

# 压裂球座结构优化分析及耐冲蚀研究

钟林<sup>1</sup>, 冯桂弘<sup>1</sup>, 朱和明<sup>2</sup>, 王国荣<sup>1</sup>, 陈文斌<sup>3</sup>

(1.西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500; 2.中石化石油工程技术研究院, 北京 100020;  
3.川庆钻探工程有限公司安全环保质量检验检测研究院, 成都 610000)

**摘要:** **目的** 提升水平井分段压裂中投球滑套球座的抗冲蚀磨损性能。**方法** 基于流体力学、冲蚀理论, 采用 Fluent 软件建立压裂球座固-液两相流冲蚀模型, 对球座冲蚀磨损进行研究, 分析不同角度下双锥面结构对球座冲蚀磨损的影响。在此基础上, 开展球座冲蚀试验, 研究 3 种不同表面材料对球座冲蚀的影响。**结果** 数值模拟显示, 球座的冲蚀磨损主要发生在前端锥面上, 最大冲蚀速率发生在锥面与密封面交接处。其原因是, 锥段直径逐渐减小, 导致固相颗粒在过流断面上的速度和浓度增加, 动能增大, 使得在斜面流动作用下对锥面的撞击与切削次数增多, 冲击力增强, 造成壁面材料损失。冲蚀试验结果显示, 在 3 种不同表面材料球座的冲蚀中, 双涂层(有机涂层+碳化钨涂层)球座的耐冲蚀能力优于碳化钨涂层和硬质合金球座。**结论** 设计双锥面结构球座时, 合理地选择锥面角度能够有效提升球座的耐冲蚀性能, 否则会导致球座的抗冲蚀性能下降。对球座进行表面喷涂强化处理时, 较单一涂层而言, 选择双涂层的抗冲蚀能力更好。**关键词:** 固-液两相流; 冲蚀磨损; 数值模拟; 球座; 结构优化; 冲蚀试验

中图分类号: TG174.4; TE83 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)06-0213-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.023

## Structural Optimization Analysis and Erosion Resistance Study of Frac Ball Seat

ZHONG Lin<sup>1</sup>, FENG Gui-hong<sup>1</sup>, ZHU He-ming<sup>2</sup>, WANG Guo-rong<sup>1</sup>, CHEN Wen-bin<sup>3</sup>

(1. Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;  
2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100020, China; 3. Chuanqing Drilling Engineering Company  
Limited Safety and Environmental Protection Quality Supervision and Inspection Institute, Chengdu 610000, China)

**ABSTRACT:** In order to improve the erosion resistance of the ball-throwing sleeve ball seat in staged fracturing of horizontal wells, based on fluid mechanics and erosion theory, the paper uses Fluent software to establish the solid-liquid two-phase flow erosion model of fracturing ball seat to study the ball seat erosion wear. This paper analyzed the impact of the ball seat erosion in different angles of double cone structure and carried out the ball seat erosion test to study the erosion of three different surface

收稿日期: 2020-07-15; 修订日期: 2020-09-29

Received: 2020-07-15; Revised: 2020-09-29

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0312305, 2018YFC0310201); 国家自然科学基金面上项目(51775463); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)支持项目(ZJW-2019-03)

Fund: National Key R&D Program of China (2019YFC0312305, 2018YFC0310201); National Natural Science Foundation of China (51775463); Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang) (ZJW-2019-03)

作者简介: 钟林(1985—), 男, 博士, 实验师, 主要研究方向为摩擦学理论及应用、钻头与井下工具、石油天然气装备现代设计理论及方法。邮箱: zhonglin858296@163.com

Biography: ZHONG Lin (1985—), Male, Doctor, Experimentalist, Research focus: tribology theory and application, drill bit and downhole tools, modern design theory and method of oil and gas equipment. E-mail: zhonglin858296@163.com

引文格式: 钟林, 冯桂弘, 朱和明, 等. 压裂球座结构优化分析及耐冲蚀研究[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 213-219.

ZHONG Lin, FENG Gui-hong, ZHU He-ming, et al. Structural optimization analysis and erosion resistance study of frac ball seat[J]. Surface technology, 2021, 50(6): 213-219.

materials of the ball seat. The numerical simulation shows that the erosion of the ball seat mainly occurs on the front cone surface and the maximum of erosion rate occurs at the junction of the cone surface and the sealing surface. The reason is that the diameter of the cone section gradually decreases, resulting in increase of the velocity and concentration of solid particles. With the action of the inclined surface, the increase of kinetic energy will increase the number of impacts and cuttings of the cone surface, increasing the impact force and causing wall material loss. Erosion test results show that in the erosion of three different surface materials of the ball seat, the erosion resistance of the double-coated (organic coating + tungsten carbide coating) ball seat is better than that of the tungsten carbide coating and the cemented carbide ball seat. When designing a ball seat with a double cone structure, a reasonable selection of the angle of the cone can effectively improve the erosion resistance of the ball seat, otherwise it will cause descending erosion resistance of the ball seat. When spraying the surface of the ball seat, the choice of double coating has better erosion resistance than single coating.

**KEY WORDS:** solid-liquid two-phase flow; erosion wear; numerical simulation; ball seat; structural optimization; erosion experiment

目前, 针对低渗透油气、致密油气藏的开发, 水平井钻井技术是一种非常有效的开采手段, 其在特殊油藏和非常规油气藏中广泛应用, 比例高达 60%。在非常规油藏中, 由于低渗透油藏渗透率低、连通性差、开采难度大, 比常规油藏产量低, 因此需要对水平井实施分段压裂措施<sup>[1-6]</sup>。作为水平井开发中实现稳产、增产的重要一环, 近年来, 水平井分段压裂工艺技术的发展十分迅速。其中, 水平井裸眼封隔器分段压裂技术, 由于其施工简便, 工作流程简单, 能减小作业成本, 且具有较高增产效率, 因而应用极为广泛<sup>[7-11]</sup>。该技术的核心工具在于投球滑套, 其作用是建立油管柱和地层裂缝之间的流道, 实现分段压裂<sup>[12-13]</sup>。在实际工程中, 由于井下高温、高压环境, 含有大量支撑剂的压裂液快速流动, 会对球座锥形壁面产生强烈的冲击、切削作用, 使得壁面材料脱落, 形成点蚀、裂缝、凹坑等缺陷, 导致球座和投球之间的接触区域无法实现有效密封, 造成高压流体漏失<sup>[14]</sup>。球座冲蚀磨损是形成分段压裂失效的主要原因, 开展球座冲蚀磨损研究十分有必要。

近年来, 有不少针对投球滑套球座相关方面的研究。Kun Ding<sup>[15]</sup>通过 Fluent 研究了 0.3 mm 与 0.8 mm 粒径的混合支撑剂颗粒对球座冲刷磨损的影响, 得出了当 0.3 mm 粒径颗粒占比为 20% 时, 球座的冲蚀率最低。Chao zheng<sup>[16]</sup>将球座材料表面氮化处理, 并进行单元摩擦试验, 发现经气体氮化处理的球座具有更优的耐磨性。向正新<sup>[17]</sup>研究了排量、颗粒浓度、粒径、黏度对压裂球座冲蚀分布的影响规律, 并对球座结构进行了优化。Nick Carrejo<sup>[18]</sup>研究了喷涂碳化钨涂层与 HSCM 材料球座的耐冲蚀性能, 结果表明, 碳化钨与 HSCM 间的结合强度优于其他候选涂层, 且该涂层的冲蚀率比铸铁更低。

综上所述, 国内外对球座冲蚀的研究, 大多集中在不同工况下球座的冲蚀失效机理分析<sup>[19-22]</sup>, 以及通过表面改性手段提升球座的耐冲蚀性能<sup>[23-28]</sup>, 针对将

多涂层结合用于提升球座的耐冲蚀性能方面还鲜有研究。本文主要基于 CFD 仿真手段, 分析球座的冲蚀特性, 改进结构, 并通过试验, 探究了 3 种不同表面材料下 (有机涂层和碳化钨双涂层、喷涂碳化钨涂层、硬质合金涂层) 球座的耐冲蚀性能, 为压裂球座耐冲蚀研究提供一定指导意义。

## 1 理论模型

### 1.1 冲蚀模型

在水平井分段压裂实际工况中, 压裂液含砂体积比为 5%~35%。由于本文主要研究固-液两相流在流道内对球座壁面的冲蚀现象, 在不影响计算结果准确性的前提下, 忽略固相颗粒间的相互碰撞作用。本次模拟采用 Fluent 软件中的离散相模型模拟流场运动, 使用的冲蚀模型为 Fluent 软件自带冲蚀模型, 其冲蚀速率定义如下:

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particle}}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}} \quad (1)$$

式中:  $\dot{m}_p$  为颗粒质量流量;  $C(d_p)$  为颗粒粒径函数;  $\alpha$  为颗粒路径与壁面间冲击角;  $f(\alpha)$  为冲击角函数;  $v$  为颗粒相对速度;  $b(v)$  为颗粒相对速度函数;  $A_{\text{face}}$  为壁面面积。

### 1.2 有限元模型建立

根据水平井分段压裂技术的现场应用, 建立符合实际工况的球座模型。其中投球滑套如图 1 所示, 设计的球座结构如图 2 所示。其中, 单锥角  $\alpha=26^\circ$ 。

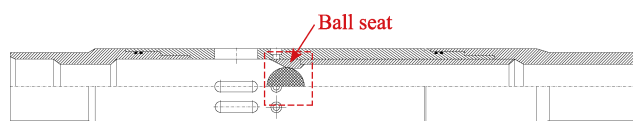


图 1 投球滑套

Fig.1 Sliding sleeve sketch map

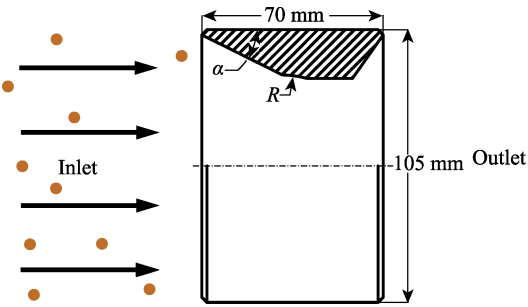


图 2 球座二维结构  
Fig.2 Two-dimensional structure of ball seat

1.3 边界条件设置

参考相关现场压裂实际工况，压裂液排量范围为 2.5~4 m<sup>3</sup>/min，压力 40~70 MPa，粒径范围 0.2~0.8 mm，粒子密度 2000~2500 kg/m<sup>3</sup>。由此定义参数见表 1。

表 1 工况参数  
Tab.1 Working condition parameters

Flow $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	Particle diameter $d/\text{mm}$	Particle density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Pressure $P/\text{MPa}$	Mass flow $M_p/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
4	0.6	2000	50	13.3

入口边界设置为速度入口， $v=Q/A=8.5 \text{ m/s}$ 。出口边界设置为压力出口，压力大小为 50 MPa。水力直径  $D=4A/L=0.1 \text{ m}$ 。雷诺数  $\text{Re}=\rho v d/\mu=8.5 \times 10^5 > 2000$ ，为完全湍流。湍流强度  $I=0.16(\text{Re})^{-1/8}=2.9\%$ 。根据 Forder<sup>[29]</sup>金属壁面撞击试验，其切向和法向壁面恢复系数为：

$$e_t = 0.998 - 0.029\theta + 6.43 \times 10^{-4}\theta^2 - 3.56 \times 10^{-6}\theta^3 \quad (2)$$

$$e_n = 0.993 - 0.0307\theta + 4.75 \times 10^{-4}\theta^2 - 2.61 \times 10^{-6}\theta^3 \quad (3)$$

2 仿真结果分析

2.1 冲蚀磨损分析

球座的冲蚀速率如图 3 所示。从整体上看，冲蚀

磨损主要发生在左端锥面上，最大冲蚀速率发生在锥面与球座密封面交接处，其磨损率约为  $1.1 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。球座冲蚀磨损的主要原因在于，锥段直径的逐渐减少，导致固相颗粒在过流断面上速度和浓度增加，动能增大，使得其在斜面导流作用下对锥面的撞击与切削次数增多，冲击力增强，因此锥面磨损严重。

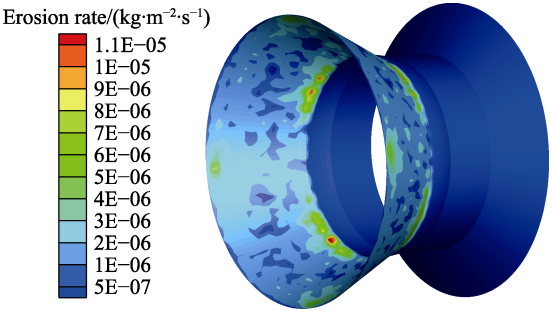


图 3 球座冲蚀云图  
Fig.3 Erosion cloud map of ball seat

2.2 结构优化

在球座抗冲蚀磨损的结构优化方面，通常研究不同锥面结构，以提高球座抗冲蚀磨损性能。因此，在不改变球座的总体尺寸上，将球座入口处的单锥面分成双段锥面，其母线分别为 A、B。在此基础上，提出 2 种改进方案：方案一，母线 A 与 x 轴夹角为  $\alpha=15^\circ$ ，母线 B 与 x 轴之间的夹角为  $\beta=35^\circ$ ；方案二，母线 A 与 x 轴夹角为  $\alpha=35^\circ$ ，母线 B 与 x 轴之间的夹角为  $\beta=15^\circ$ 。

由方案一优化后的球座冲蚀模拟云图（图 4a）可知，虽然将前锥面分成了双段锥面，但是双段锥面的下锥面处承受了主要的冲蚀作用。由于该区域紧挨球座与投球之间的密封面，当下锥面处被冲蚀破坏后，必然会对球座密封面产生冲蚀磨损，导致密封失效，引起滑套打开失败，因此这种结构的优化效果并不理想。从方案二优化后的球座冲蚀云图（图 4b）可知，球座结构由前锥面变成了双锥面，冲蚀主要作用于双锥面的上锥面。由于上锥面的导流作用，减少了固相颗粒对投球与球座之间接触密封面产生的撞击、切削作用，因此该结构达到了优化的目的。

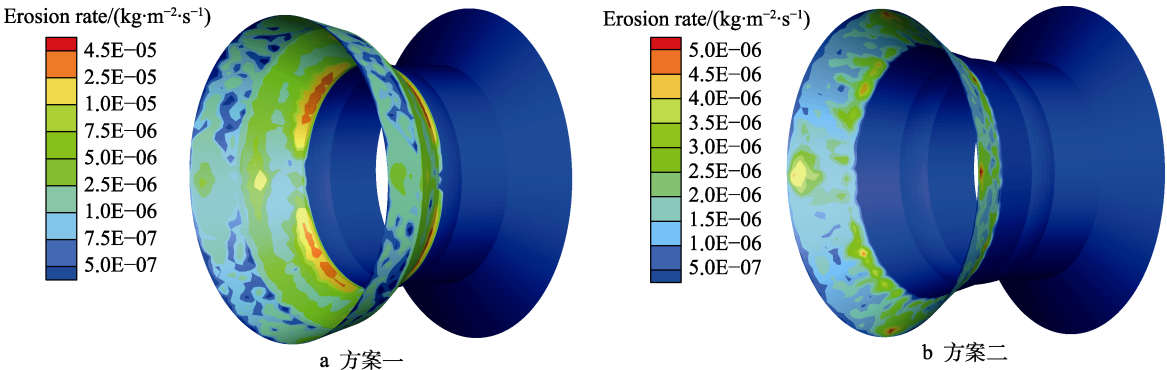


图 4 球座冲蚀云图  
Fig.4 (a) Plan 1 and (b) plan 2 erosion cloud map of ball seat

### 3 试验设计

以数值模拟中单锥球座和优化后方案二双锥面

球座为原型,加工出相同结构的球座,通过室内试验,验证两者的冲蚀性能,并在此基础上探究3种材料球座的耐冲蚀性能,流程如图5所示。试验设置的相应工况参数见表2。

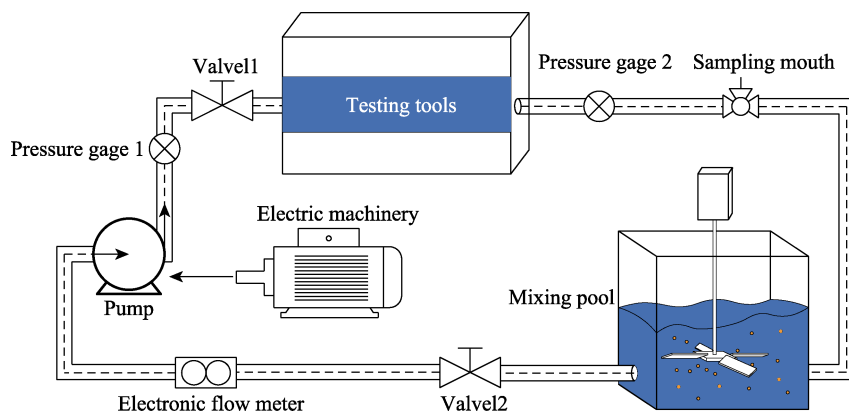


图5 冲蚀实验流程

Fig.5 Erosion experiment process

表2 冲蚀试验参数

Tab.2 Parameters of erosion experiment

Parameters	The value
Flow/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	360
Solid particle density/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.55~1.85
Particle diameter, mesh number	20~40
Particle volume fraction/%	30

### 4 球座冲蚀试验结果

#### 4.1 冲蚀试验结果分析

冲蚀试验之前,球座的宏观形貌如图6所示。球

座基体材质为镁铝合金,各型号球座编号见表3,冲蚀不同时间后的宏观形貌如图7—11所示。

表3 球座类型

Tab.3 Types of ball seat

Number	Surface material	Tapered surface type
1	Organic coating + Tungsten carbide coating	Single cone
2	Tungsten carbide coating	Single cone
3	Cemented carbide	Single cone
4	Organic coating + Tungsten carbide coating	Double cone
5	Tungsten carbide coating	Double cone



图6 各球座未冲蚀前宏观形貌

Fig.6 Macro morphology of each ball seat before erosion

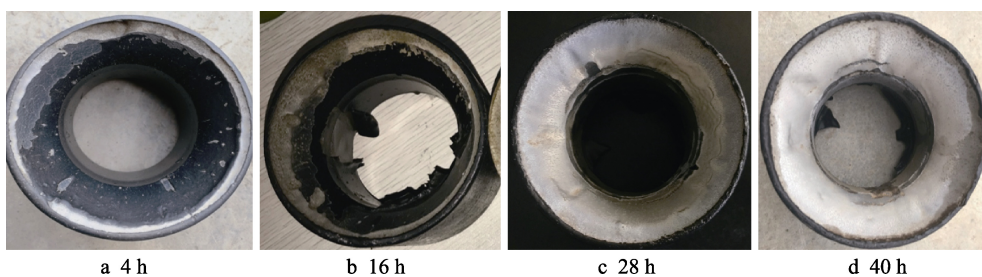


图7 1号球座（碳化钨+有机涂层）

Fig.7 No.1 ball seat (tungsten carbide + organic coating)



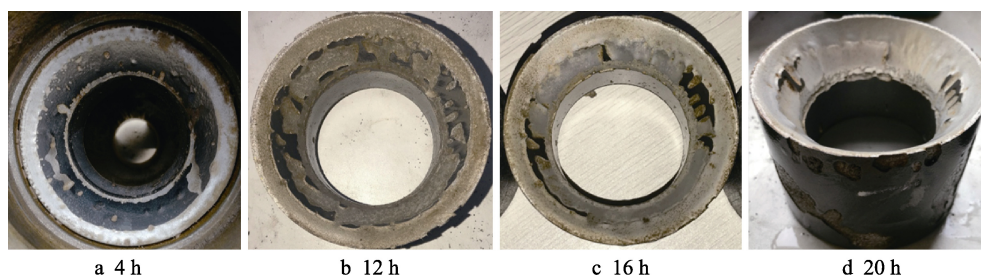


图 8 2 号球座 (碳化钨)  
Fig.8 No.2 ball seat (tungsten carbide)

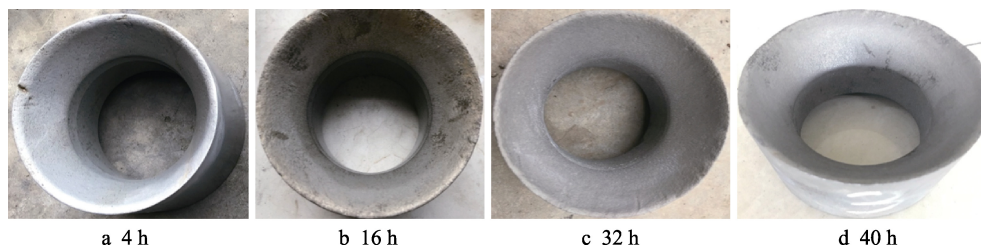


图 9 3 号球座 (硬质合金)  
Fig.9 No.3 ball seat (carbide)

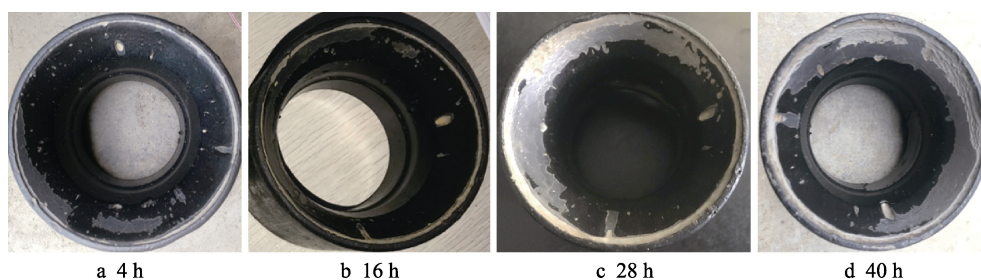


图 10 4 号球座 (碳化钨+有机涂层)  
Fig.10 No.4 ball seat (tungsten carbide + organic coating)

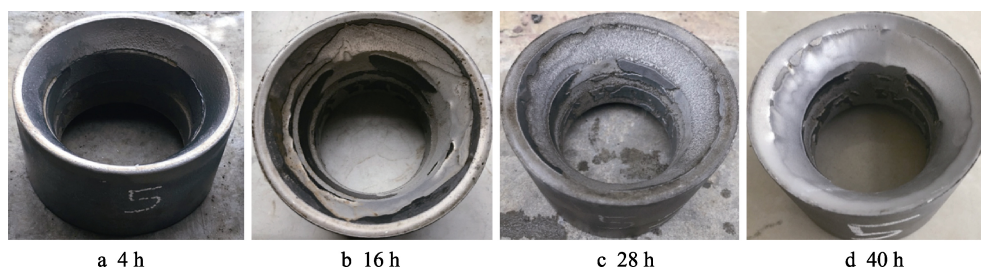


图 11 5 号球座 (碳化钨)  
Fig.11 No.5 ball seat (tungsten carbide)

由图 7 可知, 1 号球座在排量  $Q=360 \text{ m}^3/\text{h}$ 、含砂体积分数为 30% 条件下冲蚀 40 h, 入口处锥面的磨损情况相当严重, 有机涂层及碳化钨涂层几乎完全脱落, 坐封面 (靠近球座底部) 处出现破损。在 0~28 h, 球座入口处前锥面有机涂层逐渐脱落, 暴露出碳化钨涂层。碳化钨涂层在高速流体的冲击下迅速脱落, 同时在重力的作用下形成凹坑。在 28~40 h, 随着耐冲蚀性能的下降, 基体材料在高速流体的冲击下, 凹坑逐渐消失, 呈现出较平滑的表面。从 16 h 开始, 1 号球座坐封面涂层部分脱落, 部分坐封面开始被冲蚀,

导致密封性能降低。

由图 8 可知, 2 号球座在排量  $Q=360 \text{ m}^3/\text{h}$ 、含砂体积分数为 30% 条件下冲蚀 20 h, 入口处锥面的磨损情况严重, 碳化钨涂层几乎完全脱落, 坐封面被大量冲蚀。在 0~20 h, 碳化钨涂层在高速流体的冲击下迅速脱落, 随着耐冲蚀性能的下降, 基体材料暴露在高速流体的冲击下, 冲蚀后呈现出较平滑的表面。从冲蚀 4 h 后, 2 号球座坐封面开始被冲蚀。当冲蚀时间为 12 h 时, 坐封面材料大量流失, 导致密封性能降低。

由图9可知,3号球座在排量 $Q=360\text{ m}^3/\text{h}$ 、含砂体积分数为30%条件下冲蚀40 h,入口处锥面的磨损情况严重,基体材料在高速流体的冲击下,表面光滑无凹坑。在4~16 h,3号球座坐封面开始被冲蚀。当冲蚀时间为32 h时,坐封面被大量冲蚀,导致密封性能降低。

由图10可知,4号球座在排量 $Q=360\text{ m}^3/\text{h}$ 、含砂体积分数为30%条件下冲蚀40 h,入口处锥面上部磨损情况较严重,有机涂层及碳化钨涂层部分脱落。锥面下部磨损情况良好,有机涂层及碳化钨涂层均未脱落,坐封面未出现冲蚀磨损。因此,该球座具有较强的密封能力。

由图11可知,5号球座在排量 $Q=360\text{ m}^3/\text{h}$ 、含砂体积分数为30%条件下冲蚀40 h,入口处锥面的磨损情况相当严重,入口处锥面碳化钨涂层几乎完全脱落,坐封面几乎被完全冲蚀,该球座的密封性降低。在0~28 h,碳化钨涂层在高速流体的冲击下逐渐脱落,上下锥面逐渐合并为一个锥面。随着耐冲蚀性能的下降,基体材料暴露在高速流体的冲击下,球座入口锥面呈现出较平滑的基体表面。从4 h后,5号球座坐封面涂层部分脱落,部分坐封面开始被冲蚀。当冲蚀时间为40 h时,坐封面未被完全冲蚀掉,具有一定的密封性能。

球座的总质量随时间的损失情况以及损失率如图12、13所示。由图12可以看出,各个球座的质量随冲蚀时间延长,均呈线性下降。单锥结构球座1、2、3号中,1号双涂层球座在绝大部分时间段的平均冲蚀率要低于3号硬质合金球座和2号碳化钨涂层球座。这说明双涂层球座具有更优异的耐冲蚀性能。由图13可以看出,在双涂层球座1、4号中,4号球座在每个时间段内的冲蚀磨损率要远远小于1号球座。这是因为1号球座入口锥面未分双锥度,只采用了双涂层,而4号球座采用了双涂层和双锥度。同样,在相同碳化钨涂层情况下,5号双锥面球座较2号单锥面球座而言,在每个时间段内的冲蚀磨损率更低,同样验证了双锥面结构具有更强的耐冲蚀性能。

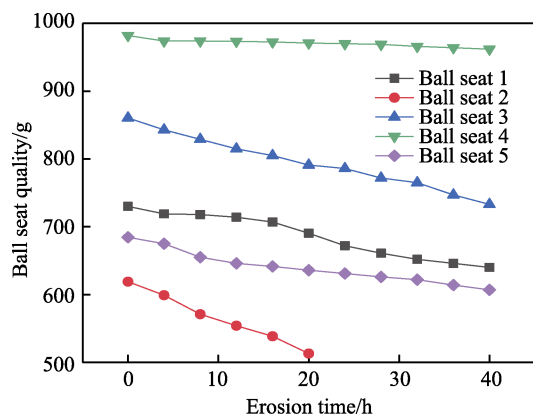


图12 球座总质量随时间的损失情况  
Fig.12 Loss of the total mass of the ball seat over time

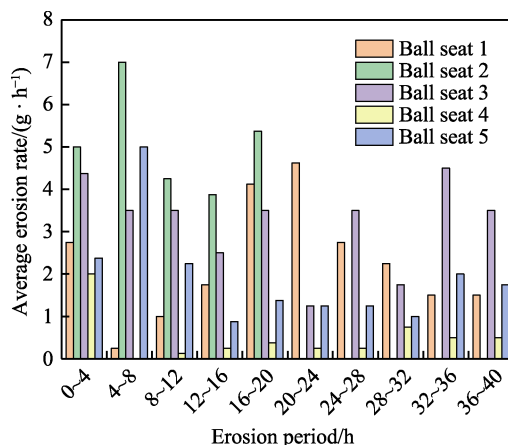


图13 球座的质量损失速率  
Fig.13 Ball seat mass loss rate per unit time

## 4.2 球座通径变化

结合球座通径的实际变化(见图14)和冲蚀形貌情况来看,本次试验球座中,4号球座在冲蚀时间达到40 h后,坐封弧面处还保持较为完整的涂层,并且其通径变化不大,保持了良好的球座坐封面完整度。

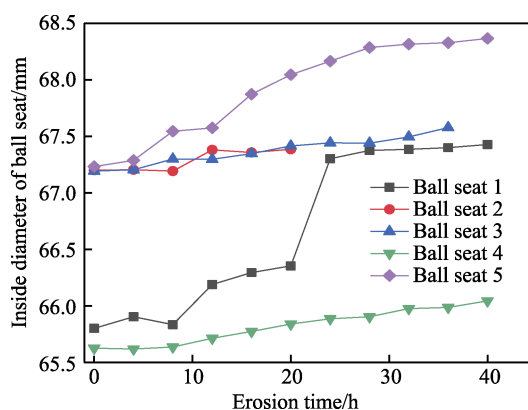


图14 球座通径变化  
Fig.14 Ball seat diameter change diagram

## 4.3 球座承压试验测试

4号球座在冲蚀试验中的抗冲蚀表现较优,为了进一步探究其密封可靠性,在该球座冲蚀40 h后,进行了密封及承压性能测试。通过加压泵加压至70 MPa,验证球座的密封及承压性能,如图15所示。经观察,



图15 4号球座承压密封测试  
Fig.15 No.4 ball seat pressure sealing test

所测试球座冲蚀后, 坐封面与憋压球配合正常, 稳定未泄压, 密封性良好。

## 5 结论

1) 通过数值模拟结果表明, 球座的冲蚀磨损主要发生在前端锥面上, 最大冲蚀速率发生在锥面与密封面交接处。

2) 通过比较3种不同表面材料球座的冲蚀试验, 发现采用双涂层(有机涂层+碳化钨涂层)的球座的耐冲蚀能力优于碳化钨涂层和硬质合金球座。

3) 设计双锥面结构球座时, 合理地选择锥面角度, 能够有效提升球座耐冲蚀性能, 否则会导致球座抗冲蚀性能下降。

## 参考文献:

- [1] 陈建飞, 罗楚湘. 水平井分段压裂工艺技术综述[J]. 辽宁化工, 2017, 46(7): 684-686.  
CHEN Jian-fei, LUO Chu-xiang. Review of segmental fracturing technology for horizontal wells[J]. Liaoning chemical industry, 2017, 46(7): 684-686.
- [2] 韩红星. 油田低渗透油藏开发技术研究[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(11): 47.  
HAN Hong-xing. Research on development technology of low permeability oil reservoirs[J]. Chemical engineering design communication, 2016, 44(11): 47.
- [3] 张诗航, 杨烨, 王翔. 水平井分段压裂与滑套球座冲蚀磨损研究[J]. 石化技术, 2016, 23(10): 230.  
ZHANG Shi-hang, YANG Ye, WANG Xiang. Research on segmental fracturing of horizontal wells and erosion wear of sliding sleeve ball seat[J]. Petrochemical technology, 2016, 23(10): 230.
- [4] YUAN F, BLANTON E, CONVEY B A, et al. Unlimited multistage frac completion system: A revolutionary ball-activated system with single size balls[C]// SPE Annual technical conference and exhibition. New Orleans, Louisiana, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2013.
- [5] BAGCI S, FLORES J C, CASTRO L. Conceptual design and production enhancement for ball-activated multistage fracturing systems in deepwater formations[C]// SPE international hydraulic fracturing technology conference and exhibition. Muscat, Oman: SPE, 2018.
- [6] PEI Xiao-han, WEI Song-bo, SHI Bai-ru, et al. Disintegrating fracturing ball used in ball injection sliding sleeve for staged fracturing[J]. Petroleum exploration and development online, 2014, 41(6): 805-809.
- [7] YUAN F, BLANTON E, CONVEY B A, et al. Unlimited multistage frac completion system: A revolutionary ball-activated system with single size balls[C]//SPE/EAGE European unconventional conference and exhibition. Vienna, Austria: SPE, 2013.
- [8] AVILES I, DARDIS M, MARYA M. Degradable frac ball holds solution to persistent problem in fracturing[J]. Journal of petroleum technology, 2013, 65(11): 32-33.
- [9] SHAW J. Benefits and application of a surface controlled sliding sleeve for frac applications[C]//SPE annual technical conference and exhibition. Denver, Colorado: SPE, 2011.
- [10] THEMIG D. New technologies enhance efficiency of horizontal multistage fracturing[J]. Journal of petroleum technology, 2011, 63: 26-31.
- [11] STAFF J P T. Technology update: New methods boost multistage fracturing in horizontals[J]. Journal of petroleum technology, 2007, 59(7): 28-30.
- [12] LIU Z, WANG Z, REN G, et al. Researching and testing on casing ball seat for multistage fracturing in horizontal wells[C]// 2020 IPTC. Saudi Arabia: IPTC, 2020.
- [13] BAIHLY J D, AVILES I, JOHNSON J, et al. Sleeve activation sleeve activation in open-hole fracturing systems: a ball selection study[C]// SPE annual technical conference and exhibition. Calgary, Alberta: SPE, 2012.
- [14] ZHENG C, LIU Y, WANG H, et al. Numerical study on improving the erosion life of ball seat for oil and gas reservoir fracturing[J]. Engineering failure analysis, 2016, 60: 188-198.
- [15] DING K, YIN H, WAN B, et al. Analysis of particle size to erosion wear of sliding sleeve ball seat based on fluent software[J]. AIP conference proceedings, 2017, 1829(1): 020024.
- [16] ZHENG C, LIU Y, WANG H, et al. Research on the effect of gas nitriding treatment on the wear resistance of ball seat used in multistage fracturing[J]. Materials design, 2015, 70: 45-52.
- [17] 向正新, 李思行, 钱利勤, 等. 压裂球座冲蚀磨损规律研究和结构优化[J]. 工程设计学报, 2017, 24(5): 555-562.  
XIANG Zheng-xin, LI Si-hang, QIAN Li-qin, et al. Study on erosion wear law and structure optimization of frac ball seat[J]. Journal of engineering design, 2017, 24(5): 555-562.
- [18] CARREJO N, WIBOWO H, ESPINOZA O R, et al. Smart-engineered ball seat system to optimize flow area in multi-zone fracturing treatments[C]// SPE unconventional resources conference Canada. Calgary, Alberta: Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [19] 张磊, 王绍先, 彭志刚, 等. 水平井裸眼压裂球座模型的建立与分析[J]. 石油机械, 2014, 42(3): 76-79.  
ZHANG Lei, WANG Shao-xian, PENG Zhi-gang, et al. Establishment and analysis of horizontal well open-hole fracturing ball seat model[J]. Petroleum machinery, 2014, 42(3): 76-79.
- [20] 丁坤, 李建民, 杨文新, 等. 压裂液对水平井滑套球座冲蚀磨损的数值模拟[J]. 石油机械, 2014, 42(12): 75-78.  
DING Kun, LI Jian-min, YANG Wen-xin, et al. Numerical simulation of erosion wear of sliding sleeve ball seat in horizontal wells by fracturing fluid[J]. Petroleum machinery, 2014, 42(12): 75-78.