

西藏羊八井热田的热储模式分析

沈 显 杰

王 自 瑞

(中国科学院地质研究所, 北京) (西藏地热地质大队, 拉萨)

摘 要

通过对羊八井热田浅层热储及下伏花岗岩基温度场的分析, 阐明了热田南北两部分热储特性的差异性和热液补给的同源性, 进一步得出: 念青唐古拉山前断裂带和唐山山前断裂带是热田的边界控制构造, 而热储内的第四系岩性分布则是热储特性的主要控制因素。依热田内深孔温度资料, 建立了深及 3.3 km 的基岩区传热模式, 应用非稳定热传导和热量平衡原理, 粗略估算出最近一次热液侵入浅层热储的年代约为距今数万年左右, 是青藏高原最新的深部热活动在近代构造应力作用下的地表显示。

羊八井热田是念青唐古拉山南缘串珠状地热显示区中较大的一个, 属喜马拉雅地热带东翼。热田内地热显示形式繁多, 类型齐全, 是一个面积较大、分布集中、埋藏浅, 具有一定自动起喷能力的高温热水型热田。目前已建成装机容量为 1 万千瓦的地热发电厂, 并向拉萨并网送电。

有关该区的区域地质背景和热田地质构造已有大量著述^{[1-3], [4, 5]}, 此处不赘引, 仅强调指出, 在青藏高原近代地壳运动的控制下, 区内呈现强烈的新构造运动、地震活动性和水热活动。对羊八井热田热储模式的探讨, 不仅为热田勘探开发所必需, 且将为研究高原近期构造演化和深部热活动提供一定的例证。

一、问题的提出

经多年热田勘探、研究和试开发, 初步阐明羊八井热田的性质和规模, 但要进一步勘探和开发, 尚须查明下列各点:

1. 热储的类型和范围 包括: (1) 热储属静态封闭型抑或动态再生型; (2) 下伏花岗岩体是热传导介质, 或本身即为可供开发之热储体的一部分; (3) 热田南北侧和东西翼边界的性质。

2. 热源和通道 一般断裂构造是热源体向上输送热液的理想通道, 但热田内存在多级断裂构造, 哪一级断裂构造起通道作用, 不仅决定着热田的成因模式, 而且直接影响进一步的勘探方向和资源开发方式。

本文 1983 年 2 月 23 日收到, 1984 年 2 月 6 日收到修改稿。

1) 杨期隆, 试论西藏羊八井地热田的成因, 1979 年。

2) 王自瑞, 西藏羊八井地热田控热构造与水文地质特征, 1979 年。

3. 热田结构的不均一性 为查明热水资源在热储体中的分配特点, 必须确定控制热储温度、压力和渗透性分布的主要因素。

目前, 有关羊八井热田的成因模式可归纳为以下三种:

(1) 断裂构造控制、垂直输热模式, 认为地热异常带, 地热异常区, 地热田及热田通道的赋存位置, 均受各级断裂构造及其复合交汇部位所控制; 羊八井热田的控热构造是一组基底帚状构造, 热液沿这些张性交汇断裂带, 以垂直上涌方式储集于浅层热储内形成热田^[2-4]。

(2) 隆起带下伏潜火山活动热源模式, 认为从硫磺矿到 317 钻孔一带, 存在一个北西向隆起带, 通过一系列断裂, 与下伏近期岩浆囊或潜火山相通, 构成强大热源; 大气降水经深循环至热源区加热后, 通过垂直张性基岩裂隙, 以垂向脉状流动回返浅部, 形成热储¹⁾。

(3) 硫磺矿岩浆热源、侧向输热模式, 认为硫磺矿一带有第四纪岩浆体上侵, 冷水的侧向补给流经深部加热, 并与岩浆体析出的少量高温水、汽相混合后, 形成混合热流体, 以重力流形式, 自北向南集中补充浅层热储²⁾。

本文作者认为, 制定热田模式之最直接而有效的方法, 是进行温度场的分析。热田内目前的温度场, 包含着有关热源、通道、热水的运动方式和补给速率等多种信息; 根据热田内的温度分布, 辅以适当的分析计算, 反演到水热活动的初始条件及其演化的概况, 是一种值得探索的方法, 至少可以作为确定热田模式的补充手段。

二、羊八井热田热储温度分布特征

1. 温度的垂向分布特征

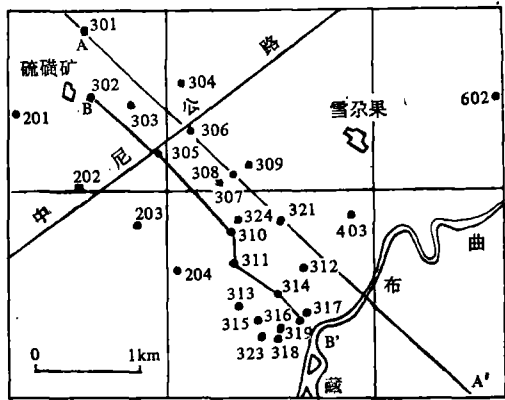


图 1 羊八井热田钻孔位置图

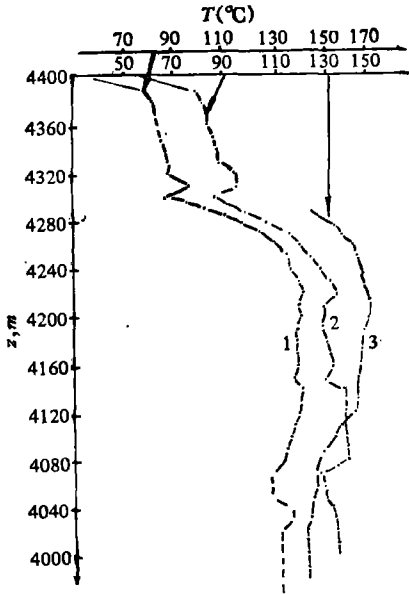


图 2 羊八井热田第四系热储平均温度-深度曲线

1——全热田平均温度曲线; 2——北区平均温度曲线; 3——南区平均温度曲线

1) 西藏羊八井热田地质工作汇报提纲, 1981 年。
2) 杨期隆, 试论西藏羊八井地热田的成因, 1979 年。

按热田内 22 个钻孔(图 1)的实测温度资料,作出浅部热储的平均温度-深度曲线(图 2)。

图 2 中全热田平均温度-深度曲线指明了整个热储内温度垂向分布的以下特点:

(1) 热储平均温度在垂向上出现明显峰值,最高平均温度 144°C 左右,反映热储内流体的平面流动特性,热源来自侧向补给,属重力流;主峰值上下各有一个局部温度突起,说明热储内可能存在一个以上流径不一的载热流体。

(2) 各钻孔相同层位处温度的离散及曲线呈波状起伏,说明热储温度分布的不均一性,间接反映出羊八井热田不属于静态封闭型热储,而具有动态热对流特征。

(3) 热储温度主峰值上下,分别形成明显的正、负温度梯度,表明热储垂直向上、向下均有热量散失,前者远大于后者。

热田南部和北部(区界大致沿 202, 307, 308, 309 钻孔一线)的平均温度-深度曲线形态不同(图 2): (1) 南区的曲线上峰值明显,平均温度较高(151°C); 北区温度峰值不甚明显,呈波状起伏,平均温度较南部低(141°C); (2) 南区最高平均温度点标高约 4,200 m; 北区埋藏较深,在 4,080—4,140 m 段(已部分波及基岩); (3) 南区曲线的下部呈明显的温度倒转,北区除个别钻孔外,似乎不存在温度倒转现象。这些特征表明,北部基岩受侧向传热而升温的效应明显,基岩顶部裂隙发育,可能构成水平向输送热水的次通道。

308 深孔温度-深度曲线(图 3)的形态表明,浅部埋深约 150 m 处峰值明显,自 200 m 向下温度剧降,500—800 m 段温度稳定在 $119\text{--}120^{\circ}\text{C}$ 左右,800 m 向下开始回升,其梯度略高于正常区增温梯度。

2. 温度在剖面中的分布特征

岩性-温度剖面给出温度场的二维平面分布特征,据此可勾绘出温度在三维空间的分布,从而指明热水在储体内的流动方向和特征,及其与岩性、断裂构造等的关系。图 4 中仅给出众多剖面中的一例。

热储内热水赋存于砾卵石、砂砾石中,而高温热水则往往储集于泉胶砂(砾)岩中。在北部,新构造运动使泉胶砂(砾)岩的位置高于目前的高温段。这种特定岩性带与高温段的复合,意味着泉胶砂(砾)岩可能是深成热液的核心部分侵入第四系沉积层的轨迹。泥砾

层呈不规则的透镜体分布于热田中部,构成南北二区大致的阻流隔热边界,也是上下热储体相对的隔水层。粘土层仅在热田南部沉积,构成热储的盖层,使南部热储具承压自喷能力;北部既无粘土盖层,也不能自动起喷(除个别孔外),反映出南北二区热储具有不同的压力特征。

图 4 还表明,浅部热储分别受西北、东南两侧的热水补给,两脉高温热水呈相向交汇分布。热田南部熔结凝灰岩界面与等温面基本平行,进入基岩区温度降低;北部基底花岗岩顶面几乎与等温面直交,说明南区基岩的渗透性及裂隙的发育程度均差于北部。

3. 温度在平面上的分布特征

热储最高温度等值线形态(图 5)表明,热田北部和南部各形成一个舌状高温脉,南北二脉高温热水在中部汇合。北脉以 301, 302, 303 孔为中心,分东西两支向东南延伸,西支宽而短,

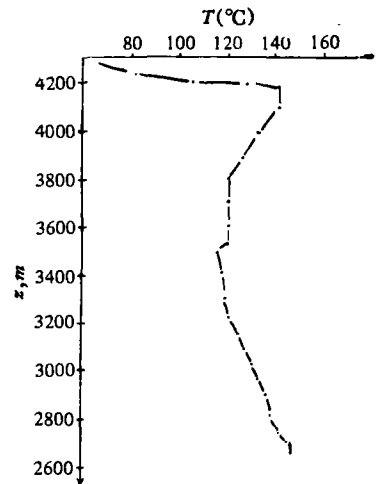


图 3 308 孔温度-深度曲线

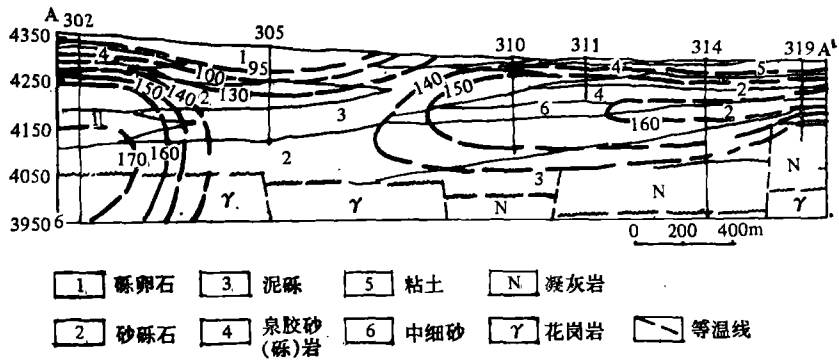


图 4 羊八井热田岩性-温度剖面图 A—A' (图 1)

不超越中尼公路;东支窄而长,延至 308 孔以南.南脉大致以 310, 314, 313 孔为中心,向西北延展,形成宽展的舌状脉.

热储温度在 4,150m, 4,200m 和 4,250 m 三个不同标高处的等温线(图略)形状,与热储最高温度等值线的形态类型相似,均呈两脉三支相向交错舌状延伸,至热田中部汇合.这一现象表明在上述深度区段内温度分布具有相对的稳定性.南北两脉热水等温线分别向西北和东南敞展,说明热水的补给分别来自东南和西北二个方向.至于南北两脉交汇处高温区变窄,主要由于侧向的冷水掺混作用所致,因而,越靠近舌中心,温度越高.

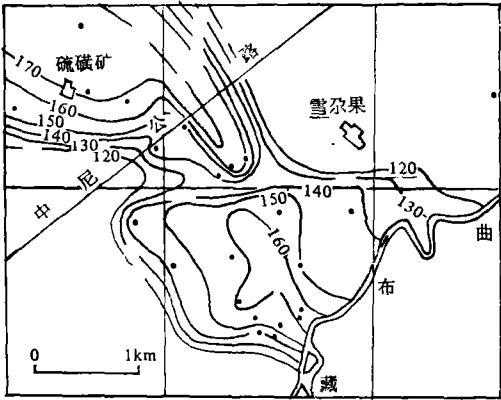


图 5 热储最高温度等值线图

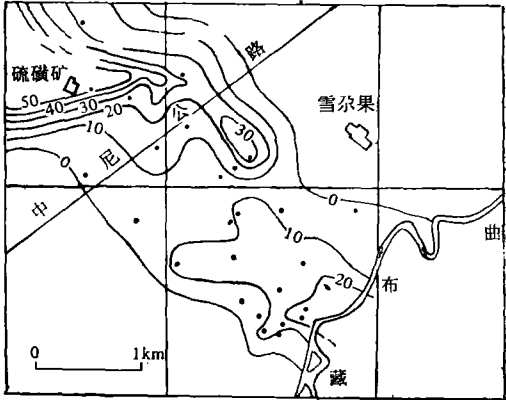


图 6 胶结岩占第四系厚度的百分含量等值线图

4. 控制热储温度分布的主要因素

念青唐古拉山前及唐山山前断裂带,可能是控制第四系高温热水型热储分布范围的边界断裂,它们既是深部热液上涌的主通道,又是向第四系热储集中输热输水的源头.靠近北部边界断裂的北西向张性断裂,可构成局部的热水运动通道.既然热储具侧向集中补给水平对流动态特性,显然,热储体在水平方向上的渗透性能是控制热田内高温热水的流动性,也即热储补充速率的主要因素.因此,浅部热储中第四系岩性的空间配置是热储温度的首要控制因素.岩性在垂向剖面中的配置,决定热田属封闭型或开启型及相应的压力特性;而在平面上的配置则是控制载热流体分布范围及其温度的主要因素.

图 6 中,泉胶砂(砾)岩(和其它的胶结岩类)占第四系厚度的百分含量等值线的圈闭形态,与图 5 中最高温度等值线的形态基本一致,进一步证实二者似有内在联系.然而,泉胶砂(砾)岩的分布范围大于目前热储内高温区的分布范围,说明自热液初始侵入以来,高温热水区的分布范围日益收缩,温度亦相应降低.

泥砾层虽具有弱透水性,但在动态型热储中仍起阻流隔热作用.图 7 所示的泥质岩类占第四系厚度的百分含量低值区(<20%)的分布范围,与高温区分布范围基本吻合,泥质含量较高的地段,温度最低,同样证实岩性配置对温度的控制作用.

热储内温度分布尚取决于侧向的热水补给强度,北部的补给强度大于南部,且距补给源较南部近,热水在运动过程中的累计温度损耗较小,致使热田北部热水的最高温度高于南部约 10℃ 左右.其它诸如热水在流动过程中的垂直向上、向下的热量散失强度,及流经途中边缘及两翼冷水掺混的程度等,均是影响热储温度的可能因素.

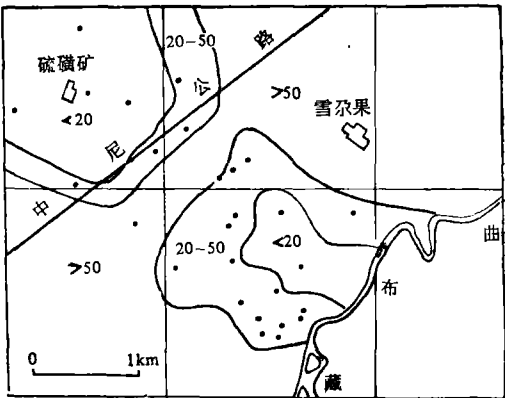


图 7 泥质岩类占第四系厚度的百分含量分区图

三、羊八井热田的热储模式及模式概算

1. 热储模式

根据上节温场分析,结合区域地质资料、纵贯热田南北的地质剖面(图 8),和 308 深钻孔和其它中深钻孔温度随深度的分布(图 3),作者提出一种“同源异途南北热液补给、水平对流动态型”热储模式,它集中概括了下述特点:南北边界断裂为输送热液的主通道,构成热田南北边界,向深部延伸,推断两者同源源于现代地壳上部的岩浆囊,或局部熔融物质上侵的壳内热源;东西两翼为冷热水混合的热力学边界;在热储内部,热水的运动方式受岩性及渗透性控制,属于水平对流动态型热储;下伏的花岗岩体主要为热传导介质,虽可能存在局部的热水上涌通

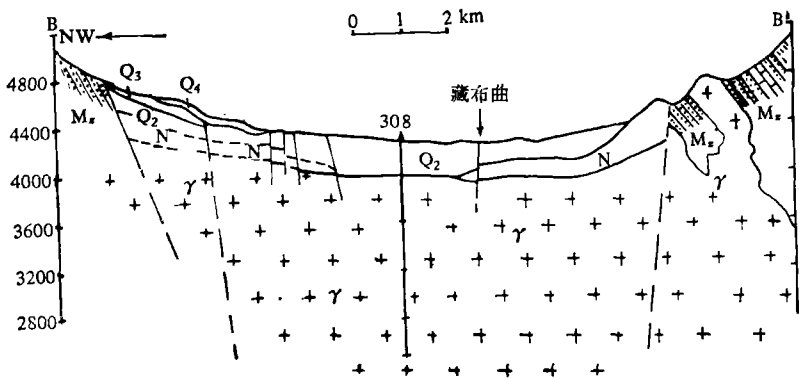


图 8 羊八井盆地地质剖面示意图 B—B' (图 1)

r——花岗岩; N——第三系凝灰岩; Q——第四系砾岩、砂砾、砂、泥砾; M_z——中生代石英岩、板岩、砂板岩,

道,但并非热田的主要控制构造。

上述模式也为羊八井热田共 42 个钻孔及泉点水化学资料所证实(图 9)。由图 9 可见,第

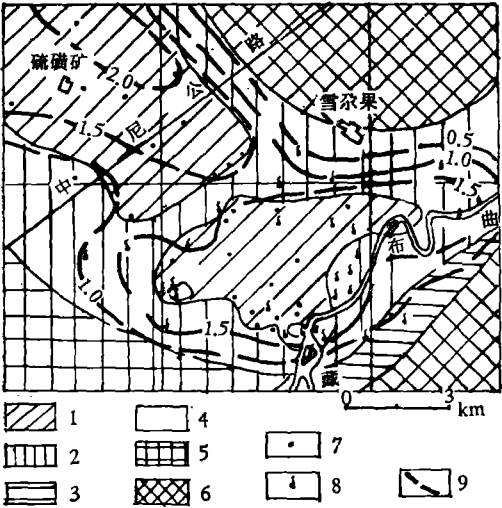


图 9 羊八井热田钻孔及泉点水化学类型分区及矿化度等值线图

- 1—Cl-Na 水; 2—Cl-HCO₃-Na 水;
- 3—HCO₃-Cl-Na 水; 4—SO₄-Na 水;
- 5—HCO₃-Ca-Mg 水; 6—HCO₃-Ca-Na 水;
- 7—钻孔; 8—泉点;
- 9—矿化度(g/l)等值线。

四系热储水的水化学类型属于 Cl-Na 型,反映了深源或深循环的环境,虽南北分片补给,但类型和矿化度基本一致;边缘冷水的掺混,使矿化度降低,Cl-Na 型水逐渐过渡为 Cl-HCO₃-Na 型水;藏布曲以南出现 HCO₃-Cl-Na 型水,表明南部山前带的冷水混合强于北部。热田南部局部出现 SO₄-Na 或 SO₄-Cl-Na 型水,且矿化度偏高,可能反映沿北西向张性断裂有局部的浅层水热活动环境。

作者检验了 Cl⁻, F⁻ 离子和 HBO₂ 和 SiO₂ 含量的分布规律,所得的等值线与图 9 中的形态相近,再次证实热储内确实存在南北两脉高温热水,及其化学组分上的同源性。

2. 模式概算

308 钻孔深 1,724 m, 在热田内位置适中,其深孔测温资料提供许多热田内最后一次热活动的信息。图 10 中给出该钻孔中温度-深度曲线随时间演变的示意图。标高 2,700m 以上段采用实测温度资料,在 3,200—

3,800m 段出现温度波动段,其上温度梯度明显倒转,其下,温度以接近于正常的梯度随深度递增,说明自最近一期热液侵入浅层热储以来,有部分热量向下传导至花岗岩体的上部,目前温度扰动波及深度约 1,100m 左右。图 10 中尚给出推测的原始温度-深度曲线,取地表多年平均

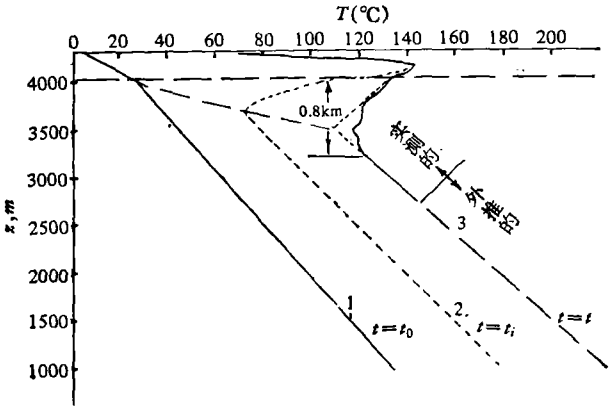


图 10 308 钻孔温度-深度曲线随时间演变的示意图

- 1— $t = t_0$, 推测的原始温度-深度曲线; 2— $t = t_i$, 某时刻的温度-深度曲线;
- 3— $t = t$, 目前的温度-深度曲线。

温度为 5°C , 第四系沉积物与基岩热导率之比为 $1:2$, 花岗岩平均热导率为 $6\text{mcal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$, 地温梯度为 $35^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 由此设羊八井地区的深部区域热流值约为 2.1HFU 左右。图中实线 $t = t_0$ 代表原始的温度-深度曲线, 点线 $t = t_i$ 表示某 t_i 时刻的温度分布。图 10 中的温度分布特征, 表征着下伏花岗岩体自最近一次热液侵入浅层热储以来所经历的非稳定热传导过程演化至今的瞬时温度场, 可用于估算非稳定温度场的某些参数, 如: (1) t ——最近一次热液侵入活动距今的年代, (2) q_2 ——边界断裂向上输送热液时, 在 t 时刻至今的时段内向花岗岩体侧向传热的平均热流密度, 以及 (3) q_3 ——第四系热储在 t 时刻至今的时段内垂直向下传热的平均热流密度等。

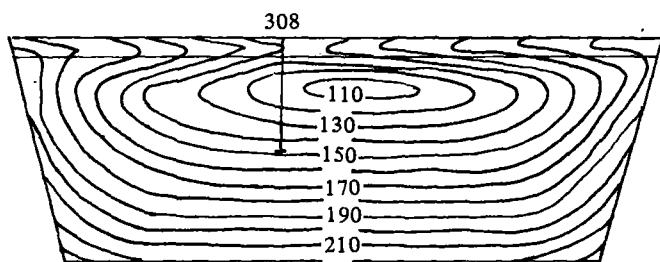


图 11 羊八井热田 3.3 km 范围内的温度分布模式

为概算 t , q_2 和 q_3 三项参数, 需将热田实际的地质条件进行模式概括, 以确定计算模型的边界条件和温度及几何参数。图 11 即根据 308 钻孔及热田内中深井测温资料, 结合边界断裂的产状、热田的分布范围推测的二维平面温度场, 或称为羊八井热田的温度分布模式。模式中取第四系热储厚度为 0.3 km , 热储南北长 9.6 km , 两侧边界断裂倾角均为 75° 。计算是在基岩传导区内进行的, 为此, 将上述模式进一步简化为图 12 的基岩传导区计算模型。图 12 中 $q_1 = 2.1\text{HFU}$ 假定为已知, q_2 和 q_3 前已定义, 边界断裂简化为直角边界, 因此 q_2 为相应的水平分量, 模型的宽度和高度分别为 8.6 km 和 3.0 km , 模型厚度取为 1 km 。

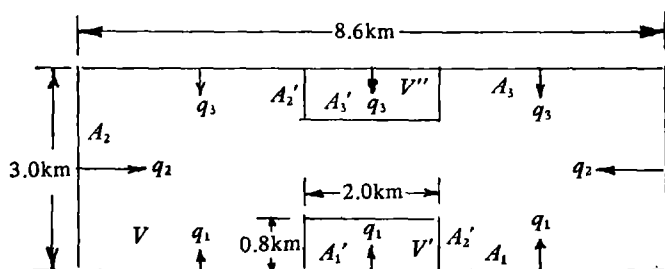


图 12 羊八井热田基岩传导区的计算模型

根据图 12 的计算模型, 可建立下列三个不同计算区的热量平衡方程式:

$$\text{整个传导区 (V): } (2q_2A_2 + q_3A_3)t = c\rho V\Delta T_V, \quad (1)$$

$$\text{线性传导区 (V'): } 2q_2A_2'(t - t') = c\rho V'\Delta T_{V'}, \quad (2)$$

$$\text{温度倒转区 (V''): } (q_3A_3' - q_1A_1')t = c\rho V''\Delta T_{V''}, \quad (3)$$

式 (1)–(3) 中, V , V' 和 V'' 为各计算区的体积, A_1' , A_2' , A_3' , A_2 和 A_3 为各相应传热界面的

面积, c 为岩石的比热, $c = 0.2 \text{ Cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, ρ 为岩石密度, $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$, ΔT_V 为 V 体积内岩石在 t 时段内的增温值, $\Delta T_{V'}$ 为 V' 体积内岩石的增温值, $\Delta T_{V''}$ 为 V'' 体积内岩石由热储向下传导的过剩热量引起的附加增温值. t' 为热量由模型两侧边界传到 V' 和 V'' 计算区侧向边界所需的时间, 根据非稳定热传导理论, 温度传播可由下式表示之:

$$T = T_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2 \sqrt{\alpha t}} \right) \quad (4)$$

式(4)中 T_0 为原始温度扰动量, 当 $\left(\frac{Z}{2 \sqrt{\alpha t}} \right) \approx 3$ 时, Z 处的原始温度开始受到扰动, 在我

们的计算中令 $t' = t$, 取介质的热扩散率 $\alpha = \frac{K}{c\rho} = 0.012 \text{ cm}^2/\text{s}$, $Z = 3.3 \text{ km}$ (见图 12), 求得 $t' \approx 3.025 \times 10^{11} \text{ s}$.

根据图 10—12, 可求得式(1)—(3)中的各项参数: $A'_1 = A'_3 = 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^2$, $A'_2 = 0.8 \times 10^{10} \text{ cm}^2$, $A_2 = 3.0 \times 10^{10} \text{ cm}^2$, $A_1 = A_3 = 8.6 \times 10^{10} \text{ cm}^2$, $V' = V'' = 1.6 \times 10^{15} \text{ cm}^3$, $V = 25.8 \times 10^{15} \text{ cm}^3$, $\Delta T_V = 90^\circ\text{C}$, $\Delta T_{V'} = 75^\circ\text{C}$, $\Delta T_{V''} = 13^\circ\text{C}$.

联立(1),(2)和(3)式, 解出 $t = 3.85 \times 10^{11} \text{ s} \approx 12,000 \text{ y}$, $q_2 \approx 45 \text{ HFU}$, $q_3 = 3.45 \text{ HFU}$.

四、结 语

通过对区域地质资料和钻孔实测温度资料的系统分析, 建立了羊八井热田第四系热储的“同源异途南北热液补给、水平对流动态型”热储模式, 钻孔和泉点水化学资料印证了这一模式. 对下伏花岗岩体的温度场进行了推算, 通过侧向传热、上下热传导补给模式的概算, 初步确定了第四系热储最近一期强烈的水热活动约始于 12,000 y 前, 延续至今仍方兴未艾. 由于: (1) 概算中采用二维平面热传导计算模式, 忽视了东西两翼冷水活动对温度场的可能影响. (2) 目前计算参数尚有较大的不确定性, 因此上述水热活动年代的数值仅可视为初步概算值; 然而数值的量级表明, 羊八井热田是一个非常年青的、近代尚有强烈热液侵入活动的动态型热田, 其最近一期热液侵入的年代, 最可能是晚更新世末期. 自热液侵入以来, 由于强烈的地表热显示和水热活动, 以及边缘冷水的侵入和混合, 热田的规模和活动性虽略有下降, 但目前仍是喜马拉雅地热带东翼一个十分活跃的、有开发前途的热田. 其成因模式对地热带内相邻的地热异常区, 可能具有一定代表性.

概算中所得的 q_2 和 q_3 数据表明, 热田南北两侧主通道的侧向传热流量, 约为正常区大地热流值的 60 倍左右, 比热储垂直向下的平均传热流量约大 25 倍, 说明羊八井第四系热储具备充足的热量补充速率. 在侧向热交换的持续作用下, 花岗岩体的基础温度逐渐升高, 但目前仍处于非稳态阶段. q_3 虽大于 q_1 而形成垂直向下的“温度波”, 但在 q_2 的强烈影响下, 温度波所及深度已基本趋于稳定.

根据上述热储模式, 建议:

1. 在评价第四系热储的地热资源时, 必须考虑到热储的动态特性, 建立与之相应的评价方法. 本文提出的模式似可作为评价热田地热资源的基础模式.

2. 进一步勘探的方向应向热田南北两侧主边界断裂带展延, 不应拘泥于在浅层热储的直接底部寻找高温热源(可能深不可及)、热液主通道或深部热储.

3. 应根据热田的侧向补给、水平对流动态型特点, 建立相应的热田开发制式。为达到长期、满发、稳发之目的, 热田开发似应建立在“保持热储压力, 截取动态补给”的原则上, 而不应过早、超量地开采第四系热储内有限的积存热量。

4. 羊八井第四系热储结构松散, 盖层发育较差, 开发中应注意成井工艺及安全生产, 制订相应的热田及环境保护措施。

参 考 文 献

- [1] 佟伟等, 西藏地热, 科学出版社, 1981.
- [2] 康文华等, 西藏地热异常与地质构造, 西藏地热能研究, 1981, 1: 19—40.
- [3] ——, 西藏地热能研究, 1982, 2: 1—50.
- [4] 刘连捷、陈健, 西藏地热能研究, 1981, 1: 41—50. 王自瑞, 同上.
- [5] 佟伟等, 地球物理学报, 1982. 25(1982), 1: 34—40.