

沉积盆地中低温地热田地热资源评价方法研究

宋倩,赵素杰,苏永强,高山,赵琳如

(河北省地质矿产勘查开发局第三水文工程地质大队,河北省石家庄市,050081)

摘要 地热资源作为一种清洁能源,可为供暖提供稳定可靠的热源,在地热资源开采初期,因对地热资源开发利用研究程度不足,导致地热资源处于过量开采,热储压力水头快速下降,随着研究认识的提高,地热流体回灌成为地热资源开采的必要手段之一,而针对沉积盆地中低温地热田回灌条件下地热资源评价方法不一,计算结果差异性很大。本次结合工程实例,对几种方法进行综合对比研究,分析潜在因素,选定最适宜沉积盆地中低温地热田地热资源评价方法,为今后科学规划开采地热资源提供技术依据。

关键词 沉积盆地;回灌;地热资源;地热流体可采量

中图分类号:P314.3 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2024)08-0020-03

河北省地热资源得天独厚,分布广、储量大、稳定可靠的特点,是全国地热资源最为丰富的省份之一。地热资源主要赋存于沉积盆地的馆陶组热储与基岩热储,埋藏深度1 000~4 000m,石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸、雄安新区等平原区均有地热资源分布,面积约5.6万km²。地热资源的开发利用对助力全省新能源体系建设,服务绿色发展,增强民生福祉具有重要的历史意义。地热资源开采初期,因地热资源开发利用研究程度不足,导致地热资源处于过量开采,热储压力水头快速下降,随着研究认识的提高,地热资源回灌成为地热资源开采的必要手段之一,而针对沉积盆地中低温地热田回灌条件下地热资源评价方法不一,计算结果差异性很大。本次结合工程实例,对几种方法进行综合对比研究,分析潜在因素,选定最适宜沉积盆地中低温地热田地热资源评价方法,为今后科学规划开采地热资源提供技术依据。

1 评价原则与评价内容

根据《地热资源地质勘查规范》GB/T 11615-2010,地热资源/储量的计算,应以地热地质勘查资料为依据,在综合分析热储的空间分布、边界条件

和渗透系数,研究地热流体的补给和运移规律,研究地热的成因,热传导方式,地温场特征,建立地热系统概念模型基础上进行,在勘查开发程度较高的城市地区,应开展热储工程研究,获取地热井的参数,结合区域地热地质条件,对评价区开展地热资源的评价。区域性地热资源评价也是建立在单个采灌工程基础上开展的评价。

沉积盆地型热储地热资源评价主要包括地热资源储量的计算与地热流体可采量、可采热量的计算。由于热储物理特性属于固有属性,地热流体可采量评价便是目前地热资源评价的关键要点,回灌条件下地热流体可采量的评价更是目前最为关切的问题之一。

2 评价方法研究

2.1 工程概况

景县广川现代城现有地热井3眼,1眼开采井,1眼回灌井,另外1眼地热井作为备用。其中开采井井深1 274.11m,开采利用段为1 104.2~1 264.6m,利用热储层为馆陶组热储,2020年测得静水位75.0m,降深47.8m时,单井出水量85.3m³/h,井口水温53℃,根据抽水试验,水流方程拟合,其20m降深时,开采量为438 779.6m³/a,回灌井井深1 260m,开采利用段为996.3~1 231.0m,利用热储层为馆陶组热储,利用热储砂层厚度69.2m,井口水温50℃,水位上升70.9m时,单井回灌量44.2m³/h。

2.2 热储特征

该工程开采利用热储为新近系馆陶组热储,热储顶界埋深870m,底板埋深1 265.0m,砂厚比

作者简介:宋倩(1984~),女,汉族,河北衡水人,本科,高级工程师,研究方向:水文地质、环境地质、地热地质。

27.72%，热储砂层厚度为109.49m，平均孔隙度20%。恒温带深度为25m，恒温带温度为15℃，新生界地温梯度为3.2℃/100m，当地平均气温12.7℃。

2.3 区域地热资源储量

评价区范围5km²，其地热资源量为6.4×10¹³J，地热流体储存量1.17×10⁸m³，地热流体储存的热资源量1.995×10¹³J。

2.4 地热流体可采量评价方法

目前沉积盆地型地热资源开采均以地热回灌为前提，因此地热流体可采量评价为回灌条件下地热流体可采量。

2.4.1 采用热突破公式计算回灌条件下地热流体可采量

采用热突破公式计算适用前提条件：在隔水隔热均一，等厚的热储层中，热量只靠对流方式传递，对井系统的热突破公式为：

$t = \frac{\pi R_1^2 M}{3Q_s C_f}$ ，该公式的来历为AndreMENJOE等(1979)推导公式。

式中：Q_s—单井回灌条件下允许开采量(m³/d)；t—热突破的时间(d)；R₁—采灌井热突破距离(m)。

当t取100年(36500d)时， $Q = \frac{\pi R_1^2 M}{365t}$

这里Q是在t时间内，能够保持冷热水的混合峰面未运移到开采井，对开采井利用热储温度未产生影响的最大的单井的回灌量。

计算结果：根据《地热资源评价方法及估算规程》，式中t为100a(36500d)，根据其计算结果显示，单井最大回灌量为35422m³/a。由于公式中，热突破时间t与回灌的水量有直接的关联。因回灌并不是每天都在实施，每年回灌的时间约为120d，若将热突破时间转化为年时，其式中Q_s则为回灌条件下年允许开采量。反推单井回灌条件下允许开采量为295m³/d。

根据实际工程的计算结果，结合利用砂层厚度，根据公式反推区域单井年最大回灌条件下允许开采量为467.1m³/d。

公式2：M_s/M=Q_s/Q_d

式中：Q_s—单井回灌条件下允许开采量(m³/d)；Q_d—区域单井回灌条件下允许开采量(m³/d)；M_s—试验工程回灌井利用砂层厚度(69.2m)；M—区域地层砂层厚度(109.5m)。

若评价区按5km²计算，采灌井距离按目前的381.2m计算，其区域可布回灌井数量约为11眼，则区域回灌条件下年允许开采量为61.6万m³/a。

2.4.2 能量守恒法

地热流体储存量为静态储量，当不考虑补给条件时，其地热水的开采必定会造成热储压力水头的下降。而在实施回灌条件下，热储是有补给的，若将评价区看做在地质条件上无补给边界时，回灌的水量则成为单一补给水量，在均衡条件下，则可将单井最大回灌量作为最大开采量。当不考虑有热量补给的条件下，其回灌水温度与热储温度之间温差，则是成为热储温度降低的主要因素，因此可以将100年，利用热储温度下降2℃作为界定条件，从能量守恒的角度出发，反推最大回灌量。计算公式如下：

$$Q_a = 2 \frac{AM\rho_r C_r (1 - \Phi) + A\Phi M\rho_w C_w}{\rho_w C_w (t_r - t_h)}$$

式中：Q_a—100年热储温度下降2℃条件下最大回灌量(m³)；A—评价区范围(m²)；M—利用热储层厚度(m)；ρ_r—热储岩石密度(kg/m³)；C_r—热储岩石比热(J/kg·℃)；Φ—热储岩石孔隙度，无量纲；ρ_w—地热水密度(kg/m³)；C_w—地热水比热(J/kg·℃)；t_r—热储温度(℃)；t_h—回灌地热水温度(℃)。

经计算，利用热储温度100年下降2℃，允许的最大回灌量为505万m³/a。根据以灌定采原则，回灌条件下允许最大开采量则为505万m³/a。

2.4.3 水均衡法

相对于热量补给，其地热流体在动力场影响下的流量补给则相对较小，因此可利用水量均衡法开展地热资源评价。把评价区看做一个整体，当保持压力水头不变，则开采的水量不得大于回灌水量，因此可其回灌的水量便可作为最大的可采量。因此只需考虑采灌工程布局条件。采灌井之间间距可利用热突破公式，求取，若只考虑开采井与回灌井之间的距离，不考虑开采井之间距离影响，两个采灌工程可能会产生一定的影响。因此应根据开采井抽水试验，确定开采井影响半径，若小于采灌井距，则开采井之间距离应按2R₁计算，若大于2倍的采灌井距，则应按开采井影响半径作为依据圈定采灌工程的范围。

当保持水头压力不变，开采井影响半径小于采

灌井距的条件下,利用水均衡计算公式如下:

$$Q_a = Q_d \frac{A}{\pi R_1^2} \quad R_1 = \sqrt{\frac{3 \times 10^4 Q_d f}{\pi M}}$$

式中: Q_a —评价区回灌条件下允许开采量(m^3/a); Q_d —单井折算稳定回灌量(m^3/a); A —评价区范围(m^2); R_1 —采灌井热突破距离(m)。

当保持水头压力不变,开采井影响半径大于采灌井距的条件下,利用水均衡计算公式如下:

$$Q_a = Q_d \frac{A}{\pi R_2^2} \quad R_2 = 10 S \sqrt{\frac{0.366 Q_d R_2}{M S_w \lg \frac{R_2}{r_w}}} \quad (\text{单孔抽水})$$

水)

式中: Q_a —评价区回灌条件下允许开采量(m^3/a); Q_d —单井折算稳定回灌量(m^3/a); A —评价区范围(m^2); R_2 —开采井影响半径(m)。

经计算,当开采井影响半径小于采灌井距,区域稳定回灌量为109万 m^3/a ,当开采井影响半径大于采灌井距,100年区域稳定回灌量54.2万 m^3/a 。根据以灌定采原则,区域稳定回灌量则等同于区域稳定开采量。

2.4.4 单井权益保护半径(回灌布井法)

假设评价区除采灌工程热量消耗以外,系统与外界无热量交换,且保障回灌100年,利用热储温度下降不超过 $2^\circ C$,回灌率保障100%条件下,利用回灌条件下单井权益保护半径法计算区域可采量。计算公式如下:

$$R_1 = \sqrt{1 - \alpha} \delta \times \sqrt{\frac{Q_d t}{\delta M \sigma}} \quad f = \frac{\alpha_w C_w}{\alpha_e C_e}$$

$$\alpha_e C_e = \varphi \alpha_w C_w + (1 - \varphi) \alpha_e C_e$$

$$\alpha = \frac{t_b - t_0}{t_1 - t_0} \quad Q_a = Q_d \frac{A}{\pi R_1^2}$$

式中: Q_a —评价区回灌条件下允许开采量(m^3/a); Q_d —单井折算稳定回灌量(m^3/a); β —回灌率,取值100%; δ —热储温度下降 $2^\circ C$ 所减少的地热储存量百分比; t —热突破时间(d)。

根据计算,求出回灌影响半径为1 131m,为了保障采灌工程的独立性,互不影响,采灌工程的影

响半径应取相对高值,据此计算,5km²范围内可布采灌工程为2处,因此区域稳定回灌量为26万 m^3/a ,区域稳定回灌量则等同于区域稳定开采量。

3 可采量计算结果对比

综合对比以上四种结算方法,其热突破法与水均衡法计算结果更为接近,能量守恒法计算结果偏大,单井权益保护半径法计算结果相对保守。其原因主要为能量守恒中100年温度下降 $2^\circ C$,综合考虑了储层温度的下降,储层中热量占比较大,反之求取的可采量偏大。单井权益保护半径法中热储平均温度越高,其回灌条件下地热井对热储的影响半径越大,回灌条件下地热流体可采量也就越小,与能量守恒法存在一定的差异性。因此建议利用水均衡法与热突破法评价回灌条件下的可采量,在不产生热突破的条件下,实现以灌定采。

4 结语

地热资源作为一种清洁能源,开发利用程度逐渐加强,开发利用水平也在不断地提高,为了降低地热资源的开采产生的有关地质环境问题,回灌成为地热资源开采的必要条件。根据以上几种方法的对比,发现地热流体的回灌并不能从实际意义上增加地热流体的可采量,而是对维持开发利用热储层水头压力具有一定的积极作用。低温地热流体的持续回灌,会对开采利用热储层具有一定的降温作用,建议沉积盆地型地热资源评价采用热突破法与水均衡法评价回灌条件下的可采量。

参考文献

- [1] 张德忠,卢红柳,刘志刚等.河北地热[M],北京,地质出版社,2013年,121-126.
- [2] 陈穆贤,董卿卿,赵素杰等.河北省衡水市中心城区生态功能区基岩热储勘查[R],河北省地质矿产勘查开发局第三水文工程地质大队,2022年.
- [3] 宾德智,刘廷忠,郑克棣等.《地热资源地质勘查规范》GB/T 11615-2010[S],2011,14-16.
- [4] 王贵玲,李曼,张明燕等.《地热资源评价方法及估算规程》GZ/T 0331-2020[S],2020,4-8.