地 质 学 报
1985 年 ACTA GEOLOGICA SINICA 第 1 期
http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

高温地热储热流体的物理状态及井孔水热动力分析与计算

胡 循 森
(中国地质科学院水文地质工程地质研究所)

文章分析了高温地热储热流体的天然物理状态，求解了地热流体沿井管减压上流(水—水、汽)两相流动方程，提出了热储最高温度、开始汽化面深度、动态平衡汽化面深度、孔内汽化面上、下压力降分布和井口最大工作压力等计算方法。以中国羊八井和日本 Otake 热田为例给出了计算结果；借用敏感性分析指出了参数的主次和准确性要求。方法包括了一般冷地下水的情况。部分结果已为热田开发所证明。它们不但为评价热储温度、地层渗透性等创造了条件，而且为热储工程提供了重要参数。

一、导 言

判断地热储自然状态下热流体（主要是水）的物理状态，描述并求解其沿井管上流的相变过程和基本方程，是定量评价地热系统的有效途径，是为热储工程提出井孔测试要求和井孔运行参数依据的一项理论分析性工作。可是，由于复杂的地质和水文地质条件，特殊的热流体状态和力学性质，可以互相转变的水、汽两相流动，因而使得与物理过程有关的因素繁多，井孔测试结果不能按已有的水文地质理论和方法加以解释和直接使用，在某些问题上，甚至现成的热工理论也不易阐明。因此，国内外在这方面的定量工作进展都比较缓慢。七十年代起，K. Yunaka, V. M. Sugrobov, 哈承佑等做了不同程度的研究[1,2,3]。作者曾于 1978 年提出了汽化面位置的计算方法1)，对其变动趋向作了讨论，计算结果获得了验证。本文以此为基础，导出沸腾温度、工作井井下压力降分布、井下热储压力降和井口最大极限工作压力等一系列计算方法，并作了热储地层渗透性估算和单个参数对结果影响的敏感性分析。

二、地热储热流体的物理状态

按热物理特性，温度和压力确定了地热储里的水呈单相过冷液态、液汽两相饱和态或过热蒸汽状态。V. M. Sugrobov 根据静水压力大于与热储温度相应的饱和压(即温度未达到与压力相应的饱和温度)，把 Pauahetka 沸泉区（热储深 270—650 米，温度 150—

1) 胡循森，1978，羊八井地热田浅层热储热流体物理状态及其汽化面的推断分析。

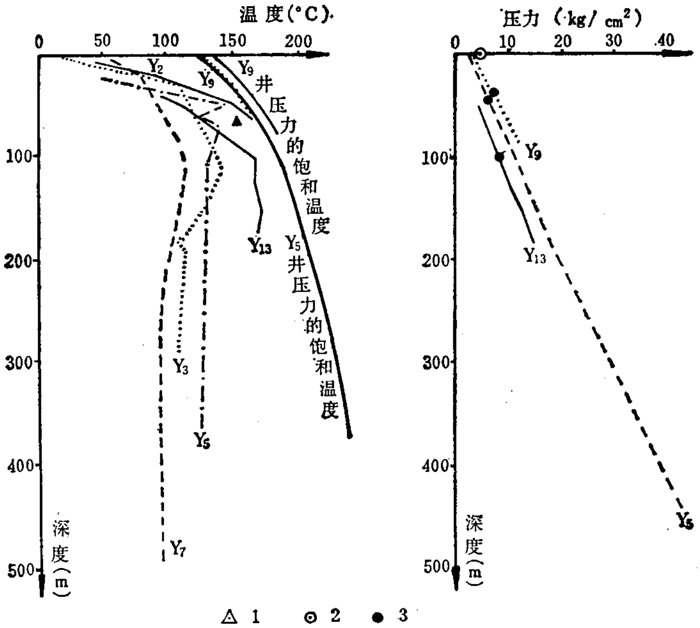

图 1　羊八井热田温度(左)、压力(右)-深度分布曲线

Fig. 1　Graphs of temperature (left) and pressure (right)-depth

1. Y_4 井底温度；　2. Y_2 井口闭井压力；3. 与 T_0 相应的饱和压力点

200℃)地热储视为热水储，水处于单相过冷液态。K. Yunaka 对 Otake 和 Broadlands 热田热储热流体的天然状态有同样看法。据代表天然状态的实测资料(图 1)，我们对羊八井热田归纳出以下几点，并得到类似的结论：

1. 无论是井口有一稳定闭井表压力的井孔，还是井水位低于地表的井孔，井下压力都有一近于常数的速率往下增加(约 11.5 米增加一个大气压)。

2. 纵深 80—180 米以上，地温呈正梯度往下增加，经过热储最高温度之后转为负梯度，然后随深度而慢慢增温。

3. 热储各处静水压力的相应饱和温度比地温都高，这个差数叫做过冷温度(图 1 给出了过冷度最小的代表)。

由上可见，如果忽略重量比小于 0.095% 的不凝结气体，那么天然的羊八井热田热流体处于过冷态，即呈单相液态热水，过冷温度在 5℃以上。照此观点，闭井井口稳定表压力就是高出地表的自流水头所至，属于这种情况的井称为自喷井(启开井口阀门，井便自动喷发)；而另一种井，所处地势较高，热储承压静水位低于地表，如 Y_{13}、Y_{14}、Y_{20} 和 OT[1] 等井孔，即假想它们的井口表压力为负值罢了，这种井称为引喷井(人工抽汲井水，井方能喷发)。

三、井内热流体相变过程及描述方程(图 2)

当启开自喷井阀门或抽汲引喷井水时，过冷态热水由热储供给，并沿井筒上流。上述

过程都同是减压过程。当减压点到达这样一个高度，即该点压力恰好等于热储最高温度相应的饱和压力时，过冷水变成饱和水，并在该深度开始沸腾，形成汽化面，我们称此深度为井内开始汽化面深度。流体继续上升，压力继续下降，减压过程形成井管里的继续汽化过程；同时汽化面下移，至到一个相对稳定的平衡位置。显然，汽化面以下至热储里属单相热水运动；其上为水、汽两相流动，并且蒸汽膨胀，带水混合冲出，形成井喷。作出绝热假设之后，得动态平衡时的基本方程如下：

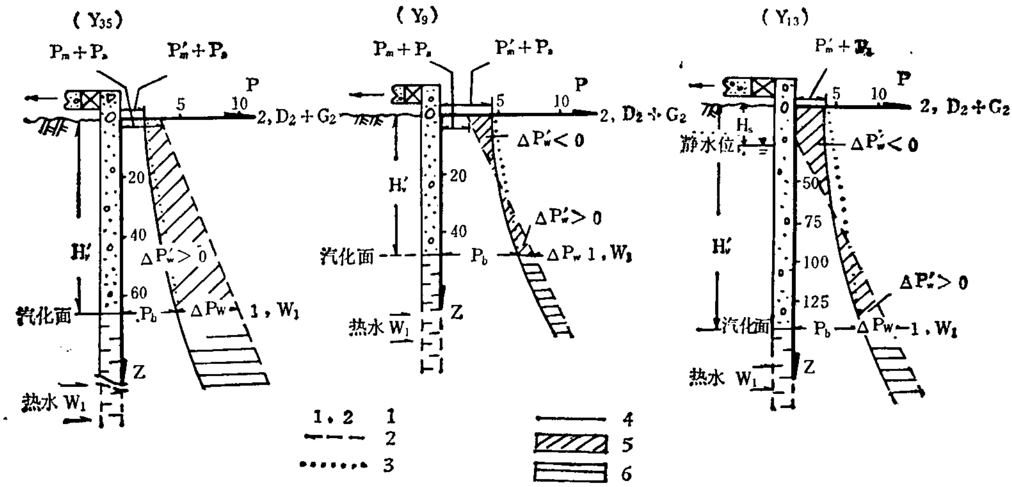

图 2　井下压力分布示意图*

Fig. 2　Pressure distribution in wellbores

1.断面脚标；2.天然状态压力-深度分布；3.工作状态压力-深度分布(近似)；4.工作状态压力-深度分布(真实)；5.汽化面以上井管段压力降；6.汽化面以下热储压力降；

* 文中有关计算公式符号的含义见符号说明表(附文后)。

流量连续方程：

$$W_1 = D_2 + G_2 \tag{1}$$

焓连续方程：

$$W_1 \cdot i_1' = D_2 \cdot i_2' + G_2 \cdot i_2'' \tag{2}$$

井管两相流动运动方程及边界条件：

$$\frac{dP}{dz} + \gamma + \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot W^2}{2 \cdot d \cdot g} + \frac{\gamma \cdot W}{g} \frac{dW}{dz} = 0 \tag{3-1}$$

$$Z = 0, \quad W = -W_2, \quad P = -(P_m' + P_a) \tag{3-2}$$

$$Z = H_v', \quad W = -W_1, \quad P = -P_b \tag{3-3}$$

四、井内汽化面深度、井内压力降分布、井下热储压力降、井口最大极限工作压力计算方法及热储地层渗透性估算

(一)汽化面深度

分离 (3-1) 式变量,对边界条件写出定积分:

$$\int_{-P_m'-P_a}^{-P_b} dP + \int_0^{H_v'} \gamma\, dz + \frac{\lambda}{2\cdot d\cdot g}\int_0^{H_v'} \gamma\cdot W^2\, dz + \frac{1}{g}\int_{-W_2}^{-W_1} \gamma\cdot W dW = 0 \tag{4}$$

此积分方程具有明确的物理意义：热水沸腾压力 P_b 被抵销在井口工作压力 (P'_m+P_a)、混合物柱压力(第二项)、沿程阻力(第三项)以及加速流动阻力(第四项)上。此外,井口弯头闸门等还有一个局部阻力,它也参与抵销作用。这样,从汽化面到井口的两相流动完整描述式便是:

$$\int_{-P_m'-P_a}^{-P_b} dP + \int_0^{H_v'} \gamma\, dz + \frac{\lambda}{2\cdot d\cdot g}\int_0^{H_v'} \gamma\cdot W^2\, dz + \frac{1}{g}\int_{-W_2}^{-W_1} \gamma\cdot W\, dW + \xi\frac{\gamma_2\cdot W_2^2}{2\cdot g} = 0 \tag{5}$$

式中 γ 和 W 均随高度而变化,因而也随该高度的饱和压而变化,并且水、汽互相转化,这就使得直接积分相当困难。引用流体力学里的实验分析理论[4],可作以下简化：为柱压项、沿程阻力项、加速阻力项中的流体重量部分 $(\gamma\cdot W)$ 以及局部阻力项分别引入各自的"混合物平均流量比重"——$[\bar{\Phi}\cdot\bar{\gamma}''+(1-\bar{\Phi})\bar{\gamma}']$、$\left[\bar{\gamma}'\left(1+\bar{\chi}\left(\frac{\bar{\gamma}'}{\bar{\gamma}''}-1\right)\right)\right]$、$\left[\bar{\gamma}'\left(1-\frac{\bar{\gamma}''}{\bar{\gamma}'}\right)\right]$、$\left[\bar{\gamma}'\left(1+\frac{W_2''}{W_1}\left(1-\frac{\bar{\gamma}''}{\bar{\gamma}'}\right)\right)\right]$ 之后,混合物流速可用总量为水的流速 W_1 (称水折算流速)来代替。同时,加速阻力项中余下对蒸汽折算流速的积分 $\int_{-W_2''}^{-W_1''} dW$。这样,平均常数项可提出积分号,(5)式可积,并解得动态平衡汽化面深度:

$$H_v' = (P_b - P_m' - P_a - P_c - P_z)\frac{1}{\gamma_a+\gamma_b}\cdot 10^4 \tag{6-1}$$

式中:

$$P_c = \frac{\bar{\gamma}'\cdot W_1^2}{g}\left[\left(1-\frac{\bar{\gamma}''}{\bar{\gamma}'}\right)\frac{W_2''-W_1}{W_1}\right]\cdot 10^{-4} \tag{6-2}$$

$$P_z = \xi\cdot\frac{\bar{\gamma}'\cdot W_1^2}{2\cdot g}\left[1+\frac{W_2''}{W_1}\left(1-\frac{\bar{\gamma}''}{\bar{\gamma}'}\right)\right]\cdot 10^{-4} \tag{6-3}$$

$$\gamma_a = \bar{\Phi}\cdot\bar{\gamma}''+(1-\bar{\Phi})\bar{\gamma}' \tag{6-4}$$

$$\gamma_b = \Psi\cdot\frac{\lambda\cdot W_1^2}{2\cdot d\cdot g}\cdot\bar{\gamma}'\left[1+\bar{\chi}\left(\frac{\bar{\gamma}'}{\bar{\gamma}''}-1\right)\right] \tag{6-5}$$

使用参数说明以下:

1. 在对流传热占绝对优势的热储里,汽化面饱和压 (P_b) 由井下热储最高温度 (T_0) 相应。T_0 一般从井静止状态时实测。但考虑到偶然误差,或井下冷水或更热水的可能入侵,有必要通过井口流量、温度和混合物干度等测量,对 T_0 进行验证。基于(1)、(2)两式,并使用 200℃ 以下水的焓值近似等于温度值条件,这里推荐二个校验公式(限于篇幅,推导从略):

$$T_0 = \frac{D_2\cdot i_2' + G_2\cdot i_2''}{W_1} - (x_{nona} - x_a)\cdot h_2 \tag{7}$$

或

$$T_0 = \frac{D_2 \cdot i_2' + G_2 \cdot i_2''}{W_1} \tag{8}$$

以上(7)式中：x_{nona} 为非绝热井口实测混合物干度；$x_a = (i_1' - i_2')/h_2$ 为井口计算混合物干度(目前试井测流所使用的端压临介流法中的干度便是如此算得)。(7)式适于大埋深热储；对于浅埋热储，$x_{nona} \approx x_a$，(8)式便能满足要求。

2. 真实含汽量 φ 跟水折算流速、蒸汽折算流速以及混合平均流速有关，以汽化面至井口的平均条件计算便是：

$$\bar{\varphi} = \beta \cdot c \tag{9-1}$$

$$\overline{W} = W_1 + \overline{W}''\left(1 - \frac{\bar{\gamma}''}{\bar{\gamma}'}\right) \tag{9-2}$$

$$\beta = \overline{W}''/\overline{W} \tag{9-3}$$

$$W_1 = \frac{0.3573 \cdot W_1}{\bar{\gamma}' \cdot d^2} \tag{9-4}$$

$$\overline{W}'' = \frac{0.1768 \cdot G_2}{\bar{\gamma}'' \cdot d^2} \tag{9-5}$$

其中 c 值由 β 值和 $(P_m' + P_a + P_b)/2$ 值查表确定[5]。

3. 沿程阻力系数按阻力平方区：

$$\lambda = \frac{1}{4\left[\lg\left(3.7\frac{d}{\Delta}\right)\right]^2} \tag{10}$$

式中 Δ 是绝对粗糙度，视地热井结垢程度而取，实例计算中 $\Delta = 1.5mm$。也是出于同样考虑，局部阻力系数 ξ 取 0.3。

4. Ψ 是压力修正系数[5]，这里流动压力小于 60 个大气压，$\Psi = 1$。

一经选定上述 λ、ξ、Ψ 诸值，以及 T_0、P_b、P_m'、W_1、D_2、G_2、x 经实测或计算之后，按井口一汽化面间的饱和压力和温度平均值查水和水蒸汽热力学性质表可得 $\bar{\gamma}'$ 和 $\bar{\gamma}''$，然后用 d 计出 W_1、$\overline{W}''$、W_2''、$\overline{W}$ 和 $\bar{\varphi}$ 各值。最终便从(6-1)—(6-5)式解算出动态平衡汽化面深度 H_v'，同时获得近似的压力-深度线性分布(图 2)。也可以在 P_m' 与 P_b 之间分段计算，得较真实的压力-深度分布曲线和 H_v' 值。考虑到当前某些参数的粗略，本文暂以近似的来代替。表 1 列出了实例计算的原始数据和结果。

若井处于稳定闭井状态，即井内热流体呈单相液态热水，则(6-1)—(6-5)式中 P_m'变为 P_s，同时 x、φ、W_1、W'' 均为零，且 $\gamma_a = \bar{\gamma}'$，那么，得到的便是井下开始汽化面深度：

$$H_v = [P_b - (P_s + P_a)]\frac{1}{\bar{\gamma}'} \cdot 10^4 \tag{11-1}$$

当上式中小括号项为正值，代表引喷井，此时有：

$$P_s = -H_s \cdot \bar{\gamma}' \cdot 10^{-4}, \text{ 且 } |P_s| > P_a \tag{11-2}$$

这时，利用 $\bar{v}'$ 与 $\bar{\gamma}'$ 的关系，(11-1)式变为：

$$H_v = (P_b - P_a)\bar{v}' \cdot 10^4 + H_s \tag{11-3}$$

当(11-1)式中小括号项为负值，代表自喷井，此时有：

$$P_s = P_m \qquad (P_m > 0) \tag{11-4}$$

这时，按前面提到的数据来考虑不凝结气体，用 $P\text{-}V\text{-}T$ 关系换算到井下平均条件，占井下井管长度 H_a，因而(11-1)式又可写成：

$$H_v = [P_b - (P_m + P_a)]\,\frac{1}{\bar{\gamma}'}\cdot 10^4 + H_a \tag{11-5}$$

对畅口而且热水缓慢自溢，然后自喷的井孔，其开始汽化面深度显然是：

$$H_v = (P_b - P_a)\bar{v}'\cdot 10^4 \tag{11-6}$$

以上式中 $\bar{v}'$ 或 $\bar{\gamma}'$ 取值方法见符号说明表。这种取值方法易于使我们明白这样一个事实：静止状态井的压力-深度曲线上，压力等于热储最高温度相应的饱和压这一深度位置点就是汽化面开始点（图 1)。

据 N. D. 登奇[6]，井下碳酸钙结垢部位指示着汽化面位置。羊八井热田的井孔结这种垢比较严重。实践证明，结垢所在位置深度和我们的 H_v 和 H_v' 计算值十分吻合。

（二）工作井井下压力降分布、井下热储压力降和最大极限工作压力

据静水力学，从图 2 可以清楚地看出静态井下静水压力分布：

$$P_{zs} = P_s + P_a + Z\cdot\bar{\gamma}'\cdot 10^{-4} \tag{12-1}$$

和工作井动态平衡时的压力分布：

$$P_d = \begin{cases} P_m' + P_a + (P_b - P_m' - P_a)\,\dfrac{Z}{H_v'} & 0\text{或 } H_s \leqslant Z \leqslant H_v' \quad (12\text{-}2) \\[2ex] P_b + \left[(Z - H_v')\cdot\left(\bar{\gamma}' + \dfrac{\lambda\cdot W_1^2\cdot\bar{\gamma}_d'}{2\cdot d\cdot g}\right)\right]\cdot 10^{-4} & Z \geqslant H_v' \quad (12\text{-}3) \end{cases}$$

末式中的 $(Z - H_v')\dfrac{\lambda\cdot W_1^2\cdot\bar{\gamma}_d'}{2\cdot d\cdot g}$（其中 $\bar{\gamma}_d'$ 为汽化面以下热水平均比重）表示热水从深部沿井管流至汽化面的沿程阻力。计算表明它比 P_c 还要小，可略。这样，(12-3)式便有：

$$P_d = P_b + (Z - H_v')\bar{\gamma}'\cdot 10^{-4} \qquad Z \geqslant H_v' \tag{12-3a}$$

从(12-1)减去(12-2)，并把(6-1)式代入，得工作井汽化面以上井段的压力降分布：

$$\Delta P_W' = P_s - P_m' + \left[\bar{\gamma}' - \frac{(P_b - P_m' - P_a)\cdot(\gamma_a + \gamma_b)}{P_b - P_m' - P_a - P_c - P_z}\right] Z\cdot 10^{-4} \tag{13-1}$$

略去较小项 P_c 和 P_z，得：

$$\Delta P_W' = P_s - P_m' + (1 - n)\bar{\gamma}'\cdot Z\cdot 10^{-4} \tag{13-2}$$

其中：$n = (\gamma_a + \gamma_b)/\bar{\gamma}'$　　(13-3)

显然，按 P_s 定义，并通过使用(11-2)和(11-4)两式，本文有关 P_s 的各个公式均可分别对引喷井和自喷井进行计算。

有意思的是，由(13-1)或(13-2)式所表示的汽化面以上井段压力降，沿井段上下并非常数，数值上可为正、负以及零（图 2)。这取决于 P_b、P_m' 和 P_s 的对比关系。负值部位表示这里的压力较之静止状态的增大了；正值的表示这里的压力较之静止状态的下降了。也就是说，只有在井下某一点深度以下才产生压力降。读者不难令（13-2）式中的 $\Delta P_W'$ 为零得该点深度计算式。另外，只有在汽化面以下，井下热储压力降（ΔP_W，见后）才近似于常数。这一点，对于用 $\Delta P_W'$ 来作储层渗透性方面的计算来讲，是要特别地给予

注意的。对浅埋热储，建议按(13-2)式计得热储代表深度(比方说热储平均深度)的$\Delta P'_W$，然后作储层渗透性计算。同时要注意汽化面是否下降到热储最高温度点以下：否，则本方法是精确的;是，则本方法是近似的。对深埋热储，可令(13-1)式中的 $Z = H'_v$，或从(12-1)减去(12-3a)式，并把(6-1)式代入，便得井下热储压力降：

$$\Delta P_W = P_s + \left(\frac{1}{n} - 1\right)(P_b - P_a) - \frac{1}{n}(P'_m + P_c + P_z) \tag{14-1}$$

结合(6-1)和(11-1)式，井下热储压力降就是开始汽化面和动态平衡汽化面深度之间的水柱(其平均压力水重度为 $\bar{\gamma}_c$)压力：

$$\Delta P_W = \bar{\gamma}'_c(H'_v - H_v)\cdot 10^{-4} \tag{14-2}$$

因为 $H'_v > H_v$，所以 ΔP_W 恒大于零，即工作井井下热储产生了一个压力降-热储流体向井滚动的驱动势。

若工作井井口阀门启开程度变大，则工作压力变小，混合物干度变大，喷出总量也跟着增大。这个增大的总量，由汽化面下移，提高热储流体向井流动的驱动势而增加的进水量来补偿。而汽化面下移的多寡，又取决于其上的两相流动，即由(6-1)式来确定。也就是说，热储一井管一孔口间热流体的热、水动力过程是整个地协调一致的。相反，当井口节流，整个流动情况向相反方向变化，汽化面上移。这时由(14-1)或(14-2)式表达的井下热储压力降就减少，以至为零。一旦井下热储压力降为零，热储里的热流体便丧失了向井流动的驱动势，从而停止向井流动，即 $W_1 = 0$。我们把 ΔP_W 为零时的井口工作压力称为极限最大工作压力 $P'_{\max}$。为此，近似地令(14-1)式中的 $\Delta P_W = 0$，并略去较小项 P_c 和 P_z，便得到这个对热储工程很重要的工作井井口运行压力参数(表压)：

$$P'_{\max} = n\cdot P_s + (1-n)\cdot(P_b - P_a) \tag{15}$$

由于 n 中的 γ_a 和 γ_b 均与 $P'_{\max}$ 有关，所以 $P'_{\max}$ 只能实测(作者曾观察到 Y_2 井的这个值约为4.4kg/cm²)，或逐次试算，或按已有较大井口工作压力的有关参数估计。表 1 列出的 $P'_{\max}$ 值就是用最后一种方法计出的，并仅作大约值供热储工程井孔运行参考。此值虽然稍有偏低，却有一定的安全系数。增大井口工作压力，故然能使汽化面上移，以利于除垢或实行孔外压力水输送，但井口工作压力的这种调整，必定要受到最大极限工作压力的限制。超越这个限度，井孔就要停喷。一旦发生这种情况，要恢复井喷，对自喷井只须重新启大阀门;对引喷井就得再行引喷。这对于连接汽机的负荷井孔来讲，切忌!

略去热储压力降(14—1)式中较小项 P_c 和 P_z，然后加上、减去 P'_m，重新安排，得：

$$\Delta P_W = P_s - P'_m + \left(\frac{1}{n} - 1\right)\cdot(P_b - P'_m - P_a) \tag{16}$$

这样，(16)与(13-2)式有相似形式。和(15)式一样，它们包括了两大部分：一是井口静止压力 P_s，与压力水有关;二是井口工作压力 P'_m 和热储最高温度饱和压 P_b，与蒸汽有关。这两部分在汽化面以上井段压力降分布、井下热储压力降和井口最大极限工作压力中占有不同比例。从 $n-x$ 非单调变化(图 3)看出：当 x 小于某数(约为 0.1)，n 随 x 变大而急剧变小，流动性质向蒸汽流动方向发展;相反，当 φ、$x\to 0$，$\gamma_b\to 0$，$\gamma_a\to\bar{\gamma}'$，$n\to 1$。当 $n=1$，(13-2)与(14-1)或(16)式就统一成一个形式：

$$\Delta P_W = P_S - P'_m \tag{17}$$

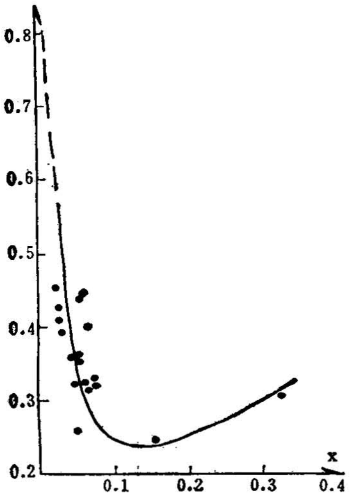

图 3　n-χ 关系图

Fig. 3　Graph of n-χ

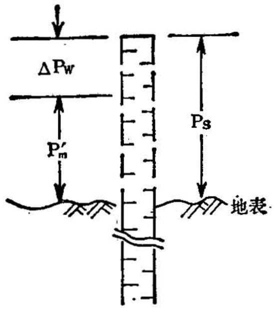

图 4　压力水井口 $\Delta P'_W$、P_m、P_s 关系图

Fig. 4　$\Delta P_W - P'_m - P_s$ rerationship at wellhead for pressurization water

同时，(15)式也变成：

$$P'_{\max} = P_s \tag{18}$$

(17)式说明，井口工作压力相当于工作井剩余自流水头高度；压力降自然是静止水头与工作水头之差(图 4)。图中只给出自喷井的情况，对引喷井，只是相当于地面抬高罢了。从(18)式显见，井口最大极限工作压力理所当然地等于最大自流水头高度。所以，这里的压力降和最大极限工作压力比一般冷水水文地质学上的意义更具一般性。

（三）热储地层渗透性估算

使用前面给出的 ΔP_w 和 W_1 值，以及表 1 中有关的参数，便可估算热储地层的渗透性 km 和 k 值。根据实例中井孔的结构，井孔揭穿透水地层的程度，以及过滤器的位置等具体条件，这里选用稳定态赞加公式和承压完整井公式：

$$k = \frac{2.4 \cdot W_1}{c_s \cdot r_0 \cdot \Delta P_W} \tag{19}$$

$$km = \frac{2.6352 \cdot W_1}{\Delta P_W} \tag{20}$$

其中：c_s 值可按 l/r_0 值查表获得[7]；(20) 式中的影响半径取采汽管内半径的 10^3 倍[2]，以便对比计算结果。表 1 给出了尽可能多变的实例。这些变化在热力学上是合理的，在水文地质学上是敏感的(见下节)，然而工程实用上是允许的。

五、参数相对变化对 H'_v、ΔP_w 和渗透性的影响

为达本节目的，作 H'_v、ΔP_W 和 km 值对单参数因素的敏感性分析。做法是计算它们的值随某一参数因素百分数增加所发生的百分数改变。这些参数因素有 T_0、W_1、P'_m、H_s 或 P_m、x、λ 和 d 七个(图 5)。由图可见，沸腾温度 T_0 的变化影响最甚，井口工作压力

表 1 羊八井热田有关计算实例

Table 1 Calculation examples

孔号 孔深			Y_2	Y_{4-1}	Y_{4-2}	Y_{4-3}	Y_5	Y_6	Y_8	Y_{9-1}	Y_{9-2}
	Z	m	72.18	68.42	68.42	68.42	457.28	354.70	213.55	87.25	87.25
过滤器深度	l	m	>68.0	$\frac{53.4}{68.4}$	$\frac{53.4}{68.4}$	$\frac{53.4}{68.4}$	>255	>236	$\frac{79}{178}$	>66	>66
热储最高温度	T_0'	℃	165.0	153.0	153.0	** 158.0	156.5	160.0	160.0	160.6	160.6
沸腾饱和压	P_b	kg/cm²	7.15	5.26	5.26	5.99	5.76	6.30	6.30	6.40	64.0
闭井孔口压力	P_m+P_a	kg/cm²	3.85	3.30	3.30	3.30	2.00	2.50	2.40	2.40	2.40
静水头埋深	H_s	m									
孔口工作压力	$P_m'+P_a$	kg/cm²	2.80	2.70	3.10	3.10	2.50	3.50	2.90	4.62	3.00
采汽管直径	d	m	0.099	0.21	*** 0.16	0.21	0.21	0.24	0.24	0.31	0.31
水汽总流量	W_t	T/H	29.20	95.00	70.00	142.00	110.00	109.70	80.66	? 176.00	400.00
蒸汽流量	G	T/H	1.90	6.80	2.60	6.45	6.50	4.83	4.52	4.60	22.12
测流处干度	x		0.065	0.072	0.037	0.045	0.059	0.044	0.056	0.026	0.055
与 P_s 相应热水比重	$\bar{\gamma}'$	kg/m³	951.20	958.50	958.50	955.11	955.11	955.11	955.11	955.11	955.11
与 P_b 相应热水比重	γ_b'	kg/m³	902.45	914.16	914.16	914.16	912.83	908.68	908.68	906.78	909.84
与 P_m' 相应热水比重	γ_m'	kg/m³	934.32	935.37	931.36	931.36	937.56	927.73	933.36	918.18	932.31
与 P_b 相应蒸汽比重	γ_b''	kg/m³	2.743	2.746	2.746	2.746	3.010	3.329	3.209	3.307	3.307
与 P_m' 相应蒸汽比重	γ_m''	kg/m³	1.469	1.672	1.672	1.672	1.367	1.873	1.570	2.422	1.621
蒸汽平均折算速度	$\bar{W}''$	m/s	13.21	12.93	7.43	11.73	11.91	5.31	5.81	2.94	16.52
总量为水流速	W_t	m/s	1.15	0.83	0.96	1.23	0.95	0.73	0.54	0.71	1.60
混合物平均流速	$\bar{W}$	m/s	14.32	13.72	8.37	12.93	12.83	6.03	6.30	3.64	18.07
沿程阻力系数	λ		0.044	0.035	0.035	0.035	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
平均真实含汽量	$\bar{\varphi}$		0.70	0.76	0.66	0.68	0.73	0.67	0.70	0.61	0.69
	P_b-(*)	kg/cm²	4.000	2.327	2.000	2.586	3.020	2.720	3.330	1.743	2.980
	γ_a	kg/m³	277.25	223.55	315.20	296.79	298.63	304.24	277.93	357.74	290.43
	γ_b	kg/m³	361.10	90.66	105.22	127.40	82.32	27.65	20.43	11.77	134.70
加速流动阻力	P_c	kg/cm²	0.300	0.200	0.136	0.261	0.210	0.071	0.060	0.030	0.360
局部流动阻力	P_z	kg/cm²	0.050	0.030	0.022	0.043	0.033	0.012	0.010	0.007	0.061
开始汽化面深度	H_v	m	**** 39	**** 26	**** 25	**** 31	**** 44	**** 43	41	42	42
动态汽化面深度	H_v'	m	63	75	48	61	80	82	112	47	70
井下热储压降	ΔP_w	kg/cm²	2.79	4.99	2.60	3.13	3.81	4.03	6.80	0.51	2.70
孔口工作极限压力	P_{max}	kg/cm²	4.3	4.0		4.3	3.8	4.3	4.6	4.3	
储层导水系数	km	m²/D					76	72	31		
储层渗透系数	k	m/D	5	3	4	6				31	14

注：*=($P_m+P_a+P_c+P_z$)；** 用(7)式计算的 T_0 值；*** 考虑了结垢的孔径；****其中 $H_a=3$—4 米；

Y_{10}	Y_{13}	Y_{14-1}	Y_{14-2}	Y_{18}	Y_{20-1}	Y_{20-2}	Y_{23}	Y_{35}	Y_{36}	OT_3	OT_9
81.82	206.54	458.38	458.38	156.93	336.27	336.27	155.40	551.50	225.20	500.0	540.0
>71	>126	$\frac{142}{294}$	$\frac{142}{294}$		$\frac{102}{247}$	$\frac{102}{247}$	$\frac{63}{150}$				
157.0	171.0	172.0	172.0	161.0	165.0	165.0	161.0	147.0	150.0	** 180.0	200.4
5.90	8.274	8.475	8.475	6.50	7.146	7.146	6.50	4.50	4.90	10.225	16.00
3.90				2.70			2.50	3.50	2.70		
	25.30	42.64	42.64		24.60	24.60				110	120
4.70	3.80	3.38	3.72	3.30	3.70	3.52	3.30	2.40	3.70	3.101	3.101
0.24	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.24	0.24	0.203	0.203
164.36	98.00	94.09	85.00	107.73	99.70	112.00	92.87	92.00	113.96	75.60	90.00
3.30	6.00	6.78	.55	5.20	4.99	6.05	4.64	4.00	2.34	10.80	28.80
0.020	0.060	0.072	0.064	0.050	0.050	0.054	0.050	0.043	0.021	0.143	0.320
955.11	958.50	958.50	958.50	955.11	955.11	955.11	958.50	958.50	958.50	935.11	923.75
896.22	896.29	895.09	895.09	906.21	902.12	906.12	906.21	919.54	916.59	886.92	864.15
918.02	925.16	928.59	925.75	929.54	925.93	927.56	929.54	938.70	925.93	931.36	931.36
3.062	4.231	4.330	4.330	3.360	3.697	3.670	3.360	2.37	2.571	4.829	7.930
2.472	2.024	1.823	1.980	1.772	1.974	1.883	1.770	1.315	1.974	1.672	1.672
3.77	3.53	6.76	5.29	6.21	5.39	6.69	5.57	6.67	3.17	13.54	25.50
1.11	0.40	0.63	0.57	0.72	0.67	0.75	0.62	0.61	0.76	0.72	0.86
4.86	3.92	7.44	5.85	6.91	6.05	7.42	6.18	7.27	3.92	14.18	26.22
0.030	0.035	0.030	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.030	0.035
0.58	0.68	0.69	0.69	0.67	0.67	0.68	0.68	0.70	0.60	0.81	0.88
1.110	4.434	5.000	4.690	3.110	3.370	3.520	3.130	2.015	1.150	6.918	12.440
385.45	298.30	278.34	284.41	212.81	303.53	294.68	295.40	280.00	369.85	175.13	110.11
46.65	10.94	32.13	22.74	35.71	28.09	38.34	26.46	31.69	21.90	69.97	178.10
0.080	0.030	0.080	0.054	0.080	0.064	0.090	0.062	0.075	0.040	0.179	0.400
0.010	0.010	0.013	0.010	0.010	0.010	0.020	0.010	0.010	0.010	0.028	0.061
21	105	124	124	40	93	93	42	11	23	208	282
26	143	161	152	125	102	106	97	65	29	282	431
0.46	3.65	3.50	2.68	8.15	0.84	1.24	5.32	5.20	0.61	6.88	13.80
4.40	4.42		4.1	5.0		3.5	4.6	3.6	3.4	4.20	6.86
	71	71	84	35	324	246	46	47	492	30	20
61											

?据野外记录此数有偏差。

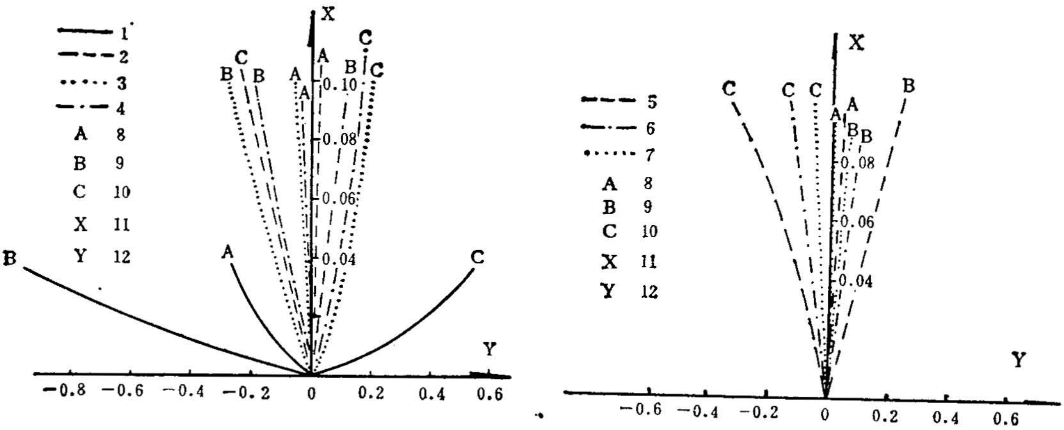

图 5　Y_{14} 井测选参数对 H'_v、ΔP_W 和 km值的影响程度(上、下共七个单因素)

Fig. 5　Effect of the factors on H'_v, ΔP_W and km (the factors totaled 7)

1.热储最高温度；2.水汽总量；3.干度；4.管内直径；5.井口工作压力；6.静止井口压力；7.沿程阻力系数；8.汽化面深度；9.井下热储压力降；10.导水系数；11.参数变化百分数；12.汽化面深度、井下热储压力降、导水系数变化百分数

P'_m、干度 x、孔径 d、水汽总量 W_1、井口静止表压力(例中是 H_s 值)次之，影响最小的是沿程阻力系数 λ。如果水、汽各量为实测，那么 T_0 的影响程度要降低四分之一左右。

六、结　论

综前所述，可作以下几个结论：

1. 天然状态下，拥有单相液态高温热水的地热储是很有代表性的一类热田。热流体从热储流向井孔，沿井管上流，服从减压汽化两相流动规律。应用这一规律，可以从井口测试数据中计得井下以至热储里的温度、压力和地层渗透性等一系列重要结果。

2. 地热流体沿井管上流，沸腾汽化面开始于某一特定位置，然后相对稳定于某一动态平衡深度。汽化面从前者下移到后者，导致井下压力的重新分布。在特定位置以下，井下产生压力降；只有在动态平衡汽化面以下，这种压力降才近似于一个常数(工作井井下储层压力降-热储里的水向井流动的驱动势)。

表 2　岩性结构表

Table 2　Petrophysical structure

孔号	Y_2	Y_4	Y_5	Y_6	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{18}	Y_{20}	Y_{23}	OT_5	OT_9
采汽部位岩性	硅化冰碛细砂砾		蚀变高岭土化冰碛砂砾		蚀变高岭土化粉砂砾	硅化石英砂砾	硅化中粗砂砾	蚀变高岭土化砂砾		蚀变砂砾及裂隙花岗岩	蚀变砂砾	胶结不均细砂砾	裂隙安山岩	

3. 井口工作压力必须低于最大极限工作压力，否则会终止井喷。

4. 渗透性计算结果，数值上落在同类热田文献的中上限，且和它们所在的各自地层岩性结构(表1,2)、层位深度等相符。

5. 热储最高温度是本方法中最重要的测算参数，其次是井口工作压力、水汽流量等。

温度相对测量误差应小于 1—2%，其余应小于 10—15%。

文内 Y_2 孔的汽化面计算原稿以及两相流动方面的知识，曾得到清华大学热能工程系沈幼庭副教授的审阅和热情指导，学部委员张宗祜高级工程师对本文初稿提了宝贵意见，特此感谢。限于作者水平，谬误难免，欢迎指正。

符　号　说　明

A	动态平衡汽化面深度变化百分数	
B	井下热储压力降变化百分数	
C	储层导水系数变化百分数	
d	采汽管内直径	m
D	饱和水重量流量	T/H
G	饱和蒸汽重量流量	T/H
g	重力加速度	m/s^2
H_s	井内静水位埋深(由井口算起)	m
H_v	井内开始汽化面深度(由井口算起)	m
H'_v	工作井内动态平衡汽化面深度(由井口算起)	m
h	汽化热	kK/kg
i	焓	kK/kg
k	储层渗透系数	m/d
km	储层导水系数	m^2/d
l	井下采汽管段长度	m
n	由(13-3)式定义	
P	压力	kg/cm^2
P_a	当地大气压(羊八井为 0.60)	kg/cm^2
P_b	与 T_0 相应的饱和压力	kg/cm^2
P_c	混合物加速流动阻力压力	kg/cm^2
P_d	工作井动态平衡时井段压力分布	kg/cm^2
P_m	闭井井口稳定压力，表压(>0)	kg/cm^2
P'_m	工作井井口压力，表压	kg/cm^2
P'_{max}	工作井井口极限工作压力，表压	kg/cm^2
P_s	静态井口压力，表压。自喷井：$P_s=P_m$；引喷井：$P_s=-\bar{\gamma}'\cdot H_s\cdot 10^{-4}$	kg/cm^2
ΔP_W	工作井井下热储压力降	kg/cm
$\Delta P'_W$	工作井汽化面以上井段压力降分布	kg/cm^2
P_z	局部阻力压力	kg/cm^2
P_{zs}	静态井井下静水压力分布	kg/cm^2
r_0	采汽管内半径	m
T_0	热储最高温度，即沸腾温度	℃
$\bar{v}'$	静止井口温度、绝对压力 (P_s+P_a) 与热储最高温度、饱和压力平均条件下压力水比容，$\bar{v}'=1/\bar{\gamma}'$	m^3/kg
W_t	水汽混合物总重量流量	T/H
W、$\bar{W}$	水汽混合物流速及其在井口至汽化面间平均值	m/s
W''、$\bar{W}''$	蒸汽折算流速及其在井口至汽化面间平均值	m/s
Z	深度座标(向下为下)	m
γ_a、γ_b	分别由(6-4)和(6-5)式定义	kg/m^3
$\bar{\gamma}'$	为 $\bar{v}'$ 的倒数	kg/m^3
$\bar{\gamma}''$	井口至汽化面间饱和汽平均比重	kg/m^3
γ	水汽混合物比重	kg/m^3
χ	干度，即汽占混合物总量的百分数	
λ	混和阻力系数	
ξ	局部阻力系数	
$\bar{\varphi}$	井口至汽化面间平均值实含汽量上、下标注	
$'$	饱和水 (H、P 的除外)	
$''$	饱和蒸汽 (H、P 的除外)	
1	汽化面断面	
2	井口测流断面	

参　考　文　献

[1] Yunaka, K. 1970, Estimation of hydrothermal systems by means of well-head observation. Geothermics——SPECIAL ISSUE 2.

[2] Sugrobov, V. M., 1970, Evaluation of Operational reserves of high temperature water. Geothermics——SPECIAL ISSUE 2.

[3] 哈承佑，1980，羊八井地热田高温热水赋存规律的探讨。水文地质工程地质，第 1 期。

[4] 清华大学电力系，1976，流体力学(第 2 册)。

[5] 清华大学电力系，1975，锅炉(下册)、第 37 页。

[6] N. D. 登奇，1978，井孔测量。地热能。H. C. H. 阿姆斯特德编，科学出版社。

[7] G. P. 克鲁斯曼等，1980，抽水试验资料的分析和评价，俞树森译。地质出版社。

PHYSICAL STATE OF FLUID IN HIGH TEMPERATURE GEOTHERMAL RESERVOIR AND WELL-HYDROTHERMODYNAMIC ANALYSIS AND CALCULATION

Hu Xunsen

(Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Chinese Academy of Geological Sciences)

Abstract

After analysing the physical state of fluid in high temperature geothermal reservoir, a series of more reliable calculation methods, including boiling temperature, interwell depth of starting boiling face, depth of the boiling face in dynamic equilibrium, distribution of the pressure both above and below the boiling face, and maximum working pressure at well-head etc., are proposed in this paper by using the essential theory of two-phase (saturated water and steam) flow rising along a wellbore with reduction of pressure. Calculated results for the geothermal field data in Yangbajing of China and in Otake of Japan are given as examples. Furthermore, estimation of transmissivities and hydraulic conductivities of the reservoir strata has been made on the basis of the results obtained. The effect of a single factor of parameters measured and selected on the calculated results has also been computed and discussed by the so-called sensitive analysis, sorting our the primary parameter from the sensitive analysis, secondaries, and recommending the accuracy of the parameters when measured and selected. Calculated results of the depth of the boiling faces had been proved to be more correct by the deveolpmental practice of geothermal field, thus to the other analyses and calculations giving a more solid foundation.

By thses methods, the pressure depression in the well and the maximum working pressure at well head involve the case of usual pressurization groundwater.