

天水地震区深部地温场的有限元计算

董治平 郭守年 蒋梅 刘宝勤 张立光

(国家地震局兰州地震研究所,兰州 730000)

摘要 用有限元方法计算了天水地震区上地壳地温场。结果表明,影响该区浅部(层)地温场的主要因素是基底构造和断裂构造。祁连褶皱系为高热异常区,秦岭褶皱系为低热异常区,西秦岭北缘断裂带为地温梯度带。认为该带历史地震的发生与热应力差有关。

关键词: 甘肃 有限元分析 地热场 地温梯度带 天水地震区

1 引言

天水地震区位于甘肃省东南部(北纬 $30.5^{\circ} - 36^{\circ}$, 东经 $103^{\circ} - 108^{\circ}$), 东邻陕西省, 北接宁夏回族自治区。在地貌上, 北部为黄土高原, 西南部为青藏高原, 该区恰处青藏高原东北缘地貌陡降带上。其大地构造位置隶属中朝准地台与祁连—昆仑褶皱区^[1]。受青藏、华北、扬子三大板块的共同作用, 区域地质构造极为复杂, 地震及地质灾害频繁发生。为了揭示和研究该区的地球物理场及深部地质背景, 先后进行了大地电磁测深、人工地震测深、重力测量及大地热流测量等深部探测工作。本文在此基础上, 结合地球物理数学模拟的综合解释, 沿人工地震测深剖面进行了上地壳地温场的有限元分析, 以探讨该区岩石圈上部热结构与深部构造及地震活动的关系。

2 计算方法

地温场是基本地球物理场之一。地壳内地温场的分布与变化, 是地球内热作用、传递、再分配的结果。

文献 [2] 的研究表明, 热传导是地球内部热传递的 3 种基本形式之一, 在地壳上部, 尤其是在地下水活动不强烈和没有岩浆(热熔浆)沿断裂上涌的地区, 热传递的形式以传导为主, 其基本方程式为:

$$\frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K \frac{dT}{dy} \right) + Q = - \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中 T 为温度 ($^{\circ}\text{C}$); t 为时间 (s); K 为岩石热导率 ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{k}$); Q 为岩石热产生率 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$); ρ 为岩石热容量 $\rho = \rho_c$, ρ 为介质密度 (kg/m^3), c 为介质比热 ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{K}$)

求解上述方程式的边界条件和初始条件为:

(1) 在上、下边界温度为常数, 即 $T = T_b$;

(2) 已知下边界的热流量 $KdT/dn = q_0$;

(3) 已知整个区域的初始温度 $T = T_0$

式中 T_b 为边界温度; q_0 为边界处垂直边界的热流, 即法向热流; n 为垂直边界的法向量; T_0 为初始温度

方程 (1) 为二维热传导方程, 对该方程及边界条件采用有限单元法求解, 以讨论二维温度场情况。求解、计算过程及计算程序详见文献 [2] 和文献 [3]

天水地震区地温场数学模拟的有限元计算就是根据该区域地温场的特点, 将连续温度场离散成有限数量的温度点, 划分为一定数量的单元, 单元之间的温度通过节点传递, 然后求出给定边界条件下这些温度点上的温度值来近似代表需要求解的温度场

3 模型的建立与参数选择

天水地震区 (图 1) 以西秦岭北缘断裂带为界, 分为秦岭褶皱系与祁连褶皱系。人工地震测线跨越这两大构造系统及鄂尔多斯台缘褶皱带。I 测线剖面 (灵台—阿木去乎) 全长 460 km, 走向近东西 II 测线 (成县—西吉) 全长 242 km, 走向近南北 与以上两条测线相对应的重力测量剖面有: (I) 漳县—张家川, 全长 178 km, 走向近东西。(II) 秦安—成县, 全长 138 km, 走向近南北 根据以上资料确定两条计算剖面, 第一及第二剖面分别与人工地震及重力 I、II 测线走向一致。

尽管人们在水天地区做过很多地质调查研究及深部地球物理探测工作, 但对建立数学模拟地温场的地质模型, 资料仍显不足, 尤其缺少系统的深钻探资料及测温资料, 因此, 计算模型的沉积盖层及结晶基底只能参考文献 [4] 及文献 [5] 的资料。选择既有典型地质构造的代表性, 又占有较多资料的地质剖面段为计算剖面长度 (地质剖面图、基底界面埋深构造图略, 参看文献 [4] [5]) 计算深度以上地壳为界。由于受计算机容量的限制, 每条剖面各分两段计算, 在适当部位进行拼接。计算模型中把第四系和新第三系合并, 结晶基底以上根据不同

时代地层划分为若干个异常区, 结晶基底以下为正常区。各地层的热物理参数 (表 1) 选自文献 [2] [3] [6] [7] 1) 模型上界面采用当地恒温带温度, 下界面采用热流和温度两种边界分别计算以进行比较。划分计算单元时, 靠近断裂及结构构造面处加密, 远离断裂稀疏, 上密下疏, 在结晶基底附近密度加大 (二维计算模型有限元网格图略)。计算方法及计算程序参看文献 [1]

(1) 卓尼—陇县剖面 该剖面横跨祁连、秦岭褶皱系及陕北地台, 剖面线走向近东西。计算剖面宽 300 km, 深 16—17 km 横轴 (X) 步长取 5—10 km, 纵轴 (Y) 步长 0.5—6 km 将剖面分成东西两段分别计算, 西段 (秦岭褶皱系) 长 125 km, 东段 (祁连褶皱系、鄂尔多斯地台) 长 175 km, 两段重叠 30 km, 所以西段模型实际宽度为 0—140 km, 东段模型为 110—300 km 整个计算模型分为 296 个单元, 结晶基底以上地层共分为 23 个异常区 (图 2)。

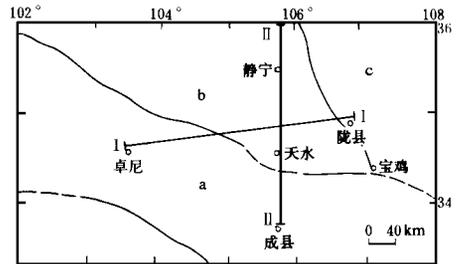


图 1 天水地震区大地构造分区图

Fig. 1 The geotectonic element in Tianshui earthquake area.

(a) 秦岭褶皱区; (b) 祁连褶皱区; (c) 中朝准地台

表 1 地层热物理参数

| 参数 区域 | 地层 | 热导率 K | | 生热率 Q | | 热扩散率 d |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|
| | | W/m ² K | Cal/s ² cm ² °C | μW/m ³ | Cal/s ² cm ³ | |
| 祁 连 褶 皱 系 | N(Q+ N) | 1.549 | 0.0037 | 0.4555 | 1.10 ¹⁾ | 0.65 ²⁾ |
| | 泥岩 | 1.563 | 0.0037 | 0.635 | 1.50 | |
| | J·K·T(Mz) | 2.529 | 0.006 | 0.024 | 2.40 | 1.00 |
| | E | 1.675 | 0.004 | | | 0.80 |
| | | 3.43 | 0.0082 | 0.5837 | 1.40 | |
| | ε—O | 2.512 | 0.006 | 2.0874 | 5.00 | 1.10 |
| | S | 1.857 | 0.0045 | 1.047 | 2.50 | 0.65 |
| | Atε(片岩) | 3.250 | 0.0078 | 1.7218 | 4.10 | 0.95 |
| | Z | 3.392 | 0.0081 | 1.2385 | 3.00 | 1.10 |
| | V, V ₄ | 3.28 | 0.008 | 2.4824 | 5.90 | |
| | 花岗岩 | | | 3.9955 | 9.50 | 0.75 |
| | W _w | 2.85 | 0.0068 | 0.8562 | 2.00 | |
| | 花岗闪长岩 | | | 2.2213 | 5.30 | 0.75 |
| | W _{O₃} | 2.88 | 0.0069 | 0.8562 | 2.00 | |
| | 石英闪长岩 | | | 2.2213 | 5.30 | 0.70 |
| | 上地壳 | 3.168 | 0.0076 | 1.425 | 3.40 | 1.10 |
| 秦 岭 褶 皱 系 | N | 1.675 | 0.004 | 0.4555 | 1.10 ¹⁾ | 0.65 ²⁾ |
| | Kz | 1.256 | 0.003 | 0.635 | 1.50 | |
| | T(Mz) | 2.52 | 0.006 | 1.375 | 3.30 | 1.00 |
| | C—P | 2.093 | 0.005 | | | 1.00 |
| | P | | 0.0055 | 1.7444 | 4.20 | |
| | D | 3.25 | 0.0078 | 1.4493 | 3.50 | |
| | D—C | 3.39 | 0.0081 | 1.3713 | 3.30 | 1.00 |
| | W _w | 2.85 | 0.0068 | 0.8562 | 2.00 | |
| | 闪长岩 | | | 2.2213 | 5.30 | 0.70 |
| | 上地壳 | 3.062 | 0.0073 | 1.875 | 4.50 | 1.00 |
| 鄂 尔 多 斯 台 缘 褶 带 | N(Q+ N) | 1.549 | 0.0037 | | | 0.65 ²⁾ |
| | Mz | 2.346 | 0.0056 | 0.939 | 2.20 ¹⁾ | 1.00 |
| | K | 2.5 | 0.006 | 1.2744 | 3.00 | |
| | ε—O | 2.85 | 0.0068 | 0.7695 | 1.80 | 1.10 |
| | | 2.35 | 0.0056 | 2.0874 | 5.00 | |
| | Z | 3.41 | 0.0081 | 1.2385 | 3.00 | 1.10 |
| | AnZ | 2.847 | 0.0068 | | | 0.90 |
| | 上地壳 | 3.368 | 0.008 | 0.999 | 2.40 | 1.10 |

1) $\times 10^{-13}$, 2) $\times 10^{-2}$

(2)成县—西吉剖面。该剖面横跨秦岭、祁连褶皱系,剖面线走向近南北,计算剖面宽 230

km, 深约 15 km 横轴 (X) 步长取 5-10 km, 纵轴 (Y) 步长取 0.5-4 km 将剖面分成南北两段分别计算, 南段 (秦岭褶皱系) 长 85 km, 北段 (祁连褶皱系) 长 145 km, 两段重叠 20 km, 所以南段实际计算宽度为 0-95 km, 北段实际计算宽度为 75-230 km 整个计算模型划分为 245 个单元, 结晶基底以上地层共分为 17 个异常区 (图 2)

4 计算结果与讨论

计算结果见图 3 和图 4 由图 3 和图 4 可以看出, 计算模型自地表到上地壳范围, 地温等值线随结晶基底形态起伏变化。下面对两条剖面计算结果分别讨论

(1) 卓尼—陇县剖面 该剖面可供参考的井孔测温资料有陇县、清水、天水 3 个, 测温最大深度约 600 m, 最浅 150 m, 且测点远离剖面线, 所以无法进行计算结果与实际资料的对比 因此, 只能就两种不同边界 (热流和温度) 的计算结果加以对比 就计算结果与地质模型及地质构造的关系进行讨论。

由图 3 可以看出, 无论是热流边界还是温度边界, 地温曲线总趋势是明显的、一致的。在深大断裂附近起伏, 远离断裂平缓; 在结晶基底面附近曲线起伏, 基底面以下越深, 曲线越平缓 等温线上密下疏。热流边界等温线比温度边界等温线起伏大。主要起伏位于秦岭褶皱系与祁连褶皱系的分界——西秦岭北缘断裂带附近。这与该带结晶基底面在武山—天水间的大起伏是对应的。总体来看, 剖面等温线为“平缓型”, 起伏不是太大, 这主要是该剖面线走向与西秦岭北缘断裂带及本区的主要构造线、地层走向趋于一致有关, 这一点与成县—西吉剖面形成明显对照。

图 2 计算模型

Fig. 2 Computation model.

(a) 卓尼—陇县; (b) 成县—西吉

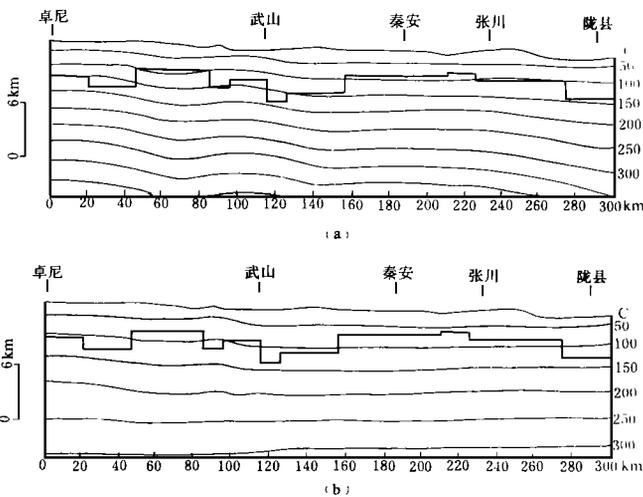
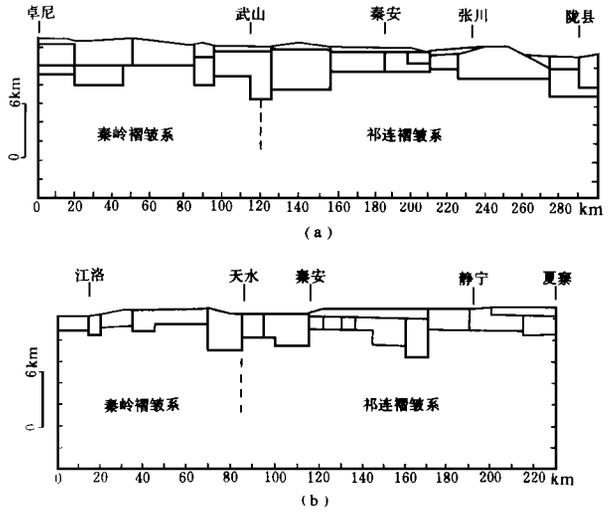


图 3 卓尼—陇县地温剖面

Fig. 3 Geotemperature profile from Zhuoni to Longxian.

(a) 热流边界; (b) 温度边界

这与该带结晶基底面在武山—天水间的大起伏是对应的。总体来看, 剖面等温线为“平缓型”, 起伏不是太大, 这主要是该剖面线走向与西秦岭北缘断裂带及本区的主要构造线、地层走向趋于一致有关, 这一点与成县—西吉剖面形成明显对照。

(2) 成县—西吉剖面 剖面可供参考的井孔测温资料有成县、西和、天水、清水 4 个, 测温最大深度 390 m, 最浅 100 m 左右, 测点均远离剖面线 10 km 以上。因此, 计算结果与实测资料对比仍有困难, 现就不同边界计算结果与地质构造关系讨论如下:

由图 4可以看出,两种边界(热流/温度)计算结果表明,地温曲线总起伏趋于一致。最明显的起伏位于西秦岭北缘断裂带,即秦岭褶皱系与祁连褶皱系的分界带。很显然,该带是一个地温陡变带。这一点与卓尼—陇县地温剖面一样。该剖面的低地温段位于秦岭褶皱系,这可能与该区域多为基岩裸露区,地下水与地表水循环快,导致地热散失快有关。反之,祁连褶皱系为第三系、第四系粘土岩所覆盖,这种低热导率的盖层使得地热散失缓慢,因此保持了较稳定的相对高地温区。这与文献〔7〕获得的热流值、居里温度面、温泉出露等高热异常显示是一致的。等温线同样表现出在深大断裂带、结晶基底面附近,曲线起伏大,远离断裂带及深度越大,曲线则变缓。所不同的是,地温变化比卓尼—陇县剖面剧烈,属“起伏型”。这可能与该剖面横切构造线及地层走向有关。表明地温场的变化与区域构造及其走向相关。顺构造走向,地温变化缓慢;垂直构造走向,地温变化剧烈。

由以上讨论可以认为,地温的变化与断裂构造和结晶基底的起伏有关。另外,由于断裂作用使不同时代、不同岩性的地层相拼接,而不同岩层其介质热物性参数差别颇大,如热导率、生热率、热扩散率等,因此造成了地热向上传递的差异,这也直接影响地温场的分布。从热流边界及温度边界等温图上可以看出,热流边界地温曲线起伏大于温度边界地温曲线,而温度边界地温曲线比较平缓。其中一个原因是沿剖面线实测井温数据及热流值太少,仅凭经验估计及取其他方法得出的温度、热流值作参考边界具有随机性,也造成了一定的计算误差。

5 几点认识

(1)天水地震区浅层地热异常区的分布受结晶基底面的起伏及断裂构造带的影响,而且也与地层分区、介质参数及边界条件有关。

(2)天水地震区以西秦岭北缘断裂带为界形成两个不同的地热异常分布区。祁连褶皱系为相对高地热区,秦岭褶皱系为低地热区。这与已有的地热资料及观测结果趋于一致。

(3)西秦岭北缘断裂带是一个地温梯度带。在其两侧形成的热应力差有利于能量的积累及地震的孕育。因此,该带及其两侧形成了众多的历史强震。这表明该断裂带既是断错壳内不同介质层的大断裂带,也是划分两个不同构造块体的分界带。

本文的计算模型由于缺少钻探资料、系统测温资料及实测岩石热导率、散热率等资料,不得已而选用一些文献给出的资料及经验估计,以致计算结果与实测结果无法进行有效对比。加之计算机功能的限制,因而使计算精度受到一定的影响。因此,准确地说,本文得出的地温剖面只是一个半定性半定量的结果。但与区域地温场的对比表明,计算模型及其结果本身是合理的,是有意义的。要完善本区地温场的有限元计算,只有进一步补充和积累资料,使用合适的计算机,提高计算精度,才能使计算模型更趋合理、更接近实际地温场。

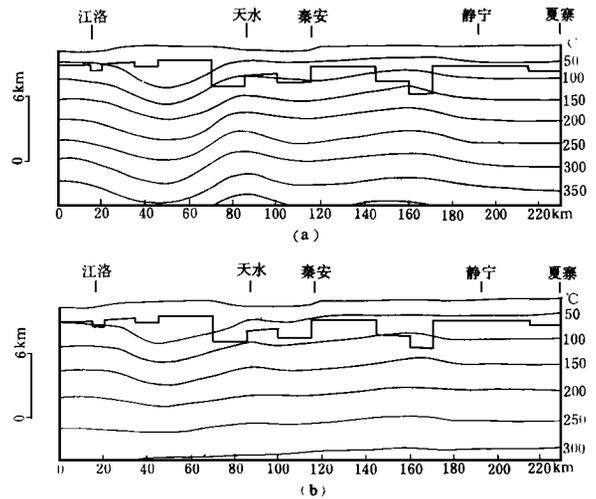


图 4 成县—西吉地温剖面

Fig. 4 Geo temperature profile from Chengxian to Xi Ji.

(a)热流边界; (b)温度边界

参考文献

- 1 黄汲清,等.中国大地构造及其演化.科学出版社,1983.
- 2 熊亮萍,等.区域构造形态对地温场影响的有限单元法计算.地球物理学报,1983,26(增刊).
- 3 张菊明,熊亮萍.有限单元法在地热研究中的应用.北京:科学出版社,1986.
- 4 张生源,谢原定.天水地震区浅层地质构造.西北地震学报,1991,13(增刊):22-28.
- 5 梁中华,等.天水地震区浅层地壳速度构造.西北地震学报,1991,13(增刊):16-21.
- 6 董治平,等.甘肃省第一批实测大地热流数据.甘肃科学学报,1992,4(3).
- 7 张必放,等.南北地震带北段地温场的初步探讨.西北地震学报,1987,9(1):26-32.

CALCULATION OF DEEP GEOTEMPERATURE FIELD IN TIANSUI EARTHQUAKE AREA BY FINITE ELEMENT METHOD

Dong Zhiping Guo Shounian Jiang Mei Liu Baoqin Zhang Liguang
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

The geotemperature field of upper crust in Tianshui earthquake area is calculated by using finite element method. The results show that basement and fault structures are main factors affecting shallow geotemperature field in this area. Qilian fold system is a high geothermal anomaly area, whereas Qinling fold system, low geothermal anomaly area. And the fault zone along the north edge of West Qinling mountains is a zone with high geothermal gradient. It is considered that the occurrence of historical earthquakes in this zone is related to thermal stress difference.

Key words Gansu, Finite element analysis, Geothermal field, Geothermal gradient belt, Tianshui earthquake area