

地
热
能

(双月发行)

主 编：王贵玲
副主编：朱家玲
马 岩
张 薇
责 编：李 曼

目 次

2024年第5期

学述论文	
超声辅助脱除水中的微气泡	马永丽等(3)
天津沧县隆起蓟县系雾迷山组热储尾水回灌地温场变化特征分析	魏永民等(12)
西藏羊八井地热田三维电性结构模型——来自大地电磁的证据	薛国强等(19)
我国高温矿井热害防治技术研究进展及展望	韩 颖等(28)
综 述	
四川省米仓山南缘发现我国规模最大地热自流斜地	林化领(9)
地热信息	
雄安新区最深4500米地热井开钻	中国石油天然气集团公司华北油田公司(18)
第十九届中国可再生能源大会地热能分会在西安隆重举行	中国可再生能源学会地热能专委会(26)
自然资源部首个中低温水热型地热资源科创平台在津授牌	段春祥等(32)
2024年国际干热-超热地热资源研究与开发研讨会在长春顺利召开	冯 波(32)

(内部资料)

GEOTHERMAL ENERGY

Editor-in-Chief:
Wang Guiling
Editor-in-Chief:
Zhu Jialing
Ma Yan
Zhang Wei
Duty Editor:
Li Man

CONTENTS

No.5 2024

ACADEMIC ARTICLES

- Ultrasound-assisted removal of microbubbles from water
..... Yongli Ma et al.(3)
- Analysis of the characteristics of ground temperature field changes due to tailwater reinjection to the geothermal reservoir associated with the Wumishan Formation of the Jixian System in Cangxian Uplift, Tianjin
..... Yongmin Wei et al.(12)
- 3-D electrical structure model of Yangbajain Geothermal Field in Tibet —evidence from magnetotellurics
..... Guoqiang Xue et al. (19)
- Research progress and prospects of heat hazard prevention-and-control technology in high-temperature mines in China
..... Ying Han et al. (28)

REVIEW ARTICLES

- The largest geothermal artesian slope in China has been discovered on the southern edge of Micang Mountain in Sichuan Province
..... Hualing Lin (9)

News

- The deepest 4500m geothermal well started spudding in Xiong'an New Area
..... North China Oilfield Company, CNPC (18)
- The 19th China Renewable Energy Conference-Geothermal Energy Branch was held in Xi'an
..... Geothermal Energy Committee of CRES (26)
- The scientific and technological innovation platform for medium-and-low temperature hydrothermal resources, led by the Ministry of Natural Resources, has been awarded in Tianjin
..... Chunxiang Duan et al.(32)
- 2024 International Workshop on Hot Dry Rock and Supercritical Geo-thermal Resources was successfully held in Changchun
..... Bo Feng(32)

超声辅助脱除水中的微气泡

马永丽¹, 沈世龙¹, 陈纪雷¹, 徐云龙¹, 王童欣¹, 魏心宇¹, 王倩倩¹, 刘明言^{1,2*}

1. 天津大学化工学院

2. 化学工程联合国家重点实验室(天津大学)

摘要:利用气泡发生仪产生微气泡水,模拟含气泡的回灌地热水。通过浊度、电导率、溶氧量等参数测量和表征自来水、微气泡水和超声处理水的微气泡含量。通过对模拟微气泡水等样品中微气泡在超声消泡前后的含量等表征和分析,研究了超声处理对样本水体中微气泡含量的影响。结果表明,超声处理时由于超声空化作用,有助于加快微气泡成长、聚并;超声作用过程也是能量传递过程,通过提供能量降低水中气体含量,促进了微气泡的脱除。研究对于超声微气泡脱除技术用于地热水高效回灌奠定了基础。

关键词:微气泡;超声波;空化作用;脱除;地热水

地热水回灌过程受当前技术限制,易发生堵塞而造成回灌效率低,甚至回灌井报废等一系列问题。因此,解决地热水回灌过程中的堵塞问题,是实现地热能高效和经济利用的关键环节之一。气体堵塞主要是指,在地热水回灌过程中,由于压力和温度等操作条件以及地热水物理化学性质变化,而形成微气泡堵塞多孔岩层水通道,使回灌难以正常进行,一般占总堵塞的10%~15%。目前应对地热水回灌气体堵塞的方法,如加压回灌、离心脱气回灌、安装脱气罐利用流速和压差脱气后回灌等,效率都较低,难以满足高效地热水回灌过程中对液体脱气率的要求。

目前对于微气泡性质的研究还处在起步阶段。一般认为,微纳米气泡尺寸应在0.5–50 μm 之间,具有气泡上升速度慢、压强大、表面积大、界面电位高、气体溶解率高等不同于普通气泡的特殊性质,这也使得微气泡在污水处理、医疗卫生等领域有特殊应用。对于微气泡的制备与表征方面有一定进展,Etchepare等采用加压溶气减压释气的方法可以制得一定粒度的稳定微气泡,Fan等利用光催化的方式,在光催化材料表面析出微气泡,潘习习等研究了不同条件下,微气泡与溶解氧之间

的关系,发现两者是互相关联的。

国内外对地热水回灌过程中的气相堵塞研究也还不够。已有对地热水回灌气相堵塞特征的实验研究,如束龙仓等以达西渗流理论为依据,利用砂柱模拟雨水回灌地下水过程,采用介质渗透系数的变化定量评价试验砂柱的堵塞情况。也有脱气方法的研究,如用于自来水和金属熔融液脱氢方面的超声波脱气研究。亦有利用超疏水和超亲水纳米针结构网格脱气。但是,尚无采用超声波脱气方法用于地热水回灌过程中的气体堵塞的深入研究。超声波脱气是利用高强度的超声波振动产生空化气泡,在振荡压和定向扩散的作用下,空化气泡不断生长,长成大气泡后聚集和漂浮到液体表面破裂,溶液中的气体被脱除。超声波脱气与常规的化学、负压等脱气技术相比,具有能在常温常压下进行,对环境清洁、价格低廉等特点,是一种较有前景的脱气技术。然而,由于超声脱气技术的研究更多侧重于冶金领域的液态金属超声波脱气和化工、环境行业的气泡运动原理、气液传质方面,针对地热水超声脱气,特别是其中有关声强、频率等参数研究和对相关装置研发的报导很少。

本论文拟通过微气泡发生装置产生微气泡水,通过改变超声除气的功率,设计和进行超声波脱除微气泡的研究,评价超声波脱气的效果,探索优化的超声波脱气参数,为工业应用提供基础指导。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

用于模拟回灌地热水的自来水。

1.2 实验装置及流程

实验装置及流程如图1所示。

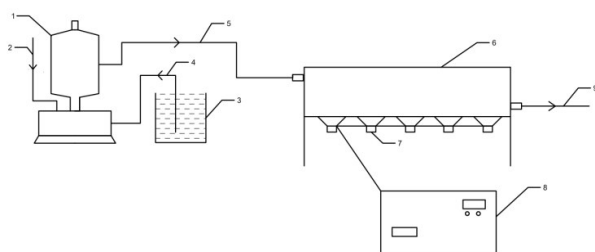


图1 实验流程图

1-微气泡发生仪;2-进气管路;3-水槽;4-进水管路;5-微气泡水;6-超声处理水槽;7-超声振子;8-超声波发生装置;9-超声处理后微气泡水

1)微气泡发生仪:斯利泵业生产,QY型号,规格为250 W。以100~150 L·h⁻¹的流量向水体内部产生微纳米级气泡。

2)超声处理装置:主体为金属水缸,材料为304不锈钢板,长50 cm,宽10 cm,高5 cm;水缸下装有超声振子,振子为科美达公司生产,KMD-4050型号,规格为28 kHz,60 W,振子间距大于10 cm。

3)超声波发生装置:科美达公司生产,KMD-K1双显型号,规格为28 kHz,600~900 W,用以在0~900 W的功率下产生20~25 kHz的超声波。

4)测量表征装置:

(1)台式浊度仪:力辰科技生产,WGZ-1A型号,测定水体的浊度,其原理是通过微气泡等对光线的散射吸收程度不同来表征不同的浊度。

(2)电导率仪:mettler toledo公司生产,M2001-CH 1/4 DIN型号,测定样品的电导率。

(3)溶氧量测定仪:梅特勒公司生产,JPSJ-605F型号,测定水体的溶氧量及温度,测量时应注

意搅动样本。

(4)微电泳仪(Zeta电位仪):上海中晨数值技术有限公司生产,JS94H型号,对放大1200倍的气泡连续拍照,放大后的照片中肉眼能看见0.5~20 μm的气泡。

1.3 实验操作条件及步骤

在室温下通过气泡发生仪处理样品5 min,以制得微气泡水,制得微气泡水在超声处理水槽中以不同条件进行处理,分别尝试通过浊度仪、电导率仪、溶氧量测定仪定量测定自来水、微气泡水、超声处理后微气泡水的气泡含量。操作步骤如下:

(1)采用浊度仪分别测量自来水、加气5 min微气泡水和固定频率与功率条件下超声处理0.5 min、2.5 min、5 min、10 min、15 min后水样的浊度。

(2)使用电导仪分别测量自来水、加气5 min微气泡水和固定频率与功率条件下超声处理5 min、15 min、25 min后水样的电导率。

(3)通过溶氧量测定仪分别测量自来水、加气5 min微气泡水和固定频率及0 W、270 W、450 W、630 W、900 W功率超声条件下,每隔10 min的样品中溶氧量浓度及温度。

(4)用微电泳仪分别拍摄自来水、加气5 min微气泡水和27.6 kHz、900 W功率超声处理后气泡水的微气泡照片。

1.4 数据处理

(1)浊度表征分析:以多次实验的平均值进行比较,通过不同状态下样品的浊度变化,分析浊度对表征样品中微气泡含量的可行性与可能揭示的规律。

(2)电导率表征分析:以多次实验的平均值进行比较,通过不同状态下样品的电导率变化,分析电导率对表征样品中微气泡含量的可行性与可能揭示的规律。

(3)溶氧量表征分析:首先对不同状态下样品的实验测量值进行比较,分析溶氧量对表征样品中微气泡含量的可行性,并通过对比溶氧量随超声处理时间和不同超声处理条件的变化探究超声脱除微气泡的规律。

(4)微气泡数目、形态变化分析:通过相机拍摄照片,直观分析不同条件下微气泡形态和数目

变化。同时由于单个照片所展示空间有限,为客观反映不同微气泡水样品中的气泡数目,对同一样品进行多次拍照,统计平均值进行比较。

2 结果与讨论

2.1 微气泡水与超声处理后的微气泡水

2.1.1 微气泡水状态

图2为微气泡发生仪初制得的含微气泡水样本。可以看出,气泡水初制得时为白色浑浊液体,静置2~5 min后逐渐澄清,开始时,气泡水含有大量的不同粒径的微气泡或小气泡,当气泡粒径超过50 μm 时,气泡上浮速度较快,不能稳定存在,会迅速发生聚并上浮至液体表面消失或溶解于液体之中。而微气泡则稳定存在于样品之中,这也在后续表征中得到证明。



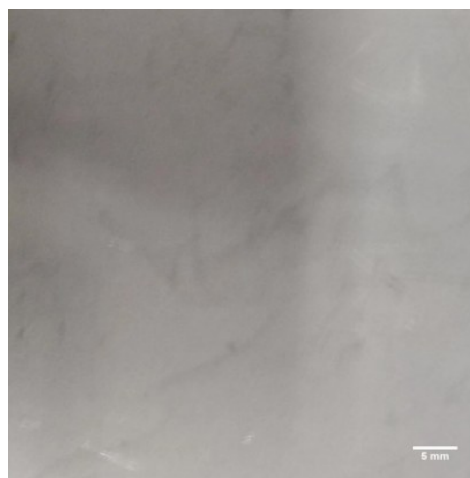
图2 初始状态的微气泡水(50 mL烧杯中)

(3 L水样通过微气泡发生仪加气处理5 min制得)

2.1.2 超声处理下气泡水状态变化

图3为进行超声处理时微气泡水的状态变化。气泡水原本状态为澄清透明液体,超声处理时,肉眼可见有气泡形成,且气泡会处于稳定成长阶段,主要存在于液体表面或容器底部。随超声时间增加,少量底部气泡上浮。当停止超声处理时,大部分液体表面气泡消失,大部分底部贴壁气泡上浮消失。分析认为,超声作用于两相体系时时由于空化作用,微气泡发生了振动、缩放等一系列动力学过程,微气泡粒径呈现震荡波动变化并逐步增大^[15],这加快了微气泡的成长或聚并,使得微气泡上浮速度加快,在环境中不能稳定存在,促使水体

中气体含量下降,同时使得微气泡含量下降。



(a) 未超声处理的微气泡水



(b) 超声处理时的微气泡水

图3 超声波处理前后的微气泡水的状态

(微气泡水为3 L水样通过微气泡发生仪加气处理5 min制得,超声处理条件为27.6 kHz,600 W)

2.2 微气泡水样品在超声消泡前后的性能表征

2.2.1 微气泡的浊度表征分析

从浊度测量的原理上分析,微气泡含量的多少与浊度(TU, NTU)有关。表1是典型的微气泡水在超声处理前后样本的浊度测量数据。从表1可以看出,无论是微气泡加气处理还是超声处理,浊度均有上升的趋势,但重复实验时,不同处理条件下浊度上升幅度又有所不同或者变化不明显,数据变化没有明显规律,而且所检测出浊度值均较小,变化程度也无规律性。分析认为是因为微气泡含量对浊度影响不明显,或者是实验所用浊度仪灵敏度不足,反而可能是其他影响因素如仪器杂质的引入等影响了样本浊度。同时,当

在相同条件下重复取得原水样时实验测量值明显不同,因而采用当前测量仪器进行测量的重现性较差。因此,浊度测量不适用于样品微气泡含量的表征。

表1 不同状态下微气泡水样本的浊度数据

组别	TU/NTU							
	原水样1	微气泡水 (处理5 min)	超声处理 (0.5 min)	原水样2	超声处理 (2.5 min)	超声处理 (5 min)	超声处理 (10 min)	超声处理 (15 min)
1	0.6	0.7	3.5	1.5	2.7	3.6	3.4	4.3
2	0.5	1.1	3.2	1.3	3.0	3.6	4.0	4.3
3	0.4	0.9	3.2	/	/	/	/	/
平均值	0.5	0.9	3.3	1.4	2.9	3.6	3.7	4.3

2.2.2 微气泡的电导表征分析

微气泡对溶液电导率($\sigma, \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)会产生影响。表2是部分样本的电导率测量数据。从表2可以看出,在不同处理条件下,尽管相对于原样本电导率小幅上升,但是总体上电导率变化不明显,且电导率上升有可能是由于实验过程中水温上升的影响。分析认为溶液电导率主要受温度和离子状态的影响、与浓度有关,微气泡对电导率的影响一般需要电导探针才能准确测量。实验室所用电导率测量设备探头为金属圆头,而非电导探针,且探针直径也会影响微气泡测量效果,当前实验条件下,电导率表征微气泡含量的方法不适用。

表2 不同超声时间下微气泡水样本的电导率

样本	$\sigma/\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$				
	原水样	微气泡水 (处理5 min)	超声处理 (5 min)	超声处理 (15 min)	超声处理 (25 min)
1	292.1	297.4	300.8	301.0	302.0
2	293.9	302.4	300.5	301.3	302.7
3	293.4	302.9	301.0	301.5	302.3
平均值	293.1	300.9	300.8	301.3	302.3

2.2.3 微气泡的溶氧量表征分析

表3是部分样本的溶氧量测量数据,图4是2 L微气泡水是否经过27.6 kHz超声5 min处理的溶氧量变化曲线对比图。从表3可以看出,微气泡处理后样本溶氧量上升;经超声作用后,溶氧量明显

下降。从图4可见,在进行测量时,数值大约在250 s后趋于稳定。超声作用处理后溶氧量明显下降;实验参数不同时,溶氧量下降速率不同。分析认为,当进行超声作用时溶解氧会因为空化作用进入微气泡水,结合超声作用时,会有肉眼可见气泡浮出水面,气泡空化成长后会进一步聚并,当不能稳定存在时,会上升至液面破裂的现象,认为溶解氧可以反映微气泡的含量。

表3 不同超声时间下微气泡水样本的溶氧量

样本	原水样	气泡水 (处理5 min)	超声处理 (0.5 min)	超声处理 (1.5 min)
DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	4.42	5.49	5.37	5.05
T/ $^{\circ}\text{C}$	20.4	20.9	21.3	21.7

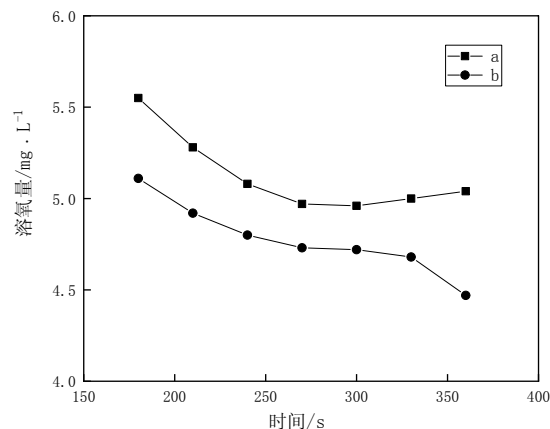


图4 微气泡水中的溶氧量在超声处理前后的变化曲线

(a—2 L微气泡水溶氧量变化;b—2 L微气泡水在27.6 kHz超声5 min后溶氧量变化,微气泡水通过微气泡发生仪加气处理5 min制得)

2.3 微气泡水样品中微气泡在超声消泡前后的表征分析

2.3.1 超声处理下含氧量变化

图5为用不同功率超声处理微气泡水所得到的微气泡水含氧量($\text{DO}, \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)随时间的变化。从图5可见,超声处理前微气泡水(加气5 min)含氧量维持在8~8.65 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,无超声处理时气泡水含氧量变化不明显,处在维持不变的状态;随着超声功率的增加,气泡水含氧量呈下降趋势,且下降趋势增大,说明气泡脱除效果与超声功率存在正相关关系。

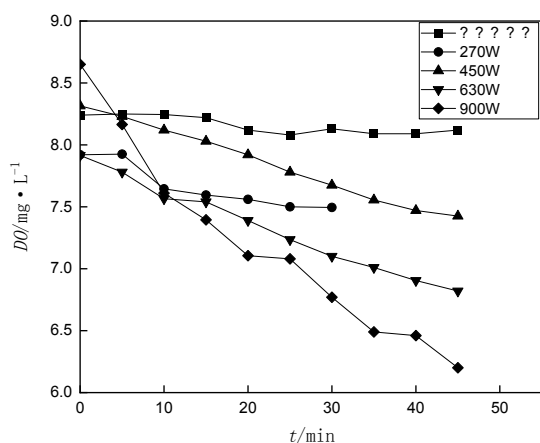


图5 超声处理微气泡水含氧量变化

(微气泡水均由5 L样品通过微气泡发生仪加气5 min制得, 超声频率均为27.6 kHz)

为客观反映超声功率对微气泡水中微气泡脱除的效果,定义物理量微气泡脱除速率,其中瞬时微气泡脱除速率为 $p(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$,平均微气泡脱除速率为 $P(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$,瞬时微气泡脱除速率和平均微气泡脱除速率分别由式(1)与(2)计算得到。

$$p = \frac{dDO}{dt} \quad (1)$$

$$P = \frac{\Delta DO}{\Delta t} \quad (2)$$

表4为由不同超声功率处理的微气泡水含氧量变化数据计算而得到的平均微气泡脱除速率。其中,与无超声处理微气泡水相比,用270 W超声处理微气泡水时,气泡脱除速率明显增大。结合实验时气泡产生与流动状态,可进一步认为在超声处理时,由于超声空化作用,微气泡可以迅速成长或发生聚并。此外,数据也明显反映出气泡脱除速率是随功率增加而提升的。其中,超声功率增加到450 W时,可观察到含氧量下降速率有所提升,而继续增加至630 W时,含氧量下降速率提升不是很明显。但当功率从630 W增至900 W时,气泡脱除速率增速明显加快,据此认为超声处理脱除微气泡时存在超声功率的合适范围,在此范围内超声功率的增加对于微气泡的脱除有更明显的效果。

表4 不同处理方法时平均微气泡脱除速率

处理方法	$P \times 10^2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$
无超声处理	-0.4
270 W	-1.58
450 W	-2.10
630 W	-2.45
900 W	-5.03

2.3.2 超声处理时微气泡水的温度变化

实验过程中发现,超声处理时,微气泡水的温度会随超声作用时间的延长而上升。图6为不同超声处理条件下微气泡水的温度随时间的变化。随超声功率的增加,微气泡水温增长速率也存在一定程度的增加。分析认为,超声处理时会传递能量,引起水温上升;当超声功率增加时传递的能量增大,水温上升速率也随之增加。而温度上升时,气体在水中溶解度下降,从平衡考虑,气液传质速率也增加,加快了空化气泡的成长速率,一定程度上促进了对微气泡的脱除效果。

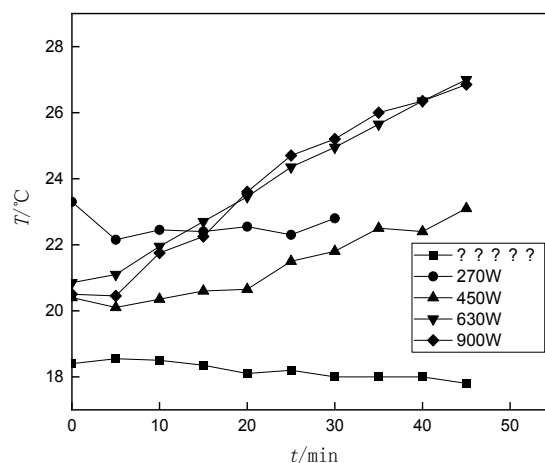


图6 超声处理时温度变化

(样品均为5 L水通过微气泡发生仪加气5 min制得的微气泡水,超声频率为27.6 kHz)

2.3.3 关于超声作用和温度上升对微气泡脱除的讨论

由于在实验进行过程中存在温度上升的现象,而且温度的上升也会导致微气泡水样品含氧量的下降,因此,这里讨论了超声空化作用是否真的对微气泡脱除有利。

图7为不同条件下微气泡水样品溶解氧随温度的变化,其中对照组为自来水在升温时含氧量

的变化。选取超声处理时功率为 450 W 和 900 W 两条件下溶氧量与温度的变化进行比较。可以明显看出,当施加超声作用时,溶氧量随温度的变化更加剧烈,且超声功率越大,溶氧量随温度变化越剧烈。同时分别计算了对照组和实验组含氧量随温度平均变化量 $U(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$,表 5 为不同条件下 U 的计算值,表中数据与图 7 所示趋势相同。实验现象可以说明,当施加超声作用时,微气泡脱除速率的加快是超声空化作用和温度上升平衡改变共同作用的结果。

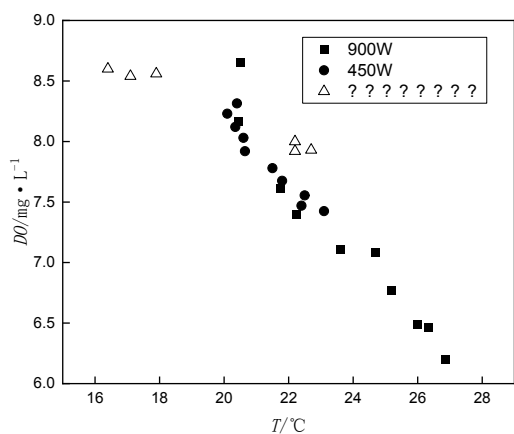


图 7 不同条件下溶氧量随温度的变化

(对照组为随机取样自来水,实验组样品为 5 L 自来水通过微气泡发生仪加气处理 5 min 后微气泡水,超声频率为 27.6 kHz)

表 5 不同条件下含氧量随温度平均变化量

处理条件	$U \times 10^2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
对照组(自来水)	-10.63
450 W	-32.96
900 W	-38.58

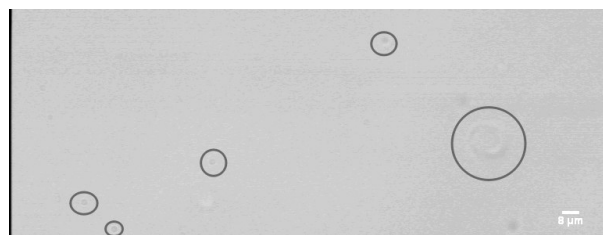
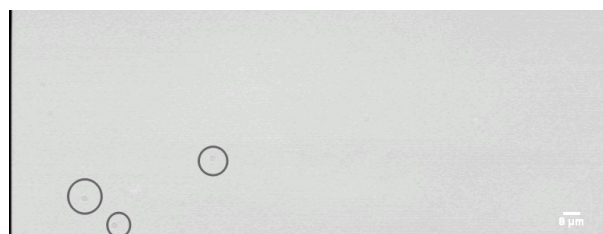
2.3.4 不同状态下微气泡形态与数量

图 8 为用相机拍摄得到的不同微气泡水样品中的气泡形态与数量。图 8(a)为未经处理的自来水,其中视野范围内气泡数目较少,粒径大小较为均一,图(b)为加气 5 min 后气泡水,图中明显可见气泡数目增多,且气泡粒径大小不均一,图(c)为 900 W 功率超声处理后的气泡水,其中视野范围内气泡数量对比原气泡水明显减少,且气泡尺寸较小。表 5 为三个微气泡水样品中气泡数目平均值。统计数值明显反映出,微气泡数目在加气

处理后明显增加,超声处理后又明显下降。从图中和表中数据综合分析认为,天然状态下的自来水样品,由于运输过程中理化性质的改变,是存在少量的微气泡的,但是微气泡粒径大小较为均一,处于一个较为稳定的状态;而微气泡发生仪处理后,样品中明显气泡含量增多,且产生的微气泡大小不同,存在一定的粒径范围分布,证明加气处理后样品中产生了不同粒径大小的微气泡,当前方法制得微气泡含量较多的模拟微气泡水是较为成功的;经过超声处理后,明显微气泡含量降低,已经低于原自来水样品,只有少量粒径较小微气泡存在,认为在超声作用下,大部分微气泡通过空化作用粒径大小发生改变,粒径较大的气泡会快速上浮至表面消失,进一步印证了超声处理有利于微气泡的脱除,也证明采用含氧量进行表征的可行性。



(a) 未经处理样品



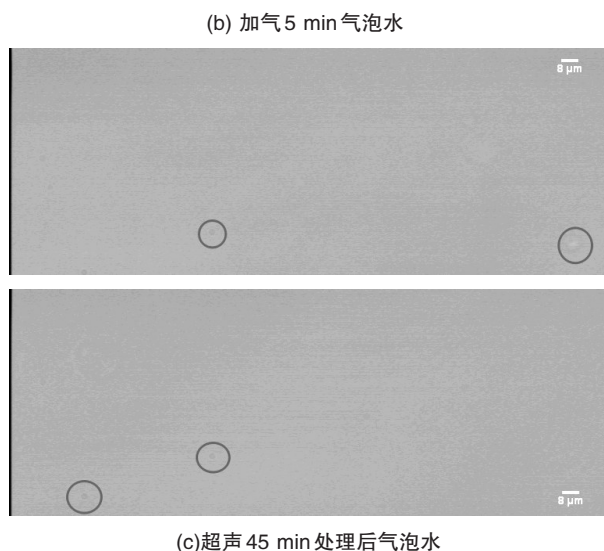


图8 相机拍摄不同状态下气泡形态与数量

(a 为未经处理自来水;b 为 5 L 自来水通过微气泡发生仪加气 5 min 后气泡水;c 为微气泡水在 27.6 kHz,900 W 条件下处理 45 min 后样品,气泡被圈出)

表6 不同样品气泡数目统计

组别	拍照次数	气泡总数	平均气泡数
未处理水样	104	187	1.80
加气 5 min 气泡水	148	408	2.76
超声处理 45 min 气泡水	124	210	1.69

3 总结与展望

(1)浊度与电导率表征微气泡含量的方法不

可行,但是,可以采用溶氧量作为微气泡含量的表征参数。

(2)超声处理时,由于超声空化作用,微气泡成长、聚并速率加快,促进了微气泡水中微气泡的脱除。

(3)超声作用脱除微气泡过程中,还存在热量传递过程,通过提供热量影响气液平衡状态,降低了水中气体含量,进而有助于脱除微气泡。

(4)微气泡的状态是随时间改变的,本实验采用的测量方法未能建立动态测量方法实时追踪微气泡含量变化,存在延后性,可以在测量方法上进一步改进。

(5)本实验功率设定范围有限,可以探索更宽范围的超声功率,并结合成本、能耗等因素,确定最适合的超声功率。此外,频率作为超声的重要参数之一,也可探究超声频率对脱除微气泡的影响,以确定更好的操作条件。

(6)本实验初步探究并确定了超声对微气泡脱除的可行性,对以后发展解决地热水回灌中气体堵塞问题的技术提供了指导。

参考文献略

转自《化学工业与工程》Vol.41 No.4

四川省米仓山南缘发现我国规模最大地热自流斜地

林化领

四川省地矿局九〇九水文地质工程地质大队

横亘于四川省北部边陲的米仓山,东连大巴山,西接龙门山,山体绵延起伏长达400公里,是四川盆地北部的天然屏障,平面上酷似缺失下底的巨大梯形。在梯形腹心地带蕴藏着丰富的地热资源。观察地形地貌,查阅地质资料,细读深井勘探成果,多次实地考察,认真分析,反复研究,确认龙

门山北段,米仓山南缘发现确系一鲜为人知我国最大的地热自流斜地。

地热自流斜地分布范围,西自四川剑阁新城,经广元、旺苍、南江、通江县北,直抵陕西省镇巴县简池乡,全长250公里,南北宽16—18公里,以米仓山为主体,幅员面积约4000平方公里。

“一枝红杏出墙来”。早在1976年,四川石油管理局3511钻井队,在嘉陵江北岸,距广元14公里的盘龙乡,为勘探河湾油气地质结构而钻探,井深3794米,当钻进至2088.8—2140.41米井段时,地下热水源源不断地涌出地面,水温47.0℃,自流涌水量为2000吨/日以上。水质分析为硫酸钠型水,含多种有医疗价值矿物质,特殊元素,遂建温泉浴室,对疥疮、脚气病、关节炎等疗效显著。盘龙热水井,惊醒了沉睡于地下亿万年的热水,从而开创了川北地区利用地热能资源的先河。

当开发利用地下热水兴起之初,于2005年底,剑阁县新城区清水河畔,一口专项钻探地下热水的钻井,带着人们的期盼、向往,在隆隆钻机转动声中启动了。历时一月余钻进工程中,不负众望,一股热水从井口喷吐而出,水温56.0℃,自流量1740吨/日,井深1780米,人们喜出望外,皆大欢喜。奔走相告。

“唯有源头活水来”。剑阁新井冒热水了!较相距26公里的盘龙热水自流井,整整晚了30年。然而两井的热水“本是同根生”,从各自的井位所处的地质剖面上,清晰地看到,热水源自一单斜构造,三迭系中统雷口坡组和嘉陵江组碳酸盐岩裂隙溶洞热水。从而,激发了专业人员对地热自流斜地探索的兴趣、热情和决心。

龙门山北段,向东顺延米仓山南缘地热自流斜地形成,既与该地区自然地理环境息息相关,又与地质条件密不可分。

地热自流斜地的形成,务必具备三大基本要素,即地层岩性、构造和地形地貌,三者完美结合,缺一不可。现分述如下。

地层岩性:地热分布区的龙门山、米仓山前山出露的中生界地层,在漫长的地质发展史中,建造一套完整的底板、热储层及盖层的单斜构造层。

底板:三迭系下统铜街子组、飞仙关组,岩性为紫红色页岩夹泥质灰岩、鲕状灰岩。

热储层:三迭系中统嘉陵江组、雷口坡组,灰白色厚层状纯灰岩、灰质白云岩、角砾岩,夹泥质白云岩和少许页岩,厚度663—992米。岩层裂隙岩溶强烈发育,为地下热水运移,储存提供良好的空间。

盖层:由三迭系上统须家河组、侏罗系下统白田坝组,中统千佛崖组、沙溪庙组组成,碎屑岩建造,块状、厚层状石英砂岩、长石石英砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩,岩层由老到新,岩性由砂岩、砂岩与泥岩互层到泥岩夹砂岩的变化趋势。该岩组裂隙不发育,犹如一道天然的堤坝,将丰富的地下热水拦截蓄集。

构造:从构造活动的痕迹显示,中生界地层除承受延续南北向力度逐渐减弱挤压作用影响外,但主要处于秦岭山脉强烈抬升与四川盆地缓慢沉降中间地带,故成就了龙门山北段和米仓山前缘独特联体的单斜构造单元。

但这一巨大的单斜构造层,伴随横向挤压作用,却发生波折的,概括起来,有三个明显向北凸起的弧形波段,西部米仓山东西向构造与龙门山北东向构造合力,在广元城区打出形如牛轭状弧段,称广元牛轭弧;东端与大巴山弧形构造在陕西简池乡联手制作两翼恰成90度的直角弧段,谓之简池直角弧;中部在南江城区,因单斜构造受南北挤压强度差异,孕育一似新月状的弧段,冠名南江新月弧。

单斜构造层产状,整体向南倾斜,但受“三弧”的干扰,竟改造了局部岩层产状,在弧形东翼岩层倾向南西;而西翼则倾向南东。岩层的倾角,据实地测量、统计,倾角变化幅度一般在20°—50°间,自北向南岩层倾角由高变低的趋势。

总之,三个弧段岩层倾向变化,利于地下热水富集,倾角变幅,再搭配南北地形反差大,易驱动层间热水自流。

地形地貌:米仓山北背靠高大的秦岭,南俯瞰低矮的丘陵,地形变化总趋势,北高南低,东部稍高于西部,高程最高为通江县北挂宝岩2008米,最低为广元昭化,嘉陵江河畔475米,一般高程在500—1600米间。

因岩性差异,表现在地形上,自北向南,渐次降低,层次分明,错落有致,总体构成别具一格的单面山地貌。

北部由碳酸盐岩层组成的低中山地形,山势峻峭,峰丛林立,间有溶蚀洼地、落水洞、岩溶漏斗等比比皆是;中部由砂质岩层构成的低山地形,山

顶山脊尖峭,山坡平直较陡;南部由泥质岩层构建的地形,则呈另类景观,丘陵起伏,丘顶浑圆,丘坡和缓。

由于流水着力刻划,区内沟谷纵横,从中解读出主要有两种河流类型:中部、北部河流流向既与原始地面倾斜一致,又顺硬质岩层倾向发育的河流,为顺向河。南部顺软质岩层走向发育的河流,称之为次成河流,最典型、最具经济价值的清水河东接嘉陵江段及其支流东河,直到旺苍县白水河河谷,乃至南江县到简池乡一带断续河谷,均系在中侏罗统厚度较大的泥岩层中顺走向发育的次成河,为单斜谷,当地称之为河谷走廊。

综上所述,龙门山北段、米仓山南缘中生界地层中底板、热储层、盖层层次清晰,单斜构造,地貌为单面山,向南渐次递降的斜坡地形,因此,地热自流斜地三大基本要素齐备,且有机组成,可说是“地”作之合,天衣无缝,因此,巨大的地热自流斜地,在米仓山南缘应运而生。

此外,气候条件中的年均降水量 1000 毫米以上,无疑为地下热水注入强劲活力,也滋润其恒久的生命。

但地热自流斜地内,各区段地下热水富水程度是不尽相同的,富集地下热水区段,即广元牛轭弧、南江新月弧和简池直角弧富水区段。因为弧段的岩层结构是,外弧岩性为碳酸盐岩层,内弧岩层为碎屑岩,外弧岩层中张裂隙尤为发育,频率高,强度大,伴之岩溶相应发育,裂隙溶蚀延伸向弧心收敛,利于地下热水向弧中轴线运移,汇聚蓄集,故富集热水。

下面引出广元牛轭弧内已施工三口地热自流井为证。

例一、远在 1978 年间,四川石油管理局在距广

元牛轭弧中轴线西侧 3 公里王家营,钻探一口热水自流井,井深 3200 米,热水自 1920—2300 米涌出,水温 49.0℃,自流量高达 8725 吨/日,富含多种有益于医疗保健作用的矿物质和微量元素。

例二、近在 2010 年,在广元市内工农镇北山坡上,施工一口热水井,因靠近牛轭弧顶,且偏东翼,出热水段 1800—2100 米,水温 36.0℃,自流量 3500 吨/日。

例三、2018 年间,位于广元市中区皇泽寺左近施工一口地热勘探供水井,位于牛轭弧中轴线左侧百余米。当钻进揭穿侏罗系、三叠系上统巨厚的碎屑岩系地层,则进入三叠系中下统碳酸盐岩系地层之后,开始大量涌出地下热水,终孔测定自流热水量为每日 7100 吨以上,水温为 49.0℃,水温、水量稳定,水质检测为 $\text{SO}_4\text{—Ca.Mg}$ 型水,矿化度 3.395 克/升。

因此,在广元牛轭弧储热水构造内仅施工三口地热井,总自流热水量每日近两万吨。而且单井自流热水量也超过正常单斜储热层单井自流热水量两倍以上。

此外,南江新月弧储热构造带和简池直角弧储热构造带有待进一步开发。

米仓山南缘巨型地热自流斜地,主要特征是,规模之大,水量之丰,水质之优,水温居中,埋深适度,便于开采,取之不尽,用之不竭,在四川省境乃至全国实属罕见。

剑阁、广元、旺苍、南江一带为开阔的河谷走廊,是布置热水井最佳的选择场地,气候温和,交通方便,人口稠密,工农业发达,多为市、县、乡镇所在地,宜于地下热水开采利用。

四川省地矿局九〇九水文地质工程地质大队

天津沧县隆起蓟县系雾迷山组热储尾水回灌地温场变化特征分析

魏永民^{1,2}, 王 娟¹

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要:为保证地热资源的可持续利用,减缓热储压力下降速度,天津市已开展多年回灌工作,大量的低温流体进入热储层后对温度场是否会产生不利影响不得而知。本文以天津沧县隆起为研究区,选取采灌量最大的蓟县系雾迷山组热储层为研究对象,通过多年恢复期的稳态测温工作,结合水位埋深观测数据,对回灌井内热储层段温度变化特征进行了分析,并定性的论述了储层热源补给来源。研究结果表明,回灌流体的进入会改变井筒的温度场,年度恢复期内,回灌井井筒温度逐步回升,回升速率由快变慢;恢复末期,储层流体温度呈逐年下降趋势。储层在恢复初期以热对流或弥散作用为主,温度恢复迅速,后期以热传导为主,温度恢复缓慢。

关键词:尾水回灌;温度场;稳态测温;雾迷山组储层;热传递

引 言

在实现“双碳”目标的大背景下,新型清洁能源—地热资源的开发与利用得到了广泛关注。天津市是我国地热开发最成熟的地区之一,距今已经有80年的地热利用历史。作为热能载体,地热流体并非取之不尽,长时间持续地、过度地开采会带来热储压力下降等问题。为保证地热资源可持续利用,采取回灌式开采已经达成共识。天津市于80年代开始进行回灌研究,2000年以后开始大规模尾水回灌,回灌率与回灌量逐年上升。回灌强度的增大,大量低温流体进入热储层后对温度场的影响逐渐得到关注。蓟县系雾迷山组热储地热资源因具有温度高、水质好、易回灌等优势,从20世纪90年代起逐渐成为天津地区开发利用的主要热储层。截至2021年10月,天津市雾迷山组地热井共311眼,雾迷山组热储采灌系统128处,开采量 $3\ 017.66 \times 10^4 \text{ m}^3$,回灌量 $2\ 433.65 \times 10^4 \text{ m}^3$,回灌率80.65%,回灌量和回灌率逐年增加。本文选取蓟县系雾迷山组热储层,以SR9井为例,通过多年恢复期的稳态测温工作,对回灌井内热储层段温度变化特征进行分析,并对储层热源补给来源进行探讨。

1 区域地质背景

1.1 地质构造特征

天津市大地构造位置处于Ⅰ级构造单元柴达木—华北板块的华北陆块(Ⅱ),纵跨了燕辽裂陷带(Ⅲ₁)和华北盆地(Ⅲ₂)两个次级构造单元。两者以宝坻断裂为界划分为Ⅳ级构造单元:断裂以北为蓟唐裂谷(Ⅳ₁),进一步划分为三个Ⅴ级构造单元,断裂构造以近东西向为主,北东向和北西向次之;断裂以南为新生界覆盖区,是中新生代以来的断陷、拗陷盆地,进一步划分为冀中拗陷(Ⅳ₂)、沧县隆起(Ⅳ₃)和黄骅拗陷(Ⅳ₄)三个Ⅳ级构造单元,整体上呈现为北北东向两拗一隆的构造格局。

沧县隆起位于冀中拗陷东侧,并以断裂为界,其东以沧东断裂与黄骅拗陷为邻。受北北东向和北西西向断裂及地层分布控制,沧县隆起进一步划分出潘庄凸起、双窑凸起、白塘口凹陷、小韩庄凸起、大成凸起和王草庄凸起等六个Ⅴ级构造单元(图1)。沧县隆起自古近纪开始一直强烈隆升,直至上新世—第四纪才被覆盖,主体部位普遍缺失古—中新统。沧县隆起主要由中、新元古界和古生界组成,中生界大多缺失,新生界沉积厚度为1 000~1 600m,缺失古近系。

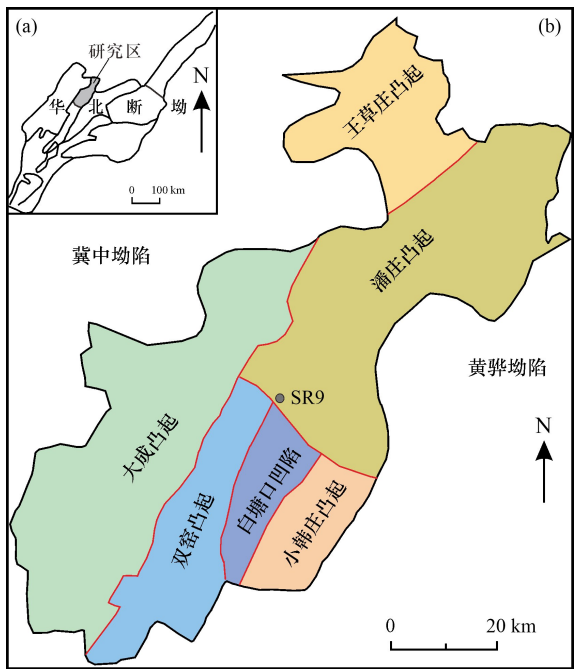


图1 沧县隆起构造分区图(据文献[4-5]修改)

1.2 地温场特征

地壳浅部地温场的主要影响因素有盖层厚度、基岩埋深形态、构造形态、断裂活动、地层岩性、地下水活动和岩浆活动等。沧县隆起地热资源属于沉积盆地型地热资源,地幔生热与基岩的放射性衰变产热主要通过热传导加热储层,上部沉积盖层的隔热特性对热储层起到保温效果,深部基岩储层通过基岩裂隙及断裂导水导热通道进行的热对流作为有益补充。沧县隆起地温场分布特征主要受基底构造形态控制,凸起部位为背斜,核部岩性主要为奥陶系及蓟县系的石灰岩和白云岩,导热率较高,将深部热流能传送到基岩顶板,使盖层平均地温梯度达到3.99℃/100m。在沧东断裂和白塘口断裂两个导水断裂处,雾迷山组储层水温高出其它部位10℃左右,表明研究区局部受到了地下热水沿断裂上涌影响。

1.3 储层特征

中元古界蓟县系雾迷山组属于岩溶裂隙型热

储层,在研究区广泛分布,顶板埋深在1 000~3 000m,仅在白塘口凹陷内白塘口西断裂与白塘口东断裂之间埋深较大,顶板埋深超过了3 000m。雾迷山组从上至下共分为4段,由于厚度比较大,一般将上部三、四段作为一组热储层,下部一、二段作为另一组热储层。三、四段岩性以深灰色粗晶白云岩、燧石条带白云岩为主,孔、洞、缝发育,裂隙率5.0%~13.4%,是重要的地热流体储集层。三、四段单井涌水量100~200m³/h,井口稳定流温77~103℃。三段底部分布有厚度稳定的砖红色泥质白云岩,隔水性好,是三段与二段的分层标志。一、二段为富镁碳酸盐岩层段,其中一段尚未有钻井揭露,二段岩性以灰色、深灰色白云岩、硅质条带白云岩为主,有泥质夹层,孔隙率4%~7%,该层岩溶裂隙发育,储存空间大,富水性好,单井涌水量100~180 m³/h,井口流温2~103℃。

雾迷山组水化学类型主要为Cl·HCO₃·SO₄-Na、Cl·SO₄·HCO₃-Na和Cl·SO₄-Na型,矿化度1 400~4 200 mg/L,沿径流方向逐渐增大。

2 研究方法

2.1 地热井概况

SR9地热井位于天津市河东区天津地热院内,成井于2002年。该井为四开定向井,采用了裸眼成井工艺,取水目的层为蓟县系雾迷山组,成井井深3 155m,成井时井口流温82℃,井身结构及钻遇地层见表1、2。从2002年开始,对SR9井进行尾水回灌,地热尾水温度平均温度约为42℃。具体情况见表3。

表1 SR9井身结构

井段	深度/m	井径/mm	工艺
一开	0~237.73	339.7	套管
二开	237.73~1 634.90	244.5	套管
三开	1 634.90~2 686.43	177.8	套管
四开	2 686.43~3 155.00	152.0	裸眼

表2 SR9井钻遇地层简表

地层	岩性特征	底板埋深/m
Q	灰色、深灰色、棕黄色、棕红色的粘土、砂质粘土与灰色、黄色、灰黄色的粉砂、粉细砂、细砂、中细砂互层。	527
Nm	灰色、棕黄色、棕红色杂色的泥岩与灰黄色、灰色、灰绿色的粉砂质泥岩互层	1 227

O	以浅灰色、灰色、灰黄色、青灰色的灰岩为主,上部含海绿石、灰黄色条带	1 256
ε	中、上部以鲕状灰岩、泥质灰岩夹泥质条带灰岩为主,下部主要以紫红色泥岩、灰色灰岩为主	2 431
Qb	上部为棕红色白云质泥灰岩,下部以紫红色为主,泥晶质,较坚硬,含钙,部分夹有灰绿色薄层灰岩。底部为海绿石英砂岩和石英砂岩,夹一层杂色页岩	2 686
Jxw	为巨厚层灰、深灰色的白云岩夹薄层灰质白云岩和泥质白云岩。	3 155(未穿)

表 3 SR9井回灌情况

10⁴ m³

年	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
灌量	27.5	10.8	7.5	9.1	2.4	12.5	29.9	26.0	34.5	37.2	26.8	16.7	20.6	24.7	33.4

注:2003、2009年未回灌。

2.2 稳态测温

天津地区供暖时间为每年11月初至次年3月底,在此期间,采灌系统将开采井内地热流体抽出经过换热后将尾水灌入回灌井中。尾水回灌破坏了地层原始的热平衡状态,当非供暖期停灌后,地层受到内部热源加热,温度将逐步恢复。为了解井筒温度场垂向上的变化特征,分析回灌对储层温度场的影响和不同时期热储动态温度变化规律,天津市地热资源动态监测项目选取停灌后、供暖前及恢复中期对回灌井进行稳态测温工作。

自2012—2018年,SR9井已连续7年在非供暖期进行了稳态测温工作。稳态测温在2012—2014年停灌后和供暖前各测一次,2014年之后增加了中期的监测。由于该井回灌时间较长,井底逐渐堆积锈皮沉屑,导致测井深度逐年减小。具体测温情况见表4。

表 4 SR9井稳态测温情况

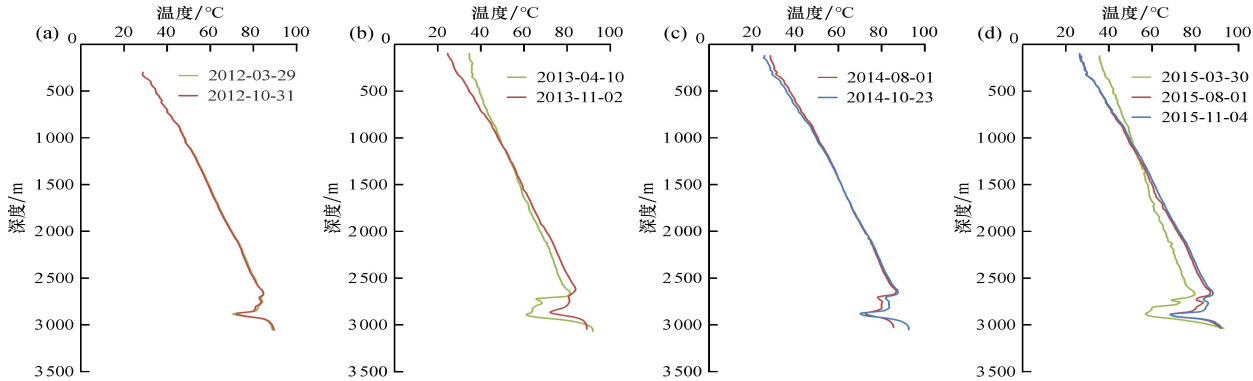
年	测温日期	测温深度/m
2012	3月29日	3 058
	10月31日	3 062

年	测温日期	测温深度/m
2013	4月10日	3 079
	11月2日	3 056
2014	8月1日	3 041
	10月23日	3 063
2015	3月30日	3 036
	8月1日	3 028
	11月4日	3 031
2016	3月24日	3 032
	7月29日	2 986
	10月26日	2 979
2017	4月11日	2 894
	7月23日	2 883
	10月17日	2 979
2018	4月10日	3 016
	7月27日	2 784
	10月18日	2 976

3 温度场变化特征分析

3.1 地热井多年测温曲线

根据SR9地热井的稳态测温记录,绘制了不同年份的测温曲线,如图2所示。



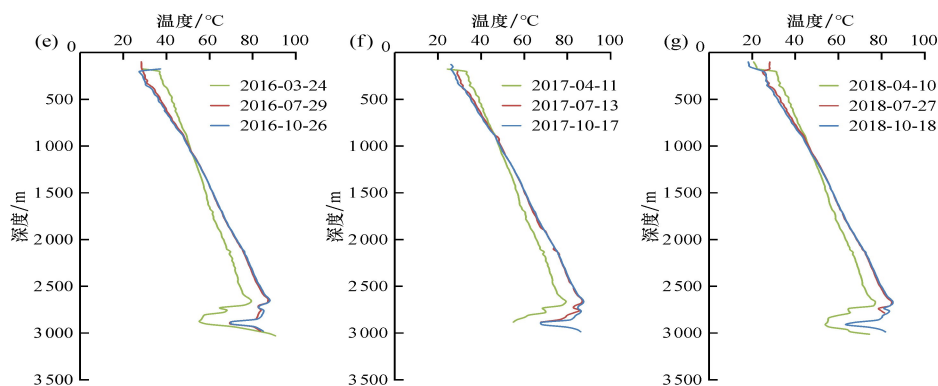


图2 2012—2018年度测温曲线

3.2 测温曲线特征

SR9井静水位埋深为150~185 m,液面深度以上测温曲线反映的是井筒内空气的温度,主要受外界气温影响。井筒内流体温度可分为两段,即上部均匀增温段和下部储层低温段:

(1)上部均匀增温段:该段测温曲线变化较为均匀,温度随深度增加而增加,变化趋势与本区的地温梯度变化趋势一致。曲线上小的波动被认为是地下径流和各层岩石热导率变化所导致。

(2)下部储层低温段:自2 700 m深度开始,温度随深度的增加明显下降,在2 875 m处温度降至最低,直至底部形成了一个低温带。该段深度与雾迷山组热储层深度基本一致,为回灌目的层。雾迷山组岩性为大段巨厚的白云质灰岩,热导率较大,在天然状态下该热储层地温梯度应呈均一化。回灌导致大量低温流体进入此段储层中,形成了温度低值区。

3.3 年内变化特征

SR9井筒内温度在停灌后逐步回升,前期回升速度远大于后期。年内测温曲线在1 000 m深度上下形成一个交汇点,多年测温曲线表明该层位水温基本不变,对应温度为回灌温度。200~800 m段曲线上的小波动基本无变化,1 600~2 400 m段曲线上的小波动基本消失。从表2可知,200~800 m段地层为第四系和新近系明化镇组上段,该段孔隙发育,地下径流活跃,形成的小波动年内变化较小;1 600~2 400 m段地层为寒武系,该段主要为灰岩和泥岩互层,测温曲线上的小波动是泥岩和灰岩的热导率相差较大形成的,随时间推移热导率差异影响逐渐减小,直至末期基本消失。

3.4 多年变化特征

根据测温曲线年内变化可知,井筒温度在恢复末期温度回升幅度极小,回灌前几天的温度都可作为储层恢复末期温度。雾迷山组为岩溶裂隙型储层,裂隙最发育处灌入的低温流体最多,测温曲线上呈现最低值。2012—2018年恢复末期储层最低温度变化结果表明,SR9回灌井储层流体温度呈逐年下降的趋势(图3)。

由于难以对回灌井周围温度场进行有效监测,当前对于尾水回灌对储层温度场在水平方向上的影响范围可采用基岩储层冷锋面运移公式计算。

$$D = \sqrt{\frac{3q_i \rho_w \beta_w}{\pi b (\rho_a \beta_a)}}, \quad (1)$$

式中: D 为冷锋面运移距离(m); q_i 为前*i*年累计回灌量(m^3); b 为热储层有效厚度(m); $\rho_w \beta_w$ 、 $\rho_a \beta_a$ 分别为流体和热储层比热容和密度乘积($\text{KJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。持续的回灌使冷锋面逐渐外扩,当冷锋面达到开采井时会造成井口流温降低。

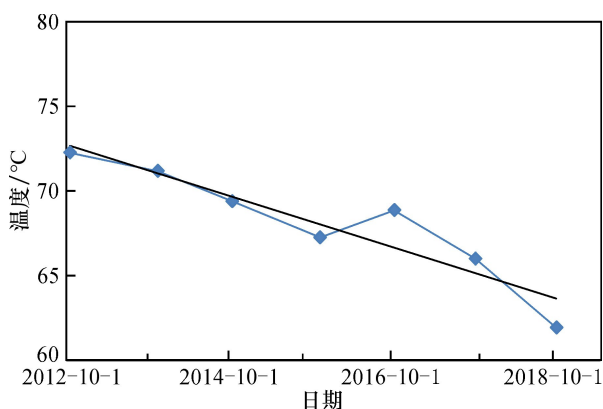


图3 SR9井储层流体温度变化趋势

3.5 影响因素分析

回灌井温度场的变化主要受到回灌量和回灌温度的影响。针对SR9井恢复期内温度回升值和回灌量及回灌温度的关系,本文进行了相关性分析。由于SR9井历年平均回灌温度为42℃,将其作为一个定值,得到了温度回升值通回灌量的关系曲线及经验公式(图4、5)。图4显示点呈离散形式,表明年度回灌量和温度回升值相关性较小;图5中累计回灌量和温度回升值拟合较好,表明在回灌温度恒定的条件下温度回升值主要受到累计回灌量的影响。

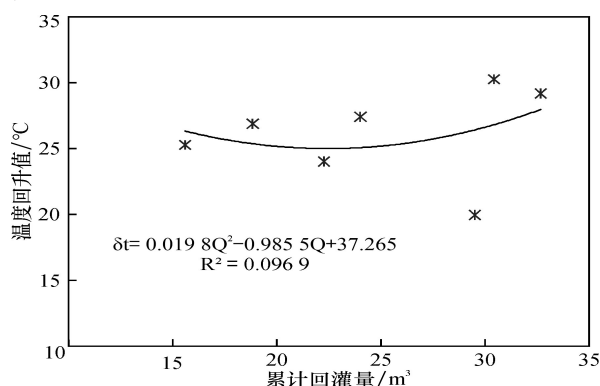


图4 年度回灌量和温度回升值关系

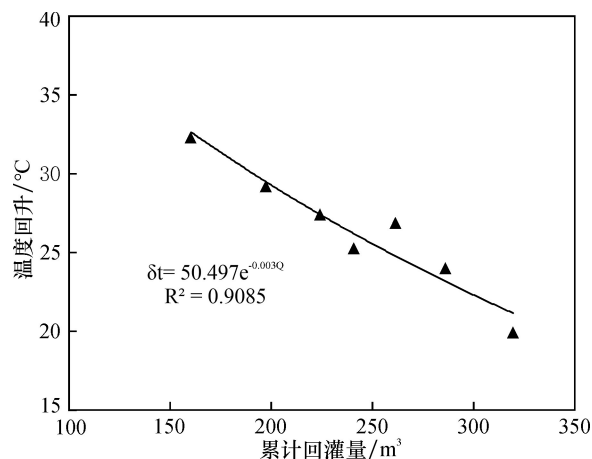


图5 累计回灌量和温度回升值关系

4 温度恢复来源

刘志涛等研究表明,储层温度恢复热量主要

来源于水平方向上的热量传递。根据传热机理可将储层热量来源分为热传导、热对流和热弥散。由于目前难以获取储层岩石的内部结构、温度场和流场的具体变化数据,本文只进行定性分析。

4.1 热传导

热传导是物体各部分之间在不发生相对位移时,依靠物体内部分子、原子及自由电子等微观粒子的运动而产生的热量传递。其公式如下:

$$Q = A\lambda G_i \cdot t, \quad (2)$$

式中: Q 为热量(J); λ 为物质热导率($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$); G_i 为地温梯度; A 为热传导面积(m^2); t 为热传导时间(s);横向上的地温梯度可根据公式(3)进行计算。

$$G_i = (T_1 - T_2)/D. \quad (3)$$

式中: G_i 为横向地温梯度; T_1 为储层温度(℃); T_2 为SR9井储层稳定温度(℃),根据测井资料储层温度取82℃; D 为冷锋面运移距离(m)。

由于稳态测温深度不一,本文选取数据最全的2015—2017年度进行分析。2015—2017年累计回灌量分别为 $240.90 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $261.50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $286.20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据SR9井区域测井资料,热储层有效厚度取80 m。根据天津市山岭子地热详查报告,流体和热储层比热容与密度乘积分别取 $4.18 \times 10^3 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{℃}^{-1}$ 和 $2.53 \times 10^3 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{℃}^{-1}$ 。

物质温度的变化和热量的关系如下:

$$Q = \Delta T m \beta, \quad (4)$$

式中: Q 为热量(J); ΔT 为温度变化量(℃); m 为物质的质量(kg); β 为比热容($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$);

联合公式(2)和(4)可得:

$$\Delta T m \beta = A\lambda G_i \cdot t. \quad (5)$$

假设热传导作用为储层温度恢复的主要来源,由于面积、质量、热导率和比热容不变,温度增幅应与地温梯度和时间的乘积成正比。测温计算结果显示,区间温度增幅比值远大于地温梯度与时间乘积比值(表5)。由此可知,热传导对储层温度回升并未起主导作用,起主导作用的是热对流或热弥散。

表5 2015—2017年温度区间增幅比值和地温梯度与时间乘积比值计算结果

年	测温日期	冷锋面运移距离/m	温度/℃	地温梯度/(℃·m ⁻¹)	区间增温幅度比值	地温梯度与时间乘积比值
2015	3月30日	218.02	55.87	0.119 850	112.90	1.28~2.27

年	测温日期	冷锋面运移距离/m	温度/℃	地温梯度/(℃·m ⁻¹)	区间增温幅度比值	地温梯度与时间乘积比值
	8月1日		67.16	0.068 066		
	11月4日		67.26	0.067 608		
2016	3月24日	227.15	54.14	0.122 644	34.93	1.28~2.71
	7月29日		68.46	0.059 605		
	10月26日		68.87	0.057 800		
2017	4月11日	237.64	53.48	0.120 013	50.08	1.26~2.16
	7月13日		66.00	0.067 328		
	10月17日		66.25	0.066 276		

4.2 热对流

热对流是流体各部分之间发生相对位移时,冷热流体相互混渗所引起的热量传递。研究显示,影响热对流的因素众多,包括渗流速度、压力梯度、界面效应、黏性耗散、浮生力、变物性等。王如宾等认为单裂隙中温度场中的温度是渗流场中渗流流速的函数,渗流速度变化越大,温度场的分布变化也越大;冯雨晴等认为干热岩裂缝宽度越大、距离越长,流体升温越快;康建宏等通过对多孔介质内黏弹性流体的热对流稳定性研究认为,随着 Rayleigh 数的增加,热对流的流场从单个涡胞逐渐演化为多个不规则单元涡胞,最后发展为混沌状态;程龙认为热对流作用随着压力梯度的增加而增大。上述因素给对流换热的计算带来很大困难,目前的理论结果基本都是简化后得到的。

4.3 热弥散

热弥散是含水层热量运移中的一种换热现象。介质孔隙内水流速度的脉动会引起热量平均化,从而导致换热效果的增强,使多孔介质中的热量运移表现出许多独有的复杂性,即弥散效应。热弥散的机理十分复杂,弥散效应与流体在介质通道内的流速、固体骨架、流体的物性以及多孔介质的结构等因素有关,理论研究难度大。目前,对弥散效应的研究还处于探索阶段,各种计算公式中都存在可调的经验常数,这些可调的经验常数因试验条件或数值模拟结果而异。

综上所述,在地质条件和地热流体不变的情况下,压力梯度作为影响热对流和热弥散的共同主要因素,两者的作用随压力梯度增加而增大。在 2019—2020 年期间,对 SR9 井进行了多点次水位埋深观测,以最小观测值作为水位稳定埋深计

算流体压力梯度,公式为:

$$I = (H - h)/L, \quad (5)$$

式中: I 为压力梯度(无量纲); H 为水位埋深(m); h 为水位稳定埋深(m), L 为压力损失距离(m)。压力梯度变化情况见图6,从图中可以看到恢复初期压力梯度大于后期,即热对流或热弥散作用主要体现在恢复初期。

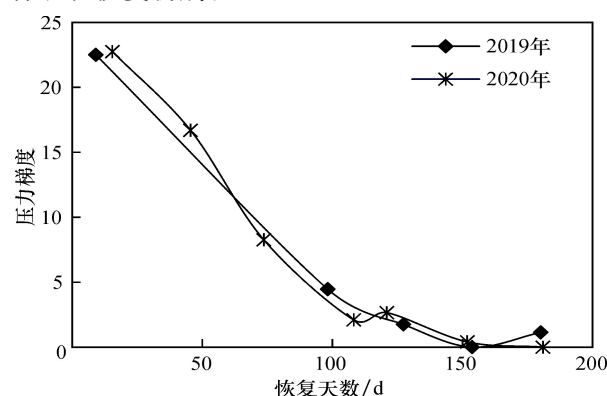


图6 SR9井流体压力梯度变化

结合储层温度恢复曲线可知,SR9井储层在恢复初期以热对流或弥散作用为主,温度迅速恢复,后期以热传导为主,温度恢复缓慢(图7)。

表6 2015—2017年储层温度累计增幅

年	恢复时间/d	累计增幅/℃
2015	15	13.87
	138	25.16
	234	25.26
2016	9	12.14
	129	26.46
	223	26.87
2017	26	11.48
	130	24.00
	217	24.25

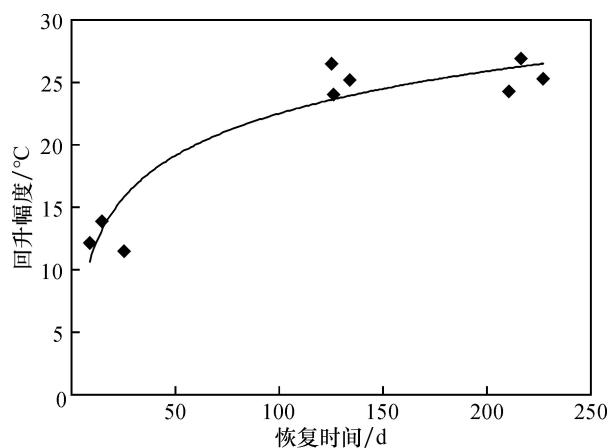


图7 储层温度恢复曲线

温流体进入井筒后改变了回灌井周围的地温场,特别是在储层段形成了低温区。在停灌期间储层温度有所恢复,但大量的回灌仍导致地热井储层温度呈下降的趋势,在回灌温度恒定的条件下温度回升值主要受到累计回灌量的影响。

(2)储层温度恢复热量主要来源于水平方向上的热量传递,热对流或热弥散在储层温度回升中起到了主导作用,使储层温度在停灌后迅速回升。

(3)持续的回灌使冷锋面逐渐外扩,为避免过早出现热突破现象,在今后的地热资源开发过程中应重视采灌井的布局。

5 结论

(1)雾迷山组回灌井的稳态测温研究显示,低

参考文献略

雄安新区最深4500米地热井开钻

中国石油天然气集团公司华北油田公司

7月15日,位于雄安新区安新县人民政府东北侧的地热试验井——安热1井正式开钻。这口地热井设计井深4500米,由华北油田具体实施,完钻后不仅是雄安新区、更是河北省内最深地热井。

安新县境内蕴藏丰富的地热资源,按照油田前期资源评价,安新县城范围内总地热资源储量达20.6亿吉焦,总地热水量达2.74亿立方米。

2024年,华北油田按照雄安新区打造绿色城市发展典范规划,设计部署了安热1井、安热2井两口地热勘查井,投用后可供暖周边1000米内学校、住宅、政府办公楼等建筑33万平方米。安热1井和安热2井作为中国石油开启雄安地热市场的重要勘查井,不仅对于建设生态雄安、绿色雄安具有探索性意义,更是雄安新区建设方关注的焦点。

今年以来,华北油田坚定不移走生态优先、绿色发展之路,不断壮大绿色能源产业,加快发展新质生产力,推动绿色转型,助力碳达峰碳中和。尤其是在推进地热能利用方面,积极拓展北京、冀中(雄安)地区市场,打造京津冀地热利用“主攻队”。为积极开拓雄安地热市场,华北油田立足于中国石油早期在安新县域的二维地震和三维地震资料,快速落实构造特征和地层展布,科学编制地热利用开发方案,精心准备钻井工作,加快推进雄安新区地热项目示范样板建设。

下一步,华北油田将以中深层地热资源为基础,浅层地热资源利用为补充,油田余热利用为特色,积极打造中国北部地区最大地热利用市场,推动油田向“热田”转型升级。

西藏羊八井地热田三维电性结构模型 ——来自大地电磁的证据

薛国强^{1,2} 陈卫莹^{1,2} 赵平^{2,3} 任旺奇⁴ 何一鸣^{1,2} 吕鹏飞^{1,2} 雷康信^{1,2} 赵炀^{1,2}

1 中国科学院地质与地球物理研究所

2 中国科学院青藏研究所

摘要:西藏羊八井地热田位于亚东-古露裂谷中部的断陷盆地,延展形态受西北、东南两侧的山前断裂带控制,地热发电已超过四十年。囿于三维地球物理探测资料,地热田局部熔融体的位置、埋藏深度和几何形态,以及地热流体的升流通道等关键地质问题长期存有争议。本文利用47个测点的实测大地电磁全阻抗张量数据进行三维反演,给出了羊八井地热田三维电性结构模型在不同深度的水平切片和在不同测线的剖面图,取得了以下认识:(1)局部熔融体是羊八井地热田的深部热源,位于中尼公路下方,沿北东方向伸展,埋藏深度6.2~14km;(2)地热流体升流通道位于北区硫磺沟一带,呈开口朝上的喇叭形状,北区2km深度以下的岩石裂隙不够发育、渗透性较差,尚未发现富水性较好的层状热储;(3)南区不存在深层高温热储,在北区应用增强型地热系统(EGS)技术将是羊八井地热田提高发电能力的重要途径。

关键词:羊八井地热田 大地电磁 局部熔融体 三维电性结构 地质成因模型

1 引言

地热能是一种可再生的绿色能源,开发利用地热能对于减少CO₂排放、减缓气候变化具有十分重要的意义(Schumacher 和 Moeck, 2020; Agemar, 2022)。羊八井地热田第一台300kW的发电机组于1977年投入运行;同年,1MW的1号发电机组投入运行;1981~1985年期间,又先后安装了3台3MW的发电机组,正式组建了地热电厂。如今,羊八井地热电厂的总装机容量为25.18MW。截至2019年12月底累计发电34.1亿千瓦时,减少CO₂排放约275万吨,为西藏社会经济发展和节能减排做出了重要贡献。近年来,地热井的压力和流量呈现衰减趋势,浅层地热流体已不能维持有机组长时间、满负荷地发电,开发利用深部高温地热资源势在必行。1983~1984年,意大利AQUATER和ENEL公司借助重力、磁场和直流电测深资料,圈定了地热田的浅部异常。重力测量表明,羊八井地热田在区域重力场中显示为负异常,等值线大体沿北东方向伸展,而且西北处的重力异常线起伏比较大,菱块状断裂较为发育。地热田磁场也处于负异常,深部花岗岩体表现为弱磁性,随着蚀变程度的增加,磁性逐渐减弱,断裂带附近表现为局部的线状磁性负

异常,而且弱磁性异常与重力负异常的位置基本吻合。20世纪70~90年代开展的直流电测深结果表明:地热流体电阻率是2.2~3Ωm,含热水砂砾岩或蚀变花岗岩是11~15Ωm,泉华是65Ωm,地表冷水接近100Ωm,未蚀变花岗岩则高达300~1500Ωm(靳宝福和程力军,1993)。应用地热流体与地表冷水、岩石之间的电性差异,可以比较准确地圈定出地热流体的赋存位置和空间形态,推测基岩埋深和热储厚度等。在羊八井地热田,视电阻率极小值30Ωm圈定出来的范围与地下5m等温线所圈定的范围基本吻合(施国良,1983)。1980~1982年,中法青藏高原地球科学联合考察队在羊八井地热田开展了大地电磁法测量(Magnetotelluric, MT),在10~20km深部发现一个低阻层,推测是地壳内部的局部熔融区,而两组断裂交汇处所形成的基岩“破碎柱”则是地热流体上升通道(吴钦等,1990)。康文华等(1983)根据二维大地电磁测深结果,推断羊八井地热田15km深处存在着一个岩浆房,是地热田的深部热源。1993~1994年,日本九州大学和中国长春地质学院联合考察队在羊八井地热田布设了9个MT测点,根据探测结果提出在12km之下存在着局部熔融体。1994年,意大利 Geotermica

Italiana 公司的专家根据 15 个 MT 测点的二维反演结果,推测地热田北区 5km 深处可能出现岩浆囊(廖志杰和赵平,1999)。青藏高原与喜马拉雅深部剖面探测国际合作项目(INDEPTH)在念青唐古拉山东侧的安岗、羊八井、念青和当雄等地发现了 4 个地震深反射亮点,用多种不同方法证实其为壳内低速体,解释为含水的局部熔融体或花岗质岩浆层,埋藏深度为 15~20km,这些亮点与地面出露的热泉相对应(Brown 等,1996;赵平等,2001)。四十多年以来,经过大量的构造地质、岩石矿物、流体地球化学、地球物理探测、钻孔测井等基础性研究,大家普遍认同羊八井地热田是一个具有岩浆热源的、对流型高温地热系统。前人在羊八井地热田开展的地球物理勘探大多是二维数据反演,难以反映地下深部的真实形态和电性特征(Newman 和 Alumbaugh, 2000; Siripunvaraporn 等, 2005)。近年来快速发展的三维数据反演技术能够较好地克服这些缺点。大地电磁法(MT)能够识别出含水层、低于 150℃ 的蚀变岩层和局部熔融所引起的低阻异常(Cumming 和 Mackie, 2010; Lee 等, 2020),具有超过 10km 深度的探测能力(唐裕等, 2021; 薛帅等, 2022; 余年等, 2022)。2021 年,本文研究团队利用地热电厂停产维修的空期,在地热田布置 54 个测点采集大地电磁全阻抗张量数据,其中 47 个测点数据经反演处理后获得了地热田的三维电性结构,揭示了局部熔融体的位置、埋藏深度和几何形态,确定了高温地热流体的升流通道及其形状。这些成果将为羊八井地热电厂改造工程提供科学依据。

2 地质概况

印度板块与欧亚板块汇聚碰撞后持续向北俯冲,形成了地球上海拔最高、最年轻的高原——青藏高原(许志琴等, 2006)。青藏高原是全球构造活动最剧烈的地区,西藏境内的活动构造带主要有 NE、NW 和 SN 向三个构造成分组成(图 1a),其中构造活动最强烈、表现最突出的是一系列近 SN 向延展的活动构造带,它们是控制西藏发生地震和地热活动最重要的构造(韩同林, 1984)。在 SN 向裂谷/地堑中,亚东-古露裂谷的规模最大,延伸最长,蕴藏着丰富的高温地热资源,已建有羊八井和羊易两座地热电厂。羊八井地热田位于西藏自治区拉萨市西北约 90km 处的当雄县羊八井镇,处于雅鲁藏布江缝合带和青藏高原地幔缝合带北侧(Klemperer 等, 2022)、亚东-古露裂谷中部的断陷盆地,其西北方向是念青唐古拉山脉,东南方向是唐山山脉。地热田内水热活动发育,显示类型包括温泉、热泉、沸泉、热水湖、水热爆炸、喷气孔、冒汽地面、硅华、钙华、盐华和水热蚀变等。随着地热资源开采量的不断增加,绝大多数温泉现已消失,热水湖也接近干涸。羊八井地热田发育着 NE、NW 和近 SN 向三组断裂,中尼公路将其分成南、北两区。北区主要由古生代变质岩、喜山期花岗岩和始-渐新世火山岩组成,浅层热储从蚀变花岗岩沿东南方向逐步过渡到第四系砂砾岩,热储温度为 150~175℃;深层热储是温度超过 250℃ 的蚀变花岗岩。南区浅层热储由第四系砂砾岩组成,硅质/钙质胶结物形成自封闭的热储盖层,其温度大多不超过 150℃(图 1b)(廖志杰和赵平, 1999)。

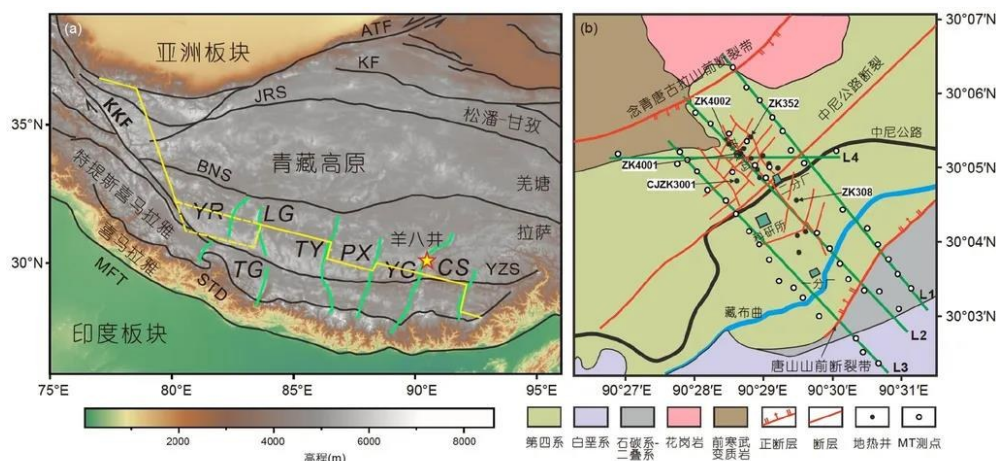


图 1 羊八井地热田构造位置及大地电磁测点分布

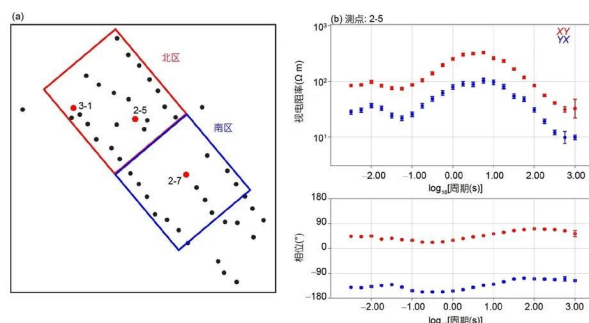
(a)青藏高原大地构造简图(修改自 Klemperer 等, 2022)。从南向北的缝合带/主要断层(黑色细线): MFT, 主喜马拉雅逆冲断裂; STD, 藏南拆离系; YZS, 雅鲁藏布江缝合带; BNS, 班公湖-怒江缝合带; JRS, 金沙江缝合带; ATF, 阿尔金走滑断裂; KF, 昆仑走滑断裂; KKF, 喀喇昆仑走滑断裂。近南北向裂谷/地堑(绿色粗线): YR, 亚热裂谷; TG, 塔科拉地堑; LG, 隆格尔地堑; TY, 当惹雍措裂谷; PX, 朋曲-申扎裂谷; YG, 亚东-古露裂谷; CS, 错那-桑日裂谷。黄线是地幔缝合带; 黄色五角星对应(b)的研究区域。(b)羊八井地热田大地电磁测点分布图(修改自 Wang 等, 2022)

为了探寻深层高温地热资源, 羊八井地热田先后打过 5 口深度超过千米的勘探井。地热田南区 ZK308 井深 1726m, 井温在 150m 深处达到 144.4℃, 200m 处温度出现倒转, 800m 深处温度恢复上升。北区 ZK352 井深 1003m, 986m 深处测得 202℃ 的温度, 井筒下部的花岗岩裂隙不发育; ZK4002 井深 2006.8m, 1850m 深处测得 329.8℃ 的最高井温, 间歇性喷发, 未获得可开发利用的流量; ZK4001 井深 1459m, 最高井温是 255℃, 放喷试验的井口温度是 200℃, 流量为 300t/h; CJZK3001 井深 2254.5m, 1200m 以下探测到 270℃ 的温度, 深部岩石的渗透性较差, 裂隙不够发育(赵平和多吉, 2021)。羊八井地热田的水热蚀变矿物比较丰富, 前人在地表和岩芯样品中观察到的蚀变矿物主要有蛋白石、玉髓、明矾石、高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、伊利石-蒙脱石混层矿物(I-M)和绿泥石-蒙脱石混层矿物(C-M)、绿帘石等。蛋白石、玉髓、明矾石和高岭石出露在北区的酸性蚀变带, 是地热蒸气冷凝后与围岩发生化学反应的产物。蒙脱石、伊利石、伊利石-蒙脱石混层矿物等是在近中性环境普遍出现的蚀变矿物。当温度升高时, 绿泥石-蒙脱石混层矿物将逐渐替代伊利石-蒙脱石混层矿物(朱梅湘和徐勇, 1989)。绿帘石被认为是 240℃ 以上高温地热流体的指示矿物(Browne, 1978), 可见于羊八井地热田勘查深层热储的钻孔岩芯, 如 ZK4001 井等。

3 数据的采集和处理分析

2021 年, 本研究在羊八井地热田布置了 4 条

MT 测线(L1、L2、L3 和 L4), 测线间距大约为 1km, 测点间距约 500m(图 1b), 共采集了 54 个测点的大地电磁全阻抗张量数据。野外数据采集设备采用中国科学院研制的新型 SEP 地面电磁探测系统(底青云等, 2021)。在每个 MT 测点, 采用不极化电极测量电场的两个水平分量 E_x (南北向)和 E_y (东西向), 采用磁传感器测量磁场的三个分量 H_x (南北向)、 H_y (东西向)和 H_z 。每个测点的观测时间超过 10h, 有效频率范围是 320 ~ 0.001Hz。应用 Robust 阻抗估计方法(Egbert, 1997)和远程参考技术(Gamble 等, 1979)压制实测数据噪声干扰。野外工作远程参考点布设在羊八井东南方向约 100km 的拉萨市达孜区。剔除羊八井地热电厂二分厂附近具有明显的“飞点”或受干扰严重的测点, 最终获得 47 个测点的全阻抗张量数据(Z_{xx} 、 Z_{xy} 、 Z_{yx} 、 Z_{yy})。图 2 是地热田典型测点的 MT 视电阻率和相位曲线, 各测点曲线光滑, 数据质量良好, 不同位置的视电阻率有明显的变化, 表明地下电性结构存在着显著的差异。2-5 和 3-1 测点位于北区(图 2b、2c), 短周期(0.003 ~ 0.1s)视电阻率随周期增大而减小, 表明地表比较干燥、地下浅层存在着低阻层, 对应着北区浅层花岗岩裂隙型热储, 长周期(0.1 ~ 1000s)可观察到视电阻率先增加后减小的现象, 表明浅部低阻体之下有高阻体, 深部存在低阻体, 对应着深层热储; 2-7 测点位于南区(图 2d), 短周期(0.003 ~ 0.1s)的视电阻率较低, 表明从地表到深部, 浅层存在着连续的低阻体, 对应着南区浅层孔隙型热储, 但长周期(0.1 ~ 1000s)视电阻率的变化规律与 2-5 和 3-1 测点相同, 表明测点深部也存在着低阻体。上述所有测点都在低频段表现为较低的视电阻率, 指示地热田深部存在着明显的低阻异常。



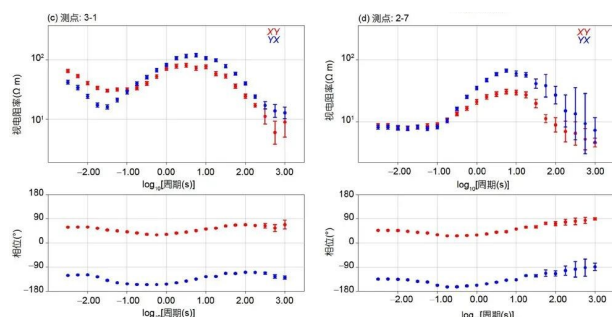


图2 羊八井地热田MT测点分布图和不同测点处视电阻率(上)和相位(下)曲线

(a) MT测点分布图;(b) 2-5测点;(c) 3-1测点;(d) 2-7测点

为了评价地热田电性结构的维度特征,对所有测点的相位张量椭圆进行了维度分析(Caldwell等,2004)。相位张量可以采用椭圆表示,椭圆偏离度(skew)反映维度结构,椭圆越接近正圆,地下结构越接近一维。当偏离度 $\leq 5^\circ$ 时,近似为二维结构;当偏离度 $>5^\circ$ 时,可视为三维结构(Booker, 2014)。在地表最浅层($T=0.01s$),地热田相位张量椭圆接近正圆,反映地热田浅层为近一维电阻率结构的第四纪沉积物;在地下中浅部($T=1s$),相位张量偏离度较小,可视为二维结构,椭圆长轴为北东向,与区域断裂构造的走向一致;在地下深部($T>100s$),大部分测点的偏离度 $>5^\circ$,说明深部的三维性较强(图3)。因此,开展三维反演研究可以获得更加可靠的深部电性结构。

4 数据三维反演

采用三维非线性共轭梯度(NLCG)算法(Mod EM, Egbert 和 Kelbert, 2012; Kelbert 等, 2014)对MT数据进行三维反演处理。NLCG算法不需要直接计算和存储灵敏度矩阵,计算速度快,内存需求小(Rodi 和 Mackie, 2001),是MT数据二维和三维反演最常用的算法。反演的数据类型为全阻抗张量(Z_{xx} 、 Z_{xy} 、 Z_{yx} 、 Z_{yy})。在320~0.001Hz频率范围内,23个频点等对数间隔分布,阻抗分量误差限设置为 $5\% \times |Z_{xy} \cdot Z_{yx}|^{1/2}$ 。由于倾子数据质量较差,未加入反演处理。将阻抗张量数据逆时针旋转 50° ,使xy分量与测线平行,可以减少模型网格,减少计算量。

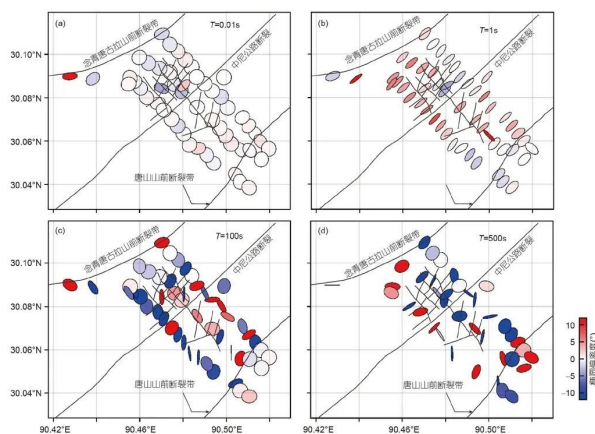


图3 不同测点不同周期的相位张量椭圆

黑色线条表示深大断裂

反演初始模型垂直方向第一层为10m,每层厚度随着深度增加而逐渐加大,递增系数为1.2.水平方向中心区的网格尺寸为 $300m \times 300m$,每个网格上最多只有一个测点,中心区以外水平方向各填充14个单元格,每格边长的递增系数为1.3.模型边界远离测点覆盖区域,避免边界对反演结果的影响,网格总数量为 $52 \times 70 \times 60$.对初始模型的电阻率、光滑系数、初始正则化因子采用了不同的设置进行反演测试。不同参数反演结果显示的异常特征基本一致。其中,初始模型为 $100\Omega m$ 的均匀半空间、光滑系数为0.3、初始正则化因子为10时得到的异常最为清晰。因此,基于该参数设置进行反演处理,归一化数据均方根拟合差(RMS)的初始值为8.66,经过97次迭代,RMS最终收敛为1.85。图4给出了反演结束后各测点的RMS分布图。从图4可见,大部分测点RMS值小于2,单点拟合差的水平接近总体拟合差。MT探测的深度受到观测频率和地下电性结构的共同影响。为了解反演结果的可靠性,采用正演测试方法对数据灵敏度进行评估。首先进行深度分辨力测试,如图5所示,将L2剖面反演结果模型在16和18km深度以下的电阻率修改为初始背景电阻率 $100\Omega m$,16km以下修改模型标记为M1,18km以下标记为M2.分别对M1和M2进行正演计算,然后检查数据拟合变化情况,以此判别观测数据对该深度以下电性结构的敏感程度。修改模型正演计算得到的响应与观测数据之间的RMS拟合差值越大,表明观测数据对该深度以下的电性结构越敏感。

反演响应和观测数据的RMS拟合差值为1.85,M1正演响应为3.12,M2正演响应为2.95,M1和M2正演响应拟合差值显著增加,表明观测数据对16km以浅具有较高的灵敏度.大地电磁三维数据反演结果揭示,在地热田中尼公路下方存在一个低阻体,电阻率为 $15 \sim 30 \Omega\text{m}$,推测是局部熔融体,也就是羊八井地热田的深部岩浆热源,埋藏深度是 $6.2 \sim 14 \text{ km}$.为了验证该低阻体的反演可靠性,进行了深部低阻体的灵敏度测试.在地热田南北区下方 $6.2 \sim 14 \text{ km}$ 深度范围内,首先将图6a白框之内的电阻率设定为 $100 \Omega\text{m}$ 建立检验模型,然后再进行三维正演处理.将观测数据反演模型响应曲线和检验模型反演响应曲线进行比较,发现两者之间有一定的偏差(图6b~6d),证明观测数据对地热田深部低阻异常具有较高的。

5 三维电性结构

热储电阻率主要受蚀变矿物和填充孔隙空间的地热流体所控制(Ussher等,2000)。地热流体的电阻率主要取决于盐度,温度影响较小。岩石电阻率除了与造岩矿物的种类、含量和排列方向有关外,还与渗透率、孔隙率、孔隙结构等因素有关。孔隙连通性越好,渗透性越高,电阻率越小。黏土矿物的种类对岩石电阻率也有很大的影响。地热流体在岩石中长时间滞留,可以在小于 100°C 的条件下形成黏土矿物盖层。在 $70 \sim 150^\circ\text{C}$ 区间,黏土矿物主要是蒙脱石。当温度超过 180°C 时,出现伊利石/绿泥石与蒙脱石互层,绿泥石比例随温度升高而增加。当温度超过 220°C 时,绿泥石和绿帘石成为主要黏土矿物。蒙脱石的阳离子在矿物晶格中的结合程度较弱,因而导电能力较强,电阻率低于 $10 \Omega\text{m}$ 。绿泥石和绿帘石则恰恰相反,电阻率超过 $10 \Omega\text{m}$ 。在高温地热系统中,盖层中含有大量的低电阻率黏土矿物,盖层之下电阻率增加反映的则是温度的升高(Muñoz,2014)。

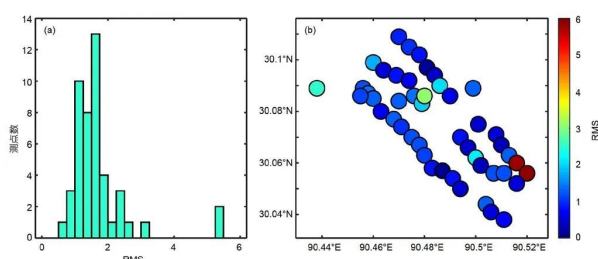


图4 反演结果拟合残差统计与分布

(a)反演模型响应归一化均方根拟合差(RMS)直方图;(b)RMS平面分布图

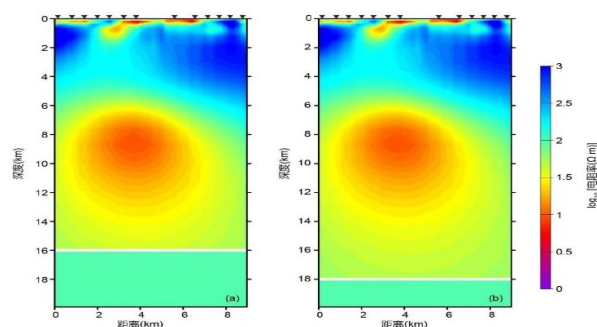


图5 深部灵敏度测试

(a)16km 修改模型 M1 示意图(L2 剖面);(b)18km 修改模型 M2 示意图(L2 剖面)

在岩浆型高温地热系统中,渗透性良好的升流通道经常出现绿泥石,热储电阻率介于 $10 \sim 200 \Omega\text{m}$ 。地热流体在冷热水密度差和地势差的驱动下,沿着裂隙或断裂向上迁移,温度随深度减小而降低。升流通道的顶端是溢流区,在渗透性较低的蒙脱石盖层之下转折为水平流动。溢流区表现为等温线模式,其特点是热储温度在流动方向上变化较小,但会随深度增加而降低(Cumming,2009)。高温热储之下的热源是局部熔融体或岩浆房,岩浆熔体通常具有较低的电阻率。黏土盖层之下的热储温度最高,含有中低电阻率的绿泥石,流体饱和度、孔隙度和渗透率都比较高,是地热开发利用最理想的热储(Muñoz,2014)。图7给出了羊八井地热田三维电性结构模型在不同深度的水平切片。在1km深度切片上(图7a)出现了两个低电阻率区:北区C1是深层热储,南区C2低阻异常随深度增加而逐渐减小,推测是富水性较好的燕山期碎裂花岗岩,汇聚着来自唐山山脉的大气降水,与深部岩石的连通性较差。高电阻率R将C1和C2相隔离,疑为隐伏的变质岩体。北区C1与深部热流体相贯通,成为深部高温地热流体向上运移的主通道。在北区深部勘探井的岩芯中可见绿泥石、绿帘石等蚀变矿物,是热储表现为中低电阻率电性特征($10 \sim 200 \Omega\text{m}$)的主要原因。在 $6.2 \sim 14 \text{ km}$ 深度范围存在着一个电阻率小于 $30 \Omega\text{m}$ 的异常体C3,推断为沿着北东向伸展的局部熔融体(图7e~7h),即羊八井地热田的岩浆热源,但C3并不位于C1的

正下方,而是位于C1的北东向(图7).局部熔融体的形成与印度板块持续向北推进有关,宽度约6km,伸展方向与亚东-古露裂谷的走向保持一致。由于MT测点的分布范围有限,目前还无法对局部熔融体的规模进行评估。

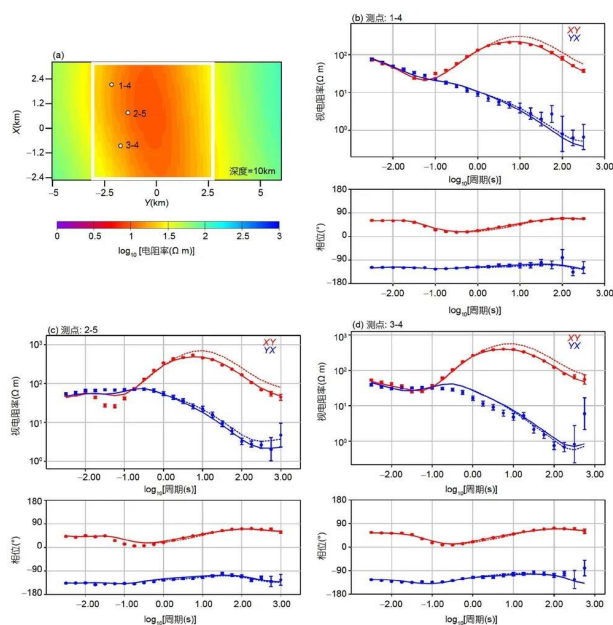


图6 深部低阻体灵敏度测试结果

(a) 检验模型(白色线框将6.2~14km深度范围内的电阻率设定为 $100\Omega\text{m}$);(b)1-4测点视电阻率图(上图)和相位图(下图);(c)2-5测点视电阻率图(上图)和相位图(下图);(d)3-4测点视电阻率图(上图)和相位图(下图)。圆点表示观测数据,实线表示观测数据反演模型响应曲线,虚线表示检验模型响应曲线。

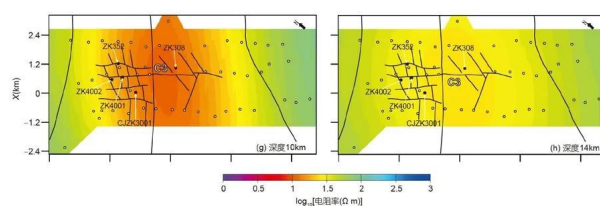
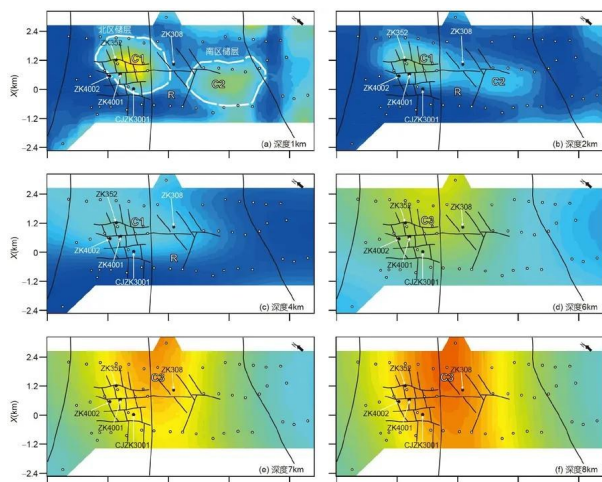


图7 三维电性结构在不同深度的水平切片

白色圆圈表示MT测点,黑色圆点表示地热井,黑实线表示断层,白虚线圈定的是低阻区。

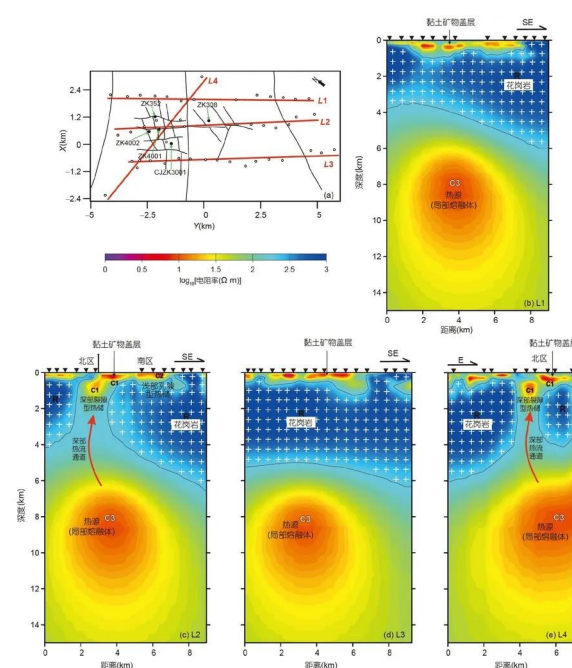


图8 三维电性结构沿MT测线的剖面图

(a)为MT测线分布图,红线表示MT测线,黑线表示断层,黑圆圈表示测点,黑圆点表示地热井。(b)~(e)分别表示L1~L4线,红色箭头表示热流通道.黑色倒三角形表示测点

图8是三维电性结构模型沿着4条MT测线的剖面图.在地下0.5km深处存在着约 $10\Omega\text{m}$ 的低电阻率含水层,那是地热田的浅层热储,大量出现的蒙脱石、玉髓等黏土矿物/蚀变矿物是导致电阻率较低的主要原因。地热田2km以浅的精细化三维电性结构可参见SO-TEM探测结果(陈卫营等,2023)。北区高温地热流体的升流通道表现为开口朝上的喇叭形状,近乎垂直。然而,在2km深度之下,尚未探测到近似层状低阻体(图8e)。

6 地质成因模型

羊八井地热田实测大地热流背景值是 108 mW/m^2 , 地温梯度是 46.5°C/km (沈显杰等, 1992), 超过了全球大陆地区大地热流平均值 67.1 mW/m^2 (Lucazeau, 2019)。羊八井地热田至今没有发现第四纪火山岩, 热源性质、深部热储特征、地热流体升流通道等问题曾经争论了许多年。Hochstein 和 Yang (1995) 提出了羊八井深循环地热水成因模式。但随着 ZK4002、ZK4001 井先后成功揭露出超过 250°C 的地热流体, 国内外同行对该地热田具有岩浆热源的属性已达成共识。氦同位素测定表明, 地热气体中来自地幔的组分约为 3% (赵平等, 2001), 据此可以推断局部熔融体主要是地壳物质组分, 通过深大断裂混入了少量的来自青藏高原地幔楔的流体组分, 与同属亚东-古露裂谷的羊易、古露等高温地热田类似; 有关地幔楔的论述详见 Klemperer 等 (2022)。国际合作项目 (INDEPTH) 研究发现, 在羊八井等地 $15 \sim 20 \text{ km}$ 深度存在着含水的花岗质岩浆层 (Brown 等, 1996), 而这次在地热田中部 $6.2 \sim 14 \text{ km}$ 深度范围内探测到的局部熔融体很可能是来自该岩浆层的上涌。局部熔融体的平均深度是 10.1 km 。综合前人在地热地质、地球物理、地球化学和钻孔测温等资料, 提出了羊八井地热田的地质成因模型 (图 9)。大气降水和冰雪融水沿念青唐古拉山前断裂带向下渗透, 随深度增加而逐步升温, 沿途从围岩中吸取热量, 并淋滤出矿物组分。经局部熔融体烘烤加热后, 地热流体的密度逐渐下降。当地热流体循环到一定深度时, 在冷、热水密度差和地势差的共同驱动下开始沿裂隙向上折返。在上升过程中, 减压气化导致大量气体组分 (主要是 CO_2 和 H_2S) 和地热蒸气从地热流体逃逸, 在升流通道顶部硫磺沟附近形成了大面积的酸性蚀变带, 明矾石、高岭土、蛋白石和玉髓等是热储盖层的主要矿物成分, 同时释放出高通量的 CO_2 。地热流体在升流过程中遇到盖层阻挡后, 受深部压力和浅层冷水顺流的共同驱动, 开始向地热田的东南方向做水平流动, 在北区浅层蚀变花岗岩和南区第四系砂砾岩层内形成浅层热储, 地热流体埋藏深度逐渐减小, 最终在南区形成大面积的溢流区。羊八井地热田深部三维电性结构揭示, 南区既没有地热

流体升流通道, 也不存在深层热储。在北区喇叭状升流通道 2 km 深度以下, 尚未发现富水性良好的层状热储, 这表明羊八井深部岩层的裂隙不够发育, 渗透性较差, 与北区深部热储勘探井的钻探资料比较吻合。前人的地热流体化学组分研究表明, 浅层地热流体是深层地热流体与地下冷水相混合的产物, 冷水混合比例为 $30 \sim 35\%$ 。开发利用深层高温地热流体将加快浅层地热资源的萎缩。由于羊八井北区在 1 km 深度的岩层温度已超过 200°C (廖志杰和赵平, 1999), 菱块状断裂发育, 因此在地热尾水回灌过程中, 可以借鉴美国 Geysers 地热电站的成功经验, 应用水力压裂等多种方法 (EGS) 在深部高温岩体人工扩大热储的规模, 通过增加地热水深循环范围和流量进一步扩大产能, 实现地热能的高效开发利用。

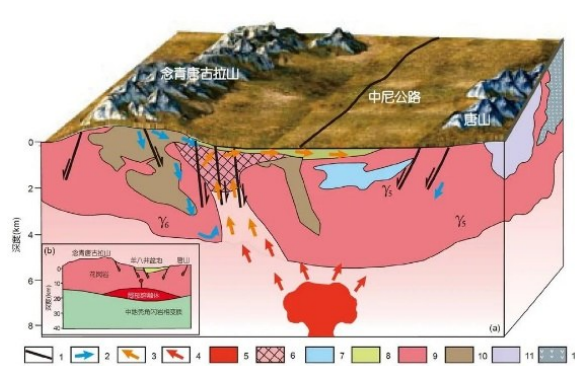


图9 羊八井地热田地质成因模型(a)及念青唐古拉花岗岩侵位与伸展构造图(b)

(a)修改自赵平等 (2001)。图例中 1 表示断层; 2 表示温水运移方向; 3 表示热水运移方向; 4 表示岩浆热能传导方向; 5 表示岩浆热源; 6 表示裂隙型热储; 7 表示富水区, 推测其温度低于浅层热储 (详见陈卫营等 (2023)); 8 表示第四系孔隙型热储; 9 表示花岗岩; 10 表示前寒武纪变质岩; 11 表示白垩系; 12 表示新生代火山岩。

7 结论

羊八井地热田局部熔融体位于地热田中尼公路的下方, 埋藏深度是 $6.2 \sim 14 \text{ km}$, 沿北东向伸展。升流通道位于北区的硫磺沟, 为开口朝上的喇叭形状。地热流体上升至浅层热储遭遇黏土矿物盖层阻挡后, 在深部压力和浅层冷水顺流的共同驱动下

转折为自西北向东南方向的水平流动,最终在地热田南区溢出。南区 2km 深度以下不存在低阻体。北区 2km 深度以下的岩石裂隙不够发育、渗透性较差,尚未发现富水性较好的层状热储。深层高温地

热资源的开发利用将加快浅层资源的萎缩,应用水力压裂等多种方法(EGS 技术)扩大深部高温热储的规模将是羊八井地热田扩大产能的重要途径。

转自《中国科学:地球科学》No. 53 No.8

第十九届中国可再生能源大会地热能分会在西安隆重举行

中国可再生能源学会地热能专委会 报

8月16日下午,第十九届中国可再生能源大会地热能分会在古都西安隆重开幕。大会由中国可再生能源学会主办,地热能专委会承办,中建丝路建设投资集团、陕西省地热协会、自然资源部浅层地热能重点实验室、自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室、保定顺昌钻井工程有限公司等5家单位协办,中国地质调查局浅层地温能研究与推广中心、中国能源研究会地热专业委员会、中国地球物理学会地热专业委员会、中国地质学会地热专业委员会、中国矿业权评估师协会等多家行业学会、科研院所支持。

中国科学院院士汪集暘,大会主席、国际地热协会理事、中国可再生能源学会会士刘久荣,原自然资源部矿产资源保护监督司司长、中国矿业权评估师协会负责人鞠建华,中国能源研究会地热专业委员会主任田廷山,应急管理部国家自然灾害防治研究院副院长胡杰,中国地质调查局水环中心党委书记、俄罗斯自然科学院外籍院士张发旺,中国科学院地质与地球物理研究所研究员、中国地球物理学会地热专业委员会主任庞忠和,中国地质科学院水环所研究员、俄罗斯自然科学院外籍院士王贵玲,中国地质科学院岩溶地质研究所首席科学家、俄罗斯自然科学院外籍院士蒋忠诚,山东省地热能勘查开发研究院院长、泰山学者特聘专家、自然资源部科技领军人才、俄罗斯自然科学院外籍院士康凤新,中国地质大学(武汉)工程学院副院长、教授、俄罗斯自然科学院外籍院士窦斌,长江学者、国家优青、清华大学土木水利学院副院长刘晓丽、北京市地质矿产勘查院副院

长黄学勤、陕西省地质调查院党委书记黄建军、北京市科学技术研究院副院长卫万顺、中国地质调查局浅层地温能研究与推广中心主任李宁波、北京市发改委新能源处领导周长宽、雄安新区管理委员会自然资源和规划局李红英、中国石油勘探开发研究院教授闫家泓等多位知名领导学者专家齐聚一堂。

吸引了来自中国科学院、自然资源部等知名学者,中国能源研究会、中国地球物理学会、中国地质学会、中国矿业联合会、中国矿业权评估师协会、陕西地热协会、安徽地质学会等学会代表,中国地调局、北京地勘院、天津地矿局、河北地矿局、甘肃地勘局、安徽地矿局、陕西地调院、雄安新区等省局领导,清华大学、中科院、地科院、中国地质大学、西安交通大学、河北地质大学、天津大学、哈尔滨工业大学、山东建筑大学、西北大学、东北大学、长安大学、郑州大学、河北工程大学、天津科技大学、扬州大学等大学教授,中石油、中石化、中核汇能、北投集团、北控集团、兵装集团、上海地矿集团、陕煤集团、陕煤地质集团、山西地质集团、华能集团、河北地矿集团、中船重工集团、皖能集团等国央企代表等300余位地热之友参加了此次大会。

会议期间,开幕式、特邀报告、学术专访、专著签送、项目考察、企业展览和墙报交流等一系列丰富多彩的活动接踵而至。这不仅为参会人员提供了宝贵的学习与交流机会,也为参会企业展示最新成果、扩大影响力提供了绝佳平台。此次大会为地热能产业的蓬勃发展注入了强劲动力,必将在推动地热能技术创新和行业发展的进程中起到

至关重要的作用。

16日下午茶歇期间,专委会精心策划了一场别具一格的活动,掀起了现场的高潮。六位业内顶尖专家——庞忠和、李宁波、戴传山、康凤新、窦斌、卫万顺——携手奉上他们的珍贵专著,带着亲笔签名,现场赠书。参会者们热情高涨,争相排队领取这一份份珍贵的心血结晶,整个活动现场充满了知识与敬意的氛围。

17日上午报告分别由闫家泓和马静晨主持。中国地质调查局水环中心党委书记张发旺做题为《矿山煤(矿)-热协同开采与多能互补研究》的报告、中国地质科学院岩溶地质研究所首席科学家蒋忠诚做题为《我国岩溶碳汇的潜力及技术途径》的报告、清华大学建筑设计研究院水利水电分院院长王恩志做题为《干热岩开发中花岗岩热力耦合破损机理研究》的报告、中国科学院广州能源研究所地热能研究室主任龚宇烈助理做题为《基于深部含水层储能的地热供暖技术》的报告、中国矿业权评估师协会秘书长杨雪松做题为《矿业权评估师职业资格制度与2024年矿业权评估师职业资格考试》的报告、中国地质大学(北京)教授张金川做题为《中国地热发展历史机遇与技术挑战》的报告、中国科学院武汉岩土力学研究所教授白冰做题为《中深层地热开发新方法与新技术研究》的报告、安徽省地质环境监测总站教授官煜做题为《浅层地热能的热冷双供优势》的报告、北京市地质矿产勘查院矿产资源部副主任李翔做题为《科技创新驱动浅层地热能行业高质量发展》的报告、中国地质大学(北京)教授李克文学生代做题为《热发电新技术及应用进展》的报告。

17日上午报告分别由西安交通大学蔡皖龙和郑州大学黄奕斌主持。天津科技大学海洋与环境学院院长邓天龙做题为《地热卤水中稀散元素提取及其高值化利用技术》的报告、中核(西藏)能源发展有限公司地热项目执行经理魏凯做题为《中核西藏谷露高温地热发电项目进展及规划》的报告、安徽省勘查技术院副院长兼总工程师熊强青做题为《地热综合地球物理勘查方法技术与应用》的报告、哈尔滨工业大学教授倪龙做题为《工业园区复合型中深层地埋管地源热泵供热系统优化研

究》的报告、东南大学教授张国柱做题为《隧道地热能开发与应用研究》的报告、东北大学教授韩宗伟做题为《地埋管地源热泵埋管换热参数精确辨识及埋管长度确定方法研究》的报告、扬州大学教授杨卫波做题为《地埋管换热器能效提升关键问题研究》的报告、华中科技大学副教授罗勇强学生代做题为《中深层地埋管分段优化设计方法研究》的报告、中山大学副教授游田做题为《复合能源地下结构热力耦合性能研究》的报告、长安大学江超做题为《中深层地热能快速计算模型及软件平台》的报告、西安交通大学蔡皖龙做题为《中深层地热耦合储热建筑供热系统动态特性研究及能量分析》的报告、北京市地质矿产勘查院工程所刘哲做题为《光纤实时传输技术在地温场监测中的应用》的报告。

18日上午,专委会组织参会专家领导参观考察了中国石化新星绿源陕西公司渭水曲项中深层地热供暖能源站,该能源站于2018年建成并投入使用,此站供暖能力可达20万平方米,现供暖面积5.4万平方米,由在小区后边钻凿的1口地热生产井提供热源,同时配备一口回灌井。两口井深分别3000米,通过用潜水泵将80°左右高温地热水从井内抽出,通过管道输送此换热站内。根据现有5.4万的供暖面积,此生产井暂时不需要满负荷运转足以满足供暖需求,采暖季平均每小时提取量为38方左右,已平稳运行5个采暖季,整体运行状况良好。地热替代燃煤锅炉集中供暖,每年可节约标准煤5591吨,减少二氧化碳排放15486吨,为节能减排、防污治霾做出了显著贡献。

本次地热能分会通过汇聚多方专家智慧,分享前沿科研成果和成功项目经验,为地热能产业的发展注入了新的活力。大会不仅在学术层面展示了地热能开发的最新进展,还为产业界提供了更多的合作机遇。特别是项目考察环节,展示了地热能在实际应用中的高效性与可持续性,彰显了地热替代传统能源在节能减排中的巨大潜力。此次大会的成功举办,标志着地热能技术在中国的不断突破与发展,将推动地热产业加速迈向规模化应用,并助力“双碳”目标的实现,为可再生能源的广泛应用奠定了坚实基础。

我国高温矿井热害防治技术研究进展及展望

韩颖 李向威 闫志佳

河南理工大学能源科学与工程学院

1 引言

据国家统计局数据显示,2021年煤炭消费量占能源消费总量的56.0%,比上年下降0.9个百分点;天然气、水电、核电、风电、太阳能发电等清洁能源消费量占能源消费总量的25.5%,上升1.2个百分点。煤炭所占比例逐年减少,但在一定时期内,煤炭资源依旧占主导地位,煤矿开采仍需进行。但浅层的煤炭资源已经无法满足我国发展需求,因此加大开采深度成为了必要,而随着我国目前矿井开采深度逐渐增加,矿井高温热害日益严重,已经严重影响了正常开采活动。

本文根据现有资料查明高温矿井的分布特征,对高温矿井的分布进行总结归纳,探究各个矿井高温热量的来源,通过不同高温矿井的井下热害现状、热害产生因素对比分析,以现有的技术针对不同的高温热源进行治理,使采矿活动能够正常进行。

2 我国高温矿井分布特征

随着我国开采技术的发展以及煤炭资源的需要,开采深度正在逐年增长,部分矿井开采深度已经超过1 000 m,可预见我国矿井开采将进入严重热害阶段。我国开采深度超过1 000 m的高温矿井主要分布在东北区域和安徽两淮区域,中部个别地区矿井也存在高温异常现象。黑龙江省的鹤岗等矿区,江苏的徐州矿区,河南省的平顶山矿区,安徽省的淮南矿区均表现为高温异常显著。东北地区以黑龙江各矿区为例,从地温测量成果计算分析,矿区平均地温梯度为 $2.7^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$;河南中部地区以郑州矿区新密煤田赵家寨煤矿为例,其平均地温梯度为 $3.50^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$;在淮南地

区,如顾北煤矿其系统测温平均地温梯度为 $3.02^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$,该区域内丁集、顾桥矿井等也都属于高温异常区,矿井平均地温梯度为 $2.52\sim 4.02^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$,绝大部分地温梯度大于 $3^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 。

对于矿井热害已有划分标准,《矿井降温技术规范》指出:平均地温梯度不超过 $3^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 的地区为地温正常区;超过 $3^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 为高温异常区;原始岩温度高于 31°C 的地区为一级热害区,原始岩温度高于 37°C 的地区为二级热害区。根据我国目前出现热害矿井的具体情况,将我国矿井热害划分为4种类型,如图1所示。

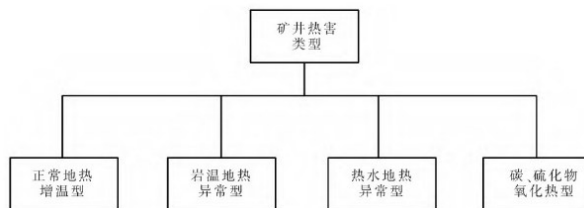


图1 矿井热害类型划分图

3 我国高温矿井热害防治技术发展历程

目前国内外矿井降温技术发展较为迅速,从过去通过改变通风风量进行降温的方式,发展到矿井空调阶段,再到如今降温技术飞速发展阶段,矿井降温技术发展历程如图2所示。

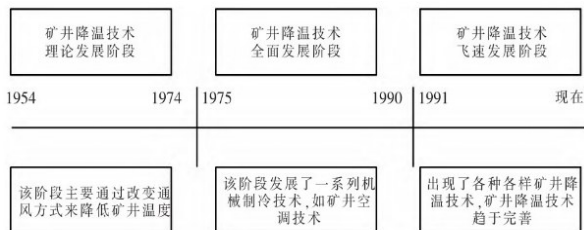


图2 矿井降温技术发展历程图

矿井降温技术的发展大致分为3个阶段:

(1) 1954—1974年,该阶段处于理论发展阶段,在这一阶段中科研人员们努力试验,学习国外专业基础理论和研究成果,为降温技术的发展奠定理论基础。该阶段主要通过改变通风方式和加大风量来对矿井进行降温。

(2) 1975—1990年,这一阶段处于矿井降温技术全面发展阶段,各种理论基础已经完善,并在矿井中进行各种试验来完善制冷降温系统。在山东新汶矿务局设计我国第一个井下集中制冷降温系统,降温技术的发展进入新的层次。该阶段主要技术是矿井空调制冷技术。

(3) 1991年至今,为降温技术的推广应用和进一步完善、提高、创新阶段。经过先驱者们对矿井降温技术理论的奠基,矿井技术飞速发展,延伸出各种降温技术。该阶段技术趋于多样化,主要降温方式为机械制冷降温。

4 高温矿井热害来源及分源治理技术

4.1 高温矿井热源分析

在矿井中,导致矿井温度过高的因素有很多,不同的因素造成的影响和灾害程度不同。我国高温矿井热害来源如图3所示,先分述如下。

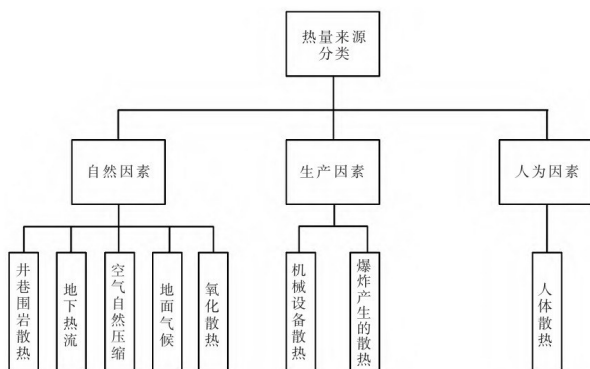


图3 我国高温矿井热源分类图

(1) 围岩

煤矿区域内高温热害主要是岩石岩性在长期演化以及各种地质作用下形成的,与地质条件、岩浆活动以及地下热流密切相关,同时又受该地区地温赋存状态影响,原岩温度随深度增加而上升的速度跟岩石热传导性与大地热流值有关,围岩散热是热害矿井中的主要热源。

(2) 地下热流

地下热流也是影响矿井温度的一个重要因素,地下热水的放热量受水流涌出量和温度所影响。地下热流对矿井温度影响有2种方式:①通过地下涌出来的热流对矿井风流直接传导热量;②地下热流向上涌出对岩体加热升温,岩体再把热量传递到井巷中。

(3) 空气自然压缩

空气自然压缩散热即在重力场的作用下,通风系统中空气顺着风筒向下运移,重力势能转变为焓导致压力和温度都有所升高,不是由地下外部其他热源传递热量引起的。

(4) 地面气候

对于地面气候来讲,对某些地区矿井影响较大,与地理位置因素有关,地面气候在每一年都是周期性、有规律地升高和降低,在每个季节中对矿井温度影响不同。

(5) 煤炭氧化

在开采过程中煤炭与空气长期接触,很容易被空气氧化,散发出大量的热。有自燃倾向的煤层被氧化后,如果热量无法及时散发出去,很容易发生自燃现象,因此,氧化散热也是导致矿井热害的又一影响因素。

(6) 其他因素

如今矿井开采已步入机械化时代,井下已全面使用机械设备,使采矿活动更安全高效,但深部热害矿井机械设备散热也成为了一大问题。以及各种人为因素导致井下热量增加,如爆炸产生的热量、采空区矸石氧化以及人在井下活动散发的热量等等,对矿井都有一定影响。

4.2 分源治理技术

目前,国内外矿井主要降温方式是机械制冷降温,但存在一定的缺陷,如设备维护困难、降温效果不显著、无法形成循环、存在安全隐患等。因此提出高温矿井分源治理技术,旨在可以有效解决高温矿井降温和能耗、经济、环保等问题。高温矿井分源治理技术就是根据热量来源的不同来采取不同的技术针对性治理热害矿井,针对不同热源进行治理技术如图4所示。

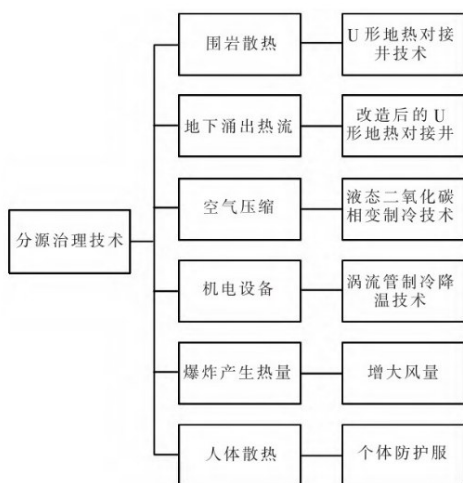


图4 针对不同热源采取的制冷技术图

(1)围岩散热治理技术

在高温矿井中,围岩散热是高温矿井中占比最大的热量,对于围岩散热可以采用U形地热对接井技术,加以改造对围岩进行针对性降温。U形地热对接井技术利用一系列换热管及热泵对地热资源进行利用,同时能对矿井进行降温。在开采煤矿的同时打对接井,向井下铺设管路,安放相应装置。其大致流程图如图5所示。

(2)地下涌出热流治理技术

地下热流涌出也是部分矿井面临的一大问题,地下热流易流动,热容量大,是良好的热源载体,热流与空气的热交换强度非常大,热水温度越高与空气接触面积越大则涌出水热放出的热量就越大。对此可以采用U形地热对接井技术同超前疏干法相结合,将涌出热水运移至地面进行利用的同时对巷道中涌出热水裂隙进行超前钻孔,将地下热流提前排出至管道中运至地面,大致流程如图6所示。

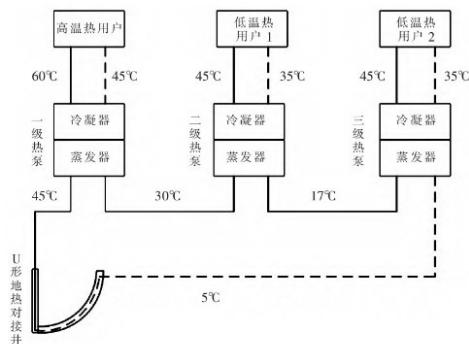


图5 U形地热对接井针对围岩降温示意图

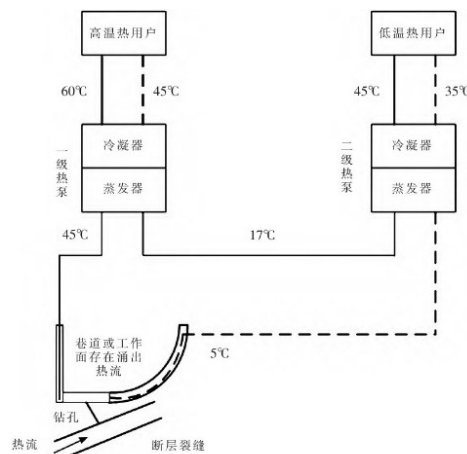


图6 针对地下热流治理技术流程图

(3)空气自然压缩散热治理技术

在风筒中,气体由地面向井下运输,风筒中空气自然压缩是不可避免的,导致风流从地面输送到工作面时温度升高,是矿井热害的影响因素之一。对于空气自然压缩产生的热量选取液态CO₂相变制冷技术,将此技术加以改进,在地面以液态CO₂相变为冷却源,对空气进行降温,将冷空气通过风筒输送到工作面,地面液态CO₂相变产生的气体可以进行回收利用,其在矿井中对空气自然压缩降温大致流程如图7所示。

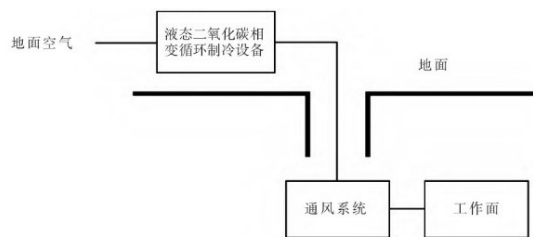


图7 空气自然压缩治理技术流程图

(4)机电设备散热治理技术

随着科技的发展,如今井下已经实现全面机械化、智能化生产。随着机电设备的增多,机电设备工作时消耗非常多的能量,这些能量一部分转化成有用功,另一部分转化成热能,并向外部环境中散发出去。

机电设备大多安置在封闭狭小空间内,导致机电设备热量聚集,影响矿井温度。对于机电设备散热可采用涡流管制降温技术,其工作原理简单,方便易行,利用空气压缩来达到制冷的目的。其

在机电硐室中的布置大致如图8所示。

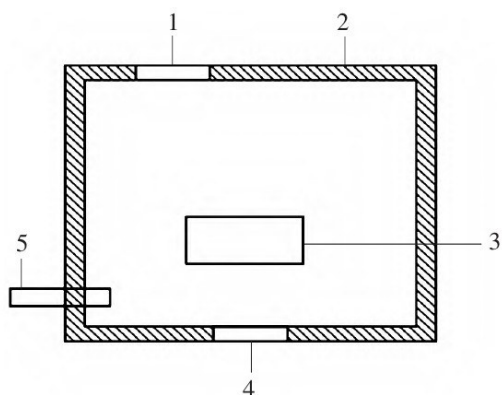


图8 涡流管技术布置示意图

1.门2.支护结构3.机电设备4.观察窗5.涡流管

(5)爆炸产生热量治理技术

对于井下采取爆破作业时产生的热量,需要及时治理,以免对矿井温度造成影响。爆炸产生的热量,部分分散在爆破烟雾中,其余热量将被储存在破碎岩石中,爆破后要及时通风,将爆炸产生的热量迅速随风流带出。爆破产生的热量作用时间短,没有持续供热源,对其采用加强通风的方式就能达到较好的降温效果。

(6)人体散热治理技术

在高温矿井中,工人在井下工作,外部环境温度过高,人体热平衡会遭受破坏,严重影响人身健康。对于井下这种特殊高温行业,工人在工作时应当穿戴特殊冷却服,冷却服不仅使人体与热环境分隔开,而且能对人体产生的热量进行降温,保证井下工作人员不受热环境的侵扰,避免人体长期处在高温环境中,对身体和心理造成不可逆转的伤害。

5 高温矿井热害防治技术发展趋势

(1)煤炭工业“十四五”科技发展指导意见中指出当今煤炭行业技术的发展方向,目前煤炭行业正处于改革阶段,煤炭行业各种技术发展要符合绿色高效理念。

(2)对于高温矿井降温技术的研究我国从20世纪50年代就已经开始着手,到今天来看,矿井降温技术的研究已经相当成熟,但也存在一定的缺陷。现如今迫切需要高温矿井降温新技术的出现和创造,新降温技术的出现和创造不仅要具有绿色、高效、节能等特点,同时要能对地热资源进行合理的利用。

(3)地热资源是未来绿色能源发展的一大方向,以矿井降温技术的发展同时,推动地热利用技术,开拓地热应用新前景。

6 结语

(1)通过总结分析我国高温矿井分布特征,我国高温矿井主要位于东北、两淮以及中部部分区域。

(2)分析不同区域高温矿井热害类型,并探讨矿井高温异常的影响因素,主要包括围岩、地下热流、地面气候、空气自然压缩、煤炭氧化以及其他因素。

(3)回顾了高温热害矿井治理技术发展历程,主要包括3个阶段:矿井降温技术理论发展阶段(1954—1974年),矿井降温技术全面发展阶段(1975—1990年),矿井降温技术飞速发展阶段(1991年至今)。

(4)总结了热害分源治理技术,针对不同热源选取相应技术进行高效治理。对于围岩散热为主的矿井,可以采用U形地热对接井技术;地下涌出热流的矿井,可采用U形地热对接井同超前钻孔相结合技术;空气自然压缩散热可选用地面CO₂相变循环制冷空气技术;针对机电设备散热建议采用涡流管制冷技术;人体散热则可选用特制制冷服。

参考文献 略

转自《煤炭技术》2023, No.10

自然资源部首个中低温水热型地热资源科创平台在津授牌

段春祥 李珊

国土资源报 第七版

由天津地热勘查开发设计院与天津大学联合申报的“自然资源部天津中低温地热野外科学观测研究站”(以下简称野外站)获授牌。该站是自然资源部在中低温水热型地热资源领域批准的首个科技创新平台,也是天津市首个获批的自然资源部野外科学观测研究站。

据天津地热勘查开发设计院院长胥博文介绍,野外站拥有天津市地热资源近40年连续监测数据和近50年地热科研成果,可用于监测与研究的地热井达到730多眼,其中选择了具有典型代表性的12眼地热井,完成监测内容标准化、自动化采集传输,通过野外观测站向社会开放,实现科研数据共享。野外站以服务国家资源保障、能源结构转型、双碳目标为宗旨,在地热资源开发利用与监测保护等方面积极开展科技攻关,紧紧围绕热储动态要素监测与变化规律研究、地热回灌监测与可持续开发研究、地热多元化应用研究与数据共享平台建设三大研究方向。

天津市地质矿产勘查开发局局长段焕春表示,

未来,天津地热勘查开发设计院将加强与央企、高校、科研机构合作,积极探索利用数智化技术,为推动国家能源转型、天津地热资源高效利用和可持续发展提供强大动力。他们有信心把这一科技创新平台组织好、实施好、建设好,为国家能源战略需求做好“智囊”,为中低温地热科学前沿探索做好“先锋”,为服务国家能源资源安全保障做好“铁军”,为韧性地质安全城市建设做好“支撑”。

野外站学术委员会会议和2024年学术年会在同日召开,围绕“地热资源评价的几点思考”“地热与区域能源”“长期动态监测揭示的地热能可更新能力”“二氧化碳爆破致裂技术开采干热岩地热能构想”“我国陆区热状态及控热因素—从陆区到盆地尺度”“国际深部地热能研究前沿进展”“地热资源动态监测装备研发与应用”“多元地热利用模式与信息化技术集成应用”“动态监测数据在地热科研与开发中的应用”等专题,会议邀请学术委员会委员和地热领域专家学者们进行了深入的学术交流研讨。

2024年国际干热-超热地热资源研究与开发研讨会在长春顺利召开

冯 波

吉林大学 新能源与环境学院

2024年国际干热-超热地热资源研究与开发研讨会于9月22日至24日在长春召开。会议由吉林大学主办,邀请了来自美国、德国、意大利、新西兰国际地热领域专家,及国内上百高校、科研院所、企业行业专家和相关人员参加。与会者共同探讨国际干热岩与超临界地热资源研究的最新进展,推动了科学技术进步,促进了地热行业发展。

本次会议共设置7个主题分会场,由李根生院士、文冬光主任、美国犹他大学Joseph Moore教授等多名

国内外著名专家学者做了会议主旨报告。会议主要围绕地热资源研究与开发领域的理论、方法与技术等进行交流。报告不仅涵盖干热岩及超热地质资源研究内容,还展示了国际干热岩、超临界地热的最新研究成果,促进了全球范围内的知识共享与科技成果转化。本次会议的成功召开,在干热岩和超临界地热资源研究方面具有广泛影响,为实现我国新一轮能源结构调整、构建世界能源清洁蓝图贡献智慧和力量。

蔚然 整编

超声辅助脱除水中的微气泡

马永丽¹, 沈世龙¹, 陈纪雷¹, 徐云龙¹, 王童欣¹, 魏心宇¹, 王倩倩¹, 刘明言^{1,2*}

1. 天津大学化工学院

2. 化学工程联合国家重点实验室(天津大学)

摘要: 利用气泡发生仪产生微气泡水, 模拟含气泡的回灌地热水。通过浊度、电导率、溶氧量等参数测量和表征自来水、微气泡水和超声处理水的微气泡含量。通过对模拟微气泡水等样品中微气泡在超声消泡前后的含量等表征和分析, 研究了超声处理对样本水体中微气泡含量的影响。结果表明, 超声处理时由于超声空化作用, 有助于加快微气泡成长、聚并; 超声作用过程也是能量传递过程, 通过提供能量降低水中气体含量, 促进了微气泡的脱除。研究对于超声微气泡脱除技术用于地热水高效回灌奠定了基础。

关键词: 微气泡; 超声波; 空化作用; 脱除; 地热水

地热水回灌过程受当前技术限制, 易发生堵塞而造成回灌效率低, 甚至回灌井报废等一系列问题。因此, 解决地热水回灌过程中的堵塞问题, 是实现地热能高效和经济利用的关键环节之一。气体堵塞主要是指, 在地热水回灌过程中, 由于压力和温度等操作条件以及地热水物理化学性质变化, 而形成微气泡堵塞多孔岩层水通道, 使回灌难以正常进行, 一般占总堵塞的10%~15%。目前应对地热水回灌气体堵塞的方法, 如加压回灌、离心脱气回灌、安装脱气罐利用流速和压差脱气后回灌等, 效率都较低, 难以满足高效地热水回灌过程中对液体脱气率的要求。

目前对于微气泡性质的研究还处在起步阶段。一般认为, 微纳米气泡尺寸应在0.5–50 μm 之间, 具有气泡上升速度慢、压强大、表面积大、界面电位高、气体溶解率高等不同于普通气泡的特殊性质, 这也使得微气泡在污水处理、医疗卫生等领域有特殊应用。对于微气泡的制备与表征方面有一定进展, Etchepare等采用加压溶气减压释气的方法可以制得一定粒度的稳定微气泡, Fan等利用光催化的方式, 在光催化材料表面析出微气泡, 潘习习等研究了不同条件下, 微气泡与溶解氧之间

的关系, 发现两者是互相关联的。

国内外对地热水回灌过程中的气相堵塞研究也还不够。已有对地热水回灌气相堵塞特征的实验研究, 如束龙仓等以达西渗流理论为依据, 利用砂柱模拟雨水回灌地下水过程, 采用介质渗透系数的变化定量评价试验砂柱的堵塞情况。也有脱气方法的研究, 如用于自来水和金属熔融液脱氢方面的超声波脱气研究。亦有利用超疏水和超亲水纳米针结构网格脱气。但是, 尚无采用超声波脱气方法用于地热水回灌过程中的气体堵塞的深入研究。超声波脱气是利用高强度的超声波振动产生空化气泡, 在振荡压和定向扩散的作用下, 空化气泡不断生长, 长成大气泡后聚集和漂浮到液体表面破裂, 溶液中的气体被脱除。超声波脱气与常规的化学、负压等脱气技术相比, 具有能在常温常压下进行, 对环境清洁、价格低廉等特点, 是一种较有前景的脱气技术。然而, 由于超声脱气技术的研究更多侧重于冶金领域的液态金属超声波脱气和化工、环境行业的气泡运动原理、气液传质方面, 针对地热水超声脱气, 特别是其中有关声强、频率等参数研究和对相关装置研发的报导很少。

本论文拟通过微气泡发生装置产生微气泡水,通过改变超声除气的功率,设计和进行超声波脱除微气泡的研究,评价超声波脱气的效果,探索优化的超声波脱气参数,为工业应用提供基础指导。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

用于模拟回灌地热水的自来水。

1.2 实验装置及流程

实验装置及流程如图1所示。

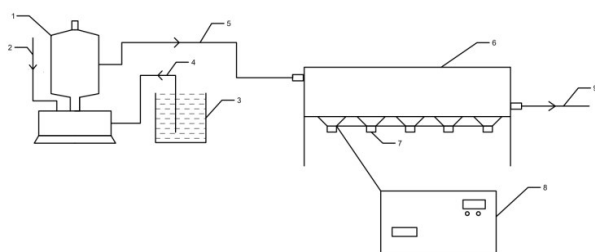


图1 实验流程图

1-微气泡发生仪;2-进气管路;3-水槽;4-进水管路;5-微气泡水;6-超声处理水槽;7-超声振子;8-超声波发生装置;9-超声处理后微气泡水

1)微气泡发生仪:斯利泵业生产,QY型号,规格为250 W。以100~150 L·h⁻¹的流量向水体内部产生微纳米级气泡。

2)超声处理装置:主体为金属水缸,材料为304不锈钢板,长50 cm,宽10 cm,高5 cm;水缸下装有超声振子,振子为科美达公司生产,KMD-4050型号,规格为28 kHz,60 W,振子间距大于10 cm。

3)超声波发生装置:科美达公司生产,KMD-K1双显型号,规格为28 kHz,600~900 W,用以在0~900 W的功率下产生20~25 kHz的超声波。

4)测量表征装置:

(1)台式浊度仪:力辰科技生产,WGZ-1A型号,测定水体的浊度,其原理是通过微气泡等对光线的散射吸收程度不同来表征不同的浊度。

(2)电导率仪:mettler toledo公司生产,M2001-CH 1/4 DIN型号,测定样品的电导率。

(3)溶氧量测定仪:梅特勒公司生产,JPSJ-605F型号,测定水体的溶氧量及温度,测量时应注

意搅动样本。

(4)微电泳仪(Zeta电位仪):上海中晨数值技术有限公司生产,JS94H型号,对放大1200倍的气泡连续拍照,放大后的照片中肉眼能看见0.5~20 μm的气泡。

1.3 实验操作条件及步骤

在室温下通过气泡发生仪处理样品5 min,以制得微气泡水,制得微气泡水在超声处理水槽中以不同条件进行处理,分别尝试通过浊度仪、电导率仪、溶氧量测定仪定量测定自来水、微气泡水、超声处理后微气泡水的气泡含量。操作步骤如下:

(1)采用浊度仪分别测量自来水、加气5 min微气泡水和固定频率与功率条件下超声处理0.5 min、2.5 min、5 min、10 min、15 min后水样的浊度。

(2)使用电导仪分别测量自来水、加气5 min微气泡水和固定频率与功率条件下超声处理5 min、15 min、25 min后水样的电导率。

(3)通过溶氧量测定仪分别测量自来水、加气5 min微气泡水和固定频率及0 W、270 W、450 W、630 W、900 W功率超声条件下,每隔10 min的样品中溶氧量浓度及温度。

(4)用微电泳仪分别拍摄自来水、加气5 min微气泡水和27.6 kHz、900 W功率超声处理后气泡水的微气泡照片。

1.4 数据处理

(1)浊度表征分析:以多次实验的平均值进行比较,通过不同状态下样品的浊度变化,分析浊度对表征样品中微气泡含量的可行性与可能揭示的规律。

(2)电导率表征分析:以多次实验的平均值进行比较,通过不同状态下样品的电导率变化,分析电导率对表征样品中微气泡含量的可行性与可能揭示的规律。

(3)溶氧量表征分析:首先对不同状态下样品的实验测量值进行比较,分析溶氧量对表征样品中微气泡含量的可行性,并通过对比溶氧量随超声处理时间和不同超声处理条件的变化探究超声脱除微气泡的规律。

(4)微气泡数目、形态变化分析:通过相机拍摄照片,直观分析不同条件下微气泡形态和数目

变化。同时由于单个照片所展示空间有限,为客观反映不同微气泡水样品中的气泡数目,对同一样品进行多次拍照,统计平均值进行比较。

2 结果与讨论

2.1 微气泡水与超声处理后的微气泡水

2.1.1 微气泡水状态

图2为微气泡发生仪初制得的含微气泡水样本。可以看出,气泡水初制得时为白色浑浊液体,静置2~5 min后逐渐澄清,开始时,气泡水含有大量的不同粒径的微气泡或小气泡,当气泡粒径超过50 μm 时,气泡上浮速度较快,不能稳定存在,会迅速发生聚并上浮至液体表面消失或溶解于液体之中。而微气泡则稳定存在于样品之中,这也在后续表征中得到证明。



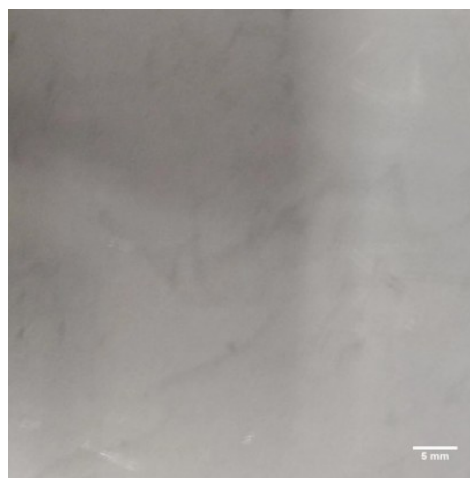
图2 初始状态的微气泡水(50 mL烧杯中)

(3 L水样通过微气泡发生仪加气处理5 min制得)

2.1.2 超声处理下气泡水状态变化

图3为进行超声处理时微气泡水的状态变化。气泡水原本状态为澄清透明液体,超声处理时,肉眼可见有气泡形成,且气泡会处于稳定成长阶段,主要存在于液体表面或容器底部。随超声时间增加,少量底部气泡上浮。当停止超声处理时,大部分液体表面气泡消失,大部分底部贴壁气泡上浮消失。分析认为,超声作用于两相体系时时由于空化作用,微气泡发生了振动、缩放等一系列动力学过程,微气泡粒径呈现震荡波动变化并逐步增大^[15],这加快了微气泡的成长或聚并,使得微气泡上浮速度加快,在环境中不能稳定存在,促使水体

中气体含量下降,同时使得微气泡含量下降。



(a) 未超声处理的微气泡水



(b) 超声处理时的微气泡水

图3 超声波处理前后的微气泡水的状态

(微气泡水为3 L水样通过微气泡发生仪加气处理5 min制得,超声处理条件为27.6 kHz,600 W)

2.2 微气泡水样品在超声消泡前后的性能表征

2.2.1 微气泡的浊度表征分析

从浊度测量的原理上分析,微气泡含量的多少与浊度(TU, NTU)有关。表1是典型的微气泡水在超声处理前后样本的浊度测量数据。从表1可以看出,无论是微气泡加气处理还是超声处理,浊度均有上升的趋势,但重复实验时,不同处理条件下浊度上升幅度又有所不同或者变化不明显,数据变化没有明显规律,而且所检测出浊度值均较小,变化程度也无规律性。分析认为是因为微气泡含量对浊度影响不明显,或者是实验所用浊度仪灵敏度不足,反而可能是其他影响因素如仪器杂质的引入等影响了样本浊度。同时,当

在相同条件下重复取得原水样时实验测量值明显不同,因而采用当前测量仪器进行测量的重现性较差。因此,浊度测量不适用于样品微气泡含量的表征。

表1 不同状态下微气泡水样本的浊度数据

组别	TU/NTU							
	原水样1	微气泡水 (处理5 min)	超声处理 (0.5 min)	原水样2	超声处理 (2.5 min)	超声处理 (5 min)	超声处理 (10 min)	超声处理 (15 min)
1	0.6	0.7	3.5	1.5	2.7	3.6	3.4	4.3
2	0.5	1.1	3.2	1.3	3.0	3.6	4.0	4.3
3	0.4	0.9	3.2	/	/	/	/	/
平均值	0.5	0.9	3.3	1.4	2.9	3.6	3.7	4.3

2.2.2 微气泡的电导表征分析

微气泡对溶液电导率($\sigma, \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)会产生影响。表2是部分样本的电导率测量数据。从表2可以看出,在不同处理条件下,尽管相对于原样本电导率小幅上升,但是总体上电导率变化不明显,且电导率上升有可能是由于实验过程中水温上升的影响。分析认为溶液电导率主要受温度和离子状态的影响、与浓度有关,微气泡对电导率的影响一般需要电导探针才能准确测量。实验室所用电导率测量设备探头为金属圆头,而非电导探针,且探针直径也会影响微气泡测量效果,当前实验条件下,电导率表征微气泡含量的方法不适用。

表2 不同超声时间下微气泡水样本的电导率

样本	$\sigma/\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$				
	原水样	微气泡水 (处理5 min)	超声处理 (5 min)	超声处理 (15 min)	超声处理 (25 min)
1	292.1	297.4	300.8	301.0	302.0
2	293.9	302.4	300.5	301.3	302.7
3	293.4	302.9	301.0	301.5	302.3
平均值	293.1	300.9	300.8	301.3	302.3

2.2.3 微气泡的溶氧量表征分析

表3是部分样本的溶氧量测量数据,图4是2 L微气泡水是否经过27.6 kHz超声5 min处理的溶氧量变化曲线对比图。从表3可以看出,微气泡处理后样本溶氧量上升;经超声作用后,溶氧量明显

下降。从图4可见,在进行测量时,数值大约在250 s后趋于稳定。超声作用处理后溶氧量明显下降;实验参数不同时,溶氧量下降速率不同。分析认为,当进行超声作用时溶解氧会因为空化作用进入微气泡水,结合超声作用时,会有肉眼可见气泡浮出水面,气泡空化成长后会进一步聚并,当不能稳定存在时,会上升至液面破裂的现象,认为溶解氧可以反映微气泡的含量。

表3 不同超声时间下微气泡水样本的溶氧量

样本	原水样	气泡水 (处理5 min)	超声处理 (0.5 min)	超声处理 (1.5 min)
DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	4.42	5.49	5.37	5.05
T/ $^{\circ}\text{C}$	20.4	20.9	21.3	21.7

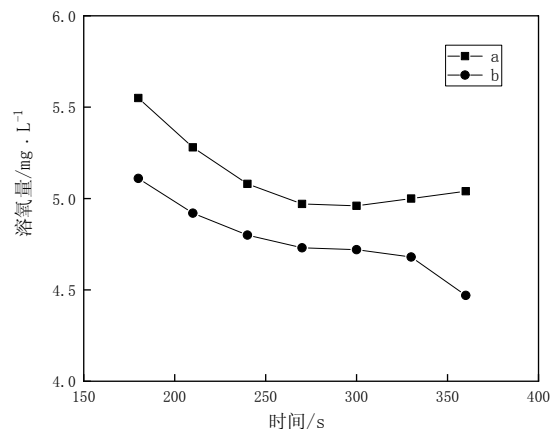


图4 微气泡水中的溶氧量在超声处理前后的变化曲线

(a—2 L微气泡水溶氧量变化;b—2 L微气泡水在27.6 kHz超声5 min后溶氧量变化,微气泡水通过微气泡发生仪加气处理5 min制得)

2.3 微气泡水样品中微气泡在超声消泡前后的表征分析

2.3.1 超声处理下含氧量变化

图5为用不同功率超声处理微气泡水所得到的微气泡水含氧量($\text{DO}, \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)随时间的变化。从图5可见,超声处理前微气泡水(加气5 min)含氧量维持在8~8.65 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,无超声处理时气泡水含氧量变化不明显,处在维持不变的状态;随着超声功率的增加,气泡水含氧量呈下降趋势,且下降趋势增大,说明气泡脱除效果与超声功率存在正相关关系。

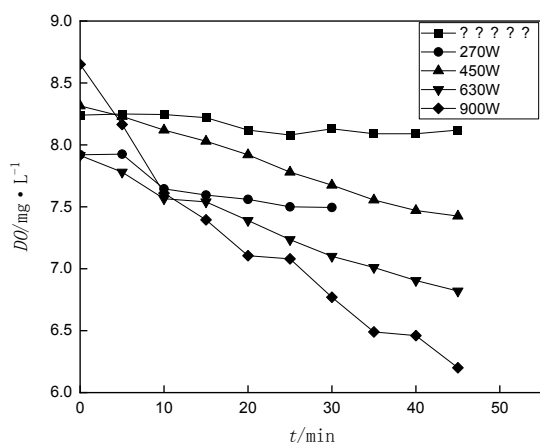


图5 超声处理微气泡水含氧量变化

(微气泡水均由5 L样品通过微气泡发生仪加气5 min制得, 超声频率均为27.6 kHz)

为客观反映超声功率对微气泡水中微气泡脱除的效果,定义物理量微气泡脱除速率,其中瞬时微气泡脱除速率为 $p(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$,平均微气泡脱除速率为 $P(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$,瞬时微气泡脱除速率和平均微气泡脱除速率分别由式(1)与(2)计算得到。

$$p = \frac{dDO}{dt} \quad (1)$$

$$P = \frac{\Delta DO}{\Delta t} \quad (2)$$

表4为由不同超声功率处理的微气泡水含氧量变化数据计算而得到的平均微气泡脱除速率。其中,与无超声处理微气泡水相比,用270 W超声处理微气泡水时,气泡脱除速率明显增大。结合实验时气泡产生与流动状态,可进一步认为在超声处理时,由于超声空化作用,微气泡可以迅速成长或发生聚并。此外,数据也明显反映出气泡脱除速率是随功率增加而提升的。其中,超声功率增加到450 W时,可观察到含氧量下降速率有所提升,而继续增加至630 W时,含氧量下降速率提升不是很明显。但当功率从630 W增至900 W时,气泡脱除速率增速明显加快,据此认为超声处理脱除微气泡时存在超声功率的合适范围,在此范围内超声功率的增加对于微气泡的脱除有更明显的效果。

表4 不同处理方法时平均微气泡脱除速率

处理方法	$P \times 10^2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$
无超声处理	-0.4
270 W	-1.58
450 W	-2.10
630 W	-2.45
900 W	-5.03

2.3.2 超声处理时微气泡水的温度变化

实验过程中发现,超声处理时,微气泡水的温度会随超声作用时间的延长而上升。图6为不同超声处理条件下微气泡水的温度随时间的变化。随超声功率的增加,微气泡水温增长速率也存在一定程度的增加。分析认为,超声处理时会传递能量,引起水温上升;当超声功率增加时传递的能量增大,水温上升速率也随之增加。而温度上升时,气体在水中溶解度下降,从平衡考虑,气液传质速率也增加,加快了空化气泡的成长速率,一定程度上促进了对微气泡的脱除效果。

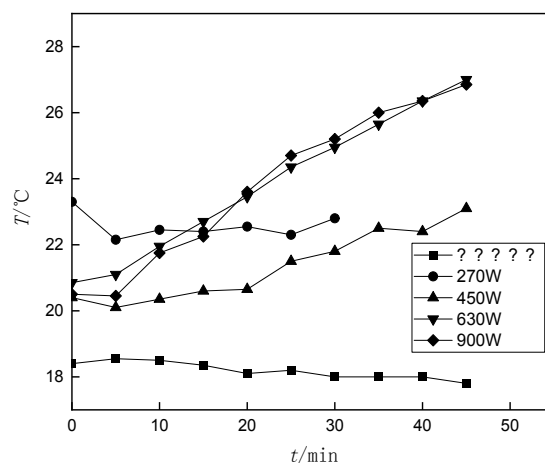


图6 超声处理时温度变化

(样品均为5 L水通过微气泡发生仪加气5 min制得的微气泡水,超声频率为27.6 kHz)

2.3.3 关于超声作用和温度上升对微气泡脱除的讨论

由于在实验进行过程中存在温度上升的现象,而且温度的上升也会导致微气泡水样品含氧量的下降,因此,这里讨论了超声空化作用是否真的对微气泡脱除有利。

图7为不同条件下微气泡水样品溶解氧随温度的变化,其中对照组为自来水在升温时含氧量

的变化。选取超声处理时功率为 450 W 和 900 W 两条件下溶氧量与温度的变化进行比较。可以明显看出,当施加超声作用时,溶氧量随温度的变化更加剧烈,且超声功率越大,溶氧量随温度变化越剧烈。同时分别计算了对照组和实验组含氧量随温度平均变化量 $U(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$,表 5 为不同条件下 U 的计算值,表中数据与图 7 所示趋势相同。实验现象可以说明,当施加超声作用时,微气泡脱除速率的加快是超声空化作用和温度上升平衡改变共同作用的结果。

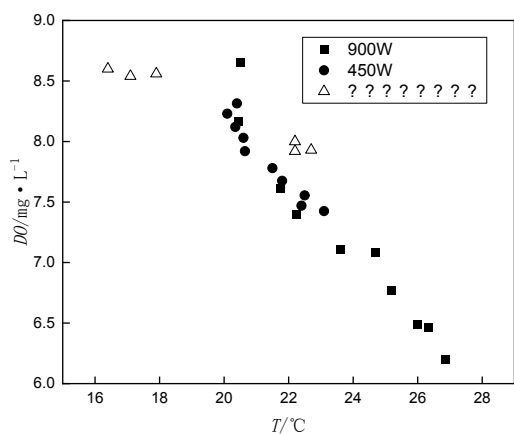


图 7 不同条件下溶氧量随温度的变化

(对照组为随机取样自来水,实验组样品为 5 L 自来水通过微气泡发生仪加气处理 5 min 后微气泡水,超声频率为 27.6 kHz)

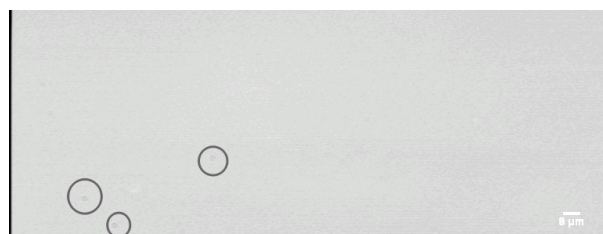
表 5 不同条件下含氧量随温度平均变化量

处理条件	$U \times 10^2/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
对照组(自来水)	-10.63
450 W	-32.96
900 W	-38.58

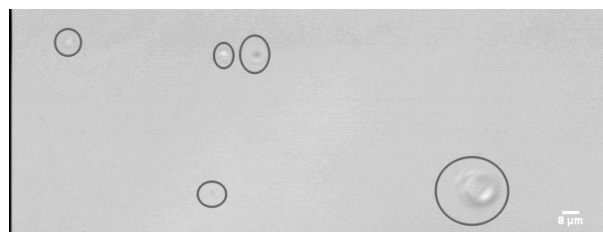
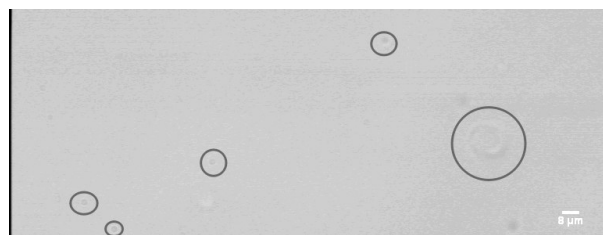
2.3.4 不同状态下微气泡形态与数量

图 8 为用相机拍摄得到的不同微气泡水样品中的气泡形态与数量。图 8(a)为未经处理的自来水,其中视野范围内气泡数目较少,粒径大小较为均一,图(b)为加气 5 min 后气泡水,图中明显可见气泡数目增多,且气泡粒径大小不均一,图(c)为 900 W 功率超声处理后的气泡水,其中视野范围内气泡数量对比原气泡水明显减少,且气泡尺寸较小。表 5 为三个微气泡水样品中气泡数目平均值。统计数值明显反映出,微气泡数目在加气

处理后明显增加,超声处理后又明显下降。从图中和表中数据综合分析认为,天然状态下的自来水样品,由于运输过程中理化性质的改变,是存在少量的微气泡的,但是微气泡粒径大小较为均一,处于一个较为稳定的状态;而微气泡发生仪处理后,样品中明显气泡含量增多,且产生的微气泡大小不同,存在一定的粒径范围分布,证明加气处理后样品中产生了不同粒径大小的微气泡,当前方法制得微气泡含量较多的模拟微气泡水是较为成功的;经过超声处理后,明显微气泡含量降低,已经低于原自来水样品,只有少量粒径较小微气泡存在,认为在超声作用下,大部分微气泡通过空化作用粒径大小发生改变,粒径较大的气泡会快速上浮至表面消失,进一步印证了超声处理有利于微气泡的脱除,也证明采用含氧量进行表征的可行性。



(a) 未经处理样品



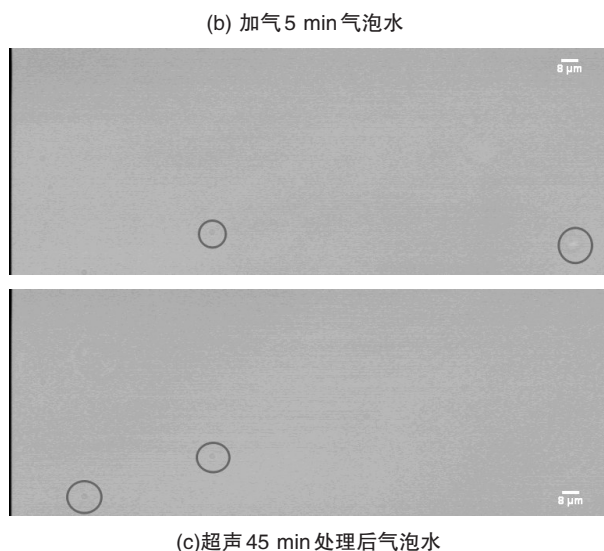


图8 相机拍摄不同状态下气泡形态与数量

(a 为未经处理自来水;b 为 5 L 自来水通过微气泡发生仪加气 5 min 后气泡水;c 为微气泡水在 27.6 kHz,900 W 条件下处理 45 min 后样品,气泡被圈出)

表6 不同样品气泡数目统计

组别	拍照次数	气泡总数	平均气泡数
未处理水样	104	187	1.80
加气 5 min 气泡水	148	408	2.76
超声处理 45 min 气泡水	124	210	1.69

3 总结与展望

(1) 浊度与电导率表征微气泡含量的方法不

可行,但是,可以采用溶氧量作为微气泡含量的表征参数。

(2) 超声处理时,由于超声空化作用,微气泡成长、聚并速率加快,促进了微气泡水中微气泡的脱除。

(3) 超声作用脱除微气泡过程中,还存在热量传递过程,通过提供热量影响气液平衡状态,降低了水中气体含量,进而有助于脱除微气泡。

(4) 微气泡的状态是随时间改变的,本实验采用的测量方法未能建立动态测量方法实时追踪微气泡含量变化,存在延后性,可以在测量方法上进一步改进。

(5) 本实验功率设定范围有限,可以探索更宽范围的超声功率,并结合成本、能耗等因素,确定最适合的超声功率。此外,频率作为超声的重要参数之一,也可探究超声频率对脱除微气泡的影响,以确定更好的操作条件。

(6) 本实验初步探究并确定了超声对微气泡脱除的可行性,对以后发展解决地热水回灌中气体堵塞问题的技术提供了指导。

参考文献略

转自《化学工业与工程》Vol.41 No.4

四川省米仓山南缘发现我国规模最大地热自流斜地

林化领

四川省地矿局九〇九水文地质工程地质大队

横亘于四川省北部边陲的米仓山,东连大巴山,西接龙门山,山体绵延起伏长达400公里,是四川盆地北部的天然屏障,平面上酷似缺失下底的巨大梯形。在梯形腹心地带蕴藏着丰富的地热资源。观察地形地貌,查阅地质资料,细读深井勘探成果,多次实地考察,认真分析,反复研究,确认龙

门山北段,米仓山南缘发现确系一鲜为人知我国最大的地热自流斜地。

地热自流斜地分布范围,西自四川剑阁新城,经广元、旺苍、南江、通江县北,直抵陕西省镇巴县简池乡,全长250公里,南北宽16—18公里,以米仓山为主体,幅员面积约4000平方公里。