

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

2025年第3期

学述论文	
有机朗肯-单级闪蒸循环发电性能优化研究	
.....	李太禄等 (3)
中国深层/超深层油气勘探储层地质力学研究进展、挑战及展望	
.....	尹帅等 (10)
基于 Trnsys 能耗预测的村镇建筑不同供能方式碳-经济分析	
.....	胡开永等 (22)
综 述	
澳大利亚库珀盆地闭式循环系统的效能	
.....	地热科学前沿 (28)
报 导	
3个地热项目获河北省科学技术奖	
.....	地热加 报 (32)
山西省大同市政府发文积极发展有规模有效益的地热能	
.....	地热加 报 (33)

(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.3 2025

Academic Articles

Research on power-generation-performance optimization of an organic Rankine cycle with single-stage flash

..... Tailu Li et al. (3)

Geomechanical research on deep and ultra-deep oil and gas exploration reservoirs in China: progress, challenges, and prospects

.....Shuai Yin et al. (10)

Carbon economic analysis of different energy supply methods for rural buildings based on Trnsys energy consumption prediction

.....Kaiyong Hu et al. (22)

Review Articles

The performance of closed-loop system in Cooper Basin, Australia

..... Frontiers of Geothermal Science (28)

News

Three geothermal projects won the Hebei Provincial Science and Technology Awards

..... Geothermal-Plus APP (32)

The government of Datong City, Shanxi Province has issued a document to actively develop geothermal energy utilization with scale and effectiveness

..... Geothermal-Plus APP (33)

有机朗肯-单级闪蒸循环发电性能优化研究

李太禄², 李学龙², 谢迎春¹, 刘军¹, 张维明³

1 中核坤华能源发展有限公司

2 河北工业大学

3 中海油能源发展装备技术有限公司

摘要:在有机朗肯循环(ORC)的基础上,提出了有机朗肯-单级闪蒸循环(ORSFC)。基于热力学第一、第二定律构建了发电性能热力学优化模型;采用R601作为系统循环工质,研究了热源温度、蒸发温度、闪蒸温度和蒸发器出口干度等参数变化对系统发电性能的影响;以净输出功率、热效率和焓效率为优化目标函数,得到了匹配3种优化目标函数的最佳运行工况。研究结果表明:热源温度、蒸发温度、闪蒸温度和蒸发器出口干度对系统性能有较大的影响,有机朗肯-单级闪蒸系统的发电性能优于有机朗肯循环,其净输出功率、热效率和焓效率均有显著提高。

关键词:地热发电;有机朗肯-单级闪蒸循环;热力学分析;发电性能优化

前言

地热发电是中高品位地热资源的一种有效利用方式。我国地热资源丰富,已探明总量约占全球地热资源总量7.9%,相当于4 000多亿t标准煤^[1]。我国地热资源主要分布于藏南-川西-滇西地区^[2]。

在众多热功转换技术中,有机朗肯循环(ORC)发电技术因系统结构简单、温度适应范围宽泛、占用资源少、机组容量配置灵活等特点而备受关注,因此,研究人员对ORC系统的优化进行了大量研究。刘茜等^[3]研究了太阳能有机朗肯-闪蒸循环工质选择,发现R601具有较高的净输出功率、热效率和第二定律效率,并且系统的不可逆损失较小,是一种较理想的有机朗肯-闪蒸系统循环工质。罗柯等^[4]提出了闪蒸-双工质联合发电系统的热力学模型,比较研究了不同地热流体温度条件下5种有机工质的做功能力,结果表明每种工质都有一个最佳闪蒸温度使联合系统的单位热水净发

电量达到最大。Edrisi等^[5]对比研究了以正丁烷、异丁烷、正己烷、戊烷、制冷剂-114、氨为工质的双级闪蒸系统和常规双级系统的运行情况,优化后双级闪蒸系统做功比常规双级系统做功提高了25%。杨新乐等^[6]提出了一种新型ORC-f(有机朗肯循环-分流闪蒸)系统,当热源不足以使工质在接近临界温度下蒸发时可以提高系统热力性能。文献[7]分析比较了不同热源温度下有、无分流闪蒸的两个系统中工质配比对系统热力性能的影响,随着热源温度的增加,采用混合工质及分流闪蒸使系统净输出功率增幅提高,但热回收率增幅相对降低。李惟慷等^[8]提出了一种梯级分流ORC系统以提高换热器中的蒸发温度,降低了预热器焓损失。王喜军等^[9]提出了由超临界CO₂循环和有级闪蒸循环组成的新型余热回收循环方式。Shokati等^[10]研究了双闪地热发电循环和单闪/ORC联合循环,在地热流体储层温度恒定和不同工质的条件下,系统热效率和焓效率最大值与闪蒸温度有关。

骆超^[11]提出了两级地热闪蒸和地热闪蒸-双工质联合发电方式,分析了地热水温度对两种不同地热发电系统的性能及地热尾水温度的影响。

在已有的ORC系统优化研究的基础上,本文提出了有机朗肯-单级闪蒸循环方式(Organic Rankine - single flash cycle, ORSFC);基于热力学第一和第二定律,构建了ORSFC热力学优化模型;以R601作为循环工质,对影响发电性能的因素进行分析,得到了以净输出功率、热效率和焓效率为优化目标函数所对应的最佳运行工况。

1 系统介绍

有机朗肯-单级闪蒸系统如图1所示。ORSFC系统是由蒸发器、冷凝器、膨胀机、循环泵、气液分离器和闪蒸器等主要部件构成。有机工质经过工质泵的加压进入蒸发器中,与热源水进行热交换后发生相变,使液态的有机工质变成气液两相态。从蒸发器流出的有机工质进入气液分离器,被分离的气体工质进入汽轮机 I 膨胀做功;被分离的液体工质进入闪蒸器。闪蒸得到的气体工质进入汽轮机 II 膨胀做功,闪蒸后的液体工质经工质泵 II 加压进入蒸发器。膨胀做功后的两部分低压工质混合后进入冷凝器,在冷凝器中与冷却水进行热交换变成过冷的液态工质;然后再次经工质泵 I 加压进入蒸发器,如此完成一次循环过程。图2为ORSFC系统对应的T-s图。

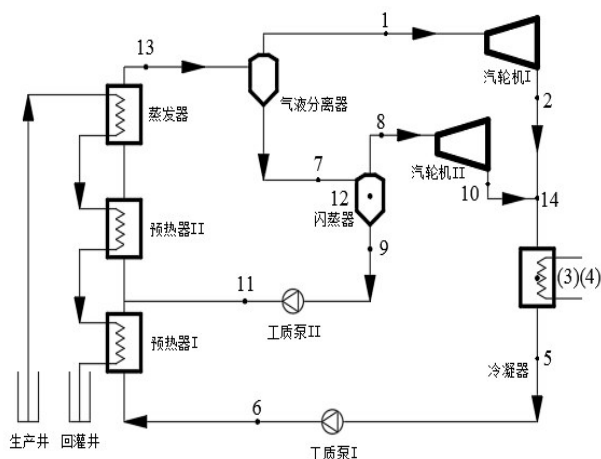


图1 有机朗肯-单级闪蒸系统图

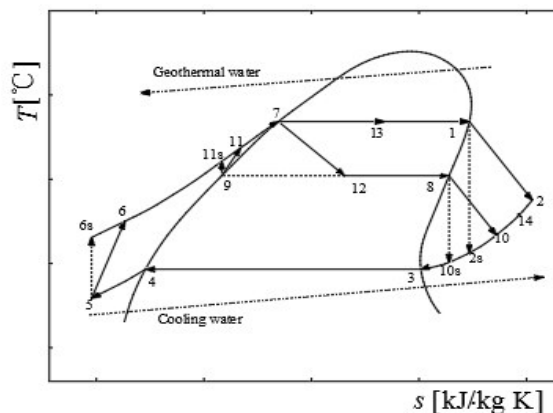


图2 有机朗肯-单级闪蒸系统T-s图

2 数学模型

2.1 假设条件

为了便于数学模型的建立,简化分析,做以下假设:①系统处于稳定流动状态,忽略系统热损失;②不计工质流动阻力损失;③工质泵和汽轮机的等熵效率在不同的工况下保持不变,且两个汽轮机的等熵效率相等;④忽略有机工质进入冷凝器之前的混合过程中能量损失;⑤气液分离器中的不可逆损失在总不可逆损失中的占比较小,忽略不计;⑥在汽轮机入口和冷凝器出口,工质状态分别为饱和汽态和过冷态,过冷度为5℃;⑦换热器窄点温差为3℃。

2.2 数学模型

运用热力学第一定律和热力学第二定律,并结合有机朗肯-单级闪蒸系统的示意图1和系统的T-s图(图2),建立有机朗肯-单级闪蒸系统各装置数学模型。

汽轮机输出功率:

$$W_t = m_{wf1}(h_1 - h_2) + m_{wf8}(h_8 - h_{10}) \quad (1)$$

式中: W_t 为汽轮机输出功率, kW; m_{wf1} 和 m_{wf8} 分别为在汽轮机 I 和汽轮机 II 中膨胀做功的工质质量流量, kg/s; h_1, h_2 和 h_8, h_{10} 分别为汽轮机 I 和汽轮机 II 进出口的比焓值, kJ/kg。

汽轮机焓损失:

$$I_t = T_0 \Delta S_t = T_0 [m_{wf1}(s_1 - s_2) + m_{wf8}(s_8 - s_{10})] \quad (2)$$

式中: I_t 为汽轮机的焓损失, kJ; ΔS_t 为汽轮机的熵增, kJ/K; T_0 为环境温度, K; s_1, s_2 和 s_8, s_{10} 分别为

汽轮机 I 和汽轮机 II 进出口的比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

冷凝器换热量:

$$Q_c = m_{wfl}(h_2 - h_5) + m_{wf8}(h_{10} - h_5) = m_{cw}(h_{cw,out} - h_{cw,in}) \quad (3)$$

式中: Q_c 为冷凝器换热量, kJ ; h_5 为冷凝器出口工质比焓值, kJ/kg ; $h_{cw,in}$, $h_{cw,out}$ 分别为冷凝器进出口冷却水的比焓值, kJ/kg ; m_{cw} 为冷却水的质量流量, kg/s 。

冷凝器熵损失:

$$I_c = T_0 \Delta S_c = T_0 [m_{wfl}(s_2 - s_5) + m_{wf8}(s_{10} - s_5) + m_{cw}(s_{cw,out} - s_{cw,in})] \quad (4)$$

式中: I_c 为冷凝器的熵损失, kJ ; ΔS_c 为冷凝器的熵增, kJ/K ; s_5 为冷凝器出口工质比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $s_{cw,in}$ 和 $s_{cw,out}$ 分别为冷凝器进出口冷却水的比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

工质泵 I 耗功:

$$W_{p1} = (m_{wfl} + m_{wf8})(h_6 - h_5) \quad (5)$$

式中: W_{p1} 为工质泵 I 耗功量, kW ; h_6 为工质泵 I 出口工质的比焓值, kJ/kg 。

工质泵 I 熵损失:

$$I_{p1} = T_0 \Delta S_{p1} = T_0 (m_{wfl} + m_{wf8})(h_6 - h_5) \quad (6)$$

式中: I_{p1} 为工质泵 I 的熵损失, kJ ; ΔS_{p1} 为工质泵 I 的熵增, kJ/K ; s_6 为工质泵 I 出口工质比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

工质泵 II 耗功:

$$W_{p2} = m_{wf9}(h_{11} - h_9) \quad (7)$$

式中: W_{p2} 为工质泵 II 耗功量, kW ; h_9 , h_{11} 分别为工质泵 II 进出口工质的比焓值, kJ/kg ; m_{wf9} 为流经工质泵 II 的工质质量流量, kg/s 。

工质泵 II 熵损失:

$$I_{p2} = T_0 \Delta S_{p2} = T_0 m_{wf9}(h_{11} - h_9) \quad (8)$$

式中: I_{p2} 为工质泵 II 的熵损失, kJ ; ΔS_{p2} 为工质泵 II 的熵增, kJ/K ; h_9 , h_{11} 分别表示工质泵 II 进出口工质的比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

蒸发器换热量:

$$Q_e = (m_{wfl} + m_{wf8})(h_{13} - h_6) + m_{wf9}(h_{13} - h_{11}) = m_{gw}(h_{gw,in} - h_{gw,out}) \quad (9)$$

式中: Q_e 为蒸发器换热量, kJ ; h_{13} 为蒸发器出口工质比焓值, kJ/kg ; $h_{gw,in}$, $h_{gw,out}$ 分别为蒸发器进出口热源水的比焓值, kJ/kg ; m_{gw} 为热源水的质量流量, kg/s 。

蒸发器熵损失:

$$I_e = T_0 \Delta S_e = T_0 [(m_{wfl} + m_{wf8})(s_{13} - s_6) + m_{wf9}(s_{13} - s_{11}) + m_{gw}(s_{gw,out} - s_{gw,in})] \quad (10)$$

式中: I_e 为蒸发器的熵损失, kJ ; ΔS_e 为蒸发器的熵增, kJ/K ; s_{13} 为蒸发器出口工质比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $s_{gw,in}$ 和 $s_{gw,out}$ 分别为蒸发器进出口热源水的比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

热源水泵耗功:

$$W_{hp} = m_{gw} g H_{hp} / 1000 \eta_{hp} \quad (11)$$

式中: W_{hp} 为热源水泵的耗功量, kW ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_{hp} 为热源水泵的扬程, m ; η_{hp} 为热源水泵效率, %。

冷却水泵耗功量:

$$W_{cp} = m_{cw} g H_{cp} / 1000 \eta_{cp} \quad (12)$$

式中: W_{cp} 为冷却水泵的耗功量, kW ; H_{cp} 为冷却水泵的扬程, m ; η_{cp} 为冷却水泵效率, %。

闪蒸器熵损失:

$$I_f = T_0 \Delta S_f = T_0 [m_{wf7}(h_{12} - h_7)] \quad (13)$$

式中: I_f 为闪蒸器的熵损失, kJ ; ΔS_f 为闪蒸器的熵增, kJ/K ; m_{wf7} 为闪蒸器内工质质量流量, kg/s ; s_7 , s_{12} 分别为闪蒸器的进口和闪蒸器内部工质比焓值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

系统净输出功率:

$$W_{net} = \eta_m \eta_g W_t - W_{p1} - W_{p2} - W_{hp} - W_{cp} \quad (14)$$

式中: W_{net} 为净输出功率, kW ; η_m 为机械效率, %; η_g 为发电机效率, %。

系统热效率:

$$\eta_{th} = W_{net} / Q_e \quad (15)$$

式中: η_{th} 为热效率, %。

系统熵效率:

$$\eta_{ex} = W_{net} / (Ex_{gw,in} - Ex_{gw,out}) = W_{net} / m_{gw} [h_{gw,in} - h_{gw,out} - T_0 (s_{gw,in} - s_{gw,out})] \quad (16)$$

式中: $Ex_{gw,in}$ 和 $Ex_{gw,out}$ 为系统进出口热源水的总焓值, kJ ; η_{ex} 为熵效率, %。

系统总熵产:

$$\Delta S = \Delta S_t + \Delta S_c + \Delta S_{p1} + \Delta S_{p2} + \Delta S_e + \Delta S_f \quad (17)$$

式中: ΔS 为系统的总熵增, kJ/K 。

系统的总熵损失:

$$I = I_t + I_c + I_{p1} + I_{p2} + I_e + I_f \quad (18)$$

式中: I 表示系统的总熵损失, kJ 。

2.3 系统参数

ORSFC 系统性能相关参数如下:地热水入口温度 80~180℃;冷却水入口温度 25℃;冷却水出口温度 30℃;地热水流量 100kg/s;汽轮机入口过热 0℃;工质泵入口过冷度 5℃;工质泵效率 60%;热水泵效率 75%;冷却水泵效率 75%;汽轮机等熵效率 75%;机械效率 96%;发电机效率 95%;环境温度 20℃;环境压力 0.101325 MPa。

3 模型验证

将文献中的计算条件代入本文所建立的模型进行计算和对比,计算结果如表 1 所示。计算结果表明,本文所构建的模型的计算结果与文献的计算结果吻合性较好,热效率的最大误差为 3.34%,具有较好的一致性,验证了本模型的准确性。

表 1 模型验证参数

验证目标函数		蒸发温度/℃		
		70	75	80
热效率/%	文献[12]值	10.86	11.17	11.37
	验证值	10.52	11.15	11.75

4 结果与讨论

4.1 ORC系统热力性能优化

图 3 所示为不同热源温度下净输出功率随蒸发温度的变化。当热源温度一定时,净输出功率随蒸发温度增加先增大后减小。蒸发温度升高使得汽轮机进出口工质比焓差增大,所需工质质量流量减小。当蒸发温度达到一定值,净输出功率达到最大。当工质质量流量减小的速率高于汽轮机进出口比焓差增加的速度时,汽轮机做功能力下降,净输出功率也随之降低。当蒸发温度一定时,汽轮机进出口工质比焓差一定,但随着热源温度升高,蒸发器的换热量增大,工质质量流量增加,净输出功率随着热源温度的升高而增大。当 $t_{\text{gw},\text{in}}=180^\circ\text{C}$ 、 $t_e=117^\circ\text{C}$ 时,最大净输出功率为 4 200 kW。

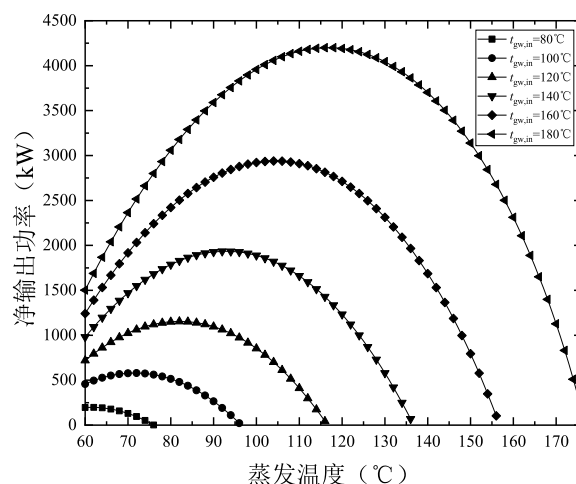


图 3 不同热源温度下最大净输出功率随蒸发温度的变化趋势

在不同热源温度下,系统热效率随蒸发温度的变化如图 4 所示。当热源温度一定时,随蒸发温度的升高,热效率先提高后降低。蒸发温度升高,热源温度和蒸发温度之间的温差减小,系统吸热量减小。当净输出功率增大时和当净输出功率减小速率小于吸热量的减小速率时,热效率提高。当净输出功率的减小速率大于吸热量的减小速率时,热效率降低。随着热源温度的升高,热效率先提高后降低。随着热源温度的升高,系统的吸热量增大,系统净输出功率也随之增加。当热量的增幅小于净输出功率的增幅时,热效率随着热源温度的升高而提高;反之,热效率降低。当 $t_{\text{gw},\text{in}}=180^\circ\text{C}$ 、 $t_e=169^\circ\text{C}$ 时,最大热效率为 12.05%。

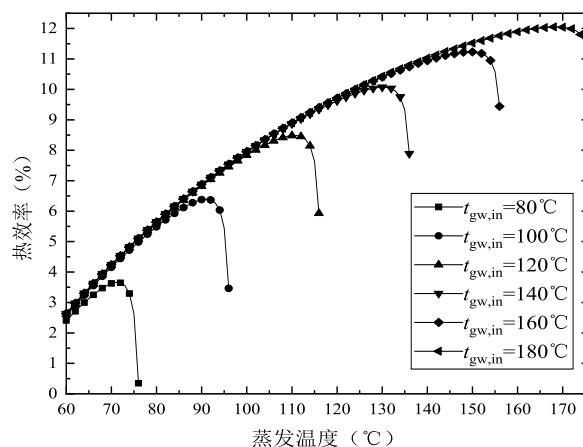


图 4 不同热源温度下最大热效率随蒸发温度的变化趋势

各热源温度下,烟效率随蒸发温度的变化如图5所示。当热源温度一定时,随蒸发温度的升高,烟效率先提高后降低。在环境温度和热源水质量流量一定的情况下,热源水出口温度提高,使热源水进出口比熵差减小,系统的总烟量减小。当净输出功率增大时和当净输出功率的减小速率小于系统总烟量的减小速率时,烟效率增大;当净输出功率的减小速率大于总烟量的减小速率时,烟效率减小。当蒸发温度小于127℃且保持一定时,随热源温度的升高,烟效率先提高后降低。环境温度和热源水质量流量一定时,随着热源温度升高,热源水进出口比熵差增大,系统总烟量增大,净输出功率增大,此时净输出功率的增幅先大于后小于总烟量的增幅,烟效率也先提高后降低。当蒸发温度大于127℃时,净输出功率的增幅大于总烟量的增幅,随着热源温度的升高烟效率而提高。当 $t_{\text{gw},\text{in}}=180^\circ\text{C}$ 、 $t_e=145^\circ\text{C}$ 时,系统的最大烟效率为37.74%。

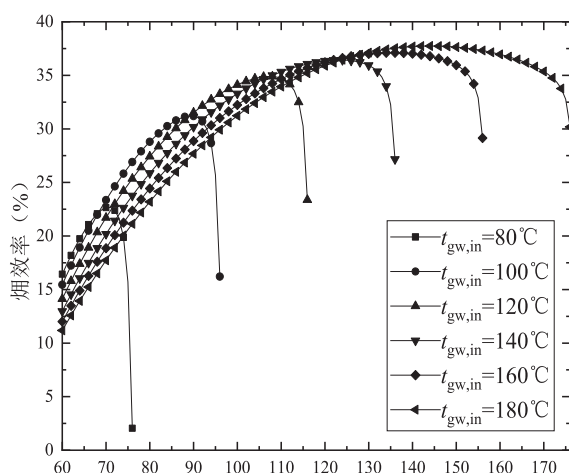


图5 不同热源温度下最大烟效率随蒸发温度的变化趋势

4.2 ORSFC系统热力性能

4.2.1 热源温度对系统发电性能的影响

热源温度对于系统性能的影响如图6所示。当蒸发温度、闪蒸温度和蒸发器出口干度保持不变时,随着热源温度升高,系统净输出功率增大。由于蒸发温度一定,汽轮机进出口工质的比焓差一定;随着热源温度升高,系统换热量增加,所需

工质质量流量增大,净输出功率近似线性增大。当热源温度升高,系统吸热量增多,但由于热量的增幅小于净输出功率的增幅,故热效率提高。环境温度和热源水质量流量一定,热源温度升高,热源水进出口比熵差增大,系统的总烟量增大,但净输出功率的增幅大于总烟量的增幅,烟效率也提高。当热源温度从120℃升高到180℃,净输出功率从467.5 kW增大到4 776 kW;热效率从7.899%增大到8.295%;烟效率从32.67%增大35.42%。

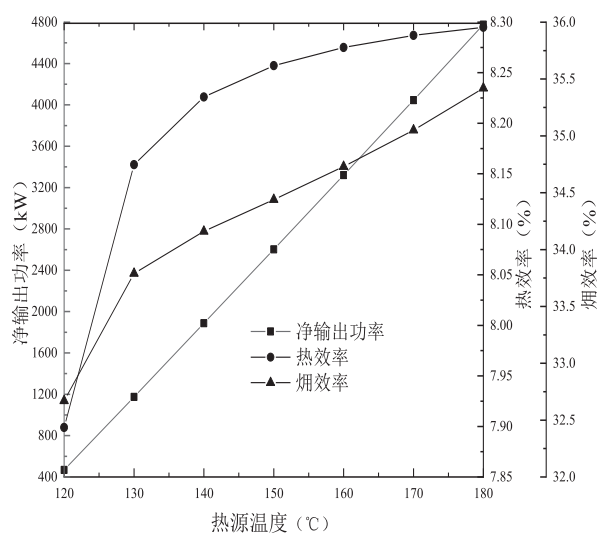


图6 在 $t_e=110^\circ\text{C}$ 、 $t_f=90^\circ\text{C}$ 、 $x=0.7$ 时净输出功率、热效率和烟效率随随热源温度的变化趋势图

4.2.2 蒸发温度对系统发电性能的影响

蒸发温度对于系统性能的影响如图7所示。与ORSFC系统中净输出功率、热效率和烟效率随蒸发温度的变化趋势相同,热源温度、闪蒸温度和干度一定时,净输出功率随蒸发温度的升高先增大后减小,热效率和烟效率也随蒸发温度的升高先提高后降低。当蒸发温度从131℃升高到176℃,蒸发温度为136℃时,净输出功率达到最大值4 466kW,之后减小为260kW。当蒸发温度从131℃升高到173℃,热效率从7.234%增加到10.26%,之后减小到9.718%,蒸发温度从131℃升高到147℃时,烟效率由32.27%提高到33.68%,之后减小到27.58%。

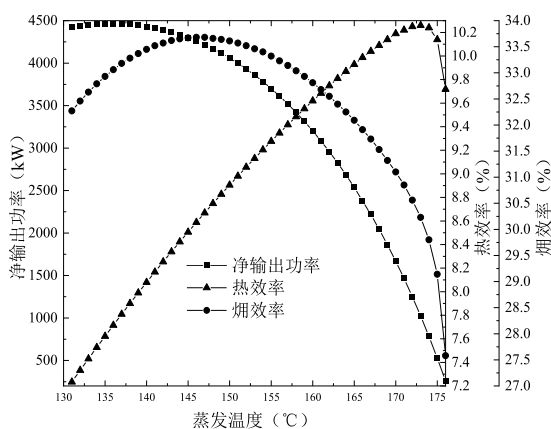


图7 在 $t_{\text{gw},\text{in}}=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\text{e}}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $x=0.5$ 时,净输出功率、热效率和烟效率随蒸发温度的变化趋势图

4.2.3 闪蒸温度对系统发电性能的影响

闪蒸温度对系统性能影响如图8所示。当热源温度、蒸发温度和蒸发器出口干度不变时,随闪蒸温度升高,净输出功率、热效率和烟效率均存在一个峰值。由于热源温度、蒸发温度和蒸发器出口干度一定,进入汽轮机 I 的工质质量流量不变,且该部分工质在汽轮机 I 进出口的比焓差也不变;随着闪蒸温度升高,闪蒸器出口气态工质在汽轮机 II 进出口比焓差增大,该部分工质质量流量减小,两者的乘积存在一个最大值,即净输出功率随闪蒸温度升高先增大后减小。当闪蒸温度升高,输入系统总热量减小,净输出功率增大时,热效率提高;之后,由于净输出功率减小速率大于热量减小速率,热效率减小。在环境温度和热源水质量流量不变的情况下,闪蒸温度升高,蒸发器进出口热源水比焓差增大,系统总烟量增大。当净输出功率的增大速率大于总烟量的增大速率时,烟效率提高;当净输出功率减小时,烟效率降低。当闪蒸温度从 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,净输出功率从 $3\ 096\text{ kW}$ 增大到 $3\ 300\text{ kW}$,之后减小为 $2\ 848\text{ kW}$;热效率从 9.402% 增大到 9.964% ,之后减小到 8.5% ;烟效率由 31.99% 增大到 33.94% ,然后减小为 29.04% 。净输出功率、热效率和烟效率均在闪蒸温度为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现峰值。

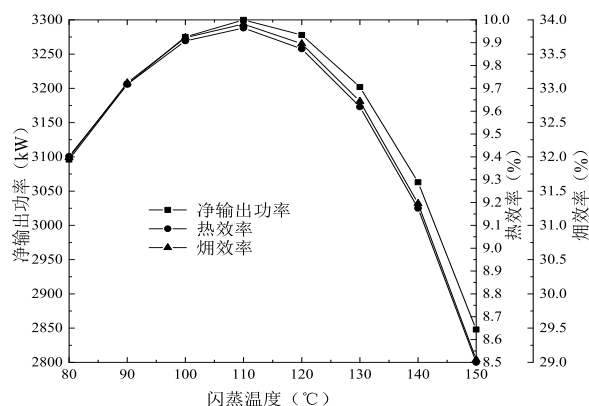


图8 在 $t_{\text{gw},\text{in}}=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\text{e}}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $x=0.5$ 时净输出功率、热效率和烟效率随闪蒸温度的变化趋势图

4.2.4 蒸发器出口干度对系统发电性能的影响

蒸发器出口干度对于系统性能的影响如图9所示。当热源温度、蒸发温度和闪蒸温度一定,两个汽轮机进出口工质比焓差均不变时,随着蒸发器出口干度的增大,进入汽轮机 I 的工质质量流量不变,闪蒸器出口进入汽轮机 II 的气态工质质量流量减小,汽轮机做功量减小,净输出功率减小。当蒸发器出口干度从 0.2 增大到 0.9 时,净输出功率由 $2\ 701\text{ kW}$ 减小为 $1\ 272\text{ kW}$,热效率随蒸发器出口干度的增大而增大。由于系统吸热量的减小速率大于净输出功率的减小速率,因此,热效率由 6.514% 提高为 12.25% 。烟效率随蒸发器出口干度的增大而提高,当环境温度和热源水质量流量一定,蒸发器进出口热源水比焓差减小时,系统的总烟量减小,且总烟量的减小速率大于净输出功率的减小速率,因此,烟效率由 23.71% 提高为 36.18% 。

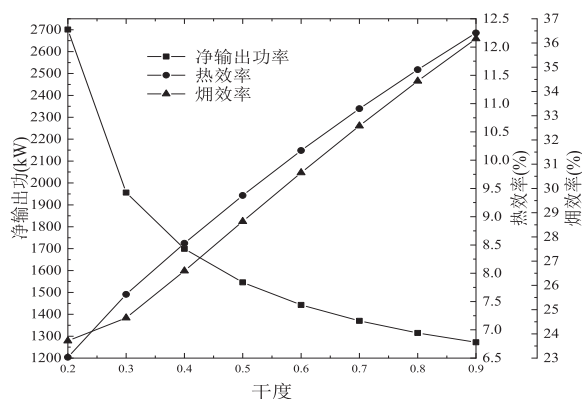


图9 在 $t_{\text{gw},\text{in}}=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\text{e}}=170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\text{f}}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时净输出功率、热效率和烟效率随蒸发器出口干度的变化趋势图

4.3 ORC与ORSFC发电性能对比

不同热源温度下,最佳工况对应的净输出功率随蒸发温度的变化趋势如图10所示。通过优化分析:当热源温度 $t_{\text{gw},\text{in}}$ 为180℃、蒸发温度 t_e 为130℃、闪蒸温度 t_f 为90℃、蒸发器出口干度 x 为0.5时,最大净输出功率为5 228 kW。

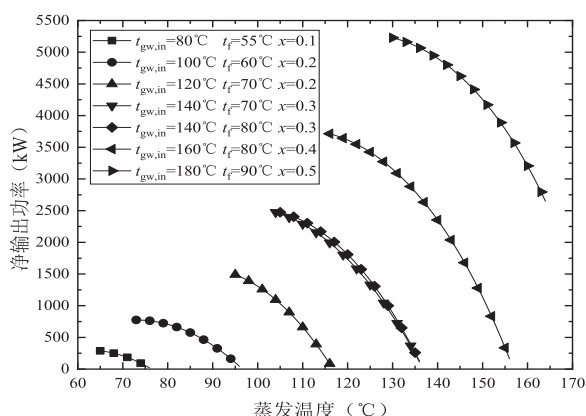


图10 不同热源温度下最大净输出功率随蒸发温度的变化趋势图

不同热源温度下,最佳工况对应的热效率随蒸发温度的变化趋势如图11所示。通过优化分析:当热源温度 $t_{\text{gw},\text{in}}$ 为180℃,蒸发温度 t_e 为171℃,闪蒸温度 t_f 为110℃,蒸发器出口干度 x 为0.9时,最大热效率为12.42%。

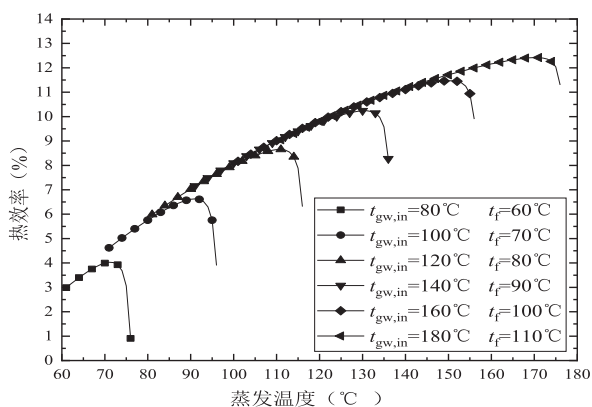


图11 不同热源温度下最大热效率随蒸发温度的变化趋势图

不同热源温度下,最佳工况对应的烟效率随蒸发温度的变化趋势如图12所示。通过优化分析可知:当热源温度 $t_{\text{gw},\text{in}}$ 为180℃,蒸发温度 t_e 为141℃,闪蒸温度 t_f 为100℃,蒸发器出口干度 x 为0.9时,最大烟效率为39.28%。

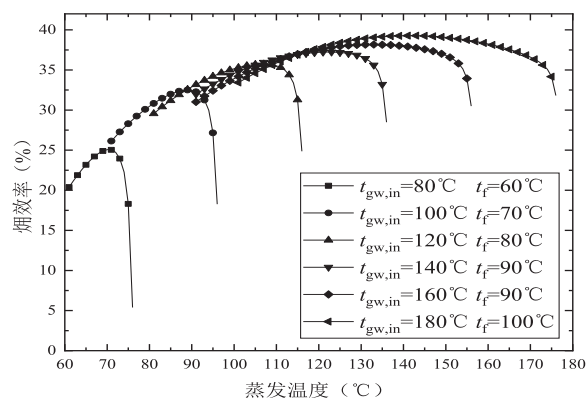


图12 不同热源温度下最大烟效率随蒸发温度的变化趋势图

通过对系统发电性能的优化分析,对比ORC和ORSFC的最大净输出功率、最大热效率和最大烟效率发现:相对于ORC系统,ORSFC的净输出功率相对增加24.48%,热效率提高0.37%,烟效率提高1.54%。因此,ORSFC系统的发电性能优于ORC,在实际工程中有更大的应用前景。

5 结论

本文在有机朗肯循环(ORC)的基础上,提出了有机朗肯-单级闪蒸循环(ORSFC),基于热力学第一和第二定律构建了ORSFC热力学优化模型,对发电性能进行了优化分析,主要得出以下结论。

①ORC和ORSFC的净输出功率与热源温度成正比,且ORSFC系统的净输出功率随热源温度的变化呈近似于线性变化;

②在特定热源条件下,ORC和ORSFC系统均存在一个最佳蒸发温度,使净输出功率、热效率和烟效率分别达到最大值;

③ORSFC中闪蒸温度和蒸发温度对系统发电性能的影响程度相当,且均存在最优值;蒸发器出口干度与净输出功率成反比,与热效率和烟效率成正比;

④总体来看,相对于ORC系统,ORSFC系统的净输出功率、热效率和烟效率均显著提高。ORS-FC系统的发电性能优于ORC系统,在实际工程中的推广应用前景广阔。

参考文献略

转自《可再生能源》Vol.40 No.6

中国深层/超深层油气勘探储层地质力学 研究进展、挑战及展望

尹帅^{1,2}, 张子阳¹, 王濡岳^{3,4}, 刘翰林⁵, 许自强⁶, 王敏捷⁶, 刘寅⁷, 刘敬寿⁴,
徐珂⁶, 鞠玮⁸, 冯少柯⁹, 何建华¹⁰, 王茂森¹

1. 西安石油大学地球科学与工程学院; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室; 3. 中国石化石油勘探开发研究院; 4. 中国地质大学(武汉)资源学院; 5. 中国石油勘探开发研究院; 6. 中国石油塔里木油田公司; 7. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院; 8. 中国矿业大学资源与地球科学学院; 9. 中国石化西南油气分公司; 10. 成都理工大学能源学院

摘要: 中国深层/超深层油气资源丰富, 是未来油气增储上产的重要领域, 开展储层地质力学研究可以为深层/超深层油气勘探开发提供重要技术支撑。为此, 通过系统总结深层/超深层储层地质力学勘探进展与研究成果, 探讨了该领域存在的挑战与未来发展方向。研究表明: ①“岩石力学层”是储层地质力学评价的核心, 其包含岩石力学参数、地应力、地层压力、裂缝系统及脆性5个关键要素, 共同控制了深层岩体变形、运动及破坏等复杂地质力学作用过程。②板块相互作用及地幔对流为构造体系的形成提供了驱动力, 构造体系为岩石力学层演变提供了特定构造条件和应力场背景。③深层/超深层油气运聚受控于地质力学作用过程, 表现为“构造应力—流体势能—断缝系统联合控制流体运移路径; 超压大幅度抵消上覆载荷及热应力, 水平应力差较小; 中性面原理适用于深层变形岩体裂缝预测, 裂缝对深层油气聚集起正向作用; 高热流值、深部流体注入、异常高压能增加流体势能, 促进油气成藏”。结论认为, 深层/超深层油气勘探中储层地质力学研究面临诸多挑战, 未来发展应重点聚焦于4方面: ①新技术、新方法、新理论不断发展; ②多尺度全维度地应力—裂缝信息融合的地质力学模型的创新构建; ③地质—工程一体化视角四维储层地质力学云平台的开发; ④新质生产力创新驱动下人工智能技术的赋能及广泛应用。

关键词: 深层/超深层; 油气勘探; 储层地质力学; 岩石力学层; 研究进展; 面临挑战; 技术展望

引言

地质力学学科由李四光先生创立, 强调岩石对应力作用的反应, 该反应取决于岩石的力学性质、应力作用的时间, 以及岩石具备的物理条件。地质力学在中国属于地质学与力学交叉学科, 倾向归属于地质学分支学科; 而国外针对“地质力学”的研究倾向归属于岩石(土)力学分支学科。这种差异出现的原因在于多(跨)学科合作解决实际科学问题过程中哪个学科主导性更强。

随着油气勘探向深层/超深层扩展, 一系列理论与技术难题迫切需要地质力学理论的科学指导。储层地质力学是地质力学的重要分支, 是指

导深层/超深层油气勘探的重要学科。Zoback 在 2007 年最早提出“储层地质力学”概念, 并明确为一门研究油气藏及其上覆地层应力状态、孔隙压力、岩石变形和破坏规律及对油气藏勘探开发影响的学科。中国油气地质条件复杂, 深层/超深层油气勘探面临油气运聚机理不明、高温/高压/高含硫背景油气勘探成本高、高质量数据解释与集成难度大等地质和工程挑战。解决这一问题极大地依赖于油气地质学、地质力学等理论及油气勘探技术的指导。

关于油气深层/超深层的分类, 中国东部将埋深 3500 ~ 4500 m 定义为深层, 超过 4500 m 定义为

超深层;中西部将埋深4500~6000 m定义为深层,超过6 000m定义为超深层;对于页岩油气,埋深3500~4500m定义为深层,超过4500 m定义为超深层。近年来,超深层油气勘探深度下限不断取得突破,“地下珠峰”成为新的勘探前沿。塔里木盆地已完钻8000 m以上特深井超100口,建成富满10亿吨级大油区以及克拉-克深、博孜-大北2个万亿立方米大气区。地质力学理论在揭示深层/超深层构造演化、成藏动力学等方面提供了关键依据及技术支持,助力深层/超深层油气勘探持续突破。为此,笔者通过系统梳理国内深层/超深层油气储层地质力学勘探进展与研究成果,探讨了该领域面临的挑战与未来发展方向,以期为深层油气高效勘探开发提供理论支撑。

1 中国深层/超深层油气基本地质特征

中国深层/超深层油气资源丰富,地理位置上

主要分布于中西部叠合盆地、东部断陷盆地及南海北部新生代沉积盆地,其高效勘探开发有望带动下一轮油气储量快速增长。

在盆地类型上,中国深层/超深层油气主要分布于被动大陆边缘、前陆盆地、克拉通内走滑断裂带及裂谷盆地(表1),前2类是深层油气储量最大的2种类型。国内深层/超深层油气储层物性差,平均孔隙度通常低于5%,平均渗透率通常低于0.5mD(表1);裂缝在深层碳酸盐岩、碎屑岩及基岩成藏中起到重要储集和渗流作用,构造活跃区深层碳酸盐岩及基岩裂缝孔隙度可达总孔隙度的10%~30%。深层/超深层油气储层温度通常为140~220℃,地层压力系数为1.0~2.1,当地层压力达上覆载荷压力60%时引起大量非构造缝形成,促进油气运移。深层/超深层油气构造样式与圈闭类型多样,油气运聚条件更为复杂(表1)。

表1 中国典型深层/超深层油气基本地质特征统计表

盆地/区块	油气田	产层	岩性	埋藏深度 / m	储层厚度 / m	含气(油) 面积 /km ²	原型盆地	孔隙度	渗透率 / mD	孔隙类型	裂缝发育程度	地层温度 /℃	地层压力系数	压力系统	构造样式	圈闭类型
塔里木盆地	富满	奥陶系	碳酸盐岩	6 500 ~ 8 500	> 1 000	17 000	被动大陆边缘	2.17%	0.10 ~ 1.00	岩溶孔隙及溶洞、热液蚀变孔隙、裂缝、残留孔	发育	150 ~ 190	0.80 ~ 1.21	常压—高压	雁列构造、复合花状构造、张扭及压扭构造、断溶体	断控缝洞型圈闭
	顺北	奥陶系	碳酸盐岩	7 300 ~ 9 300	800 ~ 1 000	28 000	克拉通内走滑断裂带	2.26%	4.66	裂缝、孔洞	极发育	170 ~ 210	1.02 ~ 1.86	常压—超高压	雁列构造、复合花状构造、张扭及压扭构造、断溶体	断控缝洞型圈闭
	博孜—大北	白垩系	砂岩	5 000 ~ 8 200	50 ~ 350	13 000	前陆盆地	6.50%	1.20	原生粒间孔、残余粒间孔、溶蚀孔	较发育	140 ~ 220	1.45 ~ 1.90	高压—超高压	冲起背斜构造、盖层滑脱堆垛构造、反冲背斜构造、宽缓褶皱构造	低阶、断背斜圈闭体系
四川盆地	普光元坝	三叠系二叠系	碳酸盐岩	6 000 ~ 6 950	100 ~ 450	1 300	被动大陆边缘	5.50%	0.50	晶间溶孔、晶间孔、粒间孔、裂缝	极发育	115 ~ 145	1.00 ~ 1.12	常压	断褶构造、低幅构造	礁滩圈闭、构造—岩性圈闭
	合兴场	三叠系	砂岩	4 500 ~ 5 500	300 ~ 400	约 100	前陆盆地	3.40%	0.07	粒间孔、裂缝、粒内溶孔、粒间溶孔	较发育	90 ~ 115	1.40 ~ 2.10	高压—超高压	断褶裂缝体	构造—岩性圈闭、岩性圈闭
	威荣	奥陶系志留系	页岩	3 550 ~ 3 880	30 ~ 120	144	被动大陆边缘	5.60%	0.06	有机孔、无机孔、有机质收缩缝、层理缝	少量	130 ~ 140	1.90 ~ 2.10	超高压	低缓向斜构造	无圈闭
柴达木盆地	昆特伊构造带东坪、尖北	泥盆系	变质岩火山岩	4 500 ~ 7 500	120 ~ 200	50	裂谷盆地	3.00%	0.06	裂缝、溶蚀孔	发育	170 ~ 200	1.20 ~ 2.10	高压—超高压	逆冲断层控制的断坡背斜构造、盖层滑脱堆垛构造、宽缓褶皱构造	低阶—断背斜—断块圈闭体系
渤海湾盆地	渤中19-6	太古宇	火山岩	5 000 ~ 6 000	40 ~ 600	118	弧后盆地	4.21%	0.32	粒间孔、溶蚀孔、裂缝	发育	180 ~ 204	1.15 ~ 1.30	常压—高压	逆冲推覆构造、印支期滑脱体系、叠瓦式构造、双重构造、断展褶皱	裂缝性低潜山圈闭
	济阳坳陷	古近系	页岩	3 200 ~ 5 500	150 ~ 450	26 200	陆相断陷盆地	10.00%	0.15	无机孔、裂缝	发育	80 ~ 115	1.00 ~ 2.00	常压—超高压	走滑—伸展构造	无圈闭

注：部分数据取自本文参考文献[10-12]。

2 深层/超深层油气勘探储层地质力学研究进展

油气勘探中,储层地质力学评价内容如图1所示。“岩石力学层”是储层地质力学评价的核心。Zoback等定义岩石力学层为:根据岩石的物理、力学性质及地应力状态进行分类的地层,地层分类指标涵盖断裂力学性质、岩石力学属性、地应力大小及方向、孔隙结构及流体特性。曾联波等将岩石力学层应用于非常规油气甜点评价中,对岩石力学层的定义与应用范围进行了丰富和完善。

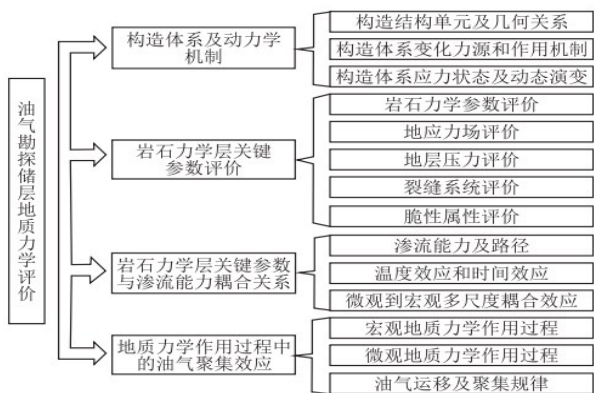


图1 油气勘探中储层地质力学主要评价内容框图

2.1 深层/超深层构造体系及动力学机制进展

深层/超深层与中/浅层油气在构造活动及变形机制方面存在显著差异。前者受控于多期构造活动,后者受控于晚期构造活动;高温高压影响下,深层构造变形涉及韧性剪切、构造成岩作用等;中/浅层构造变形机制主要为脆性断裂和块体运动。

表2总结了我国深层/超深层主要油气盆地类型的动力学机制。塔里木、四川等盆地发育被动陆缘及前陆盆地型深层/超深层油气藏,多与盐构造相关。盐岩封盖能力和热稳定性强,有利于油气富集与保存。被动陆缘盐构造包含盆地倾斜(重力滑脱)和差异负载(重力扩展)模式,盐构造成藏理论揭示“薄皮盐构造”有利于油气大规模聚集。盐岩流动性可增强水平及垂直方向地应力的均一化,减少应力差异引起的油气泄漏。

表2 不同类型油气藏构造发育特征及动力学机制对比表

盆地类型	基本特征	沉积物类型	结构单元	主要油气富集单元	动力来源	构造活动阶段	形成关键动力学机制
被动大陆边缘	大陆与大洋之间过渡带,远离板块边界的大陆地区,地震及火山活动少,地壳自陆向洋逐渐变薄	海相、陆相及海陆过渡相	大陆架、大陆坡及大陆隆	外油内气,大陆架以油为主,大陆坡以气为主,大陆隆为远景区	大陆裂离、大洋扩张	大陆裂解阶段—漂移阶段—沉积阶段—构造改造阶段	板块拉伸、地幔对流及大陆漂移、海底扩张、岩石圈冷却与沉降作用、盐构造作用、正断裂系统、走滑断层和转换断层、重力滑脱
前陆盆地	造山带前缘和相邻克拉通之间,呈不对称楔形结构	陆源碎屑岩,缺少碳酸盐沉积	前陆斜坡、前陆拗陷、内前陆、外前陆、前陆楔	前陆拗陷及前陆楔是油气富集区	造山带推覆作用	逆冲推覆阶段(欠补偿阶段)—活跃阶段(补偿阶段)—末期改造阶段(过补偿阶段)	板块汇聚、多向造山、地幔对流、造山带负荷及挠曲沉降、沉积充填、走滑运动、盐构造作用、流体和岩浆活动
克拉通内走滑断裂带	稳定克拉通,由地壳拉伸或挤压形成,断裂带通常不伴随俯冲作用	海相、陆相以及海陆过渡相	走滑断裂张扭—平移—压扭三段式分段结构、地垒—地堑结构	张扭结构区油气最为富集	走滑拉分、基底断块差异升降	萌芽阶段(微小断裂位移)—R/R'剪切阶段—P剪切阶段—Y剪切阶段(断层贯穿)	板块边界作用、地幔对流、岩石圈伸展、压缩及剪切、古构造活动及应力场、流体和岩浆活动、走滑断裂诱导构造转换带
裂谷盆地	大陆裂谷作用或海洋扩张形成,伴随强烈地震及火山活动	湖泊、河流和浅海相沉积岩	裂谷肩、裂谷坡、裂谷轴、裂谷轴周围形成小型沉积盆地、基底层(潜山)	裂谷轴、基底潜山及断垒区是油气富集区	地壳拉伸和裂开,中央块体沉降及古潜山形成	断层活动阶段—火山活动阶段—沉积活动阶段	大陆板块分离、地壳拉张、地幔对流、走滑断层和转换断层、岩浆活动、热流变化、沉积作用

前陆盆地造山带前缘和相邻克拉通之间呈不对称楔形结构,结构单元包括前陆斜坡、前陆拗

陷、内前陆、外前陆及前陆楔,油气主要分布在前陆坳陷及前陆楔单元(表2)。

克拉通内走滑断裂带是深层/超深层油气勘探热点。顺北油气田、塔中 I 号构造带、塔河地区、川东南及渝西地区均发育深层走滑断裂带,形成断褶构造、断溶体、断缝体油气藏。走滑断裂带的形成服从纯剪(莫尔—库仑准则)及单剪机制,经历生长及连接模式2个阶段(图2)。前人提出缝洞型岩溶储层油气差异聚集理论,认为与 R、P 剪切相关的马尾状、阶梯状、高部位辫状构造的张扭段叠置区域内流体运移程度高、油气最为富集,而压扭段及单一断裂带的断层核(FC)及破碎带(DZ)较

窄,油气潜力相对较弱(图3)。

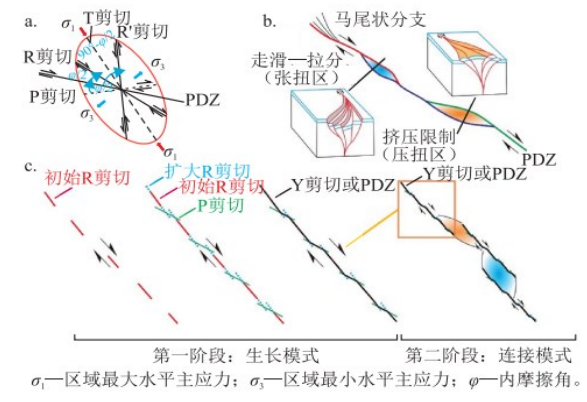


图2 深层走滑断裂扩展模式图

(资料来源参考文献)

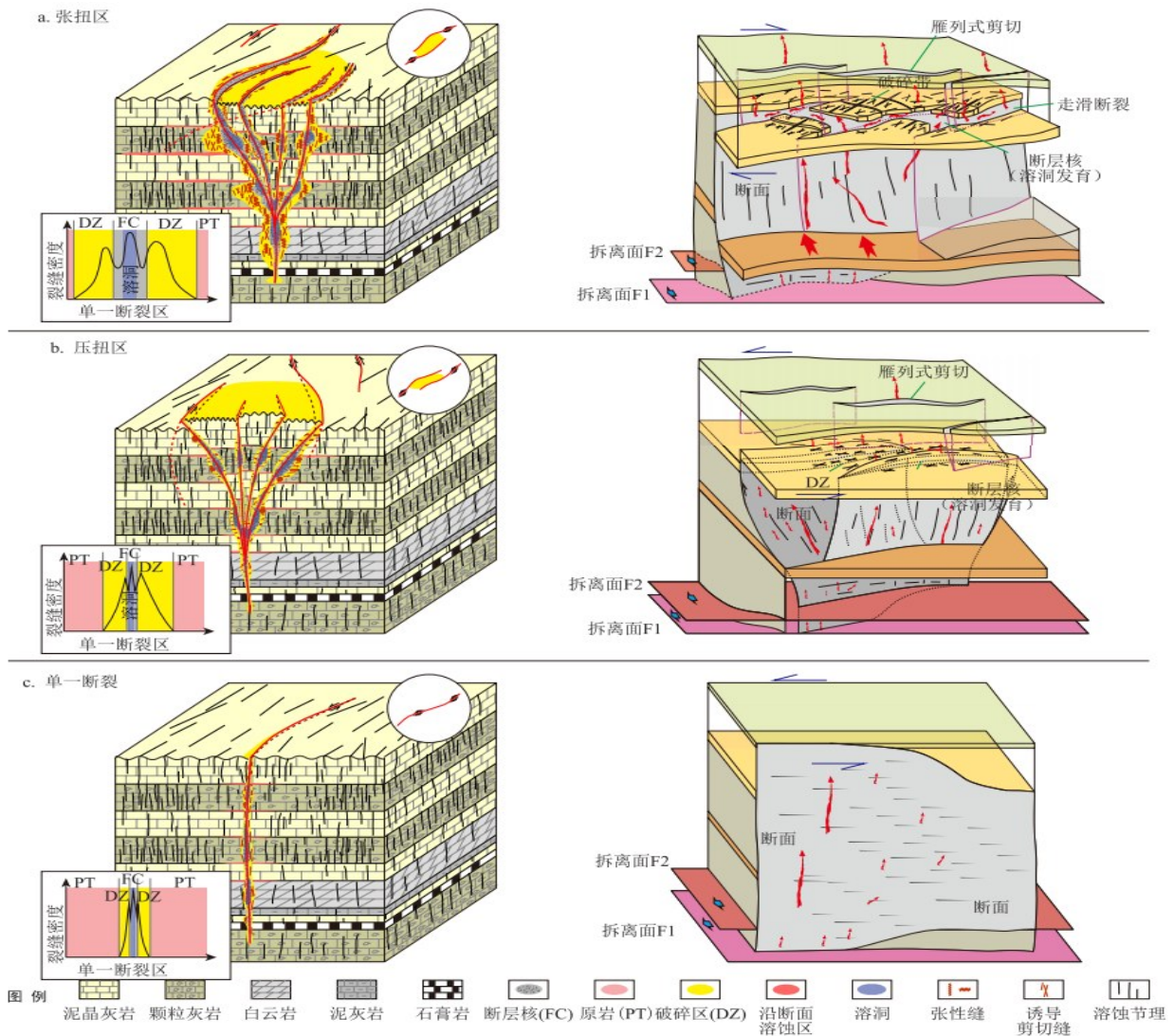


图3 深层走滑断裂带油气富集特征及流体运移模型图

(资料来源参考文献)

裂谷盆地多形成深层基岩气田/藏,如印度 Mumbai High 气田、利比亚 Augila-Nafoora 气田、泰国 Sirikit 气田、也门 Tawila 气田、中国柴达木盆地北部基岩气藏等。裂谷盆地结构单元包括裂谷肩、裂谷坡、裂谷轴及周围形成的小型沉积盆地、基岩层(含潜山),油气主要分布在裂谷轴、基岩层及断垒区(表2)。

2.2 岩石力学层关键参数研究技术进展

岩石力学层有别于传统按照岩性、古生物或年代进行地层划分,其按照岩石物理性质进行地层分类,强调岩石物理性质对深层油气运聚的影响。岩石力学层关键参数包括岩石力学参数、地应力、地层压力、天然裂缝及脆性。将脆性从岩石

力学参数中区分开来是由于它在工程甜点评价中具有关键作用及特殊性,直接影响压裂效果和产能。

岩石力学层关键参数研究技术手段/方法包括:露头观测、实验、测井、地震、地质力学、动态评价及大数据分析(表3)。钻、测、录等勘探环节可准确获取岩石力学层关键参数,而开发过程中压裂、试井、生产等动态资料可用于对储层地质力学模型中各项参数校验。露头及实验、测井、地震分别获取一维、二维及三维数据;地质力学可以观测受力单元响应过程;动态评价方法将大量压裂、试井、生产等资料应用于参数修正中,提升预测精度;大数据分析则具有强数据整合能力。

表3 油气藏岩石力学层关键参数研究方法统计表

研究方法	关键参数	具体研究方法/手段
露头观察及统计	构造行迹	常规:露头剖面、地层产状、岩性、厚度、断裂及构造特征描述 新技术:遥感扫描、激光虚拟露头观测
	裂缝系统	常规:裂缝产状、走向、发育程度、组系、交切关系及充填程度等的描述 新技术:无人机倾斜摄影、多尺度裂缝网络模型构建
实验	构造变形	常规:沙箱、离心模拟、水槽、光弹性等实验 新技术:粒子成像测速、三维地表扫描等技术
	岩石力学参数	常规:单三轴压缩、巴西劈裂、直剪(抗剪强度)、断裂韧度等 新技术:热力学测试、纳米压痕等
	显微结构	常规:镜下观察(矿物结构、变形及微裂缝等) 新技术:原子力显微镜(原子间接触力及能量、显微结构应变量及变形尺寸)观察
	地层压力	常规:钻杆测试、等效钻井密度法等 新技术:光纤传感技术、有限差分模拟等
	地应力场	常规:水力压裂、差应变、声发射等测试 新技术:定向取心 ASR 非弹性应变恢复法
测井	岩石力学参数	常规:阵列声波、元素俘获测井方法、多元线性回归等 新技术:数字岩心与数字井筒技术
	地应力场	常规:各向异性(黄氏、葛式及斯伦贝谢等)模型、成像井壁破裂解释等 新技术:机器学习(支持向量机、神经网络等)法
	地层压力	常规:有效应力法、Bowers 公式法、等效深度法、Eaton 公式法、核磁测井等 新技术:测录井组合参数模型、机器学习预测法
	脆性指标	常规:强度参数模型(能量、模量、应变及硬度模型等) 新技术:强度—矿物组合模型、层次分析法智能预测
	裂缝系统	常规:声学、力学原理方法、测井曲线变化率、多测井曲线叠合模型等 新技术:人工智能技术

地震	深层构造体系	常规：多波多分量地震解释、地震层析成像、地震相干体解释等 新技术：逆时偏移、Q 叠前偏移、多方位网络层析等
	岩石力学参数场	常规：波速/波阻抗反演、岩石力学参数反演及优化、地质统计空间插值建模等 新技术：蒙特卡洛模拟、遗传算法等
	地应力场	常规：岩石力学参数场反演地应力方法、正交各向异性介质理论方法等 新技术：物理约束分布式神经网络方法、相关地震属性机器学习等
	地层压力	常规：波阻抗反演方法、地震速度谱法等 新技术：数据+物理双驱动机器学习模型、模量参数地震法等
	不同尺度裂缝	常规：地震振幅变异分析（AVO）、多分量地震、叠前各向异性裂缝检测等 新技术：叠前地震蚂蚁体追踪+多参数（构造曲率等）约束多尺度裂缝检测
	脆性指标	常规：地震属性弹性参数反演法、岩石物理模型地震反演等 新技术：人工智能（贝叶斯、神经网络算法等）地震方法
地质力学	构造变形	常规：平衡剖面模拟技术 新技术：人工切片三维数据体重建等
	岩石力学参数场	常规：有限元法（FEA）、有限差分法（FDM）、离散元法（DEM） 新技术：机器学习技术（随机森林、神经网络等算法）等
	地应力场	常规：有限元、离散元模拟、地应力平衡法、物质点方法、三维有限差分模拟等 新技术：三维角点网格有限元、Petrel + Visage 地应力场预测、编程算法等
	地层压力	常规：压实趋势法、地质力学参数法等 新技术：卷积神经网络法、LSTM-BP 神经网络、人工智能算法等
	裂缝三维分布	常规：应力场有限元+破裂准则（张性莫尔—库仑及 Griffith 剪切破裂准则） 新技术：蚂蚁追踪+离散裂缝网络模型（DFN）方法、扩展有限元法等
基于开发资料动态评价	地应力场	压裂法、井壁破裂方位角+岩石强度分析等
	裂缝系统	井史地层漏失情况、压裂曲线分析、示踪剂、产能变化、压力干扰分析、吸水剖面等
大数据平台		ObsPy、EarthScope、地质云、World Stress Map Database Release 2016 等

岩石力学层关键参数之间具有密切联系。图 4 所示为埋深 8500m 超深层致密砂岩在不同温压条件下岩石力学参数变化。可见,随埋深(围压)增加,岩体各模量、拉梅常数逐渐增加,泊松比也

有一定程度增加(图 4-a)。深层/超深层储层岩石的应力释放依赖于其应变过程,岩石脆性主要受温度及有效应力影响,温度升高引起岩石塑性增强、脆性降低(图 4-b)。

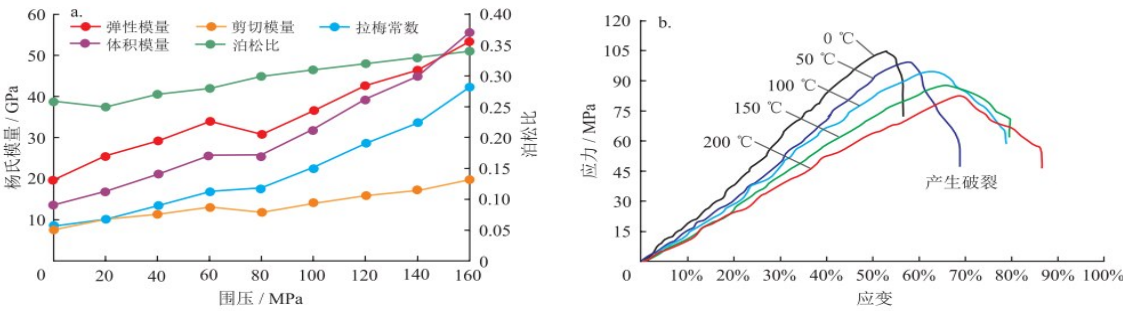


图 4 不同温压条件下超深层致密砂岩的岩石力学性质特征图
(资料来源参考文献)

2.3 岩石力学层关键参数与渗流能力耦合关系研究进展
深层/超深层与中/浅层油气岩石力学层在关

键参数与渗流能力的关系方面存在差异。前者渗流能力更加依赖于天然裂缝及溶蚀孔洞,而后者主要依赖于基质孔隙发育程度及层理结构(表 4)。

表4 岩石力学层关键参数对油气储层渗流能力影响分析表

关键参数	对渗流能力影响	
	中 / 浅层	深层 / 超深层
岩石力学性质	高强度、高模量、低泥质含量岩体内部张性结构更容易被保留,维持孔缝结构,渗流能力较强	塑性增强,维持高导流能力条件较为苛刻
地应力	脆性低渗岩体具有强应力导向性,主渗方向沿主应力方向	应力导向性减弱;高温产生显著热应力,引起孔隙结构变形;强应力敏感性较影响渗流能力明显
裂缝	渗流能力维持主要依赖于原生基质孔隙及层理结构,裂缝为非主导因素	依赖于天然裂缝及溶蚀孔洞,裂缝是维持渗流能力主导因素;水平缝导流能力强于垂直缝
地层压力	超压、常压、负压均较为普遍,非控制渗流能力主导因素	超压普遍,对维持孔缝张开及高渗流能力非常重要
脆性	硬脆性岩体易于发生高角度张性破裂,韧塑性岩体易于发生低角度或水平剪切破裂,均能引起导流能力提升;脆性指数大于60%的岩体具有良好导流能力	岩体塑性增强,脆性指数低于中 / 浅层;脆性指数大于50%的岩体具有良好导流能力

岩石力学性质决定岩石受力后的变形和破坏,深层岩体经历强压实,孔渗低,超压、溶蚀孔洞对维持储层渗透率起重要作用。

低渗岩体具有应力导向性,高脆性、低渗岩体应力导向性更强,流体倾向于沿最大主应力方向流动。深层/超深层构造活动强度减弱,应力导向性减弱。此外,高温会对地应力产生影响,深层/超深层储层热应力可达重力载30%。目前,埋深超8 000 m油气地应力研究较少,岩体地应力场特征、应力导向性及对渗流能力影响及保持机制还需更多地质、地球物理及实验数据来验证。

深层/超深层储层裂缝发育,无论垂直缝或水平缝,其扩展方向均主要受古最大主应力影响。水平

缝导流能力强于垂直缝,高脆性、高刚度、低泥质含量岩体在深埋藏过程中,张性结构更容易被保留,裂缝维持张开呈高渗。柴达木盆地北部阿尔金山前东段K区块超深层基岩气藏,气藏埋深大于6500 m。主裂缝走向NE30°,近垂直主断裂方向分布,水平最大主应力走向近NW20°,相近的应力、裂缝走向代表主裂缝方向为主渗方向(图5)。中/浅层岩石变形表现为脆性,而深层岩体破坏伴随有强脆—延性变形。硬脆性岩体发育高角度张性缝,而韧塑性岩体主要发育低角度或水平剪切缝。垂直缝抵抗上覆载荷能力较强,当沟通源岩,能长期维持垂向渗流能力;而深层低角度或水平缝的有效性(或启闭性)与地层压力密切相关。

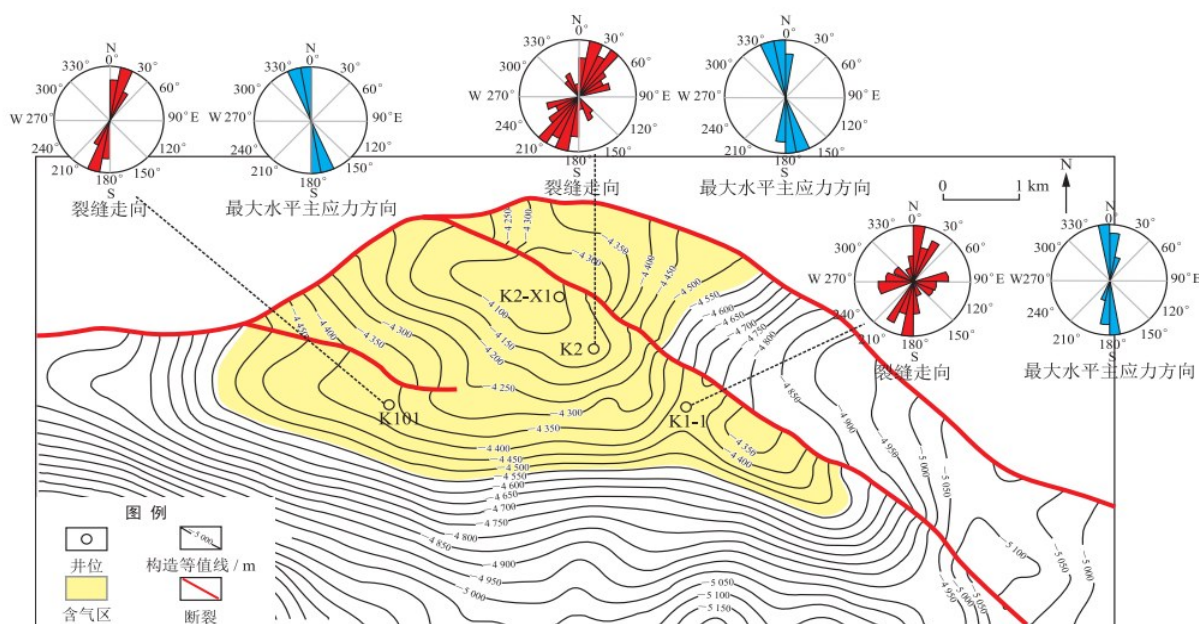


图5 柴达木盆地北部K区块泥盆系超深基岩气藏天然裂缝及最大水平主应力走向平面图

2.4 地质力学作用过程中的油气聚集效应研究进展

地质力学作用下深层/超深层与中/浅层油气聚集效应存在差异,首先体现在油气运移机制上。中/浅层油气运移主要依赖于沉积环境、构造及圈闭类型,表现为跨层位垂向运移和短、中、长距离侧向运移;而深层/超深层油气储层物性差,导流通道有效性对油气运移成藏起关键作用(表5)。深

层高温高压条件下,储层岩石和流体表现出显著的流变时间依赖性或流变时间效应。岩石的蠕变和松弛现象更为显著,流体相态也发生明显变化。例如,深层富 CO_2 流体温压条件远超临界值, CO_2 流体的密度接近液体,但黏度和扩散系数更接近气体,其对有机物质溶解能力显著增强,并能促进烃类的排替与运移,影响油气运移动力及成藏。

表5 地质力学作用过程控藏要素及油气聚集效应典型特征分析表

控藏要素	油气聚集效应典型特征	
	中/浅层	深层/超深层
油气运移路径	油气运移主要依赖沉积环境、构造及圈闭类型,表现为跨层位垂向运移和短、中、长距离侧向运移	导流通道有效性对油气运移起关键作用。储层物性差,油气运移依赖深层多期构造演化、应力机制及断缝空间展布。深层流体活动、地幔物质加入可能对油气运移路径产生影响
地应力场	构造活动较强,水平最大及最小主应力差值较大,应力平面非均质性较强,油气分布不均	垂向应力多被超压大幅消减,存在显著热应力。构造活动较弱,水平应力差较小,易于大面积成藏,油气资源丰度高
裂缝系统	渗流通道作用为主,形成机制符合中性面原理。拉伸带物性好,张性缝发育,油气富集,产能较高。裂缝过度发育会破坏盖层,对油气聚集不利	重要渗流通道及储集空间,中性面原理同样适用。拉伸裂缝带形成的油气藏规模更大。保存条件通常较好,裂缝发育程度对油气聚集主要起正向作用
流体势能	由压力差或密度差引起,流体势能主要与储层孔隙度和渗透率有关,油气从高势区向低势区运移	流体势能与超压、流体相态和裂缝发育程度密切相关。高热流值、深部流体注入、超压能增加流体势能,促进成藏

地应力驱动深层/超深层岩石变形和流体运移。褶皱增加储层岩石的比表面积和孔缝连通性,增加油气分子吸附点位。由大、中、小、微尺度裂缝构成的裂缝系统对油气运距具有重要影响。裂缝几何形状影响流体流动方向;开度及连通性影响流动阻力及流动效率;粗糙度影响流体中溶解气体或油滴吸附点位多少。流体流动还会影响裂缝稳定性和扩展,引起缝内压力动态变化,导致缝面矿物溶解、重结晶及沉淀,引起渗流能力变化^[29]。

深层/超深层断背斜油气藏发育,顶部主要发育走向单一张性缝,而翼部及低部位则发育多走向剪切缝。中/浅层及深层/超深层变形岩体中裂缝形成机制均符合中性面原理(图6-a)。如库车坳陷大北超深层气藏巴什基奇克组2段从1小层到3小层分别为拉张层(减薄层)、中性面层及挤压层(增厚层)(图6-b)。1小层减薄带物性好且产能较高;2小层物性变化小;3小层增厚层裂缝发育、物性较好且产能较高。此外,受后期共轭

剪切影响,早期裂缝系统易被晚期裂缝叠加改造(图6-c)。

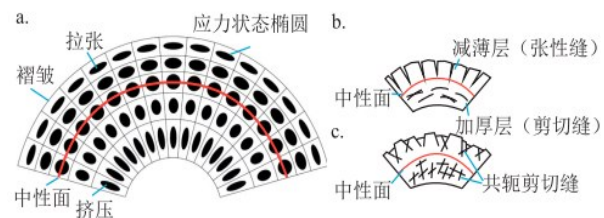


图6 变形岩体中性面及顶部底部地层裂缝发育特征图

流体势能由地下流体受压力差或密度差驱动形成。中/浅层油气藏流体势能主要与储层孔、渗有关;深层/超深层油气藏流体势能与异常高压、复杂流体相态和裂缝发育程度密切相关。深层高热流条件会引起流体黏度降低、流动性增强、相态改变,同时引起岩石强度降低和塑性变形。高热流值、深部流体注入、异常高压能增加流体势能,促

进油气成藏(表5)。

流体势能由地下流体受压力差或密度差驱动形成。中/浅层油气藏流体势能主要与储层孔、渗有关;深层/超深层油气藏流体势能与异常高压、复杂流体相态和裂缝发育程度密切相关。深层高热流条件会引起流体黏度降低、流动性增强、相态改变,同时引起岩石强度降低和塑性变形。高热流值、深部流体注入、异常高压能增加流体势能,促进油气成藏(表5)。

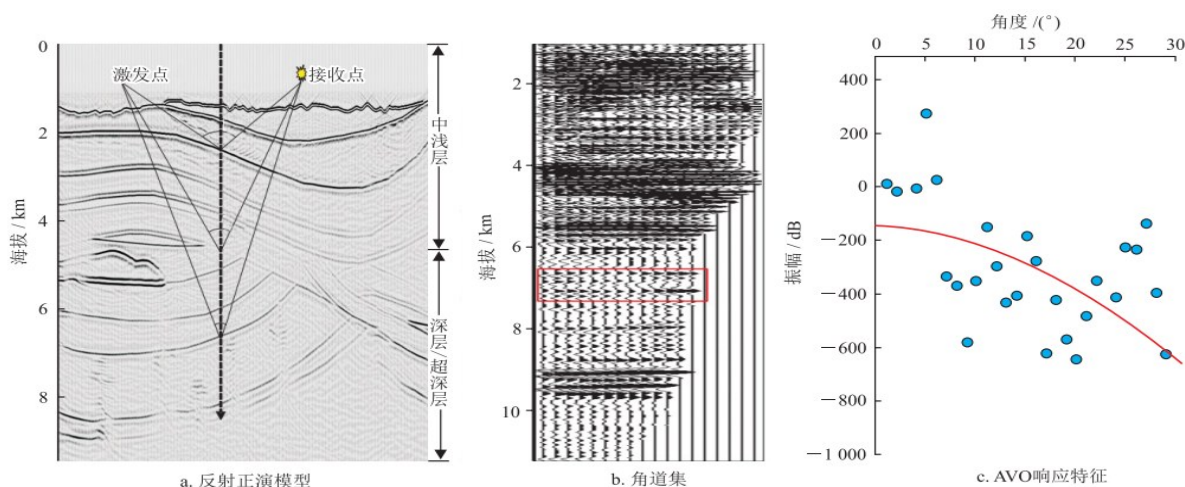


图7 不同深度反射正演模型、角道集及AVO响应特征图
(资料来源参考文献)

储层分类中,利用传统岩矿学、储层物性、沉积微相及成岩作用判据的方法可能会失效。深层超致密储层基质渗透率极低,裂缝是储层分类重要依据。薄互层也是一类重要储层,其层间岩性与地质力学层界面发育,非均质性强,同时能影响应力分布和水力裂缝穿层能力。因而,应开展精细化的岩石力学层划分,将薄互层、关键力学参数组合引入储层分类方案中。

3.2 高温高压环境下岩石物理力学性质及流体流动机制有待探索

深层/超深层井下完整岩心获取难度大,利用岩屑录井获得的深层易碎岩石的岩屑偏细,且受钻井液二次伤害,孔隙结构已被破坏,即使利用微观测试技术也很难还原其真实岩石物理力学性质。高温高压下,岩石物理力学参数会发生变化,密闭取心及模拟真温压条件精确测量岩石物理力

3 深层/超深层油气勘探储层地质力学发展面临的主要挑战

3.1 深层地质构造复杂导致储层识别和预测难度大

深层/超深层油气储层埋深大、盖层厚、油气隐蔽性强且勘探成本高,深层地质力学属性在地震解释中也存在多解性。相同观测系统情况下,地震反射角变窄(图7-a),深层含油气储层波速及波阻抗与围岩接近,地震反射振幅变弱(图7-b,红色框),AVO响应不明显(图7-c),隐蔽型“暗点”油气藏不易被发现^[31]。

学性质困难。此外,深部流体流动涉及多相流、相态转变和多尺度孔隙拓扑结构。因而,室内岩石物理力学性质及流体流动机制研究具有挑战性,耐高温高压高精度实验设备和新技术的研发有待加强。

3.3 深层三维地应力场及裂缝系统建模精度有待提高

地应力及裂缝系统影响深层/超深层储层非均质性。目前对高温、高压、地应力、裂缝主导的深层/超深层油气渗流能力演变、多期复合成藏和晚期调整机理的认识还极为有限。地应力及裂缝模拟商业软件及方法见表6。根据古今构造刻画及应力背景约束,能够实现各成藏阶段三维地应力场及裂缝系统构建。但是,地质时间轴上,深层储层三维地应力场重构及裂缝系统精细建模受不同软件及方法影响,预测精度难以保证。

表6 三维地应力及裂缝场构建常用软件及主要特征表

类别	软件	方法	主要特征
地应力	ANSYS	有限元法（FEM）	依赖网格类型及划分精度、边界条件和载荷设定
	Petrel	岩石力学参数场地应力反演；相关地震属性机器学习	依赖算法和插值准确度；依赖模型训练质量、训练数据代表性和多样性和模型泛化能力
	Petrel+Visage	Petrel + Visage 地应力场预测	依赖软件模块功能和计算能力,可执行有限元法（FEM）、边界元法（BEM）和离散元法（DEM）
	SKUA	FEM	通过三维网格整合、可视化管理复杂地震数据,结合 FEM 计算地应力场
	FracMan	FEM	角点网格模型转换为有限元网格模型,利用有限元法预测地应力场
	ABAQUS、FLAC	地应力平衡法	通过定义一个初始地应力场及使用 Geostatic 分析来实现地应力平衡,计算自重作用下的应力场和变形场
	FracPredictor	物质点方法（MPM）	整合地质、测井、地震数据,根据区域应力与天然裂缝之间的相互作用模拟初始非均质储层的地应力场,包括水平应力差及局部应力旋转等
	EPoffice	三维有限差分数值模拟	地质模型、力学模型及数学模型统一的三维有限差分数值模拟方法
	Elsiwave	叠前地震数据弹性参数反演；FEM	利用地震反演泊松比间接计算地应力；采用 FEM 对模型网格化,基于最小应变原则,得到最小应变下模型拉平的最优地应力解
	GeoEast	叠前地震属性分析；编程算法	利用叠前地震属性如振幅、频率等预测地应力场；使用 iEco 编程开发地应力预测算法,并震联合开展地应力动态预测
裂缝	ANSYS	FEM	结合破裂准则（莫尔—库仑剪切破裂及 Griffith 张性破裂准则等）裂缝表征技术
	Petrel	蚂蚁追踪；DFN（离散裂缝网络）方法	能够整合多种类型、多个维度、不同尺度裂缝信息,使裂缝的刻画最大程度接近实际地质情况,提高了裂缝检测自动化程度；数据的噪声和不连续性影响预测精度
	SKUA	地震裂缝属性参数构建	根据地震数据中的裂缝属性,如振幅变化、频率变化等构建裂缝模型
	FracMan	DFN	将地震、测井、地质数据整合,采用离散裂缝网络（DFN）模块构建裂缝模型
	ABAQUS、FLAC	扩展有限元法（XFEM）	允许在没有预制裂纹路径情况下,无须重新划分网格实现裂纹沿任意路径扩展
	FracPredictor	MPM	模拟压裂过程中的水力裂缝与天然裂缝之间相互作用
	GeoSoftware	叠前、叠后地震属性分析、多尺度裂缝建模	叠前、叠后地震属性预测大尺度裂缝；DFN 方法预测中、小尺度裂缝,利用分布函数随机过程实现多尺度裂缝预测
	EPoffice	FRS+ 模块裂缝分析	叠前各向异性裂缝检测

地应力场或天然裂缝建模失准会在开发过程中得到反馈。建模所预测裂缝为静态裂缝，生产资料所预测裂缝为动态裂缝或井间裂缝，

后者能弥补静态裂缝精度的不足(表7),两者有机结合能更精细化表征井网附近疏导体系的客观展布。

表7 建模中静态与动态天然裂缝性质差异的对比表

裂缝类型	预测方法	裂缝尺度	响应范围	认识程度	开启性变化
静态裂缝	利用静态资料（岩心、成像 / 阵列测井、常规测井及地震预测、模拟等）获得的裂缝分布	大、中、小尺度	无法反映井间裂缝及连通性	依赖地质认识及计算模型,受地质认识限制而呈现某种规律性	相对稳定
动态裂缝	利用动态资料（产能变化、压力干扰、水力压裂等）获得的裂缝分布	主要为中、小尺度	可以反映井间裂缝及连通性	依赖监测技术,由于井间分辨率高,反映出的裂缝信息具有确定性	易受生产引起开启性变化,对地层压力变化敏感

3.4 数智化储层地质力学大模型发展面临诸多挑战

信息技术是各油气公司深层/超深层油气勘探成本竞争的支点。GeoEast、勘探开发实时决策系统、量子计算地质模拟技术、PetroAI大模型等推动了常规—非常规油气勘探数智化转型。未来,深层/超深层地质力学大模型发展仍面临严峻考验:①大量高质量数据获取难度大、成本高;②大模型研发需要跨学科合作及构建完善的研发、创新及应用生态;③人工智能机器学习需巨大算力,未来要不断发展算力提升技术、芯片技术并优化算法;④能源行业易受网络攻击,仅次于信息和通信行业,当前地质力学大模型在油气勘探中的应用尚无统一规范及标准。

4 深层/超深层油气勘探储层地质力学未来发展趋势

4.1 新技术、新方法、新理论不断发展

近年来,深层/超深层油气勘探形成一系列储层地质力学新技术及新方法:①机器学习与地震人工智能等技术实现三维自动扫描及高精度成像,提高地质力学参数采集效率及可靠性;②立体成像技术和缝洞体精细雕刻技术实现更准确地定位和评估深层断缝拓扑结构;③高能加速器CT可旋转式岩石力学刚性伺服试验机的研发能直观展示岩石内部复杂力学作用过程,但设备还无法达到超深层高温高压环境要求;④三维角点网格有限元法等新网格处理技术使三维地质力学建模及地应力预测精度大幅提升。

超深层油气勘探下限不断刷新纪录,深地塔科1井完钻深度达到10910 m,在寒武系10851 m到10910 m井段钻揭优质烃源岩,实现全球首次地下万米油气资源探测。未来尚需研发更高精度的高温高压实验及探测装置,深入研究深层岩石物理力学性质;开展高温高压多相流动、相态转变流体流动仿真实验,明确矿物及孔缝在多场耦合下的演化规律。

地质力学数据获取将表现为数据获取自动化、解释方式多样化、研判结果精确化、深层结构可视化、信息监测实时化。近年来提出的超深层断控缝洞型油气成藏理论、深层油气地质信息探

测技术等有力地支撑了深层/超深层油气勘探开发,未来通过将地质力学与地球物理、地球化学等多学科交叉,不断发展交叉学科新理论、新技术及新方法,更好地服务深层/超深层油气勘探开发。

4.2 多尺度全维度地应力—裂缝信息融合的储层地质力学模型的创新构建

随着算力的提升,深层油气勘探将更注重多尺度(微观到宏观)、多物理场(力学、流体力学、热力学等)耦合。未来,深层油气勘探将融合不同尺度、不同维度地应力—裂缝信息来构建储层地质力学模型,实现油气田透明化。不同尺度指从微观尺度到宏观尺度地应力及裂缝的集散程度及走向。不同维度有2层含义:①“时间维度”,即从古至今地应力及裂缝演化;②“空间维度”,即从点一线一面一体地应力与裂缝分布规律。最终,获取高精度地应力及低级序断缝信息,指导深层/超深层油气勘探。

4.3 地质—工程一体化视角四维储层地质力学云平台的开发

信息化建设支撑油气勘探高效运行,每次技术革新都会带来油气储量的快速增长。云技术平台可以集成不同来源的勘探开发数据,实现钻、测、录、压、采等环节数据的集中管理和高效利用。云平台关键技术表现为^[42]:按需自助服务、广泛网络接入、资源池、快速可扩展及可测量服务。通过云技术构建深层/超深层储层地质力学云平台,实现软硬件资源有效整合,充分利用云端高性能计算服务器。

基于云平台技术可建立高精度巨型模型,对岩石力学层关键参数进行全面刻画,根据区域地质、钻井、生产等资料进行模型实时更新,形成四维储层地质力学模型^[43];利用多种数学算法(克里金、序贯高斯、神经网络等)对储层地质力学模型进行不确定性分析,实现大数据实时分析及综合运用^[44],高效支撑深层/超深层油气勘探发现及井位部署。

4.4 新质生产力创新驱动下人工智能技术的赋能及广泛应用

目前,以人工智能为核心的第四次工业革命发展迅速。未来,在新质生产力创新驱动、高效

能、高质量发展要求下,将逐步实现深层地质力学人工智能技术的赋能及广泛应用。基于机器学习算法的人工智能技术,在解决深层油气地质力学参数高不确定性、高维度、复杂非线性问题中将展现巨大潜力^[45]。AI技术及优化算法将大幅提升测井、地震数据计算效率,提高地下构造成像准确性,协助地质人员推动油气精细化勘探。

同时,利用数字孪生技术(图8)构建深层数字地质力学模型也是研究热点。数字孪生技术

通过先数字化再物理化完成从虚拟到现实应用的无缝过渡,达到利用数字技术驱动工作效率和创新目标。数字化将深层地质力学模型转换成数字格式,物理化将数字地质力学模型应用到现实中,实现数字模型的物理表征。该过程通过补充深层油气探测设备最新观测数据,能够不断修正原数字模型^[47],在虚拟环境中进行深层油气勘探技术创新和优化,实现对深层油气系统的预测和监测。

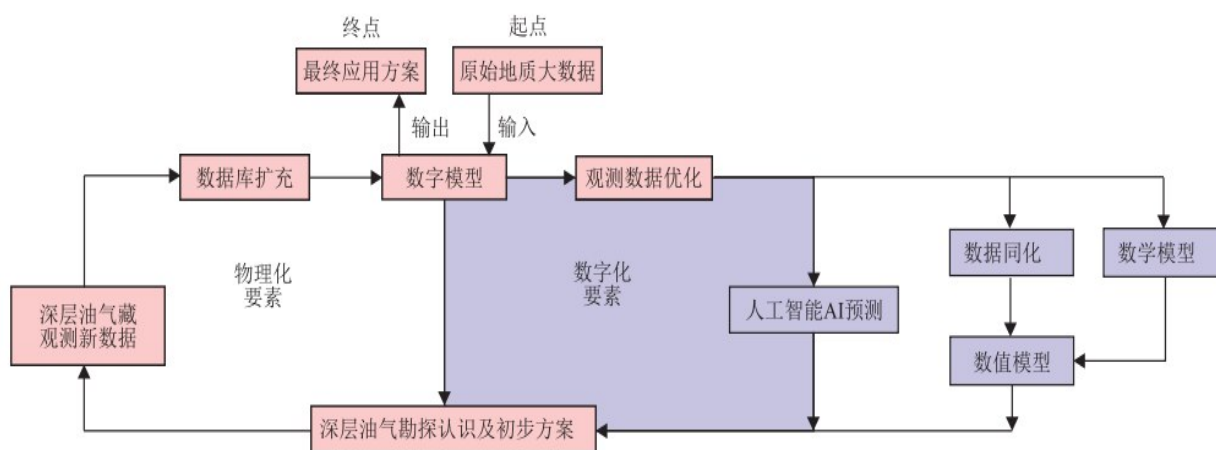


图8 深层油气系统中的数字孪生技术实现示意图

5 结论

1)“岩石力学层”是储层地质力学评价的核心,岩石力学参数、地应力、地层压力、裂缝系统及脆性5个关键要素控制了深层岩体变形、运动及破坏等复杂地质力学作用过程。深层/超深层油气运聚具有受构造应力、流体势能、断缝系统联合控制的特殊流体运移路径及复杂油气聚集规律。

2)深层/超深层面临油气运聚机理不明、高温高压高含硫油气勘探成本高、高质量数据获取与集成难度大等关键问题,并存在深层地质构造解

释多解性、高温高压岩石物理力学性质和流体流动机制不确定性、三维地应力场与裂缝系统精细建模精度不高、大模型数智化水平提升技术不成熟等诸多挑战。

3)未来,储层地质力学模型将更加注重多尺度、多场耦合模拟,综合应用多学科技术。

参考文献略

转自《天然气工业》2025,45(4) 33-47

基于 Trnsys 能耗预测的村镇建筑不同供能方式碳-经济分析

胡开永*, 刘峰, 胡芸清, 郑怡, 田绅

天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室

摘要:在碳中和背景下,村镇生物质与太阳能资源具有广阔的应用前景。本文以河北迁安地区某农宅为基础,建立三维模型,采用 Trnsys 对农宅能耗进行预测,通过实测数据对模型进行验证。分析不同供能方式的碳排放和经济性,结果表明:该农宅以天然气为燃料的供暖方式具有较高的二氧化碳(CO₂)减排潜力,CO₂排放量为 2019.75kg/年,以生物质+标准煤的供暖方式具有较好的经济性,1034.42 元/年;当安装太阳能光伏发电系统时,采用生物质+空调的采暖方式具有较好的经济性,464.62 元/年,且 CO₂排放量为 3060.56kg/年,仅次于天然气。因此,合理利用天然气、生物质和太阳能成为减轻供暖经济负担,降低 CO₂排放的有效方法。

关键词:能耗预测;生物质能;太阳能光伏发电;CO₂排量;经济性;

引言

近年来,随着我国经济的不断发展,居民对冬季建筑室内温度的要求逐渐提高。寒冷地区农村采暖能耗为家庭能源消耗的主要部分,北方地区村镇冬季采暖方式是我国建筑节能工作中的重点,我国作为农业大国,每年会产生大量秸秆,居民将秸秆堆积或原地燃烧,不但没有充分利用生物质资源,还对农业生态系统造成一定的污染。生物质是与农业密切相关的清洁、环保型能源,村镇冬季采暖可通过燃烧生物质代替煤用于室内供热。天然气作为一种优质、高效的绿色能源,极大地缓解了世界能源危机,在大气保护中起着关键作用。太阳能以污染低、健康环保、成本低等特点,成为社会绿色能源发展的重要方向。因此,村镇冬季供热方式逐渐从常规的燃煤散烧日益向“煤改电、煤改气、煤改生物质”转变。

那威、张宇璇等人指出我国寒冷地区村镇建筑供热耗煤量所占的比例达 50%,每年将产生大量 CO₂,因此,农村冬季供暖具有巨大的节能潜力。

刘戈在对寒冷地区采暖方式调查中得到,自 2007 年至 2010 年,94% 的家庭部分或全部使用煤作为采暖燃料,只有 11% 的家庭采用煤+秸秆的方式,这表明煤仍是当前农村家庭冬季采暖的最主要的燃料。田驰等人通过草谷比法估算我国秸秆产量,认为使用秸秆作为燃料进行供暖具有一定的可行性。Soltero 的研究结果表明采用生物质资源对村镇冬季采暖供热是提高西班牙村镇地区热效率的一种有前途的方法。Chatzistougianni 提出生物质支持公共建筑的小规模区域供热系统,分析了生物质对临近建筑供热的优势。Roberts 指出使用传统生物质资源和木材作为农村离网供暖组合的一部分,既可以改善当地的环境,还可以有效缓解家庭的财务压力。冯乐军、付志浩等人指出天然气作为从煤炭自然能源向新兴能源过渡的桥梁型能源,不断提高其消费比重,是我国实现“碳中和、碳达峰”的重要途径。刁培滨、王宇帆等人^[1]对国内天然气市场现状、消费情况、对国外的依存程度、定价改革 4 个方面进行了详细阐述,分析预测

了未来几年国内天然气供需量等方面走势。王志峰、何雅玲等人认为太阳能热发电技术具有安全性高、电力品质高、储能规模大、可双向连接电网的优势,在“碳达峰、碳中和”战略中具有不可替代的地位。

我国北方村镇约80%的家庭冬季全部采用燃煤的方式供暖,不但造成了大量化石燃料的消耗,还使免费的生物质资源得不到有效利用。2021年8月自然资源部召开新闻发布会,公布第三次全国国土调查主要数据成果。数据显示,我国耕地面积19.18亿亩,人均耕地面积1.40亩(本文所研究的河北迁安地区农村人口人均耕地0.7448亩)。2022年底全国光伏累计装机容量达到约 3.60×10^8 kW。以河北省为例,河北拥有丰富的太阳能资源,年辐照总量可达1383kWh/m²至1657kWh/m²,河北全省太阳能资源丰富,为供热利用提供了良好的用能环境。

综上所述,国内外虽已对不同供能方式冬季供暖进行了相关研究,但多数为不同供能方式冬季供暖可行性、优势与发展前景的研究,鲜有针对满足某村镇农宅冬季室内热负荷匹配不同供能方式的分析。本文以华北地区迁安农宅为研究对象,采用Trnsys对农宅冬季能耗进行实时预测,基于预测数据,分别采用太阳能光伏发电供能、天然气供能、生物质+空调供能、生物质+标准煤供能等方式进行研究,分析不同供能方式的碳排放和经济性。

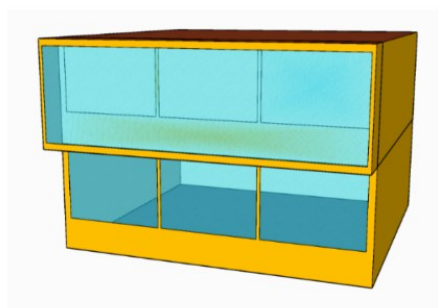
1 模型建立

1.1 农宅模型

选择河北省唐山市迁安市马兰庄镇侯台子村的农宅作为研究对象,农宅为上下两层建筑,坐北朝南,经实地测量此农宅长9.59米,宽9.00米,一层高3.23米,二层高3.35米,一层有3个长3.00米,宽2.00米的玻璃大窗,二层伸出1.50米宽的阳台,阳台内部有三个与一楼相同的玻璃窗,阳台外部长9.00米,宽2.80米。农宅实物照和采用SketchUp建立的农宅模型见图1。



(a) 农宅照片



(b) 农宅模型

图1 农宅实物照和三维模型

1.2 模型验证

采用2022年5月记录的农宅房间实时温度对Trnsys软件内建立的房屋负荷预测模型进行验证。农宅结构参数见表1。

表1 农宅结构参数

(a) 材料参数

材料类别	红砖	水泥	瓷砖	屋瓦
导热系数 (W/m·℃)	0.49	1.84	1.10	1.74
热容(kJ/kg·K)	0.86	1.00	0.84	0.97
密度(kg/m ³)	1560.00	1400.00	2090.00	2020.00

(b) 结构参数

农宅围护结构	水泥层/m	红砖/m	瓷砖/m	屋瓦/m
外墙	0.10	0.46	0.10	
内墙	0.10	0.26		
屋顶	0.26			
夹层	0.36			

模拟数据和实测数据误差采用《冷库瞬态能耗调查:建模和案例研究》所提供的四个误差分析公式:

$$CVRMSE(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)^2}{n}}}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)}{\sum_{i=1}^n E_i} \times 100 \quad (2)$$

$$RN_RMSE(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)^2}{n}}}{\max(E) - \min(E)} \times 100 \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \mu)^2} \quad (4)$$

式中,CVRMSE为均方根误差变异系数; E_i 为建筑*i*的实测能耗; $\hat{E}_i$ 为建筑*i*的预测能耗; μ 为建筑实测能耗的平均值; n 为样本数量;MBE为平均相对误差;RN_RMSE为范围归一化均方根误差; R^2 为决定系数。

模拟数据和实测数据四组误差值分别为11.95%,9.85%,10.92%,0.34%,均在误差值建议范围内,因此所建模型可靠。图2为农宅室内温度模拟值和实测值的对比图。

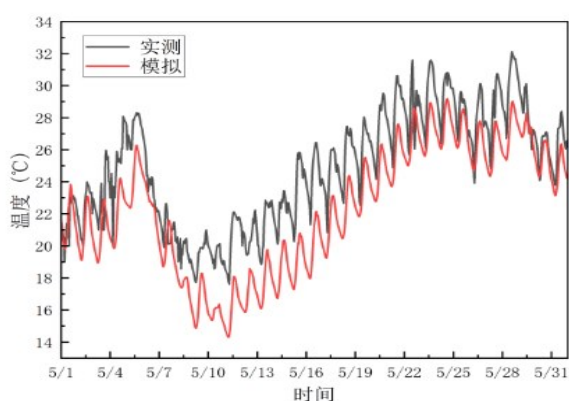


图2 农宅实测温度与预测温度对比图

1.3 碳排放模型

不同燃料的碳排放量通过公式(5)计算:

$$EA = \sum_{j=1}^n EF_j \cdot Q_j \quad (5)$$

式中,EA为总碳排放量,kg; EF_j 为燃料*j*的碳排放系数,kg CO₂/kg; Q_j 为燃料*j*的消耗量,kg。

表2 为不同能源的碳排放系数

类别	标准煤 (kg CO ₂ /kg)	秸秆 (kg CO ₂ /kg)	电力 (kg CO ₂ /Wh)	天然气 (kg CO ₂ /kg)	柴油 (kg CO ₂ /L)
排放系数	2.27	1.16	0.85	2.09	2.73

1.4 经济分析模型

单位面积农作物秸秆产量通过公式(6)获得:

$$M_2 = KM_1 \quad (6)$$

式中,K为草谷比; M_1 为农作物单位面积产量,kg·m⁻²。表3为不同农作物单位面积秸秆产量,表中 M_2 为本次计算取值。

表3 不同农作物秸秆产量

农作物	K	M_1 /(kg·m ⁻²)	M_2 /(kg·m ⁻²)
玉米	0.9	0.548~0.6	0.49
水稻	0.78	0.645~1.103	0.50
小麦	0.73	0.467~0.488	0.34
棉花	3.53	0.138~0.142	0.49
大豆	0.75	0.195~0.225	0.15
油菜	1.29	0.195~0.206	0.25

经查阅可得,河北唐山迁安地区,2022年标准无烟煤价格为1770.00元/吨;本文所涉及的河北唐山迁安地区电价按每度0.60元计算。该农宅匹配的太阳能发电系统为3kW。太阳能光伏板产生的电量通过公式(7)计算:

$$E_{PV} = R_{PV} \cdot PSH \eta_{PV} \quad (7)$$

式中, R_{PV} 为太阳能光伏板的额定容量,kW;PSH为根据平均值计算的峰值太阳时数,h; η_{PV} 为太阳能光伏板的效率,%。

2 结果与分析

2.1 农宅实时负荷预测

农宅室内实测温度与农宅三维模型一同导入 Trnsys 中,在 Trnsys 软件中设置农宅外墙、内墙、屋顶、夹层等围护结构尺寸和各材料导热系数、热容、密度。可得该农宅2月15日0时至3月15日24时单位面积热负荷逐时数据,如图3所示。

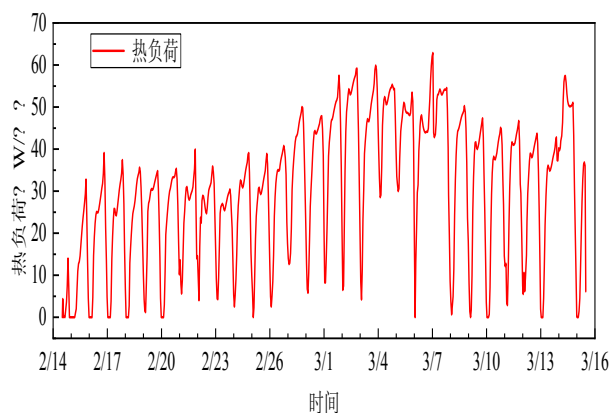


图3 农宅热负荷

由图3可以看出农宅一天中在下午两点左右热负荷达到最低值,因为冬季一天中下午两点室外环境温度最高;该农宅一天中在上午8点更容易出现热负荷最高值,这是因为一天中深夜到清晨室外环境温度较低,在此期间该农宅室内供暖条件较好温度较高,室内外温差较大。以3月1日为例,热负荷最低值出现在下午13点57分,为 8.26 W/m^2 ,热负荷最高值出现在上午7点55分,为 47.88 W/m^2 。该农宅进入三月以后热负荷明显升高,产生这样的原因是住户三月份每日采暖时间更久,采暖强度提高。

对2月15日0时至3月15日24时热负荷逐时数据计算,该农宅在此期间累计热负荷为 21248.15 W/m^2 。农宅上下两层面积共 160.00 m^2 ,因此,2月15日至3月15日达到室内供暖温度需要 $1.23 \times 10^7 \text{ kJ}$ 的热量。河北地区冬季采暖时长约为4个月,故整个冬季采暖需要 $4.90 \times 10^7 \text{ kJ}$ 的热量。

2.2 不同供能方式碳排放分析

农宅采用不同供暖方式,原理如图4所示。

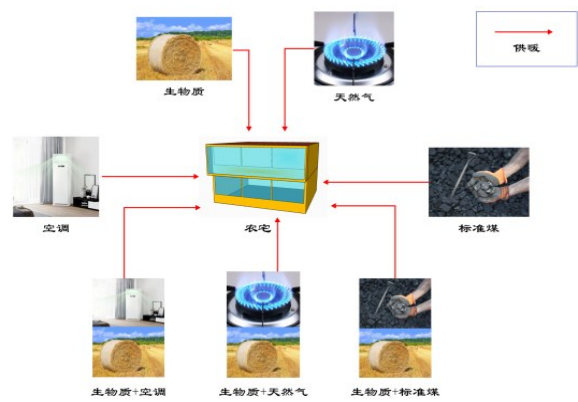


图4 不同农宅供暖方式

不同供暖方式对应的供暖期碳排放量如下所示:

完全采用标准煤:1kg标准煤燃烧所能提供的热量为 $2.93 \times 10^4 \text{ kJ}$,故满足该农宅冬季采暖需要 1674.64 kg 标准煤, CO_2 排放量 3801.43 kg 。

完全采用生物质:农户耕地全年以种植玉米和小麦为主,玉米秸秆低位热值为 $1.55 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$,小麦秸秆低位热值为 $1.53 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$,故两者秸秆平均低位热值为 $1.54 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$ 。故满足该农宅冬季采暖需要 3181.82 kg 秸秆, CO_2 排放量 3690.91 kg 。

完全采用天然气: 1 m^3 天然气燃烧所能提供的热量为 $3.60 \times 10^4 \text{ kJ}$,满足冬季采暖需要 1361.11 m^3 天然气,由此产生的 CO_2 排放量为 2019.75 kg 。

完全采用空调:采用两个1.5匹空调,各供暖6小时,一个2匹空调供暖18小时,满足供暖需求需要 6480 度电,产生 CO_2 排放量 5508.00 kg 。

采用生物质+标准煤:该农宅有 3.724 亩耕地,全年可产生 1224.62 kg 玉米秸秆和 844.11 kg 小麦秸秆,可以提供 $3.19 \times 10^7 \text{ kJ}$ 热量,产生 CO_2 排放量 2402.36 kg 。该农宅所有生物质供暖可满足该农宅 65.10% 的供暖需求。剩余热量需求为 $1.71 \times 10^7 \text{ kJ}$,采用标准煤提供,需要 584.42 kg ,产生 CO_2 排放量 1326.63 kg ,故该农宅冬季供暖 CO_2 排放量为 3728.99 kg 。

采用生物质+天然气:该农宅拥有耕地所产生的生物质可提供热量 $3.19 \times 10^7 \text{ kJ}$,仅能满足住户 65.10% 的冬季供暖需求。若剩余供暖需求由天然气提供,需要 475.00 m^3 天然气,产生 704.85 kg CO_2 。

排放量,故该农宅冬季供暖共产生 CO₂ 排放量 3107.21kg。

采用生物质+空调:该农宅拥有耕地所产生的生物质提供的热量为 3.19×10^7 kJ,仅能满足住户 65.10% 的冬季供暖需求。若剩余供暖由空调提供,则需要 2261.52 度电,产生 1922.29kg CO₂ 排放量,故该农宅冬季供暖共产生 CO₂ 排放量 4324.65kg。

不同供暖方式产生的 CO₂ 排放量如图 5 所示。各供暖方式比标准煤供暖多排放 CO₂ 量如图 6 所示。

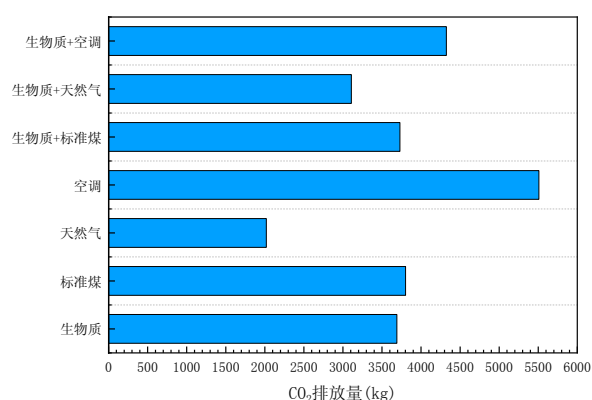


图5 不同供暖方式CO₂排放量

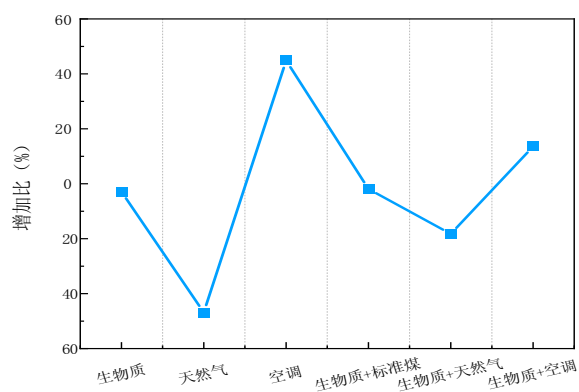


图6 不同供暖方式比标准煤多排放CO₂量

由图5可以看出,天然气供暖方式是排放 CO₂ 量最少的供暖方式。由图6分析可得,该农宅冬季以生物质为燃料供暖,比以标准煤为燃料供暖 CO₂ 排放量降低 2.90%;以天然气为燃料供暖,比以标准煤为燃料供暖 CO₂ 排放量降低 46.87%;以空调供暖,比采用标准煤供暖 CO₂ 排放量增加 44.89%;以

生物质+标准煤供暖,比以标准煤为燃料供暖 CO₂ 排放量降低 1.91%;以生物质+天然气供暖,比以标准煤供暖 CO₂ 排放量降低 18.26%;以生物质+空调供暖,比以标准煤供暖 CO₂ 排放量增加 13.58%。

若农宅屋顶安装 3kW 光伏板,价格为 2 万元,使用年限达 25 年,该系统总成本平摊到一年供暖季为 266.67 元。安装太阳能发电系统的农宅采用不同供暖方式系统流程如图 7 所示。

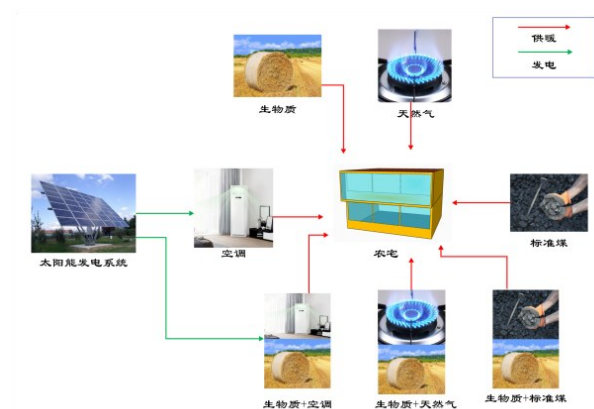


图7 安装太阳能发电系统的农宅供暖方式

由公式(7)可知,光伏板可产生 1487.16 度电。若采用空调供暖,则只需要电网 4992.84 度电,产生 4243.91kg CO₂;若采用生物质+空调的供暖方式,则只需要电网 774.36 度电,产生 3060.56kg CO₂。

安装太阳能发电之后,不同供暖方式 CO₂ 排放量如图 8 所示,各供暖方式相比之前少排放 CO₂ 量如图 9 所示。

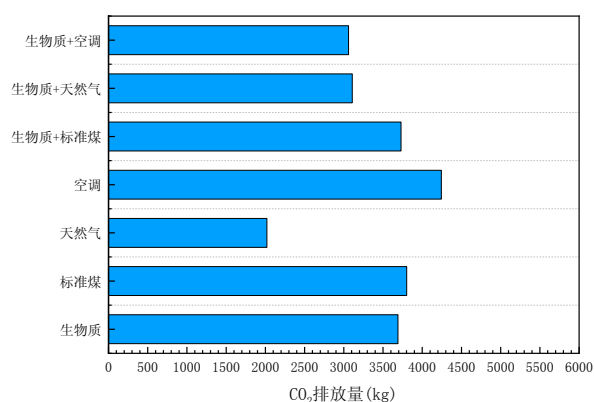
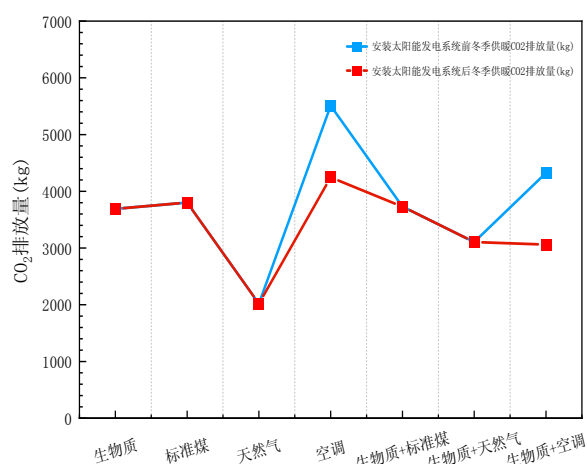


图8 结合太阳能发电的不同供暖方式CO₂排放量

图9 太阳能发电对CO₂排放量影响对比

从图8可以看出,装有太阳能发电系统后,采用空调供暖CO₂排量为4243.91kg,采用生物质+空调供暖CO₂排量为3060.56kg,太阳能发电系统的使用有效降低了空调用电部分CO₂排放量。由图9分析可得,安装太阳能发电系统后,采用空调供暖CO₂排放量降低22.95%;采用生物质+空调供暖CO₂排放量降低29.23%。

2.3 不同供能方式经济性分析

不同供暖方式的经济性能如下所示。

完全采用标准煤:该农宅冬季采暖需要1674.64kg标准煤,花费2966.46元。

完全采用天然气:该农宅冬季采暖需要1361.11m³天然气,花费3702.22元。

完全采用空调:该农宅冬季供暖需要消耗6480.00度电,花费3888.00元。

采用生物质+标准煤:需要584.42kg标准煤,花费1034.42元。

采用生物质+天然气:需要475.00m³天然气,花费1292.00元。

采用生物质+空调:需消耗2261.52度电,花费1356.91元。

不同供暖方式的经济性见图10,生物质+标准煤的供暖方式经济性最好。其他供暖方式和标准煤相比,花费增加情况见表图11,从图中可以看出,合理利用生物质,可以有效降低农民冬季供暖费。

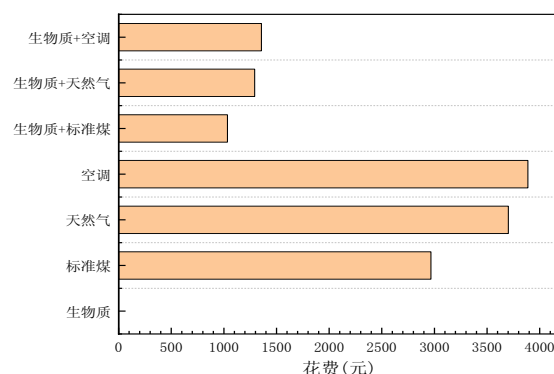


图10 农宅冬季供暖花费

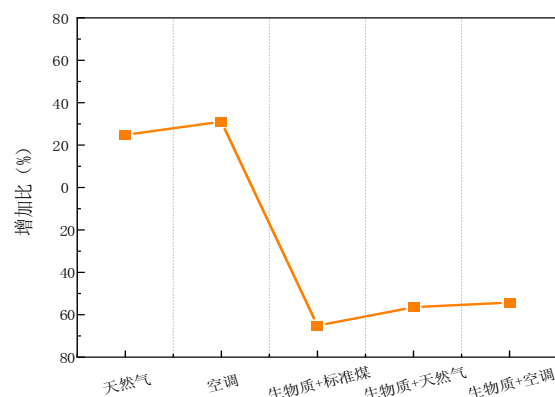


图11 不同暖方式比煤供暖多支出比

由图11可以看出,天然气供暖比以标准煤供暖花费增加了24.80%;采用空调供暖比以标准煤为燃料供暖花费增加了31.07%;生物质+标准煤供暖比以标准煤为燃料供暖花费降低了65.13%;生物质+天然气供暖比标准煤为燃料供暖花费降低了56.45%;生物质+空调供暖比以标准煤为燃料供暖花费降低了54.26%。

安装太阳能发电系统之后,不同供能方式经济性见图12,各供暖方式相比之前成本变化见图13。

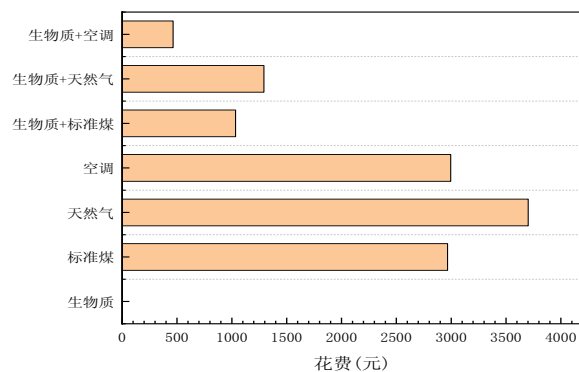


图12 装有太阳能发电系统的农宅供暖花费

从图12可以看出,装有太阳能发电系统后,采用空调供暖花费为2995.20元,采用生物质+空调供暖花费为464.62元,太阳能发电系统的使用有效降低了空调用电成本。此时,生物质+空调供暖经济性最好。由图13可知,安装太阳能发电系统后,冬季采用空调供暖成本降低22.96%;采用生物质+空调供暖成本降低65.76%。

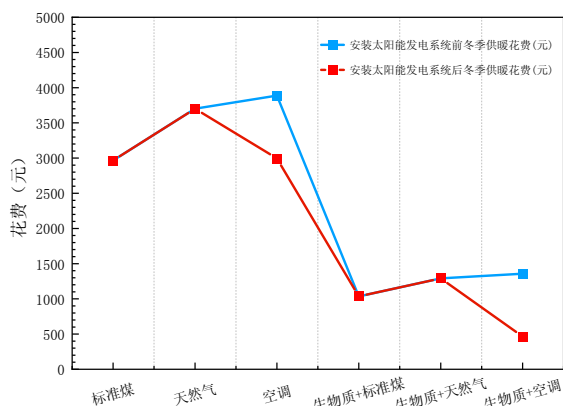


图13 安装太阳能发电系统前后供暖花费

Fig. 13 Heating costs before and after installation of solar power generation system

3 结论

通过对河北省唐山市迁安市马兰庄镇侯台子村的农宅满足冬季供暖需求所采用的不同供暖方式的分析,得到以下结论:

(1)冬季CO₂排放量最少的供暖方式为天然气供暖,CO₂排放量2019.75kg;供暖花费最少的供暖方式为生物质+标准煤供暖,花费1034.42元,可有效减轻农户冬季供暖经济负担。

(2)安装3kW的太阳能光伏发电系统时,冬季四个月可提供1487.16度电,此时采用生物质+空调的供暖方式具有较好的经济性,仅需要花费464.62元;而天然气供暖依旧为CO₂排放量最少的供暖方式,产生2019.75kg CO₂。

(3)村镇居民在冬季供暖时,可以合理安排生物质供暖时间,节省花费的同时也可减少CO₂排放总量。因此,合理利用天然气、生物质和太阳能成为减轻供暖经济负担,降低CO₂排放的有效方法。

参考文献略

转自《综合智慧能源》2023 Vol.45 No.8

澳大利亚库珀盆地闭式循环系统的效能

地热科学前沿

1 概述

向可再生能源过渡对于应对气候变化和减少二氧化碳排放至关重要。来自地壳的地热能是一种很有前途的替代能源。虽然浅层地热能开采稳步增长,但开发深层干热岩储层带来了挑战。深层地热能的可持续利用对于大规模发电至关重要。澳大利亚的Habanero强化地热系统项目由于复杂的断裂网络而面临障碍。钻孔热交换器(BHE)提供了一种解决方案,使工作流体循环而不直接接触地质流体。本研究使用二维轴对称模型(2D-AM)评估同轴BHE在Habanero油藏中的可行性,并将其与更简单的一维深度积分模型(1D-

DIAM)进行比较。这两种模式产生了类似的结果。此外,结果表明,同轴BHE的生产温度在10小时内从250℃呈指数下降到100℃,使得在运行10小时后不适合用于发电的能量回收。该研究提出了一个能量回收周期为10小时,然后关闭110小时。注射温度和流速显著影响生产效率,而钢套管的导热性对热交换器性能的影响最小。

2 讨论

在21世纪初,澳大利亚政府和企业家探索了该国的地热潜力。图1描绘了澳大利亚5公里深处的温度分布。有趣的是,据预测,在澳大利亚人

类发展报告中回收1%的能源可以满足该国26000年的能源需求。因此,澳大利亚政府坚定地致力于推进可再生能源。Habanero EGS项目由Geodynamics Limited于2000年启动,该公司位于南澳东北部(库珀盆地,见图1)。在该项目期间,在Innaminka花岗岩,特别是岩基花岗岩中钻了六口井,深度从4200米到4911米不等。这些井底的温度从230摄氏度上升到264摄氏度。尽管目标结果是100MW,但试点计划通过在Habanero 1和Habanero 4井之间循环流体产生的电力不到1MW。该项目因不符合经济措施而被放弃。此外,Habanero EGS中的裂缝网络复杂且知之甚少。因此,利用当前的技术,通过工程裂缝系统将流体从一口井循环到另一口井并不容易。因此,寻找一种合适的方法来回收地热能与目前的技术从澳大利亚的HDR是至关重要的。

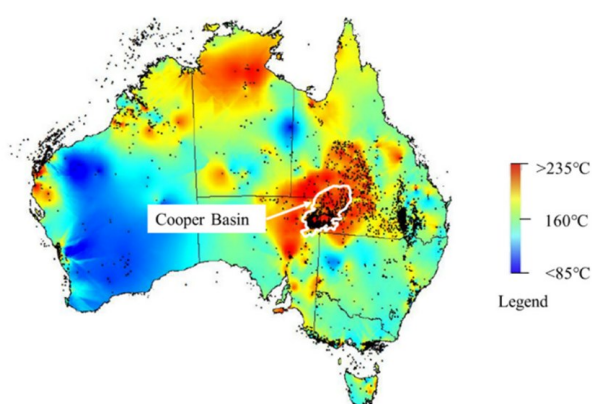
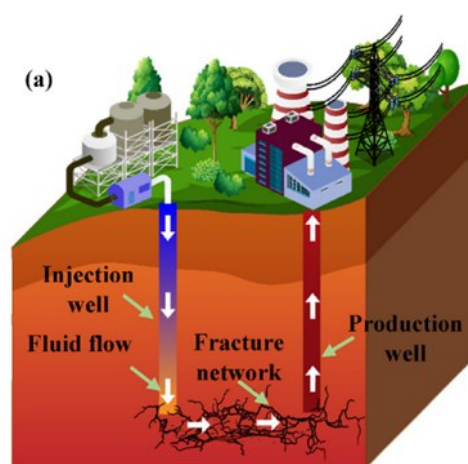


图1 澳大利亚5公里深度的温度图和库珀盆地的位置

几种地热能勘探策略可用于从HDR回收热量,包括具有单独注入和生产井的开环EGS,以及具有同轴井的闭环EGS或BHE,如图2所示。Chen等人使用统一管网方法研究了裂隙岩石网络中的热传递。裂缝在 $10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m}$ 的范围内随机分布。他们发现,在没有裂缝的情况下,可以达到最高生产温度,在120天内持续接近 177°C 。 0.1mm 孔径的断裂使温度略微降低至 162°C 。在开环系统中,没有裂缝的循环流体对于流体循环是不可行的。值得注意的是,Xiong等人对Habanero储层

40年的流体流动和热输运进行了建模。在Habanero 1和Habanero 4井之间使用开环系统,他们发现,在注入压力为45 MPa的情况下,可以连续生产高达56MW的电力,持续时间超过10年。这表明开环和依赖于电流的系统比同轴BHE产生更多的功率。然而应该指出的是,Habanero项目中复杂和未知的储层条件严重影响了发电量,导致发电量不到1MW。

在EGS中,工质通过注入井泵入工程裂缝系统,在那里它吸收周围岩石的热量,然后通过生产井回收,这一过程称为开环系统。相比之下,BHE使工作流体在井筒内循环,而不与原位地质流体相互作用。尽管与传统的开环系统相比,BHE每单位深度产生更少的功率,但BHE避免了与开环系统相关联的不确定性。例如,传统的开环地热系统面临着地理限制、回注困难和地热废水处理造成的热污染等挑战。另一方面,BHE依赖于地热条件、流动参数、结构设计和操作因素。BHE的主要优点之一是它们不需要在储层内进行水循环,从而消除了对水污染和储层渗透性的担忧。BHE还降低了地下水污染和水垢沉积的风险。此外,由于BHE不需要储层刺激,因此诱发地震活动的风险和成本最小化。考虑到Habanero储层的裂缝网络复杂且知之甚少,BHE特别适用于此类环境。



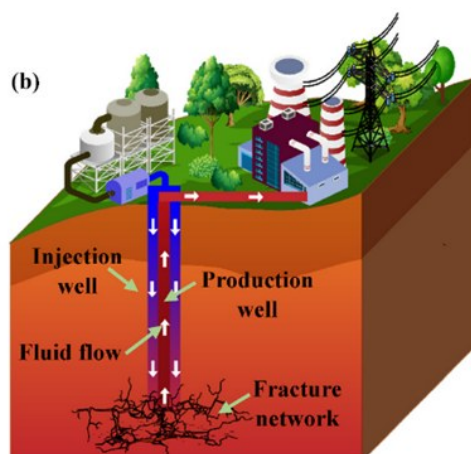


图2 (a)具有通过裂缝网络连接单独注入井和生产井的开环EGS和(b)具有同轴BHE的闭环EGS的示意图。

生产温度和热提取率随时间逐渐降低,如图3(a)所示。在能量回收过程中,生产温度的降低表明收益随时间递减。2小时后,油井顶部的生产温度从124℃开始,逐渐降低至111℃、105℃、101℃,并在4、6、8和10小时后分别降至99℃。在一项类

似的研究中,Nian等人在井深3000m、井底温度125℃的条件下观察到开采温度随时间下降。最初,在操作开始时,生产温度接近88℃,在10h时降至约77℃,并在240h后进一步降至52℃。开采温度的这种下降可归因于岩石的温度高于注入流体的温度,从而导致热量从岩石传递到注入流体,并因此随着时间的推移降低岩石的温度。同轴底部热交换器的性能可通过能量产生率进行评估,如图3(b)所示。

在本研究中观察到能量产生率呈递减趋势,在6h时从1.78 MW降至0.71 MW,10h后逐渐降至0.66 MW。本研究探讨了从Habanero岩层中废弃地热井中提取能量的可行性。如图3(a)所示,同轴BHE运行10小时后,生产温度预计将降至100℃以下,导致连续能量提取不适合发电。当生产温度超过100℃时,发电变得可行。因此,用于从Habanero岩层中回收能量的同轴BHE的连续长期操作被认为不足以用于发电。

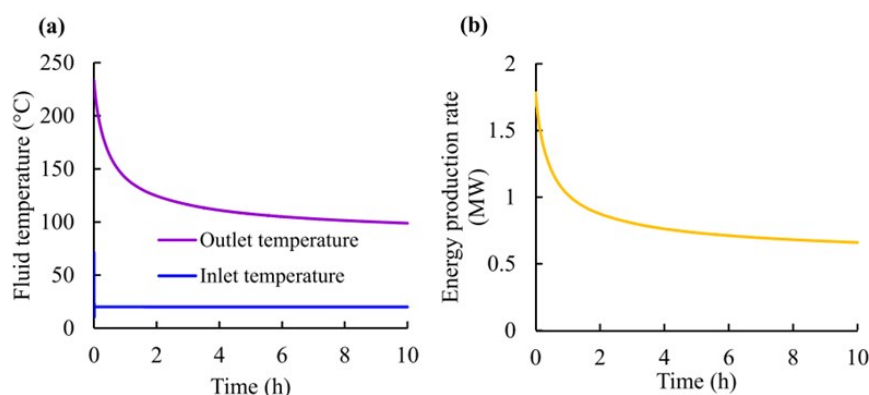


图3 (a)同轴BHE的入口和出口处的温度随时间的变化,以及(b)在20℃注射温度和2 kg/s注射流速下随时间的能量产生率。

周围岩石和循环流体之间的相互作用促进岩石和流体中的温度调节。图4(a-c)直观地显示了运行2 h和10 h后围岩的温度变化。在能量回收过程中,观察到同轴BHE附近的温度降低。随时间和岩层深度的现场温度变化如图4(b-c)所示。操作2小时后,细微的温度变化是明显的,随着BHE操作时间的增加逐渐变得更加明显。值得注意的是,在井操作10小时后观察到急剧的温

度下降,突出了该过程的动态性质。这些结果强调了能量回收对岩层内温度分布的影响。同样,Hu等人调查了同轴BHE在阿尔伯塔欣顿废弃威尔斯中的适用性。他们的研究表明,由于能量回收,岩石温度下降。在井筒附近,浅层岩层的温度略有上升,而较深区域由于地热开采而温度急剧下降。因此,很明显,能量回收可以显著影响围岩温度。

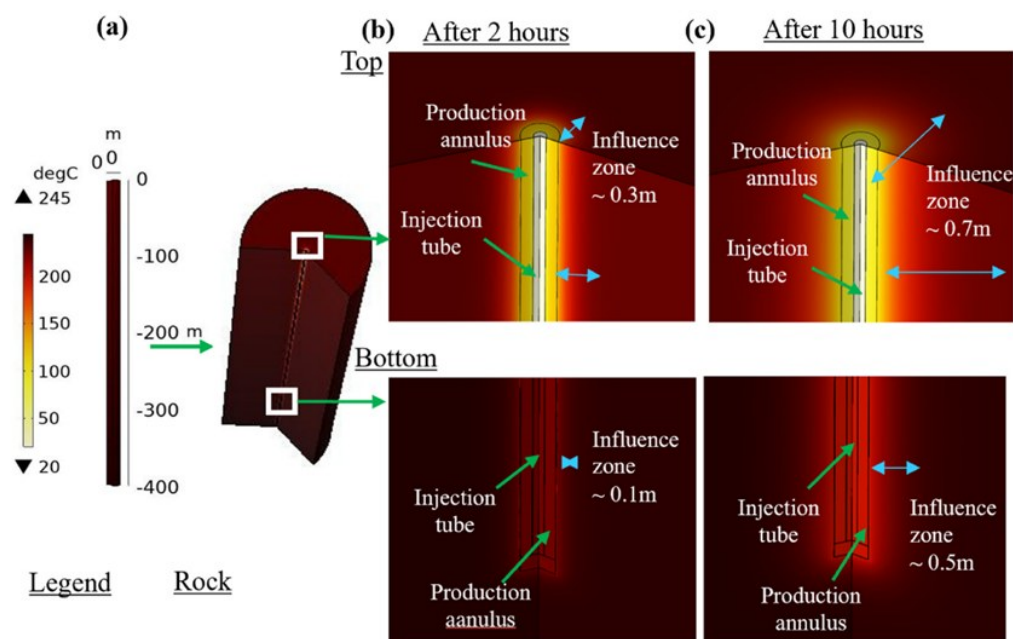


图4 (a)深层岩层和井的温度分布,(b)2小时后BHE顶部的温度等值线,(c)10小时后BHE顶部的温度等值线,(d)2小时后BHE底部的温度等值线,以及(e)10小时后BHE底部的温度等值线(20℃注入温度和2 kg/s注入流速)。

由于能量回收,围岩中同轴BHE附近的温度可随时间逐渐降低。持续的地热能回收过程的连续时间为10小时,需要考虑的影响区的模型。图4(b-c)和图5描绘了围岩随时间的等温热等值线。如图5所示,横向影响区随时间扩展。例如,在2h时,影响区测量值为0.3 m,在4h时增加到0.45m。地热能回收10h后,最大影响范围达到0.7m。

此前,Hu等人研究了能量回收期间横向的温度下降。因此,本研究通过考虑能量恢复时间和影响区来确定模型的横向长度。由于在横向方向上观察到0.7m的最大影响区,因此横向边界不会影响同轴BHE中的能量回收。此外,在现场,必须注意一口井的影响区不会影响另一口井的影响区。例如,Habanero 2和Habanero 1相距500米,Habanero 1和Habanero 3相距560米,Habanero 3和Habanero 4相距145米。因此,10小时的能量回收期不会影响一口井与另一口井。

考虑到10小时的能量恢复时间,选择10米的横向畴长度有利于增强能量恢复模拟的二维-AM。此外,从岩石到流体的热传递只发生在热影响区内。在该区域之外,在同轴BHE系统中没有

发生热传递。然而,增加钻孔直径有可能显著扩大热影响区。通过增加热影响区,热传递也将显著增加。此外,用人工裂缝网络创建的开环系统进一步促进热影响区的扩展。

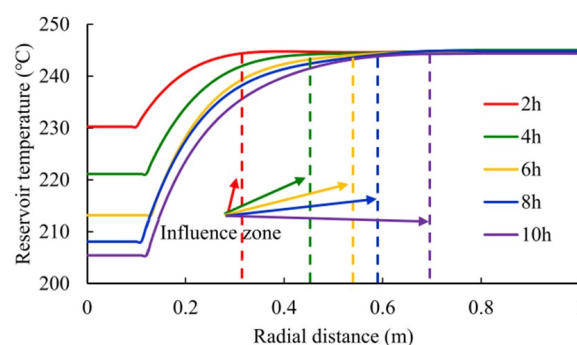


图5 在能量回收过程中,注入温度为20℃,注入流速为2 kg/s时,Habanero深层岩层内温度随弧度距离的变化。

本研究探讨了同轴BHE在澳大利亚Habanero油藏丰富井中的适用性。使用COMSOL将流体流动和传热相结合来模拟同轴BHE(2D-DM)。分析了同轴BHE的性能,并将结果与1D-DIAM和Ramey方程进行了比较。最后进行敏感性分析以调查影响参数。

3个地热项目获河北省科学技术奖

地热加 报

4月21日,2024年度河北省科学技术奖励大会在石家庄召开,对全省科技创新领域取得突破性成果的单位和个人进行表彰,其中,3个地热项目荣获2024年度河北省科学技术奖。

“雄安新区古潜山热储探测与增强开发技术”荣获省科学技术进步奖一等奖,该项目由中国地质科学院水文地质环境地质研究所、中国石油大学(北京)、中国地质科学院、中石化绿源地热能开发有限公司、石家庄铁道大学完成,主要完成人包括王贵玲、黄中伟、王思琪、马峰、高小荣、朱喜、杨睿月、牛庆合、刘彦广、孙彩霞。该项目团队创新了华北克拉通古潜山优势流传热聚热理论,揭示了华北克拉通古潜山热储多元聚热机制,刻画了古潜山非线性传热过程,量化表征了古潜山区温度场的“潜山镜像”特征,创新地热靶区优选方法,实现地热勘探井目标热储钻遇率超过95%,降低地热勘查成本近30%;发明了深部低渗透碳酸盐岩热储水力喷射增产改造系列技术,形成了由开采井从近及远的系列增产新技术工艺,解决了深部低渗透碳酸盐岩热储的高效开发难题;创建“群井采灌”协同采热技术和深部热储能量多节点综合空间调控技术,解决了地热资源空间分布不均衡与地热供暖需求不匹配的重大难题。研究成果指导了雄安新区等地的地热资源勘探与开发,显著提升了地热资源的勘探效率和经济效益,对我国古潜山型地热资源勘查开发具有重大的理论和现实意义。该项目成果获得国家发明专利27项,实用新型专利18项,软件著作权5项,在国内外重

要期刊发表论文86篇,其中SCI/EI检索58篇,出版专著1部。

“河北省浅层地热能资源赋存特征与规模化利用关键技术及应用”荣获省科学技术进步奖三等奖,该项目由河北省地质矿产勘查开发局第三水文工程地质大队(河北省地热资源开发研究所)、河北工业大学完成,主要完成人包括苏永强、宋倩、赵琳如、赵朝兵、张志刚、王华军、董卿卿、杨超、赵素杰、李杨。该项目团队系统开展了河北省浅层地热能资源赋存特征与规模化示范应用关键技术研究工作,构建了浅层地温场研究模型、实现浅层地热能勘查开发利用关键技术的突破。创新性揭示了岩土体结构与宏观热物性的耦合关系,建立了复杂含水层结构下的非稳定渗流与热量运移三维耦合模型;首创了“源-网-站-荷”协同优化的浅层地热能开发利用新模式;自主研发了多项浅层地热能开发利用关键技术和设备。项目成果获得发明和实用新型专利6项,软件著作权5项,编制了河北省地方标准2项,出版专著1部,发表核心论文3篇。

“中深层地热耦合热泵应用关键技术”荣获省科学技术进步奖三等奖,该项目由河北工程大学、河北省科学院能源研究所、西安交通大学、河北桓杰能源科技有限公司、陕西中煤新能源有限公司完成,主要完成人包括鲍玲玲、刘伟、王洋浩、付鹏、周聪、王景刚、蔡皖龙、朱余良、刘自强、焦敏。该项目团队创新了中深层地下水热储“取热不取水”系统热湿传递过程描述方法,阐明了地热井耦

合岩土多孔介质的热湿传递机理;创新研发了闭式地热井热储压裂强化传热改造方法及工艺,提出了中深层地热+多种可再生能源储能供暖系统模式;阐明了中深层地埋管耦合热泵供热系统动态运行能流分配机理,首创了计及系统综合能源成本的工程设计运行参数优化体系;首创了考虑

环境效益及碳交易政策的系统优化及降碳评价方法。项目成果获授权发明专利6项,实用新型专利36项,制定地方性标准3部,发表论文57篇,其中SCI检索论文11篇,编制降碳产品方法学1部。研究成果在河北、陕西等多地清洁供暖领域成功应用,为企业新增产值5.1亿元。

山西省大同市政府发文 积极发展有规模有效益的地热能

地热加 报

近日,山西省大同市人民政府印发《大同市碳达峰实施方案》(以下简称《实施方案》),要求以传统能源绿色低碳转型和新能源规模化高质量发展为关键,以低碳零碳负碳技术转化应用和新质生产力培育为抓手,积极稳妥推进碳达峰重点行动。《实施方案》提出,积极发展有规模有效益的风能、太阳能、生物质能、地热能、氢能等新能源,统筹发展储能项目,实现煤炭与新能源融合发展。

《实施方案》明确,广泛开展地热资源调查评价,针对低温地热资源和浅层地热能开展公益性调查评价项目,重点推进大同盆地重点地区深部高温地热资源详查。逐步健全完善地热资源可持续发展体系,规范实施地热资源配置出让和优化相关审批手续,有效保障地热资源勘查开发利用项目用地。

严格控制能源消费强度,落实重点控制化石能源消费的决策部署,原料用能和非化石能源不纳入能耗双控,推动能耗双控逐步转向碳排放双控。以电机、风机、泵、压缩机、变压器、换热器、工业锅炉等用能设备为重点,严格执行能效标准,逐步提升设备能效水平。推动化工、医药、建材等领域工业用能电气化,逐步扩大锅炉、窑炉等电气化终端用能设备使用比例。

实施重点行业节能降碳工程,加快推动全市煤炭、煤电、钢铁、医药、化工、建材等重点行业企业深入开展能效对标达标,实施节能诊断和技术改造挖潜,强化节能管理。实施城市节能降碳工程,以城市建成区为重点,在建筑、交通、供热等重点领域,推动传统基础设施升级改造,发展绿色低碳交通和超低能耗建筑,推动城市综合能效提升。

山西省人民政府于近日印发的《山西省加快经济社会发展全面绿色转型行动方案》明确提出,积极开展地热能利用试点示范,支持太原、大同、忻州、晋中、临汾、运城等市创建地热供暖示范区,加大地热能的城市基础设施、公共机构的应用。推动有条件的村镇实施集中供热工程,不具备集中供热条件的按照“宜电则电、宜气则气、宜煤则煤、宜地热则地热”的原则做好农村供热工作。

《实施方案》主要目标是:到2030年,全市资源型经济转型任务基本完成,能源革命综合改革试点先行区建设成效显著,绿色低碳循环的经济体系和清洁低碳、安全高效的现代能源体系基本形成,绿色低碳技术创新取得突破,绿色低碳生活成为大众选择,绿色政策体系更加完善健全,绿色低碳转型示范效应显现。