

揭秘地下蒸汽

林化领

知泉必应思其源,如果将泉水、温泉和汽泉三种类型的泉,依次与其相应的来源,按温度由低到高排序,即可得出下列泉与源相对应的组合序列。泉水即地下水;温泉即地下热水;汽泉即地下蒸汽。因此,泉水是地下水的天然露头;温泉是地下热水的天然露头;同样,汽泉是地下蒸汽的天然露头,温度高于相应的地面沸点。

顺理成章,一般泉水和温泉各自的源头,已为人们所熟知共识,耳熟能详。然而汽泉源自地下蒸汽却鲜为人知,或知之甚少,虽然汽泉早在远古时代业已问世,但毕竟汽泉出现为数甚少,据调查,在四川省内仅在甘孜藏族自治州地区出露八处汽泉。又常常在人烟稀少的雪域高原上抛头露面,故很少有人乃至专业技术人员接触它,即便接触到

了也被忽视了,更无从谈及探索汽泉源于地下蒸汽。因此,可以认为,目前地下蒸汽是个盲区。

1982 年,在地处雪域高原的四川省甘孜藏族自治州地区,开展 1:50 万区域水文地质普查工作时,在甘孜县城郊雅砻江河谷谷底左侧高漫滩后缘,以育一条北西向隐伏断层,长 10 公里,宽 200—250 米,为逆断层,倾向北东,在其上盘施工一个水文地质勘探孔,在成井实践过程中惊奇地发现:

1 一孔谱写三部曲

1.1 地下热水定性

首先将钻孔揭露地层岩性统计于次(表 1)。

表 1 地层岩性统计表

地层代号	代号	孔深(米)	岩性	裂隙状态	风化带
第四系全新统 三迭系上统 罗空松多组	Q ₄	0.0—18.73	粉质粘土夹砾石、碎石	隔水层	风化裂隙自上而下强度逐渐减弱趋势。 50 米以下裂隙发育轻微
		18.73—22.54	灰色细粒变质长石石英砂岩	风化裂隙较发育裂壁见铁质氧化物	
		22.54—24.89	浅灰色石英岩脉,坚硬致密	裂隙不发育	
	T _{3LX}	24.89—40.65	灰色细粒变质长石石英砂岩夹板岩、砂岩具带状构造	风化裂隙较发育,裂壁见铁质氧化物	
		40.65—70.92	深灰、浅灰、浅紫灰黄杂色细粒变质长石石英砂岩,局部带状构造	风化裂隙稍发育,裂壁见铁质氧化物,高倾——裂隙中方解石脉有溶蚀现象	
		70.92—74.91	浅灰、浅紫红色变质长石石英砂岩夹少许大理岩、火山岩	岩心完整,裂隙不发育	
		74.91—120.92	灰色、浅灰色变质长石石英砂岩	裂隙多闭合、裂面见黄铁矿膜	

当钻进揭穿第四系松散层后,置入直径 168 毫米的套管护壁,深度为 19.73 米。之后,在继续钻进的过程中,地下热水逐渐突显出来,冲洗液温度升到 30℃—40℃,且有轻微硫化氢气味逸出,同时钻具也被硫化氢腐蚀呈深褐色。钻孔结构为:

孔深 0.00—18.73 米,孔径 170 毫米,合金钻进;孔深 18.73—59.42 米,孔径 130 毫米,钢粒钻进;孔深 59.42—120.92 米,孔径 110 毫米,钢粒钻进;在孔深在 18.73—58.89 米孔段,采用合金肋骨钻头由孔径 130 毫米扩孔孔径为 150 毫米,以适

应抽水试验要求的孔径。

用 BWT12/450 泥浆泵冲洗钻孔,再用空压机洗井。洗井之后,测定静止水位为 1.63 米,水温 58.0℃,孔底温度 80.0℃。抽水设备为空压机,工作管直径 108 毫米,置入孔深 42.06 米,风管下入孔内 38.39 米,测管直径 20 毫米,置入孔内 46.54 米。安装好之后,即进行正式抽水试验,降深三个落程,稳定时间最长为 24 小时,最大降深 16.86 米。

通过抽水试验三次降深,其涌水量与降深,依

次记录如下。

$Q_1 = 1.578$ 升/秒	$S_1 = 6.57$ m
$Q_2 = 2.302$ 升/秒	$S_2 = 11.07$ m
$Q_3 = 3.058$ 升/秒	$S_1 = 16.86$ m

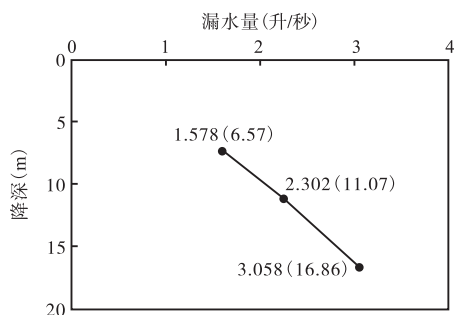


图 1 $Q \sim f(s)$ 曲线图

根据抽水试验成果 $Q \sim f(s)$ 曲线特征, 结合钻孔水文地质条件, 上部第四系粉质粘土夹砾石、碎石层作为隔水顶板, 下部完整基岩为底板, 构成完整层间热水, 故确认地下热水类型属基岩裂隙承压热水, 水头为 17.10 米。

1.2 止水诱发井喷

四川省地震局与单位协商, 欲利用该孔留作地震监测孔, 技术要求选择适当的孔深做永久性止水工作。

在抽水试验结束之后, 接着进行永久性止水准备工作, 首先应选定止水孔段部位。

地层属马尔康地层分区三迭系上统罗空松多组, 岩性为变质长石石英砂岩夹板岩、大理岩、火山岩。

通过岩芯的鉴定描述, 裂隙发育程度的判别, 岩石破碎状态的分析对比, 以及孔内掉块、卡钻、漏水等现象的记录, 认定孔深 50 米以上裂隙较发育, 之下裂隙发育微弱。

在钻进过程中, 孔深 52 米以下冲洗液温度升高为 30—40℃。

据上述情况分析, 永久性止水孔深选定在 52 米为宜。止水孔段确定之后, 按下列五个程序进行永久性止水准备工作。

(1) 按预定长度, 将直径 108 毫米套管接成三合一立根, 立置于井架内, 争取快速下管, 以防海带在高温中烫损, 达不到架桥止水的目的;

(2) 将钻具下入孔底, 用冷水冲洗钻孔, 为降

低孔内温度;

(3) 将优质海带剪去薄裙边, 包缠在止水变径管(直径 108×127×108mm)的海带的护箍上、下两段, 海带包缠长 4.5 米, 其厚度视止水孔段间隙大小而定, 尔后, 将编好的“竖麻辫”捆绑在止水管的海带层外侧, 使麻丝与止水管轴平行(图 2);

(4) 清理孔口及现场, 准备下管工具, 分工明确, 做好快速下管的各项准备;

(5) 快速将孔内钻具提出后, 用 35 分钟把止水管及长 58.04 米、直径 108 毫米套管全部下入孔内, 再用升降机将套管柱吊于孔口。

上述准备工作就绪之后, 采取回填止水法进行止水, 所需材料及程序可归纳为下列五个方面:

(1) 将压箍套在直径 108 毫米的管柱上, 投送滑入孔内, 以利将绑缚在止水管的麻丝受压后散开;

(2) 将重 100 公斤的围填钢粒沿孔壁投入, 压倒麻丝和海带;

(3) 用重 50 公斤的中粒砂土, 并加入少许钢粒投入环形状间隙, 下落到麻丝之上, 作为充填钢粒间隙, 以防渗漏水泥浆;

(4) 灌入纯水泥浆 500 公斤, 采用 500 标号的水泥, 每袋重 50 公斤, 加入清水 18—20 公斤, 搅拌均匀后, 沿孔壁环状间隙注入, 注入时定要掌握速度, 因为过快容易在途中堵塞, 而过慢则会被地下热水稀释;

(5) 围填结束后, 清洗井口, 用夹板将直径 108 毫米止水管柱固定在井口, 二下四小时后, 当孔内水泥还处于初凝阶段, 地下高温热汽(水)即喷出井口, 高达 19.0 米以上, 气势壮观, 景象异常(照片 1)。初喷时温度高达 95℃, 之后稳定为 90.5℃, 孔口涌水量为 172.8 吨/日。

事实证明, 这次永久性止水工艺是成功的, 效果出乎意料, 止水孔段选定也恰到好处。

1.3 制喷两法效应

实践中探索出两种遏制井喷的方法:

(1) 注入冷水——压

(2) 双阀关闭——憋

其效应: 水位反常。

(1) 止水管内水头升高, 高出地面 1.10 米, 自流热水;

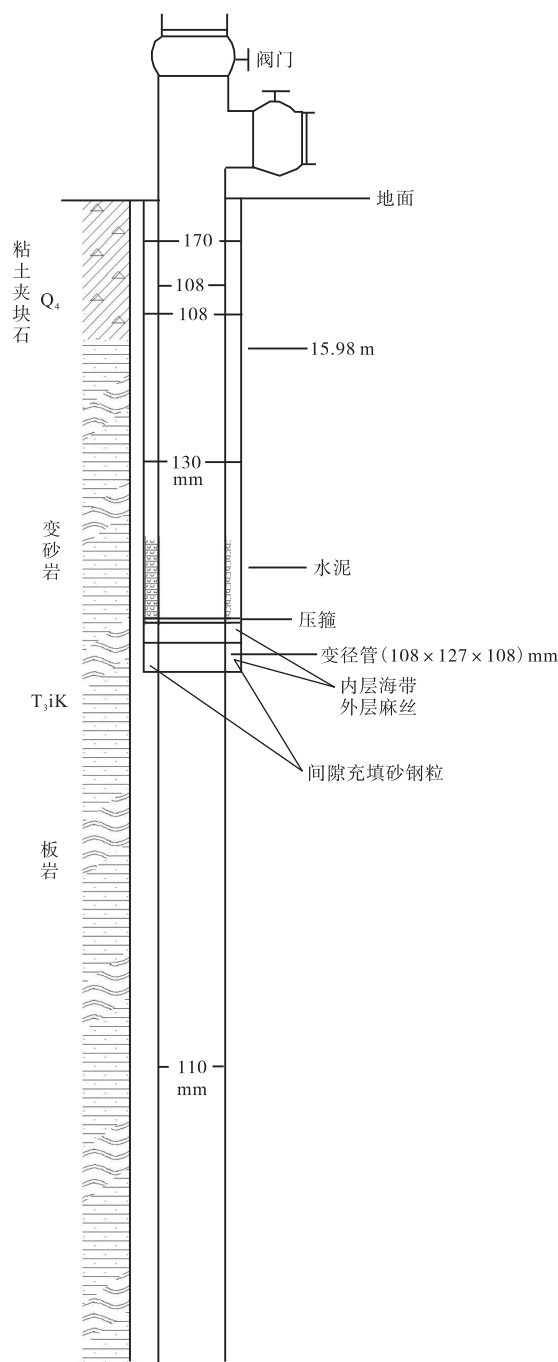


图2 喷井永久性止水结构图

(2) 止水管与护壁管间水头下降 2.64 米, 仍为承压水, 巧合, 水头上升与下降值几乎相等。

下面较详细地介绍在实践过程中探索遏制井喷有效方法, 且及时观察记录止喷有效方法, 观察记录止喷后出现的异常现象。

因高温热汽(水)久喷不衰, 施工人员无法靠近井口, 造成继续施工困难, 经过四天之后, 估计



照片一孔揭开气冲天

孔内水泥浆完全凝固, 孔口需要安装法兰盘、三通和四寸闸门, 为保证施工顺利安全及时进行, 决定开动 BWT450/12 水泵向喷井之中灌入冷水, 目的在于降低井内水温, 以便进行安装, 待三通、闸门全部安装完毕后, 停泵将冷水管抽出井口, 井喷停息。

两天之后, 观测直径 108 毫米止水管内的水头高出地面 1.10 米, 水温为 58℃, 水头呈静止状态, 放水自流量为 0.10 升/秒。又观测直径 168 毫米与直径 108 毫米两管间水头, 由抽水试验恢复水位 1.63 米, 下降到 4.27 米, 水温亦为 58℃。因此, 直径 108 毫米管内水头较原水头高出 2.73 米, 而两管间的水头相对原水头下降 2.64 米, 上升和下降水头几近相等。

停喷后, 通过井内分别对止水管内外地下承压热水水位的测定, 认为注入喷井内的冷水, 则形成“冷水塞”, 将喷发的高温热汽(水)堵压住了。但如何将冷水压抑高温热汽(水)喷井复喷呢? 施工

人员又做下面工作尝试。

将抽水试验时的风管改为胶管,从三通一侧的阀门插入孔内,然后开动空压机抽水,待高温热汽(水)喷出时,即拉出胶管,用阀门控制热汽(水)喷出的方向,试探成功了。

地下高温热汽(水)重新喷出,向上喷出的高度仍为 19.0 米,温度 90℃—91.0℃,井口涌水量仍为 172.8 吨/日,利用两个阀门,将高温热汽(水)喷出方向控制自如。

在了解和掌握高温热汽(水)制喷和引喷方法之后,随之又进行放喷热水和井内静态定深测温工作。

(3)放喷试验

高出地面三个高度,依次测出相应涌水量,分别为:

$H_1 = 1.38$ 米, $Q_1 = 1.818$ 升/秒,稳定时间:25 小时 30 分钟;

$H_2 = 3.14$ 米, $Q_2 = 1.578$ 升/秒,稳定时间:8 小时 30 分钟;

$H_3 = 4.35$ 米, $Q_3 = 1.461$ 升/秒,稳定时间:5 小时;

因此,喷井自地面向上,每增 1.0 米,喷出热量相应减少 0.10 升/秒,依此推算该孔热水静止水头高出地面 16.0 米,与图解高度相吻合(图 3),蒸汽喷出高度为 19.0 米。放喷试验结果表明,其性态与承压水自喷的性态完全吻合。

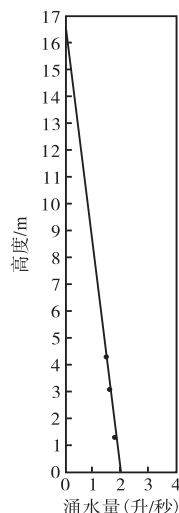


图 3 涌水量随高度增加减少曲线图

(4)井内静态定深测温

井内静态测温工作,自井口向下每间隔 10 米

测一次温度,现将测温结果记录如下。

孔深(m)	温度(℃)
	58
10.0	64
20.0	70
30.0	76
40.0	82
50.0	87
60.0	93
70.0	104
80.0	111
90.0	114
100	113
110	116
120	115
	地面沸点

依观测深度、温度的记录绘制温度随深度增加的曲线图(图 4)。

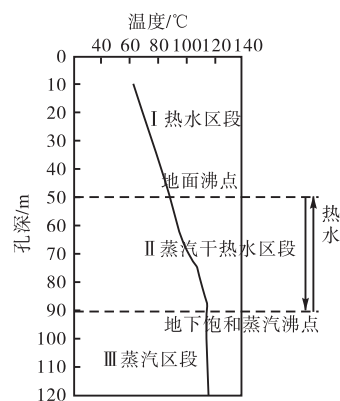


图 4 喷井静态定深测温田线图

在放喷试验和静态测温工作结束之后,又作了两个阀门同时关闭测试,经过十分钟后,再打开阀门,高温热汽(水)又停喷了,井喷被“憋死”了,因此,通过实践,又探索出另一种遏制井喷的方法。

实际上这也是间接性“冷水塞”压服法,因为将正在喷发的高温蒸汽(水)被突然关闭的双阀卡住在井口附近的低温环境中,地下蒸汽开始液化,冷却转化为较低温的热水,将自身的井喷压息。

实践出真知,通过甘孜县城郊,地热水文地质勘探和试验,尤其是永久性止水后的意料不到的井喷效应,彻底改变了地下热水的性态,发生了由液态突变为汽态质的变化,是发生同一口井内,可

以说是个奇迹!

在高温蒸汽(水)井喷后,边尝试边实践,探索出一套制喷和引喷的具体措施和方法。现在在成井的实践过程中,探索且采取的工作方法,以及演

绎出来的地质事件和现象,观测记录的结果,整理归纳如下(表 2)。止水之后,地下热水不仅发生性态突变,而且水质也发生巨大的变化。

表 2 工作名称、效应、定性观察一览表

序号	工作名称	效应	定性	观测记录
1	抽水试验三个落程	Q—f(S) 曲线正线性	基岩裂隙承压热水	抽水水温 70℃,孔底温度为 80℃
2	永久性止水	井喷	地下热汽驱动热水	喷高 19.0 m,温度 90℃—91℃
3	注入冷水	遏制井喷	管内自流热水,管外	管内水头升高出地面 1.10m,两管间
4	安装法兰盘三通	止水管内外水头反常	水头降低,承压热水	水头下降 2.64m,水温均为 58℃,孔内
				静态测温最高 114℃
5	抽水	井喷如故	状如承压自流喷井	推判喷高热水柱为 16.0 m
	放喷试验三个落程	Q—f(H) 曲线负线性		
6	双阀关闭	井喷憋息		

2 破解静态测温曲线

通过上述地热水文地质勘探和试验工作成果,确认地下热水性质具承压性。然而,在实施永久性止水 24 小时后,出其不意地发生井喷事件,从而改写了地下热水的性态,此后又在处理井喷的实践中探索出止喷、复喷的工作方法。

人工干预诱发的井喷事件可首次列入地热领域中一种罕见的“蝶变”现象。经初步研究分析,井喷事件发生绝非偶然,而是必然发生的产物,应从井喷的静态定深测温曲线的解读中获得答案。

2.1 分解测温曲线

首先对图 4 喷井静态定深测温曲线分解,第一段曲线,从热水静止水位 1.63 米,水温 58.0℃,到地面沸点(87.0℃),热水温度随井深的加深而升高,称井深增加与水温升高为正线性关系。

(1) 地面沸点埋深为 50 米。

从地面沸点到饱和蒸汽压沸点(114.0℃)为第二段曲线,温度高于地面沸点,同样伴随井深增加而升温,但升温的曲线有别于第一段曲线。

按该段曲线特点大体可分为上下两段,上半段近似直线,类似第一段曲线延伸部分;下半段曲线相当于抛物线转为渐近线。实际上是第一段曲线向第三段曲线过度段曲线。

第二段曲线温度高于地面沸点,其原因是热水中富含蒸汽成分之故,温度升高表明热水中蒸汽随井深增加而增加,最终达到极至,蒸汽饱和状态即为第三段曲线,即温度持平,稍有波动,曲线为直线且平行于纵轴。

(2) 饱和蒸汽压沸点埋深为 90 米。

2.2 浅谈地下蒸汽形成机理

为了更简约,更清晰,更直观,象征性表述地热层次结构,利于分析,推判地下蒸汽形成环境,故将图 4 曲线图改为倒三角形图(图 5)。

倒三角形表示断层破碎带内裂隙发育程度,上部近地表的一定深度,因受风化作用,构造裂隙势必拓宽,裂隙发育强度相对上部高于下部,相应地下水富水性无疑上部优于下部。

倒三角形两条边,代表断层破碎带热岩与地下水多边接触面,因近地表上部外界低温环境的影响,降低了热岩的温度,故断层破碎带热岩的温度自上而下逐渐升温。

何谓两点三段式?

两点即地面沸点和饱和蒸汽压沸点。三段即由两点分割为三个区段;自上而下依次为热水区段(I)、热水和蒸汽混合区段(II)和饱和蒸汽区段(III),其中热水、蒸汽区段中,热水成分自上而下减少终止为零,相反蒸汽成分自上而下增加。

重点讨论地下蒸汽是如何形成的? 地下蒸汽形成的必要条件,据以前分析,断层破碎带多为高温热岩。以甘孜县城 3 号喷井为例,上部热岩温度为 58℃,下部热岩为 114℃,是上部温度的两倍。

在高温热岩裂隙中赋存地下水,其富水性下部低于上部,无疑将下部的高温热岩裂隙水热化,继而汽化形成地下蒸汽,因此,充分理由确认,断层高温热岩破碎带裂隙赋存地下水是地下蒸汽形成的必要条件。

未完待续