

文章编号: 1001-1986(2010)01-0058-04

平顶山八矿地热温标的选取及热储温度估算

柴蕊

(煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 在地热系统中, 地热温标通常被用来评价地下热储温度, 但是众多地热温标计算出的热储温度往往相差很大, 需要进一步判断矿物-流体的平衡状态。以平顶山八矿地热系统为例, 讨论了地球化学温标的应用条件; 通过 Na-K-Mg 三角图及以 WATCH 程序建立的多矿物平衡法在该矿的应用, 证实玉髓地热温标最适合估算该矿区深部热水温度, 该矿区深部热水温度约为 50℃。

关键词: 地热温标; 热储温度; 水-岩平衡; 平顶山八矿

中图分类号: TD741; P641 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.01.014

Selection of geothermometers and estimate of the temperature of geothermal reservoir in Pingdingshan 8th mine

CHAI Rui

(Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The geothermometer is often used to calculate the deep temperatures of geothermal reservoirs in the geothermal system, but the temperatures calculated by different geothermometers are different, which needs to exam the mineral-fluid equilibrium state. The conditions for use of geothermometers in the geothermal system were discussed in the paper by taking the geothermal system in pingdingshan 8th mine as example. The Na-K-Ca diagram and lg(Q/K) figure were used to exam the mineral-fluid equilibrium state of the geothermal system in Pingdingshan 8th mine, which indicated that the chalcedony geothermometer was the most suitable geothermometer for the deep reservoir in Pingdingshan 8th mine, and the temperature of the deep reservoirs is about 50℃.

Key words: geothermometer; water-rock equilibrium; temperature of geothermal reservoirs; Pingdingshan 8th mine

热储温度的确定对于矿井热害防治及有效利用地热资源都具有非常重要的意义。目前, 地下深部热储温度的估算通常采用地热温标方法, 尤其是对中低温、水动力场属开放型的地热田, 这是一种经济有效的手段。地热温标大体可以分为两类: 一类是硅温标, 如石英、玉髓等矿物, 溶解度是温度的函数, 可以直接用作地热温标; 另一类是阳离子温标, 如 Na/K、Na/Li、Na-K-Ca 等, 它们在水中溶解组分比例的交换反应依赖于温度, 可以用这些组分的比值来作为地热温标^[1]。

平顶山矿区位于河南省中西部, 是一个遭受热害威胁的矿区, 由于井下热水涌出, 工作面气温偏高。区内平均地温梯度约为 3.5℃/hm, 比邻区高, 也高于华北地台的正常地温梯度(3℃/hm)。本文应用地热温度计估算了平顶山八矿地下深部热储的温度, 旨在为地热资源的研究和开发利用提供依据。

1 常用地热温标方法和应用条件

水热系统里的对流循环运动总是伴随着各种物质的溶解-沉淀反应, 如果某种反应产生的平衡浓度值和反应的温度有关, 就可以根据这一浓度来反推反应温度, 建立在这一原理基础上的估算地下温度的方法称之为地热地球化学温标^[2]。地球化学温标用于评价热储温度以及预测热储在生产过程中可能的冷却。各种温标的经验公式都是利用水溶液中相应组分的平衡反应与温度的关系确立起来的。通常, 直接利用传统地球化学温标估算出的热储温度往往与实际温度相差甚远, 应用效果较差。根本原因是地热温标的使用有一个基本前提, 那就是作为地热温标的某种溶质或气体和热储中的矿物达到了平衡状态。这是因为热水溶液在向上运移的过程中会因沸腾、蒸汽逃逸改变热流体化学组分含量, 或者深部热储层的热水与浅层冷水的稀释混合会使原有的

收稿日期: 2009-04-21

作者简介: 柴蕊(1982—), 女, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事水文地质方面的研究工作。

高温平衡环境遭到破坏。

目前,常用的定量地球化学温标有二氧化硅温标(包括石英温标、玉髓温标)和阳离子温标(包括 Na-K 温标、K-Mg 温标等)。

1.1 SiO₂ 温标

SiO₂ 温标是目前广泛用于推算地下热储温度的一种方法,它是基于水溶液中硅的浓度是由水-岩相互作用时的温度下硅的溶解性决定的^[3]。天然水中溶解的 SiO₂ 一般不受其他离子的影响,也不受络合物的形成和挥发散失的影响,并且沉降随温度降低而降低的速度相当缓慢,因此在地表水中硅的浓度能很好地指示地下热储的温度^[4]。硅的总浓度是温度的函数。不同的等式表明,这种函数是基于实验室试验数据、测量数据以及地热系统中不同井中热水的硅浓度的数学过程。石英传导温标可以说明该部分地下热水曾经达到过的最高温度。研究表明,温度小于 110 °C,通常是玉髓控制着溶液中的二氧化硅含量;大于 180 °C 时,通常是石英控制着溶液中的二氧化硅含量;在 180~110 °C 间,石英和玉髓都可以和溶液达到平衡^[5]。

石英温标 $t = 1\,309 / (5.19 - \lg C_{\text{SiO}_2}) - 273.15$,

玉髓温标 $t = 1\,032 / (4.69 - \lg C_{\text{SiO}_2}) - 273.15$,

式中 C_{SiO_2} 代表 SiO₂ 的质量浓度, mg/L。

1.2 阳离子温标

阳离子地热温标是基于热水与固相物质间的 K、Na、Ca、Mg 等阳离子的交换与温度的关系建立起来的。所有阳离子温标方法都是经验性的近似方法^[6],多用于热储温度的评价。常用的有 Na-K 温标、K-Mg 温标等。

1.2.1 Na-K 温标

Na-K 地热温标是基于钠长石和钾长石在一定温度条件下达到平衡而建立的,即在具备钠、钾长石平衡环境的天然水中,Na、K 质量浓度的比值是温度的函数,这一比值不受以后温度降低的影响。适合的温度是 25~250 °C^[4]。

Na-K 温标 $t = \frac{933}{\lg(C_{\text{Na}}/C_{\text{K}}) + 0.993} - 273.15$,

式中 C_{Na} 、 C_{K} 分别代表水中钠、钾离子的质量浓度, mg/L。

1.2.2 K-Mg 温标

K-Mg 温标是基于钾长石转变为白云母和斜绿石的离子交换反应,它对于温度的变化反应非常迅速,在溶液达到平衡也最为快速,因此,它适用于低温热水系统^[7]。

K-Mg 地热温 $t = \frac{4\,410}{14.0 - \lg\left(\frac{C_{\text{K}}^2}{C_{\text{Mg}}}\right)} - 273.15$ 。

式中 C_{Mg} 代表水中镁离子的质量浓度, mg/L。

1.2.3 Na-K-Ca 温标

Na-K-Ca 地热温标的建立基于 Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 3 种离子的碱性长石的离子交换反应,它是中低温地热系统中常用的温标。适合的温度是 0~250 °C^[7]。

Na-K-Ca 温标

$t = \frac{1\,647}{\lg\left(\frac{C_{\text{Na}}}{C_{\text{K}}}\right) + \beta \left[\lg\left(\frac{\sqrt{C_{\text{Ca}}}}{C_{\text{Na}}} + 2.06\right) + 2.47 \right]} - 273.15$,

式中 当 $t < 100$ °C 时, $\beta = 4/3$; $t > 100$ °C 时, $\beta = 1/3$ 。
 C_{Ca} 代表水中钙离子的质量浓度, mg/L。

2 地热温标的选取和计算

2.1 不同温标对热储温度的计算

本文选取平顶山八矿 5 个钻孔的热水水样进行水化学分析测试,其水化学成分分析结果见表 1。

利用上述各种地热温标方法对这些热水水样数据进行初步的热储温度估算,估算结果见表 2。

从表 2 可以看出,由于温标方法众多,各自所依据的理论原理均不相同,再加上相关干扰因素的影响,对于同一水点来说,不同的温标方法计算出的热储温度常常差异很大。这是因为任何一种温标的适用前提都是假设溶液-矿物达到了平衡状态,在没有达到平衡状态的情况下,温标必然无法给出正确的结果。这就需要寻找其他化学分析方法进行更深入的分析、筛选,确定达到水-岩平衡的矿物,选取合适的温标方法,最后确定热储的温度范围。

2.2 矿物-流体平衡判断

地热流体中溶解物的浓度是热储温度的函数。从理论上讲,受温度控制的化学反应中的组分都可以用来做地热温标。但是,作为地热温标方法,还

表 1 热水水样水化学成分表
Table 1 Chemical composition of the hot water samples

mg/L

水样编号	K ⁺ + Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS	pH
1	143	67.10	30.20	61.30	191.60	388.10	26.8	882.1	7.1
2	143	69.14	29.17	62.75	155.90	390.50	28.0	855.4	7.1
3	144.9	68.10	29.50	61.30	194.00	300.10	24.4	805.9	7.05
4	130.6	61.12	30.30	58.50	205.17	373.42	24.0	888.2	7.05
5	135.7	66.13	29.17	58.50	206.03	384.41	25.2	908.6	7.5

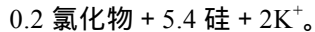
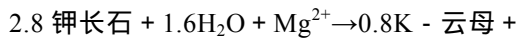
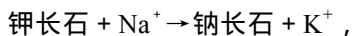
表 2 不同地热温标对八矿地下热储温度的估算表 $^{\circ}\text{C}$
Table 2 Temperature of geothermal reservoirs calculated by various geothermometers

样品 编号	石英 温标	玉髓 温标	Na-K 温标	K-Mg 温标	Na-K-Ca 温标
1	74.82	43.23	211.78	62.78	88.35
2	76.58	45.09	208.52	62.41	86.46
3	71.09	39.33	203.60	61.82	86.45
4	70.44	38.65	212.79	60.77	86.46
5	72.36	40.66	217.13	62.70	88.03

须满足以下基本条件：a. 反应物必须充足；b. 水-岩之间必须达到平衡；c. 水(气)向取样点运移的过程中没有发生再平衡。因此，必须研究热水和矿物的平衡状态以检验地热温标方法的可靠性。

2.2.1 Na-K-Mg 三角图法

Na-K-Mg 三角图由 Giggenbach 于 1988 年提出，在图中分为完全平衡、部分平衡和未成熟水 3 个区域，常被用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样。其应用原理是，钠、钾的平衡调整较缓慢，但钾、镁含量的平衡调整很快，即使在温度较低时亦如此，因此对中低温热田热储温度的计算较为有利。它取决于以下两个依赖于温度的反应^[1]：



三角图中的坐标可以计算如下：

$$S = C_{\text{Na}} / 1000 + C_{\text{K}} / 100 + C_{\text{Mg}};$$

$$C_{\text{Na}} \% = C_{\text{Na}} / 10S;$$

$$C_{\text{K}} \% = C_{\text{K}} / S;$$

$$C_{\text{Mg}} \% = 100 \sqrt{C_{\text{Mg}}} / S.$$

式中 C_{Na} 、 C_{K} 、 C_{Mg} 为水中钠、钾和镁离子的质量浓度，mg/L。

此方法优点在于可在同一幅图上同时判断出大量水样的平衡状态，能把混合水和平衡水很好地分开。

通过图 1 中的 Na、K 以及 Mg 含量的分析数据，可以判断水样是否适合应用离子型溶解性地温计。图中水样点均落在部分平衡水和未成熟水的范围内，反映了水-岩反应的平衡温度偏低，水样不能完全达到平衡，也说明了八矿的地下热水可能来自较热的环境，在由热水向地表上升的过程中受到浅层冷水的稀释作用，从而使热水中元素的含量变低。通过对八矿热水沉淀物成分的分析得知，热水在向上运移的过程中混入了煤系砂岩水，印证了这一结论。因此，阳离子型地温计不会得出合理的平衡温度值，八矿不适合用阳离子型地温计来计算深部热水温度。

2.2.2 多矿物平衡法

Reed 和 Spycher 提出多矿物平衡图解法以判断地热系统中热液与矿物之间总体的化学平衡状态。

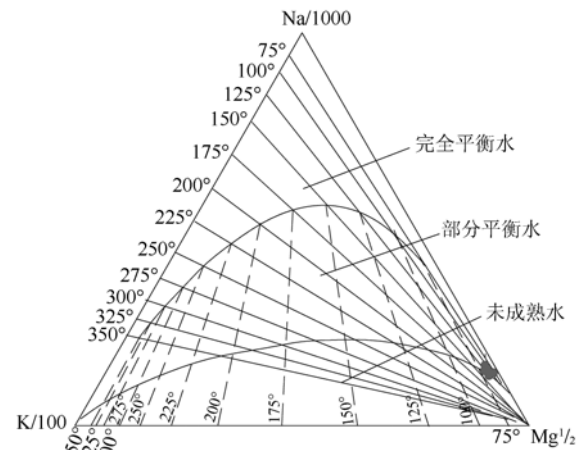


图 1 八矿地下热水 Na-K-Mg 三角图

Fig. 1 Diagram of Na-K-Mg of the water samples in 8th mine

其原理是将水中多种矿物的溶解状态当成温度的函数，若一组矿物在某一特定温度下同时接近平衡，则可判断热水与这组矿物达到了平衡，平衡时温度即为深部热储温度^[8]。

用 WATCH 程序计算出的矿物-溶液的平衡数据，可判断出已达到平衡的矿物。WATCH 程序可以利用地下热流体水质分析数据，通过计算深层水中水溶物种的活度系数，模拟出地热流体中的化学成分和物种的形成，并进一步模拟出水中溶解矿物的情况。

结合收集到的八矿地下热水的水质资料，应用 WATCH 程序计算矿物的饱和程度。饱和指数 SI 可判断每种矿物的饱和程度， $SI > 0$ ，表示过饱和； $SI = 0$ ，表示饱和； $SI < 0$ ，表示未饱和。

$$SI = \lg Q - \lg K = \lg \left(\frac{Q}{K} \right),$$

式中 K 为矿物在地下热水中的溶解度，mol/L； Q 为实际溶解在地下热水中矿物的离子活度积，mol/L。

表 3 为八矿热水水样各矿物的饱和指数，选取了常见的 5 种矿物(硬石膏、温石棉、玉髓、石英、滑石)。从表 3 中可以看出，这 5 种矿物中玉髓和石英的饱和指数大于 0，而石英处于过饱和状态，只有玉髓接近平衡状态。因此可以认为玉髓温标给出了较为可靠的平衡温度。从一定意义上讲，石英温标给出的温度是深层热储的最高温度。

2.3 热储温度的确定

用 WATCH 程序分别模拟出这 5 个热水水样在 40~80 $^{\circ}\text{C}$ 时，水中溶解矿物的情况。通常，若某种矿物在水溶液中达到了平衡，这种矿物的平衡曲线和 $SI = 0$ 轴的交点所对应的温度就是它的理论平衡温度，交点周围一个较小的温度区间就是热储中的平衡温度，这种矿物可作为该热储的地热温标。以温度为横坐标， $\lg(Q/K)$ 值为纵坐标，作出表示石

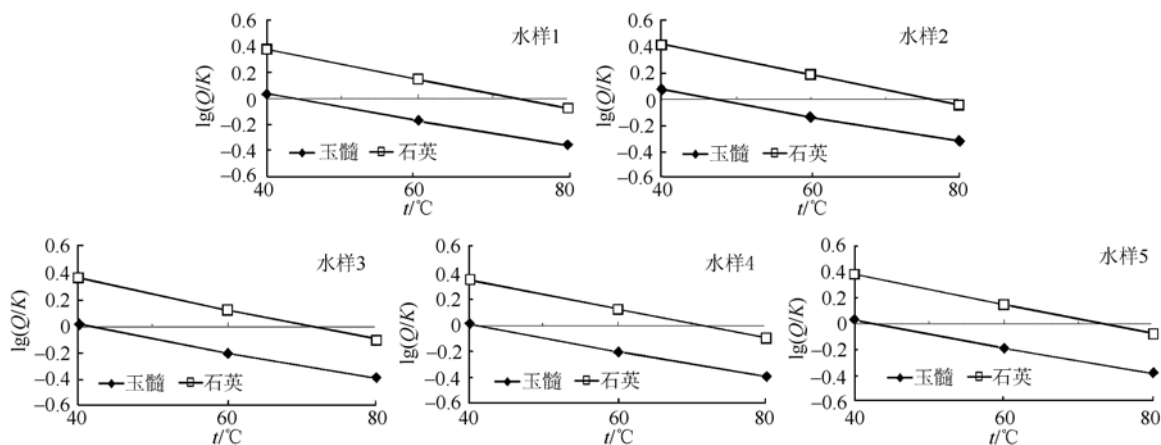
表 3 热水水样中各矿物饱和指数

Table 3 Saturation indices of minerals of the water samples

矿物	水样编号				
	1	2	3	4	5
硬石膏	-1.163	-1.241	-1.185	-1.173	-1.103
温石棉	-3.71	-3.857	-4.611	-4.333	-0.959
玉髓	0.099	0.136	0.106	0.057	0.025
石英	0.448	0.485	0.456	0.406	0.37
滑石	-0.838	-0.898	-1.69	-1.541	1.729

英、玉髓和溶液平衡状态的 $t - \lg(Q/K)$ 曲线图。

从图 2 中可以看出,玉髓的平衡曲线与 $SI=0$ 轴

图 2 各水样玉髓、石英矿物的 $t - \lg(Q/K)$ 曲线图Fig. 2 Diagram of $\lg(Q/K)$ of quartz and chalcedony of the water samples

计算得出八矿地下水的循环深度为 1 425 m,这个深度与李口集向斜轴部灰岩最大深度基本吻合。

八矿距地表 600 余 m(-430 m 水平)处,温度是 47 °C 左右,而在深度 1 425 m 处具有 70~80 °C 的高温,东风井等出水点水温为 36 °C 左右,说明深部热水在上升过程中还有温度偏低水的混入。再次印证了 Na-K-Mg 三角图得出的结论。

3 结 论

a. 地热温标法目前广泛应用在地热勘探工作中,但是任何温标在使用前都要进行水岩平衡判断,不能直接应用。

b. 利用 Na-K-Mg 平衡图可以评价水样的平衡状态。当大部分水样未达到平衡,不能用阳离子地热温标估算热储温度。

c. 利用热流体水质分析数据可以由 WATCH 程序计算出矿物-溶液的平衡数据,从而可判断出已达到平衡的矿物,进而来估算地下热储的温度。

d. 无论是 WATCH 程序还是 Na-K-Mg 平衡图,都可以用来评价地热系统中水-岩平衡状态,但在实际工作中,要将这些方法结合起来,互相比对,互相验证,互相补充。

交点的温度对应应在 40~50 °C 间,与实测温度较为接近;石英的平衡曲线与 $SI=0$ 轴交点的温度对应应在 70~80 °C 间,则反映出该区深层热储的最高温度。

实测平顶山矿区恒温带深度为 25 m,温度 17.2 °C,东部地区地温梯度为 4 °C/hm,代入热水的循环深度公式中:

$$H = q(t_H - t_B) + h$$

式中 H 为循环深度, m; t_B 为恒温带温度, °C; t_H 为热水深部最高温度, °C; q 为地温梯度, °C/hm; h 为恒温层厚度, m。

e. 通过多矿物平衡法在平顶山八矿地热系统的应用,采用各种地热温标计算的结果以及矿物-溶液的平衡数据证实,玉髓地热温标是最适合估算该矿区深部热水温度的地热温标,石英温标则适合估算深部热储的最高温度。八矿深部热水温度约为 50 °C,最高温度达 70~80 °C。

参考文献

- [1] 郑西来,刘鸿俊.地热温标中的水-岩平衡状态研究[J].西安地质学院学报,1997,18(1):74-79.
- [2] 汪集旻,孙占学.神奇的地热[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [3] 于媛.北京城区地热田地下热水的水化学及同位素研究[D].北京:中国地质大学,2005.
- [4] 柳春晖.白庙温泉、赤城温泉及塘子庙温泉的水化学及同位素研究[D].北京:中国地质大学,2006.
- [5] 郑西来,郭建青.二氧化硅地热温标及其相关问题的处理方法[J].地下水,1996,18(2):85-88.
- [6] 汪集旻,熊亮萍,庞忠和.中低温对流地热系统[M].北京:科学出版社,1993.
- [7] 吴红梅,周立岱,郭宇.阳离子温标在中低温地热中的应用研究[J].黑龙江科技学院学报,2006,16(1):27-30.
- [8] 王莹,周训,于媛,等.应用地热温标估算热储温度[J].现代地质,2007,21(4):605-612.