

地热井资源评价技术规程

The technical specification of geothermal well resources evaluation

2022-07-20 发布

2022-08-20 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 2

5 地热井产能测试 2

6 热储水文地质参数计算方法 5

7 地热井资源计算与可靠性评价 8

8 地热资源开发利用评价 11

9 地热资源流体质量评价 11

10 资料整理及报告编写 11

附录 A（规范性） 产能测试原始记录表..... 13

附录 B（规范性） 非稳定流降压试验求参方法..... 17

附录 C（规范性） 地热井资源评价报告编写提纲..... 20

参考文献 22

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定修订。

本文件代替DB12/T 664—2016《地热单（对）井资源评价技术规程》，与DB12/T 664—2016相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 修订了本技术规程名称；
- b) 修订了许可开采量和可开采量的定义，全文件统一为可开采量（见3.10、7.1、7.3，2016年版3.10、7.3）；
- c) 删除了与资源管理、资料管理相关的条款（见2016年版的4.1、10.5、附录A.3）；
- d) 删除了地热井降压试验时，最大降深试验宜按非稳定流方法进行（见2016年版4.7）；
- e) 增加了资料收集要求（见5.1.3）；
- f) 增加了产能测试过程质量控制和设备维护相关要求（见5.2.6）；
- g) 删除了放喷试验的相关内容（见2016年版的5.4）；
- h) 修订了产能测试中水位和流量稳定控制要求（见5.3.7.4和5.4.2.2，2016年版的5.3.7.4）；
- i) 修订了稳定流降压试验观测时间要求（见5.5.2.2，2016年版的5.6.4.2）；
- j) 修订了地热井开采量估算方法（见7.1，2016年版7.1.1、7.1.2、7.1.3）；
- k) 修订了地热井回灌能力评价方法（见7.2，2016年版7.2.3.1、7.2.3.2）；
- l) 删除了两种特殊情况下可回灌量确定方法（见2016年版7.2.4.2）；
- m) 修订了地热资源可靠性评价方法（见7.3，2016年版7.3.5、7.3.6、7.3.6.1）；
- n) 增加了特殊条件下地热井可开采量和保护范围评价方法（见7.3.6）；
- o) 增加了开采动态预测相关要求（见7.4）；
- p) 删除了50年开采期内热储层的可采能量计算（见2016年版7.3.7）；
- q) 增加了地热井储量核实报告内容和提纲（见10.3和附录C）；
- r) 修订了产能测试原始记录表（见附录A，2016年版附录B、附录C）。

本文件由天津市规划和自然资源局提出并归口。

本文件起草单位：天津地热勘查开发设计院、天津市规划和自然资源局矿产资源管理处、天津市地质资料馆、天津市浩鸿科技发展有限公司、天津市地热资源开发公司。

本文件主要起草人：林建旺、宗振海、王平、沈健、曾梅香、岳丽燕、刘斐、闫佳贤、李波、李焕青、胡志明。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——2016年首次发布；

——本次为第一次修订。

地热井资源评价技术规程

1 范围

本文件规定了地热井产能测试、水文地质参数计算、可开采量和可回灌量的计算与评价、开发利用评价、报告编写及资料收集的技术要求。

本文件适用于天津地区地热井储量评价、储量核实工作，新建地热井布局应参考执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范

GB 50027 供水水文地质勘察规范

DA/T 41—2008 原始地质资料立卷归档规则

DZ/T 0331—2020 地热资源评价方法及估算规程

NB/T 10097—2018 地热能术语

NB/T 10099—2018 地热回灌技术要求

3 术语和定义

GB/T 11615—2010和NB/T 10097—2018界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

试验降压 trial pumping test

正式降压试验之前，为检查抽水设备及其安装情况，掌握地热井最大出水量而进行的试验。

3.2

温度效应 temperature effect

地热井在抽水期间，尤其是在抽水的初期，井口流体温度随着时间的延续不断升高，而由于水的密度与温度的变化成反比，此时尽管地热井内水位上升或保持不变，但热储压力却下降。

3.3

静水位埋深 depth of static water level

在非开采（或回灌）条件下，某一时刻井筒内具备某一液面温度的静止液面到自然地面的垂直距离。

3.4

热水头埋深 depth of geothermal water head

热储静压力按储层温度换算的地热井承压水头称为热水头，是井筒内流体上下形成统一热力场、隔水顶板之上的热液柱高度。以自然地面为基点到热水头液面之间的距离则为热水头埋深。

3.5

动水位埋深 depth of dynamic water level

在开采（或回灌）条件下，某一时刻井筒内对应某一液面温度和流量的井筒内液面到自然地面的垂直距离。

3.6

降深 drawdown

地热井在井试条件下所产生的热流体水位变化或压力下降值。降压试验的稳定水位降深为稳定动水位埋深与热水头埋深之差。

3.7

单位产量 specific capacity

指地热井在井试时，每米压力降的热流体产量。相当于单位涌水量。

3.8

地热尾水 geothermal tail water

地热流体经换热后，温度降低但水质未受污染的地热原水。

3.9

开采权益保护半径 protection radius of exploitation rights

经地热资源综合评价，圈定的维持地热井在整个正常开采期内，产量与流体温度不会下降的热储范围。

3.10

热影响厚度 heat affected thickness

开采热储中地热流体时，可提供热能补给的热储层厚度及各取水层之间的岩石厚度之和。

3.11

可开采量 exploitable quantity

依据区域热储水位年降幅、合理降深、相邻已有地热井的开采权益保护半径多种因素确定的地热井可开采能力。

4 总则

4.1 地热井资源评价是为地热资源可持续开发利用和政府审批地热矿山开采规模提供较为可靠的数据支撑。

4.2 应测量试验井的井口坐标（采用 2000 国家大地坐标系）和标高、测点至自然地面的距离。

4.3 天津平原地区，地热井静水位埋深、动水位埋深、热水头埋深统一以自然地面为零点进行计算。

4.4 计算开采井热储参数时所用的热水头埋深、动水位埋深均按热储平均温度下的流体密度进行换算，即计算所得参数为热储温度下的渗透系数、导水系数和导压系数。

4.5 评价热储导水性能时，统一用渗透率表征，或明确指出某一温度下的渗透系数（如热储温度）。

4.6 地热井允许开采年限以 50 年计算。

5 地热井产能测试

5.1 准备工作

5.1.1 产能测试前宜进行洗井，疏通热储层，以达到最佳出水能力和回灌效果。

5.1.2 产能测试前宜进行试验降压，确定地热井最大动水位埋深、最大降深和最大出水量，为选择抽水潜水泵型号提供依据。同时可利用试验降压后的水位恢复来初步确定热水头埋深。

5.1.3 资料收集应符合以下要求：

- a) 区域地质、水文地质条件、地热地质条件、矿业权设置、周边地热井及开发利用现状、动态监测等资料；

- b) 地热井钻探施工阶段取得的各项资料,包括但不限于地层划分、井身结构、岩土样分析报告、定向井施工报告、完井报告等。

5.2 一般要求

- 5.2.1 地热井产能测试包括降压试验和回灌试验,通过测试取得热储层压力、产能、温度、单位产量、井流方程和采灌量比及热储层的渗透性等参数。
- 5.2.2 产能测试所采用的设施均应是耐高温防腐蚀材质。
- 5.2.3 试验操作人员应明确各类试验目的、方法,制定详细方案,提示试验过程中可能出现的风险及困难,并提出应对预案。
- 5.2.4 从井口测量水位时,条件具备的宜采用压力式水位计观测水位埋深,并应同步观测对应的液面温度。
- 5.2.5 试验前必须准确测量试验井的静水位埋深及对应的液面温度,观测时间不少于 24h,观测频率为 1 次/h,精度达到 1cm,以掌握水位天然动态变化规律为宜。
- 5.2.6 宜留存现场观测、地热流体取样等照片,并在报告中简单叙述设备和观测仪器型号、精度、量程、测管类型等信息。如进行观测仪器和试验设备维护,应在报告中详细介绍维护过程。
- 5.2.7 降压试验分类应符合以下要求:
 - a) 依据抽水时动水位稳定情况分为稳定流和非稳定流;
 - b) 稳定流降压试验通过不同的稳定流量及所对应的井中热储压力降低值即水位稳定降深,计算热储水文地质参数(渗透系数 K 、导水系数 T 和降压影响半径 R 等)。并通过热储压力变化值与其对应的涌水量关系,推算地热井井流方程,绘制 $Q-f(s_w)$ 曲线;
 - c) 非稳定流降压试验通过热储压力随时间变化过程计算热储水文地质参数(导水系数 T 和弹性释水系数 μ^* 等)。
- 5.2.8 地热流体水化学分析应符合以下要求:
 - a) 地热流体分析样宜在产能测试结束之前采集。对于需要酸化处理的地热井应在酸化前采集流体样;
 - b) 一般流体质量化验为水质全分析,针对特殊利用行业的地热流体,还应有针对性的采集特殊组份样品送检,分析项目和取样按照 GB/T 11615—2010 中 7.7.2 和附录 B 的要求进行。

5.3 降压试验

- 5.3.1 降压试验数据应能确定热储层流体运动方程 $s_w-f(t)$ 和储层渗流类型,计算热储水文地质参数,进行开采动态预测。
- 5.3.2 降压试验数据应能确定井流量方程 $s_w=aQ+bQ^2$ 或 $Q-f(s_w)$, 计算热储的热水头和地热井的产能,确定地热井的可采资源量。
- 5.3.3 根据地热井试验降压情况,选择扬程、涌水量、温度、功率等技术指标相适宜的潜水泵,下泵深度要综合考虑热储层类型、动水位埋深、降深等。
- 5.3.4 试验前应检查排水管道是否畅通,检查水位、水量、水温等测试仪器仪表及用品、工具,确保降压试验能连续进行。
- 5.3.5 在同一降压试验中应采用同一方法和工具进行数据观测和采集。
- 5.3.6 依据勘查工作需要,分为单井和多井降压试验。
- 5.3.7 单井降压试验应按以下方法:
 - a) 应进行 3 次定流量降压试验,反映 $Q-s_w$ 曲线形态。先进行大落程抽水,大落程停泵之后立即进行水位恢复观测,观测时间不少于 6h,之后再进行中、小落程降压试验;

- b) 降压试验各落程应采用流量控制，其大小分别为 $Q_1=Q_{\max}$ ， Q_2 、 Q_3 分别为最大流量的 2/3 和 1/3 左右；
- c) 大落程降压试验延续时间不少于 48h，稳定延续时间不少于 24h；中、小落程试验稳定延续时间分别不少于 12h、8h；水位持续上升或下降的，应适当延长试验时间；
- d) 各组试验是否达到稳定以流量变化不大于 3%，观测水位埋深波动幅度孔隙型不大于 10cm/60min，裂隙型不大于 20cm/60min，考虑区域水位、潮汐的影响，没有持续下降或上升趋势为标准。

5.3.8 多井降压试验应按以下方法：

- a) 主要在对井中第二眼井成井时的降压试验中采用。当地热地质条件复杂、对井及附近地热井尤其是同层地热井较多且相距较近时，具备观测条件的都宜进行多井降压试验；
- b) 宜进行 1~2 个落程的稳定流或非稳定流降压试验，最大一次降压的延续时间不少于 120h。如果同期观测井出现水位持续下降或水位波动较大情况，应适当延长试验时间；
- c) 试验资料除满足单井试验的各项要求外，还应能确定降压影响半径 R 、井间干扰系数等参数。

5.4 回灌试验

5.4.1 系统工艺

5.4.1.1 水质处理系统

应依据试验井热储层类型，选择精度适宜的过滤设备作除砂、除污水质处理：

- a) 热储层为孔隙型热储时，需同时安装粗过滤和精细过滤两级过滤器，粗过滤精度为不大于 $50\mu\text{m}$ ，精过滤精度为不大于 $5\mu\text{m}$ ；
- b) 热储层为基岩岩溶裂隙型热储时，过滤器精度不大于 $50\mu\text{m}$ 。

5.4.1.2 系统管路

采、灌系统管路应保持密闭状态。仪表、仪器正常运行。正式回灌试验前应利用地热流体对管道及过滤设备内部污垢杂物进行冲洗，要求水清砂净。

5.4.1.3 回灌方式

宜采用回灌管内进水方式进行回灌，包括自然回灌和加压回灌，回灌管应下至回灌井静水面以下 10~15m 深度，保证回灌在真空密闭条件下进行。

5.4.2 试验操作

5.4.2.1 至少进行三组试验。宜采用定流量方法，回灌量从小到大依次进行。第一组小灌量以其产能测试时最大抽水流量的 1/4 为宜，后续每组逐级增加，最大一组灌量应达到或接近产能测试时的最大涌水量。

5.4.2.2 第一组试验回灌井的动水位需稳定 8h 以上，第二、三组动水位需稳定 16h、48h 以上。各组试验是否达到稳定以流量变化不大于 3%，观测水位埋深波动幅度孔隙型不大于 10cm/60min，裂隙型不大于 20cm/60min，考虑区域水位、潮汐的影响，没有持续下降或上升趋势为标准。

5.4.2.3 停灌后应进行水位恢复观测。

5.4.2.4 测试资料应满足确定流体运动方程的要求。利用多组回灌试验数据建立井流方程，计算热储注水渗透系数 $K_{\text{注}}$ 、导水系数 $T_{\text{注}}$ 和回灌影响半径 $R_{\text{注}}$ 等热储水文地质参数，评价合理回灌量。

5.5 数据采集与资料整理

5.5.1 基本要求

观测数据精确到水位1cm、水温0.1℃。开采流量采用堰板计量时，过水堰高测量应读数精确到1mm；采用水表计量时，开采量与回灌量读数应精确到0.1m³。

5.5.2 降压试验数据观测要求

5.5.2.1 降压试验过程中，抽水井的瞬时流量、水位埋深、出水温度和观测井的水位埋深、液面温度均应同步观测。

5.5.2.2 稳定流观测时间为开泵后第 1、5、10、15、20、25、30、40、60、80、100、120、150、180min，稳定后每 60min 观测一次。

5.5.2.3 非稳定流观测时间为开泵后第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120min，之后每隔 30min 观测一次。

5.5.2.4 大降压试验停泵后立即观测恢复水位，按非稳定流间隔时间观测，持续时间不少于 6h，要求水位和液面温度同步监测。

5.5.3 回灌试验数据观测要求

5.5.3.1 每一组试验观测时间为回灌开始后第 1、5、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120、150、180min，之后每 60min 观测一次。

5.5.3.2 回灌试验过程中，要求动水位埋深、回灌温度、回灌量同步观测。

5.5.4 产能测试资料整理

5.5.4.1 产能试验现场应绘制必要的草图（如 $Q-s_w$ 、 $Q-t$ 、 $S-t$ 、 s_w-lgt 、 $s_w-\sqrt{t}$ 曲线），以了解水位水量的变化趋势，判断是否存在降压反曲线，若存在问题应重新做试验。

5.5.4.2 试验现场应做好原始数据记录工作，表格见附录 A。试验前后应准确记录时间、流量表累计读数等。

5.5.4.3 现场应审查校对水位、流量、温度、观测时间等数据，发现记录错误的应及时进行修正，问题数据不可涂抹，应划掉后在旁边记录正确数值，备注原因并由核对人在修正处签字。

5.5.4.4 试验记录表在试验阶段改变、表格换页时应完整填写年份、月份、日期、时、分。

5.5.4.5 原始记录必须保持字体清晰、干净整洁，留档备查。

6 热储水文地质参数计算方法

6.1 水位校正

6.1.1 基本要求

将产能测试获得的、不同温度的观测水位统一换算到某一温度下的校正水位埋深，消除温度效应。一般按热储平均温度进行校正。

6.1.2 校正方法

降压试验所取得的观测水位换算到热储平均温度下的水位校正可采用（1）式进行。回灌试验时，回灌井内不同温度下的观测水位埋深，均采用（1）式统一校正到25℃温度下的水位埋深，即 ρ_{25} 为25℃温度所对应的流体密度。

$$H_t = H_{\text{中}} - \frac{\rho_{\text{平}} \times [H_{\text{中}} - (h_t - h_0)]}{\rho_{\text{高}}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

H_t ——校正后自然地面起算的水位埋深（m）；

$H_{\text{中}}$ ——热储有效厚度段中点垂深（m）；

$\rho_{\text{平}}$ ——井筒内水柱平均密度（即热储温度与液面温度的平均值所对应的流体密度）（kg/m³）；

h_t ——观测水位埋深（m）；

h_0 ——观测基点距自然地面的高度（m）；

$\rho_{\text{高}}$ ——热储温度所对应流体密度（kg/m³）。

6.1.3 热水头埋深确定方法

热水头埋深通常采用以下两种方法计算：

a) Q-h 曲线法：根据 3 个落程校正后的稳定动水位埋深（h）和对应的涌水量（Q），绘制 Q-h 关系曲线图，其与纵轴截距即热水头埋深。

b) 静水位校正法：将抽水前测得的静水位埋深按照公式（1）校正到热储平均温度下的水位埋深，即热水头埋深。

6.2 单位产量计算方法

$$q = \frac{Q}{S_{\text{井}}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

q ——单位产量（m³/h·m）；

Q ——抽水流量（m³/h）；

$S_{\text{井}}$ ——抽水产生的稳定水位降深（稳定动水位埋深与热水头埋深之差）（m）。

6.3 稳定流降压试验求参方法

6.3.1 基本要求

采用承压完整井公式计算热储水文地质参数。

6.3.2 热储有效厚度

6.3.2.1 确定热储有效厚度应结合地热井地质录井和地球物理测井资料，统计具有有效空隙和渗透性的地层、岩体和构造带的总厚度。

6.3.2.2 岩溶裂隙型热储有效厚度为以测井结果划分的 I、II 类裂隙厚度之和。采取酸洗压裂措施后其厚度为 I、II、III 类裂隙厚度之和。

6.3.2.3 孔隙型热储有效厚度为滤水管（射孔段）位置对应的测井解译的含水层厚度之和。

6.3.3 单井降压试验求参方法

6.3.3.1 采用裘布依 Dupuit 公式（3）及奚哈特 W. Sihadrt 影响半径经验公式（4），叠代求取热储渗透系数 K 和降压影响半径 R。

$$K = \frac{0.366Q}{s_w M} \lg \frac{R}{r_w} \dots\dots\dots (3)$$

$$R = 10s_w \sqrt{K} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

K ——热储平均温度下的渗透系数 (m/d) ;

Q ——抽水流量 (m³/d) ;

M ——热储层有效厚度 (m) ;

R ——降压影响半径 (m) ;

s_w ——抽水井稳定水位降深 (m) ;

r_w ——抽水井热储段井半径 (m) ;

其余符号意义同前。

6.3.3.2 热储导水系数 T 采用 (5) 式求得

$$T = KM \dots\dots\dots (5)$$

式中:

T ——导水系数 (m²/d) ;

其余符号意义同前。

6.3.3.3 热储渗透率 k 采用 (6) 式求得。

$$k = \frac{\eta}{g} K \dots\dots\dots (6)$$

式中:

k ——热储渗透率 (m²/s) ;

K ——热储渗透系数 (m/s) ;

η ——热储平均温度下热流体的运动粘滞系数 (m²/s) ;

g ——重力加速度 (9.8m/s²) ;

其余符号意义同前。

6.3.3.4 依据同一热储层渗透率 k 值相同的原理, 采用 (7) 式计算不同流体温度下的渗透系数 K_T 。

$$K_T = \frac{k}{\eta_T} g \dots\dots\dots (7)$$

式中:

K_T —— $T^\circ\text{C}$ 时热储的渗透系数 (m/s) ;

η_T —— $T^\circ\text{C}$ 时热流体的运动粘滞系数 (m²/s) ;

其余符号意义同前。

6.3.4 多井降压试验求参方法

6.3.4.1 当带有一个观测井时, 如果观测井受抽水主井影响水位有变化时, 采用 (8) 式, (9) 式计算降压影响半径和热储渗透系数。

$$\lg R = \frac{s_w \lg r - s_1 \lg r_w}{s_w - s_1} \dots\dots\dots (8)$$

$$K = \frac{0.366Q}{M(s_w - s_1)} \lg \frac{r}{r_w} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

s_w ——抽水井稳定水位降深（m）；

s_1 ——观测井稳定水位降深（m）；

r ——观测井与抽水井井底水平距离（m）；

其余符号意义同前。

6.3.4.2 当带有两个观测井时，采用（10）式，（11）式计算水文地质参数。

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \dots\dots\dots (10)$$

$$K = \frac{0.366Q}{M(s_1 - s_2)} \lg \frac{r_2}{r_1} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

s_1 ——近观测井稳定水位降深（m）；

s_2 ——远观测井稳定水位降深（m）；

r_1 ——近观测井与抽水井井底水平距离（m）；

r_2 ——远观测井与抽水井井底水平距离（m）；

其余符号意义同前。

6.4 非稳定流降压试验求参方法

计算方法见附录B。

6.5 回灌试验热储注水参数方法

回灌条件下热储注水渗透系数、回灌影响半径和注水导水系数按公式（3）、（4）和（5）进行计算。

6.6 复杂条件下热储水文地质参数计算

如果降压试验受到不同水文地质边界影响时，则应根据实际情况选取符合水文地质条件的方法进行计算，具体方法参见《水文地质手册》第二版。或按边界水力性质设置虚拟井按势叠加原理进行计算。

6.7 热储水文地质参数选取

选取大降深产能测试资料所求得的相关参数，作为该地热井热储的水文地质参数。

7 地热井资源计算与可靠性评价

7.1 可开采量计算

根据3个落程降压试验数据，绘制Q-s_e曲线，确定地热井井流方程式（12），采用公式计算或内插法估算地热井可开采量Q，使用的水位最大降深值见表1。

$$s_w = aQ + bQ^2 \dots\dots\dots (12)$$

式中：

a ——热储层流损失系数；

b ——井筒紊流损失系数；

其余符号意义同前。

表1 水位降深约束条件一览表

水位年降幅 (m/a)	最大降深取值 (m)
≤ 2	≤ 50
> 2	≤ 30

注：最大降深取值不应大于降压试验最大降深值。

7.2 可回灌量计算

7.2.1 利用回灌试验资料，采用（3），（4）式计算回灌流体温度为 25℃时的注水渗透系数 $K_{\text{注}}$ 、回灌影响半径 $R_{\text{注}}$ 。采用（13）、（14）式来估算回灌流体温度为 25℃时回灌井的可灌量。

$$Q_{\text{注}} = \frac{K_{\text{注}} s_{\text{注}} M}{0.366 \lg \frac{R_{\text{注}}}{r_w}} \dots\dots\dots (13)$$

$$R_{\text{注}} = 10 s_{\text{注}} \sqrt{K_{\text{注}}} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$Q_{\text{注}}$ ——回灌流体温度为25℃时回灌井稳定可灌量 (m^3/d)；

$K_{\text{注}}$ ——回灌流体温度为25℃时的热储注水渗透系数 (m/d)；

$s_{\text{注}}$ ——回灌井内流体水位上升到允许的最大值（统一取距离井口10m，水位以25℃校正）(m)；

$R_{\text{注}}$ ——回灌影响半径 (m)；

其余符号意义同前。

7.2.2 保证 50 年开采期内不产生热突破，采用（15）、（16）式计算回灌井的允许灌量。

$$Q_{\text{注}} = \frac{\pi D^2 M \rho_a c_a}{3 t \rho_w c_w} \dots\dots\dots (15)$$

$$\rho_a c_a = \phi \rho_w c_w + (1 - \phi) \rho_r c_r \dots\dots\dots (16)$$

式中：

D ——与距离最近的同层开采井的井底距离 (m)；

t ——冷峰面到达开采井的允许时间 (d，按50年计)；

$\rho_w c_w$ ——25℃时流体密度与比热之乘积 ($\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)；

$\rho_r c_r$ ——25℃时岩石骨架密度与比热之乘积 ($\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)；

$\rho_a c_a$ ——25℃时流体、岩石骨架的密度与比热乘积的均值 ($\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)；

ϕ ——回灌井热储层的孔隙度或裂隙率；

其余符号意义同前。

7.2.3 可回灌量综合确定

根据以上 2 种不同计算方法估算可回灌量, 结合回灌试验时地热井的实际回灌情况, 取最小值确定地热回灌井的可回灌量。

7.3 地热资源可靠性评价

7.3.1 地热井资源可靠性评价是在综合考虑各种影响因素的情况下, 地热井所能允许的稳定的可采资源量。这些因素包括但不限于: $Q-s_w$ 曲线、区域水位年降幅、热(量)均衡条件下的开采合理降深、开采权益保护半径, 在确定地热井可采量时, 不应以单一指标来简单评价。

7.3.2 开采井的可开采量不应大于回灌井的可回灌量。

7.3.3 依据初步确定的地热可开采量估算其热影响范围。对盆地型热储类型, 按开采年限 50 年, 采用式(17)估算地热井开采 50 年的热影响半径 $R_{热}$ 。

$$R_{热} = \sqrt{\frac{NQ_{估}f}{\pi H \lambda_w}} \dots\dots\dots (17)$$

$$f = \frac{\rho_w c_w}{\rho_a c_a} \dots\dots\dots (18)$$

$$\rho_a c_a = \frac{M}{H} \varphi \rho_w c_w + \left(1 - \frac{M}{H} \varphi\right) \rho_r c_r \dots\dots\dots (19)$$

式中:

$R_{热}$ ——地热井开采 50 年排出热量对热储的热影响半径 (m);

N ——地热井 50 年开采期内的开采总日数 (d);

$Q_{估}$ ——初步确定的地热井可开采量 (m^3/d);

f ——水的体积比热、岩石骨架与水的平均体积比热的比值;

H ——地热井开采 50 年排出热量对热储的热影响厚度 (最上一个取水层顶板至最下一个取水层底板之间的厚度, m);

λ_w ——热储热能回收率 (孔隙型取 0.25, 裂隙型取 0.15);

ρ_w, ρ_r, ρ_a ——水的密度, 岩石的密度, 岩石骨架与水的平均密度 (kg/m^3);

c_w, c_r, c_a ——水的比热, 岩石的比热, 岩石骨架与水的平均比热 ($kJ/kg \cdot ^\circ C$);

M ——热储层有效厚度 (m);

φ ——开采井热储岩石的孔隙度或裂隙率。

7.3.4 若开采井因钻遇溶洞、破碎带等导致揭露热储层厚度较小, 但出水量与周边同层地热井相比无明显差异, 可扩大均质同性的概化范围, 参考同一构造单元内地热地质条件及成井工艺相近的地热井确定该开采井的热影响厚度, 并依据式(17)评价其可靠性。

7.3.5 将初步估算的可开采量 Q 带入公式(3)、(4), 计算该开采量下的降压影响半径 R , 并与 $R_{热}$ 对比, 以大者作为地热井的开采权益保护半径。平面上以开采井揭露的热储中部为圆心、以开采权益保护半径确定的开采权益保护范围应不侵犯周边同层地热井的开采权益保护范围, 如不侵犯则估算的开采量即为开采井的可开采量; 如有侵犯应以实际井底水平距离与已有开采井的权益保护半径之差作为该开采井的权益保护半径, 用式(17)及式(3)、(4)反求开采井的可开采量, 取小值。

7.3.6 相对密集的两个及以上同层开采井, 可按群井开采整体确定可开采量及权益保护范围, 以各开采井排出热量对热储的热影响厚度均值、可开采量之和作为参数代入式(17)评价群井开采的可靠性。平面上以群井揭露的热储中部的中心位置为圆心、整体开采权益保护半径确定的权益保护范围不侵犯周边同层开采井的权益; 如有侵犯应参考 7.3.5 方法反求群井可开采量。

7.3.7 新布设地热开采井时, 其与同层开采井井底水平距离应大于与其距离最近的已有开采井权益保护半径的 2 倍。新布设回灌井时应按 7.2.2 计算与同层开采井井底的合理距离, 防止发生热突破。

7.4 开采动态预测

以可开采量、可回灌量作为开采方案，当区域地热井相对密集、钻井资料相对完整、动态监测资料相对齐全且连续时，宜采用数值法或统计分析法进行水位动态预测；当区域地热井相对稀疏、钻井资料相对不够完整、动态监测资料为短期监测或偶测值时，宜采用解析法、比拟法进行水位动态预测。

8 地热资源开发利用评价

8.1 经济效益评价

8.1.1 地热资源经济价值的评价采用类比常规能源（燃煤）的方法进行折算。依据地热流体可开采量所采出的热量，采用（20）式计算地热井的产能（热能或电能）。

$$W_t = 4.1868Q_w(T_w - T_q) \dots\dots\dots (20)$$

式中：

W_t ——热功率（kW）；

4.1868——热功当量换算系数；

Q_w ——地热流体可开采量（L/s）；

T_w ——地热流体温度（℃）；

T_q ——当地年平均气温（℃）。

8.1.2 地热流体全年开采累计可利用的热能量，采用（21）式进行估算。

$$\sum W_t = 86.4dW_t \dots\dots\dots (21)$$

式中：

$\sum W_t$ ——地热井开采一年可利用的热能量（MJ）；

d ——全年开采日数（d）；

W_t ——由（20）式计算得出的热功率值（kW）；

86.4 ——单位换算系数。

8.2 环境效益评价

8.2.1 地热资源开发利用所获热量与之相当的节能效果，减排量、节省污染治理费用等，按 GB/T 11615-2010 中附录 F 所列方法和要求进行估算和评价。

8.2.2 按 GB/T 11615-2010 中 10.2 的要求，对地热资源开发利用的环境影响进行综合分析和评价。

9 地热资源流体质量评价

地热流体的水质、不同用途、有用矿物组分、腐蚀性、结垢趋势等评价，按 GB/T 11615-2010 中第 9 章所列方法和要求进行。理疗、洗浴等特殊行业按 GB/T 11615-2010 中附录 E 进行评价。

10 资料整理及报告编写

10.1 新建成地热井应对地热资源勘查工作取得的各项资料，包括：地质调查、地球物理与地球化学勘查、地热钻井、地球物理测井、试井、井史、地热流体化学分析、岩土测试、降压及回灌试验观测原始记录表、完井报告等资料，进行分类整理、编目、造册、存档备查。

10.2 应整理地热钻井取得的实物地质资料(岩心、岩屑等),有重要地质意义的地热钻井实物资料(岩心、岩屑)应予以长期保存。

10.3 地热井资源评价报告主要依据勘探成果评价其可开采量、可回灌量及开采保护区范围,为资源的开发管理提供依据。报告内容应充分反映地热钻探地质编录、物理测井和井试成果,明确提出地热井合理回灌量、可开采量、开采权益保护半径,以及矿权开采期限内可采地热流体热能,具体如下:

a) 前言:简述地热勘查/储量核实项目概况;地热井所处的地理位置;探矿权、采矿权登记概况;以往开展地热地质工作概况及地热地质研究程度;勘查目的和任务;勘查工作量及质量评述等。

b) 地热地质特征:简述地热井所处的地质构造部位;构造特征;地层概况;地温场及热储层特征;勘查项目附近地热开发利用现状。

c) 钻井工程:详述地热井钻探工程实施情况与问题;成井地质剖面;物探测井及井身结构;钻遇地层情况及特征;地温梯度及热储发育特点。

d) 地热井资源评价:产能测试资料分析;数据整理及热储水文地质参数计算;地热井可灌性分析及合理回灌量确定;计算地热井开采量及降压影响半径。最终评价确定地热井开采权益保护半径、可开采量,并计算整个开采期内可开采的地热流体热能。

e) 开采保护区评价:结合地热井降压影响半径、已有同层开采井距离及保护范围,评价并圈定地热开采权益保护范围。

f) 水质评价:针对实际用途进行评价。

g) 利用效益评价:对地热流体利用所产生的经济、环境、社会效益进行客观评价。

h) 结论及开发利用建议:侧重热储层特征、地热井可开采量、可回灌量、水质及用途、开采权益保护范围及其合理井距、环境影响评价等方面的结论和意见。

10.4 地热井资源评价报告编写提纲见附录 C。

附 录 A
(规范性)
产能测试原始记录表

A.1 静水位观测原始记录表

井号：_____ 井位：_____ 第_____页
测点距自然地面距离：_____m 共_____页

观测时间						观测数据			记录人
月	日	时	分	间隔时间 (min)	累计时间 (min)	水位埋深 (m)	液面温度 (℃)	气温 (℃)	

审核人：_____ 时间：_____

A.2 降压试验原始观测记录表

井号：_____ 井位：_____ 第_____页
测点距自然地面距离：_____m 堰形：_____ 落程（大/中/小）_____ 共_____页

观 测 时 间						观 测 数 据						记录人
月	日	时	分	间隔 时间 (min)	累计 时间 (min)	堰口 读数 (cm)	涌水量 (m³/h)	累计 流量 (m³)	水位 埋深 (m)	液面 温度 (℃)	气温 (℃)	

审核人：_____ 时间：_____

A.3 恢复水位观测原始记录表

井号：_____ 井位：_____ 第_____页
测点距自然地面距离：_____m 共_____页

观 测 时 间						观 测 数 据			记录人
月	日	时	分	间隔时间 (min)	累计时间 (min)	水位埋深 (m)	液面温度 (℃)	气温 (℃)	

审核人：_____ 时间：_____

A. 4 回灌试验观测原始记录表

井号：_____ 井位：_____ 第_____页
测点距自然地面距离：_____m 第_____组 共_____页

观 测 时 间						观 测 数 据						记录人
月	日	时	分	间隔 时间 (min)	累计 时间 (min)	瞬时 流量 (m ³ /h)	累计 流量 (m ³)	水位 埋深 (m)	压力表读数 (kPa、 kg·f/cm ²)	液面 温度 (℃)	气温 (℃)	

审核人：_____ 时间：_____

附 录 B
(规范性)
非稳定流降压试验求参方法

B.1 Theis 配线法

计算步骤如下:

- a) 在双对数坐标纸上绘制 $W(u)-1/u$ 的标准曲线。
- b) 在另一张模数相同的透明双对数纸上绘制实测的 $s-t/r^2$ 曲线或 $s-t$ 曲线。
- c) 将实际曲线置于标准曲线上, 在保持对应坐标轴彼此平行的条件下相对平移, 直至两曲线重合为止。
- d) 任取一匹配点(在曲线上或曲线外均可), 记下匹配点的对应坐标值: $W(u)$, $1/u$, s 和 t (或 t), 带入 (B.1)、(B.2)、(B.3) 式, 分别计算有关参数。

$$K = \frac{0.08Q}{[s]M} [W(u)] \dots\dots\dots (B.1)$$

$$\mu^* = \frac{r^2}{4[t]} \left[\frac{1}{u} \right] \dots\dots\dots (B.2)$$

$$a = \frac{T}{\mu^*} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

- s ——抽水任一时刻的水位降深 (m);
 μ^* ——储层的弹性释水系数;
 a ——储层的导压系数 (m^2/d);
 r ——观测孔与抽水井井底水平距离 (m);
 其余符号意义同前。

B.2 Jacob直线图解法

当降压试验时间较长, $u = r^2/(4at) < 0.01$ 时, 可采用雅各布Jacob公式 (B.4) 计算参数。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2 \mu^*} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25Tt}{r^2 \mu^*} \dots\dots\dots (B.4)$$

将上式改写成 $s = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25T}{r^2 \mu^*} + \frac{0.183}{T} \lg \frac{t}{r^2}$, 即 s 与 $\lg \frac{t}{r^2}$ 成线性关系, 具体步骤如下:

a) 绘制 $s - \lg \frac{t}{r^2}$ 曲线，拟合成直线形式，求直线斜率 i 。可在 excel 拟合公式上直接读取，也可取

和一个对数周期对应的降深 Δs ，这就是斜率 i 。 $i = \frac{0.183Q}{T}$ ，可求出导水系数 T 。

b) 将直线部分延长，在零降深线上的截距为 $\left(\frac{t_0}{r^2}\right)$ ，代入 (B.4) 式有 $\lg \frac{2.25Tt_0}{r^2\mu^*} = 0$ ，即

$$\mu^* = 2.25T \left(\frac{t_0}{r^2}\right), \text{ 可求出弹性释水系数 } \mu^*。$$

B.3 水位恢复资料求参方法

当 $u < 0.01$ 时，依据泰斯Theis叠加公式 (B.5)，使用Excel表绘制降深—历时对数曲线，以历时 $\lg(t/t_0)$ 为 x 轴、剩余降深 s_r 为 y 轴，添加线性趋势线获得趋势线斜率 $i = \frac{2.3Q}{4\pi T}$ ，求取导水系数 T 。

$$s_r = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{t - t_0} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

s_r ——剩余降深值 (m)；

t ——抽水开始到计算时的延续时间 (d)；

t_0 ——恢复观测距抽水开始的时间 (d)；

i ——剩余降深对数历时曲线趋势线斜率；

其余符号意义同前。

B.4 有越流补给热储求参方法

越流系统中降压试验可采用Hantush-Jacob公式 (B.6)、(B.7) 计算参数。

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{B}\right) \dots\dots\dots (B.6)$$

$$R = 1.123B \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

$K_0\left(\frac{r}{B}\right)$ ——零阶第二类虚宗量Bessel函数；

B ——越流因素 (m)；

其余符号意义同前。

$s - \lg t$ 曲线的斜率变化规律是由小到大，又由大变到小，存在着拐点 P (见图B.1)。

拐点 P 处降深 s_p 与最大降深 s_{\max} 的关系为：

$$s_p = \frac{Q}{4\pi T} K_0\left(\frac{r}{B}\right) = \frac{1}{2} s_{\max} \dots\dots\dots (B.8)$$

拐点P处的时间 t_p 为:

$$t_p = \frac{\mu^* Br}{2T} \dots\dots\dots (B.9)$$

拐点P处切线的斜率为:

$$i_p = \frac{2.3Q}{4\pi T} e^{-\frac{r}{B}} \dots\dots\dots (B.10)$$

拐点P处降深 s_p 与斜率 i_p 之间的关系为:

$$\frac{2.3s_p}{i_p} = K_0\left(\frac{r}{B}\right) e^{\frac{r}{B}} \dots\dots\dots (B.11)$$

应用上述原理, 具体计算参数步骤如下:

a) 在单对数坐标纸上绘制 s - $\lg t$ 曲线, 用外推法确定最大降深 s_{\max} , 并用公式 (B.8) 计算拐点 P 处降深 s_p 。

b) 根据 s_p 确定拐点 P 位置, 并从图上读出拐点出现的时间 t_p 。

c) 做拐点 P 处曲线的切线, 并从图上确定拐点 P 处切线的斜率 i_p (一个对数周期对应的降深 Δs)。

d) 应用公式 (b.11), 求出有关数值后, 查 Bessel 函数数值表确定 $\left(\frac{r}{B}\right)$ 和 $e^{\frac{r}{B}}$ 值。

e) 根据 $\left(\frac{r}{B}\right)$ 值求 B 值: $B = \frac{r}{\left(\frac{r}{B}\right)}$ 。

f) 用公式 (b.10)、(b.9) 和 (b.7) 分别计算 T、 μ^* 和 R 值。

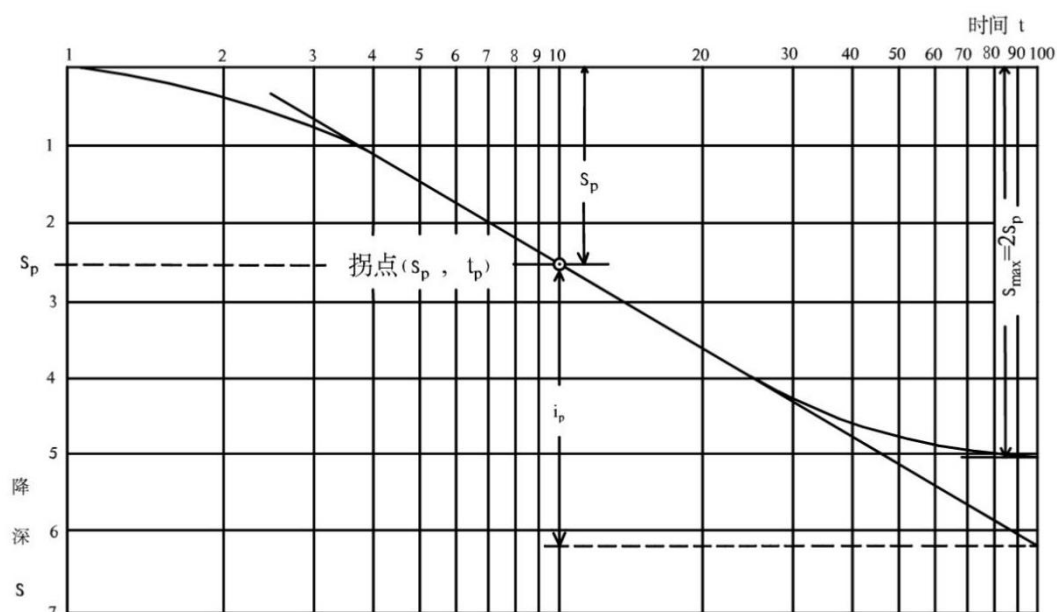


图 B.1 s - $\lg t$ 曲线

附 录 C

（规范性）

地热井资源评价报告编写提纲

报告编写提纲如下：

第一章 前言

- 第一节 项目概要
- 第二节 地热勘查研究程度
- 第三节 勘查目的任务
- 第四节 矿区及矿权概况
- 第五节 工作质量评述

第二章 区域地热地质条件

- 第一节 构造特征
- 第二节 地层概况
- 第三节 地温场特征
- 第四节 热储层特征
- 第五节 区域开发利用现状及热储动态

第三章 地热井热储工程

- 第一节 地热井工程
- 第二节 钻遇地层特征
- 第三节 地热井热储特征
- 第四节 地热井开发利用及动态（*）

第四章 地热井产能测试与资源评价

- 第一节 降压试验
- 第二节 回灌试验
- 第三节 数据整理及热储参数计算
- 第四节 地热井可灌性分析及可开采量计算与评价
- 第五节 开采保护区论证
- 第六节 开采初步预报

第五章 地热流体质量评述

- 第一节 地热流体水质特征
- 第二节 地热流体质量评价

第六章 储量对比评述（*）

- 第一节 以往储量评价工作情况
- 第二节 历次储量评价工作对比评述（*）

第七章 地热资源开发利用经济效益及环境影响评价

- 第一节 经济效益评价
- 第二节 环境影响评价

结论及建议

- 附：①降压试验观测记录表
- ②回灌试验观测记录表
- ③水、岩分析化验资料
- ④地热井竣工验收表（△）
- ⑤勘查/采矿许可证复印件

⑥矿产资源储量评审备案信息表

注：标注△的仅适用于新建地热井资源评价；标注*的仅适用于地热井储量核实。

参 考 文 献

- [1] DB 37/T 4243-2020 单井地热资源评价技术规程
 - [2] 《水文地质手册》（第二版）
 - [3] 《地热单井勘察报告审批要求》储办发（1996）51号
 - [4] 《天津地区地热单（对）井资源评价技术要求》津国土房热（2006）239号
 - [5] 《天津地区地热单（对）井资源评价技术要求》津国土房热（2014）269号
-