

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.237

引用格式: 王瑛俪, 李小洋, 李冰, 等. 深孔保压取样球阀热-应力耦合仿真分析[J]. 中国地质调查, 2024, 11(5): 153-160. (Wang Y L, Li X Y, Li B, et al. Simulation analysis of thermal-stress coupling for deep hole pressure retention sampling ball valves[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(5): 153-160.)

深孔保压取样球阀热-应力耦合仿真分析

王瑛俪^{1,2}, 李小洋^{2*}, 李冰¹, 施山山², 吴纪修²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 随着钻孔深度的不断加大, 钻孔内的温度和压力也会越来越高, 保压取样作为一种能够有效获取地下岩心原位赋存状态的技术方法, 在高温高压的环境下能否有效实现原位保压成为检验保压取样可靠性的关键标志之一。为此, 选取保压取样的关键机构球阀, 开展热-应力耦合仿真分析, 重点研究了球阀在[15, 30] MPa、[0, 250] °C环境参数内的应力和变形规律。从仿真模拟结果可以看出: ①对比 316L、42CrMo 和 Inconel718 这3种材料在[15, 30] MPa静压力作用下的最大等效应力与最大变形, 同时考虑加工成本, 优选 42CrMo 作为球阀制作材料; ②当温度从 0 °C 增加到 250 °C 时, 球阀的最大变形也在增加, 但增长率仅为 1.05%, 最大等效应力虽然有小的波动, 但整体呈现增加趋势, 最大波动幅度为 12.76 MPa, 处于球阀有效密封的允许范围内。仿真模拟结果可为保压球阀在深孔中的可靠密封提供理论数据。

关键词: 保压取样; 球阀; 高温高压; 热-应力耦合; 等效应力

中图分类号: P634 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2024)05-0153-08

0 引言

我国一直以来都是世界上最大的能源消耗国, 近年来我国无论是煤炭, 石油还是天然气, 整个浅部化石能源都逐渐枯竭, 在未来很长时间, 我国能源开发重心将逐步向深部能源转变^[1-2]。与浅层能源相比, 深部能源的开采难度更大, 也更加危险。就煤炭而言, 瓦斯的含量是影响深部煤炭开采的主要原因, 瓦斯爆炸一直被认作是最有破坏性的、最危险的煤矿事故^[3]。瓦斯含量的精准测量是深部煤炭开采时灾害预测以及煤层气精细有效利用的关键^[4]。在高温高压的环境下, 深部煤储层孔渗、瓦斯含量、煤体稳定性等信息存在明显区别^[5]。常规煤层取心是开放式的取心, 此种方法并不适用于深部煤层高温高压的情况, 会导致大量甲烷气体扩散, 无法准确获取瓦斯含量, 会

为后续开采造成巨大的安全隐患。根据天然气、石油领域上的保压取心钻具, 现已研究出保温保瓦斯的取心钻具^[6-7]。

保压取心技术是将采取的岩心密封在保压管中, 使其在蓄能器的作用下尽可能保持原始的地层压力状态, 防止岩心中的液体流失, 气体膨胀, 可以提高岩心结构的稳定性, 防止岩心的破损与断裂等^[8-11]。保压取心技术在石油和天然气水合物领域的应用是非常普遍的, 最早在 1983 年我国大庆油田就已经成功研制了 BYM 型保压取心工具^[12]。近年来, 我国石油开采深度已经超过 4 500 m, 为了适应深孔高温高压的工况条件, 长城钻探工程有限公司研发了 GW-CP 系列保压取心工具, 其最高承压可达 80 MPa, 最高耐温可达 150 °C, 最大取心井深可达 5 168.55 m^[13-15]。分析国内外保压取心钻具可知, 整个钻具中最重要的部分就是保压球阀的密封部分, 球阀能否很

收稿日期: 2024-06-20; 修订日期: 2024-09-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目“海洋天然气水合物保压取样球阀密封失效机理及优化设计研究(编号: 42102352)”与国家重点研发计划项目“精准勘探定向钻进连续取心前沿技术研发(编号: 2021YFC2900200)”联合资助。

第一作者简介: 王瑛俪(2001—), 女, 硕士在读, 主要从事深部钻探取心技术研究。Email: wyl05202023@163.com。

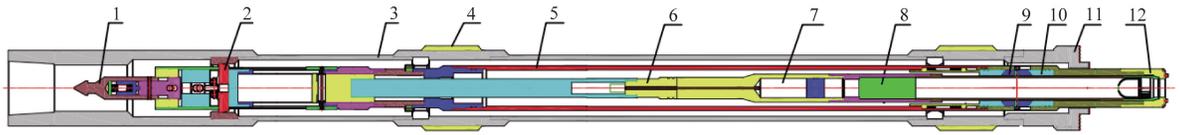
通信作者简介: 李小洋(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事深部钻探取心技术研究。Email: Lixy0692@163.com。

好的密封,直接影响了取心的效率以及取出岩心的质量。

随着取心深度的不断增加,温度与压力都逐渐升高,在这种高温高压的工况下,保压取心技术是获取岩心原位赋存状态的唯一方法^[16]。本文基于现有的保压球阀钻具,开展了不同材料、静压力以及温度情况下球阀的仿真模拟,通过分析球阀的变形与等效力,研究高温高压对球阀密封性能的影响,旨在为今后球阀的开发和研究提供更好的方案。

1 保压取样工作原理

保压取样常见的工作方式为提钻式取心和绳索打捞式取心。虽然工作方式不同,但是保压球阀密封机构的基本工作原理大致相同。现以绳索打捞式保压取样钻具为例,探讨其工作原理。如图 1 所示,该钻具主要由打捞组件、弹卡、扶正器、保压管、密封接头、蓄能器、温压记录仪、保压球阀、取心管、取心钻头等组成。



1. 打捞组件; 2. 弹卡; 3. 外管; 4. 扶正器; 5. 保压管; 6. 密封接头; 7. 蓄能器; 8. 温压记录仪; 9. 保压球阀; 10. 取心管; 11. 取心钻头; 12. 超前钻头

图 1 绳索打捞式保压取样钻具结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the rope - type pressure retention sampling drilling tool

绳索打捞式保压取样钻具工作原理为:当岩心长度达到取心管最大长度后,通过打捞组件上提密封接头、蓄能器及取心管等组件,将取心管回收到保压管内;当取心管下端越过球阀后,球阀在偏心预压弹簧的作用下翻转,实现保压管的下端密封,同时密封接头与保压管上端配合密封,将保压管两端有效密封,最终将岩心密封在保压管内,实现原位保压功能。球阀作为保压密封的关键机构之一,在其关闭后要承受井下原位静压力对其挤压作用,球阀产生的变形和应力会对密封效果产生重要影响。基于此,根据保压取样可能的应用场景,选取球阀机构重点研究其在 [15, 30] MPa、[0, 250] °C 以内的工况环境下变形与应力变化规律,为优选球阀材料及保压可靠性提供理论支撑。

好地适应复杂的几何形状,便于进行网格划分,且能够较好地逼近边界形状,使得在处理复杂问题时更加灵活。网格平均表面积为 2 210.0 mm²,共划分了 31 048 个节点,15 414 个网格,如图 2 所示。

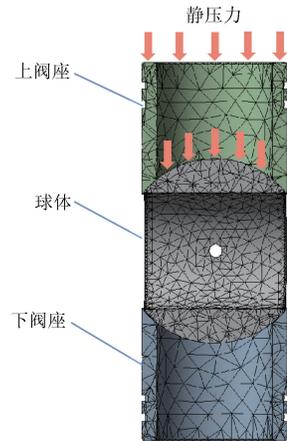


图 2 球阀组成及网格划分

Fig. 2 Ball valve composition and meshing

2 球阀静压力仿真分析

2.1 模型参数设置及网格划分

利用 solidworks 软件构建球阀三维模型,再导入 ANSYS Workbench 中进行仿真分析。球阀主要由上阀座、球体和下阀座组成,当球阀关闭后,静压力作用在上阀座和球体的上表面。本次仿真采用 ANSYS Workbench 中的 Mesh 模块进行网格划分,选择全局网格控制和三角形单元划分网格,这可以较

2.2 不同材料对球阀变形与应力的影响

保压取样球阀的材料选择主要考虑以下 3 个因素:①在保压过程中,上阀座和球体都要受到保压压力的作用,试制材料要有足够大的屈服强度;②在球阀翻转过程中,球体与阀座之间的接触面上可能黏附有固体颗粒,破坏密封面,因此球阀材料要有一定的硬度和耐磨性;③部分材料价格比较高,且加工难度大,在满足使用工况的条件下,还要

考虑加工制造成本。在查阅相关资料后,筛选出 316L、42CrMo 和 Inconel718 三种材料进行对比。其性能参数见表 1。

表 1 三种材料的性能参数表

Tab.1 Performance parameters for the three materials

材料	密度/(g·cm ⁻³)	杨氏模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
316L	7.98	2.0×10 ⁵	0.30	252
42CrMo	7.85	2.1×10 ⁵	0.28	930
Inconel718	8.22	2.0×10 ⁵	0.30	1 034

将上阀座与球体之间的接触设置为摩擦,摩擦因数为 0.1,下阀座与球体之间的接触设置为绑定,在上阀座端面、球体与上阀座接触的上表面分别施加静压力,静压力值分别为 15 MPa、20 MPa、25 MPa

和 30 MPa,下阀座设置为固定支撑,仿真时间为 1 s,对比 3 种材料球阀在不同静压力下最大变形和最大等效应力(图 3),优选出合适的球阀材料。从整体上看,随着施加静压力的增大,球阀的最大变形与最大等效应力也随之增大。其中 316L 球阀在 15 MPa 静压力作用下,最大等效应力为 383.69 MPa,已经超过其屈服强度 252 MPa,导致球阀发生塑性变形,无法满足保压密封需求。而 42CrMo 和 Inconel718 两种球阀在 30 MPa 静压力作用下,最大应力分别为 768.41 MPa、774.44 MPa,均小于其屈服强度,最大变形分别为 0.153 0 mm、0.161 4 mm,属于弹性变形,且变形幅度在球阀硬密封的变形许可范围内。

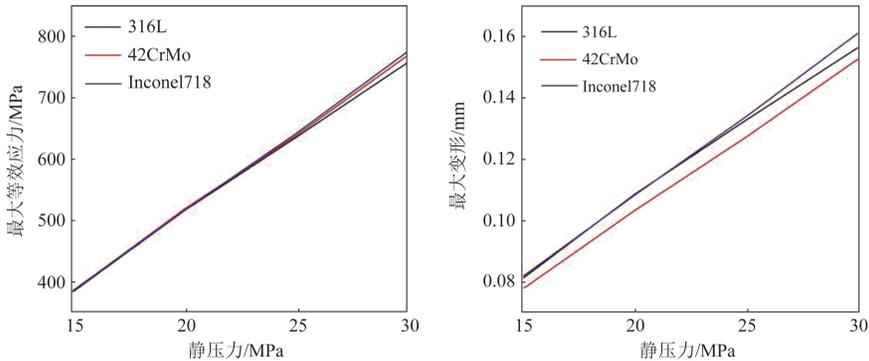
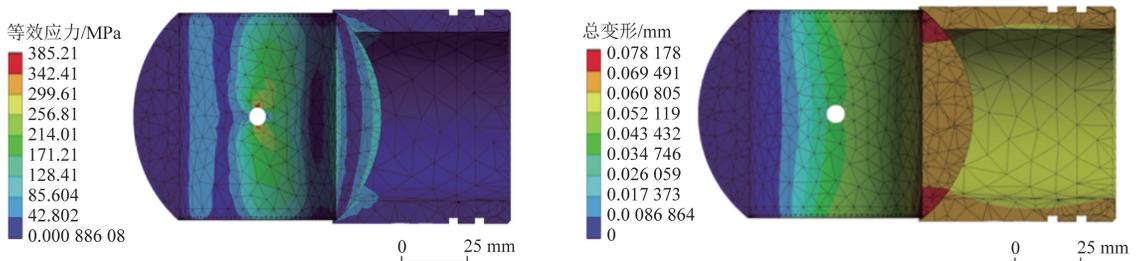


图 3 三种材料球阀在不同静压力作用下最大等效应力(左)、最大变形(右)曲线

Fig.3 Maximum equivalent stress (left) and maximum deformation (right) curves for ball valves of three materials under different static pressures

图 4 是以 42CrMo 球阀为例研究不同静压力下其等效应力和变形分布情况。由于下阀座所受的应力和变形都较小,为重点研究球体和上阀座的应力与变形情况,将下阀座隐藏。当静压力逐渐由 15 MPa 增加到 30 MPa 时,球阀的最大等效应力与最大变形都在变大,但云图的分布区域基本一样。

球阀最大等效应力的位置集中在球体侧面的螺纹孔周边,且在上阀座与球体接触区域的等效应力也较大;球阀的最大变形出现在球体与上阀座接触区域,沿水平轴向左看变形逐渐变小,有明显的分层,从最大变形区域向右看,球体的变形要大于上阀座,两部分的变形较均匀。



(a) 15 MPa 作用下等效应力云图

(b) 15 MPa 作用下变形云图

图 4-1 42CrMo 球阀在不同静压力作用下等效应力、变形云图

Fig.4-1 Equivalent stress and deformation cloud diagram of 42CrMo ball valve under different static pressures

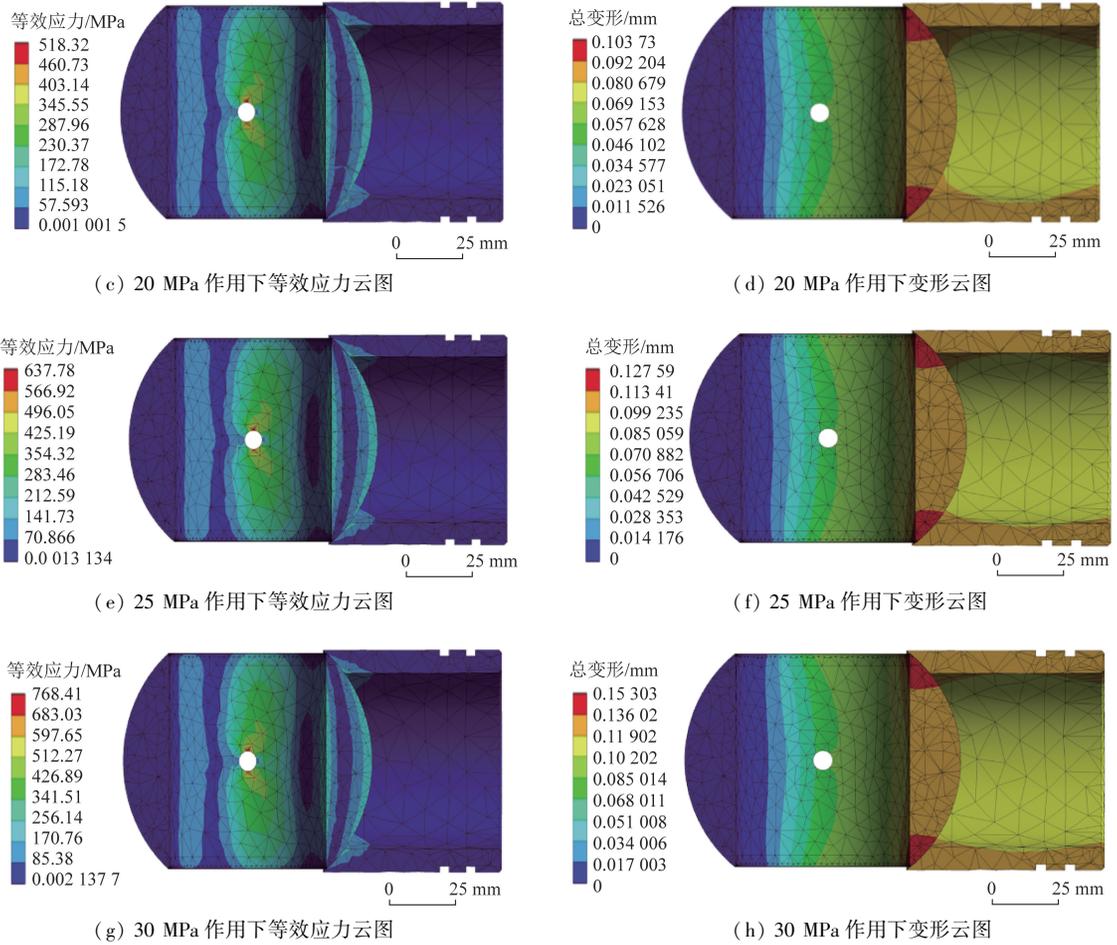


图 4-2 42CrMo 球阀在不同静压力作用下等效应力、变形云图

Fig. 4-2 Equivalent stress and deformation cloud diagram of 42CrMo ball valve under different static pressures

综合对比以上 3 种材料发现：316L 球阀在 15 MPa 时已无法满足保压密封的工作要求，42CrMo 和 Inconel718 两种球阀在 30 MPa 静压力作用下其最大等效应力依然小于自身材料的屈服强度，能够满足球阀的保压密封，但从加工成本来看，Inconel718 球阀要比 42CrMo 球阀高得多，在满足性能要求的前提下，应首选 42CrMo 材料。

耦合形式如图 5 所示。

3 球阀热 - 应力耦合仿真分析

有限元分析软件(ANSYS 软件)的顺序耦合是对需要分析的多个过程进行逐级分析,将前一个耦合分析结果作为后一个耦合分析的前提约束条件^[17]。本文按照先做稳态热分析再做结构静力学分析的顺序耦合法,进行热 - 应力耦合仿真分析,



图 5 热 - 应力顺序耦合

Fig. 5 Thermal - stress sequence coupling

3.1 模型参数设置

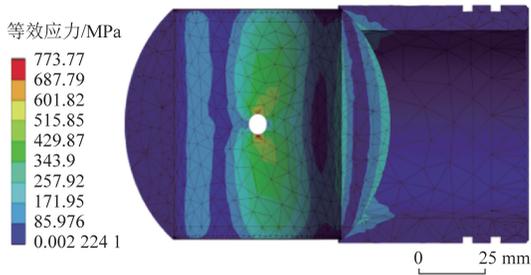
(1) 稳态热仿真分析。初始温度设置为均匀温度,最终温度应用到整个几何体,其中最终温度与初始温度的温差设置为 10 ℃,设置完成后在稳态热求解模块中插入温度。

(2)静应力仿真分析。在稳态热仿真分析结果的前提下,进行静应力分析,从而达到热-应力耦合仿真分析。在上阀座端面,球体与上阀座接触的上表面分别施加 30 MPa 静压力,其他设置与静应力仿真设置一样。在求解中插入总变形与等效应力,求解变形与应力云图。

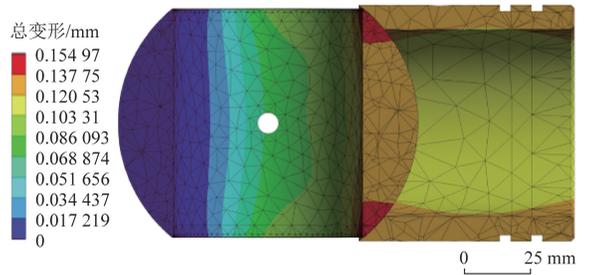
3.2 不同温度下的有限元分析

以 42CrMo 球阀为例,得出了不同温度下球阀的等效应力与变形云图(图 6)。通过与图 4 对比可以发现,不同温度下最大变形及最大等效应力位置与不同静压力下的位置一致。不同温度下最大变形和最大等效应力对比(图 7)可以发现,随着温度的升高,保压球阀的最大变形逐渐增大。0 °C 时,球阀最大变形为 0.154 97 mm,250 °C 时,球阀

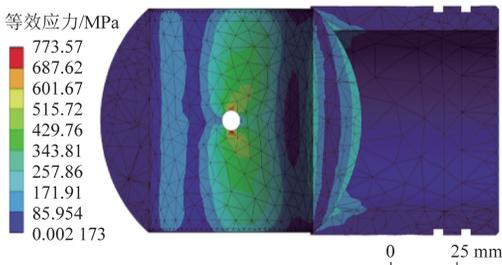
最大变形为 0.156 6 mm。从 0 °C 到 250 °C 温差极大,但最大变形增长微乎其微,仅增加了 1.05%。随着温度升高,最大等效应力整体也呈增加趋势,但个别温度下最大等效应力出现了波动。50 °C 时,球阀最大等效应力最小,200 °C 时,球阀最大等效应力最大,分别为 773.57 MPa、786.33 MPa,两者相差 12.76 MPa,增长率为 1.65%。分别对比 0 °C 和 50 °C、200 °C 与 250 °C 两组工况下的最大等效应力,发现每组内的最大等效应力差别不大,且均在可控范围之内,说明在[0,250] °C 范围内温度对球阀最大等效应力和最大变形影响较小。按照《GB/T 26147—2010 球阀球体技术条件》^[18]的要求,其最大变形小于规范许可的范围。



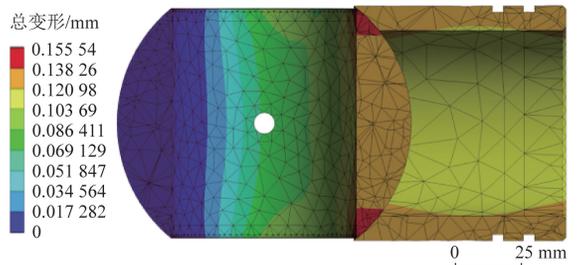
(a) 0 °C 作用下等效应力云图



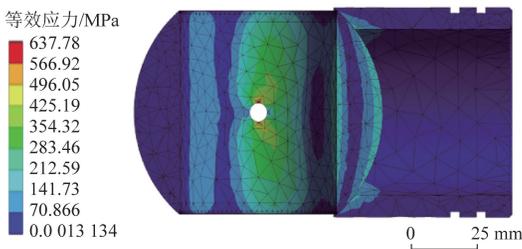
(b) 0 °C 作用下变形云图



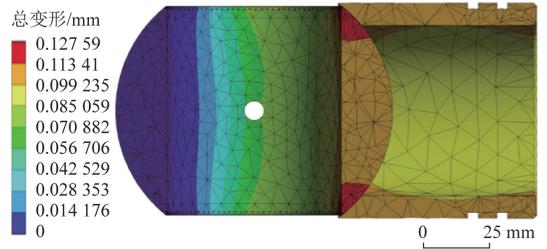
(c) 50 °C 作用下等效应力云图



(d) 50 °C 作用下变形云图



(e) 100 °C 作用下等效应力云图



(f) 100 °C 作用下变形云图

图 6-1 42CrMo 球阀在不同温度作用下等效应力、变形云图

Fig. 6-1 Equivalent force and deformation cloud diagram of 42CrMo ball valve under different temperatures

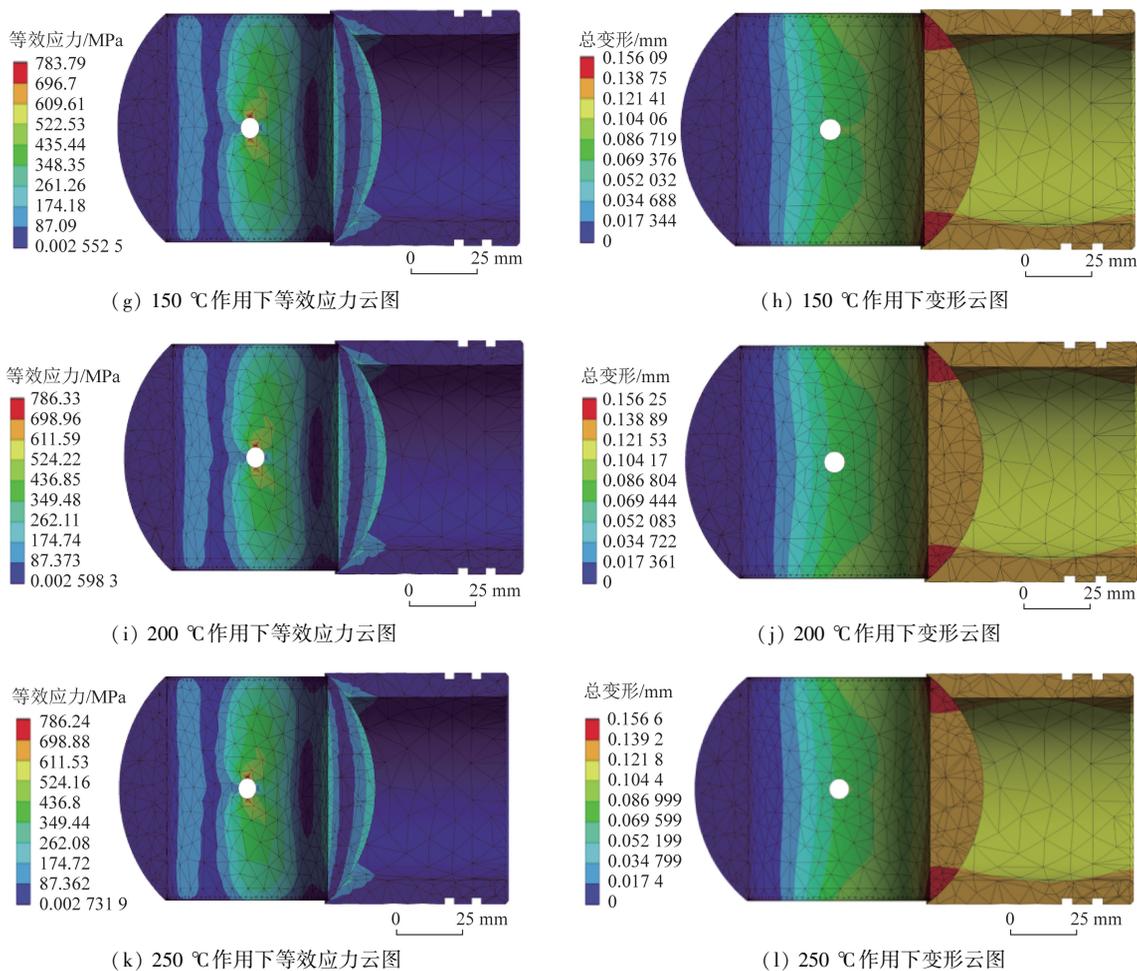


图 6-2 42CrMo 球阀在不同温度作用下等效应力、变形云图

Fig. 6-2 Equivalent stress and deformation cloud diagram of 42CrMo ball valve under different temperatures

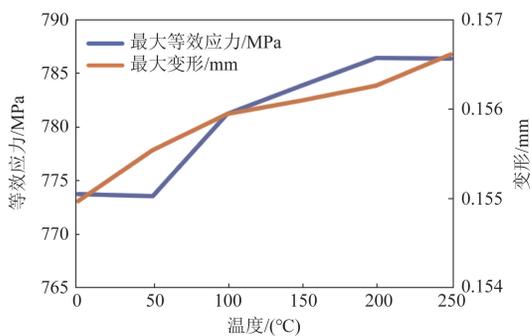


图 7 不同温度下最大变形、最大等效应力对比

Fig. 7 Comparison of maximum deformation and maximum equivalent stress under different temperatures

4 结论与展望

(1) 根据保压取样工作原理, 构建了球阀三维模型, 模拟了 3 种球阀材料在不同静压力作用

下的等效应力和变形情况, 从密封性能和制造价格两方面, 优选出 42CrMo 作为球阀的制作材料。

(2) 针对深孔保压取样高温高压的技术难题, 采用 ANSYS 软件热 - 应力耦合方法研究了 [0, 250] °C、30 MPa 工况下球阀变形与等效应力分布规律。从最大变形和最大等效应力可以看出, 球阀的最大变形随着温度升高而增加, 最大等效应力虽然有局部波动, 但整体趋势与温度正相关。从最大变形和最大等效应力的增加幅度来看, 其最大增长率分别为 1.05%、1.65%, 处于可控范围内, 能够满足保压密封的需求。

(3) 下一步将以球阀高温高压仿真模拟数据为基础, 搭建深钻孔工况环境下的保压取样试验台, 测试保压球阀的密封性能及工作可靠性, 并在非常规油气钻井、战略性矿产勘查、科学钻探井等开展

取心试验,助力深孔高保真原位岩心的获取,提高岩心分析研究的准确性、科学性。

参考文献(References):

- [1] 张家强,毕彩芹,徐银波,等. 非常规油气地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查,2023,10(1):1-19.
Zhang J Q,Bi C Q,Xu Y B,et al. Progresses and main achievements on unconventional oil and gas geological survey[J]. Geological Survey of China,2023,10(1):1-19.
- [2] 张家强,毕彩芹,李锋,等. 新能源矿产调查工程进展[J]. 中国地质调查,2018,5(4):1-16.
Zhang J Q,Bi C Q,Li F,et al. Progresses of the new energy mineral investigation project[J]. Geological Survey of China,2018,5(4):1-16.
- [3] Wang Y X,Fu G,Lyu Q,et al. Accident case - driven study on the causal modeling and prevention strategies of coal - mine gas - explosion accidents:A systematic analysis of coal - mine accidents in China[J]. Resources Policy,2024,88:104425.
- [4] 刘贵康,李聪,游镇西,等. 煤矿井下原位磁控多向保压取心原理与技术[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(8):13-20.
Liu G K,Li C,You Z X,et al. Principle and technology of in - situ magnetically controlled multidirectional pressure - preserved coring in the coal mine[J]. Coal Geology & Exploration,2023,51(8):13-20.
- [5] 郭振宇. 上覆远距离煤层卸压瓦斯地面抽采技术研究[J]. 能源与节能,2024(5):11-14.
Guo Z Y. Surface extraction technology of depressurized gas in overlying long distance coal seams[J]. Energy and Energy Conservation,2024(5):11-14.
- [6] 李勇,徐立富,刘宇,等. 深部煤层气水赋存机制、环境及动态演化[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(2):40-51.
Li Y,Xu L F,Liu Y,et al. Occurrence mechanism, environment and dynamic evolution of gas and water in deep coal seams[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(2):40-51.
- [7] Chen J X,Yang R Y,Li J W,et al. Numerical investigation of abrasive SC - CO₂ jet for horizontal well cavity completion in deep coal seams:insights from a fluid - thermal - structural coupling model [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 250: 123457.
- [8] 刘协鲁,阮海龙,赵义,等. 天然气水合物岩心保压转移与测试系统研发现状分析[J]. 钻探工程,2023,50(S1):26-31.
Liu X L,Ruan H L,Zhao Y,et al. Analysis on research and development of gas hydrate core pressure transfer and testing system[J]. Drilling Engineering,2023,50(S1):26-31.
- [9] 卢春华,张涛,徐俊,等. 海域天然气水合物保压取心钻具的研制与试验[J]. 钻探工程,2023,50(6):18-26.
Lu C H,Zhang T,Xu J,et al. Development and experiment of pressure core sampler for marine natural gas hydrates[J]. Drilling Engineering,2023,50(6):18-26.
- [10] Li W B,Li X,Zhao S X,et al. Evaluation on carbon isotope fractionation and gas - in - place content based on pressure - holding coring technique[J]. Fuel,2022,315:123243.
- [11] Zhao S X,Lu S F,Wu J F,et al. Comparison and verification of gas - bearing parameter evaluation methods for deep shale based on the pressure coring technique [J]. Energy & Fuels, 2023, 37(3):2066-2077.
- [12] 杨柳青,陈文才,曾欣. 深层超深层取心技术进展与未来解决方案[J]. 钻采工艺,2024,47(2):113-120.
Yang L Q,Chen W C,Ceng X. Progress and future solutions of deep and ultra - deep coring technology[J]. Drilling & Production Technology,2024,47(2):113-120.
- [13] 焦杨,孙少亮,高培丞,等. 80 MPa 保压取心工具的研制与应用[J]. 钻采工艺,2023,46(2):112-117.
Jiao Y,Sun S L,Gao P C,et al. Development and application of 80 MPa in - situ pressure - preserved coring tool[J]. Drilling & Production Technology,2023,46(2):112-117.
- [14] 杨立文,苏洋,罗军,等. GW - CP194 - 80A 型保压取心工具的研制[J]. 天然气工业,2020,40(4):91-96.
Yang L W,Su Y,Luo J,et al. Development and application of GW - CP194 - 80A pressure - maintaining coring tool[J]. Natural Gas Industry,2020,40(4):91-96.
- [15] 朱庆忠,苏雪峰,杨立文,等. GW - CP194 - 80M 型煤层气双保压取心工具研制及现场试验[J]. 特种油气藏,2020,27(5):139-144.
Zhu Q Z,Su X F,Yang L W,et al. Development and field test of GW - CP194 - 80M CBM dual pressure coring tool[J]. Special Oil and Gas Reservoirs,2020,27(5):139-144.
- [16] Xie H P,Hu Y Q,Gao M Z,et al. Research progress and application of deep in - situ condition preserved coring and testing[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(11):1319-1337.
- [17] 任红,裴学良,吴仲华,等. 天然气水合物保温保压取心工具研制及现场试验[J]. 石油钻探技术,2018,46(3):44-48.
Ren H,Pei X L,Wu Z H,et al. Development and field tests of pressure - temperature preservation coring tools for gas hydrate[J]. Petroleum Drilling Techniques,2018,46(3):44-48.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 26147 - 2010,球阀球体技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 26147—2010 Specification for Ball of Ball Valve[S]. Beijing:Standards Press of China,2011.

Simulation analysis of thermal – stress coupling for deep hole pressure retention sampling ball valves

WANG Yingli^{1,2}, LI Xiaoyang², LI Bing¹, SHI Shanshan², WU Jixiu²

(1. *China University of Geosciences (Beijing)*, Beijing 100083, China; 2. *Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Science, Hebei Langfang 065000, China*)

Abstract: The temperature and pressure inside the borehole are higher and higher with the increasing depth of the borehole. As a technical method to effectively obtain the in situ state of the underground core, the effective realization of the in situ pressure retention under the high temperature and pressure environment has become one of the key signs to test the reliability of pressure retention sampling. Thus, ball valves were selected as key devices for pressure retention sampling and simulation analysis of thermal – stress coupling, and the stress and deformation law of ball valves in the environmental parameters of [15,30] MPa and [0,250] °C were analyzed. The results of numerical simulation are as follows. ① The maximum equivalent stress and deformation values of three materials of 316L, 42CrMo and Inconel718 under the action of static pressure from 15 to 30 MPa were compared, and the 42CrMo was preferred as a material for the fabrication of ball valves, considering the cost of processing. ② The maximum deformation values of ball valves is increasing when the temperature is increasing from 0 °C to 250 °C, but the growth rate is only 1.05%. The maximum equivalent force is increasing with slight fluctuation, showing an increasing overall trend. The maximum fluctuation is 12.76 MPa, which is in the effective sealing range of ball valves. The simulation results could provide theoretical data for the reliable sealing of pressure retention ball valves in the deep hole.

Keywords: pressure retention sampling; ball valves; high temperature and high pressure; thermal – stress coupling; equivalent stress

(责任编辑: 刘丹)