含钼网脉组成的工业矿体呈扁豆状，长2000 m，宽600～800m，延深700m，矿体及地表下花岗斑岩为NEE向断层切割。按区域重力资料和卫片分析结果，金堆城及其周围矿床位于北东向延长的老牛山大岩基的东北缘舌状突起部外围，该舌状突起位于卫片上椭圆形环状影像的内环，并可见清晰的放射状影纹。综合地质-地球物理-遥感信息，可推断成矿时矿化小岩体深部与一较大的隐伏岩体相连，这与对斑岩钼矿矿化岩体一般产状特征及理论计算结果一致（Condela等，笔者等，1993]。根据上述资料，建立了矿区的地质概念模型（见图1）。

3.2 渗透率分布的概念模型

在斑岩钼矿形成过程中，流体场和温度场都受岩石渗透率的制约。破碎岩石的渗透率是裂隙密度和裂隙孔径（或宽度）的立方函数，其表达式为：

$$k=\frac{nd^3}{c}\text{(Snow, 1970)},$$

式中 k 为渗透率（cm^2），n 为裂隙密度（cm^{-1}）、d 为破碎裂隙的宽度（cm），c 为修正常数。

为了建立金堆城矿床的渗透率时空分布概念模型，笔者等首先通过详尽的野外-室内工作，确定了矿化期、矿化阶段及含矿裂隙的生成顺序，采用定点等积测量的方法。在露天采

http://www.kcdz.ac.cn/

场及其周围1.26 km² 范围内设置了210个观测点。测量了各观测点上各成矿阶段的裂隙密度（n）、含脉率（k'）和裂隙宽度（d），表1列出了上述观测结果。对观测的数据，用分块双三次多项式Hermite插值趋势分析程序进行电算制图，绘出了露天采场及其周围各矿化阶段的含脉率等值线图，以及总含脉密度、总含脉率和钼品位等值线图[7]。较系统的揭示了露天采场中含脉率和渗透率的时、空分布特征。

表1 金堆城矿区各矿化阶段矿脉宽度、含脉率、裂隙密度与矿化关系*

Table 1. Relationship of ore vein width, vein percentage and fissure density to mineralization at various mineralization stages of the Jinduicheng ore district

与矿化关系	矿化阶段	矿化强度	含脉率（%）				裂隙密度（cm⁻¹）				脉宽（cm）		
			N	$\overline{X}$	δ	相对丰度（%）	N	$\overline{X}$	δ	相对丰度	N	$\overline{X}$	δ
成矿前	Ⅰ-1 钾长石	−	149	1.4	1.4	7.4	144	0.079	0.097	28.6	727	0.25	0.33
成矿期	Ⅰ-2 石英-钾长石-黄铁矿	+	110	2.26	2.21	9.1	110	0.044	0.045	12.2	144	0.89	0.94
	Ⅰ-3 石英-钾长石-辉钼矿-黄铁矿	++	77	2.07	2.79	5.8	77	0.036	0.038	7.0	132	0.65	0.78
	Ⅰ-4 石英-辉钼矿												
成矿后	Ⅰ-5 黄铁矿	−	96	0.70	0.85	2.5	96	0.038	0.042	9.2	406	0.46	0.52
成矿前	Ⅱ-1 石英-钾长石	+	170	4.08	4.58	25.4	170	0.042	0.029	17.9	380	0.95	1.09
成矿期	Ⅱ-2 辉钼矿-石英	+++	96	3.25	4.15	11.4	96	0.034	0.021	8.2	171	1.30	1.43
	Ⅱ-3 石英-黄铁矿-萤石-辉钼矿	++++	163	6.32	7.68	37.6	1.63	0.038	0.038	15.6	227	1.72	2.12
	Ⅱ-4 石英	+											
成矿后	Ⅱ-5 石英-方解石	−	24	0.61	0.59	0.8	24	0.022	0.015	1.3	35	0.31	0.24

*注：表1中N为统计数；$\overline{X}$为均值；δ 为标准离差。矿化强度用含脉率相对丰度及脉体中辉钼矿含量估计：－示无矿化；＋示弱矿化；＋＋示矿化；＋＋＋示强矿化；＋＋＋＋示最强矿化

含脉率和渗透率在深部的变化是根据以下资料估测的：（1）矿区不同深度下含脉率变化趋势的实测数据；（2）对其他斑岩型矿床（如沙溪斑岩铜矿）岩心中含脉率随深度变化的观测资料[8]；（3）Norton等对北美西南部斑岩型矿床含脉率及渗透率随深度变化的理论模型[11]；（4）现代地热体系中渗透率时空分布特征（Henley等，1983[12]）。

由于文中的渗透率分布模型并非实测，因此仍属于概念模型，但与前人的模型相比，有相当部分的依据属于实测资料，故已有了较大的改进。

图1为金堆城斑岩钼矿的渗透率时空分布的概念模型（其中已包含了地质模型）。在不同的矿化阶段，渗透率分布模式均有明显变化，本文仅列举了第一成矿期成矿前阶段（Ⅰ-1），第二成矿期主要矿化阶段（Ⅱ-2、Ⅱ-3、Ⅱ-4）和第二成矿期成矿后阶段（Ⅱ-5）的渗透率

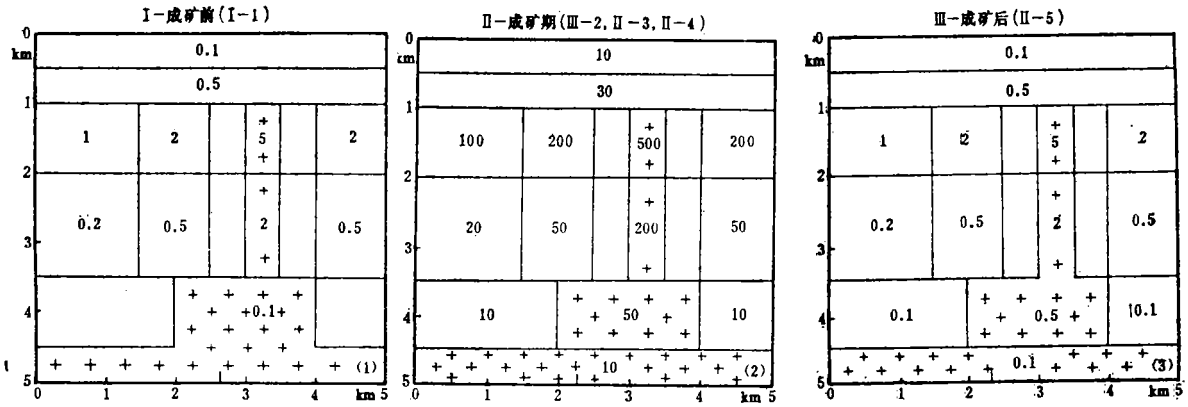

图 1 渗透率分布模式图（渗透率k值，单位：md）
（1）成矿前；（2）成矿期；（3）成矿后；（2）上方之Ⅲ-2应为Ⅱ-2
Fig. 1. Distribution patterns of permeability.
(1)Pre-mineralization period; (2)Mineralization Period; (3)Post-mineralization period.

分布模型作为代表，以后的各类计算模拟工作结果也都只针对上述三个阶段，以减少篇幅。通过对上述三个矿化阶段已足以了解成矿前直至成矿后，矿化斑岩体周围温度场及流体场的演变过程。

4 计算模拟结果及讨论

4.1 温度场的计算模拟结果

按照地质模型和流体包裹体资料，金堆城矿床工业矿体赋存部位约在当时地表下1.5km左右，主矿化阶段（Ⅱ-2、Ⅱ-3、Ⅱ-4）的K—Na—Ca离子平衡温度为265～273℃[7]，与均一温度接近（270～280℃）。本项目计算模拟结果为270℃左右，若矿体向下延深1 km，

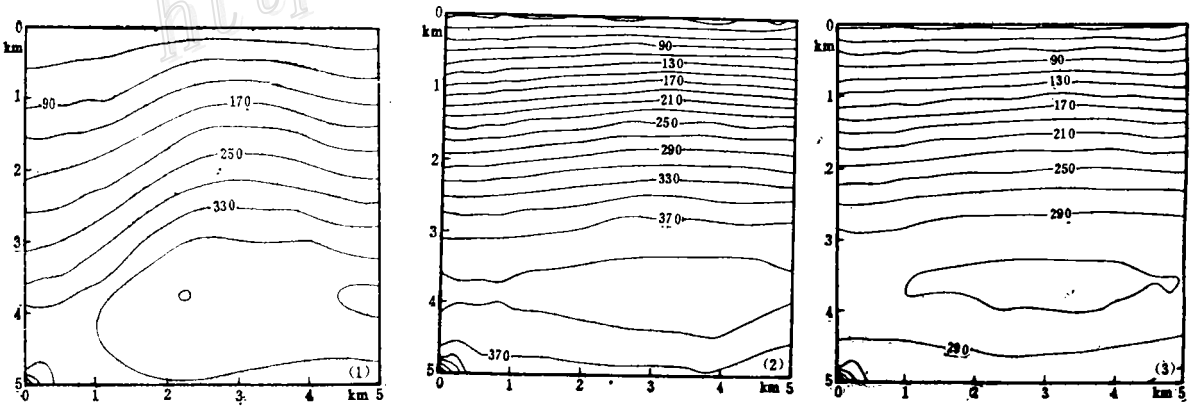

图 2 等温线分布图（单位：℃）
（1）成矿前；（2）成矿期；（3）成矿后
Fig. 2. Isothermal diagram.
(1) Pre-mineralization period; (2) Mineralization period; (3) Post-mineralization period.

http://www.kcdz.ac.cn/

则实测的成矿温度区间为265～380℃，而理论模拟的温度区间为270～355℃，（参看图2-(2)。因此，计算模拟结果与实测数据基本吻合，表明所采用的地质模型、渗透率分布的概念模型、数学模型及求解方法是可信的。

温度场的模拟结果似与国外研究者有所不同（Norton，1977；Cathles，1977；Norton，1982），主要是由于选择的边界条件有明显差异，本项研究以深部大岩体作为主要热源，而国外研究者未考虑深部大岩体的影响；其次，由于成矿期岩石的渗透率很高，通过热对流可使由小岩体产生的热异常迅速消散，另外，也与本项研究所采用的渗透率分布模型有关。计算模拟结果表明：在成矿过程中矿体周围的温度梯度较高，计算值为100～120℃/km，相当于活动地热体系演化晚阶段的温度梯度。而热异常可在很长的时间内继续，可达$n\times10^5$a以上，这些数值都与对现代活动地热体系的研究结果接近[12]。

4.2 流体场的计算模拟结果

图3和图4为金堆城矿床成矿过程中的流线图和Darcy流速分布图。这些图解显示：（1）在不同的时期流线和Darcy流速分布型式均有明显差别。渗透率是制约流体场分布型式的主要因素；（2）工业矿体赋存部位是流线密度最大、Darcy流速最高的部位。可以推断在这些部位及其附近地下水与岩浆流体的作用最强烈，热液的物理化学性质变化也最大；（3）流速和流线的分布型式与岩体的形态、产状有关。成矿前、成矿期和成矿后的流速在矿体附近变化很大。表明加热地下水运动状态的复杂性，而渗透率在时空的变化是导致这种复杂性的主要因素。因此，要研究斑岩型矿床的成矿热液活动过程，首先应从研究矿床的裂隙分布规律入手。

与前人同类研究相比，尽管本科研项目的结果在某些方面有所改进，但是没有涉及岩浆流体及其与地下热水的相互作用，因而尚不能定量地解释斑岩钼矿的形成过程，国际矿床学界目前面临同样的问题。

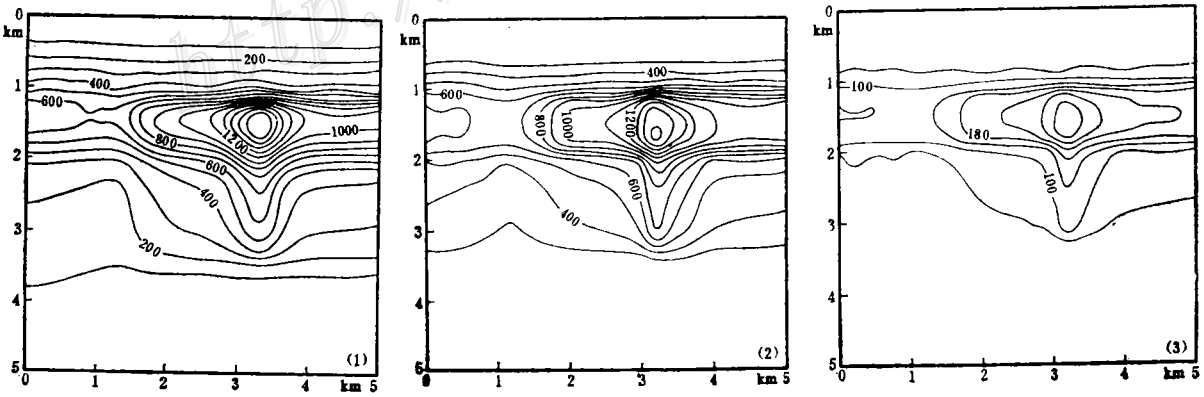

图3 流线分布图（ψ：$\times10^{-10}m^2/s$）
（1）成矿前；（2）成矿期；（3）成矿后
Fig. 3. Distribution of flow lines.
（1）Pre-mineralization period；（2）Mineralization period；（3）Post-mineralization period.

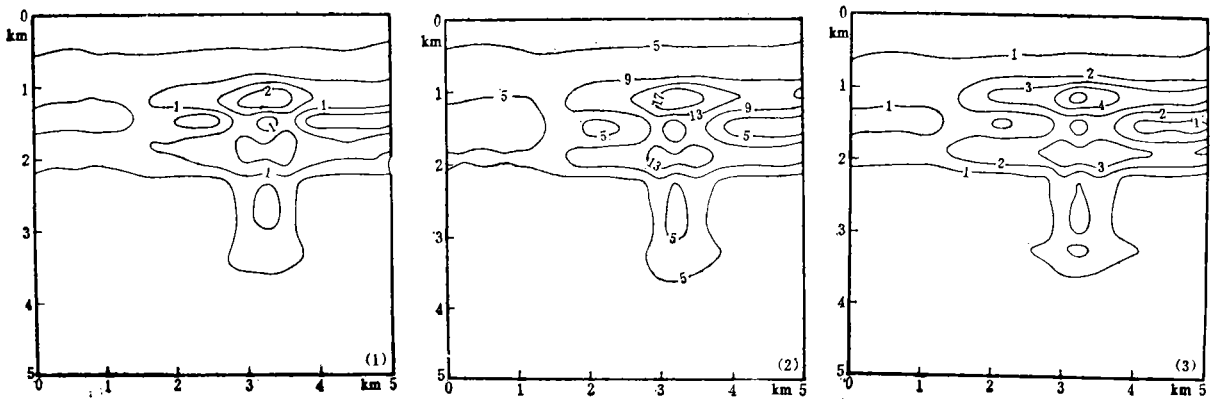

图 4 Darcy 流速分布图（q：$\times 10^{-11}$m/s）
（1）成矿前；（2）成矿期；（3）成矿后
Fig. 4 Distribution of Darcy flow velocities
（1）Pre—mineralization period；（2）Mineralization period；（3）Post-mineralization period

参 考 文 献

1 皮尔.多孔介质流体力学.北京：中国建筑工业出版社，1983.
2 王绍亭等.动量、热量及质量传递.天津：天津科学技术出版社，1988.
3 张捷迁等.真实流体力学（上册）.北京：清华大学出版社，1986.
4 J康纳等.流体流动的有限元法.北京：科学出版社，1981.
5 郭宽良等.计算传热学.合肥：中国科学技术大学出版社，1988.
6 斯坦卡.传热与流体流动的数值计算.北京：科学出版社，1984.
7 任启江等.陕西金堆城斑岩钼矿含矿裂隙分布规律与成因.矿床地质，1987，6(3)：37
8 任启江等.安徽沙溪斑岩铜（金）矿床矿化小岩体的形成条件.矿床地质，1991，10(3)：232
9 Norton D, Knight J. Transport phenomena in hydrothermal systems: cooling pluton. Am. Jour. sci., 1977, 277: 937～981
10 Cathles L M. An analysis of the cooling of intrusives by ground-water convection which includes boiling. Econ. Geol., 1977, 72: 804～826
11 Norton D L. Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments. In: Titley S R, ed. Advances in geology of the porphyry copper deposits, Southwestern North America, Tucson, Univ. of Arizona Press, 1982, 59～72
12 Henley R W, Ellis A J. Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. Earth Science Reviews, 1983, 19: 1～50

COMPUTER SIMULATION OF HEAT AND FLUID TRANSPORT IN THE ORE-FORMING PROCESS OF THE JINDUICHENG PORPHYRY MOLYBDENUM DEPOSIT, SHAANXI PROVINCE

Ren Qijiang, Guo Guozhang, Feng zujun, Fang Changquan and Xie Xiaojun

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu Province)

Key words: porphyry molybdenum deposit, heat and fluid transport,

http://www.kcdz.ac.cn/

finite element, computer simulation

Abstract

On the basis of detailed studies on the geological setting, ore-forming process and ore-bearing fissure systems of the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit, Shaanxi Province, the geological conceptual model and distribution pattern of permeability have been established for the Jinduicheng deposits. According to the law of conservation of mass, momentum and energy, a set of governing differential equations representing transport phenomena of heat and fluid during the ore-forming process have been proposed. The distribution patterns of stream function and temperature are obtained through the numerical solution to these equations by using the finite element method, and Darcy velocity and heat flux can be further calculated.

The results of the study show:

(1) The hydrothermal system has a temperature gradient as high as 100℃ to 120℃ per kilometer. The heat anomaly may last over $n \times 10^5$ years, which is comparable with the active geothermal system in the modern volcanic areas.

(2) As porphyry stocks connect with a batholith at depth, the temperature field is controlled mainly by the batholith.

(3) The distribution patterns of stream function and Darcy velocity are dependent on the permeability of wall rocks, and the orebodies are located in the area which has the largest velocity and the highest density of stream function.

(4) The distribution patterns of Darcy velocity and stream function are related to the shape and mode of occurrence of the intrusive body. In the vicinity of the orebodies, the Darcy velocity changed obviously during the ore-forming process. This mainly resulted from the variation in permeabilities of rocks.

In comparison with the previous similar work, this study has the following features:

(1) The geological model and the distribution pattern are established on the basis of the studies on large quantities of geological data.

(2) The selection of parameters and the calculation results have been examined by the observation data of modern active geothermal systems.

(3) For the simulation of heat and fluid transport, the variation in permeability in space and time and the disparity in physical features of rocks have been considered.

(4) The Ritz and Galerkin methods have been applied in the finite element analysis. The computational programs are easily understandable and are also ready to be modified and enlarged. In addition, the structure of the programs is very clear. All the computer results are output in the way of contour diagrams, including streamline map, isothermal map and Darcy velocity distribution map.