

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

# 西藏羊八井热田井孔喷流模型 与喷流类型

胡循森 郑灼华

(中国地质科学院水文地质工程地质研究所,河北正定)



本文从热田热储流体的内能及井筒水文地质力学条件出发,总结了西藏羊八井热田人工井孔喷流类型,提出适合该热田的孔内高温热水汽化喷流的模型,该模型得到了较好的实例验证。

## 一、热田热储概况,温度、压力和流体动力特征

### 1. 概况

西藏羊八井热田热储基本上可以分为:第四纪沉积物构成的浅层面状热储;较深部位老于第三纪的脉管状热储<sup>[1]</sup>。浅部热储由砾石和粗砂组成,厚度从北往南由 5 m 增至 20 m,其上有 20—30 m 粘性土作盖层,顶板埋深 20—40 m,流体呈孔隙-裂隙渗流。浅部热储的下部是硅化砾岩,热储流体呈脉状裂隙渗流。热田中南部的深处有较低温度的供水层。

### 2. 温度空间分布

热田高温区分布在北部硫磺矿至羊八井的一条弧形条带上,最高温度达 172℃,而且热储往下延伸。温度梯度百米以浅,北部 0.7—0.8℃/m,南部 0.2—0.3℃/m;深度在 100—150 m 范围,北部 0.1—0.2℃/m,南部为零;深度在 150 m 以下,南部梯度为零甚至为负梯度(图 1)。

### 3. 压力空间分布

热储高压区基本上与高温区硅化带分布相吻合。该带两侧压力逐渐下降。井水位海拔最高值 4315 m,最低值 4290 m。热田北部地势较高,热水位于井中地面以下深达 40—50 m (井口表压  $P_m < 0$ );南部相反,热水位均高出地面(井口表压  $P_m > 0$ ),详见图 2。

### 4. 热流体动力特征

热储温度和压力的空间分布,在一定程度上反映了热流体的赋存和运动状态。这不仅与流体的内能有关,而且还取决于热储埋藏条件及流体循环的水文地质等条件。热田盆地内北西向张性断裂和北东向压扭性断裂,为热流体运动提供了良好的空间条件,高温使流体粘度降低,有利于流体运动。大气降水和冰雪融化水沿裂隙渗入地下,在重力场中

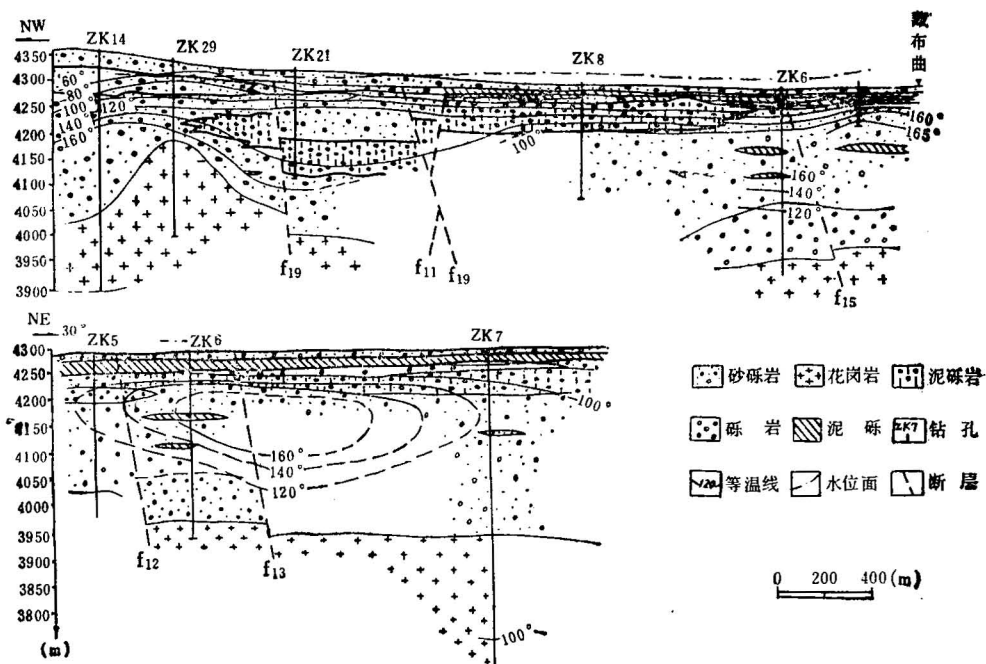


图1 羊八井热田剖面图

Fig. 1 Section of the Yangbajain geothermal field

渗流,经深部热源加热后产生浮力效应,向上升腾。而密度较大的冷水又从侧方裂隙通道源源不断地注入深部,构成了重力水压加浮力的水热对流运动。北部深层热储流体以垂向对流运动为主;中部和南部浅层热储流体以横向渗流为主,且有冷水横向入侵。

## 二、井喷流类型及特征

据现有井喷流记录,按水热地质特征,将喷流类型归纳如表1。

### 三、井喷的必要和充分条件——井喷流模型

上述各种井喷类型,起因于井喷流模型的不同工况条件。

#### 1. 起喷的必要条件

在蒸气及水共存的条件下,汽、水均处于饱和状态,汽水混合物温度即为饱和温度,相应的压力为饱和压力,它们是严格对应的。据此,现提出羊八井热田井下热水开始沸腾汽化面深度,并将井下热水划分为三种状态,即过冷水、临界、喷发状态:

$$P_b - (P_a + P_m + H_v \cdot r_w) \begin{cases} < 0 & \text{不喷或只流过冷水状态} & (1.1) \\ = 0 & \text{临界状态} & (1.2) \\ > 0 & \text{喷发状态} & (1.3) \end{cases}$$

式中符号见附录。当闭井井口表压  $P_m$  为零,即畅口井;  $P_m$  为±值,分别为表1中的 I、II 和 III、IV 类型。只要热水最高温度相应的饱和压力  $P_b =$  当地大气压力  $P_a$ , 即热水具有与当地大气压相当的饱和温度,热水处于饱和和临界状态,就具有沸腾喷发的必要条



表1 羊八井热田井孔喷流类型

Table 1 Gush-flow types in the Yangbajain geothermal field

| 类型           | 特 征                                                                                                | 空间位置                           | 代表孔号                                            |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| I. 畅口自动连续喷流  | 1. 静水位在井口以上 ( $P_m > 0$ );<br>2. 井下供水热储最高温度饱和压力高于高温点以上水柱压力+当地大气压;<br>3. 连续喷发                       | 高温热储层内                         | 羊 <sub>2, 4, 6, 8, 9</sub> 及羊 <sub>3</sub> (浅部) |
| II. 畅口自动间歇喷流 | 1. 静水位在井口以下 ( $P_m > 0$ );<br>2. 井下热储最高温度饱和压力低于高温点以上水柱压力+当地大气压, 井的下部供水层温度较低;<br>3. 水位恢复、水自流——间歇喷流  | 多分布于热田边缘                       | 羊 <sub>7, 22</sub> 及羊 <sub>1</sub> (深部)         |
| III. 抽汲连续喷流  | 1. 水位在井口以下 ( $P_m < 0$ );<br>2. 井下供水热储最高温度饱和压力低于高温点以上水柱压力+当地大气压;<br>3. 人工抽水, 深部热水上升连续喷, 一旦停喷, 再抽再喷 | 1. 热田地势较高部位;<br>2. 井下储层最高温度埋深大 | 羊 <sub>13, 14</sub> 等                           |
| IV. 抽汲天然断喷   | 1. 水位在井口以下 ( $P_m < 0$ );<br>2. 井下供水热储最高温度饱和压力低于高温点以上水柱压力+当地大气压;<br>3. 人工抽汲井水便自流, 自动停喷             | 井筒下低温水层下伏于浅层高温热储               | 预测                                              |

热水从储层进入下部井筒, 沿井筒上流减压汽化, 经受热量为  $q$  的得、失之后, 仍能保持井口喷发的质、能总量。这就是连续稳定喷发的充分条件, 用下面(3)–(5)式描述。

承压储层内热水向完整井稳定流入量<sup>[2]</sup>:

$$W = K_m \cdot \bar{r}' (H'_v - H_v) 10^{-4} / 2.6352 \quad [\text{t/h}] \quad (3)$$

非绝热条件下, 井筒进水点(0)、汽化点(1)和井口(2)三个断面的质能连续方程:

$$W_0 i'_0 + q_{01} = G_1 i'_1 + q_{12} = (G_2 i'_2 + D_2 i''_2) \times 4186 \quad [\text{J/h}] \quad (4)$$

井筒里的热水与井壁的热交换量:

$$q = [\alpha F (t_s - t_w)] \times 4186 \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (5)$$

(3)式中影响半径取井内径的  $10^3$  倍,  $K_m$  是储层导水系数, (4)式中  $i'$  和  $i''$  分别为单位重量饱和水及水蒸汽热焓值, 其余见附录。

井下有较低温热水流入,  $P_b$  下降, 或关小井口阀门, 井口工作压力  $P'_m$  升高, 都会破坏(2.2)式的平衡, 这时会导致汽化面上移, 井下储层压力降变小, 以致终止井喷。对表1中类型I来讲, 如阀门还有一定隙缝, 井筒里流体流动过慢, 以致(4)中的  $q_{12}$  为冷却热量, 使流体温度下降, 从而出现(1.1)式的条件, 只溢流而不喷<sup>[3]</sup>。总之井喷的这种终止, 以蒸气量越来越少、向液态水流方向发展为特征。相反, 当井口阀门启大, 或井下高温水流入,  $P_b$  升高, 汽化面下移, 增大储层压力降, 可使更多的热水流入井中, 并维持更大流量的连续稳定喷发。如汽化面降至储层内, 储层渗透性又很差, 则热储温度虽很高, 也会由于无水流入井中而停歇。不过这种终止以蒸气干度越来越高、向喷汽方向发展为特征<sup>[2]</sup>。

## 四、实例解释——井喷流模型验证

西藏地热队和张之非等<sup>[3]</sup>对羊7井的水位恢复、自流间歇——井喷周期性现象作了详细观测,数据见图3及表2。公认的间歇喷泉三要素为:水室、水源和热源。羊7井的水室就是它的容积约为 $16\text{m}^3$ ,长约600m的井筒,其水源和热源按上述水文地质热力模式作如下分析:

## i. 水源

羊八井热田单井流体喷发量一般为 $100\text{t/h}$ 左右,储层供给井的水量是充沛的。储层 $K_m$ 值的下限为 $40\text{m}^2/\text{d}$ <sup>[2]</sup>,羊7井 $H_p$ 为9.5m(附录第I项)。这样,从(3)式和附录第II项,可以试算获得储层向井的流入量,即井喷的水汽

总量 $W$ 。实测羊7井刚停喷时的水位埋深为45m<sup>[3]</sup>,说明喷发时汽化面稍大于这个数值。通过试算得到的偶合值: $H_p = 50.50\text{m}$ , $W = 59.81\text{t/h}$ ,可见这个储层向井流入量 $W$ 比张之非等<sup>[3]</sup>提供的喷发平均排放量 $37\text{t/h}$ 要大许多,说明喷发间歇并非储层供水不足所致。

表2 羊7井综合表

Table 2 A summary of data of well No. 7

| 岩性    | 热储    | 深度(m) | 井结构   | 温度剖面 | 喷发量                    | 间歇期    | 喷发期   | 井发压力               | 井高温度 | 井水温度 | 单位 |
|-------|-------|-------|-------|------|------------------------|--------|-------|--------------------|------|------|----|
| 粘土砂砾  | 盖层    | 10    |       | 100  | t/h                    | mins   | mins  | kg/cm <sup>2</sup> | °C   | °C   |    |
| 砂砾岩   | 浅层热储  | 45    |       | 110  | ※                      | 13'52" | 2'38" | 60.0               | 111  | 100  | 实测 |
| 砂砾岩   |       | 120   | 9 5/8 | ③    | ※※ 0.60                | 13'50" | 2'47" |                    |      |      | 计算 |
| 凝灰砂砾岩 | 低温供水层 | 270   |       |      | ※ 包括井中水位恢复2'5",溢流1'37" |        |       |                    |      |      |    |
| 砾岩花岗岩 |       | 340   |       |      | ※※ 示文中(3)式计算值          |        |       |                    |      |      |    |
|       |       | 603   |       |      | ① 间歇期开始温度剖面            |        |       |                    |      |      |    |
|       |       |       |       |      | ② 喷前温度剖面               |        |       |                    |      |      |    |
|       |       |       |       |      | ③ 停喷开始时温度剖面            |        |       |                    |      |      |    |

## 2. 热源

在表2的井下结构和热力条件下,供水层砾岩中点深度为309m,低温热水向井流入温度为 $100^\circ\text{C}$ ,沿井筒上升并受浅部热储加热<sup>[3]</sup>在120m处,温度升至 $111^\circ\text{C}$ 。然后继续上升至井口自流, $111^\circ\text{C}$ 的热水在井口以下9.50m处汽化起喷(见附录I)。(喷发)+(水位恢复自流)周期为 $16'30''$ (据80次观测统计结果)<sup>[3]</sup>。按照前述模式,间歇期间水位恢

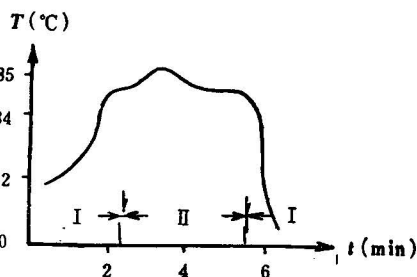


图3 喷流时间周期示意图

Fig. 3 Time-cycle of the gush-flow activity

I. 停歇(井中水位恢复自流)期; II. 水汽喷发期

复自流量  $Q$  所具有的总热量,应等于井下受热增加的热量。此热量按管流放热规律由(5)式乘上加热时间来确定,即:

$$Q \cdot i' = [\alpha F(t_s - t_w) \cdot T] \times 4186 \quad [\text{J}]$$

式中  $T$  是水位恢复 + 自流间歇期;  $\alpha$  为放热系数,在井下定性温度和压力条件下其值为:  $1.7 \times 10^6 [\text{J}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}]^{[4]}$  (见附录 III), 由(6)式得  $T = 13'51''$  (见附录 IV)。计算值与实测值(表 2 第 7 项)相吻合,微小的误差来自复杂的自然条件和计算参数的选取。

喷发延长时间,就是紧贴 120m 以下的低于  $111^\circ\text{C}$  的热水,以流速  $V_0$  上流抵达动态平衡汽化面 50.50m (见附录 II), 使  $P_b$  下降破坏连续喷发条件(2.2)所需的时间。按表 2 第 6 项和井筒长 ( $120 - 50.50 = 69.50\text{m}$ ) 计算,得喷发期为  $2'47''$  (见附录 V)。水位恢复 + 自流量、喷发量以及井下热力数据的不够精确,使计算结果与观测值稍有差别,但差别很小。因此,可以说所提出的水文地质热力模式是很接近实际的。

若井下深部热储层供水温度就是井下最高温度,则不存在低温水受热上升抵达汽化面的问题;而且,造成储层下最高温度到达起喷条件的原因不是自流,而是人工抽汲,这就是所谓的人工引喷连续喷发。当然,这种井喷不会自动停喷。但可预言,类似羊,井这样的井下结构和热力条件、水文地质力学条件,不可能自流,只能由人工抽汲引喷。这就是“人工引喷-天然停歇”地热井喷类型,即人工引喷,自动停喷;再引喷,再自动停喷。

## 结 语

象羊八井这样高温热水型地热田井孔的喷流情况,取决于具体的井下储层的不同水文地质和热力条件,以及井口工作条件。揭露储层温度高于当地大气压饱和温度的井孔,可以表现为连续喷发和间歇喷发。间歇喷发可以是井下水位恢复、自流和喷发相间,也可以是有待观测到的“人工引喷和自动停歇”相间。所提出的地热井喷流模型中的一种喷流类型,得到羊,井的验证;所预测的喷流动态,还有待于今后实践的证实。

## 附录: 羊,井计算实例

### I. 开始汽化面深度 $H_v$ :

井下热水最高温度饱和压力  $P_b = 1.5106 [\text{kg}/\text{cm}^2]$ ;

当地大气压力  $P_a = 0.6000 [\text{kg}/\text{cm}^2]$ ;

开始汽化面以上压力水平均容重  $\gamma'_w = 961.150 [\text{kg}/\text{m}^3]$ ;

$$H_v = \frac{P_b - P_a}{\gamma'_w} \times 10^4 = 9.5\text{m}.$$

### II. 喷发动态平衡汽化面深度 $H'_v$ :

井口喷发压力  $P'_m = 0.6000 [\text{kg}/\text{cm}^2]$ ;

汽水总流量  $W = 60.00 [\text{t}/\text{h}]$ ;

$$\begin{aligned} \text{井口蒸气干度 } \chi &= (i'_1 - i'_2)/(i'_1 - i''_2) = (85.02 - 111.2)/(85.02 - 633.3) \\ &= 0.048; \end{aligned}$$

井口饱和蒸气流量  $D = 2.88 [\text{t}/\text{h}]$ ;

井口饱和水流量  $G = 57.12 [\text{t}/\text{h}]$ ;

汽化面至井口的平均饱和蒸气容重  $\bar{\gamma}_v'' = 0.6048 [\text{kg/m}^3]$ ;

汽化面至井口的平均饱和水容重  $\bar{\gamma}_b' = 959.556 [\text{kg/m}^3]$ ;

井筒断面积  $F = 0.0418 [\text{m}^2]$ ;

平均饱和蒸气折算流速:

$$\bar{V}_D = \frac{1/2 \cdot D_v \cdot 10}{\bar{\gamma}_v'' \cdot F \cdot 36} = \frac{1/2 \times 2.88 \times 10}{0.6048 \times 0.0418 \times 36} = 15.82 [\text{m/s}];$$

总量为水流速:

$$V_G = \frac{W \cdot 10}{\bar{\gamma}_b' \cdot F \cdot 36} = \frac{60 \times 10}{959.556 \times 0.0418 \times 36} = 0.416 [\text{m/s}];$$

总量为混合物平均流速:

$$\begin{aligned} V_h &= V_G + V_D \left(1 - \frac{\bar{\gamma}_b''}{\bar{\gamma}_b'}\right) \\ &= 0.416 + 15.82 \times \left(1 - \frac{0.6048}{959.556}\right) = 16.23 [\text{m/s}]; \end{aligned}$$

$$\beta = V_D / V_h = 15.82 / 16.23 = 0.975;$$

$$C[1, 0.976] = 0.93^{[3]};$$

$$\text{平均真实含汽量 } \bar{\varphi} = \beta \cdot C = 0.975 \times 0.93 = 0.91;$$

$$\text{汽化面柱压 } P_h = (\bar{\gamma}_b'' \times \bar{\varphi} + (1 - \bar{\varphi}) \bar{\gamma}_b') \times H_v \times 10^{-4};$$

$$P_h = 0.6048 \times 0.91 + (1 - 0.91) \times 959.556 = 86.91 \times H_v \times 10^{-4} [\text{kg/cm}^2];$$

沿程阻力压力:

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{\lambda \times V_G^2}{2 \times d \times g} \cdot \bar{\gamma}_b' \left[1 + \bar{x} \left(\frac{\bar{\gamma}_b}{\bar{\gamma}_b''} - 1\right)\right] \times H_v \times 10^{-4} \\ &= \frac{0.042 \times 0.416^2}{2 \times 0.21 \times 9.661} \times 959.556 \times \left[1 + 0.024 \times \left(\frac{959.556}{0.6048} - 1\right)\right] \times H_v \times 10^{-4} \\ &= 67.13 H_v \times 10^{-4} [\text{kg/cm}^2]; \end{aligned}$$

加速流动阻力压力:

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{\bar{\gamma}_b' \times V_G^2}{g} \left[\left(1 - \frac{\bar{\gamma}_b''}{\bar{\gamma}_b'}\right) \left(\frac{2 \times V_h - V_G}{V_G}\right)\right] \\ &= \frac{959.556 \times 0.416^2}{9.661} \times \left[\left(1 - \frac{0.6048}{959.556}\right) \left(\frac{2 \times 16.23 - 0.416}{0.416}\right)\right] \times 10^{-4} \\ &= 0.132 [\text{kg/cm}^2]; \end{aligned}$$

代入(2.2)式,解得:

$$H_v = (1.5106 - 0.6 - 0.132) \times \frac{10^4}{86.91 + 67.13} = 50.50 [\text{m}]_0$$

III. 放热系数:

$$\alpha = \left[B \frac{(\bar{\gamma}_w \cdot V_D)^{0.3}}{d^{0.2}}\right] \times 4186 \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}]$$

式中:  $\bar{\gamma}_w$ ——井下压力热水容重, 相当于平均温度  $105^\circ\text{C}$  和 14 个大气压力条件下, 取  $955.247 [\text{kg/m}^3]$ ;

$V_D$ ——热水水位恢复上移速度,  $45/735 = 0.0612 [\text{m/s}]^{[3]}$ ;

$d$ ——井内径,取 0.20[m];

$B$ ——对水来讲与温度有关,定性温度取 105℃,  $B$  取 11.39<sup>[4]</sup>

代入得:

$$\alpha = \left[ 11.39 \times \frac{(961.150 \times 0.0612)^{0.8}}{0.20^{0.2}} \right] \times 4186 = 1.7 \times 10^6 [\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}]。$$

IV. 水位恢复、自流间歇期:

按(6)式:  $T = Q_i \cdot i / [\alpha F(t_i - t_w)]$

式中:  $Q$  是井中水位恢复、自流期水量为 1936.8[L]<sup>[2]</sup>; (取井内径  $R$  与<sup>[3]</sup>计算稍有出入) 这时热水容重  $\gamma' = 0.956 \text{ kg/L}$ ; 热焓值  $i$  取热水平均温度值,  $105.60 \times 4186 = 4.4 \times 10^5 [\text{J}/\text{kg}]。$

井壁面积  $F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h = 2 \times 3.1416 \times 0.1 \times (111 - 100) = 188.182 [\text{m}^2]。$

按井下结构及热力条件代入得:

$$T = \frac{1936.8 \times 105.6 \times 0.956}{409.215 \times 188.182 \times (111 - 100)} = 13'51''$$

V. 喷发延续期——井下热水以流速  $V_0$  流过  $(120 - 50.50 = 69.50 \text{ m})$  长度所需的时间:

$$T = (120 - 50.50) / 0.416 = 2'47''$$

VI. 刚停喷时的井中水位:

由前面计算, 汽化面至井口间的混合物柱压为  $86.91 \times 50.50 \times 10^{-4} = 0.4389 [\text{kg}/\text{cm}^2]$ , 即相当于  $0.4389 [\text{kg}/\text{cm}^2] \times 10^4 \times 1/959.556 [\text{kg}/\text{m}^2] = 4.6 \text{ m}$  水柱。所以, 观测到停喷时的井中水位深度为 45m, 即  $50 - 4.60 = 45.9 \text{ m}$  的近似值。

## 参 考 文 献

- [1] 中国地质科学院研究报告0056号, 1984, 西藏羊八井地热资源评价。
- [2] 胡循森, 1985, 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。地质学报, 第 59 卷, 第 1 期。
- [3] 张之非、沈敏子, 1982, 羊八井热田的人工间歇井。北京大学学报, 第 4 期。
- [4] 杨世铭, 1958, 传热学。水利电力出版社。
- [5] 清华大学电力系, 1975, 锅炉(下册), 第 37 页。

## GUSH-FLOW MODEL AND TYPES FOR THE BOREHOLES IN THE YANGBAJAIN GEOTHERMAL FIELD, TIBET

Hu Xunsen and Zheng Zhuohua

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

### Abstract

From the point of view of internal energy of geothermal fluid and the hydrogeothermodynamical conditions of the wells a gush-flow model is developed and the gush-flow types in Yangbajain geothermal field are summarized. The gush is caused by the pressure reduction of the arising fluids along the wellbore.

The model involves necessary conditions for starting the boiling, essential conditions for gushing, and sufficient conditions for steady gushing. Such conditions are described by a series of equations concerning the well-flow, on-steaming, gushing, mass-energy continuation, and the heat exchange between the fluid and the wall of the wellbore. The gush-flow types are converted to one another, depending on the thermodynamic, and hydrogeological and working conditions of the geothermal well. The model has been confirmed by various aspects of well No. 7: the water source, heat source, initial boiling point, timecycle of gushing-flowing and the water level at the beginning of the gush interim.

In terms of various gush-flow conditions, the paper predicts a new gush type of thermal well, i.e. artificial withdrawal and auto-interim type. It will be substantiated by further studies.

### 作者简介

胡循森, 生于 1939 年, 1964 年毕业于北京地质学院水文地质工程地质专业, 从事水文地质学、地下水动力学、地下热流体动力学等方面的研究工作, 为中国地质科学院水文地质工程地质研究所, 高级工程师现调至广西北海地质矿产勘察公司工作。