



## 压缩空气储能过程中的能量损失评价

谷建伟, 吴胜男, 何志豪, 刘世豪, 平佳馨  
(中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

**摘要:** 含水层压缩空气储能(CAESA)技术因储能规模大、环境友好等特点, 是一种潜在的大规模储能方式, 然而在高速注采空气过程中产生能量损失的程度和环节尚不明确。本工作在考虑非达西渗流特性、井筒-地层耦合计算的基础上, 通过理论分析和数值模拟方法, 计算高速注采过程中井筒-地层中压缩空气体系的压力、流量、温度分布, 提出了以焓值、压能、内能和动能为核心的多指标能量损失评价体系, 定量分析了注采循环中各能量分量的变化规律, 分析影响能量损失的主要因素, 并提出降低能量损失对策。研究表明: 压能损失是系统能量损耗的主要形式, 占总能量的78%~88%; 采出阶段的摩擦损失和动能损失分别是注入阶段的4.7~5.3倍和4.6~5.1倍; 通过优化工作气量( $<5 \times 10^4 \text{ m}^3$ )、改善井底渗流条件(表皮系数 $<0$ )和降低井筒粗糙度( $<1\%$ )可显著减少能量损失; 将气体注入地层深处可对气体实现加温, 开采地热能, 补偿其他能量损失, 提升整体能量。本研究为CAESA系统的优化设计和高效运行提供了理论依据和技术支撑。

**关键词:** 压缩空气储能; 能量损失评价; 井筒-地层耦合模型; 非达西渗流; 减损策略

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0772

中图分类号: TE 53

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1463-09

## Evaluation of energy losses in the compressed air energy storage process

GU Jianwei, WU Shengnan, HE Zhihao, LIU Shihao, PING Jiabin  
(China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

**Abstract:** Aquifer compressed air energy storage (CAESA) technology, characterized by large storage capacity and environmental friendliness, is a promising large-scale energy storage approach. However, the extent and pathways of energy loss during high-speed air injection and production remain unclear. Considering non-Darcy seepage and wellbore-stratum coupling, this study determines the pressure, flow rate, and temperature distributions of the compressed air system in the wellbore and formation during high-speed injection and production through theoretical analysis and numerical simulation. A multi-index energy loss evaluation system centered on enthalpy, pressure energy, internal energy, and kinetic energy is proposed to quantitatively analyze variations of each energy component in the injection-production cycle, identify key factors affecting energy loss, and propose mitigation measures. Results indicate that pressure energy loss constitutes the primary form of system energy dissipation, accounting for 78%—88% of total energy. Friction and kinetic energy losses

收稿日期: 2025-08-28; 修改稿日期: 2025-11-22。

基金项目: 国家自然科学基金 (5247041417)。

第一作者及通信联系人: 谷建伟 (1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向为地下储气库及碳储工程, E-mail: gjwLcp@upc.edu.cn。

引用本文: 谷建伟, 吴胜男, 何志豪, 等. 压缩空气储能过程中的能量损失评价[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1463-1471.

**Citation:** GU Jianwei, WU Shengnan, HE Zhihao, et al. Evaluation of energy losses in the compressed air energy storage process[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1463-1471.

during the production stage are 4.7—5.3 times and 4.6—5.1 times those during the injection stage, respectively. Energy loss can be significantly reduced by optimizing working gas volume ( $<5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), improving bottom-hole seepage conditions (skin factor $<0$ ), and lowering tubing roughness ( $<1\%$ ). Injecting gas into deep formations enables gas heating and geothermal energy exploitation, offsetting other energy losses and enhancing overall energy performance. This study provides a theoretical basis and technical support for optimal design and efficient operation of CAESA systems.

**Keywords:** compressed air energy storage; energy loss evaluation; wellbore-stratum coupling model; non-Darcy flow; mitigation strategy

随着可再生能源的快速发展,压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)因其规模大、寿命长和效率高的特点,成为解决可再生能源波动性和间歇性的重要手段之一<sup>[1-3]</sup>。然而,在CAES系统的实际运行中,尤其是含水层压缩空气储能(CAESA)场景下,高速注采过程会导致显著的能量损失,直接影响系统的整体效率和经济性<sup>[4-5]</sup>。这些能量损失主要来源于井筒流动阻力、地层非达西流动损失、热力学损失等多个方面,但目前针对CAESA系统全流程能量损失的系统性评价研究仍较为缺乏。

近年来,国内外学者在CAES能量损失方面已开展了一系列研究。在理论模型方面,Oldenburg等<sup>[6]</sup>建立了多孔介质压缩空气储能(PM-CAES)的耦合数学模型,分析了储层参数对能量效率的影响。Li等<sup>[7]</sup>论述了CAESA理论基础和评价方法,分析主要地质因素对性能的影响,提出含水层选择准则,扩展了CAESA的应用。刘慧等<sup>[8]</sup>提出一种地下储气库注气过程一体化压力及地层参数计算方法,减少了因地层参数导致的能量损失,提高了能量回收率。在数值模拟方面,Wang等<sup>[9]</sup>采用CMG软件研究了注采过程中井筒热损失对系统性能的影响。王皆明等<sup>[10]</sup>针对气藏型储气库井的注采动态,提出了一种适用于储气库多周期运行的动态不稳定流分析方法,采用了“三点两段”式注采动态不稳定流分析新模式,并建立了相关数学模型和理论图版。李盼等<sup>[11]</sup>通过建立焓值平衡方程,量化了注采循环中热损失对系统效率的影响。孙晓霞等<sup>[12]</sup>建立了各部件的动态模型,深入研究了压缩空气储能系统不同运行模式的特性。然而,现有研究多聚焦于单一环节(如井筒或地层)的能量损失,缺乏对井筒-地层全系统耦合流动的深入分析。此外,传统评价方法往

往仅关注压力损失或热力学效率,未能全面量化不同能量形式(如压能、内能、动能)的损耗比例及其影响因素。

针对上述问题,本工作以垦东642-7含水层压缩空气储能系统为对象,在考虑高速注采非达西流动特征基础上,建立井筒-地层流动耦合数值模型,对循环注采空气过程中的压缩空气流速、温度、压力分布开展计算。在此基础上提出涵盖压能、内能、动能等多指标的能量损失评价体系,开展能量损失计算,并提出降低能量损失的策略。本研究成果可为CAESA系统的工程设计和运行优化提供理论指导,对提升压缩空气储能技术的经济性和可靠性具有重要意义。

## 1 井筒-地层流动耦合模型建立

本研究选定的含水层为垦东642-7含水层,此砂体沿东西方向呈条带状分布,地势自西向东逐渐降低,闭合高度为32 m,东西长度约1900 m,南北宽度约190 m,砂体总面积达到0.37 km<sup>2</sup>。

砂体厚度变化范围为2~16 m,呈现出明显的独立岩性体特征。砂体的有效孔隙体积约为 $1.26 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,平均渗透率为 $0.6878 \mu\text{m}^2$ ,表现出较高的孔隙率与渗透性,能够满足构建压缩空气储能系统的基本储层条件,构造上无断裂、裂缝且无泄漏,边界设为封闭边界,储层内有底水,地层分析表明在构造上不存在泄漏的情况。

采用CMG软件建立压缩空气储能地层中气体流动数模模型,模型网格划分为 $226 \times 124 \times 15$ ,总计420360个,网格划分按照行业标准要求在10~20 m之间,考虑刻画精细,本研究选用网格尺寸为10 m。图1展示了地层渗透率分布特征,在渗透率较高、构造高部位部署了一水平井作为压缩空气储能的注采

井，见图 1 中位置标识。

为了准确评价注采空气过程中温度、压力、摩阻等参数的影响，采用商业数值模拟软件 CMG-STARS 的离散井模块建立井筒流动模拟模型，模拟压缩空气在井筒流动过程中温度、压力变化情况；在此基础上，根据储层物性参数、地层压力与温度等参数建立气藏数值模拟模型，模拟压缩空气进入地层后的温度、压力变化情况；二者以井底为界，进行压缩空气井筒流动和地层渗流的耦合(图 2)。

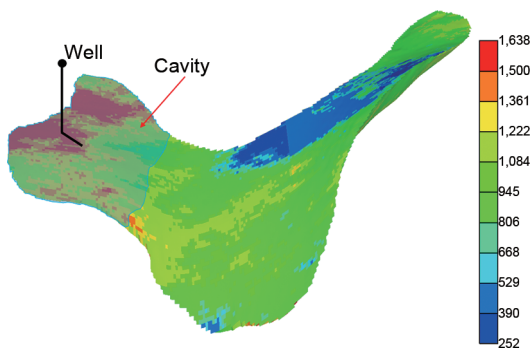


图 1 垦东 642-7 含水层渗透率分布图  
Fig. 1 Permeability distribution of Kendong 642-7 aquifer

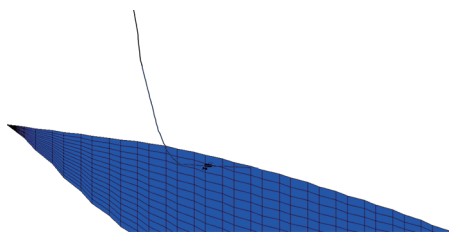


图 2 井筒-地层耦合模型图  
Fig. 2 Wellbore-formation coupling model

本工作采用三维多组分数值模拟方法，选择模拟气液两相流动。模型中主要考虑的组分包括氮气(N<sub>2</sub>)、氧气(O<sub>2</sub>)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和水(H<sub>2</sub>O)。其中每种组分的具体参数详见表 1。

为准确评价注采空气过程中温度、压力、摩阻

表 1 流体组分数物性参照表

Table 1 Reference table of fluid physical properties

组分	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
临界压力/MPa	22.05	3.394	5.046	7.376
临界温度/°C	374.30	-146.95	-118.55	31.05
分子质量/(kg/mol)	0.018	0.02801	0.03199	0.04401
初始地层中摩尔分数/%	100	0	0	0
注入气体中摩尔分数/%	0	78	21	1

等参数的影响，本研究建立离散井筒模型，模拟压缩空气在井筒中的温压变化；与压缩空气在地层中流动的数值模拟模型结合，以注采井井底为端点，实现井筒流动与地层渗流的耦合。

在考虑高速非达西流动时，由于紊流现象的存在，采用传统模型导致预测产量与实际产量不符。为了更准确地计算压力变化和地层流体流动情况，确保数值模拟模型的有效性，模型中采用 Geertsma correlation 方法，引入非达西渗流参数表征流动特征，但是该参数的数值需要根据储层特征确定。本工作采用自行搭建的高速注采空气的实验流程，对目标储层的岩心开展实验，测试在不同的流量区间下的压力平方差与流量的关系并绘制图 3 曲线。结合曲线得出二项式产能方程[式(1)]中流量的二次项系数，反求出非达西渗流系数 β，根据现场相渗数据将式(2)中的非达西渗流系数 β 与岩心渗透率 K 和气相相对渗透率 K<sub>rg</sub> 的乘积进行指数关系拟合，如图 4 所示，求得 α=2×10<sup>10</sup>，N<sub>1</sub>=-1.423。将以上参数写入数值模拟的关键字中，可将非达西渗流规律合理表征在数值模拟模型中。

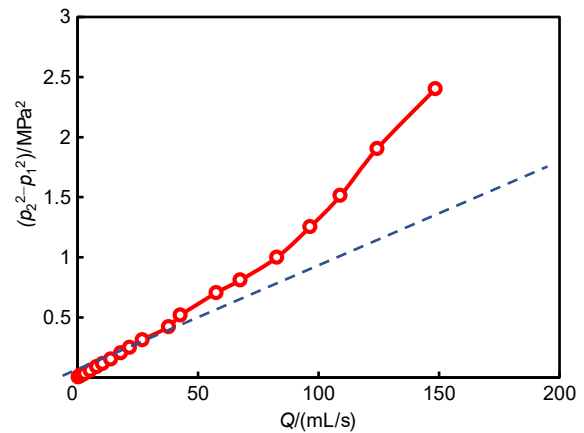


图 3 岩心流量与压力平方差的关系  
Fig. 3 Relationship between core flow and pressure square deviation

$$p_2^2 - p_1^2 = \frac{8p_{sc}\mu ZT(L_2 - L_1)}{\pi k d^2 Z_{sc} T_{sc}} Q + \frac{32\beta M p_{sc}^2 ZT(L_2 - L_1)}{R\pi^2 d^4 Z_{sc}^2 T_{sc}^2} Q^2 \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{(KK_{rg})^{N_1}} \quad (2)$$

式中，p<sub>1</sub>与p<sub>2</sub>分别为供给端压力与产出端压力，MPa；p<sub>sc</sub>为标准状态下气体的压力，MPa，一般情况下取 0.101 MPa；Q 为流量，mL/s；L 和

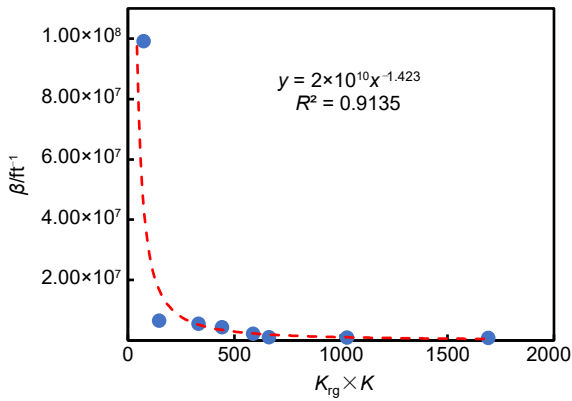


图4 渗透率和相对渗透率乘积与非达西流系数拟合曲线

Fig. 4 The permeability and relative permeability product were fitted to the non-Darcy seepage coefficient

$d$  分别为管道长度和管道内径,  $m$ ;  $T_{sc}$  为标准状态下的地层温度,  $K$ , 一般取  $273.15 K$ ;  $Z_{sc}$  为标准状态下气体压缩因子, 量纲为  $1$ ;  $\alpha$  表示非达西因子常数项;  $K_{rg}$  表示气相相对渗透率;  $K$  表示渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $N_1$  为非达西因子渗透率项。

## 2 能量损失评价模型建立

对高速循环注采空气过程, 以注采井井口为研究端面, 采用建立的井筒-地层耦合模型, 分别计算循环注采过程中压缩空气体系的温度、压力、流量变化, 建立系统能量评价方程, 对注入阶段和采出阶段的系统能量分别进行计算, 得到系统沿程能量损失状况, 并开展评价。

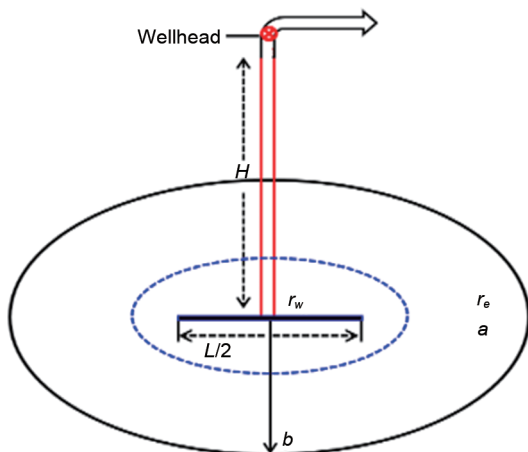


图5 压缩空气储能中的能量损失分段示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of energy loss in compressed air energy storage

根据热力学原理, 对于一定质量的流体, 其能量由内能( $U$ )、势能( $mgZ$ )、动能( $mv^2/2$ )和压缩能( $PV$ )组成, 用式(3)表示。

$$E_t = U + mgZ + \frac{mv^2}{2} + PV \quad (3)$$

式中:  $E_t$  表示一定量的气体的总能量,  $kJ$ ;  $m$  为一定量气体的质量,  $kg$ ;  $T$  是气体具有的温度,  $^{\circ}C$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $Z$  选取端面的相对高度,  $m$ ;  $v$  是气体的流速,  $m/s$ ;  $P$  为气体的压力,  $kPa$ ;  $V$  是一定量气体的体积,  $m^3$ 。

设端面处注入阶段和采出阶段气体总能量分别为  $E_{t1}$ 、 $E_{t2}$ , 两者之差  $\Delta E_t$  即为能量损失。

$$\Delta E_t = E_{t1} - E_{t2} \quad (4)$$

因为研究端面位置固定, 势能项不发生变化, 此时能量损失主要包括内能变化、动能变化和压能变化, 用式(5)表达。

$$\Delta E_t = U_1 - U_2 + \left(\frac{mv^2}{2}\right)_1 - \left(\frac{mv^2}{2}\right)_2 + (PV)_1 - (PV)_2 \quad (5)$$

采用构建的井筒-地层耦合流动模型, 分别计算出注入和采出过程中, 压缩空气体系从井口端面到注入井底、注入井底到气囊腔中的压力、温度、流量速度, 代入到式(5)中, 可以得到沿程的能量变化状况, 进而开展能量损失评价。

## 3 压缩空气储能过程中的能量损失

在压缩空气储能过程中, 需要进行高速的循环注采过程, 整个系统中压缩空气流经地面井口、注采井底、气囊腔三个位置。其中, 压缩空气在井筒中的能量变化主要来源于摩擦损失、重力能量变化、井筒温度变化。

### 3.1 注采过程中摩擦损失的变化

由于注采过程中压缩空气都是通过井筒进行输送, 在高速注采空气过程中, 会产生一定的摩擦损失。考虑井筒的粗糙度对摩擦影响, 采用式(6)计算沿程的摩擦损失, 其中摩擦系数由式(7)计算得到。

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[ \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \quad (7)$$

式中:  $h_f$  为摩擦损失,  $MPa$ ;  $L$  和  $D$  分别为管道长度和管道内径,  $m$ ;  $f$  为摩擦系数, 量纲为  $1$ ;  $\epsilon/D$  为表面相对粗糙度(其中  $\epsilon$  为代表绝对粗糙度的

线性量，单位为英尺，1英尺=0.3048 m)，量纲为 1； $Re$ 为雷诺数，量纲为 1。

主要影响摩阻的参数是井筒的粗糙程度，随着井筒粗糙度增加，摩阻损失迅速增加，图 6 表示了 3 种粗糙度下注入和采出过程中的摩阻损失。不论注入和采出过程，从井口端面开始随着深度增加，摩阻损失都在增加。比较而言，采出过程的摩阻损失要高于注入阶段的摩阻损失，原因是注入阶段井筒中气体压力高于采出阶段气体压力，在气体质量一定条件下，采出阶段气体流速高于注入阶段，造成摩阻损失相对较高。将采出阶段的总摩阻与注入阶段的总摩阻比较，发现在不同粗糙度下，采出阶段的总摩阻损失是注入阶段总摩阻损失的 4.7~5.3 倍。此外，随着井筒粗糙度增加，摩阻增加，可见增加井筒光滑性是降低摩阻的好方法。

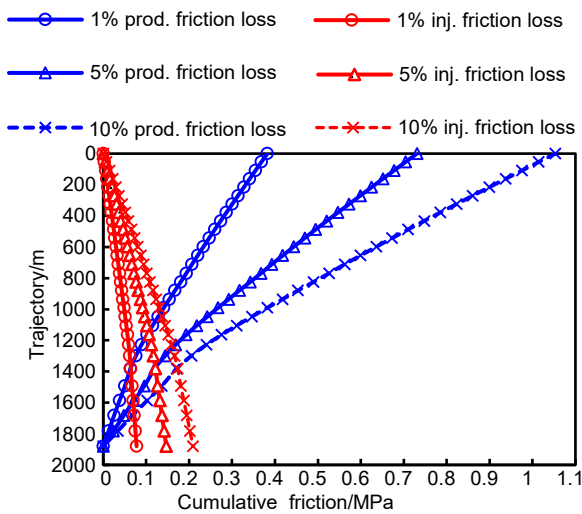


图 6 不同粗糙度系数下的沿程摩阻损失对比  
Fig. 6 Comparison of friction loss along the path under different roughness coefficients

### 3.2 注采过程中动能损失分析

压缩空气在井筒中流动，具有一定的动能。由于压缩空气在注采过程中温度、压力一直发生变化，导致压缩空气的体积发生变化，进而影响动能变化。

图 7 展示了沿着井筒深度气体通过井筒界面的流速变化，在注入阶段，随着井深增加，压缩空气由于压力增加，体积减小、流速逐渐降低；在产出阶段，沿着井深轨迹向上，由于压力降低，气体膨胀，压缩空气流速逐渐上升。由于流速差异，注采阶段的动能发生变化，以一定质量的气体为评价标

准，相同的井深条件下产出阶段动能与注入阶段动能比值表征动能变化，见图 8。在总注气量一定的情况下，采气阶段的压缩空气动能要高于注气阶段的动能，其中采出阶段的动能是注入阶段动能的 4.6~5.1 倍；从井底向上动能比值不断增加，在 325 米处出现拐点，原因是在该深度处井筒中气体与井壁温度差最大，压缩空气若继续向上运移，受地表地层温度影响，气体温度逐渐降低，流速增加幅度开始降低。

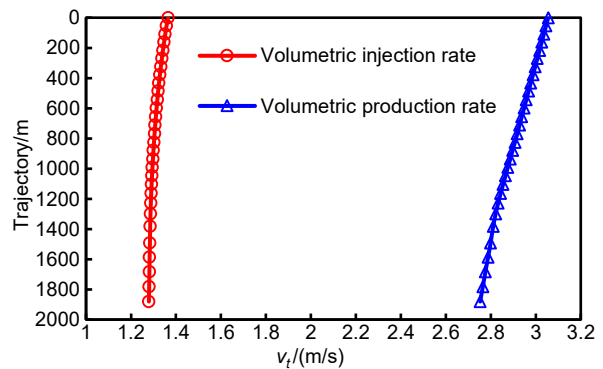


图 7 沿井深轨迹的压缩空气流速变化对比  
Fig. 7 Comparison of compressed air velocity along the well depth trajectory

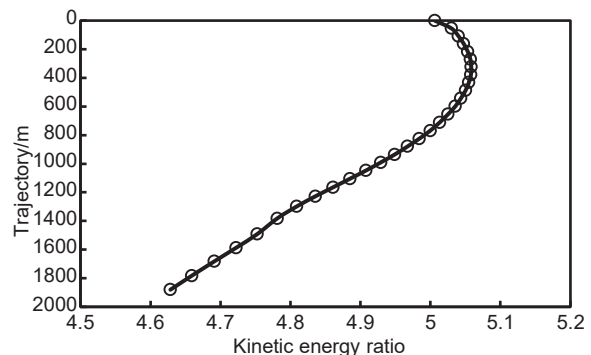


图 8 沿井深轨迹的注入采出过程动能比值变化  
Fig. 8 Change of kinetic energy ratio during injection and production along well depth trajectory

### 3.3 注采过程中内能损失分析

压缩空气由于经过压缩、地层加热等环节后，内能发生变化。需要说明的是，在注入阶段，经过压缩机提取热量后，压缩机出口的气体温度为 20℃。

图 9 展示了注入和采出阶段井筒内流体温度变化情况，在注入阶段压缩空气沿着井筒向下，压缩空气压力增加，被地层加热后温度逐渐上升；压缩空气在气囊腔中经过地层加热，随后在采出阶段，

沿着井筒向上, 压力、温度逐渐降低。在相同的深度下, 采出阶段的压缩空气温度要高于注入阶段的压缩空气温度, 因此采出阶段压缩空气的内能是逐渐增加的。

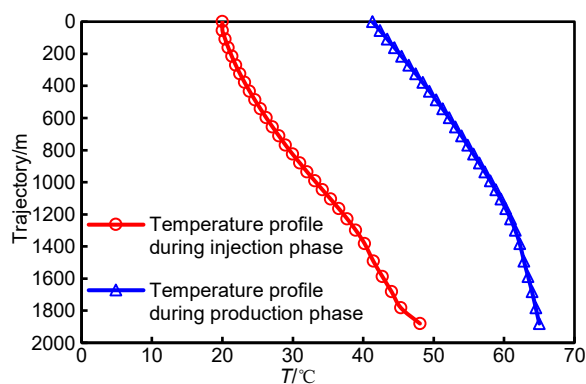


图9 沿井深轨迹压缩空气温度变化

Fig. 9 Compressed air temperature changes around the wellbore along the well depth trajectory

### 3.4 注采过程中压能损失分析

循环注采空气过程中, 由于压缩空气不断与地层、井筒进行热交换, 同时受到摩阻、势能的影响, 在循环注采中体系的压能在不断发生变化。采用耦合模型可以计算出整个循环过程中压缩空气体系的压力、体积变化, 进而计算整个体系压能的沿程变化。

图10展示了注采过程中压能变化, 注入阶段压能不断上升, 采出阶段压能不断降低; 但是相同的深度条件下, 注入阶段的压能要小于采出阶段的压能, 即经过地层加热后, 压缩空气的压能是逐渐增加的。压缩空气在地下由于地层把空气加热, 压缩空气内能增加, 压能上升, 即CAESA具有地热开采的功能。

### 3.5 注采过程中能量构成分析

上文分项分析了注采过程中压缩空气体系的各种能量变化特征, 以式(3)为基础, 分别计算从井底到井口过程中沿程压缩空气体现能量变化, 得到注采过程中总的能量分布状况。以地面20°C注入 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 气体为例, 其中注入气体时间为8.3 h, 注气速度 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ ; 采出气体时间为4 h, 注气速度 $2.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ , 在该注采量下计算相应的能量分布。

图11展示了注入阶段的系统能量构成, 从中

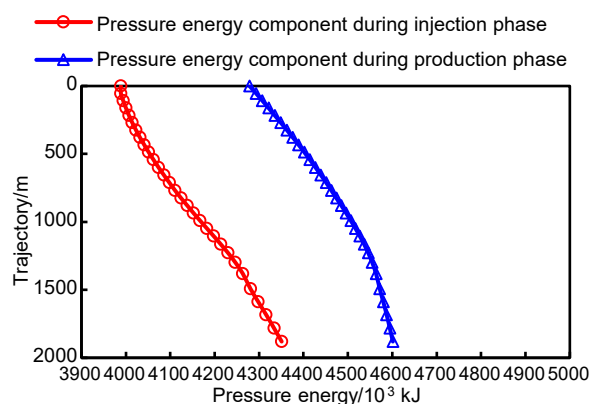


图10 沿井深轨迹的注入阶段和采出阶段的压能变化  
Fig. 10 Pressure energy changes at injection and production stages along the well depth trajectory

可以看出注入阶段压能是最主要的部分, 占到78%~88%; 其次是注入流体内能, 占比为5.5%~20.9%; 势能在初期还占有一定的比例, 为16.3%, 到达井底后逐渐降低为0; 动能部分所占的比例极小, 仅为0.8%。

图12展示了采出阶段的系统能量构成, 从中可以看出采出阶段压能也是最主要的部分, 其次是注入流体内能; 势能在初期还占有一定的比例, 到达井底后逐渐降低为0; 动能部分所占的比例极小, 但是由于采出阶段速度大, 数值上要高于注入阶段的动能比例。

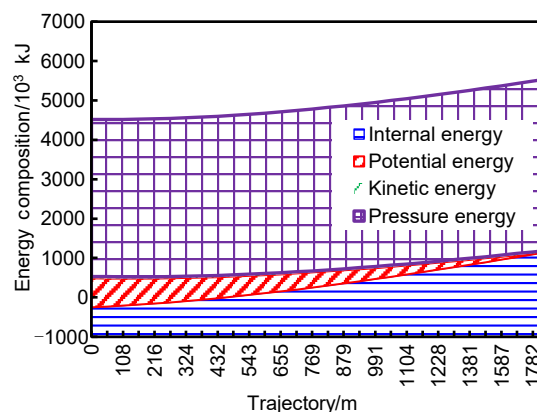


图11 沿井深轨迹注入阶段系统能量构成

Fig. 11 System energy composition during injection stage along well depth trajectory

综上, 在压缩空气循环注采过程中, 压能和内能是主要构成部分, 是导致压缩空气体系压力和温度变化的因素, 也是导致整个系统能量变化的主要因素。

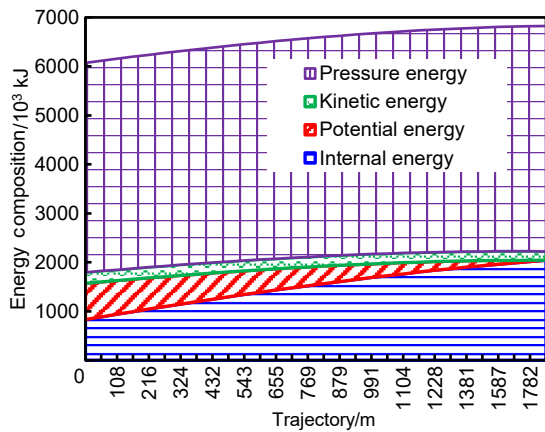


图 12 沿井深轨迹采出阶段系统能量构成  
 Fig. 12 System energy composition in the recovery stage along the well depth trajectory

### 4 注采条件对系统能量损失的影响

在压缩空气储能过程中，注采条件会对系统能量产生影响，下文针对工作气量、井底污染程度和井筒摩阻等因素，分析不同参数水平对能量损失程度的影响。由于压缩空气体系的压力和温度是影响系统能量的主要参数，因此下文主要分析压缩空气的压力、温度变化特征。

#### 4.1 工作气量对减损的影响研究

分别设计  $1.9 \times 10^4$ 、 $2.5 \times 10^4$ 、 $4.0 \times 10^4$ 、 $4.5 \times 10^4$ 、 $5.0 \times 10^4$ 、 $5.7 \times 10^4$ 、 $7.0 \times 10^4$ 、 $7.6 \times 10^4$   $m^3$  的工作气量，以井底采出端面为评价点，开展注采过程中的能量变化情况研究。

从图 13 中可以看出，随着工作气量的增加，注入过程中井底流压不断上升，而生产过程中随着工作气量增加，井底压力不断降低，引起压降损耗增加。随着工作气量增加，注入过程中井底压缩空气的温度快速降低，而采出过程中压缩空气在井底的温度缓慢降低，这主要是地层对其进行了预热。注入过程中压缩空气主要是依靠井筒加热，因此温度降低的速度快。

#### 4.2 表皮系数对减损的影响研究

表皮系数反映了井底污染造成的能量损耗，分别设计表皮系数为 3、2、1、0、-1、-2、-3 共 7 种情况，开展注采过程中的能量变化分析，采用同上的指标开展评价计算和对比。

从图 14、15 中知，随井底表皮系数增加，注入过程中井底流压不断上升，生产过程中随着表皮系数增加，井底压力不断降低，引起压降损耗增

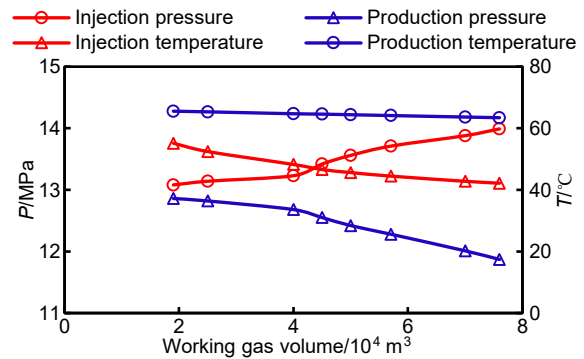


图 13 工作气量对注入、采出过程中压缩空气的温度、压力影响

Fig. 13 Influence of working gas volume on temperature and pressure of compressed air during injection and production

加。由于表皮系数存在，注入和采出过程井底的压力损耗都增加。

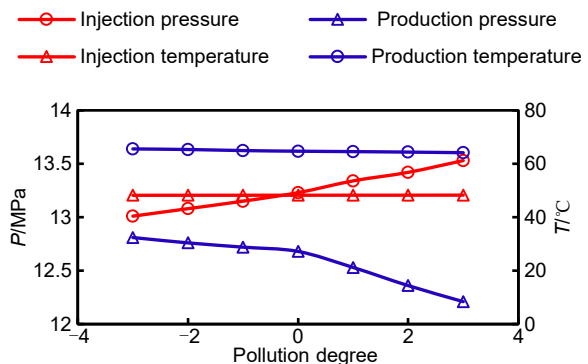


图 14 井底污染程度对注入、采出过程中压缩空气的温度、压力影响

Fig. 14 Influence of bottom hole pollution on temperature and pressure of compressed air during injection and production

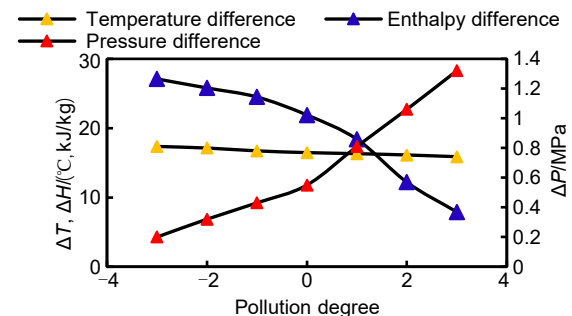


图 15 井底污染程度对注入、采出过程中压缩空气温度、压力、焓值差值影响

Fig. 15 Influence of bottom hole pollution on temperature, pressure and enthalpy differences of compressed air during injection and production

### 4.3 摩阻对减损的影响研究

采用井筒-地层流动耦合模型展开计算,设计0.001、0.002、0.003、0.004、0.005、0.008、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.07共12种井筒粗糙度的模型,计算注采过程中的摩阻压降,图16表明,当井筒粗糙度超过0.01后,摩阻压降增加明显。

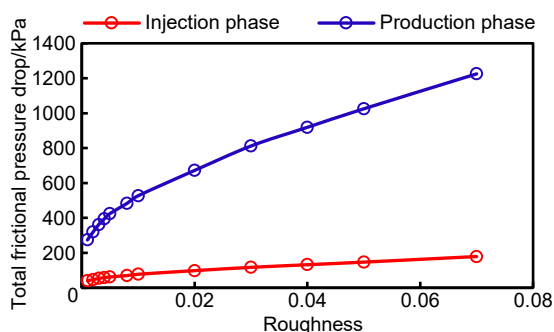


图16 井筒粗糙度对注入和采出过程总摩阻压降的影响  
Fig. 16 Influence of tubing roughness on the total frictional pressure drop during injection and production

## 5 结论

(1) 本工作依托建立的地层-井筒流动耦合模型,提出了考虑压缩空气体系内能、势能、动能、压能四部分的能量评价模型,可以全面表征注采空气过程中沿程系统能量变化。

(2) 分析表明 CAESA 循环注采过程中,4种主要能量,从井底到井口采出过程中,各种能量所占比例不断变化,其中压能占到总能量的80%左右,其次是内能。因此循环注采过程中压缩空气的压力、温度变化是影响系统能量的主要方面。此外,能量分析表明 CAESA 具有一定的地热开采特征。

(3) 工作气量、井底污染程度与井筒粗糙度是影响能量损失的主要工程因素。工作气量增加会加剧注采过程中的压力损耗,且对注入温度的影响更显著,但同时压缩空气发电的功率增加;较低的表皮系数会降低压缩空气体系的能量损耗;当井筒粗糙度超过0.01时,摩阻压降增幅明显,这表明优化井筒光滑性可作为高效减损手段。

(4) 本研究通过建立井筒-地层流动耦合模型,量化了 CAESA 注采过程的能量损失特征及关键影响因素,为系统效率优化奠定了理论基础。未来研

究可进一步聚焦压能损失的精细化调控,结合数值模拟与现场试验,探索多参数协同优化方案,同时深化地层-井筒热交换机理研究,以充分发挥 CAESA 系统的地热-储能协同效益,推动其工程应用与性能提升。

### 参考文献

- [1] 梅生伟,公茂琼,秦国良,等.基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J].电网技术,2017,41(10):3392-3399. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992.  
MEI S W, GONG M Q, QIN G L, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3392-3399. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992.
- [2] 文贤旭,张世海,王锁斌.压缩空气储能技术及示范工程综述[J].应用能源技术,2018(3):43-48. DOI:10.3969/j.issn.1009-3230.2018.03.012.  
WEN X K, ZHANG S H, WANG S B. Summary of compressed air energy storage technology and demonstration projects[J]. Applied Energy Technology, 2018(3): 43-48. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2018.03.012.
- [3] 罗宁,何青,刘文毅.压缩空气储能系统储气装置研究现状与分析[J].储能科学与技术,2018,7(3):489-494. DOI:10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0180.  
LUO N, HE Q, LIU W Y. The development status and energy storage characteristic of gas storage device of compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(3): 489-494. DOI:10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0180.
- [4] 胡贤贤,张可霓,郭朝斌.压缩空气地下咸水含水层储能技术[J].新能源进展,2014,2(5):390-396. DOI:10.3969/j.issn.2095-560X.2014.05.011.  
HU X X, ZHANG K N, GUO C B. Compressed air energy storage using saline aquifer as storage reservoir[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(5): 390-396. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2014.05.011.
- [5] 郭祚刚,马溪原,雷金勇,等.压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述[J].南方能源建设,2019,6(3):17-26.  
GUO Z G, MA X Y, LEI J Y, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3): 17-26.
- [6] OLDENBURG C M, PAN L H. Porous media compressed-air energy storage (PM-CAES): Theory and simulation of the coupled wellbore-reservoir system[J]. Transport in Porous Media, 2013, 97(2): 201-221. DOI:10.1007/s11242-012-0118-6.
- [7] LI Y, LI Y, LIU Y N, et al. Compressed air energy storage in aquifers: Basic principles, considerable factors, and improvement approaches[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2019: 20190015. DOI:10.1515/revce-2019-0015.
- [8] 刘慧,丁心鲁,张士杰,等.地下储气库注气过程一体化压力及地层参

- 数计算方法[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 64-71.
- LIU H, DING X L, ZHANG S J, et al. Integrated calculation method of pressure and formation parameters in gas injection process of underground gas storage[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 64-71.
- [9] WANG J K, LIU H Y, ZHANG J L, et al. Lost gas mechanism and quantitative characterization during injection and production of water-flooded sandstone underground gas storage[J]. Energies, 2018, 11(2): 272. DOI:10.3390/en11020272.
- [10] 王皆明, 李春, 孙军昌, 等. 气藏型储气库井注采动态不稳定流分析方法[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 156-165. DOI:10.11698/PED.2022.01.14.
- WANG J M, LI C, SUN J C, et al. An analysis method of injection and production dynamic transient flow in a gas field storage facility[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 156-165. DOI:10.11698/PED.2022.01.14.
- [11] 李盼, 杨晨, 陈雯, 等. 压缩空气储能系统动态特性及其调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2295-2305. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.190859.
- LI P, YANG C, CHEN W, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2295-2305. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190859.
- [12] 孙晓霞, 桂中华, 高梓玉, 等. 压缩空气储能系统动态运行特性[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(6): 1840-1853. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0181.
- SUN X X, GUI Z H, GAO Z Y, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(6): 1840-1853. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0181.