



中华人民共和国地质矿产行业标准

DZ/T 0331—2020

地热资源评价方法及估算规程

Specification for estimation and evaluation of geothermal resources

2020-04-13 发布

2020-05-01 实施

中华人民共和国自然资源部 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	3
5 地热资源储量估算	4
5.1 计算参数的确定	4
5.2 计算方法要求	4
5.3 地热单(对)井地热资源储量估算	4
5.4 不同类型地热资源储量估算	5
6 地热资源储量可靠性评价	6
6.1 地热单井可靠性评价	6
6.2 地热田或地热开采区可靠性评价	7
7 地热流体质量评价	8
7.1 地热流体不同用途评价	8
7.2 地热流体中有益矿物组分评价	9
7.3 地热流体腐蚀性评价	9
7.4 地热流体结垢评价	9
8 地热资源开发利用评价	10
8.1 地热资源开发可行性评价	10
8.2 地热资源开发利用环境影响评价	11
8.3 地热资源开发利用现状与潜力评价	12
8.4 地热资源综合开发利用评价	12
9 地热资源勘查评价报告编写	12
9.1 编写要求	12
9.2 编写内容	12
附录 A (资料性附录) 地热温度计	13
附录 B (资料性附录) 地热资源计算参数的确定	17
附录 C (资料性附录) 地热资源储量计算方法	29
附录 D (资料性附录) 生产试验法	37
附录 E (资料性附录) 地热常用量符号和单位名称	43
附录 F (资料性附录) 理疗热矿水水质标准	46

附录 G (资料性附录) 地热利用的节煤减排量及居室采暖面积估算表	47
附录 H (资料性附录) 地热资源开发利用现状及潜力分析方法	49
附录 I (资料性附录) 地热资源梯级综合利用	52
附录 J (资料性附录) 地热资源勘查评价报告编写提纲	53
参考文献	55

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由中华人民共和国自然资源部提出。

本标准由全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会(SAC/TC 93)归口。

本标准起草单位：自然资源部矿产资源储量评审中心、中国地质科学院水文地质环境地质研究所。

本标准主要起草人：王贵玲、李曼、张明燕、刘志明、张薇、蔺文静、邢林啸、马峰、修艳敏、王婉丽、李亭昕。

地热资源评价方法及估算规程

1 范围

本标准规定了地热资源储量估算、地热资源储量可靠性评价、地热流体质量评价、地热资源开发利用评价及地热资源勘查评价报告编写的有关要求。

本标准适用于水热型地热资源的资源评价及储量估算。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 5084 农田灌溉水质标准

GB 5749 生活饮用水卫生标准

GB 8537 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水

GB 8978 污水综合排放标准

GB 11607 渔业水质标准

GB/T 11615 地热资源地质勘查规范

GB/T 13727 天然矿泉水资源地质勘探规范

GB/T 14848 地下水质量标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

地热能 geothermal energy

赋存于地球内部岩土体、流体和岩浆体中,能被人类开发和利用的热能。

3.2

地热流体 geothermal fluid

包括地热水及其蒸汽,以及伴生的少量不凝结气体。

3.3

地热资源 geothermal resources

能够经济地被人类利用的地球内部的地热能、地热流体及其有用组分。

3.4

水热型地热资源 hydrothermal resources

赋存于天然地下水及其蒸汽中的地热资源。

3.5

沉积盆地型地热资源 geothermal resources of sedimentary basin

分布于沉积盆地地区,能量传递方式以热传导为主的地热资源。

3.6

隆起山地型地热资源 **geothermal resources of uplift mountain**

分布于沉积盆地以外的丘陵、山地等地区,能量传递方式以热对流为主的地热资源。

3.7

地热系统 **geothermal system**

在流量和流体循环上相对独立的地质构造单元,其中的地热能聚集到可利用的程度。它是开展地热资源成因研究的基本单元。

3.8

地热田 **geothermal field**

在当前经济技术条件下可以开采的深度内,具有开发利用价值的地热能及地热流体的地域。一般包括水源、热源、热储、通道、盖层等要素,具有关联的热储结构,可用地质、物探方法加以圈定。

3.9

地热储量 **geothermal reserves**

在当前经济技术可行的深度内,经过勘查工作,一定程度上查明储存于热储岩石和空隙中的地热流体和热量的资源总量。

3.10

地热流体储存量 **geothermal fluid reserves**

热储中储存的地热流体总量,单位为立方米(m^3),包括容积储存量和弹性储存量。

3.11

地热流体可开采量 **recoverable reserves of geothermal fluid**

经勘查或经开采验证的在当前开采经济技术条件下,能从热储中开采出来的那部分地热流体,是地热储量的一部分。

3.12

地热流体可开采热量 **recoverable heat of geothermal fluid**

在当前开采经济技术条件下,能从热储中开采出来的那部分地热流体中携带的、可被经济利用的热量。

3.13

热储 **geothermal reservoir**

埋藏于地下、具有有效空隙和渗透性的地层或岩体,其中储存的地热流体可供开发利用。

3.14

层状热储 **layered heat reservoir**

具有有效空隙和渗透性且呈层状分布的热储。大型沉积盆地中的热水含水层属于此类热储。

3.15

带状热储 **zoned heat reservoir**

具有有效空隙和渗透性且呈条带状分布的热储。导水断裂带控制的热水富水带属于此类热储。

3.16

岩溶热储 **karstic heat reservoir**

发育岩溶化的碳酸盐(石灰石、白云石、大理石等)、硫酸盐(石膏、硬石膏、芒硝等)和卤化物(岩盐、钾盐、镁盐等)岩层等构成的热储。

3.17

热储盖层 cap rock

覆盖在热储之上的弱透水和低热导率的岩层。盖层是相对于热储而言的。对于大型沉积盆地,通常将覆盖在结晶基底热储上的沉积地层统称为盖层。

3.18

地温梯度 geothermal gradient

地温随深度变化的速率,单位为摄氏度每百米($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)或摄氏度每千米($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)。

3.19

地热温度计 geothermometry

基于地热流体化学组分和同位素组成,利用经验公式或热力学计算的方法,预测地热系统深部热储温度的方法。

3.20

地热回灌 geothermal reinjection

为保持热储压力、充分利用能源和减少地热流体直接排放对环境造成的污染,对利用后(降低了温度)的地热流体通过地热井重新注回热储,也可利用其他清洁水源注回热储。

3.21

地热田概念模型 conceptual model of geothermal field

对地热田包括补给水源、热储、盖层、热源、通道、热传递和流体运动等要素的几何及物理形态的简化描述,代表人们对一个地热系统的认识。

3.22

地热资源梯级利用 stepwise utilization of geothermal resources

根据地热资源的流体数量、质量和能量特征,采取系统合理的经济技术措施和方案,逐级、逐步地对其进行综合利用的方式。

4 总则

4.1 地热资源评价的目的任务是在查明地热地质背景的前提下,确定地热流体的温度、物理性质和化学组分,并对其利用方向做出评价,查明地热流体动力场特征、补径排条件和地温场特征,估算、评价地热资源储量,提出地热资源可持续开发利用的建议,以减少开发风险,取得地热资源开发利用社会效益、经济效益和环境效益,并最大限度地保持地热资源的可持续利用。

4.2 经勘查的地热田或边采边探已形成一定开采规模的地热开发区,应及时进行地热资源评价,为科学制定地热资源开发利用规划或方案提供依据。

4.3 对已投入规模化开采的地热田或地热集中开采区,宜每隔5a依据开采动态监测资料对其地热资源储量进行核实再评价,为资源管理、保护和可持续利用提供依据。

4.4 勘查开发程度高、规模大的地热田,尤其是城市地区的地热田,应开展热储工程研究,建立数值模型,并据此提出地热资源可持续开发利用的方案和资源优化管理模式。

4.5 应根据地热资源类型和勘查阶段的不同,相应选取地热资源评价内容和评价方法。地热流体可开采量还应根据勘查可靠程度的差别,分别确定为验证的、探明的、控制的和推断的地热资源,具体参照GB/T 11615执行。

4.6 应依据不同用途对地热流体质量进行综合评价。宜在井(泉)试验现场测试相关参数及定期对代表性地热流体采样进行全分析及微生物检测的基础上进行综合评价,评价指标包括地热流体的物理性质、化学成分和微生物含量等。

5 地热资源储量估算

5.1 计算参数的确定

5.1.1 地热资源储量计算参数宜通过试验和测试获得。对难以通过测试获得的参数或勘查工作程度较低时,可采用经验值。相关参数的具体计算要求和方法参照附录 A 和附录 B。

5.1.2 地热资源评价时应获得下列参数和资料。

- a) 地热井参数:位置、深度、揭露热储厚度、强渗透段位置、单井涌水量、温度、压力、流体化学成分等。
- b) 热储几何参数:面积、顶板深度、底板深度、厚度和地热能回收率等。
- c) 热储物理性质参数:温度、压力及岩石的密度、比热容和热导率等。
- d) 热流体性质参数:体积、密度、焓、动力黏滞系数、运动黏滞系数等。
- e) 热储渗透性和贮存流体能力的参数:渗透率、渗透系数、压力传导系数、导水系数、弹性释水率、弹性释水系数(贮水系数)、孔隙度、有效孔隙度等。
- f) 监测资料:地热井的生产量、温度、压力、化学成分等随时间变化的资料。
- g) 热储的边界条件:边界的位置、热力学和流体动力学特征等。

5.1.3 参数的分布应能控制地热田或勘查区的特征。在建立数值模型时,如果实测资料不充分,在建立数值模型后,可通过模型反求热储的参数。

5.2 计算方法要求

5.2.1 地热资源储量估算应在建立地热田概念模型的基础上,根据地热资源类型、地热地质条件和研究程度的不同,选择相应的方法进行。概念模型应能反映地热田的热源、热储层、盖层、热储层的渗透性、内部和外部边界条件、地热流体的补给和运移等特征。

5.2.2 地热单(对)井地热流体可开采量估算见 5.3。沉积盆地型地热资源和隆起山地型地热资源储量估算见 5.4。

5.2.3 计算方法或计算模型应符合实际,模型的建立和计算方法的采用,应随勘查工作程度的提高,依据新的勘查资料和监测资料进行更新和改进。在开采阶段,模型的更新周期宜小于 5 a。

5.2.4 在有条件的情况下,应根据经济技术条件和综合利用方向,对不同计算方案进行对比、论证,确定合理的开发利用方案,并根据确定的开发利用方案,预测地热田的地温场、渗流场(具有流体质量长观数据的研究程度较高的地区,还应包括流体质量)的变化趋势,论证可开采量的保证程度和地热资源开发利用方案。

5.2.5 地热资源储量常用计算方法参见附录 C 和附录 D,地热常用量符号和单位名称参见附录 E。

5.3 地热单(对)井地热资源储量估算

5.3.1 单井地热流体可开采量估算

对新建单个地热开采井,可依据其产能测试资料按井流量方程估算单井的稳定产量,或根据抽水试验资料采用内插法确定。中低温地热资源评价时,宜采用的水位降深 100 a 内不大于 100 m,下降速率不大于 1 m/a。高温地热资源评价时,宜采用的总压力降低值一般不大于 0.3 MPa,最大不超过 0.5 MPa,下降速率不大于 0.02 MPa/a。

5.3.2 对井地热流体可开采量估算

5.3.2.1 对井系统估算可开采量时,应结合实际回灌试验,依据“以灌定采”和同层对井回灌的原则,计

算在一定压力(水头)降条件下的合理开采强度,充分考虑流体回灌对热储的回补作用。

5.3.2.2 对井“以灌定采”应同时满足:回灌率大于80%,回灌温度宜为25℃,可根据实际情况取值。地热流体回灌后,100 a内冷锋面不应到达开采井,即不产生热突破。

5.3.2.3 对井采灌时可回灌量的估算与确定,应根据附录C中考虑回灌条件下地热流体可开采量的两种不同方法进行计算,结合回灌试验时地热井的实际回灌情况,综合评价确定地热回灌井的合理可回灌量。其中有两种特殊情况应酌情考虑:

- a) 回灌井回灌能力极弱(小于出水量的三分之一)时,宜以该井回灌试验过程中相对延续时间较长的一段回灌量作为其可回灌量,并采用比拟法,对比分析相同地质构造条件下,成井工艺相同的同类型地热井的回灌能力,同时取保证系数为0.7时,作为其可回灌量的依据。
- b) 回灌井回灌能力极强(大于最大出水量)时,主要应考虑冷锋面的运移,以对井中的开采井和附近其他同层开采井流体100 a内温度不应下降、不产生热突破为宜。

5.4 不同类型地热资源储量估算

5.4.1 沉积盆地型地热资源储量估算

5.4.1.1 沉积盆地型地热资源储量估算方法应根据勘查阶段进行选取。区域调查阶段和预可行性勘查阶段评价内容包括地热储量、地热流体储量、地热流体可开采量、地热流体可开采热量;可行性勘查阶段和开采阶段评价内容包括地热资源可开采量、地热流体储量、地热流体可开采量、地热流体可开采热量、回灌条件下地热流体可开采量、回灌条件下地热流体可开采热量。

5.4.1.2 地热资源储量估算重点是地热流体可开采量和地热流体可开采热量。计算方法依据勘查阶段和勘查研究程度的不同进行选择。

- a) 地热资源调查阶段,以分析研究已有地热资源相关资料为主,重点对地热井开展野外调查,依据地热资源勘查研究程度的不同,预测调查区的地热资源储量。地热资源储量估算方法宜采用热储法和解析法。
- b) 地热资源预可行性勘查阶段,多选定有地热资源开发前景但又存在一定风险的地区进行勘查,主要利用地热钻井测试资料及经验参数。地热资源储量估算方法宜采用热储法、解析法和比拟法。
- c) 地热资源可行性勘查阶段,主要结合地热资源发展规划或开发工程项目要求,在地热资源预可行性勘查阶段选定的地区进行,勘查范围可是一个地热田,也可能是划定的拟开采地区,主要利用多个地热钻井(孔)测试资料、年动态监测资料及经验参数。地热资源储量估算方法宜采用解析法、数值法、比拟法和热储法。
- d) 地热资源开采阶段,主要对已规模化开采地热资源的地热田或地区,结合开采中出现的问题与地热资源管理的需要,对地热流体可开采量及开采后对环境的影响进行重新评价,主要利用地热勘查、采灌试验及多年动态监测资料。地热资源储量估算方法宜采用数值法、统计分析法、解析法和生产试验法。

5.4.1.3 以对井开采为主并开采多年的地热田,应以统计分析法为主估算地热流体可开采量,以地热田内代表性监测井多年水头压力保持稳定或一定时限内可趋于稳定条件下的地热田开采总量作为其可开采量。对暂不能保持水头压力稳定的地热田,可用地热田内代表性监测井保持一定水头压力年降速条件下的地热田开采量作为一定时限内的可开采量。

5.4.1.4 对已实施地热回灌或采(灌)结合开发的地热田,可采用统计分析法、热储法或数值法估算其保持水头压力、热(量)均衡条件下的合理开采强度作为其可开采量。采(灌)条件下地热资源开采量的计算温度应为回灌时开采井出水口温度。

5.4.1.5 沉积盆地型地热资源评价热储范围的确定。

- a) 有井控制的,应同时满足下列条件:埋深在 4 000 m 以内,热储层温度在 25 ℃ 以上;单井涌水量大于 20 m³/h;中低温地热资源 100 a 内水位下降小于 100 m,水位下降速率小于 1 m/a,高温地热资源总压力降低值最大不超过 0.5 MPa,压力下降速率不大于 0.02 MPa/a。
- b) 没有井控制、资料较少的远景评价区:通过盖层平均地温梯度大于 2.5 ℃/100 m 圈定热储面积,地温梯度、热储层厚度、砂厚比根据以往成果资料获得,热储层温度可用地温梯度推算确定。

5.4.1.6 考虑回灌条件下地热流体可开采量的计算方法:对于盆地型地热田,根据热量平衡,按回灌条件开采 100 a,热储温度下降 2 ℃ 进行计算,计算公式参见附录 C.3.3。

5.4.2 隆起山地型地热资源储量估算

5.4.2.1 隆起山地型地热资源储量估算内容包括地热资源储量、地热流体可开采量及地热流体可开采热量。

5.4.2.2 地热资源储量估算方法依据勘查阶段和研究程度的不同进行选择。调查阶段宜采用热储法和地表热流量法;预可行性勘查阶段可采用热储法、地表热流量法和比拟法;可行性勘查阶段除采用热储法和比拟法外,还可依据部分地热井试验资料采用解析法;开采阶段则应依据较丰富的勘查、开发及监测资料,采用统计分析法、数值法、解析法和生产试验法等进行估算。

5.4.2.3 对单独开采的地热天然露头(泉),应依据泉流量动态观测资料,采用泉流量衰减方程估算可开采量或取历年最低泉流量作为其可开采量。在资料丰富的条件下,宜采用丰水期和枯水期的流量评价可开采量。

5.4.2.4 地热资源评价热储范围:将温度大于 25 ℃ 的山区温泉或地热井作为地热资源评价的水温下限;断裂带开放型热储的热水以泉(群)或热水井的形式出露,其地热田由断裂带构成,或由几组断裂交叉包围的范围构成;断裂带半圈闭型热储,宜以估算的热储温度大于 25 ℃ 的范围作为地热田或地热异常区的范围。

6 地热资源储量可靠性评价

6.1 地热单井可靠性评价

6.1.1 按 5.3.1 确定单井稳定产量。

6.1.2 依据确定的单井稳定产量或行政管理部门批准的单井允许开采量,按相关公式估算单井开采权益保护的范围。对盆地型地热田,可接单井允许开采量开采 100 a、消耗热储温度下降 2 ℃ 的地热储存量,用热储法及圆面积公式估算地热井开采对热储的影响范围,视其为单井开采权益保护的范围。

$$R = \sqrt{\frac{36500Qf}{\delta M \pi}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

其中,

$$f = \frac{\rho_w c_w}{\rho_e c_e} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_e c_e = \varphi \rho_w c_w + (1 - \varphi) \rho_r c_r \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

R ——地热井开采 100 a 排出的热量对热储的影响半径,单位为米(m);

- Q ——地热井产量,单位为立方米每天(m^3/d);
 δ ——热储温度下降 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 时减少的地热储存量的比例,数值以“%”表示;
 M ——热储层厚度,单位为米(m);
 ρ_w ——热储水的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 ρ_r ——热储岩石的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 φ ——热储岩石的孔隙度;
 ρ_e ——热储层的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 c_e ——热储层的比热容,单位为千焦[耳]每千克开[尔文] $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$;
 c_w ——热储水的比热容,单位为千焦[耳]每千克开[尔文] $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$;
 c_r ——热储岩石的比热容,单位为千焦[耳]每千克开[尔文] $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

6.1.3 对盆地型地热田,可按单井允许开采量开采 100 a、消耗热储温度下降 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 时的地热储存量,假设除抽取和回灌的热量外,系统和外界没有能量交换,回灌未发生热突破且抽水井井口温度与回灌前温度一致,则回灌条件下单井开采权益保护半径的计算公式如下:

$$R = \sqrt{1 - \alpha\beta} \times \sqrt{\frac{Qtf}{\delta M \pi}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

其中,

$$\alpha = \frac{t_h - t_0}{t_r - t_0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = \frac{Q_h}{Q} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- t_r ——回灌前热储温度,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$);
 t_h ——回灌水温度,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$);
 t_0 ——基准温度,取恒温层温度或当地多年平均气温,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$);
 t ——时间,单位为年(a),取值为 100 a;
 Q_h ——回灌量,单位为立方米每天(m^3/d)。

6.1.4 按单井允许开采量开采 100 a,考虑热突破后果计算回灌条件下单井开采权益保护半径的公式如下:

$$R = \sqrt{\frac{3 \times 36500 Q f}{\pi M}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

6.1.5 对于盆地型地热田,当采用上述三种方法计算单井开采权益保护半径时,应选取一个最大开采权益保护半径。

6.1.6 对有一定补给的地热田,可按影响半径公式计算开采影响半径,综合考虑井间干扰因素,确定开采的合理井距权益保护范围。

6.1.7 对于已进行了地热可开采量评价的地热田或开采区,则可按行政管理部门认可的单井开采量占地热田或开采区可开采量的比例,确定其开采权益保护的范围及其相应的义务。

6.2 地热田或地热开采区可靠性评价

6.2.1 根据地热田的地热地质条件、勘查开发利用程度、地热动态,确定地热资源储量及不同勘查程度地热流体可开采量(见表 1)。

表 1 地热资源储量查明程度

类别		验证的	探明的	控制的	推断的
单泉		多年动态资料	年动态资料	调查实测资料	文献资料
单井		多年动态监测值	产能测试内插值	实际产能测试	试验资料外推
地 热 田	钻井控制程度	满足开发阶段要求	满足可行性阶段要求	满足预可行性阶段要求	其他目的勘探孔
	开采程度	全面开采	多井开采	个别井开采	自然排泄或未开采
	动态监测	5 a 以上	不少于 1 a	短期监测或偶尔测值	偶尔测值
	计算参数依据	勘查测试、多年开采 与多年动态	多井勘查试验及 经验值	个别井勘查、物探推测 和经验值	理论推断和经验值
	计算方法	数值法、统计分析等	解析法、比拟法等	热储法、比拟法、 热排量统计法等	热储法及理论推断

6.2.2 依据地热流体可开采量采出的热量,按下式计算地热田的产能:

$$W_t = 4.1868Q(t - t_0) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

W_t ——热功率,单位为千瓦[特](kW);

Q ——地热流体可开采量,单位为立方米每秒(m^3/s);

t ——地热流体温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

6.2.3 地热流体年开采累计可利用的热能量估算公式如下:

$$\sum W_t = 86.4DW_t \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$\sum W_t$ ——开采 1 a 可利用的热能,单位为兆焦[耳](MJ);

D ——全年开采日数(按 24 h 换算的总日数),单位为天(d)。

6.2.4 计算地热流体年(或 100 a)可开采量能采出的热量占热储中储存热量及地热流体中储存热量的比例,评价地热资源的开发潜力并比较计算结果的一致性。

6.2.5 依据地热资源条件及地热资源开发经济技术条件,确定合理的开采方案,并预测地热田的温度场、渗流场、流体化学成分等的变化趋势。

7 地热流体质量评价

7.1 地热流体不同用途评价

7.1.1 理疗热矿水评价:地热流体通常含有某些特有的矿物质(化学)成分,可作为理疗热矿水开发利用,可参考附录 F 对其属于何种类型的理疗热矿水做出评价。

7.1.2 饮用天然矿泉水评价:地热流体符合饮用天然矿泉水界限指标及限量指标的,可依据 GB 8537 进行评价。

7.1.3 生活饮用水评价:地热流体可作为生活饮用水源的,应根据 GB 5749 和 GB/T 14848 做出评价。

7.1.4 农业灌溉用水评价:低温地热流体(水)在用于采暖供热等目的后排放的地热废弃水,可用于农田灌溉,遵照 GB 5084 对其是否适宜农田灌溉做出评价。

7.1.5 渔业用水评价:低温地热水用于水产养殖的,遵照 GB 11607 对其是否符合水产养殖做出评价。

7.2 地热流体中矿物组分评价

中高温地热流体通常含有高浓度的矿物质,有的为热卤矿物水,可从中提取工业可利用成分,如碘(>20 mg/L)、溴(>50 mg/L)、铯(>80 mg/L)、锂(>25 mg/L)、铷(>200 mg/L)、锶(>5 mg/L)等,有的还可生产食盐、芒硝等,对达到工业利用可提取有用元素最低含量标准的,可参照《矿产资源工业要求手册》(2014年修订本)进行评价。

7.3 地热流体腐蚀性评价

7.3.1 地热流体中因含有氯离子、硫酸根、游离二氧化碳和硫化氢等组分而对金属有一定腐蚀性的,可通过挂片试验等测定其腐蚀率,对其腐蚀性做出评价。

7.3.2 可参照工业上的评价方法,用腐蚀系数(K_K)评价地热流体(水)的腐蚀性:

- $K_K > 0$,称为腐蚀性水;
- $K_K < 0$,并且 $K_K + 0.0503r(\text{Ca}^{2+}) > 0$,称为半腐蚀性水; $K_K < 0$,并且 $K_K + 0.0503r(\text{Ca}^{2+}) < 0$,称为非腐蚀性水。

7.3.3 腐蚀系数的计算。

- 对酸性水:

$$K_K = 1.008[r(\text{H}^+) + r(\text{Al}^{3+}) + r(\text{Fe}^{2+}) + r(\text{Mg}^{2+}) - r(\text{HCO}_3^-) - r(\text{CO}_3^{2-})] \quad \dots\dots (10)$$

- 对碱性水:

$$K_K = 1.008[r(\text{Mg}^{2+}) - r(\text{HCO}_3^-)] \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

r ——离子的毫克当量浓度,单位为毫克当量每升(meq/L)。

注:1 meq=1 mmol×原子价。

7.4 地热流体结垢评价

7.4.1 地热流体中的二氧化硅、钙和铁等组分因温度变化而结垢,可通过试验评价其结垢程度。

7.4.2 可参照工业上的评价方法,用锅垢总量(H_0)评价地热流体的结垢性:

- $H_0 < 125$,称为锅垢很少的地热流体;
- $125 \leq H_0 < 250$,称为锅垢少的地热流体;
- $250 \leq H_0 < 500$,称为锅垢多的地热流体;
- $H_0 \geq 500$,称为锅垢很多的地热流体。

$$H_0 = S + \rho + 36r(\text{Fe}^{2+}) + 17r(\text{Al}^{3+}) + 20r(\text{Mg}^{2+}) + 59r(\text{Ca}^{2+}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

H_0 ——锅垢总量,单位为毫克每升(mg/L);

S ——地热流体中的悬浮物含量,单位为毫克每升(mg/L);

ρ ——地热流体中的胶体($\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$)的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L)。

7.4.3 通过碳酸钙结垢趋势判断、评价地热流体结垢程度。

- 对氯离子含量高(大于或等于25%摩尔当量)的地热流体,可采用拉申指数(LI)判断碳酸钙的结垢趋势和腐蚀性程度,计算公式如下:

$$\text{LI} = \frac{\rho(\text{Cl}^-) + \rho(\text{SO}_4^{2-})}{\text{ALK}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$\rho(\text{Cl}^-)$ ——氯化物或卤化物的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L);

$\rho(\text{SO}_4^{2-})$ ——硫酸盐的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L);

ALK ——总碱度(以 CaCO_3 计),单位为毫克每升(mg/L)。

- 1) $\text{LI} \geq 0.5$, 不结垢,有腐蚀性; $0.5 \leq \text{LI} < 3.0$,有轻微腐蚀性; $3.0 \leq \text{LI} < 10.0$,有强腐蚀性。
- 2) $\text{LI} < 0.5$,可能结垢,没有腐蚀性。

- b) 当地热流体中氯离子含量较低(小于 25%摩尔当量)时,可根据雷兹诺指数(RI)定性估计地热流体碳酸钙的结垢趋势。雷兹诺指数计算公式如下:

$$\text{RI} = 2\text{pH}_s - \text{pH}_a \quad \text{..... (14)}$$

$$\text{pH}_s = -\lg c(\text{Ca}^{2+}) - \lg(\text{ALK}) + K_s \quad \text{..... (15)}$$

式中:

RI ——雷兹诺指数;

pH_s ——计算的地热流体的 pH;

pH_a ——实测的地热流体的 pH;

$c(\text{Ca}^{2+})$ ——地热流体中钙离子的浓度,单位为摩尔每升(mol/L);

K_s ——常数(当总固形物为 200 mg/L~6 000 mg/L 时,取值为 1.8~2.6,温度大于 100 °C 时取低值,低于 50 °C 时取高值)。

- 1) $\text{RI} < 4.0$, 结垢非常严重;
- 2) $4.0 \leq \text{RI} < 5.0$, 结垢严重;
- 3) $5.0 \leq \text{RI} < 6.0$, 结垢中等;
- 4) $6.0 \leq \text{RI} < 7.0$, 结垢轻微;
- 5) $\text{RI} \geq 7.0$, 不结垢。

8 地热资源开发利用评价

8.1 地热资源开发可行性评价

8.1.1 考虑当前地热资源开采技术的可能性、经济的合理性以及开发利用的科学性,对其开发的可行性做出评价。

8.1.2 依据地热井的成井深度,区别地热资源开采的经济性,分为:

- a) 经济的,成井深度小于 1 000 m。
- b) 较经济的,成井深度为 1 000 m~3 000 m。
- c) 有经济风险的,成井深度大于 3 000 m。

8.1.3 依据地热流体的出井口温度,评价可能的利用范围(见表 2)。

表 2 地热资源温度利用分级

温度分级		温度 °C	主要用途
高温地热资源(I级)		≥ 150	发电、烘干、工业利用、采暖
中温地热资源(II级)		$90 \sim < 150$	烘干、发电、采暖
低温地热资源	热水(III级)	$60 \sim < 90$	采暖、理疗、洗浴、温室种植
	温热水(IV级)	$40 \sim < 60$	理疗、休闲洗浴、采暖、温室种植、养殖
	温水(V级)	$25 \sim < 40$	洗浴、温室种植、养殖、农业灌溉和采用热泵技术的制冷供热
注:表中温度是指地热流体的出井口温度。			

8.1.4 依据地热井的地热流体单位产量大小,确定开采适宜性分区。

- a) 适宜开采区:地热井地热流体产量大于 $50 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。
- b) 较适宜开采区:地热井地热流体产量为 $5 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m}) \sim 50 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。
- c) 适宜性差开采区:地热井地热流体产量小于 $5 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。
- d) 地热田的开采适宜性应根据地热井统计规律进行确定。

8.1.5 依据地热流体化学组分的含量,确定可作为地热流体的利用方向、方式和排放要求(见表3)。

表3 不同质量地热流体的利用方向、方式和排放要求

溶解性总固体 mg/L	利用方向		利用方式		排放要求
	达到 GB 5749 或 GB 8537 的规定	达到理疗矿水 水质标准	理疗、洗浴	其他	
<1 000	生活饮用水及 饮用矿泉水	理疗洗浴、采暖、 农业等	直接利用	直接利用	医用处理后排放, 其他利用后回灌
1 000~<3 000		理疗洗浴、采暖等	直接利用	间接利用	直接利用处理后 排放,间接利用 后回灌
3 000~<10 000		理疗洗浴、采暖等	直接利用	间接利用	
$\geq 10 000$		理疗洗浴、采暖等	直接利用	间接利用	

8.1.6 依据地热流体可开采量及其产能,评价其可开发利用的规模。中、低温地热资源用于采暖、供生活热水、理疗、温泉洗浴、洗浴、农业温室、水产养殖等的规模估计见表4。

表4 采暖、供生活热水、理疗、温泉洗浴等耗水(热)量参考标准

项目	采暖 W/m^2	供生活热水 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{人})$	温泉洗浴 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{次})$	理疗 $\text{m}^3/(\text{床位} \cdot \text{a})$	农业温室 W/m^2	水产养殖 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
标准	50	15~20	0.3~0.5	100	80	5~7

8.2 地热资源开发利用环境影响评价

8.2.1 地热利用的节能减排效果估算

地热利用的节能减排效果估算可参照附录G执行。

8.2.2 地热流体排放对环境影响评价

8.2.2.1 高温地热流体中通常含有 CO_2 、 H_2S 等非凝结气体,应评价其对大气可能造成的污染,提出污染防治建议。

8.2.2.2 废地热流体的直接排放会造成热污染和其中有害组分对地表水、土壤水以及地下水的污染,应遵循 GB 8978 的规定评价其排放对环境的影响。

8.2.3 地面沉降及地面塌陷评价

8.2.3.1 对于新生界松散沉积层及半成岩热储层,应对开采地热流体可能产生的地面沉降做出评价,针

对可能出现的问题,提出相应的防治措施和建议。

8.2.3.2 上覆松散层厚度小的岩溶热储或基岩热储层,应对开采地热流体可能引发的对岩溶热储层的溶蚀和地面变形破坏(塌陷或沉降等)等做出评价,针对问题提出相应的防治措施和建议。

8.2.4 其他地质环境影响评价

8.2.4.1 地热地质景观保护评价。地热流体长期开发,可能导致地热田及其周边地区的地热显示、地热景观的消失和天然温泉的锐减,应做出保护性评价,保护代表性的地热自然景观。

8.2.4.2 海水入侵可能性评价。对海岸地区开采地热流体可能引起的海水入侵进行评价,确定合理的开采方式和开采量,防止海水入侵对地热田的破坏和影响。

8.2.4.3 浅层地下水源保护性评价。与浅层含水层有较密切水力联系的地区,对开采地热流体可能引起上覆含水层水质、水量的变化进行评价,确定热储合理开采量及浅层地下水源保护对策。

8.3 地热资源开发利用现状与潜力评价

8.3.1 以地热区(田)为单元,依据地热井和温泉调查数据按热储段和利用方向进行分类解析,分析各热储段和各利用方向的现状,并计算地热资源总开发利用量。

8.3.2 结合地热资源评价结果,分析地热资源的盈余量和开发利用潜力,论证获得开发利用潜力的途径、措施和可行性,合理开发和配置地热资源。

8.3.3 地热资源开发利用现状及潜力分析方法参见附录 H。

8.4 地热资源综合开发利用评价

地热资源开发利用应基于温度等级区划及流体水化学特征区划,并结合以往的开发利用情况、地区经济发展状况,充分考虑梯级开发利用技术等确定其合理开发利用方向。主要开发利用方向包括:地热发电、地热供暖、旅游疗养、养殖、种植和工业利用等。地热资源梯级综合利用参见附录 I。

9 地热资源勘查评价报告编写

9.1 编写要求

地热资源勘查评价工作完成后,应及时编写相应的地热资源勘查评价报告。

9.2 编写内容

9.2.1 单井地热资源勘查评价报告。单井勘查评价工作完成后,编写地热井勘查评价报告。报告内容应包括:前言;区域地热地质条件;地热井地质及地球物理测井;井产能测试与可开采量评价;流体质量评价;经济与环境评价、开采保护区论证;结论与开发利用建议等。

9.2.2 地热田(区)地热资源勘查评价报告。完成一个独立的地热田或具有一定开采规模的地区的地热资源勘查评价工作后,编写地热田(区)地热资源勘查评价报告。地热资源勘查评价报告编写提纲参见附录 J。

附录 A (资料性附录) 地热温度计

A.1 基本要求

A.1.1 对于温泉和地热井,可利用地热温度计估算热储温度,预测地热田潜力。

A.1.2 应用地热温度计的条件:①地下储存的流体为热水;②控制化学组分进入热水的化学反应只和温度相关;③热储层中用于地热温度计方法的化学组分有足够的补给;④热水与供应这些化学组分的储热岩体中特定矿物之间已经建立溶解平衡;⑤热储层的热水能迅速流出地表;⑥热水在流出地表的过程中,化学组分的浓度没有发生变化。

A.2 常用地热温度计

A.2.1 二氧化硅地热温度计

A.2.1.1 无蒸汽损失的石英地热温度计。热水中的二氧化硅是由热水溶解石英形成的,这部分热水在其达到取样点(泉口或井口)时没有沸腾,热储温度计算公式如下:

$$t = \frac{1\,309}{5.19 - \lg \rho(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad \text{..... (A.1)}$$

式中:

t ——热储温度,单位为摄氏度(℃);

$\rho(\text{SiO}_2)$ ——热水中溶解的硅酸形式的 SiO_2 的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L)。

A.2.1.2 最大蒸汽损失的石英地热温度计。如果溶解石英的这部分热水达到取样点时已发生了沸腾闪蒸,热储温度计算公式如下:

$$t = \frac{1\,522}{5.75 - \lg \rho(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad \text{..... (A.2)}$$

A.2.1.3 非晶质二氧化硅地热温度计。如果热水溶解了非晶质二氧化硅,热储温度计算公式如下:

$$t = \frac{731}{4.52 - \lg \rho(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad \text{..... (A.3)}$$

上述公式适用热储温度为 0℃~250℃。

A.2.1.4 玉髓地热温度计。如果地下热水中的二氧化硅是由热水溶解玉髓形成的,则当热水到达地面时没有发生蒸汽损失,其热储温度计算公式为

$$t = \frac{1\,032}{4.69 - \lg \rho(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad \text{..... (A.4)}$$

当热水到达地面时已发生蒸汽损失,热储温度计算公式为

$$t = \frac{1\,263}{5.32 - \lg \rho(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad \text{..... (A.5)}$$

A.2.1.5 α -方石英地热温度计。如果地下热水中二氧化硅是溶解 α -方石英形成的,则热储温度计算公式为

$$t = \frac{1\,000}{4.78 - \lg \rho(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad \text{..... (A.6)}$$

A.2.1.6 β -方石英地热温度计。如果地下热水中二氧化硅是溶解 β -方石英形成的,则热储温度计算公式为

$$t = \frac{781}{4.51 - \lg \rho(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 7})$$

A.2.1.7 使用二氧化硅地热温度计时,应考虑的因素包括:

- 当水沸腾时,水中二氧化硅随蒸汽闪蒸而含量增大,应采用式(A. 2)。
- 若取样之前可能发生二氧化硅聚合和沉淀作用,应用非晶质二氧化硅地热温度计试算,如有勘探钻孔时,计算温度应与采样时的实测温度进行对比,以验证是否发生了这种聚合和沉淀作用。
- 取样之后,随温度降低在样品运输和保存期间可能发生二氧化硅聚合作用,当水中二氧化硅含量大于 115 mg/L 时,取样时需作稀释处理。
- 除石英外,应注意其他硅酸盐对水中二氧化硅的影响。
- 当 pH 大于 8.5 时,应先进行水中硅酸形式的二氧化硅含量的计算。
- 地热温度计不适用已被稀释的热水。
- 对 pH 远小于 7 的酸性水不适用。

A.2.2 钠-钾地热温度计

A.2.2.1 根据水岩平衡和热动力方程推导的计算地热水温度的公式为

$$t = \frac{1\,390}{1.75 - \lg[\rho(\text{K}^+)/\rho(\text{Na}^+)]} - 273.15 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 8})$$

式中:

$\rho(\text{K}^+)$ ——水中 K^+ 的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L);

$\rho(\text{Na}^+)$ ——水中 Na^+ 的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L)。

A.2.2.2 在具备钠长石与钾长石平衡的条件下,温度高于 150℃ 时,可用下列公式计算地热水温度:

$$t = \frac{1\,217}{\lg[\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{K}^+)] + 1.48} - 273.15 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 9})$$

或

$$t = \frac{885.6}{\lg[\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{K}^+)] + 0.857\,3} - 273.15 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 10})$$

当 25℃ < t < 250℃ 时:

$$t = \frac{933}{\lg[\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{K}^+)] + 0.933} - 273.15 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 11})$$

当 250℃ ≤ t < 350℃ 时:

$$t = \frac{1\,319}{\lg[\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{K}^+)] + 1.699} - 273.15 \quad \dots\dots\dots (\text{A. 12})$$

以上各式不适用于 pH 远小于 7 的酸性水、富钙地热水(如出现钙华)及发生混合的地热水。

A.2.3 钠-钾-钙地热温度计

钠-钾-钙地热温度计是计算富钙地热水温度的公式:

$$t = \frac{1\,647}{\lg[c(\text{Na}^+)/c(\text{K}^+)] + \beta \left\{ \lg \left[\sqrt{c\left(\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}\right)} / c(\text{Na}^+) \right] + 2.24 \right\}} - 273.15 \quad \dots\dots (\text{A. 13})$$

式中:

$c(\text{Na}^+)$ —— Na^+ 的浓度,单位为摩尔每升(mol/L);

$c(K^+)$ —— K^+ 的浓度,单位为摩[尔]每升(mol/L)。

$c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$ —— Ca^{2+} 的基本单元浓度,单位为摩[尔]每升(mol/L)。

当 $t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且 $\lg\left[\sqrt{c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)}/c(Na^+)\right] > 0$ 时, $\beta = 4/3$; 当 $t > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\lg\left[\sqrt{c\left(\frac{1}{2}Ca^{2+}\right)}/c(Na^+)\right] < 0$ 时, $\beta = 1/3$; 沸腾及地下热水与冷淡水相混导致的组分浓度变化会影响本方法计算结果。沸腾使 CO_2 逸失,从而引起 $CaCO_3$ 沉淀,而水溶液中 Ca^{2+} 的损耗会导致计算温度过高。冷、热水混合时,如果热水比例小于 20%,则应考虑混合对本方法计算结果的影响,可用 β 值的选择来控制。

A.2.4 钠—钾—钙—镁地热温度计

此方法是钠—钾—钙地热温度计的镁校正法。当钠—钾—钙地热温度计用于富含 Mg^{2+} 的地热水时,会得出异常高的结果。R. O. 福尔尼埃和 R. W. 波特提出钠—钾—钙地热温度计的镁校正法,其温度校正值 Δt_{Mg} 用下列公式求得。

当 R 介于 5~50 之间时,

$$\Delta t_{Mg} = 10.66 - 4.7415R + 325.87(\lg R)^2 - \frac{1.032 \times 10^5 (\lg R)^3}{T} - \frac{1.968 \times 10^7 (\lg R)^2}{T^2} + \frac{1.605 \times 10^7 (\lg R)^3}{T^2} \quad \text{..... (A.14)}$$

当 $R < 5$ 时,

$$\Delta t_{Mg} = -1.03 + 59.97 \lg R + 145.05 (\lg R)^2 - \frac{36\,711 (\lg R)^3}{T} - \frac{1.67 \times 10^7 \lg R}{T^2} \quad \text{..... (A.15)}$$

其中,

$$R = \left[\frac{c\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)}{c\left(\frac{1}{2}Mg^{2+} + \frac{1}{2}Ca^{2+}\right) + c(K^+)} \right] \times 100 \quad \text{..... (A.16)}$$

式中:

$c\left(\frac{1}{2}Mg^{2+}\right)$ —— Mg^{2+} 的基本单元浓度,单位为摩[尔]每升(mol/L);

$c\left(\frac{1}{2}Mg^{2+} + \frac{1}{2}Ca^{2+}\right)$ —— Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的基本单元浓度,单位为摩[尔]每升(mol/L);

$c(K^+)$ —— K^+ 的浓度,单位为摩[尔]每升(mol/L);

T ——地热水的温度,单位为开[尔文](K);

Δt_{Mg} ——温度校正值,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)或开[尔文](K)(两者数值相同,无须换算)。

在使用钠—钾—钙—镁地热温度计时,应用钠—钾—钙—镁地热温度计计算结果减去 Δt_{Mg} ,并均以摄氏度($^{\circ}\text{C}$)为单位。但 Mg^{2+} 的高浓度指示在较低温度时达到水岩平衡,因此使用本方法时应谨慎。

A.2.5 钾—镁地热温度计

利用钾、镁质量浓度比计算地热水在浅部与围岩达到平衡时的温度。计算公式为

$$t = \frac{4\,410}{13.95 - \lg[\rho(K^+)/\rho(Mg^{2+})]} - 273.15 \quad \text{..... (A.17)}$$

式中:

$\rho(K^+)$ ——水中 K^+ 的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L);

$\rho(Mg^{2+})$ ——水中 Mg^{2+} 的质量浓度,单位为毫克每升(mg/L)。

A.2.6 硫酸盐—氧同位素地热温度计

此方法是洛依德(Lloyd)等人在 20 世纪 60 年代末的实验研究基础上建立的,其公式如下:

$$1\,000\ln\alpha = 2.88 \times 10^6 T^{-2} - 4.1 \quad \dots\dots\dots (A.18)$$

其中,

$$\alpha = (1\,000 + \delta^{18}O_{HSO_4^-}) / (1\,000 + \delta^{18}O_{H_2O})$$

式中:

T ——地热水的温度,单位为开[尔文](K);

$\delta^{18}O$ ——氧同位素比值,数值以“‰”表示。

A.2.7 气体地热温度计

根据钻孔排放气体浓度与测得的热储温度之间的相关关系,阿诺尔松(S. Arnorsson)等人提出了 5 个气体地热温度计,其中 CO_2 、 H_2S 和 H_2 为喷气孔蒸汽中的组分。在热储层水中气体的质量摩尔浓度的对数与温度的函数关系式如下:

$$\lg b(H_2S) = -11.80 - 0.060\,35T - 17\,691.09/T + 27.163\lg T \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

$$\lg b(H_2) = 11.98 - 0.084\,89T + 8\,254.09/T - 27.58\lg T \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

$$\lg b(H_2) = -3.04 - 10\,763.54/T + 7.003\lg T \quad \dots\dots\dots (A.21)$$

式中:

$b(H_2S)$ —— H_2S 的质量摩尔浓度,单位为摩[尔]每千克(mol/kg);

$b(H_2)$ —— H_2 的质量摩尔浓度,单位为摩[尔]每千克(mol/kg);

T ——温度,单位为开[尔文](K)。

对温度高于 300 °C 的地热水,计算公式为

$$\lg b(CO_2) = -1.09 - 3\,894.55/T + 2.532\lg T \quad \dots\dots\dots (A.22)$$

式中:

$b(CO_2)$ —— CO_2 的质量摩尔浓度,单位为摩[尔]每千克(mol/kg)。

当氯离子质量摩尔浓度大于或等于 500×10^{-6} mol/kg 时,计算热储温度在 200 °C ~ 300 °C 之间是合理的。

在温度低于 200 °C 时,计算公式为

$$\lg b(H_2S) = -1.24 - 4\,691.84/T + 2.830\lg T \quad \dots\dots\dots (A.23)$$

当氯离子质量摩尔浓度小于 500×10^{-6} mol/kg 时,计算热储温度在 200 °C ~ 300 °C 之间是合理的。

气体地热温度计用于预测高温地热系统中地下热水的温度。

附录 B

(资料性附录)

地热资源计算参数的确定

B.1 地热井参数

综合钻孔地质编录和试井资料,获得地热井的位置、深度、揭露热储厚度、强渗透段位置、单井涌水量、温度、压力、流体化学成分等。

B.2 热储几何参数

热储几何参数包括热储面积、厚度和地热能回收率等。

B.2.1 热储面积

B.2.1.1 沉积盆地型地热资源热储面积依据地热田的构造边界和同一深度的地温等值线圈定的范围确定。工作区仅涉及地热田的部分范围,应按勘查工作控制的实际面积计算。工作区涉及多个地热田,应将各地热田及地热异常区分界线、热储温度等值线和热储厚度等值线进行计算机数字化,计算各分区的面积。

B.2.1.2 隆起山地型地热资源的热储范围可由控热断裂构造圈闭,面积由地质构造圈定,可考虑拟化成变化的椭球体等进行面积计算。如热储范围界线模糊,可考虑地热异常点 1 km^2 范围作为热储计算范围。

B.2.1.3 地热资源调查阶段和预可行性调查阶段,热储面积可根据地面测绘和物探、化探资料综合分析推测;可行性勘查和开采阶段,热储面积应结合岩芯和岩屑录井、简易水文观测、地球物理测井以及水热蚀变等资料确定。

B.2.2 热储厚度

热储厚度应依据钻孔资料,结合地球物理勘探资料确定热储顶板深度和底板深度,依据近期开采技术水平和经济合理性确定计算的基础深度,然后计算基础深度之内的热储厚度。沉积盆地型地热资源热储厚度可采用地层厚度与砂厚比的乘积确定,基岩热储厚度可采用 $4\ 000\text{ m}$ 以浅基岩的评价平均厚度与储厚比的乘积确定。热储砂厚比通过地热田钻孔资料统计确定,基岩储厚比参照区域值确定。

B.2.3 热储地热能回收率

热储地热能回收率应根据热储的岩性、有效孔隙率、热储温度以及开采回灌技术条件合理确定。勘查程度较低,资料较少时,可取经验值。对于大型沉积盆地的新生代砂岩孔隙型热储,孔隙率大于 20% 时,回收率可取 25% ;对于岩溶型裂隙热储,回收率可取 $15\%\sim 20\%$;对于中生代砂岩和以花岗岩为代表的火成岩型裂隙热储,回收率可取 $5\%\sim 10\%$ 。

B.3 热储物理性质

热储物理性质包括热储温度、压力及岩石的密度、比热容、热导率等。

B.3.1 热储温度

B.3.1.1 有条件时,应通过地热井内剖面的温度测量获得热储顶板温度、底板温度和热储不同深度的温

度。在资料不充分时,可通过地温梯度推测热储的温度,也可用地球化学地热温度计计算热储温度。据此,可获得热储不同部位的温度分布情况。

B.3.1.2 根据地温梯度计算热储温度,计算公式为

$$t_z = t_0 + \frac{\Delta T}{100}(H - H_0) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

t_z ——热储中部温度,单位为摄氏度(℃);

t_0 ——恒温带温度或多年平均气温,单位为摄氏度(℃);

ΔT ——地温梯度,单位为摄氏度每百米(℃/100 m);

H ——热储中部埋深,单位为米(m);

H_0 ——恒温层深度,单位为米(m)。

B.3.2 热储压力

应通过地热井的试井资料获得热储的压力分布情况。

B.3.3 岩石的密度、比热容和热导率

有条件时,应通过试验测试得到岩石的密度、比热容和热导率。在勘查程度较低时,可取经验值(参见表 B.1)。

表 B.1 几种常见岩石和物质的比热容、密度和热导率

岩石和物质名称	比热容 J/(kg·K)	密度 kg/m ³	热导率 W/(m·K)
花岗岩	794	2 700	2.721
石灰岩	920	2 700	2.010
砂岩	878	2 600	2.596
钙质砂(含水率为 43%)	2 215	1 670	0.712
干石英砂(中—细粒)	794	1 650	0.264
石英砂(含水率为 8.3%)	1 003	1 750	0.586
砂质黏土(含水率为 15%)	1 379	1 780	0.921
空气(常压)	1 003	1.29	0.023
冰	2 048	920	2.219
水(平均)	4 180	1 000	0.599
注:引自 GB/T 11615。			

B.4 热流体性质

B.4.1 密度、焓

这些参数与地热水所处的温度和压力有关。在地热流体含盐量不高,且不含非凝结气体时,这些参数可从表 B.2 查得,否则需要适当修正,或通过 IAPWS—IF97 方程求得。

表 B.2 饱和蒸汽表

温度 ℃	压力 bar	水的密度 kg/m ³	蒸汽的密度 kg/m ³	水的焓 kJ/kg	蒸汽的焓 kJ/kg
0	0.006 108	999.8	0.004 847	—0.04	2 501.6
5	0.008 718	1 000.0	0.006 795	21.01	2 510.7
10	0.012 270	999.7	0.009 396	41.99	2 519.9
15	0.017 039	999.2	0.012 82	62.94	2 529.1
20	0.023 37	998.3	0.017 29	83.86	2 538.2
25	0.031 66	997.1	0.023 04	104.77	2 547.3
30	0.042 41	995.1	0.030 37	125.66	2 556.4
35	0.056 22	994.1	0.039 61	146.56	2 565.4
40	0.073 75	992.2	0.051 16	167.45	2 574.4
45	0.095 82	990.2	0.065 46	188.35	2 583.3
50	0.123 35	988.0	0.083 02	209.26	2 592.2
55	0.157 41	985.7	0.104 4	230.17	2 601.0
60	0.199 20	983.1	0.130 2	251.09	2 609.7
65	0.250 1	980.5	0.161 2	272.02	2 618.4
70	0.311 6	977.7	0.198 2	292.97	2 626.9
75	0.385 5	974.7	0.241 9	313.94	2 635.4
80	0.473 6	971.6	0.293 3	334.92	2 643.8
85	0.578 0	968.4	0.353 5	355.92	2 652.0
90	0.701 1	965.1	0.423 5	376.94	2 660.1
95	0.845 3	961.7	0.504 5	397.99	2 668.1
100	1.013 3	958.1	0.597 7	419.06	2 676.0
105	1.208 0	954.5	0.704 6	440.17	2 683.7
110	1.432 7	950.7	0.826 5	461.32	2 691.3
115	1.690 6	946.8	0.965 0	482.50	2 698.7
120	1.985 4	942.8	1.122	503.72	2 706.0
125	2.321 0	938.7	1.298	524.99	2 713.0
130	2.701 3	934.6	1.497	546.31	2 719.9
135	3.131	930.3	1.719	567.68	2 726.6
140	3.614	925.9	1.967	589.10	2 733.1
145	4.155	921.4	2.242	610.60	2 739.3
150	4.760	916.8	2.548	632.15	2 745.4
155	5.433	912.1	2.886	653.78	2 751.2
160	6.181	907.3	3.260	675.47	2 756.7
165	7.008	902.3	3.671	697.25	2 762.0

表 B.2 饱和蒸汽表(续)

温度 ℃	压力 bar	水的密度 kg/m ³	蒸汽的密度 kg/m ³	水的焓 kJ/kg	蒸汽的焓 kJ/kg
170	7.920	897.3	4.123	719.12	2 767.1
175	8.924	892.2	4.618	741.07	2 771.8
180	10.027	886.9	5.160	763.12	2 776.3
185	11.233	881.5	5.752	785.26	2 780.4
190	12.551	876.0	6.397	807.52	2 784.3
195	13.987	870.4	7.100	829.88	2 787.8
200	15.549	864.7	7.864	852.37	2 790.9
205	17.243	858.8	8.694	874.99	2 793.8
210	19.077	852.8	9.593	897.74	2 796.2
215	21.060	846.7	10.57	920.63	2 798.3
220	23.198	840.4	11.62	943.67	2 799.9
225	25.501	833.9	12.76	966.89	2 801.2
230	27.976	827.3	14.00	990.26	2 802.0
235	30.632	820.6	15.33	1 013.8	2 802.3
240	33.478	813.6	16.76	1 037.6	2 802.2
245	36.523	806.5	18.31	1 061.6	2 801.6
250	39.776	799.2	19.99	1 085.8	2 800.4
255	43.246	791.7	21.79	1 110.2	2 798.7
260	46.943	783.9	23.73	1 134.9	2 796.4
265	50.877	776.0	25.83	1 159.9	2 793.5
270	55.058	767.8	28.10	1 185.2	2 789.9
275	59.496	759.3	30.55	1 210.9	2 785.5
280	64.202	750.5	33.19	1 236.8	2 780.4
285	69.186	741.5	36.06	1 263.2	2 774.5
290	74.461	732.1	39.16	1 290.0	2 767.6
295	80.037	722.4	42.53	1 317.3	2 759.8
300	85.927	712.2	46.19	1 345.0	2 751.0
注 1:引自 GB/T 11615。					
注 2:1 bar=100 kPa。					

B.4.2 两相热流体的焓

两相热流体的热量(焓)的计算公式为

$$h = h_g w_g + h_l w_l \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

h ——水汽混合物的焓,单位为千焦[耳]每千克(kJ/kg);

h_g ——气体的焓,单位为千焦[耳]每千克(kJ/kg);

h_l ——水的焓,单位为千焦[耳]每千克(kJ/kg);

w_g ——气体的质量分数;

w_l ——水的质量分数。

B.4.3 黏滞系数

地热流体的运动黏滞系数主要取决于温度的高低,受压力变化的影响比较小。蒸汽的运动黏滞系数远大于水的运动黏滞系数。动力黏滞系数和运动黏滞系数之间的关系为

$$\mu = \nu \cdot \rho \quad \text{..... (B.3)}$$

式中:

μ ——动力黏滞系数,单位为千克每米秒[kg/(m·s)];

ν ——运动黏滞系数,单位为平方米每秒(m²/s);

ρ ——水的密度,单位为千克每立方米(kg/m³)。

压力为1 bar~400 bar时,水(蒸汽)的运动黏滞系数参见表 B.3。

表 B.3 压力为1 bar~400 bar时水(蒸汽)的运动黏滞系数

温度 ℃	运动黏滞系数 10 ⁻⁶ m ² /s					
	1 bar	50 bar	100 bar	200 bar	300 bar	400 bar
0.01	1.79	1.78	1.76	1.73	1.71	1.68
5	1.52	1.51	1.50	1.48	0.46	1.44
10	1.31	1.30	1.29	1.28	1.27	0.25
15	1.14	1.13	1.13	1.12	1.11	1.10
20	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98
25	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87
30	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79
35	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71
40	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65
45	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
50	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
55	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
60	0.47	0.47	0.47	0.48	0.48	0.48
65	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
70	0.41	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42
75	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
80	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
85	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

表 B.3 压力为 1 bar~400 bar 时水(蒸汽)的运动黏滞系数(续)

温度 ℃	运动黏滞系数 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$					
	1 bar	50 bar	100 bar	200 bar	300 bar	400 bar
90	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
95	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
100	20.82	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
105	21.44	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29
110	22.07	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
115	22.71	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
120	23.36	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
125	24.02	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
130	24.69	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
135	25.37	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23
140	26.06	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22
145	26.76	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
150	27.47	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
155	28.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20
160	28.69	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
165	29.67	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19
170	30.42	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
175	31.18	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
180	31.95	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
185	32.74	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
190	33.53	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17
195	34.33	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
200	35.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
205	35.97	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16
210	36.81	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
215	37.65	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
220	38.50	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15
225	39.37	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15
230	40.24	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15
235	41.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
240	42.02	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
245	42.93	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14

表 B.3 压力为 1 bar~400 bar 时水(蒸汽)的运动黏滞系数(续)

温度 ℃	运动黏滞系数 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$					
	1 bar	50 bar	100 bar	200 bar	300 bar	400 bar
250	43.84	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14
255	44.77	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14
260	45.70	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
265	46.65	0.72	0.13	0.13	0.13	0.13
270	47.60	0.75	0.13	0.13	0.13	0.13
275	48.57	0.77	0.13	0.13	0.13	0.13
280	49.54	0.80	0.13	0.13	0.13	0.13
285	50.53	0.82	0.12	0.13	0.13	0.13
290	51.52	0.85	0.12	0.12	0.13	0.13
295	52.53	0.87	0.12	0.12	0.13	0.13
300	53.54	0.90	0.12	0.12	0.12	0.13
注 1:引自 GB/T 11615。						
注 2:黑体数据为气体状态的黏滞系数。						

B.5 热储渗透性和贮存流体能力的参数

B.5.1 基本内容

包括孔隙度、有效孔隙度、渗透率、渗透系数、导水系数、弹性释水率、弹性释水系数(贮水系数)等。在具有较长地热田监测资料的情况下,可通过监测资料反求热储的这些参数。在建立地热田的数值模型时,如果实测资料不充分,在建立数值模型后,可通过模型反求参数。

B.5.2 孔隙度和有效孔隙度

孔隙度可通过实验测定,也可通过地球物理测井数据计算。有效孔隙度可通过试井资料计算。

B.5.3 渗透率、渗透系数、导水系数、弹性释水率和弹性释水系数

B.5.3.1 渗透率、渗透系数、导水系数是表示热储渗透性的参数,它们之间的关系为

$$k = \frac{\mu}{\rho g} K \quad \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

$$T = KM \quad \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

式中:

k ——渗透率,单位为平方米(m^2);

μ ——地热流体的动力黏滞系数,单位为千克每米秒 $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})]$;

ρ ——流体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

g ——重力加速度,单位为米每平方秒(m/s^2),取值为 9.8 m/s^2 ;

K ——渗透系数,单位为米每秒(m/s);

T ——导水系数,单位为平方米每秒(m^2/s);

M ——热储层厚度,单位为米(m)。

弹性释水率和弹性释水系数是表示热储贮存能力的参数。流体的相态不同,热储的贮存机理不同,其贮存能力存在很大的差别。贮存液态水的承压热储的弹性释水率和弹性释水系数为

$$s = \rho_w [\varphi C_w + (1 - \varphi) C_r] \quad \text{..... (B. 6)}$$

$$S = s \cdot M \quad \text{..... (B. 7)}$$

式中:

s ——热储的弹性释水率,单位为每米(m^{-1});

ρ_w ——地热流体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

φ ——热储孔隙度;

C_w ——流体的压缩系数,单位为每帕[斯卡](Pa^{-1});

C_r ——热储岩石的压缩系数,单位为每帕[斯卡](Pa^{-1});

S ——热储的弹性释水系数;

M ——热储层厚度,单位为米(m)。

B. 5. 3. 2 采用稳定流试井资料求得渗透系数、渗透率和流体导水系数。

- a) 地热单井稳定流降压试验时,用裘布依公式和 W. Sihadrt 影响半径经验公式,采用迭代法求取热储渗透系数和降压影响半径,计算公式如下:

$$K = \frac{0.336Q}{s_w M} \lg \frac{R}{r_w} \quad \text{..... (B. 8)}$$

$$R = 10s_w \sqrt{K} \quad \text{..... (B. 9)}$$

式中:

K ——热储平均温度下的热储层渗透系数,单位为米每秒(m/s);

Q ——抽水流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

s_w ——抽水井稳定水位降深,单位为米(m);

M ——热储层厚度,单位为米(m);

R ——降压影响半径,单位为米(m);

r_w ——抽水井热储段井半径,单位为米(m)。

- b) 多井降压试验,当有一个观测井时,如果观测井受抽水井主井影响水位有变化时,计算降压影响半径和热储渗透系数的公式如下:

$$\lg R = \frac{s_w \lg r - s_1 \lg r_w}{s_w - s_1} \quad \text{..... (B. 10)}$$

$$K = \frac{0.336Q}{M(s_w - s_1)} \lg \frac{r}{r_w} \quad \text{..... (B. 11)}$$

式中:

s_1 ——观测井稳定水位降深,单位为米(m);

r ——观测井与抽水井井底水平距离,单位为米(m)。

- c) 多井降压试验,当有两个观测井时,降压影响半径和热储渗透系数计算公式如下:

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \quad \text{..... (B. 12)}$$

$$K = \frac{0.336Q}{M(s_1 - s_2)} \lg \frac{r_2}{r_1} \quad \text{..... (B. 13)}$$

式中:

s_1 ——近观测井稳定水位降深,单位为米(m);

s_2 ——远观测井稳定水位降深,单位为米(m);

r_1 ——近观测井与抽水井井底水平距离,单位为米(m);

r_2 ——远观测井与抽水井井底水平距离,单位为米(m)。

d) 利用压力测试时,参数求取公式如下(有一个观测井):

$$K = \frac{Qg}{2\pi\Delta PM} \ln \frac{r_1}{r_w} \quad \text{..... (B. 14)}$$

式中:

ΔP ——使水达到稳定状态时,抽水井与观测井之间的流体压力差,单位为帕[斯卡](Pa)。

B. 5. 3. 3 采用非稳定流试井资料可求得热储的渗透系数、渗透率、导水系数、弹性释水率和弹性释水系数。

a) Theis 配线法。通过绘制 $W(u) - 1/u$ 标准曲线,以及实测的 $s - t/r^2$ 曲线或 $s - t$ 曲线,采用 Theis 配线法计算相关参数,计算公式如下:

$$K = \frac{0.08Q}{sM} W(u) \quad \text{..... (B. 15)}$$

$$\mu^* = \frac{r^2}{4t} \frac{1}{u} \quad \text{..... (B. 16)}$$

$$a = \frac{T}{\mu^*} \quad \text{..... (B. 17)}$$

$$u = \frac{r^2}{4at} \quad \text{..... (B. 18)}$$

式中:

$W(u)$ ——井函数;

s ——抽水任一时刻的水位降深,单位为米(m);

μ^* ——含水层的贮水系数;

a ——含水层的导压系数,单位为平方米每天(m^2/d);

t ——抽水开始到计算时的延续时间,单位为天(d);

r ——观测孔与抽水井井底水平距离,单位为米(m)。

b) 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 Jacob 公式计算参数。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2\mu^*} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25Tt}{r^2\mu^*} \quad \text{..... (B. 19)}$$

式中:

t ——抽水开始到计算时的延续时间,单位为天(d);

s ——抽水任一时刻的水位降深,单位为米(m)。

c) 降压曲线拟合求参方法。利用相对误差较小的大降深试验数据,绘制 $s_w - t$ 历时曲线,采用 Theis 井函数拟合求参数。充分利用实测数据,通过调整导水系数及压力传导系数,使理论曲线与实测曲线达到最佳拟合状态,从而获得热储参数。对于基岩热储,主要拟合出流体温度基本稳定后的曲线尾支段。

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{..... (B. 20)}$$

原创力文档
max.book118.com

$$W(u) = -0.577\,216 - \ln u + u - \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{n n!} \quad \text{..... (B. 21)}$$

式中:

$s(r, t)$ ——任意点任一时刻的热储压力降低值,单位为米(m);

t ——抽水开始到计算时的延续时间,单位为天(d)。

- d) 水位恢复资料求参数方法。当 $u < 0.01$ 时,依据 Theis 叠加公式,绘制降深—历时对数曲线,添加线性趋势线获得趋势线斜率 $i = 2.3Q/(4\pi T)$,求取导水系数。

$$s_r = \frac{2.3Q}{\pi T} \lg \frac{t}{t - t_0} \quad \text{..... (B. 22)}$$

式中:

s_r ——剩余降深值,单位为米(m);

t_0 ——抽水开始到计算时的延续时间,单位为天(d)。

测距抽水开始时间,单位为天(d)。

降压试验求参数方法。越流系统中降压试验可采用 Hantush—Jacob 公式计算参数如下:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B} \right) \quad \text{..... (B. 23)}$$

$$R = 1.123B \quad \text{..... (B. 24)}$$

$$s_p = \frac{Q}{4\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B} \right) = \frac{1}{2} s_{\max} \quad \text{..... (B. 25)}$$

$$t_p = \frac{\mu^* B r}{2T} \quad \text{..... (B. 26)}$$

$$i_p = \frac{2.3Q}{4\pi T} e^{-\frac{r^2}{B^2}} \quad \text{..... (B. 27)}$$

$$\frac{2.3s_p}{i_p} = K_0 \left(\frac{r}{B} \right) e^{\frac{r^2}{B^2}} \quad \text{..... (B. 28)}$$

零阶第二类虚宗量 Bessel 函数;

越流因素,单位为米(m);

—lgt 曲线拐点 P 处的降深,单位为米(m);

—lgt 曲线拐点 P 处的时间,单位为秒(s);

—lgt 曲线拐点 P 处切线的斜率;

最大降深,单位为米(m)。

分析法求得渗透系数、渗透率。如果井在时间 $t=0$ 时开始抽水,稳定流量为 q 或 W 的变化为径向距离和时间的函数。

$$\Delta P = P - P_0 = -\frac{q\mu}{4\pi kM} E_1 \left(\frac{\varphi\mu Cr^2}{4kt} \right) = -\frac{W\mu}{4\pi kM} E_1 \left(\frac{\varphi\mu Cr^2}{4kt} \right) \quad \text{..... (B. 29)}$$

$$E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{y} e^{-y} dy \quad \text{..... (B. 30)}$$

式中:

$K_0 \left(\frac{r}{B} \right)$ ——

B ——

s_p ——

t_p ——

i_p ——

$s_{\max}$ ——

原创力文档
max.book118.com

3.5.3.4 采用半对数 $W(=pq)$,含水层中压

式中:

ΔP ——热储层中压力的变化,单位为帕[斯卡](Pa);

P ——压力,单位为帕[斯卡](Pa);

P_0 ——开始抽水时的压力,单位为帕[斯卡](Pa);

q ——体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

W ——井中质量流量,单位为千克每秒(kg/s);

ν ——热流体运动黏滞系数,单位为平方米每秒(m^2/s);

μ ——热流体动力黏滞系数,单位为千克每米秒[$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$];

k ——渗透率,单位为平方米(m^2);

M ——热储层厚度,单位为米(m);

φ ——热储孔隙度;

C ——压缩系数;

r ——观测半径,单位为米(m)。

对于 x 无限小时,指数积分 E_1 存在渐近线:

$$E_1(x) \approx -\ln x - \gamma = 2.303 \lg x - \gamma \quad \dots\dots\dots (\text{B. 31})$$

式中:

γ ——欧拉常数,取值为 0.577 2。

$$\begin{aligned} -\Delta P = P_0 - P &= \frac{q\mu}{4\pi kM} E_1 \left(2.303 \lg \frac{4kt}{\varphi\mu Cr^2} - 0.577 2 \right) \\ &= m \left[\lg t + \lg \left(\frac{4kt}{\varphi\mu Cr^2} \right) - 0.251 \right] \quad \dots\dots\dots (\text{B. 32}) \end{aligned}$$

$$m = \frac{2.303q\mu}{4\pi kM} \quad \dots\dots\dots (\text{B. 33})$$

式中:

t ——时间,单位为秒(s)。

考虑到压力随时间变化,流量以半对数形式变化,可作一条渐近直线,这条线主要受斜率 m 和特定时间 t 的值决定。当斜率确定后,假定体积流量已知,可识别出斜率—厚度:

$$kM = \frac{2.303q\mu}{4\pi m} \quad \dots\dots\dots (\text{B. 34})$$

地热井中质量流量 W 更容易确定,那么用 $W\nu$ 代替 $q\mu$,可写成:

$$kM = \frac{2.303W\nu}{4\pi m} \quad \dots\dots\dots (\text{B. 35})$$

那么在某时刻, ΔP 与 m 的比值可转化为

$$\frac{\Delta P}{m} = -\lg \left[\left(\frac{4kM}{\mu} \right) \left(\frac{4}{\varphi CM} \right) \frac{t}{r^2} \right] + 0.251 \quad \dots\dots\dots (\text{B. 36})$$

或

$$\varphi CM = 2.25 \left(\frac{kM}{\mu} \right) \left(\frac{t}{r^2} \right) 10^{\Delta P/m} \quad \dots\dots\dots (\text{B. 37})$$

式中:

t ——时间,单位为秒(s)。

B.6 监测资料

包括地热井的生产量、温度、压力、化学成分等随时间变化的资料,专门监测井的温度、压力随时间的变化情况。

B.7 热储的边界条件

包括边界的位置、热力学和流体动力学特征等。可通过地质调查、钻井地质、地球物理勘探、地球化学勘探和试井等资料分析热储的边界条件。

附录 C
(资料性附录)
地热资源储量计算方法

C.1 热储法

C.1.1 基本要求

C.1.1.1 采用热储法估算地热资源储量应先确定地热田的面积(或计算区范围)和计算/评价的基准面深度。地热田的面积最好依据热储的温度划定。地热田温度的下限标准应根据当地的地热可能用途确定,或根据规划的利用方式确定。在勘查程度比较低,对热储温度的分布不清楚时,可采用浅层温度异常范围、地温梯度异常范围大致圈定地热田的范围,也可结合地球物理勘探方法圈定地热田的范围。计算/评价的下限深度应根据当地的经济状况、地热资源的开采技术条件、地热利用的经济效益等因素综合考虑。

C.1.1.2 计算/评价热储范围确定后,首先应根据热储的几何形状(顶板埋深、底板埋深和厚度)、温度、孔隙度的空间变化,以及勘查程度的高低将计算/评价热储范围划分成若干个子区,为每个子区的各项参数分别赋值;然后,计算出每个子区的热储存量、地热水储存量;最后,把各子区的计算结果累加就得到了地热田(或计算区)的热储存量和地热水储存量。

C.1.2 基本公式

估算热储中储存的热量及地热田地热资源的潜力,可按下列式计算:

$$Q = Q_r + Q_w \quad \text{..... (C. 1)}$$

$$Q_r = AM\rho_r c_r (1 - \varphi)(t_r - t_0) \quad \text{..... (C. 2)}$$

$$Q_L = Q_1 + Q_2 \quad \text{..... (C. 3)}$$

$$Q_1 = A\varphi M \quad \text{..... (C. 4)}$$

$$Q_2 = ASH \quad \text{..... (C. 5)}$$

$$Q_w = Q_L \epsilon_w \rho_w (t_r - t_0) \quad \text{..... (C. 6)}$$

式中:

Q ——热储中储存的热量,单位为焦[耳](J);

Q_r ——岩石中储存的热量,单位为焦[耳](J);

Q_w ——水中储存的热量,单位为焦[耳](J);

Q_L ——热储中储存的水量,单位为立方米(m^3);

Q_1 ——截至计算时刻,热储孔隙中热水的静储量,单位为立方米(m^3);

Q_2 ——水位降低到目前取水能力极限深度时,热储释放的水量,单位为立方米(m^3);

A ——计算区面积,单位为平方米(m^2);

M ——热储层厚度,单位为米(m);

ρ_r ——热储岩石密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

c_r ——热储岩石比热容,单位为焦[耳]每千克开[尔文][$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$];

φ ——热储岩石的孔隙率;

t_r ——热储温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

- t_0 ——当地年平均气温,单位为摄氏度(°C);
 ρ_w ——地热水密度,单位为千克每立方米(kg/m³);
 S ——弹性释水系数;
 H ——计算热储起始点以上水头高度,单位为米(m);
 c_w ——水的比热容,单位为焦[耳]每千克开[尔文][J/(kg·K)]。

C.1.3 地热资源可开采量

当资料较少,无法明确计算地热流体可开采量时,地热资源可开采量可采用回收率法进行计算。回收率根据工作区的实际情况确定,具体参考附录 B.2.3 确定。地热资源可开采量计算公式如下:

$$Q_k = R_E \cdot Q \quad \text{..... (C.7)}$$

式中:

- Q_k ——地热资源可开采量,单位为千焦[耳](kJ);
 R_E ——回收率;
 Q ——地热资源储量,单位为千焦[耳](kJ)。

C.1.4 地热流体储存量

地热流体储存量包括容积储存量和弹性储存量两部分,计算公式如下:

$$Q_{ws} = \varphi V + S(h - H)A \quad \text{..... (C.8)}$$

式中:

- Q_{ws} ——地热流体储存量,单位为立方米(m³);
 φ ——热储岩石孔隙率;
 V ——热储体积,单位为立方米(m³);
 S ——弹性释水系数;
 h ——平均承压水头标高,单位为米(m);
 H ——平均热储顶面标高,单位为米(m);
 A ——评价热储面积,单位为平方米(m²)。

C.2 地表热流量法

C.2.1 基本公式

地表热流量法是根据地热田地表散发的热量估算地热资源储量。宜在勘查程度低、无法使用热储法情况下使用。地热资源储量计算公式如下:

$$Q = pt = (p_1 + p_2)t \quad \text{..... (C.9)}$$

式中:

- Q ——一定时间段内地热田散发的热量,单位为焦[耳](J);
 p ——单位时间地热田散发的热量,单位为瓦[特](W);
 t ——计算时间段,单位为秒(s);
 p_1 ——单位时间通过岩石传导散发到空气中的热量,单位为瓦[特](W);
 p_2 ——单位时间温泉、热泉和喷气孔等散发的热量,单位为瓦[特](W)。

C.2.2 泉(井)流量法

C.2.2.1 对于断裂带开放型热储的地热田,地热水主要以温泉或自流井的形式排泄,将温泉和自流井的总流量作为地热田的地热流体可开采量。

C.2.2.2 对于泉(井)不自流,但有地热井抽水试验资料的地热田,根据抽水试验资料,将 100 m 水位降深的单井涌水量之和作为地热田的可开采量。

C.2.3 排泄量法

对于断裂带半圈闭型热储的地热田,地下热水以温泉、自流井和第四系潜流的形式排泄,其总排泄量可代表地热田的总补给量。考虑到第四系潜流不能被全部开采利用,根据经验,可将潜流量的 70% 作为可利用量,则 70% 的第四系潜流量以及全部的温泉流量、自流井流量及开采量作为地热田的地热流体可开采量。

C.2.4 补给量法

对于地热地质条件已基本查明的地热田,利用其补给量计算地热田的可开采量,其中侧向补给量取其 70% 作为地热流体可开采量。

C.3 解析法

C.3.1 基本要求

C.3.1.1 在勘查程度比较低,可用资料比较少时,可采用解析法估算地热井或地热田的地热流体可开采量。

C.3.1.2 当热储可概化为均质、各向同性、等厚、各处初始压力相等的无限(或存在直线边界)的承压含水层时,可采用非稳定流 Theis 公式计算单井的开采量、水位(压力)随开采时间的变化,从而计算出在给定的压力允许下降值下地热水的可开采量,对单井的地热资源进行评价。

C.3.2 采用最大降深法计算地热流体可开采量

采用最大允许降深法,设定一定开采期限内(100 a),计算区中心水位降深与单井开采附加水位降深之和不大于 100 m 时,求得的最大开采量为计算区地热流体可开采量。对于山区基岩裂隙热水,最大降深宜考虑地热开采井揭露的热水储集带埋藏深度。地热流体可开采量表达式为

$$Q_{sk} = \frac{4\pi Ts_1}{\ln(6.11t)} = \frac{4\pi Ts_1}{\ln\left(\frac{6.11Tt/R_k^2}{\mu^*}\right)} \quad \text{..... (C. 10)}$$

$$Q_{wd} = \frac{2\pi Ts_2}{\ln(0.473R_d/r)} \quad \text{..... (C. 11)}$$

式中:

Q_{sk} ——地热流体可开采量,单位为立方米每年(m^3/a);

T ——导水系数,单位为平方米每年(m^2/a);

s_1 ——计算区中心水位降深,单位为米(m);

t ——开采时间,单位为年(a);

μ^* ——热储含水层弹性释水系数;

R_k ——开采区半径,单位为米(m);

Q_{wd} ——单井地热流体可开采量,单位为立方米每年(m^3/a);

s_2 ——单井附加水位降深,单位为米(m);

R_d ——单井控制半径,单位为米(m);

r ——抽水井半径,单位为米(m)。

C.3.3 考虑回灌条件下地热流体可开采量计算

C.3.3.1 采用热突破公式计算回灌条件下地热流体可开采量

在隔水隔热均一、等厚的热储层中,热量只靠对流方式传递时,对井系统的热突破公式为

$$t = \frac{\pi R_1^2 M}{3Qf} \quad \text{..... (C.12)}$$

式中:

t ——热突破时间,单位为天(d);

R_1 ——井间距,单位为米(m)。

当 t 取 100 a(36 500 d)时,式(C.12)可变换成下式:

$$R_1 = \sqrt{\frac{3 \times 36\,500 Qf}{\pi M}} \quad \text{..... (C.13)}$$

故,采用热突破公式计算的回灌条件下地热流体可开采量为

$$Q_s = \frac{AQ}{\pi R_1^2} = \frac{AM}{3 \times 36\,500 f} \quad \text{..... (C.14)}$$

$$f = \frac{\rho_w c_w}{\rho_r c_r}; \rho_r c_r = \varphi \rho_w c_w + (1 - \varphi) \rho_r c_r \quad \text{..... (C.15)}$$

式中:

Q_s ——回灌条件下允许开采量,单位为立方米每天(m^3/d);

A ——评价面积,单位为平方米(m^2);

M ——热储层厚度,单位为米(m);

φ ——热储岩石孔隙度;

ρ_r ——热储岩石的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ρ_w ——地热流体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ρ_r ——热储层的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

c_w ——地热流体的比热容,单位为千焦[耳]每千克开[尔文][$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$];

c_r ——热储岩石的比热容,单位为千焦[耳]每千克开[尔文][$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$];

c_r ——热储层的比热容,单位为千焦[耳]每千克开[尔文][$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$].

C.3.3.2 采用回灌条件下单井开采权益保护半径计算地热流体可开采量

对于盆地型地热田,当满足假设条件:①除了抽取和回灌的热量外,系统与外界没有能量交换;②按回灌条件下开采 100 a,热储温度下降 2°C ;③回灌未发生热突破且抽水井井口温度与回灌前温度一致;采用下式估算回灌条件下地热井对热储的影响半径,以及回灌条件下流体可开采量:

$$R_2 = \sqrt{1 - \alpha\beta} \times \sqrt{\frac{Qt f}{\delta M \pi}} \quad \text{..... (C.16)}$$

$$Q_s = \frac{AQ}{\pi R_2^2} = \frac{\delta AM}{(1 - \alpha\beta) t f} \quad \text{..... (C.17)}$$

$$\alpha = (t_h - t_0) / (t_r - t_0); \beta = Q_h / Q \quad \text{..... (C.18)}$$

式中:

R_2 ——回灌条件下地热井对热储的影响半径,单位为米(m);

β ——回灌率,考虑热储岩性和孔隙裂隙发育情况,孔隙型层状热储层取 30%,岩溶型层状热储层取 90%,裂隙型层状热储层取 50%,若有实测值,应优先采用;

t ——时间,单位为年(a),取值为 100 a;

- δ ——热储温度下降 2℃ 减少的地热储存量的比例;
 Q_s ——回灌条件下允许开采量,单位为立方米每天(m^3/d);
 Q ——地热井产量,单位为立方米每天(m^3/d);
 Q_h ——回灌量,单位为立方米每天(m^3/d);
 t_h ——回灌温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
 t_r ——回灌前热储温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),取值为 25℃;
 t_0 ——基准温度,取恒温层温度或当地多年平均气温,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

C.3.4 地热流体可开采热量计算

地热流体可开采热量可用下式计算:

$$Q_{wr} = Q_{wk} c_w \rho_w (t_r - t_0) \quad \dots\dots\dots (\text{C. 19})$$

式中:

- Q_{wr} ——地热流体可开采热量,单位为千焦[耳]每年(kJ/a);
 Q_{wk} ——地热流体可开采量,单位为立方米每年(m^3/a);
 c_w ——地热流体的比热容,单位为千焦[耳]每千克开[尔文][$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$];
 ρ_w ——地热流体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 t_r ——热储温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
 t_0 ——恒温层温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

C.4 统计分析法

具有多年动态监测资料的地热田,可用统计分析建立的统计模型预测地热田在定(变)量开采条件下压力(水位)变化趋势,并确定一定降深条件下地热流体可开采量。可采用相关分析、回归分析、时间序列分析等统计分析法。宜采用压力(水位)降低值和开采量之间建立的相关统计模型对地热田进行预测。用于预测的模型应具有较高的相关系数,预测的时限不应超过实际监测资料的时段长度。

C.5 数值模型法

C.5.1 基本要求

C.5.1.1 在地热田勘查程度比较高,并且有一定时期的开采历史,具有比较齐全的监测资料时,应建立地热田的数值模型,用来计算/评价地热资源储量,并作为地热田管理的工具。

C.5.1.2 数值模型的求解方法主要包括有限差分法、有限单元法和边界元法等。

C.5.1.3 应查明研究区的地质构造,掌握热储和盖层的岩性、空间分布,掌握地热水的补给条件、水动力特征,掌握地热田内温度的分布和变化规律,分析地热系统的热源以及热传递方式。同时收集地热试井、回灌试验资料,掌握热储的渗透率、孔隙度、贮水系数等参数,测量热储和盖层的热导率、密度、比热容等参数。收集地热田的监测资料,包括地热田的开发历史、开采量,开采井和专门监测井的压力、温度和水化学变化情况。

C.5.2 控制方程

描述地热水系统中水和热量均衡的基本方程可写为

$$\frac{d}{dt} \iiint_V M^{(\kappa)} dV = \iint_F F^{(\kappa)} n d\Gamma + \iint_V q^{(\kappa)} dV \quad \dots\dots\dots (\text{C. 20})$$

其中, κ 表示不同的计算量,当 $\kappa=1$ 时表示水, $\kappa=2$ 时表示空气, $\kappa=3$ 时表示热量。式(C.20)中等号左

侧项表示热储中物质/热量的变化,等号右侧第一项表示通过边界流入(或流出)热储的物质/热量,等号右侧第二项表示物质/热量的源汇项。

在式(C.20)中,物质的变化量($\kappa=1,2$ 时)可表示为

$$M^{(\kappa)} = \varphi \sum_{\beta=1,g} S_{\beta} \rho_{\beta} w_{\beta}^{(\kappa)} \quad \text{..... (C.21)}$$

热量的变化量由岩石和流体两部分热量的变化组成,可表示为

$$M^{(3)} = (1-\varphi) \rho_r c_r t + \varphi \sum_{\beta=1,g} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} \quad \text{..... (C.22)}$$

边界上物质的流入(流出)量包括各种相态流入(流出)量的总和:

$$F^{(\kappa)} = \sum_{\beta=1,g} F_{\beta}^{(\kappa)} \quad \text{..... (C.23)}$$

其中各相态边界上的流入(流出)量为

$$F_{\beta}^{(\kappa)} = -K \frac{K_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \rho_{\beta} w_{\beta}^{(\kappa)} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g) - \delta_{\beta g} D_{vg} \rho_{\beta} \nabla w_{\beta}^{(\kappa)} \quad \text{..... (C.24)}$$

式(C.24)中,等号右侧最后一项只与气相有关,表示因气体的扩散而引起的物质的增加或减少。

边界上热量的流入(流出)包括热量的对流和传导:

$$F^{(3)} = -\lambda \nabla t + \sum_{\beta=1,g} h_{\beta}^{(\kappa)} F_{\beta}^{(\kappa)} \quad \text{..... (C.25)}$$

式中:

- c_r —— 岩石固体骨架的比热容,单位为焦[耳]每千克开[尔文](J/kg·K);
- D_{vg} —— 蒸汽和空气混合物的扩散系数;
- $F^{(\kappa)}$ —— 物质或热量在计算区边界上的流入或流出量;
- $F_{\beta}^{(\kappa)}$ —— 计算量 κ 相 β 在计算区边界上的流入或流出量;
- g —— 重力加速度,单位为米每平方秒(m/s²),取值为9.8 m/s²;
- $h_{\beta}^{(\kappa)}$ —— 计算量 κ 相 β 的比焓;
- K —— 绝对渗透系数,单位为米每秒(m/s);
- λ —— 岩石和流体综合体的热导率,单位为瓦[特]每米开[尔文][W/(m·K)];
- $K_{r\beta}$ —— 相 β 的相对渗透系数;
- $M^{(\kappa)}$ —— 物质或热量在计算区内储存量的变化;
- $M^{(3)}$ —— 计算区内热储存量的变化,单位为焦[耳](J);
- n —— 与边界的正交方向;
- P_{β} —— 相 β 的压力,为相对基准面的压力和毛细压力的和,即 $P_{\beta} = P + P_{cap,\beta}$,单位为帕[斯卡](Pa);
- P —— 相对基准面的压力,单位为帕[斯卡](Pa);
- $P_{cap,\beta}$ —— 相 β 的毛细压力,单位为帕[斯卡](Pa);
- $q^{(\kappa)}$ —— 物质或热量在计算区内的源汇项;
- S_{β} —— 流体相 β 的饱和度;
- t —— 温度,单位为摄氏度(°C);
- u_{β} —— 计算量 κ 相 β 的比内能,单位为焦[耳]每千克(J/kg);
- V —— 计算区;
- $w_{\beta}^{(\kappa)}$ —— 计算量 κ 相 β 的质量分数;
- $\delta_{\beta g}$ —— 气相的扩散系数;
- β —— 热流体的相态, $\beta=1$ 时为液态, $\beta=g$ 时为气态;
- φ —— 孔隙度;
- Γ —— 计算区边界;

- μ_{β} ——相 β 的动力黏滞系数,单位为千克每米秒[$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$];
 ρ_r ——岩石固体骨架的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 ρ_{β} ——计算量 κ 相 β 的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

C.5.3 建立数值模型的基本步骤

C.5.3.1 建立概念模型:综合分析收集到的资料,对地热田的地质条件进行合理概化,建立概念模型。概念模型应反映热储和盖层的分布规律、地热水的补给来源、地热系统的热源、重要的热流体和热传递通道、流体动力特征。宜概化为三维模型。

C.5.3.2 地质体的剖分:在概念模型的基础上,把模拟的地质体剖分为若干单元体(也称为网格剖分)。应根据模型的求解方法、计算程序的要求确定网格剖分方式,可剖分为立方体、长方体、棱柱体等。单元体的大小宜根据勘探程度、资料的多少确定,在集中开采区、压力变化显著处,网格应相对密集,在地热田的外围和压力变化不明显处,网格可相对稀疏。

C.5.3.3 进行天然状态的模拟:天然状态模拟是对地热田未进行开发之前的压力、温度、热流体的流动状态和热传导情况进行模拟。

C.5.3.4 开采状态的模拟:根据地热田的监测资料,对地热田开采状态下的压力和温度进行拟合,又称为参数识别或模型校正。参数识别的方法有直接解法和间接解法两种。由于直接解法的稳定性差,可采用间接解法进行参数识别。具体做法是,逐步调整模型参数,使模型的计算结果尽可能地逼近实际监测资料。控制观测井压力的观测值与模拟计算值的拟合误差应小于拟合计算期间水位变化值的10%;在压力变化较小时,压力拟合误差应小于1.0 m水柱高度。最终得到一个可用来预测地热田对未来开采的反映的模型。

C.5.4 利用数值模型进行地热资源储量计算

经过校正的模型可认为在当前勘查程度下模型是可靠的,可用来预测地热田对将来开采的反映。应选择多个可能的地热田管理方案,计算各方案对地热田带来的长期反映,包括压力场和温度场的变化趋势,预测可能带来的不利影响,预测为了保持稳定开采量是否需要开凿新井以及新井的位置,预测回灌的效果和可能引起的地热田冷却。然后对各开采方案结果进行比较,提出推荐的地热田管理方案,提出地热水的可开采量和可开采热量。利用地热系统的数值模型还可计算地热田的地热储存量和地热流体储存量。

C.6 比拟法

比拟法又称类比法,即利用已知地热田的地热资源储量推算地热地质条件相似的地热田的地热资源储量,或者用同一地热田内已知地热资源储量的部分来推算其他部分的地热资源储量。比拟法应是在地热的储藏、分布条件相似的两之间进行的,否则比拟的结果与实际情况可能会存在很大的差异。

C.7 经验系数法

即开采系数法,地热远景区采用可采系数法。开采系数的大小,取决于热储岩性、孔隙裂隙发育情况以及补给情况,有补给情况下取大值,无补给情况下取小值。

$$Q_{wk} = Q_{ws} \cdot X \quad \dots\dots\dots (C.26)$$

式中:

Q_{wk} ——地热流体可开采量,单位为立方米每年(m^3/a);

Q_{ws} ——地热流体存储量,单位为立方米(m^3);

X ——可采系数,对于孔隙型层状热储层,取值为3%~5%(100 a),即0.000 3/a~0.000 5/a;对

于岩溶型层状热储层,取值为 $5\%(100\text{ a})$,即 $0.000\ 5/\text{a}$;对于裂隙型层状热储层,取值为 $1\%\sim 2\%(100\text{ a})$,即 $0.000\ 1/\text{a}\sim 0.000\ 2/\text{a}$ 。

C.8 生产试验法

由于流体的开采会在热储孔隙中产生沸腾现象,意味着生产井正在开采两相流,开采时热储中将会产生蒸汽弥补流体开采损失的体积。故在有大量非凝结气体存在、条件允许的情况下,可采用生产试验法,目前此方法多用于中高温地热流体的开发利用阶段。具体计算方法详见附录D。

附录 D (资料性附录) 生产试验法

D.1 基本方程

开展地热生产测试时常假定在当地大气压下蒸汽和水均处于饱和状态,但有大量非凝结气体存在时,应考虑其影响。在一些生产“干”蒸汽井中可能存在过热条件,应当在蒸汽温度和压力条件下对蒸汽性质进行评价。在饱和状态下,热流量计算公式如下:

$$Q = WH \quad \text{..... (D.1)}$$

在分离压力(P_{sep})下,

$$W = W_w + W_s \quad \text{..... (D.2)}$$

$$W_s = WX \quad \text{..... (D.3)}$$

$$X = \frac{H - H_w}{H_{sw}} \quad \text{..... (D.4)}$$

式中:

Q ——热流量,单位为兆瓦[特](MW);

W ——总流量,单位为千克每秒(kg/s);

X ——干度;

W_s ——分离出的蒸汽流量,单位为千克每秒(kg/s);

W_w ——分离出的水流量,单位为千克每秒(kg/s);

H ——流体的焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);

H_w ——分离出水的焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);

H_{sw} ——汽化潜热的焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg)。

D.2 闪蒸校正系数

生产试验法常用于使用分离器的流量测试中,目的是修正在大气压力下测得的水流到更高分离压力的水流,即在较高的压力(P_{ref})下蒸汽和水分离后,分离的水再次闪蒸到大气中,二次蒸发后水的流量用堰板测量。如果在大气压力下测得的水的流量(W'_w)对于在分离器压力和大气压力间闪蒸出来的蒸汽需要修正,则

$$W'_w = W_{wsep} \times (1 - X') \quad \text{..... (D.5)}$$

$$X' = \frac{H_{w(P_{ref})} - H_{w(atm)}}{H_{sw(atm)}} \quad \text{..... (D.6)}$$

式中:

X' ——二次蒸发后的干度;

W_{wsep} ——分离压力下水的流量,单位为千克每秒(kg/s);

$H_{w(atm)}$ ——标准大气压力下水的焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);

$H_{sw(atm)}$ ——标准大气压力下汽化潜热的焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);

$H_{w(P_{ref})}$ ——在 P_{ref} 下分离时水的焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg)。

闪蒸修正系数(FCF)可表示为

$$W_{\text{sep}} = W'_w \times \text{FCF} \quad \text{..... (D. 7)}$$

$$\text{FCF} = \frac{1}{1-X'} = \frac{H'_{\text{sw}}}{H'_s - H_{w(P_{\text{sep}})}} \quad \text{..... (D. 8)}$$

式中:

H'_{sw} ——大气压力下的汽化潜热焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);

H'_s ——大气压力下的蒸汽焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);

$H_{w(P_{\text{sep}})}$ ——分离压力下的水的焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg)。

大气压力为 1 bar 时,

$$\text{FCF} = \frac{2\,258}{2\,675 - H_{w(P_{\text{sep}})}} \quad \text{..... (D. 9)}$$

D. 3 单相流

D. 3. 1 低焓井

D. 3. 1. 1 流动地热流体的温度可在液体的条件下测量时,流体的焓直接从蒸汽表(参见表 B. 2)中查找获得。

D. 3. 1. 2 若不发生沸腾,质量流体可使用标准的孔板(ISO 5167)或堰(ISO 1438/1)直接测得,焓可通过井口温度计算。流体焓较大可引起沸腾时,总的质量流量可通过液体的温度(在补给带的井底测得)和在大气压力下分离的水流,利用闪蒸修正系数进行计算,以 H (基于井口排放的热焓或补给带的温度)代替 $H_{w(P_{\text{sep}})}$ 。已知测得分离后大气压力下水的流量时,求得总质量流量(W)和热流量(Q)为

$$W = W' \times \frac{H'_{\text{sw}}}{H'_s - H} \quad \text{..... (D. 10)}$$

式中:

W' ——大气压力下的总流量,单位为千克每秒(kg/s)。

$$Q = WH \quad \text{..... (D. 11)}$$

D. 3. 2 高焓(蒸汽)井

高焓井的流量测量要求使用标准的孔板(ISO 5167)或其他设备,如皮托管和利用温度测量技术。蒸汽中非凝结气体的含量很少(约小于 2%,以质量计)且有轻微的过热现象时,流动的热的焓可通过在 Mollier 图上标绘出蒸汽的压力-温度条件而获得。若蒸汽稍微有些“湿”,可使用节流热量表进行测量,将压力约束在饱和压力条件下,此方法的前提是从管道中可采集到具有代表性的流体样。若蒸汽是真正“干”时(即过热状态),就像位于排放管中一样是透明的,测定热的焓应测定温度和压力。

D. 4 两相流

D. 4. 1 总流量热量计

使用热量计开展测井,将井流迅速排入热量计的水箱中。在热量计中,两相流并排放物凝结后与热量计中的冷水混合,利用热量计中液体的体积和热量的变化计算测试期间的质量流量和热流量。

$$W = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\Delta t} = \frac{V_2/v_2 - V_1/v_1}{\Delta t} \quad \text{..... (D. 12)}$$

$$Q = \frac{\rho_2 V_2 H_{w2} - \rho_1 V_1 H_{w1}}{\Delta t} \quad \text{..... (D. 13)}$$

式中:

- ρ_1 ——第一次观测时流体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 V_1 ——第一次观测时流体的体积,单位为升(L);
 v_1 ——第一次观测时流体的比容,单位为立方米每千克(m^3/kg);
 ρ_2 ——第二次观测时流体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 V_2 ——第二次观测时流体的体积,单位为升(L);
 v_2 ——第二次观测时流体的比容,单位为立方米每千克(m^3/kg);
 Δt ——两次观测的时间间隔,单位为秒(s);
 H_{w1} ——第一次分离出的水的焓,单位为焦[耳]每克(J/g);
 H_{w2} ——第二次分离出的水的焓,单位为焦[耳]每克(J/g)。

D.4.2 詹姆斯端压法

D.4.2.1 此方法适用于高产的两相流地热井。通常利用分离器和端压法的试验结果进行相互检查,并将从地表测量推导的焓值和井下勘探的结果进行比较,质量流量和焓的误差能控制在5%以内。

D.4.2.2 应用端压法时,试验井生产的汽、水混合物被排放到一个大气压力分离器(或“消音器”,用来降低排放过程中产生的噪音水平),在混合物将进入“消音器”时,在排放管线的末端进行“端压”的测量,其从“消音器”中流出的分离的液体水用三角堰板测量,而蒸汽排放到大气中。据上述两项观测,流体焓和总质量流量用詹姆斯方程进行计算。

$$\frac{GH^{1.102}}{P_{\text{lip}}^{0.15}} = 184 \quad \text{..... (D.14)}$$

$$G = W/A \quad \text{..... (D.15)}$$

式中:

- W ——质量流量,单位为千克每秒(kg/s);
 H ——焓,单位为千焦[耳]每千克(kJ/kg);
 A ——管道的截面面积,单位为平方厘米(cm^2);
 P_{lip} ——端压,单位为巴(bar)。

当测量流量单位为吨每[小]时(t/h),焓的单位为千焦[耳]每千克(kJ/kg)时,其关系式为

$$\frac{GH^{1.102}}{P_{\text{lip}}^{0.15}} = 663 \quad \text{..... (D.16)}$$

$$W'_w = \frac{WH'_{sw}}{H'_s - H} \quad \text{..... (D.17)}$$

$$\frac{W'_w}{AP_{\text{lip}}^{0.96}} = \frac{194}{H^{1.102}} \times \frac{H'_s - H}{H'_{sw}} \quad \text{..... (D.18)}$$

式中:

- W'_w ——大气压力下水的流量,单位为千克每秒(kg/s);
 H'_{sw} ——大气压力下的汽化潜热焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);
 H'_s ——大气压力下的蒸汽焓,单位为焦[耳]每千克(J/kg);
 A ——排放管道的截面面积,单位为平方厘米(cm^2);
 P_{lip} ——端压,单位为巴(bar)。

在1 bar 大气压力进行分离的特殊情况下, $H'_s = 2\,675 \text{ J/kg}$, $H'_{sw} = 2\,258 \text{ J/kg}$,则

$$\frac{W'_w}{AP_{\text{lip}}^{0.96}} = Y = \frac{0.081\,5(2\,675 - H)}{H^{1.102}} \quad \text{..... (D.19)}$$

或流量单位为吨每[小]时(t/h)时,

$$\frac{W'_w}{AP_{\text{lip}}^{0.98}} = Y = \frac{0.293(2\,675 - H)}{H^{1.102}} \quad \text{..... (D. 20)}$$

焓在 800 kJ/kg~2 200 kJ/kg 范围时,给出精度为 1.5%的 Y 与焓的关系:

$$H = \frac{2\,675 + 3\,329Y}{1 + 28.3Y} \quad \text{..... (D. 21)}$$

或流量单位为吨每〔小〕时(t/h)时,

$$H = \frac{2\,675 + 925Y}{1 + 7.85Y} \quad \text{..... (D. 22)}$$

获得流体焓后,使用闪蒸修正系数可计算质量流量:

$$W = \frac{W'_w \times H'_{ws}}{H'_s - H} \quad \text{..... (D. 23)}$$

式中:

H'_{ws} ——闭井情况下的汽化潜热的焓,单位为焦〔耳〕每千克(J/kg)。

大气压力为 1 bar 时,

$$W = \frac{2\,258W'_w}{2\,675 - H} \quad \text{..... (D. 24)}$$

D. 4. 2. 3 通过端压和测量的水流量计算井的产能,过程如下:

- 利用式(D. 19)计算 Y 值。
- 利用式(D. 21)计算焓(H)。
- 利用式(D. 23)计算质量流量(W)。

D. 4. 3 垂向排放法

在环境条件允许的情况下,进行成本较小的、利用硬件设备较少的垂向释放试验,可对井的生产能力进行初步估算。在完井和温度恢复不久后,通常用简单的垂向排放进行初始的流量测试。此试验无法取得非常稳定的流量,但可对热井潜力进行初始评价。

从詹姆士方程得到:

$$\frac{WH^{1.102}}{AP_{\text{lip}}^{0.98}} = 184 \quad \text{..... (D. 25)}$$

当焓单位为千焦〔耳〕每千克(kJ/kg),热流量单位为兆瓦〔特〕(MW)时,其中的比例因子从 184 调整为 0.184。井的焓范围为 800 kJ/kg~2800 kJ/kg, $H^{0.102}$ 变化很小,故可通过估算的流体焓确定热流量(Q):

$$Q = HW = \frac{0.184AP_{\text{lip}}^{0.98}}{H^{0.102}} \quad \text{..... (D. 26)}$$

D. 4. 4 示踪稀释法

示踪稀释法,是通过向两相流体中注入示踪剂,测量分离的蒸汽和液相中的示踪剂稀释度,确定两相流的热的焓和质量流量的方法。

稀释法对大多数两相系统均适用。当进行正式生产的两相流管线中无蒸汽损失,且常规测试及其他测试方法不能使用时,可采用此方法。

- 液相的质量流量和气相的流量可通过下式得到:

$$W_w = \frac{W_T}{w_{Tw} - w_{Bw}} \quad \text{..... (D. 27)}$$

$$W_v = \frac{W_T}{w_{Tv} - w_{Bv}} \quad \text{..... (D. 28)}$$

式中:

W_w ——液相质量流量,单位为千克每秒(kg/s);

W_T ——示踪剂的质量流量,单位为千克每秒(kg/s);

W_v ——蒸汽相的质量流量,单位为千克每秒(kg/s);

w_{Tw} ——液相中示踪剂的质量分数,单位为克每吨(g/t);

w_{Tv} ——蒸汽相中示踪剂的质量分数,单位为克每吨(g/t);

w_{Bw} ——液相中示踪剂的背景质量分数,单位为克每吨(g/t);

w_{Bv} ——蒸汽相中示踪剂的背景质量分数,单位为克每吨(g/t)。

采样点处的压力已知,该压力下两相流的干度(X)用下式计算:

$$X = \frac{W_v}{W_v + W_w} \quad \text{..... (D. 29)}$$

考虑取样压力下所有热力学变量,利用蒸汽表可计算流体的焓:

$$H = \frac{W_v}{W_v + W_w} \times H_{sv} + H_w \quad \text{..... (D. 30)}$$

b) 使用此方法,示踪剂选取的优先准则如下:

- 1) 液体和蒸汽的示踪剂应完全区分进入各自的相,或应准确知道在各相中的分布。
- 2) 在注入和采样条件下,示踪剂应在化学上和热学上稳定。
- 3) 具有在较高浓度范围下的精确分析方法。
- 4) 示踪剂的天然背景水平一定要保证较低且为常数。
- 5) 注入和采样需要的仪器应当简易和牢固。

D.4.5 其他方法

在阀门或孔板后压力降大的地方,利用非凝结气体(蒸汽—气相)或氯化物(液相)的浓度变化,能测定干度的变化。假设在液体采样点之间没有热损耗(对于气体方法所有气体归入蒸汽—气相),利用浓度和采样压力的变化能计算焓。

在上游采样点水—蒸汽—气混合相中,非凝结气体的摩尔分数为

$$x_1 = x_{s1} X_1 \quad \text{..... (D. 31)}$$

式中:

x_1 ——非凝气体的摩尔分数,单位为毫摩[尔]每摩[尔](mmol/mol);

x_{s1} ——上游采集点的非凝结气体的摩尔分数,单位为毫摩[尔]每摩[尔](mmol/mol);

X_1 ——上游采样点的干度。

下游采样点非凝结气体的摩尔分数为

$$x_2 = x_{s2} X_2 \quad \text{..... (D. 32)}$$

式中:

x_{s2} ——下游采样点的非凝结气体的摩尔分数,单位为毫摩[尔]每摩[尔](mmol/mol);

X_2 ——下游采样点的干度。

沿管线总的气体流量同两处采样点处相同,并假设在两采样点间流体的焓无变化,由于干度随压力而变化,在蒸汽相中气体的浓度也发生变化。

$$x_{s1} X_1 = x_{s2} X_2 \quad \text{..... (D. 33)}$$

$$x_{s1} \frac{H - H_{w1}}{H_{sw1}} = x_{s2} \frac{H - H_{w2}}{H_{sw2}} \quad \text{..... (D. 34)}$$

$$R = \frac{x_{s1}}{x_{s2}}$$

且

$$r = \frac{H_{sw1}}{H_{sw2}}$$

$$H = \frac{RH_{w1} - rH_{w2}}{R - r} \quad \text{..... (D. 35)}$$

式中：

 H ——流体的焓，单位为焦〔耳〕每千克(J/kg)； H_{w1} ——上游采样点的流体的焓，单位为焦〔耳〕每千克(J/kg)； H_{w2} ——下游采样点的流体的焓，单位为焦〔耳〕每千克(J/kg)； H_{sw1} ——上游采样点的汽化潜热焓，单位为焦〔耳〕每千克(J/kg)； H_{sw2} ——下游采样点的汽化潜热焓，单位为焦〔耳〕每千克(J/kg)。

附 录 E
(资料性附录)
地热常用量符号和单位名称

地热常用量符号和单位名称参见表 E.1。

表 E.1 地热常用量符号和单位名称

序号	常用量		符号	原用单位		SI 单位		附注
				名称	符号	名称	符号	
1	长度	长度	l, L	千米, 公里 米 厘米 毫米 微米	km m cm mm μm	米	m	$1\text{ km}=10^3\text{ m}$ $1\text{ m}=10^2\text{ cm}$ $1\text{ m}=10^3\text{ mm}$ $1\text{ mm}=10^3\text{ }\mu\text{m}$
		宽度	b					
		高度	h					
		厚度	d, δ					
		半径	r, R					
		直径	d, D					
		距离	d, r					
2	面积		A, S	平方公里 平方米	km^2 m^2	平方米	m^2	
3	体积	体积, 容积	V	立方米 升 毫升	m^3 L mL	立方米	m^3	$1\text{ m}^3=10^3\text{ L}$ $1\text{ L}=10^3\text{ mL}$
		气体体积	V_{g}	立方米	m^3			
4	时间		t	年 日, 天 时 分 秒	s d h min s	秒	s	
5	速度		v, u	公里/时 米/秒	km/h m/s	米每秒	m/s	
6	质量		m	吨 公斤, 千克 克 毫克	t kg g mg	千克	kg	$1\text{ t}=10^3\text{ kg}$ $1\text{ kg}=10^3\text{ g}$ $1\text{ g}=10^3\text{ mg}$
7	体质质量, (质量)密度		ρ	吨/ m^3 公斤/ m^3 克/ cm^3	t/m^3 kg/m^3 g/cm^3	千克每 立方米	kg/m^3	

表 E.1 地热常用量符号和单位名称(续)

序号	常用量		符号	原用单位		SI 单位		附注
				名称	符号	名称	符号	
8	流量	体积流量	q_v	米 ³ /日	m ³ /d	立方米每秒	m ³ /s	
				米 ³ /时	m ³ /h			
				升/秒	L/s			
		质量流量	q_m	吨/日	t/d	千克每秒	kg/s	
				吨/时	t/h			
				公斤/秒	kg/s			
9	力,重量		F, W	吨力	tf	牛〔顿〕	N	1 kgf=9.806 65 N
				公斤力	kgf			
				克力	gf			
10	压强	p	吨力/米 ² 公斤力/厘米 ² 大气压 毫米汞柱 巴	tf/m ² kgf/cm ² atm mmHg bar	帕〔斯卡〕	Pa	1 Pa=1 N/m ² 1 kgf/cm ² =9.806 65×10 ⁴ Pa 1 mmHg=133.322 4 Pa 1 bar=1×10 ⁵ Pa	
	正应力	σ						
	切应力	τ						
11	功		W, A	公斤力米 焦〔耳〕	kgf·m J	焦〔耳〕	J	1 kgf·m=9.806 65 J 1 kJ=10 ³ J 1 MJ=10 ⁶ J 1 cal=4.186 8 J
	能量		E	焦〔耳〕	J			
	热量		Q	卡 千卡	cal kcal			
	电能		W	千瓦〔特〕时	kW·h			
12	功率		P	瓦〔特〕 千瓦〔特〕	W kW	瓦〔特〕	W	1 MW=10 ⁶ W 1 kW=10 ³ W
13	温度	热力学	T	开〔尔文〕	K	开〔尔文〕 摄氏度	K ℃	1 K=1 ℃+273.15 1 ℃= $\frac{5}{9}$ (1 ℉-32)
		摄氏温度	t, θ	摄氏度	℃			
		华氏温度		华氏度	℉			
14	地温梯度		$\Delta T/\Delta h$	摄氏度/100 米	℃/100 m	摄氏度 每百米	℃/100 m	
15	热容		C	卡/度	cal/℃	焦〔耳〕每 开〔尔文〕	J/K	1 cal/℃=4.186 8 J/K
16	比热容		c	卡/克度	cal/(g·℃)	焦〔耳〕每千 克开〔尔文〕	J/(kg·K)	1 cal/(g·℃) =4 186.8 J/(kg·K)
17	热导率		λ, κ	卡/(厘米· 秒·度) 千卡/(米· 秒·度)	cal/(cm·s·℃) kcal/(m·s·℃)	瓦〔特〕每米 开〔尔文〕	W/(m·K)	1 cal/(cm·s·℃) =418.68 W/(m·K)

表 E.1 地热常用量符号和单位名称(续)

序号	常用量	符号	原用单位		SI 单位		附注
			名称	符号	名称	符号	
18	热扩散率	α	厘米 ² /秒 米 ² /时	cm ² /s m ² /h	平方米 每秒	m ² /s	
19	渗透率	k	达西 毫达西	D mD	平方米	m ²	1 D $\approx$ 0.987 $\times$ 10 ⁻¹⁸ m ²
20	渗透系数	K	米/日 米/秒	m/d m/s	米每秒	m/s	
21	导水系数	T	平方米/秒	m ² /s	平方米 每秒	m ² /s	
22	贮水系数	S	量纲为一				
23	运动黏滞系数	ν	平方米/秒	m ² /s	平方米每秒	m ² /s	
24	动力黏滞系数	η, μ	厘泊	cp	帕〔斯卡〕秒	Pa $\cdot$ s	1 cp=10 ⁻³ N $\cdot$ s/m ²
25	压缩系数	C	平方米/公斤	m ² /kg	每帕〔斯卡〕	Pa ⁻¹	

附录 F
(资料性附录)
理疗热矿水水质标准

理疗热矿水水质标准参见表 F.1。

表 F.1 理疗热矿水水质标准

项目	指标	水的命名
溶解性总固体	$>1\,000\text{ mg/L}$	矿(泉)水
二氧化碳(CO_2)	$>500\text{ mg/L}$	碳酸水
总硫化氢($\text{H}_2\text{S}+\text{HS}^-$)	$>2\text{ mg/L}$	硫化氢水
偏硅酸(H_2SiO_3)	$>50\text{ mg/L}$	硅酸水
偏硼酸(HBO_2)	$>35\text{ mg/L}$	硼酸水
溴(Br^-)	$>25\text{ mg/L}$	溴水
碘(I^-)	$>5\text{ mg/L}$	碘水
总铁($\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$)	$>10\text{ mg/L}$	铁水
砷(As)	$>0.7\text{ mg/L}$	砷水
氡(^{222}Rn)	$>110\text{ Bq/L}$	氡水
水温	$>36\text{ }^\circ\text{C}$	温矿(泉)水
注 1:依据 GB/T 13727。 注 2:理疗天然矿泉水化学成分达到表中规定的含量者可参与命名。		

附录 G
(资料性附录)

地热利用的节煤减排量及居室采暖面积估算表

地热利用的节煤量、减排量、节省污染治理费用及居室采暖面积分别按表 G.1、表 G.2、表 G.3、表 G.4 和表 G.5 所列方法计算。

表 G.1 地热水开采一年所获热量与之相当的节煤量

项目	考虑热效率折算后的热能(W_i) 10^8 J	节煤量(M) t/a
计算式	ΣW_i	$M = \Sigma W_i / (4.1868 \times 7)$

表 G.2 地热水开采一年相当节煤量的减排量

项目	二氧化碳(CO_2) t/a	二氧化硫(SO_2) t/a	氮氧化物(NO_x) t/a	悬浮质粉尘 t/a	煤灰渣* t/a
计算式	$2.386M$	$1.7\%M$	$0.6\%M$	$0.8\%M$	$10\%M$
* 煤灰渣不属于大气排放,属于固体废物排放。					

表 G.3 节省污染治理费用

项目	二氧化碳(CO_2)	二氧化硫(SO_2)	氮氧化物(NO_x)	悬浮质粉尘	煤灰渣
费用	0.1 元*/kg	1.1 元/kg	2.4 元/kg	0.8 元/kg	运输费
* 清洁开发机制 CDM 国际碳汇市场价格略低于此价格。					

表 G.4 无调峰设施的地热水居室采暖面积估算表

利用温度($t_1 - t_0$) $^{\circ}\text{C}$	采暖面积(F) m^2				
	$Q=1\ 000$	$Q=1\ 250$	$Q=1\ 500$	$Q=1\ 750$	$Q=2\ 000$
10	9 692	12 115	14 536	16 961	19 384
20	19 384	24 230	29 076	33 922	38 768
30	29 076	36 345	43 614	50 883	58 152
40	38 768	48 460	58 152	67 844	77 536
50	48 460	60 575	72 690	84 805	96 920
60	58 152	72 690	87 228	101 766	116 304
70	67 844	84 805	101 766	118 727	135 688
80	77 536	96 920	116 304	135 688	155 072
注: $F=E_a/Q_i$; $E_a=48.46Q(t_1-t_0)$ 。其中, E_a 为热水产能,单位为瓦[特](W); Q_i 为居室采暖热指标,单位为瓦[特]每平方米(W/m^2),表中取值为 $50 \text{ W}/\text{m}^2$; Q 为地热水流量,单位为立方米每天(m^3/d); t_1 为地热水采暖进水温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$); t_0 为地热水采暖排水温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。					

表 G.5 加用调峰负荷占供热总量 30% 的地热水居室采暖面积估算表

利用温度(t_1-t_0) ℃	采暖面积(F) m ²				
	$Q=1\ 000$	$Q=1\ 250$	$Q=1\ 500$	$Q=1\ 750$	$Q=2\ 000$
10	13 845	17 307	20 766	24 230	27 691
20	27 691	34 614	41 537	48 460	55 383
30	41 537	54 778	62 306	72 690	83 074
40	55 383	69 228	83 074	96 920	110 766
50	69 228	86 536	103 843	121 150	138 457
60	83 074	103 843	124 611	145 380	166 149
70	96 920	121 150	145 380	169 610	193 840
80	110 766	138 457	166 149	193 840	221 531
注: Q 为地热水流量, 单位为立方米每天(m ³ /d)。					

附录 H (资料性附录)

地热资源开发利用现状及潜力分析方法

H.1 流体开采量分类统计方法

流体开采量分类统计方法主要依据地热井、温泉的流体开采量监测数据和行政区、地热田历年井、泉数量统计数据,按各热储段和各利用方向,对地热田的开采量进行分类统计。统计方法有两种,一种是平均累计,另一种是加和累计。

a) 平均累计:

$$Q_i(x, y) = A_i(x, y) \overline{q_i(x, y)} \quad \text{..... (H.1)}$$

式中:

$Q_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的总流体开采量,单位为立方米每年(m^3/a);

$A_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的地热井(温泉)数量;

$\overline{q_i(x, y)}$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的地热井(温泉)平均流体开采量,单位为立方米每年(m^3/a)。

b) 加和累计:

$$Q_i(x, y) = \sum q_i(x, y) \quad \text{..... (H.2)}$$

式中:

$Q_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的总流体开采量,单位为立方米每年(m^3/a);

$q_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的地热井(温泉)流量,单位为立方米每年(m^3/a)。

a)。

- c) 应采用上述两种方法分别进行统计,然后进行校核,并可根据校核后的结果,按 x 统计得到第 i 地热田 x 热储层段的总流体开采量;按 y 统计得到第 i 地热田 y 利用方向的总流体开采量。第 i 地热田的总流体开采量将式(H.2)按 x, y 加和得到。所有地热田按 y 统计得到地热田 y 利用方向的总量。

H.2 流体开采热量计算方法

H.2.1 按所得数据的不同,有两种分类统计方法。

- a) 在上述流体开采量统计的基础上,依据地热井(温泉)口温度监测数据,按下式进行分类统计:

$$E_i(x, y) = \overline{V_i(x, y)} Q_i(x, y) [\overline{t_i(x, y)} - t_0] \quad \text{..... (H.3)}$$

式中:

$E_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的热量,单位为千焦[耳]每年(kJ/a);

$\overline{V_i(x, y)}$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的平均流体热容,单位为千焦[耳]每立方米摄氏度[$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$];

$Q_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的总流体开采量,单位为立方米每年(m^3/a);

$\overline{t_i(x, y)}$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的平均流体井(泉)口温度,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$);

t_0 ——基准温度,取恒温层温度或当地多年平均气温,单位为摄氏度(℃)。

b) 依据单井(温泉)的监测数据和热容参数按下式进行分类统计:

$$E_i(x, y) = \sum V_i(x, y) q_i(x, y) [t_i(x, y) - t_0] \quad \dots\dots\dots (H. 4)$$

式中:

$V_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的某单井(泉)的流体热容,单位为千焦[耳]每立方米摄氏度[kJ/(m³·℃)];

$q_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的某单井(泉)的流体开采量,单位为立方米每年(m³/a);

$t_i(x, y)$ ——第 i 地热田 x 热储层段 y 利用方向的某单井(泉)口温度,单位为摄氏度(℃);

t_0 ——基准温度,取恒温层温度或当地多年平均气温,单位为摄氏度(℃)。

H. 2.2 应按以上两种方法分别进行统计,然后进行校核,并将校核后的结果进行分类统计。

H. 3 地热资源开发利用潜力评价

H. 3.1 根据各地热田主要热储层的地热流体开采程度、地热流体热量潜力模数和最大水位降速三个指标确定地热资源开发利用潜力,取三个指标中最不利者将其分为严重超采区、超采区、基本平衡区、具有一定开采潜力区、具有开采潜力区和极具开采潜力区。

H. 3.2 采用地热流体热量开采系数指标衡量地热资源开发利用潜力:

$$C_E = \frac{E_k}{E_y} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (H. 5)$$

式中:

C_E ——地热流体热量开采系数,数值用“%”表示;

E_k ——地热流体开采热量,单位为千焦[耳]每年(kJ/a);

E_y ——地热流体允许开采热量,单位为千焦[耳]每年(kJ/a)。

采用地热流体热量开采系数来划分六个区,具体参见表 H. 1。

表 H. 1 地热流体热量开采系数分区表

分 区	热量开采系数(C_E) %
严重超采区	≥ 120
超采区	$100 \sim < 120$
基本平衡区	$80 \sim < 100$
具有一定开采潜力区	$60 \sim < 80$
具有开采潜力区	$40 \sim < 60$
极具开采潜力区	< 40

H.3.3 采用地热流体最大水位降速指标衡量地热资源开发利用潜力,参见表 H.2。

表 H.2 最大水位降速分区表

分 区	最大水位降速 m/a
严重超采区	≥ 4.0
超采区	$2.0 \sim < 4.0$
基本平衡区	$1.0 \sim < 2.0$
具有一定开采潜力区	$0.5 \sim < 1.0$
具有开采潜力区	$0.2 \sim < 0.5$
极具开采潜力区	< 0.2

H.3.4 采用地热流体热量潜力模数衡量地热资源开发利用潜力。地热流体热量潜力模数依据下式进行计算:

$$M = \frac{E_f - E_k + R}{A} \dots\dots\dots (H.6)$$

式中:

M ——地热流体热量潜力模数,单位为千焦〔耳〕每平方千米年[$\text{kJ}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$];

E_f ——地热流体允许开采热量,单位为千焦〔耳〕每年(kJ/a);

E_k ——地热流体开采热量,单位为千焦〔耳〕每年(kJ/a);

R ——地热流体热量补给量,千焦〔耳〕每年(kJ/a);

A ——面积,单位为平方千米(km^2)。

附录 I
(资料性附录)
地热资源梯级综合利用

I.1 地热资源梯级利用温度分级**I.1.1 基本原则**

I.1.1.1 根据主要热储代表性温度可将地热资源梯级利用划分为 I、II、III、IV、V 五个利用级别。在开发利用时,应从 I 级至 V 级逐级进行考虑。

I.1.1.2 对于理疗、工业提炼、矿泉水饮用、农业灌溉和养殖等用途,应考虑地热流体质量。

I.1.1.3 上一级利用的出口温度即为下一级利用的入口温度。

I.1.2 地热资源梯级利用温度分级

I.1.2.1 I 级:主要用于发电、烘干等工业利用和采暖,流体温度大于 150℃。

I.1.2.2 II 级:主要用于烘干、发电和采暖等,温度大于 90℃且小于或等于 150℃。

I.1.2.3 III 级:主要用于采暖、理疗、洗浴和温室种植,温度大于 60℃且小于或等于 90℃。

I.1.2.4 IV 级:主要用于理疗、休闲洗浴、采暖、温室种植和养殖,温度大于 40℃且小于或等于 60℃。

I.1.2.5 V 级:主要为洗浴、温室种植、养殖、农业灌溉和采用热泵技术的制冷供热,温度大于 25℃且小于或等于 40℃。

I.2 流体按质量分类综合利用

I.2.1 在流体质量方面,理疗热矿水水质标准参见附录 F。

I.2.2 用于工业提炼的一些热矿水矿物原料提取工业指标参见表 I.1,有的还可生产食盐和芒硝等。

I.2.3 对达到工业利用可提取有用元素最低含量标准的,可参照《矿产资源工业要求手册》(2014 年修订本)予以评价。

I.2.4 矿泉水饮用水水质应符合 GB 5749 和 GB 8537 的规定。

I.2.5 用于农业灌溉和养殖用途的,应分别符合 GB 5084 和 GB 11607 的要求。

I.2.6 用于工业用途的,应根据用水目标所应达到的水质要求选择合适的水质标准。

I.2.7 多数用途还应评价地热流体的腐蚀性和结垢性。采用热泵技术的制冷供热还应按 DZ/T 0225—2009《浅层地热能勘查评价规范》中的水质要求进行评价。

表 I.1 热矿水矿物原料提取工业指标

单位为毫克每升

类型	碘(I)	溴(Br)	铯(Cs)	锂(Li)	铷(Rb)	锗(Ge)
工业指标	>20	>50	>80	>25	>200	>5

附录 J

(资料性附录)

地热资源勘查评价报告编写提纲

地热资源勘查评价报告是地热资源勘查评价的阶段性或最终成果,是地热资源统计、开发利用规划与管理的主要依据,报告内容应能反映地热资源勘查的主要成果,可参照下列内容编写。

J.1 报告编写提纲

报告编写提纲如下:

1 前言

简要介绍研究区地形地貌、水文地质条件和社会经济概况。

2 地热地质研究程度

3 区域地热地质条件

简要阐述研究区地层和区域地质构造等区域地热地质特征。

4 地热田(区)地热地质条件

4.1 地球物理与地温场特征

4.2 热储特征及其埋藏条件

4.3 地热流体动态特征

5 地热流体化学特征

5.1 地热流体水化学特征

5.2 环境同位素与地热田成因分析

6 地热资源计算与评价

6.1 热储模型

6.2 主要计算参数

6.3 地热资源可开采量计算

6.4 地热资源评价

7 地热流体质量评价

开展地热流体不同用途评价、地热流体中有益矿物组分评价、地热流体腐蚀性评价以及地热流体结垢评价。

8 经济与环境影响评价

开展地热利用的节能和减排效果估算、地热流体排放对环境的影响评价、地面沉降及地面塌陷评价以及其他地质环境影响评价。

9 地热资源开发利用与保护

结合地热资源开发利用现状与潜力评价结果,进行地热资源综合开发利用评价,提出地热资源开发利用与保护方案。

10 结论

J.2 报告主要附图

报告主要附图如下:

a) 实际材料图。

- b) 地热地质图。
- c) 地热资源分布图。
- d) 地热资源开发利用现状图。
- e) 地热资源开发利用潜力评价图。
- f) 地热田地温分布图或一定深度内的地温等值线图。
- g) 地热流体化学图。
- h) 地热井(泉)动态曲线图。
- i) 地热井综合地质柱状图册。

参 考 文 献

- [1] DZ/T 0025—2009 浅层地热能勘查评价规范
 - [2] NB/T 10097—2018 地热能术语
 - [3] DB 12/T 664—2016 地热单(对)井地热评价技术规程
 - [4] 《地球科学大辞典》编委会.地球科学大辞典.北京:地质出版社,2006
 - [5] 徐世光,郭远生.地热学基础.北京:科学出版社,2009
 - [6] Grant M A,Bixley P F. 热储工程学.王贵玲,蔺文静,译.北京:测绘出版社,2013
 - [7] 《矿产资源工业要求手册》编委会.矿产资源工业要求手册(2014年修订本).北京:地质出版社,2014
-