

基于 CFD 的 6500HP 新型压裂泵液力端流场分析研究*

□ 马玉龙 □ 张洪生 □ 董辉
兰州理工大学 机电工程学院 兰州 730050

摘要:基于计算流体动力学(CFD)技术研究了 6500HP 新型压裂泵液力端内流场特性。利用 UG 软件对压裂泵液力端流场进行建模,应用 Fluent 软件进行数值模拟和可视化研究。分析了模型内部的流场特性,得到其内部流场的主要参数,获得内部关键位置的流体速度和压力分布情况,为新型压裂泵液力端的参数确定和结构设计提供了参考数据。

关键词:压裂泵 液力端 计算流体动力学

中图分类号:TH137.9

文献标志码:A

文章编号:1000-4998(2016)11-0021-03

Abstract: The performance of internal flow field at the fluid end of new fracturing pump 6500HP was investigated based on CFD technology. It adopted UG software to establish the model for the flow field at fluid end of the fracturing pump while Fluent software was applied to the numerical simulation and visualization investigation. The main parameters of the internal flow field as well as the flow field velocity and pressure distribution at interior key positions were obtained through analyses on the performances of the flow field within the model which can provide reference data for parameter determination and structural design for the fluid end of the new type of fracturing pump.

Key Words: Fracturing Pump Fluid End Computational Fluid Dynamics

随着我国页岩气开采技术的不断发展,对压裂泵输出功率和输出压力的要求也在不断提高,以适应我国特殊的地质开采条件^[1]。压裂泵是非常规能源油气开发中使用压裂作业技术的核心设备^[2],液力端是整个压裂泵最为关键的组成部分。由于液力端处于连续高压甚至超高压的工作环境中,其内部组件十分容易发生损坏,寿命都不长。泵头体由于承受交变载荷及应力集中,容易产生疲劳破坏。为延长阀箱的使用寿命,采用了阀箱自增强技术和对相贯线进行倒圆角处理的特殊工艺^[3]。泵头体在排出压裂液时,处于超高压工作状态,整个泵体都在极高的压力下工作,又由于流道内如相贯线、倒角、阀隙等特殊结构导致泵内流场出现复杂的情况,因此,必须对高压大功率压裂泵的内部流场进行分析研究,为传统结构的改进和新结构的研发提供理论依据。

传统柱塞泵的液力端阀箱部分根据吸入排出口的位置安排形式、液流通道及构造特点,可分为直通式、直角式、阶梯式^[4]等结构。在阀箱内部会出现较复杂的相贯线,虽然可进行倒圆角处理,但压裂泵是一种超高压作用泵,且使用工况复杂,传统结构的内部流场情况

十分复杂,会出现内部载荷不均、泵体振动强烈、泵头体寿命不长等问题。

由于 6500HP 新型压裂泵的排出压力高达 164 MPa^[5],因此采用了一种新型液力端结构,该结构不存在相贯线,内部液体流通性好,流场相对稳定,可以为高压大功率压裂泵的设计提供新方案,为泵头体寿命延长提供新方法。应用计算流体动力学(CFD)方法研究压裂泵的内部流场,得到流动过程中压力、速度等参数分布情况,用于液压零部件结构的设计与优化。CFD 分析具有周期短、费用低等优势,因此得到了越来越广泛的重视^[6-8]。

1 结构与建模

1.1 新型压裂泵结构

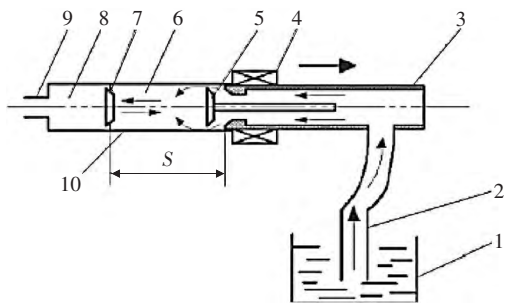
传统压裂泵疲劳破坏加速的根本原因是高压液缸与阀箱相贯处的相贯线结构形式,解决这一问题的思路在于从结构上取消这些相贯线^[9]。

6500HP 压裂泵采用新型的阀箱结构,如图 1 所示,图 2 为传统的直通式结构。

图 1 所示结构将吸入阀、排出阀安装在同一轴线上,整体采用直通式,排出阀安装在阀箱的一端,吸入阀安装在柱塞上。柱塞压缩时,液体将排出阀打开,从

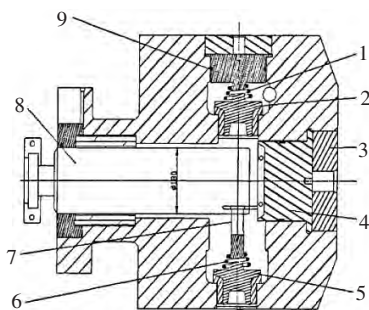
* 国家自然科学基金资助项目(编号 51275226)

收稿日期:2016 年 3 月



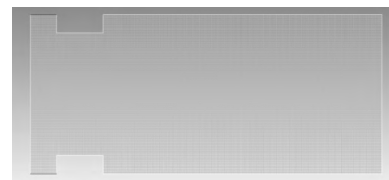
1. 液体 2. 吸入管 3. 柱塞 4. 柱塞密封 5 吸入阀 6. 吸入液缸 7. 排出阀 8. 排出腔 9. 排出管 10. 阀箱

▲图1 新型液力端结构

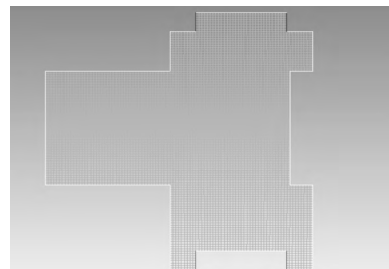


1、6. 弹簧 2、5. 阀 3. 端盖 4. 吸入端盖 7. 截止阀 8. 柱塞 9. 排出端盖

▲图2 传统直通式液力端结构



▲图3 新型液力端流场模型的网格



▲图4 传统液力端流场模型的网格

排出阀排出。当柱塞回程时,排出阀关闭,吸入阀打开,将液体吸入缸内。表1为6500HP新型压裂泵的主要参数。

表1 6500HP 新型压裂泵液力端的主要参数

内径/mm	行程/mm	曲轴转速/(r·min ⁻¹)	进口流速/(m·s ⁻¹)	出口压力/MPa
104	190	250	1.264	164

1.2 几何模型及网格划分

内流场属于对称回转结构,因此对模型进行二维简化。利用UG软件建立模型,并用Gambit软件对模型进行网格划分,Gambit是CFD计算商业软件Fluent的优秀前处理软件^[10]。图3为新型压裂泵流场模型,图4为传统直通式流场模型。

1.3 边界条件设置

设置模型中的求解器为耦合隐式算法,设置在表1状态下流体为定常流动,液流为标准两方程湍流模型,即K-epsilon [2eqn]湍流模型,选择能量方程(Energy Equation)。压裂液通常为水介质,密度为998 kg/m³、等压比热为4 182 J/(kg·K),导热系数为0.6 W/(m·K),运动黏度为0.001 kg/(m·s)。在边界条件设置中,吸入阀流速为1.264 m/s(由每分钟流量及缸体尺寸得出),温度为293 K,湍流强度为5%;出口边界温度为293 K,湍流强度为5%。设置出口压力为164

MPa,计算步数为900。

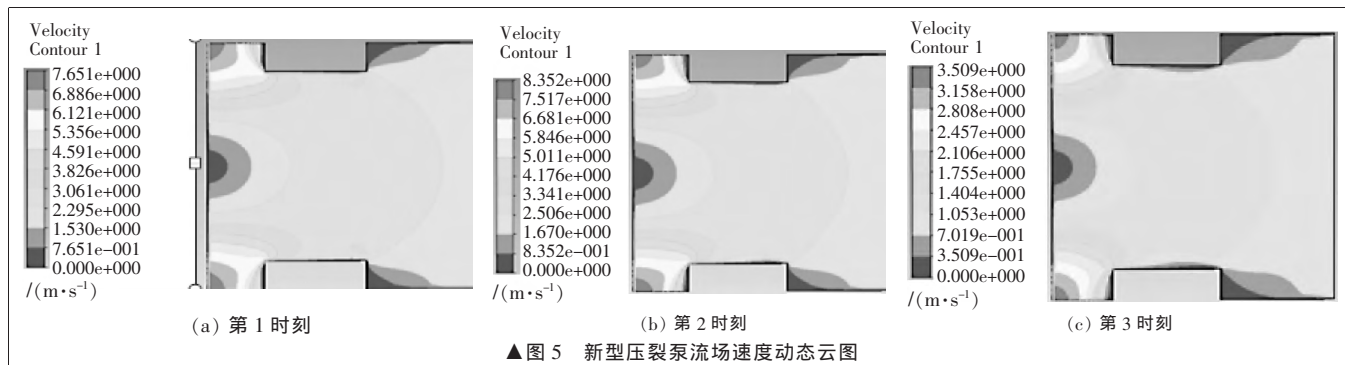
2 结果及分析

2.1 两种结构的流场分析

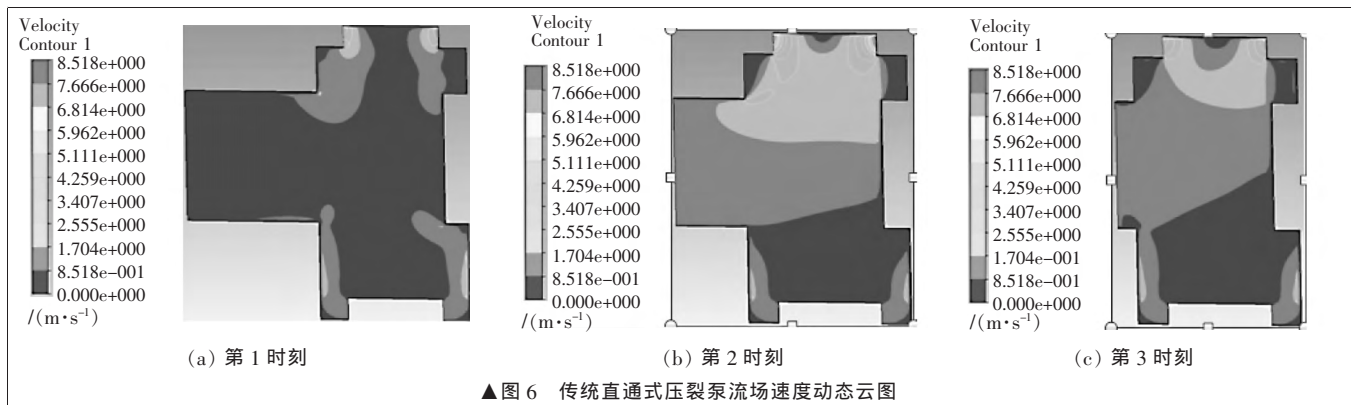
计算结果如图5、图6所示。其中图5为Fluent后处理所得的新型压裂泵流场3个时刻流速动态云图,图6为传统直通式压裂泵流场3个时刻流速动态云图。

由图5可看出,新型压裂泵内流场在柱塞运动过程中,缸内流速基本稳定在2.295 m/s左右。流速在柱塞缸与排出阀的连接处出现旋流,流速发生变化。液体流速到达排出阀口时流速最大。流速呈现如此情况的原因是整个液力端缸体整体采用无相贯线设计,柱塞轴线与进出口阀轴线在同一轴线上,刚体内不存在相贯线,不会出现速度骤变现象。基于以上原因,在柱塞运动时,缸内流速基本稳定。

由图6可看出,传统直通式液力端内流场在柱塞运动过程中,整个缸内流速情况较为复杂。在吸入阀到柱塞缸的相贯线处,液体流速从0.85 m/s骤变为1.7 m/s。在柱塞缸到排出阀的相贯线处,液体流速从0.85 m/s骤变到了3.41 m/s。流速最大处仍在阀口处。虽然直通式液力端设计使吸入阀与排出阀在同一轴线上,但柱塞轴线与吸入排出阀轴线仍为垂直布置,因此不



▲图5 新型压裂泵流场速度动态云图



可避免地会出现相贯线,另外整个泵头体右侧装有螺栓,使液力端内部结构更复杂,内部流场复杂多变,流速在不同地方会有较大变化,稳定性较差。

2.2 两种结构的压力分析

计算结果如图7、8所示。由于压力在压裂泵排出过程时最大,因此只研究排出过程。图7为新型液力端流场排出过程的压力分布云图,由图7可看出,压力在整个柱塞缸内基本稳定,在排出阀与柱塞缸连接处出现应力集中,压力不稳定情况集中出现在排出阀上。

图8为传统直通式液力端流场排出过程的压力分布云图,由图8可看出,应力集中在柱塞缸与阀座孔的相贯线处,以及阀座与内孔的连接处。由于内孔的结构复杂,内流场压力在排出过程中,从柱塞缸到排出阀的流场区域内压力情况都不稳定。

研究表明,液体缸与装阀座的内孔相贯线部位受力最大^[1],应力集中是造成阀箱失效的主要原因^[11]。要最大程度降低应力集中对液力端的危害,延长寿命,还是要从根本上消除相贯线,否则,即使在相贯线处倒圆角也不能从根本上解决这一问题。

2.3 分析结果对比

综合两种结构中间流场的特性,新型压裂泵液力端内流场在流速情况和压力情况方面比传统直通式结构内流场都要稳定得多。若去掉内部流速,则会直接影响液力端结构的稳定性能。内部流场越不稳定,液力端振动就越剧烈,会导致容积效率下降,零件可靠性下降,从而影响液力端的整体寿命。新型液力端结构流场稳定性好,液力端振动相对较小,液力端寿命因此得到较大延长。该新型结构可以极大地缓解应力集中所带来的危害,延长了液力端的使用寿命。

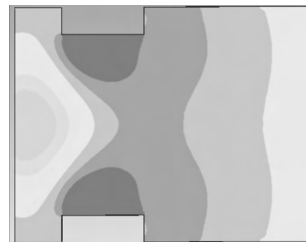
3 结论

笔者应用CFD动网格技术对新型液力端结构与传统直通式液力端结构的流场进行了数值模拟,比较了新型结构流场和传统结构流场的稳定性。结果表明,新型结构的流场比传统结构稳定,流速更均匀,没有相

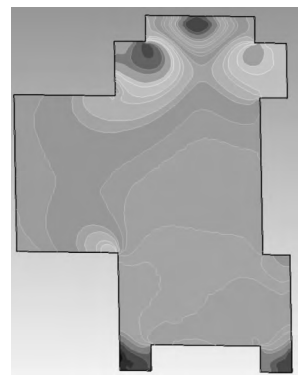
贯线带来流速骤变的情况,流场情况更为理想,可作为6500HP新型压裂泵液力端的优先设计方案。

参考文献

- [1] 张凤田. 压裂泵阀箱磨损机理研究及其有限元分析[D]. 成都: 西南石油学院, 2002.
- [2] 李向龙, 芮执元, 雷春丽, 等. 压裂泵连杆疲劳强度分析[J]. 机械制造, 2014, 52(12):60-62.
- [3] 冯耀荣, 李鹤林. 泵头体失效分析与预防[J]. 石油矿场机械, 1989, 18(3):26-29.
- [4] 往复泵设计编写组. 往复泵设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [5] 张洪生, 方超. 6500HP型压裂泵主要技术参数的优化研究[J]. 机械制造, 2016, 54(4):51-53.
- [6] 刘海波, 辛舟, 冯国庆, 等. 基于CFD的运动型多功能车气动特性分析[J]. 机械制造, 2013, 51(6):19-20.
- [7] 杨涛, 樊耀华, 李永奇, 等. 基于CFD技术的油缸缓冲结构优化[J]. 机械制造, 2016, 54(2):15-18.
- [8] 李一民. 曲轴及正时系动力学特性对发动机NVH性能影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [9] 陈辽望, 崔晓宇, 陈辽洋, 等. 压裂泵无相贯线阀箱设计及有限元分析[J]. 石油与化工设备, 2010, 13(5):20-23.
- [10] 代元军, 任常在, 徐立军, 等. 基于Gambit的S系列新翼型风力机建模[J]. 机械制造, 2014, 52(2):30-32.
- [11] 方华灿, 周维. 石油钻采机械可靠性设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.



▲图7 新型液力端流场排出过程的压力分布云图



▲图8 传统直通式液力端流场排出过程的压力分布云图

(编辑 平平)