



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403677

引用格式:刘欣,杜廷召,张利媛,等.基于CAES的管道-井筒储气室充气过程的数值模拟[J].科学技术与工程,2025,25(11):4559-4566.

Liu Xin, Du Tingzhao, Zhang Liyuan, et al. Numerical simulation on the Inflation process of pipeline-wellbore gas storage chamber based on CAES[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4559-4566.

能源与动力工程

基于 CAES 的管道-井筒储气室充气过程的数值模拟

刘欣¹, 杜廷召^{1,2*}, 张利媛¹, 申会兵¹, 刘联胜³, 王子月⁴, 李轶烽³

(1. 中国石油工程建设有限公司华北分公司, 任丘 062550; 2. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310058;
3. 河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300401; 4. 天津商业大学机械工程学院, 天津 300134)

摘要 压缩空气储能作为一种新型能源存储技术,在削峰填谷中发挥了重要作用。基于废弃油井储气的压缩空气储能系统,提出了一种管道-井筒储气室(储气空间由地上管道与地下井筒构成),模拟研究了其充气过程,重点分析了内部气体的热力学与流动特性。结果表明:随着压缩气体流入管道-井筒储气室内,在高温井筒壁面的加热作用下,气体温度迅速升高;随后,气体温度略高于壁面温度,此时气体向壁面散热;直至储气压力升高至约 3 MPa,气体温度和散热量均趋于稳定。由于地温梯度的存在,充气过程中地下井筒不同区域内气体特性差异显著。随着井深的增加,气体流速、密度和沿程阻力减小;且随着储气压力的升高,各区域内气体流速和沿程阻力差异减小。研究结果对利用地下井筒作为储气空间的压缩空气储能系统的实际工程应用具有一定的理论指导意义。

关键词 压缩空气储能;管道-井筒储气室;充气过程;热力学与流动特性

中图分类号 TK02;

文献标志码 A

Numerical Simulation on the Inflation Process of Pipeline-wellbore Gas Storage Chamber Based on CAES

LIU Xin¹, DU Ting-zhao^{1,2*}, ZHANG Li-yuan¹, SHEN Hui-bing¹,
LIU Lian-sheng³, WANG Zi-yue⁴, LI Yi-feng³

(1. North China Branch, China Petroleum Engineering & Construction Co., Ltd., Renqiu 062550, China;

2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

4. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

[Abstract] Compressed air energy storage, as a new energy storage technology, plays an important role in peak shaving and valley filling. Based on the compressed air energy storage with abandoned oil wellbores, a pipeline-wellbore gas storage chamber, that is, the storage space was composed of above ground pipelines and underground wellbores, was proposed. Its inflation process was simulated, with a focus on analyzing the thermodynamics and flow characteristics of the internal gas. The results showed that with compressed gas flowed into the pipeline wellbore gas storage chamber, the gas temperature rapidly increased under the heating effect of the high-temperature wellbore wall. Subsequently, the temperature of the gas became slightly higher than that of the wall, at this point, a heat release of the gas to the wall. The gas temperature and heat dissipation tended to remain stable until the gas storage pressure rose to about 3 MPa. Due to the presence of geothermal gradient, there were significant differences in gas characteristics in different areas of the underground wellbore during the inflation process. As the depth of the wellbore increased, gas flow rate, density, and frictional resistance decreased. With the increase of the gas storage pressure, the differences in the gas flow rate and frictional resistance in different areas diminished. The results of this study provide significant theoretical insights that can effectively inform the practical application of compressed air energy storage systems, particularly those that employ underground wellbores as the repository for gas storage.

[Keywords] compressed air energy storage; pipeline-wellbore gas storage chamber; inflation process; thermodynamics and flow characteristics

收稿日期: 2024-05-17 修订日期: 2024-08-10

第一作者: 刘欣(1982—),男,汉族,甘肃张掖人,硕士,正高级工程师。研究方向:油气与新能源。E-mail:liuxin_hb@cnpc.com.cn。

*通信作者: 杜廷召(1986—),男,汉族,山东聊城人,博士研究生。研究方向:氢能与储能。E-mail:dutingzhao@zju.edu.cn。

近年来,压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)作为可再生能源系统中的重要配套方案备受关注^[1-2],其具有效率高、容量大、寿命长等优点,被认为是最具有发展前景的物理储能技术^[3-4]。在压缩空气储能系统中,储气室作为关键模块之一^[5],其扮演着储存和释放能量的重要角色。

中国压缩空气储能技术发展迅猛,以不同类型储气室的 CAES 工程项目已逐渐落地。例如,2021 年 8 月,中国科学院工程热物理研究所地下盐穴为储气室建成了国际首套 10 MW 先进压缩空气储能商业示范电站^[6],并于 2022 年 7 月获批参与电力交易;同年 10 月,以地上储气钢罐为集气装置的 10 MW 先进压缩空气储能系统在贵州毕节完成并网发电。在 2023 年,已投入运行的河北张家口 100 MW 压缩空气储能项目^[7]采用储气钢罐与人工洞室相结合的储气方式,全年累计调度运行近 200 余次,系统额定运行效率高达 70.2%。可见,中国建设的压缩空气储能系统的储气装置^[8]主要以地上储气钢罐和地下储气室(如盐穴、人工洞室和废弃地下矿井等)为主。在地热能的作用下,带有地下储气室的系统相对于带有地上储气罐的系统具有更高的系统效率^[9]。此外,中国地下废弃油气井筒的数量庞大,是 CAES 系统储气空间的潜在来源。将废弃油井作为系统储气室,不仅可以有效地解决废弃地下空间的开发再利用问题,还可以降低系统初投资、提高系统经济性。因此,以地下井筒作为储气空间的压缩空气储能系统具有广阔的市场开发前景。

储气过程中储气室内气体的压力变化、温度变化及热量交换,直接影响着系统的能量存储效率和循环稳定性^[10]。大量中外学者已针对地下储气室内气体热力学特性进行了模拟研究。以山西云冈废矿 60 MW CAES 工程为例,Xu 等^[11]开发了一种实际地下巷道压缩空气储能系统的三维热力学分析方法,模拟得出了地下储气室内气体热力学动态规律,发现室内空气温度在一个循环周期内呈现“上升-下降-上升”趋势。王国华等^[12]和严铭卿等^[13]针对地下盐穴型储气库气体注采全过程进行热力学特性分析,发现在充气过程中储气库内部空气的温度和压力均随时间逐渐升高。Raju 等^[14]和 Kushnir 等^[15]分别基于质量和能量守恒方程、储气室热力学模型,分析得出了洞穴储气室内参数对室内气体温度和压力的影响规律。Xia 等^[16]假设岩洞具有恒定的空气密度和岩壁温度,进一步提出了系统运行周期中岩洞内气体热力学参数的数学解析解。结果表明,气体温度和压力随时间均呈先升

高、后下降的趋势,该规律与 Huntorf 电站实测数据相一致。相比于地下储气室内气体热力学特性的众多研究成果,地下储气室内气体流动状态的相关研究却鲜有报道,部分学者仅针对地上储氢气瓶的快速充气过程展开了模拟研究。Kim 等^[17]认为氢气注入储气瓶内为射流过程,注入的氢气冲击壁面,并在气瓶尾部附近形成明显的再循环流。进一步地,邹东方^[18]和王光绪等^[19]模拟表明,在快充过程中气体在气瓶内形成的循环流动将增强气体与瓶壁的对流换热。不同于上述储气室,实际地下油气井筒具有长径比极大的特点,其充气过程中内部气体的流场分布与地上储气罐内气体的循环流动存在显著差异。邹遂丰等^[20]建立了井筒内部流体的流动模型,发现井底部压力、温度等热力学参数与流体流量存在单调线性关系。刘铭刚等^[21]研究了天然气在油管柱内的运动状态,认为油管柱内流体状态受注采压差和井身结构的影响,管柱沿程速度和动压均随井深的增加而减小。随后,王建军等^[22]针对油井注采气全过程进行数值求解,同样得出了气体流速随井深增加而逐渐减小的结论。

以带有地下井筒的压缩空气储能系统为研究背景,基于系统特性和井筒实际特征,提出并建立一种具有高扩展性和灵活性的管道-井筒储气室模型,数值模拟其充气瞬态过程,探讨储气室内部气体的热力学和流动特性。研究结果将有助于推动废弃井筒储气室在压缩空气储能领域的发展和应。

1 系统介绍

地下井筒压缩空气储能系统包括压缩模块、膨胀模块、蓄热模块和充放气模块四部分,如图 1 所示。以四级压缩、四级膨胀的储能系统为例,压缩模块包括压机(A1、A2、A3、A4)、间冷器(B1、B2、B3、B4)和空气入口阀(C1)等装置;膨胀模块包括透平膨胀机(D1、D2、D3、D4)、再热器(B5、B6、B7、B8)和膨胀阀(C5)等装置;蓄热模块包括蓄热罐(B10)、蓄冷罐(B9)、热水泵(B12)、冷水泵(B14)、热水阀(B11)和冷水阀(B13)等装置;充放气段包括地上储气箱(C2)及管道-井筒储气室(C4)和井筒阀门(C3)等装置。其中,利用大通径阀门作为空气入口阀连接储气箱以降低局部压损。

由于单个地下井筒的容积过小,不能满足压缩空气储能系统所需的储气容积,因此选取井场中的若干口废弃油井与地上储气箱并联作为储气空间,如图 2 所示。其中,地下井筒和地上储气箱利用与井筒内径相同的地上管道、90°同径弯头及大通径阀门进行连接。该管道-井筒储气室的优势在于,将地

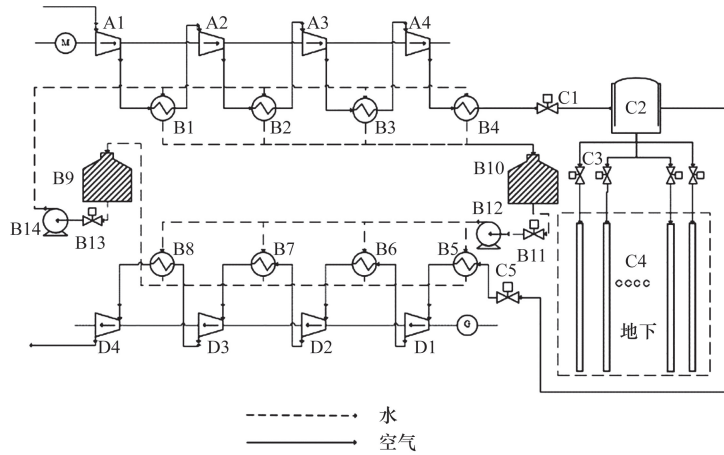


图1 压缩空气储能系统图

Fig. 1 Schematic diagram of compressed air energy storage system

上高压管道用于储气,可增加储气容积、提高系统经济性。后期若需扩展储气容量,可通过增加地上管道或地下井筒的数量来实现,从而使系统具有更高的扩展性和灵活性。

由于地上储气箱的相关研究已较为成熟,仅针对由地上管道与地下井筒构成的单支管道-井筒储气室的充气过程进行模拟研究,其中地上管道与地下井筒的结构参数如表 1 所示。

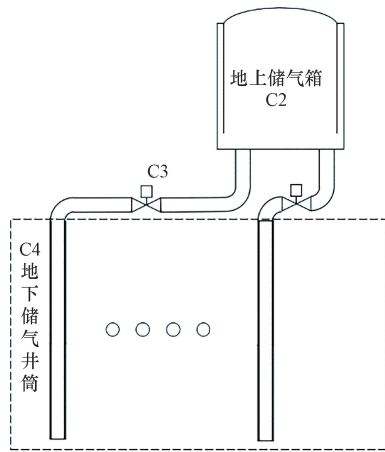


图2 储气室示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gas storage chamber

表 1 管道、井筒结构参数

Table 1 Structural parameters of pipeline and wellbore

结构参数	数值
管道储气容积/m ³	19.7
井筒储气容积/m ³	114.28
管道内径/mm	224
管道长度/m	500
井筒内径/mm	224
井筒深度/m	2 900
弯头曲率半径/mm	336
壁面粗糙度/mm	0.12
壁厚/mm	7.92

2 数值模拟

2.1 计算模型及网格划分

管道-井筒储气室的计算模型如图 3 所示,包括地上管道、弯头和地下井筒三部分。由于该模型长径比高达上万,导致网格划分困难。为解决该问题,一方面,参考文献[23]的建模方法简化模型,在保证径向尺寸(管道、井筒的直径)不变的同时,将管道的长度和井筒的深度以 1:10 的比例缩小。此方法有效节省了计算资源,减少计算时间;另一方面,网格无关性验证,在保证计算精算的同时,选用最小网格数量。其中,地上管道与地下井筒计算域选用六面体结构网格,弯头处计算域选用四面体非结构网格,模型计算域网格总数约为 78 万。

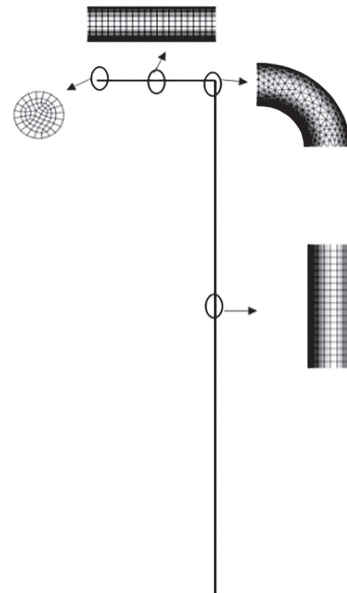


图3 管道-井筒储气室计算模型

Fig. 3 Calculation model of pipeline-wellbore gas storage chamber

2.2 数学模型

2.2.1 连续性方程

管道-井筒储气室内部充气过程是典型的流动传热过程,这里选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型(k 为湍流动能, ε 为湍流动能的耗散率)。井筒内气体流动的微分表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_r)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式(1)中: u_r, v_r, w_r 为 x, y, z 方向上的速度分量, m/s; t 为时间, s; ρ 为气体密度, kg/m³。

2.2.2 动量守恒方程

在充气过程中,管道-井筒储气室内气体运动方程的数学表达式为

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式(2)中: $x_{i,j}$ 为对应坐标系中 i, j 方向上的距离, m; U_i, U_j 为气体在 i, j 方向上的速度分量, m/s; ρ 为气体的密度, kg/m³; p 为气体的压力, Pa; μ_{eff} 为有效动力黏度, Pa/s。

2.2.3 能量守恒方程

在充气过程中,管道与井筒内空气满足能量守恒,其表达式为

$$\frac{\partial(\rho E_{\text{air}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} E_{\text{air}}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mu_t \nabla \mathbf{v}) - \nabla \cdot (\mathbf{v} P) + \rho \mathbf{v} \mathbf{g} \quad (3)$$

式(3)中: ρ 为空气的密度, kg/m³; E_{air} 为单位质量空气总能量, J; \mathbf{v} 为气体速度矢量, m/s; λ 为空气导热系数, W/(m·K); T 为温度, K; μ_t 为湍流黏性系数, Pa/s; P 为压力, Pa; \mathbf{g} 为重力矢量, N/kg。

2.3 边界条件

2.3.1 温度设置

地上管道壁面边界设置为绝热模型,计算域内初始温度设置为环境温度(300 K)。管道入口气体温度与压缩空气储能系统中压缩段出口温度相一致,设置为 300 K。对于实际地层而言,地温升高梯度为 3 °C/100 m,则简化模型的地下井筒壁面温升梯度为 3 °C/10 m。在地下井筒的壁面边界设置中插入 UDF 文件,壁面温度计算式为

$$T = 300 + 0.3z \quad (4)$$

式(4)中: z 为地层深度, m。

2.3.2 流场设置

储气室入口设置为质量流量边界条件。参考文献[24]工况,选用压缩空气储能系统储气室入口(压缩段出口)的气体质量流量为 10.14 kg/s。对于油井数量为 10 的井场而言,通道分流作用下的单个管道-井筒储气室的气体质量流量设置为 1.014 kg/s。

3 结果与分析

3.1 模型简化及验证

为验证模型简化的合理性和可靠性,本文对比了简化模型与原尺寸模型在充气过程中不同位置处的气体参数。提取储气室压力由 0.1 MPa 充气提升至 1 MPa 时工况下的室内气体流速和密度数据,如图 4 所示。分段位置 0 m 为模型地上管道的入口处,则简化模型中的 0 ~ 50 m 和 50 ~ 340 m 以及原尺寸模型中的 0 ~ 500 m 和 500 ~ 3 400 m 分别为地上管道段和地下井筒段。由图 4 可知,简化模型和原尺寸模型在不同位置处气体流速基本一致,但密度略有差异,且该差异随井深的增加而逐渐增大,其最大误差为 2.76%。主要原因在于,原尺寸模型内部气体温度略低于简化模型内部气体温度,导致前者密度略大于后者。可见,简化模型的模拟结果能够较为准确地反映原尺寸储气室内部气体的热力学与流动特性。因此,接下来将针对简化模型的充气过程进行详细的数值模拟研究。

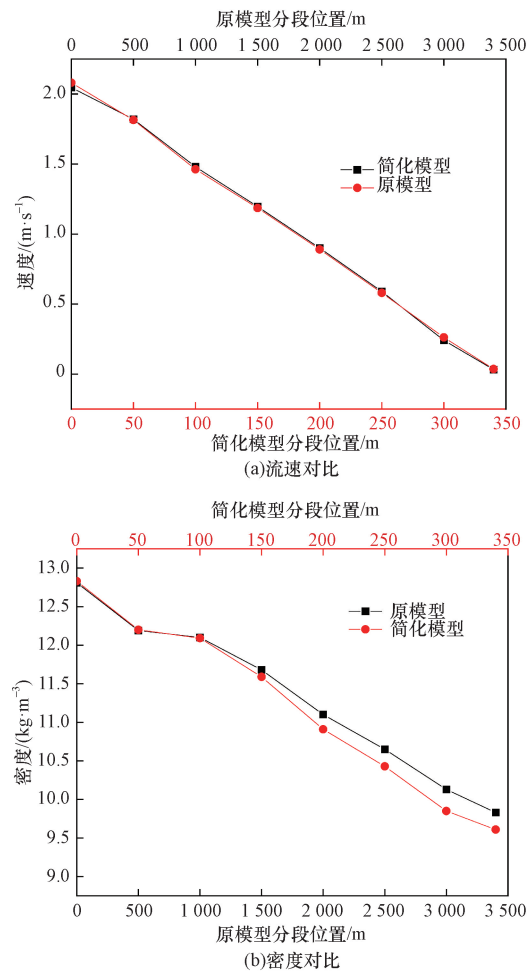


图 4 简化模型与原尺寸模型的结果对比
Fig. 4 Comparison of results between simplified model and full-scale model

3.2 充气过程热力学特性分析

3.2.1 平均压力及温度

在充气过程中,管道-井筒储气室内气体的温度和压力变化如图 5 所示。充气初期,入口气体平均温度远低于井筒内温度,在对流换热的主导作用下,室内气体温度随时间的增加呈现迅速升高的趋势,平均温升高达 38 K;充气后期,在压缩热的作用下,气体平均温度略高于井筒壁面温度,气体温度随时间缓慢降低并趋于平稳。此外,由于模型采用恒定质量流量入口,则储气室内气体质量随时间线性增长,进而导致室内气体压力同样随时间呈现线性升高的趋势。

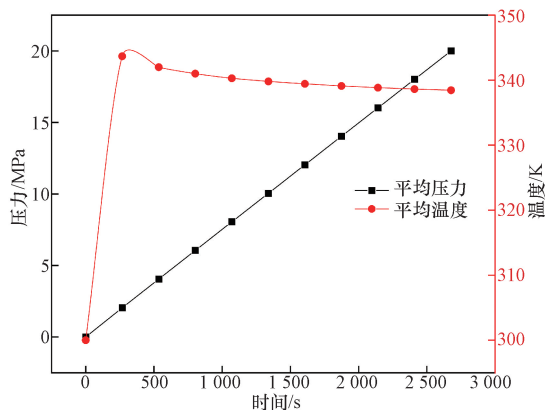


图 5 管道-井筒储气室内气体平均温度及压力随充气时间的变化

Fig. 5 Variation of average gas temperature and pressure in the pipeline-wellbore gas storage chamber with inflation time

3.2.2 平均密度

在充气过程中,不同储气压力下的管道-井筒储气室各分段区域内气体平均密度的变化规律如图 6 所示。对于同一储气压力而言,随井深(分段区域)

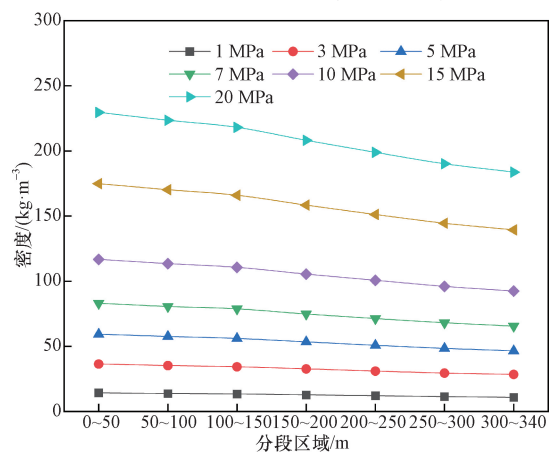


图 6 不同储气压力下,管道-井筒储气室各分段区域内的气体平均密度

Fig. 6 Average density of gas in each segmented regions of the pipeline-wellbore gas storage chamber under different gas storage pressures

的增加,井筒壁面和气体的温度提高,则气体密度呈现逐渐减小的趋势;且该下降梯度随储气压力的增加而增大。在储气压力为 1 ~ 10 MPa 的范围内,随着压力的升高,各区域内气体密度差异较小;然而,当储气压力达到 15 ~ 20 MPa 时,各区域内气体密度差异显著增大。此外,对于同一井深而言,随着充气时间的增加、室内压力的升高,气体密度上升;且该上升梯度随井深的增加而减小。

3.2.3 壁面热通量

由于地上管道为绝热模型,因此这里仅考虑地下井筒内气体与壁面的换热情况,提取地下井筒壁面的平均热通量。随着充气时间的增加,壁面热通量呈现先迅速下降、后趋于稳定的趋势,该趋势与井筒内气体温度的变化规律相关,如图 7 所示。充气初期,井筒内气体温度较低、壁面温度较高,两者温差较大,此时壁面向气体传递的热流量较大。随着充气过程的持续,气体与壁面间的温差减小。在储气压力高于 3 MPa 后,井筒内气体温度已基本恒定,壁面热通量随时间趋于稳定;此时,井筒内气体温度高于壁面平均温度,气体由吸热模式转变为放热模式,导致壁面热通量变为负值。

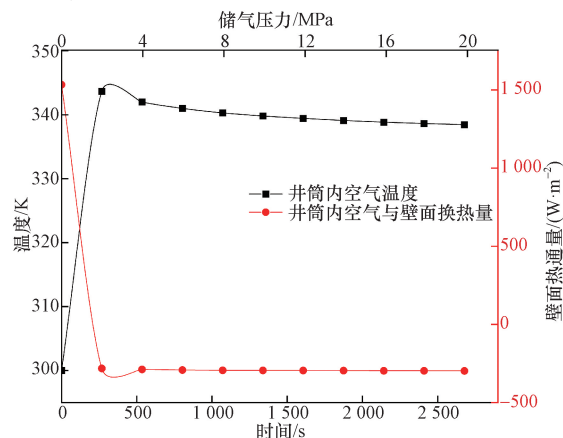


图 7 地下井筒壁面热通量随充气时间的变化

Fig. 7 The variation of heat flux on the wall of underground wellbore with inflation time

3.3 充气过程流动特性分析

3.3.1 平均流速

在充气过程中,不同储气压力下的管道-井筒储气室各分段区域内的气体平均流速如图 8 所示。在同一储气压力下,随着井深、气体流动距离的增加,沿程摩擦阻力增大,导致气体流速降低;且流速下降梯度随储气压力的升高而减小,原因在于,气体压强和密度的升高将阻碍气体流入,继而导致其流速降低。此外,对于同一井深而言,随着储气压力的升高,气体流速降低;且流速下降梯度会随着井深的增加而减小。

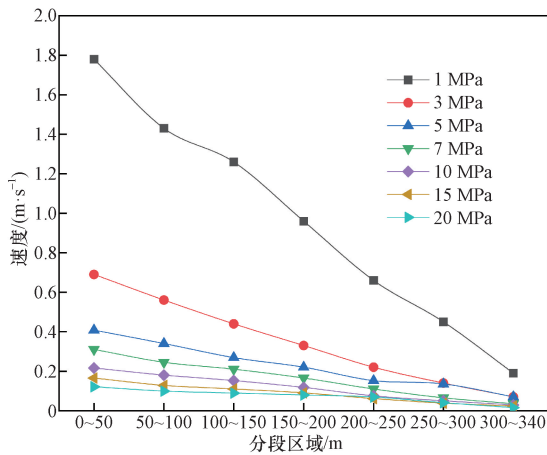


图8 不同储气压力下,管道-井筒储气室各分段区域内的气体平均流速

Fig. 8 Average velocity of gas in each segmented regions of the pipeline-wellbore gas storage under different gas storage pressures

3.3.2 沿程阻力

如前文所述,管道-井筒储气室各分段区域内的气体温度、密度和流速均存在显著差异。为更加准确地获得沿程阻力,特提取了不同区域内气体的密度和流速等基本数据,并利用经验公式对其进行求解,比沿程阻力计算公式为

$$P/L = \lambda v^2 \rho / 2D \quad (5)$$

式(5)中: P 为沿程阻力,Pa/m; L 为管道长度及井筒深度,m; λ 为摩擦阻力系数,取值为0.025; v 为管道井筒不同区域内平均流速,m/s; ρ 为管道井筒不同区域内平均密度,kg/m³; D 为管道及井筒的直径,m。

图9为计算得到的不同储气压力下储气室各分段区域的比沿程阻力,其变化趋势与气体平均流速

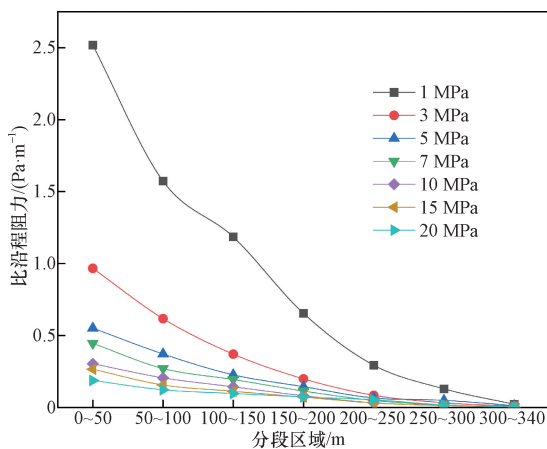


图9 不同储气压力下,管道-井筒储气室各分段区域的比沿程阻力

Fig. 9 The specific frictional resistance of each segmented area of the pipeline-wellbore gas storage chamber under different gas storage pressures

(图8)相近。一方面,在同一储气压力下,随着井深的增加,管道-井筒储气室内部比沿程阻力逐渐减小,这是由于气体流动距离增加、气体流速减小所致。另一方面,随着储气压力的升高,比沿程阻力逐渐减小,尽管压力提高、密度增大,但流速降低对摩擦阻力的影响更为显著。

基于各分段区域内的比沿程阻力即可获得管道-井筒储气室内的总沿程阻力,如图10所示。随着储气压力的升高,储气室内总沿程阻力呈现先快速下降、后趋于稳定的趋势。

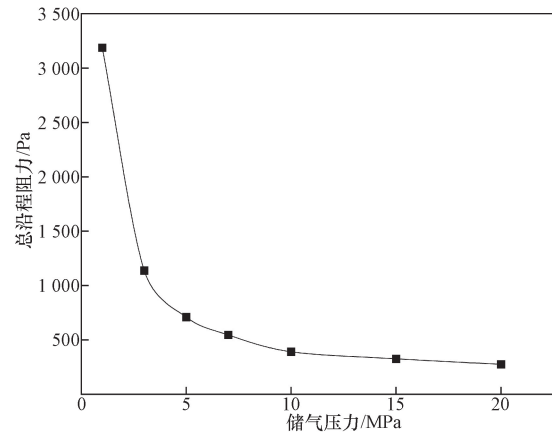


图10 不同储气压力下,管道-井筒储气室各分段区域的总沿程阻力

Fig. 10 The total frictional resistance of each segmented area of the pipeline-wellbore gas storage chamber under different gas storage pressures

4 结论

基于实际废弃油井现状,本文提出了一种管道-井筒储气室,利用数值模拟的方法研究了其充气过程,探究了其内部气体的流动与热力学特性,为基于油井储气的压缩空气储能系统提供了理论参考。主要结论如下:

(1)在充气过程中,管道-井筒储气室内气体平均温度随时间呈现先快速升高、后缓慢降低并趋于平稳的趋势,平均温升高达38 K。可见,在土壤热的作用下,地下井筒储气室对室内气体具有良好的加热作用,这将有助于提高压缩空气储能系统效率。

(2)随着井深的增加、储气压力的降低,气体密度逐渐减小。随着充气时间的增加,壁面热通量受地下井筒内气体温度的影响呈现先迅速下降、后趋于稳定的趋势。当储气压力提升至3 MPa后,地下井筒内气体温度和壁面热通量均趋于恒定值。

(3)随着井深的增加,气体流速降低,且流速下降梯度随储气压力的升高而减小,储气压力越高,管道-井筒储气室内气体流速分布越均匀。在气体

流速的主导作用下,管道-井筒储气室内沿程阻力随井深的增加和储气压力的升高而逐渐减小。

参 考 文 献

- [1] 李季,黄恩和,范仁东,等. 压缩空气储能技术研究现状与展望[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(2): 86-89, 126.
Li Ji, Huang Enhe, Fan Rendong, et al. Research status and development prospects of compressed air energy storage technology [J]. Turbine Technology, 2021, 63(2): 86-89, 126.
- [2] 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.
Mei Shengwei, Gong Maoqiong, Qin Guoliang, 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.
- [3] 张文,王龙轩,丛晓明,等. 新型压缩空气储能及其技术发展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15335-15347.
Zhang Wen, Wang Longxuan, Cong Xiaoming, et al. New type of compressed air energy storage and its technological development [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15335-15347.
- [4] He G, Lin J, Sifuentes F, et al. Rapid cost decrease of renewable and storage accelerates the decarbonization of China's power system [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2486.
- [5] 庄绪增. 压缩空气储能系统储气室传热规律研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
Zhuang Xuzeng. Study on heat transfer law of gas storage chamber for compressed air energy storage systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [6] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2022 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516-1552.
Chen Haisheng, Li Hong, Xu Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1516-1552.
- [7] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2023 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1359-1397.
Chen Haisheng, Li Hong, Xu Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1359-1397.
- [8] 郭丁彰,尹钊,周学志,等. 压缩空气储能系统储气装置研究现状与发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1486-1493.
Guo Dingzhang, Yin Zhao, Zhou Xuezhong, et al. Status and prospect of gas storage device in compressed air energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1486-1493.
- [9] Li Y, Liu Y, Hu B, et al. Numerical investigation of a novel approach to coupling compressed air energy storage in aquifers with geothermal energy [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115781.
- [10] Zhang Y, Yang K, Li X, et al. The thermodynamic effect of air storage chamber model on advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. Renewable Energy, 2013, 57(3): 469-478.
- [11] Xu Y, Zhou S, Xia C, et al. Three-dimensional thermo-mechanical analysis of abandoned mine drifts for underground compressed air energy storage: a comparative study of two construction and plugging schemes [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102696.
- [12] 王国华,张学林,李智,等. 压缩空气储能盐穴储气库注采全过程热力学特性分析[J]. 可再生能源, 2019, 37(4): 618-624.
Wang Guohua, Zhang Xuelin, Li Zhi, et al. Thermodynamics analysis of salt cavern for compressed air energy storage system [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4): 618-624.
- [13] 严铭卿,赵梦涛,李军,等. 洞穴型地下储气库热力分析[J]. 煤气与热力, 2015, 35(2): 59-65.
Yan Mingqing, Zhao Mengtao, Li Jun, et al. Thermodynamic analysis of cavern-type underground gas storage [J]. Gas and Heat, 2015, 35(2): 59-65.
- [14] Raju M, Khaitan S K. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant [J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 474-481.
- [15] Kushnir R, Dayan A, Ullmann A. Temperature and pressure variations within compressed air energy storage caverns [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22): 5616-5630.
- [16] Xia C, Zhou Y, Zhou S, et al. A simplified and unified analytical solution for temperature and pressure variations in compressed air energy storage caverns [J]. Renewable Energy, 2015, 74: 718-726.
- [17] Kim S C, Lee S H, Yoon K B. Thermal characteristics during hydrogen fueling process of type IV cylinder [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(13): 6830-6835.
- [18] 邹东方. 70MPa 船载储氢气瓶快充过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Zou Dongfang. Study on fast filling process of 70 MPa shipboard hydrogen storage cylinder [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [19] 王光绪,周剑秋,胡淑娟,等. 高压储氢气瓶的长径比和进气口直径对其快充温升及温度分布的影响[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 225-232.
Wang Guangxu, Zhou Jianqiu, Hu Shujuan, et al. The influences of l/d ratio and inlet diameter on the temperature rise and temperature distribution within a high pressurized hydrogen cylinder during refueling [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 225-232.
- [20] 邹遂丰,郭正斌,王珏,等. 井筒内超临界多元热流体注入过程的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7663-7670.
Zou Suifeng, Guo Zhengbin, Wang Jue, et al. Numerical simulation of supercritical multicomponent heat fluid injected into a wellbore [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7663-7670.
- [21] 刘铭刚,王建军,闫怡飞,等. 地下储气库井管柱沿程流体状态数值模拟[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(4): 449-454.
Liu Minggang, Wang Jianjun, Yan Yifei, et al. Numerical simulation on the state of fluids along the string of gas storage well [J]. Oil Drilling and Production Technology, 2017, 39(4): 449-454.
- [22] 王建军,曾祥俊,贾善坡,等. 储气库注采井筒温度场预测

- 与影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(18): 7890-7902.
- Wang Jianjun, Zeng Xiangjun, Jia Shanpo, et al. Wellbore temperature field prediction and influencing factors analysis of gas storage injection production wells[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(18): 7890-7902.
- [23] 丁田田. 煤层气充气钻井井筒多相流分析及工艺参数优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- Ding Tiantian. Wellbore multiphase flow analysis of coalbed methane gas drilling and process parameters optimization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [24] 郭欢, 徐玉杰, 张新敬, 等. 蓄热式压缩空气储能系统变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1366-1377.
- Guo Huan, Xu Yujie, Zhang Xinjing, et al. Off design performance of compressed air energy storage system with thermal storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1366-1376.