

压裂管柱中陶粒对滑套球座影响

刘景超, 刘超, 王晓

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

摘 要: **目的** 防止陶粒对滑套球座产生破坏。**方法** 利用有限元软件 LS-DYNA 对陶粒冲击滑套球座进行建模, 分别改变陶粒与滑套球座表面涂层之间的摩擦系数、滑套球座涂层的厚度、陶粒的粒径、陶粒的速度和陶粒速度相对于滑套球座表面的角度, 通过仿真结果观察参数变化对滑套球座表面应力的影响。**结果** 随着陶粒和球座之间的静摩擦系数由 0.1 增加到 0.4, 球座的最大表面应力由 1.67 GPa 增加到 2.33 GPa。随着球座表面涂层厚度由 3 μm 增大到 6 μm , 球座的最大表面应力由 2.05 GPa 减小到 0.89 GPa。随着陶粒粒径由 50 μm 增加到 80 μm , 球座的最大表面应力由 1.67 GPa 增加到 3.63 GPa。随着陶粒速度由 24 m/s 增加到 96 m/s, 球座的最大表面应力由 0.96 GPa 增加到 2.42 GPa。随着陶粒和球座表面之间的夹角由 15° 增加到 60°, 球座的最大表面应力由 1.67 GPa 增加到 4.12 GPa。**结论** 压裂液的性能会影响陶粒和球座之间的摩擦系数, 进而影响球座的表面应力大小。球座的表面涂层厚度适当增大可以降低其表面的最大应力, 压裂液中陶粒的直径越大, 单个陶粒对球座造成的冲击应力越大。可以通过设计使滑套球座表面与中心线的夹角尽量小, 以减小球座的最大表面应力。施工排量的增大会加剧球座的破坏。

关键词: 陶粒; 滑套球座; LS-DYNA; 涂层; 表面应力; 破坏

中图分类号: TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)05-0118-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.018

Influence of Sand in Fracturing String on Sleeve Tee

LIU Jing-chao, LIU Chao, WANG Xiao

(Engineering Technology Company, CNOOC Energy Technology & Services Limited, Tianjin 300452, China)

ABSTRACT: **Objective** To prevent damage of sleeve tee caused by sand. **Methods** Using the finite element software LS-DYNA, the impact of sand on sleeve tee was modeled. By changing the coefficient of friction between the ball seat surface and sand, the thickness of the coating, the diameter of sand, the speed of sand, the angle between sand velocity and sleeve tee surface, the effects of parameter changes on sleeve tee surface stress were observed by simulation results. **Results** With the static coefficient of friction between the sand and the ball seat increasing from 0.1 to 0.4, the maximum surface stress on ball seat increased from 1.67 GPa to 2.33 GPa. With the coating thickness on the ball seat surface increasing from 3 μm to 6 μm , the maximum surface stress ball seat decreased from 2.05 GPa to 0.89 GPa. As the diameter of sand increased from 50 μm to 80 μm , the largest surface stress on the ball seat increased from 1.67 GPa to 3.63 GPa. With the sand speed increasing from 24 m/s to 96 m/s, the maximum surface stress on ball seat increased from 0.96 GPa to 2.42 GPa. With the angle between the sand speed and ball seat surface increasing from 15° to 60°, the maximum surface stress on ball seat increased from 1.67 GPa to 4.12 GPa.

收稿日期: 2016-01-23; 修订日期: 2016-04-26

Received: 2016-01-23; Revised: 2016-04-26

作者简介: 刘景超(1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事海洋钻完井科技研究。

Biography: LIU Jing-chao (1984—), Male, Master, Engineer, Research focus: marine drilling and completion technology research.

Conclusion Performance of fracturing fluid affected the coefficient of friction between the sand and the ball seat, thereby affecting the tee surface stress magnitude; appropriately increasing the surface coating thickness of tee could reduce its maximum stress. The larger the diameter of sand, the greater the stress on the ball seat. The sleeve could be designed to make the angle between the surface and the center line of the ball seat as small as possible to reduce the maximum surface stress on ball seat. Increased construction could exacerbates the destruction of tee.

KEY WORDS: sand; sleeve tee; LS-DYNA; coating; surface stress; damage

近年来,煤层气和页岩气开发工作逐渐深入且开发技术不断进步。针对水平井完井压裂过程中压裂施工排量和含砂量的不断增加,滑套球座的冲蚀磨损问题逐渐突出^[1-3],冲蚀会导致封隔器坐封失效,封隔器的坐封失效会导致后续的施工失败,进而造成巨大的经济损失。目前国内外相关学者对流场冲蚀磨损规律进行了较深入的研究^[4-7],也得出了许多宝贵的经验。丁坤等人^[3]针对水平井裸眼封隔器投球滑套分段压裂技术在施工过程中出现压裂携砂液对滑套球座冲蚀磨损的问题,采用欧拉多相流理论和 Finnie 微切削理论,建立了压裂液对滑套球座冲蚀的液固两相双流体数学模型,结合实际工程模拟不同砂比、粒径、排量等因素对球座冲蚀磨损速率的影响,并进行失效分析和现场应用。运用 Fluent 软件数值模拟混合粒径固体颗粒对滑套球座的冲蚀磨损,结果表明,压裂携砂液冲蚀球座最严重的部位发生在滑套前端锥面;施工排量对球座冲蚀磨损的影响最大,且磨损速率与排量成指数关系。该球座冲蚀磨损规律为非常规油藏水平井分段压裂施工方案的优化提供了理论依据。王尊策等人^[4]针对压裂管柱磨损日益严重这一问题,基于欧拉-欧拉双流体模型,结合携砂压裂液的冲刷磨损试验,建立了半试验的冲刷磨损模型,对深层气井压裂管柱突扩结构的内流态和冲刷磨损规律进行数值模拟,得到了速度分布、砂浓度分布、砂粒冲击速度和冲击角度等流场特性,以及突扩管柱的冲刷磨损量,模拟得到的主要磨损部位与现场失效部位基本吻合。但是现有的文章大多是考虑整个球座的宏观破坏情况,得出整个流场的破坏侵蚀情况,而很少对微观的破坏规律进行分析研究。本文结合国内某水平井压裂施工参数^[8-9],利用 LS-DYNA 软件对陶粒冲蚀滑套球座问题进行分析。

1 滑套球座结构

水平井分段压裂设计施工方案时,根据水平段

的长度和分段数量要求,压裂管柱上串联各级球座。在压裂施工过程中通过投压裂球使球座坐封进而实现分段压裂。滑套结构如图 1 所示,在投球过程中压裂球会和图中所示 A 区域紧密贴合进而形成压差,实现坐封。在投球之前,压裂液中携带的陶粒会对滑套球座产生冲击,进而出现冲蚀现象,如果冲蚀严重,会影响压裂球和 A 区域的密封,进而导致球座的坐封失败。为了防止冲蚀对球座产生破坏,需要对球座表面进行渗氮处理^[10],以加强其耐磨性,避免设备在施工过程中失效。本文主要考虑渗氮以后氮化层对球座表面受力的影响。通过改变陶粒和球座之间的静摩擦系数、球座表面涂层厚度、陶粒粒径、陶粒速度、陶粒速度和球座表面之间的夹角等一系列参数,得到了球座表面氮化涂层受力规律,为以后设计施工提供参考。

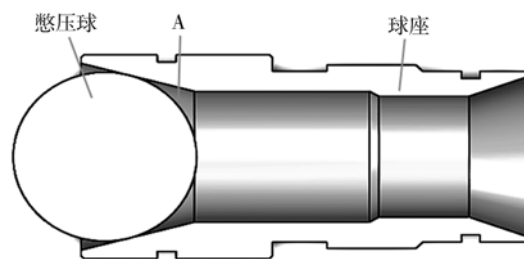


图 1 球座示意图

Fig.1 Schematic of ball seat

2 磨损方程

冲蚀磨损是一个很复杂的过程,并且受到诸多因素的影响。目前,对于冲蚀磨损的理论研究有很多,但是没有一种数学模型能够解释所有的冲蚀现象^[11-12]。本文采用 Bitter 的变形磨损理论。Bitter 于 20 世纪 60 年代在 Finnie 微切削理论基础上提出了变形磨损理论,他认为在高角度冲蚀时,微切削作用不明显,冲击造成材料变形,表面形成裂纹并脱落产生磨损^[13-15]。此外,只有当冲击应力达到一定值时,材料表面才能够产生足够大的变形,产生

磨损。Bitter 从能量的角度推导出了总的磨损量是由变形引起的磨损量和切削产生的磨损量之和,表达式如下:

$$W_C = \begin{cases} W_{C1} = \frac{2mC(v\sin\alpha - K_2)}{v\sin\sqrt{\alpha}} \left[v\sin\alpha - \frac{C(v\sin\alpha - K_2)^2}{v\sin\sqrt{\alpha}} Q \right] & (\alpha < \alpha_0) \\ W_{C2} = \frac{mC}{2Q} \left[v^2 \cos^2 \alpha - K_1(v\sin\alpha - K)^{3/2} \right] & (\alpha \geq \alpha_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$W_D = m(v\sin\alpha - K^2)/(2\varepsilon) \quad (2)$$

式中: W_C 为由变形引起的磨损量; W_D 为切削产生的磨损量; m 为冲蚀颗粒的质量; v 为冲蚀速度; ε 为常数, 与变形有关; Q 为常数, 与切削作用有关; α 为冲蚀角, α_0 是 $W_{C1} = W_{C2}$ 时的冲蚀角; C 、 K 、 K_1 为常量。

3 计算模型

取滑套球座表面的一个微小表面, 建立陶粒冲击球座的仿真模型。采用 SolidWorks 建立模型, 利用 SolidWorks 与 workbench 软件的无缝连接功能实现模型的参数化。LS-DYNA 软件在几何非线性(大位移、大转动和大应变)、材料非线性和接触非线性等方面有着强大的求解计算功能。它以 Lagrange 算法为主, 同时具备 ALE 和 Euler 算法; 以显式求解为主, 同时具备隐式求解功能。该软件在结构动力学分析方面有特别突出的表现, 在军用和民用方面都显示出了巨大的应用效果, 其显式动力学程序更是具备独一无二的优势。因此本文选用 LS-DYNA 软件。

在模拟陶粒冲击球座的过程中, 由于计算机运算资源有限, 从提高工作效率和保证结果准确性的角度出发, 需要不断优化计算模型。本文通过不断调节计算时长, 达到能够观察从陶粒接触球座到陶粒最终反弹离开球座的整个过程的目的。在前处理过程中, 需要把时间步长设置得足够小, 以便能够捕捉到涂层应力达到最大的瞬间。文中设置的时间步长为 10^{-9} s。利用 workbench 中的 LS-DYNA 模块对模型进行网格划分, 把陶粒的速度分解并施加到图 2 中的小球上, 建模的过程中把球座表面涂层和球座基体材料建成两部分, 通过后续前处理定义体接触使二者结合成一体。约束施加在球座基体的底面。图 2 是计算模型图。

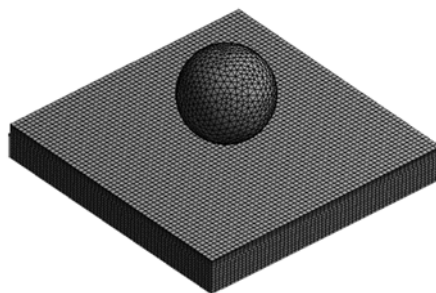


图 2 计算模型图

Fig.2 Calculation model

4 仿真结果及分析

改变陶粒和球座之间的静摩擦系数, 由 0.1 增加到 0.4, 球座的表面最大应力由 1.67 GPa 增加到 2.33 GPa。变化曲线如图 3 所示。可以看出随着摩擦系数的增大, 球座的表面最大应力增大。这与 Bitter 提出的变形磨损理论相吻合, Bitter 认为在高角度冲蚀时, 微切削作用不明显, 冲击造成材料变形, 表面形成裂纹并脱落产生磨损。摩擦系数的增大会导致陶粒和涂层表面之间的摩擦力增大, 从而更容易形成表面裂纹, 进而脱落。

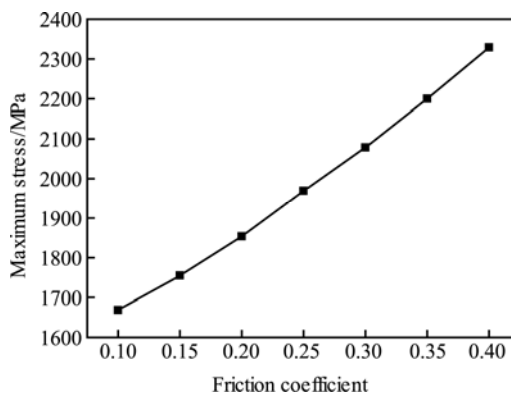


图 3 摩擦系数与最大应力关系

Fig.3 Relationship between friction coefficient and max. stress

改变球座表面涂层厚度, 由 $3\mu\text{m}$ 增大到 $6\mu\text{m}$, 球座的表面最大应力由 2.05 GPa 减小到 0.89 GPa。变化曲线如图 4 所示。可以看出随着球座涂层厚度的增大, 球座的表面最大应力减小。这是由于球座表面涂层经过氮化处理后, 具备更好的力学性能, 能够极大缓冲陶粒对其表面的冲击力。

改变陶粒粒径, 由 $50\mu\text{m}$ 增加到 $80\mu\text{m}$, 球座的表面最大应力由 1.67 GPa 增加到 3.63 GPa。变化曲线如图 5 所示。可以看出陶粒粒径越大, 球座的表面最大应力越大, 与式 (1) 中 m 增大引起冲

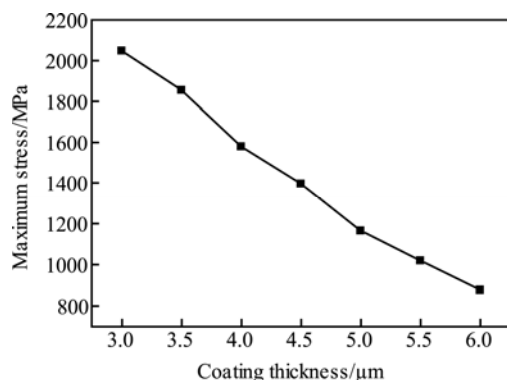


图 4 涂层厚度与最大应力关系

Fig.4 Relationship between coating thickness and max. stress

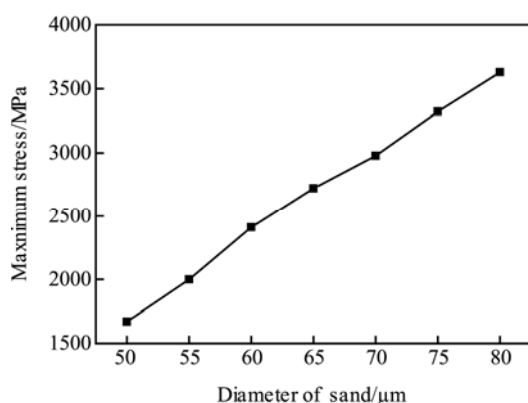


图 5 陶粒直径与最大应力关系

Fig.5 Relationship between diameter of sand and max. stress

蚀加剧相吻合。

改变陶粒速度，由 24 m/s 增加到 96 m/s，球座的最大表面应力由 0.96 GPa 增加到 2.42 GPa。变化曲线如图 6 所示。可以看出陶粒速度越大，球座的最大表面应力越大。根据 Bitter 推导出的磨损量公式可以发现，磨损量和陶粒速度的平方成正比。参照球座的最大表面应力变化趋势，印证了表面应力导致的变形是冲蚀磨损的直接原因。

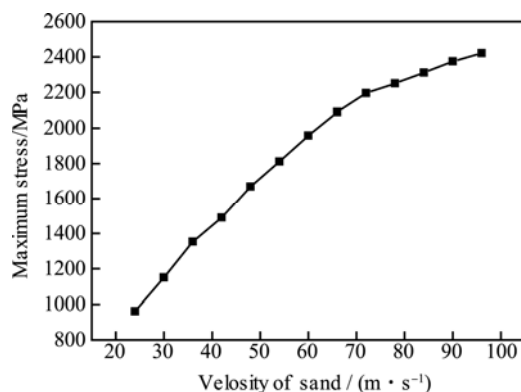


图 6 陶粒速度与最大应力关系

Fig.6 Relationship between velocity of sand and max. stress

改变陶粒速度和球座表面之间的夹角，由 15° 增加到 60°，球座的最大表面应力由 1.67 GPa 增加到 4.12 GPa。变化曲线如图 7 所示。可以看出陶粒速度和球座表面之间的夹角越大，球座的最大表面应力越大。

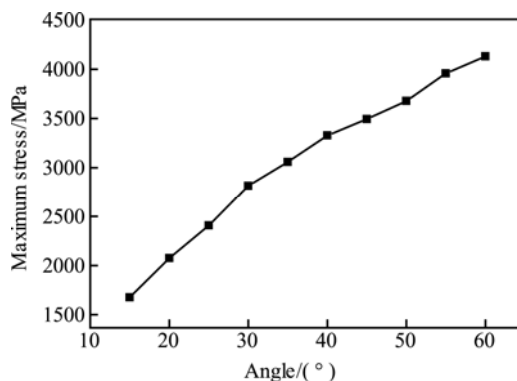


图 7 速度和球座表面夹角与最大应力关系

Fig.7 Relationship between angle between the speed and the surface of the ball seat and max. stress

通过仿真结果可以发现：随着陶粒和球座之间的静摩擦系数增大，球座表面涂层厚度减小，陶粒粒径增大，陶粒速度增大，陶粒和球座表面之间的夹角增大，球座的最大表面应力随之增大。结合 Bitter 提出的变形磨损理论表达式，可以发现，这些因素相同趋势的变化同样会导致磨损量的增加，因此可以认为磨损量与表面应力成正相关。在所有材料属性都已知的情况下，可以通过表面应力来判断材料表面是否会产生磨损以及磨损的变化趋势。

5 结论

- 1) 压裂液的性能会影响陶粒和球座之间的摩擦系数，进而影响球座的表面应力大小。
- 2) 球座的表面氮化涂层厚度适当增大可以降低其表面的最大应力。
- 3) 压裂液中陶粒的直径越大，陶粒对球座造成的冲击应力就越大。
- 4) 可以通过设计使滑套球座表面与中心线的夹角尽量小，以减小球座的最大表面应力。
- 5) 施工排量的增大会加剧球座的破坏。

参考文献

- [1] 丁坤, 石善志, 李建民, 等. 混合粒径固体颗粒对滑套球座冲蚀磨损的影响[J]. 润滑与密封, 2015, 40(6): 111—

114.
DING Kun, SHI Shan-zhi, LI Jian-min, et al. Wear of Solid Particles of Different Sizes Erosion on Ball Seat[J]. Lubrication and Sealing, 2015, 40(6): 111—114.
- [2] 谢文伟.氮化物图层的冲蚀磨损模拟研究[D].湘潭:湘潭大学, 2012.
XIE Wen-wei. Simulation of Erosion of Nitride Coatings[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012.
- [3] 王尊策, 徐艳, 李森, 等.深层气井压裂管柱突扩结构内流态及磨损规律模拟[J].大庆石油学院学报, 2010, 34(5): 87—91.
WANG Zun-ce, XU Yan, LI Sen, et al. Flow Pattern and Wear Regularity Simulation Deep Gas Well Fracturing String Sudden Expansion Structure[J]. Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(5): 87—91.
- [4] 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. Horizontal Well Fracturing Fluid Simulation Wear Sleeve Tee Erosion[J]. Petroleum Machinery, 2014, 42(12): 75—78.
- [5] 黄粟.直井不动管柱 10 段压裂工艺技术研究与应用[J].内蒙古石油化工, 2013, 18: 103—105.
HUANG Su. Vertical Wells Tubing 10-stage Fracturing Technology Research and Application[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2013, 18: 103—105.
- [6] 张旭昀.压裂工况下工具材料及表面涂层冲刷磨损机理研究[D].大庆: 东北石油大学, 2013.
ZHANG Xu-yun. Study on Erosion Wear Mechanism of Tool Materials and Surface Coatings in the Condition of Fracturing[D]. Northeast Petroleum University, 2013.
- [7] 安杰.油气井管柱受颗粒冲位的数值模拟[D].荆州: 长江大学, 2014.
AN Jie. Study on Solid Particles Erosive Wear Mechanism of Oil and Gas Well Tubing String[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2014.
- [8] 赵丹妮.水平井压裂喷砂器喷射冲蚀数据模拟[D].大庆: 东北石油大学, 2013.
ZHAO Dan-ni. The Numerical Simulation of in Ejection and Erosion of Horizontal Well Fractured Sand Blower[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [9] 员冬玲.层状复合陶瓷喷嘴的设计制造及其应用研究[D].济南: 山东大学, 2009.
YUAN Dong-ling. Design, Fabrication and Application of Multilayered Ceramic Nozzles[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [10] 王文韬.立式离心机过流旋转件冲蚀磨损的分析与预测[D].长沙: 湖南工业大学, 2014.
WANG Wen-tao. Analysis and Prediction of Erosion Wear of Vertical Centrifuge Transflux Rotating Parts[D]. Changsha: Hunan University of Technology, 2009.
- [11] 戈超.离心风机叶片抗冲蚀磨损仿生研究[D].长春: 吉林大学, 2011.
GE Chao. Bionic Investigation on Erosion Resistance of Centrifugal Fan Blades[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [12] 姚建林.气体钻井环空流场分析及岩屑对管柱的冲蚀特性研究[D].上海: 上海大学, 2010.
YAO Jian-lin. Investigations of Flow Field in Annulus and Erosion Characteristics on the Pipe with Cuttings in Gas Drilling[D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.
- [13] 王丽.基于有限元法的陶瓷喷砂嘴冲蚀磨损机理研究[D].济南: 山东轻工业学院, 2007.
WANG Li. Research on Erosion Wear Mechanisms of Ceramic Sandblasting Nozzles Using FEA Methods[D]. Jinan: Shandong Institute of Light Industry, 2007.
- [14] 张玉萍.SiC/钢基表面复合材料冲蚀磨损性能研究[D].西安: 西安理工大学, 2007.
ZHANG Yu-ping. Research on the Slurry Erosion Wear of SiC Particles Reinforced Steel Matrix Surface Composite Material[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [15] 郝负洪, 李永.风沙环境下钢结构涂层低角度冲蚀特性研究[J].摩擦学学报, 2013, 33(4): 333—335.
HAO Yuan-hong, LI Yong. Study on Erosion of Steel Structure Coat under Sand[J]. Tribology, 2013, 33(4): 333—335.