

保压取心钻具球阀工作动力学分析

韩泽龙¹, 李小洋^{1,2,3*}, 赵明^{1,3}, 宋刚^{1,3}, 张欣^{1,3}, 蒋亚峰^{1,3}, 田英英¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074;

3. 廊坊聚力勘探科技有限公司, 河北廊坊 065000)

摘要: 保压取心技术可以使取出的岩心保持在原位状态下, 最大限度地减少岩心重要数据的丢失, 进而准确获取地下矿产资源储量和地层参数。本文利用数值模拟研究保压取心钻具的球阀机构, 探索其动力学特性, 优化球阀机构, 增加其密封可靠性。分析结果表明, 随着关闭推力的增大, 球阀关闭时间缩短, 产生的振动增大, 易造成密封失效, 需选择较小的推力提高密封的可靠性; 随着接触面摩擦系数的降低, 产生的振动反而增加; 翻转到位后球阀在30 MPa条件下, 其应力、应变皆在球阀的许可范围内, 满足使用需求。该项研究对于指导球阀机构的优化设计及提高其工作可靠性具有重要的意义。

关键词: 保压取心钻具; 球阀; 推力; 摩擦系数; 振动; 可靠性

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0032-07

Analysis of working dynamics of ball valve with pressure core sampler

HAN Zelong¹, LI Xiaoyang^{1,2,3*}, ZHAO Ming^{1,3}, SONG Gang^{1,3},

ZHANG Xin^{1,3}, JIANG Yafeng^{1,3}, TIAN Yingying¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

3. Langfang Juli Exploration Technology Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The pressure holding coring technology can keep the extracted core under in-situ condition, minimize the loss of important data in the core, and then accurately obtain important formation parameters which can calculate the reserves of mineral resources. In this paper, the ball valve mechanism of pressure core sampler is studied by numerical simulation, and its dynamic characteristics are explored to optimize the ball valve mechanism, and increase its sealing reliability. The results show that with the increasing of thrust force on the ball valve, the shorter the closing time of ball valve, but the vibration generated increases, which is easy to cause seal failure. Thus, the small thrust force is selected to help improve the sealing reliability. With the decreasing of friction coefficient, However, the vibration generated increases, making the leakage risk of ball valve much bigger. When the ball valve is closed, the pressure simulation of 30MPa is conducted. The maximum contact stress and the maximum strain are both within the allowable range of ball valve. This study are meaningful to guide the optimal design of ball valve mechanism and improve its working reliability.

Key words: pressure coring; ball valve; thrust force; friction coefficient; vibration; reliability

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-05-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.004

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); 国家重点研发计划项目“天然气水合物勘查开发技术联合研究”(编号: 2018YFE0208200)

第一作者: 韩泽龙, 男, 汉族, 1993年生, 工程师, 石油与天然气工程专业, 硕士, 从事天然气水合物钻采技术及海洋钻探取心取样研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, hz1285@163.com。

通信作者: 李小洋, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探器具及工艺研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 770613273@qq.com。

引用格式: 韩泽龙, 李小洋, 赵明, 等. 保压取心钻具球阀工作动力学分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 32-38.

HAN Zelong, LI Xiaoyang, ZHAO Ming, et al. Analysis of working dynamics of ball valve with pressure core sampler[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 32-38.

0 引言

我国是世界上矿产资源比较丰富、矿种比较齐全的少数几个国家之一。到目前为止,经过几十年的矿产勘探工作,已发现173种矿产。但在矿产资源勘探、储能评价过程中,仍面临一些技术难题和挑战,采用常规的取心方式,当岩心筒从井底提升到地面时,岩心内储存的流体、气体和轻质组分等物质会因岩心筒外压力和温度的降低而发生膨胀和散逸现象^[1],导致储层流体饱和度、储层结构等发生一定程度的变化,不能如实地反映原位条件下地层真实物性状态,尤其在精细评价矿产资源的赋存特点及制定高效合理的开发方案时,原始地层的孔隙度、渗透率及易挥发性气体含量等重要基础数据的获取依然难度较大^[2-4]。保压取心作为一种获取原位高保真岩心样品的技术,在掌握目标地层基础数据方面具有十分重要的作用^[5-7]。

近年来,随着非常规油气资源的大规模勘探开发,对高性能保压取心技术的需求也越来越迫切。煤层气、页岩气以及天然气水合物更是需要原位保真取样技术来精准评价其物性特征和资源储量。保压取心钻具是一种能获取接近原始地层温度和压力状态信息岩心的取心方式,它具有保护井下岩心不受钻井液污染、物性资料真实等优点。因此,保压取心技术获取的井下地质数据准确可靠,对常规油气田开发方案的合理制定以及对天然气水合物、页岩气和煤层气等新能源的开发具有广泛的应用前景^[8-10]。

保压取心钻具具有多种结构及密封形式,较常用的是采用球阀机构来实现取心内筒的密封^[11],例如长城钻探公司研发的GW194-70BYM型保温保压取心工具^[12]、GW-CP194-80A型起钻式保压取心工具^[13],中国地质大学(武汉)研发的海域天然气水合物保压取心钻具^[14],北京探矿工程研究所研发的TKP194-80型密闭保压取心工具^[15],均为球阀密封机构,但是作业过程中受球阀材料、表面粗糙度和翻转推力以及泥浆含砂量等因素的影响,造成密封机构在井下工作时经常出现关闭不严或者无法关闭的情况,从而导致保压密封失败,严重影响保压取心工具的可靠性。

本文重点研究了一种机械式球阀机构,该机构采用行程控制机构对球阀球体施加外力,推动球阀球体翻转关闭。采用数值模拟方法,重点研究不同

推力、摩擦系数对球阀翻转的影响,并且探讨了球阀翻转到位后在30 MPa条件下的应力和变形情况。该研究结果对于指导球阀机构的优化设计及提高其工作可靠性具有重要意义。

1 球阀工作特性

1.1 球阀工作原理

球阀密封机构结构如图1所示,球阀机构由球阀管、上阀座、球阀阀芯、下阀座、销轴以及限位螺栓组成,其中球阀阀芯的外径为95 mm,内通径为61 mm。阀芯上下分别安装一个阀座,阀座在球阀管内做轴向运动,在球阀阀芯翻转过程中,上阀座在外力作用下下压时,上阀座推动球阀阀芯向下运动,由于销轴安装在球阀阀芯侧面限位槽内,阀芯下移并翻转90°,与下阀座端面形成密封。

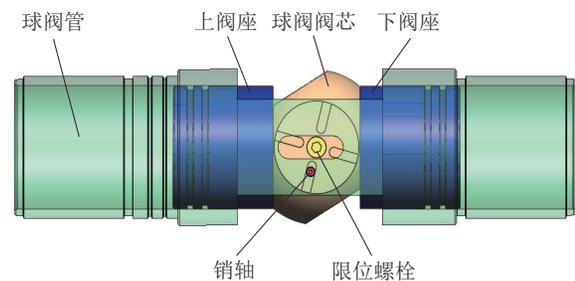


图1 球阀机构原理示意

Fig.1 Schematic diagram of ball valve mechanism

球阀机构在井下工作时,有两种工作状态,即开启状态和关闭状态。最初球阀为开启状态,岩心管可通过球阀抵达钻具底部并阻止球阀翻转关闭,当取心完成后,上提岩心管穿过球阀球体内部,球阀阀芯在上推力的作用下旋转90°后变成关闭状态,岩心以及取心管被密封和存贮。球阀的工作内压力根据井深要求,一般不低于30 MPa。由压力容器的设计压力等级分类可知,该球阀属于高压状态下的密封机构^[16],因此对其工作的安全性和可靠性开展研究是十分有意义的。

1.2 球阀翻转过程理论计算

将保压钻具球阀机构进行简化,建立如图2所示的X-Y坐标轴,球阀阀芯的中心沿着球阀管限位槽做轴向运动,即在X方向上运动,球阀管限位槽的距离为 d ,销轴与球阀管限位槽中心的距离为 L 。

在球阀运动过程中,上阀座对球阀阀芯施加的力为 $F_{\text{上}}$,上弹簧的压缩量为 L_1 ,下阀座对球阀阀芯

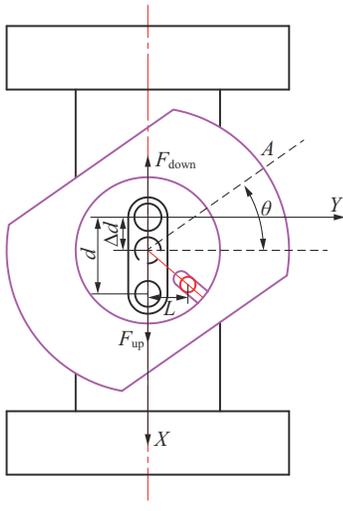


图2 球阀翻转模型

Fig.2 Ball valve flip model

施加的力为 F_{down} , 下弹簧的压缩量为 L_2 , 当上阀座向下移动 Δd 时, 球阀翻转角度为 θ 。其关系如下:

$$ds = \sqrt{[(\Delta d + dl - R\sin\theta') - (\Delta d - R\sin\theta)]^2 + (R\cos\theta' - R\cos\theta)^2}$$

即:

$$ds = \sqrt{(dl + R\sin\theta - R\sin\theta')^2 + (R\cos\theta' - R\cos\theta)^2}$$

式中: dl ——球阀中心点的位移; θ' —— dt 时间后球阀的翻转角度。

则 A 点的瞬时速度为:

$$v = \frac{ds}{dt}$$

2 球阀网格划分

在球阀机构有限元分析过程中, 建立球阀机构的三维模型, 利用有限元分析软件对球阀机构进行仿真分析, 根据球阀的结构特点、载荷类型以及分析的需要, 本次分析采用 Abaqus/Explicit。

为了提高球阀阀芯和阀座部分的计算精度, 网格模型加密了上下阀座和球阀阀芯的网格, 其他部件对于计算的影响较低, 为了提高模型的收敛性, 网格尺寸设置相对较大, 有效减少网格数量。在选择划分网格单元类型时需遵循以下原则: (1) 对于三维区域, 尽可能采用结构化或扫掠网格划分技术, 从而得到六面体单元网格, 减小计算代价, 提高计算精度。当几何形状复杂时, 也可在不重要的区域使用少量楔形体单元。(2) 如果使用了自由网格划分技术, 四面体网格单元的类型应选择二次单

$$F_{up} = -k_{up}(L_1 - \Delta d)$$

$$F_{down} = -k_{down}(L_2 + \Delta d)$$

销轴到限位滑道中轴线最大距离为 L_{max} :

$$L_{max} = \frac{L}{\cos 45^\circ}$$

当下行位移 $\Delta d < \frac{d}{2}$ 时:

$$\tan \theta = \frac{L_{max} \sin 45^\circ - \Delta d}{L}$$

即:

$$\tan \theta = \frac{L \tan 45^\circ - \Delta d}{L}$$

当下行位移 $\Delta d > \frac{d}{2}$ 时:

$$\tan \theta = \frac{\Delta d - L}{L}$$

A 点坐标为 $(\Delta d - R \sin \theta, R \cos \theta)$, 其中 R 为球阀球体半径, A 点产生的位移为 ds , 则:

元。在 Abaqus/Explicit 中应选择修正的四面体单元 C3D10M。在 Abaqus/Standard 中可以选择 C3D10。但如果有大的塑性变量, 或模型中存在接触, 而目使用的是默认的“硬接触”关系, 则也应该选择修正的 C3D10M, 所以本次分析划分网格时采用自由网格划分技术选择四面体单元 C3D10M, 球阀部分共划分网格 49380 个, 所有网格划分完毕后, 总网格数达到 119911 个。

3 球阀机构有限元分析

为了提高球阀保压机构在井筒内的工作可靠性, 采用有限元分析法对球阀的翻转过程进行动力学仿真模拟, 以探究不同推力、摩擦系数对球阀翻转速度、振动情况的影响, 同时研究了球阀翻转到位后的耐压能力。

3.1 推力对球阀翻转的影响

依次在上阀座上端面施加了 200、300、400、500 N 的恒推力, 在下阀座下端面施加 100 N 的恒力, 模型中重力方向与上推力方向一致, 阀座与球体接触摩擦系数设置为 0.05。仿真结果显示(见图 3), 当推力为 200 N 时, 球阀在 2.94 s 关闭; 推力 300 N 时, 球阀在 2.14 s 关闭, 时间较 200 N 时缩短 27.2%; 400 N 时在 1.72 s 完成关闭, 时间较 300 N 时缩短

19.6%;500 N时球阀关闭时间为 1.5 s,时间较 400 N时缩短 12.7%。随着推力的增大,球阀关闭时间缩短,但是推力对球阀关闭时间的影响也逐渐变小。

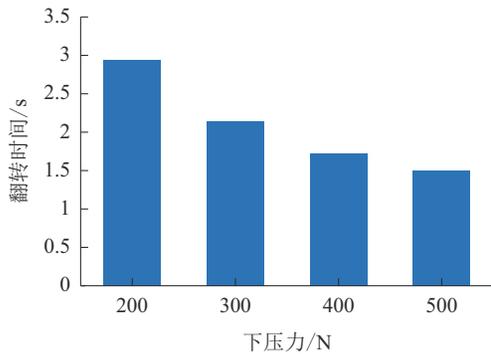


图 3 球阀关闭时间与推力关系

Fig.3 Curve of the relationship between ball valve closing time and thrust

与此同时,球阀翻转速度也随着推力变大越来越快(见图 4),最大达到了 136.5 mm/s。并且从仿真结果中可以看出球阀翻转的初始阶段,速度以线性增加,伴有小幅度的波动,当球阀翻转到位后,由于销轴和限位螺栓的作用,翻转速度会发生再次增大后并降低至 0,且会重复出现多次,导致球阀会产生多次的振动。

以 500 N 曲线为例,球阀阀心在 1.5 s 时初次关闭,但阀心速度多次改变,每次速度改变即发生一次振动,共产生 3 次振动,最大振动速度为 50 mm/s,最终在 2.6 s 趋于 0 并保持稳定,振动时间约为

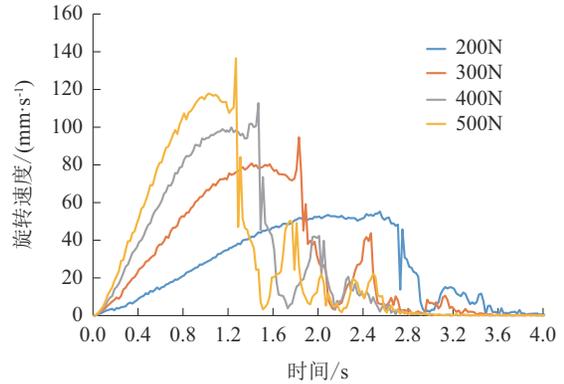


图 4 不同推力条件下球阀翻转速度曲线

Fig.4 Flipping speed curve of ball valve under different thrust conditions

1.1 s,当上推力为 400 N 时,球阀阀心在 1.72 s 时初次关闭,最大振动速度为 42 mm/s,振动时间为 0.42 s。因此,选取球阀达到最大翻转速度(即推力 500 N)时来研究球阀的振动情况。

图 5 是在 500 N 推力作用下球阀在 X、Y、Z 轴 3 个方向上的加速度曲线,通过加速度的变化情况来研究球阀的振动幅度。可以看出在球阀关闭后加速度变化剧烈,最大的振动加速度变化范围为 -5.12g~8.14g,一直持续到 3 s 后加速度才趋近于 0,此时球阀停止振动。综上所述,较大的推力虽然能在一定程度上增加球阀翻转速度,缩短翻转时间,但产生的振动也较大,极易造成密封失效,降低保压密封的可靠性。因此,在球阀能够顺利翻转的情况下,选择较小的推力有助于提高球阀密封的可靠性。

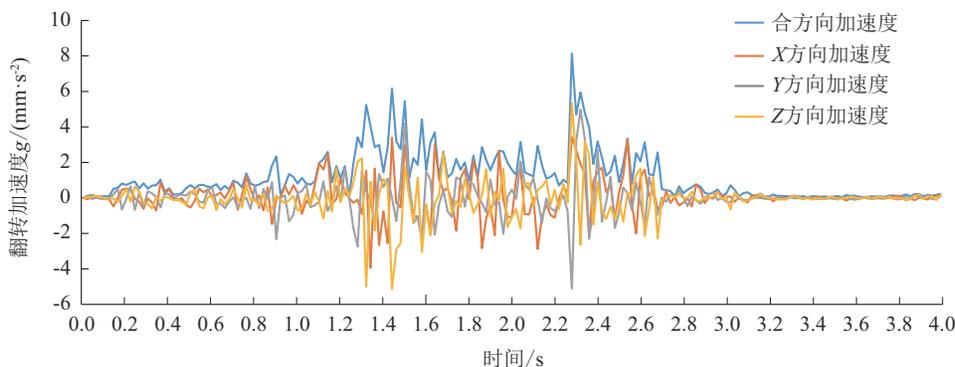


图 5 500 N 推力下球阀翻转完成后振动加速度曲线

Fig.5 Vibration acceleration curve after flipping of ball valve under 500N thrust

3.2 摩擦系数对球阀翻转的影响

由于阀芯与阀座之间是硬密封,且密封压力属

于高压,因此阀芯与阀座接触部分的表面粗糙度一般为 0.2~0.8,其摩擦系数范围为 0.02~0.1。在前

文分析的基础上,选择中等推力进行摩擦系数对球阀翻转影响的研究。如图6所示,在推力均为300 N的条件下,选择阀座与球芯之间的摩擦系数为0.025、0.05、0.075和0.1。当摩擦系数为0.1时,球阀翻转关闭的时间为3.2 s,在摩擦系数为0.025时,球阀翻转关闭时间为1.96 s。随着摩擦系数的降低,球阀翻转关闭时间也随之减小,但两者并不是线性关系,摩擦系数的减小对翻转时间的降低效果也在逐步减小。

从图7可以看出,球阀翻转速度随着摩擦系数减小而变大。在球阀翻转的初期阶段仍然是线性

增加,有较小幅度的锯齿形波动,最大速度达到了108.5 mm/s。后由于球阀翻转到位,出现了急停,导致多次剧烈的速度波动。并且摩擦系数越小,波动幅度和持续时间就越长。图8显示了摩擦系数0.025时球阀的加速度变化情况,尤其是球阀关闭后出现了多次剧烈的加速度波动,最大波动范围 $-5.85g\sim 7.08g$,后逐渐减小。因此,摩擦系数越小,球阀翻转摩擦阻也越小,致使球阀翻转速度也越快,同时球阀的振动强度和持续时间也就越大,不利于球阀的快速可靠密封。

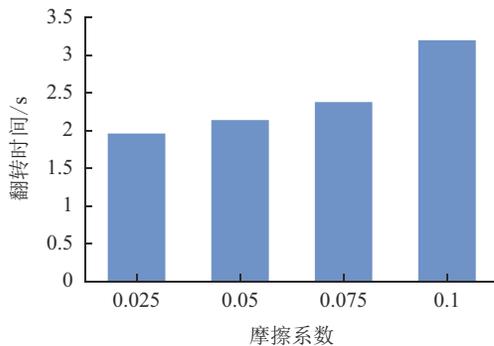


图6 球阀翻转时间与摩擦系数关系

Fig.6 Curve of the relationship between ball valve flipping time and friction coefficient

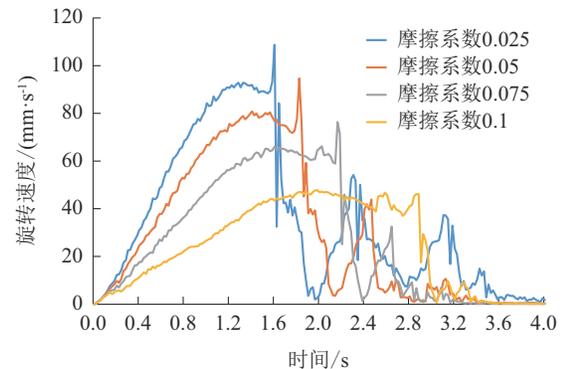


图7 不同摩擦系数条件下球阀翻转速度曲线

Fig.7 Flipping speed curve of ball valve under different friction coefficient conditions

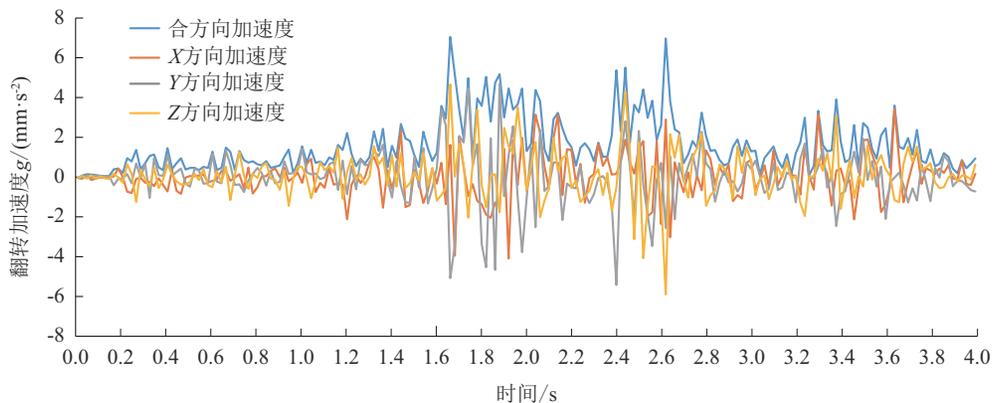


图8 摩擦系数0.025时球阀翻转振动加速度曲线

Fig.8 Acceleration curve of ball valve flipping vibration with a friction coefficient of 0.025

3.3 球阀耐压能力分析

根据保压球阀的设计要求,当球阀翻转到位后,需要能够保持30 MPa的压力,为井底的原位保真提供技术支撑。因此,开展了球阀30 MPa的耐压仿真模拟,来研究高压条件下球阀的应力、应变能否满足高压密封要求,球体选用的材料为Inco-

nel718,低温抗冲击性能优良,主要成分性能见表1。

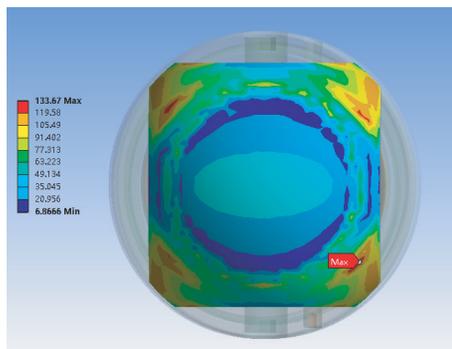
通过模拟结果发现,阀座和球体接触应力最大为133.67 MPa,最大应变为0.0328(见图9),且最大应力和应变的位置都发生在接触区域的外侧边缘地带。球阀的最大接触应力远小于其材料的屈服

表1 Inconel718材料参数

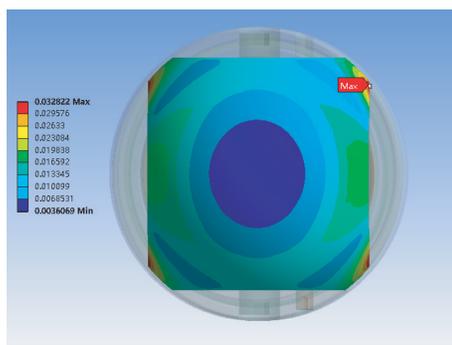
Table 1 Inconel718 Material parameters

成分		性能	
材料名称	占比/%	性能参数	参数值
镍(Ni)	50~55	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	8.2
铬(Cr)	17~21	屈服强度/MPa	1034
铁(Fe)	18~21	抗拉强度/MPa	1172
铌(Nb)	4.75~5.5	延伸率/%	20
钛(Ti)	0.65~1.15		
铝(Al)	0.2~0.8		
碳(C)	0.08		

强度,按照《球阀球体 技术条件》(GB/T 26147—2010)中的规范要求,其最大应变小于规范许可的范围。因此,在30 MPa压力条件下,球阀能够满足密封要求。



(a) 应力云图



(b) 应变云图

图9 在30 MPa情况下球阀接触区域应力和应变云图

Fig.9 Stress and strain cloud map of the contact area of the ball valve at 30MPa

4 结论

以研发的保压取心工具为例,介绍了保压取心工具球阀机构的工作原理及对球阀工作状态进行

仿真模拟,得出以下结论:

(1)随着推力从200 N增加至500 N,球阀关闭时间从2.94 s降低到1.5 s,但推力对球阀关闭时间的影响也逐渐变小。同时随着推力增加,球阀产生的振动幅度增大与次数增多,易造成密封失效,降低保压密封的可靠性。在球阀能够顺利翻转的情况下,选择较小的推力有助于提高球阀密封的可靠性。

(2)随着摩擦系数从0.1降低到0.025,球阀翻转关闭时间从3.2 s降低到1.96 s,但摩擦系数对关闭时间的影响幅度也逐渐降低。同时球阀产生的振动随着摩擦系数的减小而增加,不利于提升球阀的密封性能。

(3)在球阀翻转到位后,进行耐压能力分析,结果显示球阀机构在30 MPa条件下最大接触应力为133.67 MPa,最大应变为0.0328 mm,远小于阀体材料的许可范围,能够满足高压密封要求。

参考文献(References):

- [1] 赵恒耀. 钻井保压密闭取心技术应用分析[J]. 科技资讯, 2013(7):109.
ZHAO Hengyao. Application analysis of drilling pressure holding closed coring technology[J]. Science & Technology Information, 2013(7):109.
- [2] 王西贵,邹德永,杨立文,等. 保温保压保形取心工具优化设计及应用[J]. 石油机械, 2022, 50(2):109-114.
WANG Xigui, ZOU Deyong, YANG Liwen, et al. Optimization and application in unconventional oil and gas development of heat-pressure-shape-preserved coring tool[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(2):109-114.
- [3] 李小洋,张永勤,王汉宝,等. 煤层气调查评价钻探保压取心钻具设计与试制[J]. 地质与勘探, 2019, 55(4):1045-1050.
LI Xiaoyang, ZHANG Yongqin, WANG Hanbao, et al. Design and trial-manufacture of the pressure-holding core drilling tool for evaluation of coal-seam gas[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(4):1045-1050.
- [4] 蒋国盛,王荣璟. 页岩气勘探开发关键技术综述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(1):3-7.
JIANG Guosheng, WANG Rongjing. Review of key technology for shale gas exploration and development[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(1):3-7.
- [5] 胡海良,唐海雄,罗俊丰,等. 深水天然气水合物钻井及取心技术[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(1):27-30.
HU Hailiang, TANG Haixiong, LUO Junfeng, et al. Deepwater gas hydrates drilling and coring techniques[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(1):27-30.
- [6] 郑秀华. 3型天然气水合物保压取心装置[J]. 探矿工程, 2000(4):32-33.

- ZHENG Xiuhua. Type 3 pressure-keep coring set for gas hydrates[J]. Exploration Engineering, 2000(4):32-33.
- [7] 罗军. 保压密闭取心技术在延页27井的应用[J]. 钻采工艺, 2015(5):113-114.
- LUO Jun. Application of pressure maintaining sealed coring techniques to Well Yanye-27[J]. Drilling & Production Technology, 2015, (5):113-114.
- [8] 张洪君, 刘春来, 王晓舟, 等. 深层保压密闭取心技术在徐深12井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(4):110-111, 114.
- ZHANG Hongjun, LIU Chunlai, WANG Xiaozhou, et al. Application of submerged pressure maintaining sealed coring techniques to Well Xushen-12[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(4):110-111, 114.
- [9] 林志强, 杨甘生, 张建. 保形取心技术及其在松科1井中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(7):49-51.
- LING Zhiqiang, YANG Gansheng, ZHANG Jian. Application of coring with formation kept techniques in SLCORE-1[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(7):49-51.
- [10] 刘合, 温鹏云, 宋微, 等. 保压取心工具连续割心系统设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(4):130-136.
- LIU He, WEN Pengyun, SONG Wei, et al. Design of continuous core-cutting system for pressure-maintaining coring tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(4):130-136.
- [11] 刘协鲁, 阮海龙, 赵义, 等. 海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(7):33-39.
- LIU Xielu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):33-39.
- [12] 罗军. 保温保压取心工具球阀工作力学的有限元分析[J]. 石油机械, 2014(7):16-19.
- LUO Jun. Finite element analysis on the mechanics of ball valve of pressure and temperature-preservation coring tool[J]. China Petroleum Machinery, 2014(7):16-19.
- [13] 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 Liwen, SU Yang, LUO Jun, et al. Development and application of GW-CP194-80A pressure-maintaining coring tool[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4):91-96.
- [14] 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):18-27.
- LU Chunhua, ZHANG Tao, XU Jun, et al. Development and experiment of pressure core sampler for marine natural gas hydrates[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6):18-27.
- [15] 赵义, 刘海龙, 蔡家品, 等. TKP194-80型密闭保压取心工具的研制与应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(4):77-83.
- ZHAO Yi, LIU Hailong, CAI Jiapin, et al. Development and application of TKP194-80 sealed pressure-holding coring tool [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):77-83.
- [16] 白云波, 张亚宁, 袁继禹, 等. 压力容器分析设计中等效应力的研究与探讨[J]. 压力容器, 2022, 39(10):54-59.
- BAI Yunbo, ZHANG Yaning, YUAN Jiyu, et al. Research and discussion on equivalent stress in design by analysis of pressure vessels[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(10):54-59.

(编辑 荐华)