

储气库多周期注采条件下的管柱受力特征分析

张仁好¹, 温廷钧², 苏堪华¹, 李力民², 姜婷婷², 郭正伟¹, 曾治友¹

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²重庆相国寺储气库有限公司, 重庆

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年6月11日; 发布日期: 2024年6月21日

摘要

地下储气库是天然气能源管理的高效手段, 注采管柱在天然气调峰过程发挥着重要作用, 在不同注采周期下注采管柱的受力状态有很大差异, 不同的环空带压情况, 又会引起管柱受力状态发生变化, 会加速管柱损坏。因此, 本文建立了考虑鼓胀效应、活塞效应、流体摩阻效应和温度效应的注采管柱力学分析模型, 以某储气库为例, 分析了不同环空压力、注采气时运行压力和不同封隔器位置下管柱受力和中性点位置的变化规律, 且该管柱在井口、封隔器和悬挂器处轴向载荷突变较大, 管柱中性点位置在965~1660 m之间变化, 这使该区域管柱处于拉压交变的应力状态, 容易引起管柱疲劳损坏和形成漏气点。该研究结果对储气库注采管柱漏气点监测、注采压力参数和封隔器安放位置优化设计有重要意义。

关键词

储气库, 注采管柱, 多周期注采, 交变载荷, 中性点

Analysis of Stress Characteristics of Injection-Production String under Multi-Cycle Conditions in Gas Storage

Renhao Zhang¹, Tingjun Wen², Kanhua Su¹, Limin Li², Tingting Jiang², Zhengwei Guo¹, Zhiyou Zeng¹

¹School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Chongqing Xiangguosi Gas Storage Co., Ltd., Chongqing

Received: Apr. 25th, 2024; accepted: Jun. 11th, 2024; published: Jun. 21st, 2024

Abstract

Underground gas storage is an efficient means of natural gas energy management, and the injection-production string under multi-cycle conditions has different stress characteristics. Different annular pressure conditions will cause changes in the stress state of the string, which will accelerate the damage of the string. Therefore, this paper establishes a mechanical analysis model of the injection-production string considering the effects of expansion, piston, fluid friction, and temperature. Taking a certain gas storage as an example, the law of change of the stress and neutral point position of the string under different annular pressures, injection-production gas operating pressures, and different packer positions is analyzed. The axial load mutation is large at the wellhead, packer, and hanger positions, and the neutral point position of the string changes between 965 and 1660 m, which makes the string in the region of the string处于拉压交变的应力状态, which is easy to cause fatigue damage and gas leakage points. The research results are of great significance for the monitoring of gas leakage points of the injection-production string, the optimization of injection-production pressure parameters and packer placement.

文章引用: 张仁好, 温廷钧, 苏堪华, 李力民, 姜婷婷, 郭正伟, 曾治友. 储气库多周期注采条件下的管柱受力特征分析[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(2): 170-178. DOI: 10.12677/jogt.2024.462022

tion and production string plays an important role in the process of peak regulation of natural gas. The stress state of the string varies greatly in different injection and production cycles, and the stress of the pipe string will change under different annular pressure conditions, which makes the pipe string subject to cyclic and alternating loads for a long time, which will accelerate the damage of the pipe string. Therefore, a mechanical analysis model of injection-production string was established, which takes into account swelling effect, piston effect, fluid friction effect and temperature effect. A gas storage well was taken as an example to analyze the variation law of pipe force and neutral point position under different annulus pressure, operating pressure during gas injection and production, and different packer positions. In addition, the axial load of the string at the wellhead, packer and hanger changes greatly. The position of the neutral point of the string varies between 965 and 1660 m, which puts the string in the tension and pressure alternating stress state, which is easy to cause fatigue damage to the string and the gas leakage point. The research results are of great significance to the monitoring of gas leak point of injection-production string during gas storage process, the parameters design of the injection-production pressure and packer placement.

Keywords

Gas Storage, Injection-Production String, Multi-Cycle Injection and Production, Alternating Loads, Neutral Point

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着能源需求的不断增加和能源供给结构的不断调整,天然气作为清洁、高效的能源形式备受重视。储气库作为天然气储存和调峰的重要设施,在确保能源供应安全和平衡能源市场上发挥着至关重要的作用[1][2]。在储气库井多周期注采气过程中,注采气压、环空压力、注采气量和温度处于不断变化的状态,此时管柱不仅受到自身重力的作用,同时还受到鼓胀、活塞、气流摩阻和温度效应产生的轴向载荷作用[3][4][5]。长期运行下,这种循环交变的轴向载荷会降低管柱的强度,使管柱发生疲劳失效出现漏气现象,对储气库的安全生产构成威胁[6]。因此,对注采气过程中管柱的受力特性进行分析有着十分重要的意义。Lubinski 和 Hammerlindl 等人[7][8][9]以油管为研究对象,考虑管柱温度和内外压力以及屈曲效应,建立了油管-封隔器力学分析模型,为井下油管柱受力特征和安全性分析奠定了基础。国内学者,丁亮亮、陈瑞和徐帅等人[10][11][12]在前人研究的基础上,对不同工作环境下的井下油管-封隔器管柱系统展开了大量的理论研究,为井下油管受力特性分析及现场应用提供了理论支撑,但大多没有考虑封隔器位置对管柱轴向力的影响,且在注采气过程中,对于管柱中性点位置的变化规律研究很少。而位于中性点位置的管柱处于拉-压交变的应力状态,长期工作下中性点位置变化区域内的螺纹接头容易发生疲劳失效,形成漏气点,影响储气库的安全运行。因此,对储气库注采管柱进行力学分析,研究管柱中性点位置变化范围和规律有很好的实际意义。

本文针对注采管柱运行过程中的工作环境及受力特征,进行了储气库多周期注采条件下的管柱受力特征分析,建立了考虑膨胀、活塞、流体摩阻等多种效应的注采管柱力学分析模型,以一口井为例,分析了环空压力、注气压力、采气压力以及封隔器位置对管柱所受载荷的影响规律,以及该井在多周期注采下,管柱所受轴向载荷及中性点位置的分布规律,确定了易形成气体泄露点的位置。研究可为储气库

注采管柱漏气点监测和参数优化提供思路和依据。

2. 注采管柱所载荷分析

2.1. 鼓胀效应引起的轴向载荷

注采管柱在内外压差的作用下,会产生轴向伸长或缩短,由于封隔器会限制管柱的轴向变形,因此鼓胀效应(图 1)会在封隔器上产生鼓胀力 F_1 , 其表达式为:

$$F_1 = \frac{\pi\mu}{2} (\bar{P}_i d^2 - \bar{P}_0 D^2) \times 10^9 \quad (1)$$

式中: μ 为管柱的泊松比; P_0 为管柱外压力变化的平均值, MPa; P_i 为管柱内压力变化的平均值, MPa; D 为管柱外径, m; d 为管柱内径, m。

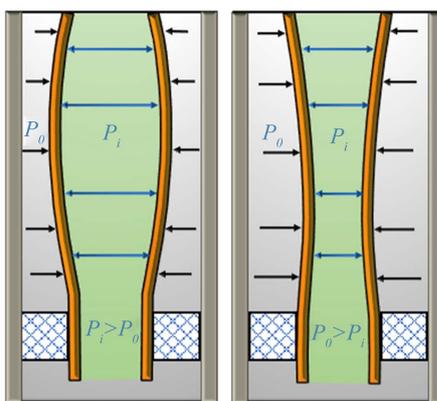


Figure 1. Schematic diagram of swelling effect

图 1. 鼓胀效应示意图

2.2. 活塞效应引起的轴向载荷

由于注采管柱径向存在面积差,在管柱内外压力差的作用下会产生活塞力,从而引起管柱产生轴向变形和轴向载荷,如图 2 所示。

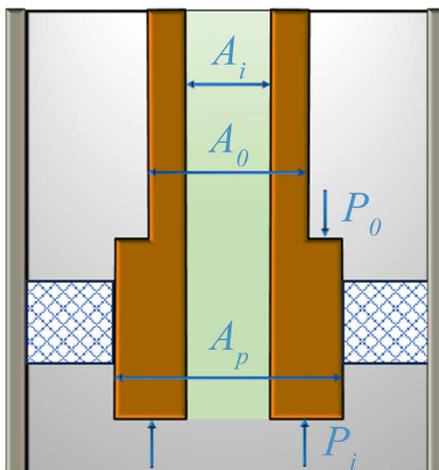


Figure 2. Schematic diagram of piston effect

图 2. 活塞效应示意图

管柱内外压产生的活塞力和活塞力引起的管柱轴向变形, 分别用 F_2 和 ΔL_2 表示:

$$F_2 = (A_p - A_i)P_i - (A_p - A_0)P_0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta L_2 &= -\frac{F_2 L \times 10^{-3}}{EA} \\ &= -\frac{L \times 10^{-3}}{EA} (A_p - A_i)P_i - (A_p - A_0)P_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ΔL_2 为活塞效应引起的管柱轴向变形, m; L 为管柱长度, m; E 为管柱弹性模量, MPa; A 为管柱的横截面积, m^2 ; P_0 为封隔器上部环空压力, MPa; P_i 为管柱内压, MPa; A_p 为封隔器密封腔的横截面积, m^2 ; A_0 为管柱外截面积, m^2 ; A_i 为管内截面积, m^2 。

2.3. 气流摩阻效应引起的轴向载荷

在储气库注采气过程中, 注采管柱内高速流动的天然气会和管柱内壁产生摩阻力, 摩阻力与注采气时天然气的流向一致(图 3), 可用下式表示:

$$F_3 = \pm \frac{\pi d^2 \Delta P_f}{4} \quad (4)$$

$$\Delta P_f = \frac{8\lambda L Q^2 \rho}{\pi^2 d^2} \times 10^{12} \quad (5)$$

式中: ΔP_f 为摩阻压降, MPa; Q 为注采气量, m^3/s ; L 为管柱长度, m; ρ 为天然气密度, g/cm^3 ; λ 为摩阻系数, 取 0.03; d 为管柱内径, mm。

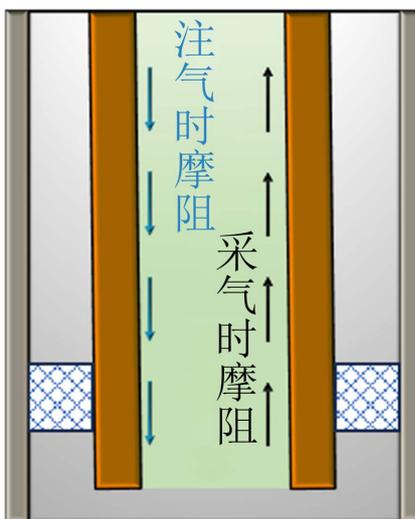


Figure 3. Schematic diagram of gas friction effect during gas injection and production
图 3. 注采气时气体摩阻效应示意图

2.4. 温度效应引起的轴向载荷

注采管柱在井筒中, 由于注入的天然气与管柱间摩擦会产生热, 使管柱温度升高, 以及不同深度地层温度的变化, 从而会产生温度效应, 由温度升高或降低而引起的管柱轴向变形和轴向力, 分别用下式表示:

$$\Delta L_4 = \alpha L \Delta T \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_4 &= -\alpha E A \Delta T \times 10^3 \\ &= -\frac{1}{4} \alpha E \pi (D^2 - d^2) \Delta T \times 10^3 \end{aligned} \quad (7)$$

式中： ΔL_4 为温度效应引起的管柱长度变化，m； α 为管材的线膨胀系数(一般取 1.2×10^{-5})， $1/^\circ\text{C}$ ； ΔT 为井筒内温度的变化， $^\circ\text{C}$ ； F_4 为温度效应引起的管柱载荷，kN； E 为管材的弹性模量，MPa； A 为管柱的横截面积， m^2 ； D 为管柱外径，m； d 为管柱内径，m。

3. 实例计算

本文以某储气库注采井为例，该储气库原始地层压力为 28.73 MPa，地层温度为 62.23 $^\circ\text{C}$ ，每年注气期为 4~10 月，采气期为 11 月到下一年 3 月。该井直井段管柱长度为 1725 m，造斜段管柱弧长 500 m，曲率半径为 600 m，稳斜段长度为 234 m，最终井斜 47.75 $^\circ$ ，注采管柱材料采用 13Cr 材质，直径为 114.3 mm，厚度为 6.88 mm，封隔器和悬挂器分别位于 2103.3 m 和 2461.6 m 位置处，环空保护液密度为 1.2 g/cm^3 ，天然气密度为 $0.685 \times 10^{-3} \text{g}/\text{cm}^3$ ，井口温度 27 $^\circ\text{C}$ 。

3.1. 环空压力变化对管柱受载的影响

在储气库运行过程中，由于管柱螺纹接头漏气等原因，会引起井筒的环空内存在压力，在此情况下，分析条件如下：注采气压力 18 MPa，环空压力从 2 MPa 增加到 20 MPa，注采气量 $80 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。如图 4(a)所示，在注气过程中，随着环空压力的增加，井口处管柱轴向拉力从 303.39 kN 减小到 188.86 kN，封隔器处轴向压力从 58.34 kN 增加到 154.10 kN，中性点位置从 1676.40 m 上移至 1075.00 m，管柱受拉部分减少，受压部分增加，采气过程与注气时规律一致。

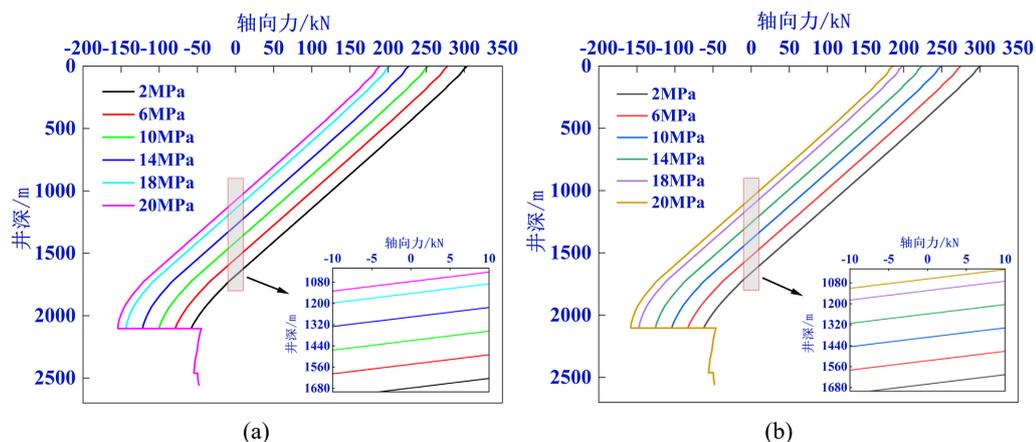


Figure 4. Changes of axial force and neutral position of the column under different annular pressures. (a) Axial force changes during gas injection; (b) Axial force changes during gas production

图 4. 不同环空压力下管柱轴向力和中性点位置变化规律。(a) 注气过程轴向力变化；(b) 采气过程轴向力变化

3.2. 注采气压力变化对管柱受载的影响

计算条件：注采气压力 12~24 MPa，环空压力 10 MPa，注气量为 $75 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，采气量为 $120 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。在注气过程中，随着注入气体的增加，井底压力逐渐增大，则注气压力也要相应增加，如图 5(a)所示，随着注气压力的增加，管柱轴向力曲线往右移动，井口处轴向拉力从 221.16 kN 增加到 283.56 kN，

封隔器处轴向压力从 127.07 kN 减少到 14.70 kN，中性点位置从 1249.95 m 下移至 1574.99 m；在采气过程中，随着气体的采出，井底压力逐渐减小，则采气压力也相应的减小，如图 5(b)所示，随着采气压力减小，管柱轴向力曲线向左移动，井口处管柱轴向拉力从 279.55 kN 减少到 217.49 kN，封隔器处轴向压力从 16.13 kN 增大 131.27 kN，中性点位置从 1550.00 m 上移至 1219.20 m。

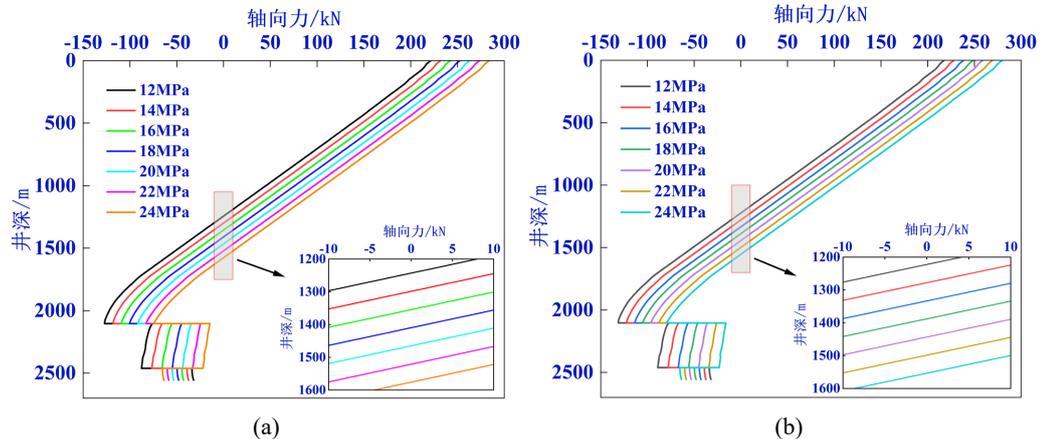


Figure 5. Changes of axial force and neutral position of the string under different injection-production pressures. (a) Axial force changes during gas injection; (b) Axial force changes during gas production
图 5. 不同注采压力下管柱轴向力和中性点位置变化规律。(a) 注气过程轴向力变化；(b) 采气过程轴向力变化

3.3. 封隔器位置变化对管柱受载的影响

保持悬挂器位置不变，将封隔器从 1800 m 位置向下移动到 2200 m 位置，计算条件为：注采气压力 16 MPa，环空压力 14 MPa，注采气量为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。如图 6(a)所示，在注气过程中，随着封隔器位置向下移动，管柱轴向力曲线向左移动，井口处管柱轴向拉力从 233.18 kN 减小到 227.89 kN，封隔器处轴向压力从 94.80 kN 增大 140.96 kN，由此可见轴向压力增加幅度比拉力大，管柱中性点位置上移，但变化不大，采气过程与注气时规律一致。

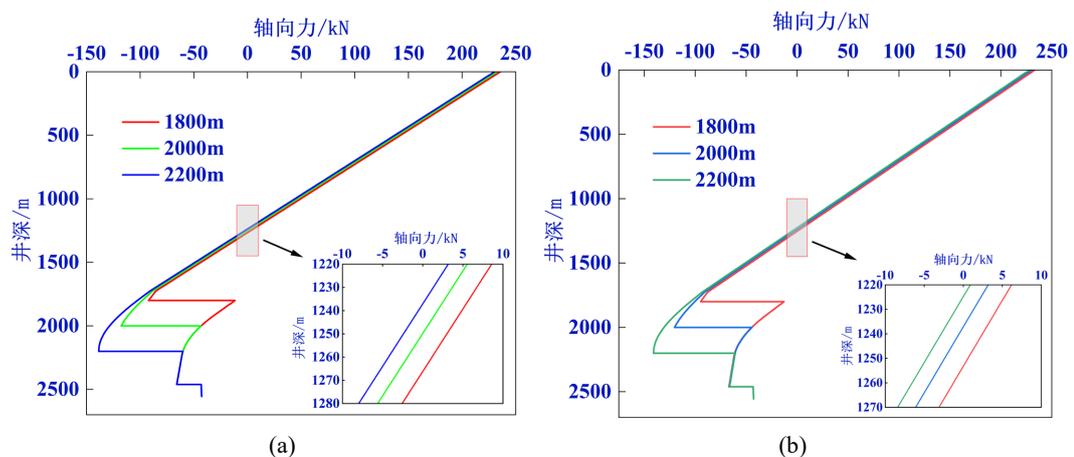


Figure 6. Changes of axial force and neutral position under different packer positions. (a) Axial force changes during gas injection; (b) Axial force changes during gas production
图 6. 不同封隔器位置下管柱轴向力和中性点位置变化规律。(a) 注气过程轴向力变化；(b) 采气过程轴向力变化

3.4. 注采气一月内不同井深处管柱载荷情况

在7月注气过程中,随着注入气体的增加,井底压力在逐渐增加,注气压力也要逐渐增加,注气压力20.90~24.07 MPa,环空压力15 MPa,注气量 $62.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,如图7(a)所示,井口处轴向拉力变化范围为235.22~251.47 kN,封隔器处轴向压力从114.75 kN减小到14.52 kN,悬挂器处轴向压力从21.79 kN增加到65.56 kN,中性点位置变化范围为1320.00~1409.97 m;在1月采气过程中,随着气体的采出,井底压力在逐渐减小,采气压力也相应的减小,采气压力9.20~14.00 MPa,环空压力11 MPa,采气量 $1.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,如图7(b)所示,随着采气压力减少,管柱轴向力曲线往左移动,即管柱受到的轴向拉力减少,压力增大,中性点位置上移,井口处轴向拉力变化范围为196.89~221.53 kN,封隔器处轴向压力从149.04 kN减小到66.88 kN,悬挂器处轴向压力从103.84 kN减小到26.33 kN,中性点位置变化范围为1109.99~1235.00 m。

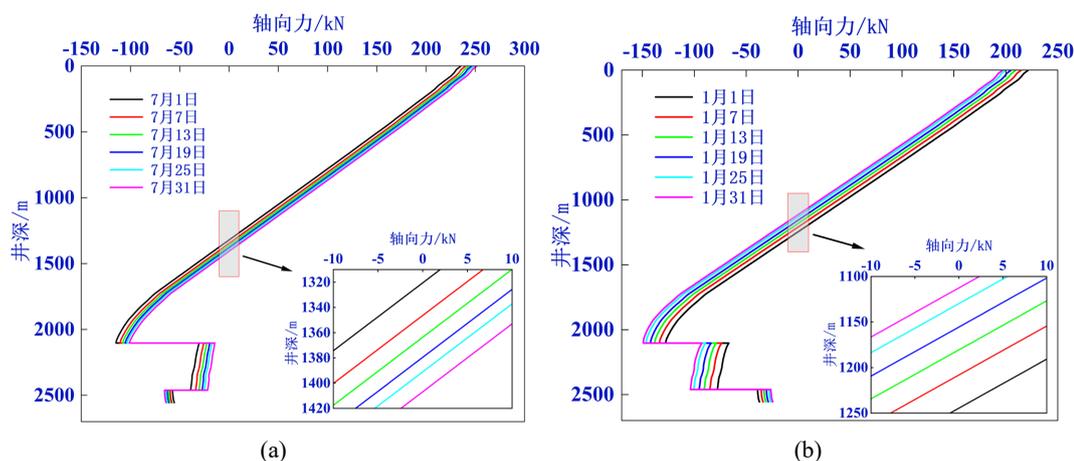


Figure 7. Axial force distribution of injection-production string within one month. (a) Axial force of column during gas injection; (b) Axial force of string during gas production

图7. 一个月内注采管柱轴向力分布图。(a) 注气过程管柱轴向力; (b) 采气过程管柱轴向力

3.5. 一个注采周期内不同井深处管柱载荷情况

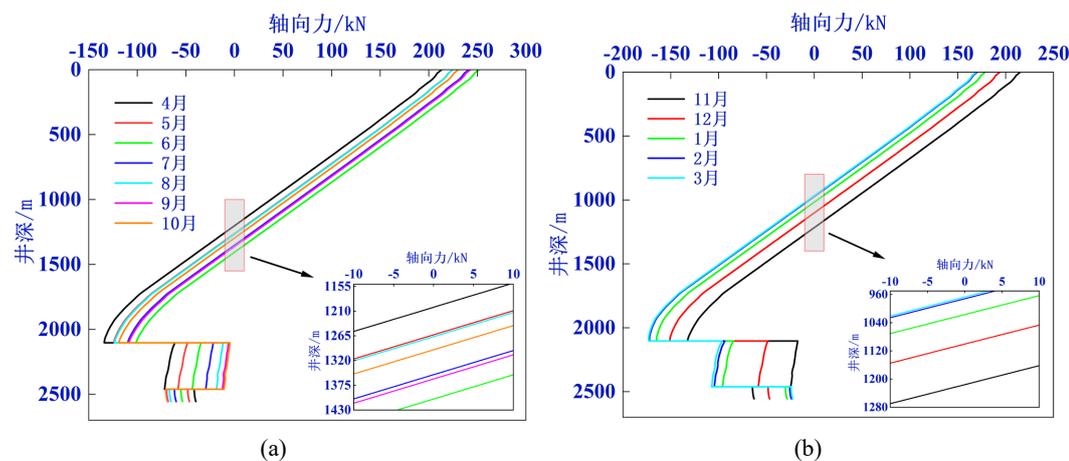


Figure 8. Axial force distribution of the string in one injection-production cycle. (a) Axial force of column during gas injection; (b) Axial force of string during gas production

图8. 一个注采周期下注采管柱轴向力分布图。(a) 注气过程管柱轴向力; (b) 采气过程管柱轴向力

在 4~10 月注气过程中, 注气压力 14~26 MPa, 环空压力 13~19 MPa, 注气量 $18 \times 10^4 \sim 70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 如图 8(a)所示, 井口处轴向拉力变化范围为 213.06~251.47 kN, 封隔器处轴向压力 4.85~62.06 kN, 悬挂器处轴向压力 10.85~72.06 kN, 中性点为位置 1200.00~1410.00 m; 在 11~3 月采气过程中, 采气压力 8.46~23.75 MPa, 环空压力 15.00~19.89 MPa, 注气量 $33 \times 10^4 \sim 123 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 如图 8(b)所示, 井口处轴向拉力 169.18~215.22 kN, 封隔器处轴向压力 17.37~172.81 kN, 悬挂器处轴向压力 24.35~107.36 kN, 中性点为位置 965.21~1219.20 m。

3.6. 多周期注采下不同井深处管柱载荷情况

自该储气库投入运行以来, 不同注采周期下注采气压、环空压力和注采气量有所不同, 这引起管柱所受到的轴向力存在差异, 对不同注采周期的管柱进行分析, 得到不同注采周期下管柱轴向力的变化规律。如图 9(a)所示, 在注气阶段, 井口处轴向拉力变化范围为 229.38~300.53 kN, 封隔器处轴向压力 19.83~116.47 kN, 悬挂器处轴向压力 27.62~81.85 kN, 中性点为位置 1289.97~1660.00 m; 如图 9(b)所示, 在采气阶段, 井口处轴向拉力变化范围为 199.88~262.40 kN, 封隔器处轴向压力 54.40~146.17 kN, 悬挂器处轴向压力 31.14~94.35 kN, 中性点为位置 1129.50~1450.00 m。

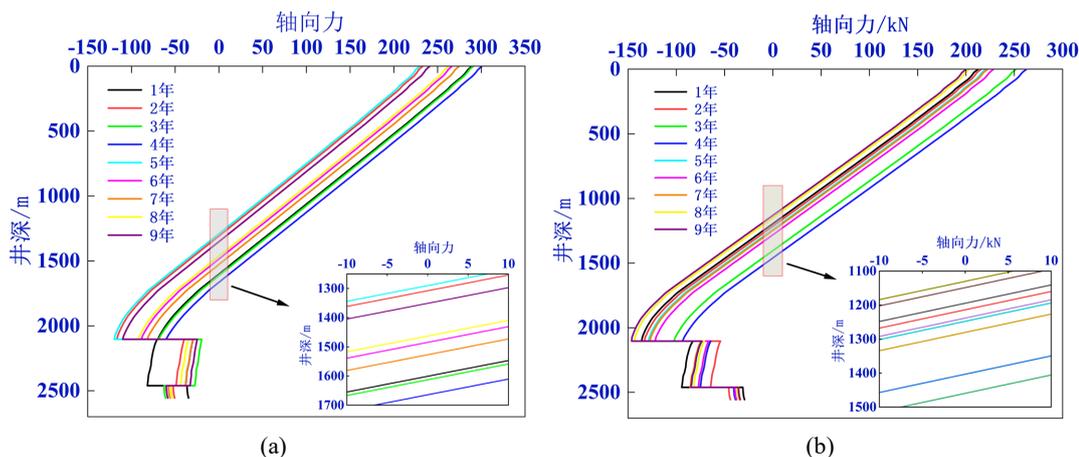


Figure 9. Axial force distribution of the string under different injection-production periods. (a) Axial force of column during gas injection; (b) Axial force of string during gas production

图 9. 不同注采周期下管柱轴向力分布。(a) 注气过程管柱轴向力; (b) 采气过程管柱轴向力

4. 结论

本文考虑鼓胀、活塞、流体摩阻和温度等多种附加效应, 建立了储气库注采管柱力学分析模型, 分析了不同环空压力、注采气压、封隔器位置, 重点分析了多周期注采条件下管柱轴向力和中性点位置的变化规律, 具体结论如下:

(1) 随着环空压力的增加, 封隔器上方的管柱轴向拉力减小, 同时中性点位置上移; 随着封隔器位置下移, 管柱受到的拉力减少, 压力增加相对较大。在设计封隔器安放位置时应考虑这一因素的影响。

(2) 随着注气时运行压力的增加, 管柱所受到的轴向拉力增大, 同时中性点位置下移。而采气过程所得规律则与之相反。管柱中性点位置在一定范围随时间不断变化, 使该区域管柱处于拉压交变的应力状态, 容易引起管柱及螺纹疲劳。

(3) 在井口、封隔器和悬挂器位置处, 管柱轴向载荷较大且发生较大的突变。长期运行下, 这种交变的轴向载荷容易导致管柱密封失效, 形成漏气点。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新项目,“定向井储气库注采管柱振动特征及工程控制措施”(YKJCX2320135);重庆市基础研究与前沿探索项目“连续管钻井(塞)管柱底部激振波及规律和振扭耦合多轴疲劳研究”(CSTC2019JCYJ-MSXMX0199)。

参考文献

- [1] 苏展. 全球地下储气库发展趋势研究及对我国储气调峰体系建设的启示[J]. 质量与市场, 2021(7): 143-145.
- [2] 高思萱, 杨艳萍. 国内外储气库经营管理现状研究与展望[J]. 化工管理, 2023(4): 8-11.
- [3] 张弘, 申瑞臣, 胡耀方. 地下储气库生产管柱循环注采轴向力分析[C]//中国石油和化工自动化应用协会. 首届地下储库科技创新与智能发展国际会议论文集. 2016: 266-273.
- [4] 李帅, 练章华, 丁亮亮, 等. 多因素耦合作用下的气井持续环空压力预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 166-172.
- [5] 刘清友, 何玉发. 深井注入管柱力学行为及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 王云. 交变载荷对苏4储气库注采管柱安全性影响研究[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 40-42+129.
- [7] Lubinski, A. and Althouse, W.S. (1962) Helical Buckling of Tubing Sealed in Packers. *Journal of Petroleum Technology*, **14**, 655-670. <https://doi.org/10.2118/178-pa>
- [8] Hammerlindl, D.J. (1980) Packer-to-Tubing Forces for Intermediate Packers. *Journal of Petroleum Technology*, **32**, 515-527. <https://doi.org/10.2118/7552-pa>
- [9] Wang, C., Wang, R., Dong, Z., Li, X., Ma, D. and Wang, X. (2023) Study on Mechanical Calculation Method of Injection-Production String in Changqing Gas Storage. *Journal of Physics: Conference Series*, **2594**, 012072. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2594/1/012072>
- [10] 丁亮亮, 练章华, 林铁军, 等. 川东北三高气井测试管柱力学研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(4): 71-73+140.
- [11] 陈瑞, 杜洋洋, 王晓虎, 等. 深斜井注水过程管柱受力与变形研究[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(5): 13-16.
- [12] 徐帅. 储气库注采管柱力学安全评价及软件开发[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2018.