

◀海洋石油装备▶

压裂作业船超高压快速脱离装置设计研究^{*}

李增亮 周邵巍 肖茵 肖彤 郑杰

(中国石油大学 (华东) 机电工程学院)

摘要: 针对海洋压裂作业船超高压快速脱离装置技术被国外垄断的现状, 设计了一套压裂作业船超高压快速脱离装置。阐述了快速接头的结构及工作原理, 并制定了装置整体作业方案。对该装置的主要部件 (接头和液压执行结构) 进行了设计。对快速接头的主要受力部件 (限位块、插头体和阀芯) 进行了有限元分析。分析结果表明: 限位块、插头体和阀芯所受应力均小于各自许用应力, 因此这 3 个主要部件在挤压状态下安全; 该装置在超高压下可实现管路的自动快速脱离, 并封闭管路; 当遇到紧急情况时, 超高压快速脱离装置可通过网络控制系统使压裂作业管汇连接断开, 并保证无高压液体溢出, 使得压裂船能够快速撤离。研究方法可为其他类似装置的结构设计提供参考。

关键词: 压裂作业船; 快速脱离装置快速接头; 超高压; 结构设计; 有限元分析

中图分类号: TE952 **文献标识码:** A **doi:** 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.10.014

Research on Ultra-high Pressure Quick Disconnecter of Fracturing Ship

Li Zengliang Zhou Shaowei Xiao Yin Xiao Tong Zheng Jie

(College of Mechanical and Electronic Engineering , China University of Petroleum (Huadong))

Abstract: In order to solve foreign monopoly in the ultra-high pressure quick disconnector of offshore fracturing ship , a new ultra-high pressure quick disconnector is designed. The structure and working principle of the quick connector are elaborated and the overall operation plan is developed for the device. Main components of the device (female joint , male joint and hydraulic actuator) are designed. A finite element analysis is conducted on major stressed components of the quick connector (stopper , plug body and valve element) . Analysis results show that , the stress of stopper , plug body and valve element is lower than respective allowable stress , so these three components are safe in the compressive state; the device can achieve automatic and quick disconnection of pipelines and close pipelines under ultra-high pressure; in case of emergency , it can disconnect fracturing manifolds by means of network control system and prevent overflow of high-pressure liquids to guarantee quick evacuation of the fracturing ship.

Key words: fracturing ship; quick disconnector; quick connector; ultra-high pressure; structure design; finite element analysis

0 引言

我国现役的 2000 型海洋压裂橇机组由中国石油海洋工程公司投资开发研制, 填补了我国在海洋

压裂橇装设备技术方面的空白^[1-3]。但这艘作业船上的快速脱离装置是从国外引进的先进设备。

快速脱离装置是一种工作可靠且不需要借助外界的工具, 通过网络控制便能迅速实现管路断开的自动化管接头。当遇到紧急情况时, 它能保证压裂

^{*} 基金项目: 国家高技术船舶科研计划项目 “水下混输增压泵研制” (2014020024) 。

作业船载设备与平台的管路连接装置快速有效地脱离^[4-5]。但海洋压裂作业船超高压快速脱离装置技术仍被国外垄断,这已成为制约我国深水油气开采的瓶颈^[6]。为此,笔者设计了一种压裂作业船超高压快速脱离装置,对该装置的技术要求如下:①最高工作压力140 MPa,压裂作业时不发生泄漏,连接可靠稳定;②短时间内完成管路连接的断开,可靠度高;③一键操作,简单方便,自动化程度高;④具有断开后封闭管路功能,防止压裂液溢出而造成毁坏与污染。

1 技术分析

1.1 总体方案

海洋压裂作业船工作时,其排出管汇通过高压软管与平台井口连接。当需要紧急撤离时,首先停泵,然后启动快速脱离装置,将高压软管与船载排出管汇的管路连接断开,压裂船快速离开平台^[7-8]。如图1所示,快速接头主要由外接头与内接头组成,快速接头安装连接平台高压软管和船载排出管汇,被固定在压裂船甲板设备撬装中。

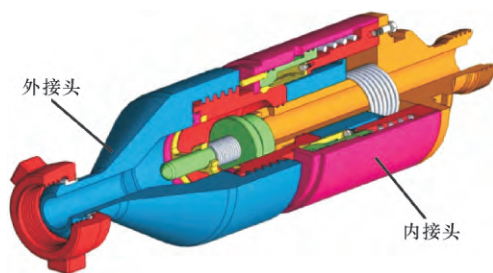


图1 快速接头结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of quick connector

1.2 主要技术参数

最高工作压力 140 MPa (排量 $0.56 \text{ m}^3/\text{min}$), 最大排量 $2.8 \text{ m}^3/\text{min}$ (对应压力 83 MPa), 高压管汇内径 75.0 mm, 高压软管内径 76.2 mm (3 in), 压裂液流速低于 30 m/s, 断开时间 1~3 s。

1.3 工作原理

当需要紧急撤离时,启动快速脱离装置液压控制系统,控制内接头结构中的液压缸动作,使快速接头分离,快速接头工作原理如下。

1.3.1 连接状态

该状态为出厂及压裂作业时状态,活塞在活塞回位弹簧的作用下位于行程左极限,弹性限位块因活塞的径向定位,失去变形能力,卡住接头体,快速接头连接并锁紧,如图2a所示,图中箭头表示

压裂液流动方向。

1.3.2 解除连接锁紧

压裂泵停止,启动液压控制系统,液压泵工作,活塞在液压油的作用下向右移动,位置指示器反映活塞运动位置。当活塞到达行程右极限时,液压泵停止工作。指示器完全进入内接头内,活塞对限位块的径向定位失效,外接头挣脱限位块,如图2b所示。

1.3.3 接头分离过程

船移动时,在拖拽力的作用下,插头体向内接头外移动,使限位块径向弯曲变形,松开插头体,接头随着船的移动逐渐分离。内接头固定在压裂撬中随船离开,外接头连接在高压软管上留在平台,如图2c所示。

1.3.4 防止压裂液泄漏

接头分离过程中,推套在其弹簧的作用下与插头体端面紧密连接,阀芯在弹簧的作用下与内接头体端面紧密连接,当接头内流路关闭时,两接触端面依然保持接触,保证无压裂液溢出,如图2d所示。

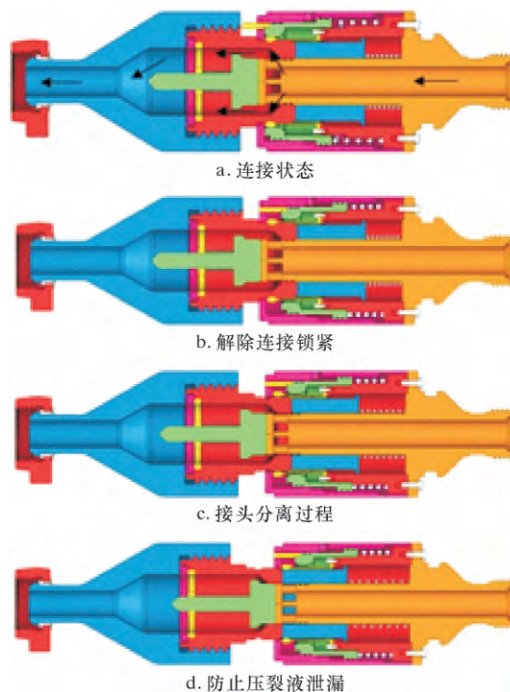


图2 快速接头工作原理

Fig. 2 Operating principle of quick connector

2 主要部件设计

2.1 液压执行机构

液压执行机构是实现快速脱离装置自动分离的核心,是联系控制系统与快速接头的纽带,其结构

如图 3 所示。液压泵连接在液压执行机构的油口上。不工作时, 液压缸内无油压, 活塞在活塞回位弹簧的作用下处在行程左极限位置, 即活塞左端面与缸体接触, 此时活塞内表面与限位块外表面贴合, 限制限位块径向弯曲, 限位块卡块部分锁紧外接头, 快速接头无法分离, 压裂作业可靠进行; 当液压泵开始工作时, 活塞在油压的作用下克服回位弹簧的弹簧力向右移动, 直到活塞右端面接触到定位基座轴肩, 停止运动, 液压泵停泵保压, 使活塞停留在行程右极限位置, 此时活塞失去了对限位块变形的限制, 且为限位块弯曲变形提供了足够的空间, 加以拖拽力, 外接头便可以脱离限位块的锁紧。在活塞向右运动的过程中, 活塞回位弹簧起到缓冲作用, 可减轻活塞停靠时引起的碰撞。

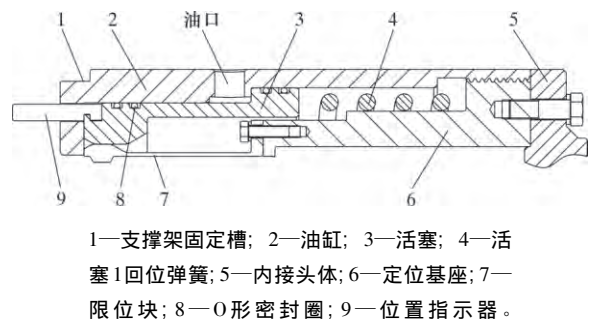


图 3 液压执行机构及相关零件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hydraulic actuator and related parts

活塞与缸体之间具有相对运动, 且要求液压缸 2 腔之间不漏油, 需单独设计活塞密封机构, 因此选用 O 形密封圈密封^[10]。

2.2 内接头

内接头主要由内接头体、推套、限位块、活塞、缸体、活塞回位弹簧、推套弹簧、螺栓和密封圈等组成, 如图 4 所示。

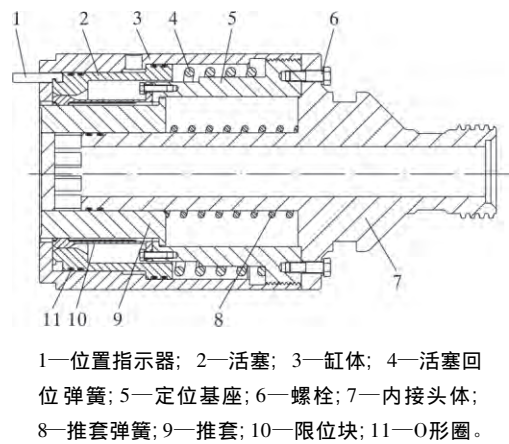


图 4 内接头示意图

Fig. 4 Schematic diagram of female joint

内接头体作为压裂液流道, 在整个内接头结构

中起着搭载配合其他重要零部件的作用, 因此选用高强度的 42CrMo 锻件毛坯加工制造而成, 其抗冲击能力强^[9]。

2.3 外接头

外接头终端充当 3 in Fig1502 由壬凸接头, 配由壬翼形螺母, 与平台高压软管连接, 它主要由外接头体、插头体、阀芯、密封托架、导向体和密封圈等组成, 如图 5 所示。

外接头内的阀芯在快速接头断开后, 起到封闭外接头流路的作用, 它与阀芯弹簧组成单向阀。

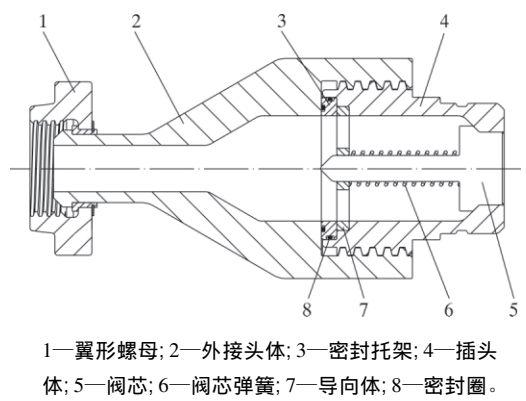


图 5 外接头结构示意图
Fig. 5 Structure diagram of male joint

3 关键零部件的有限元分析

限位块、插头体和阀芯是快速接头在压裂作业及断开时主要的受力部件, 需进行有限元分析。其材料及其力学性能如表 1 所示。

表 1 快速接头不同部件材料特性
Table 1 Material properties of different parts
for quick connector

零 件	材 料	屈服极 限 /MPa	泊松比	密度 / (kg · m ⁻³)	弹性模 量 /GPa
插头体和阀芯	42CrMo	950	0.279	7 850	212
限位块	60Si2Mn	1 200	0.280	7 820	206

选择材料安全系数为 3, 计算得到插头体和阀芯的许用应力为 316 MPa、许用挤压应力为 573 MPa; 限位块的许用应力为 400 MPa、许用挤压应力为 680 MPa。

3.1 限位块与插头受力分析

采用 Solid95 单元, 以限位块与插头体的装配体组合为基础建立有限元模型, 细化弹簧瓣和插头体模型的网格以提高计算精度。限位块有限元分析模型如图 6 所示。将弹簧瓣与插头体卡槽建立的接

触面定义为摩擦接触,钢对钢的摩擦因数设为0.15。添加模型边界条件,并对插头体断面施加载荷进行计算。

限位块等效力云图如图7所示。由图可以看出,脱离过程中限位块最大应力为298 MPa,从限位块最小内径处运动到插头体头部最大外径处,小于所选材料许用应力,因此整体结构设计安全;应力多集中在限位块弹簧瓣端处,由于此处受到弯矩的作用,所以限位块发生变形,其变形云图如图8所示。



图6 限位块有限元分析模型

Fig. 6 Finite element model of stopper

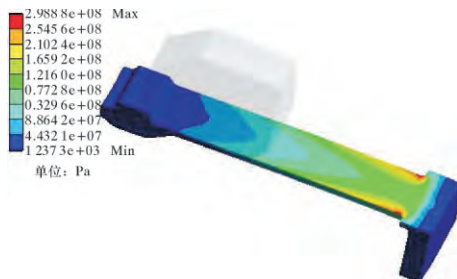


图7 限位块等效力云图

Fig. 7 Nephogram of equivalent stress for stopper



图8 限位块变形云图

Fig. 8 Deformation nephogram of stopper

在接头脱离过程中,限位块不仅受到剪切力,而且在插头体接触面处受到挤压力。通过分析相对位移的6个子步,得到挤压应力的大小与相对位移的关系,如图9所示。

由图9可知,随着相对位移的增大,挤压应力经历了1个缓增→急增→急减→急增的过程,最大挤压应力为20 MPa,远小于许用挤压应力。因此认为限位块卡块在挤压状态下安全。

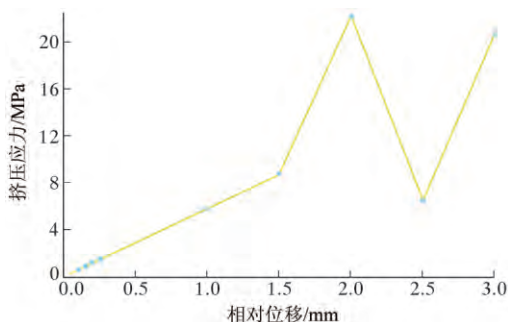


图9 限位块挤压应力与相对位移的关系

Fig. 9 Relation between contact stress and relative displacement of stopper

3.2 阀芯受力分析

快速接头脱离后,阀芯受到弹簧力与外接头腔内高压液体的压力。弹簧弹力较小,可以忽略不计。当压裂液压力达到140 MPa时,阀芯受到的载荷最大。

采用Solid95单元,以阀芯与插头体的装配体组合为基础建立有限元模型,细化阀芯及插头体接触面的网格,以提高计算精度。模型网格划分结果如图10所示。



图10 阀芯有限元分析模型

Fig. 10 Finite element model of valve element

将阀芯与插头体孔内部建立接触面,定义接触类型为摩擦接触,钢对钢的摩擦因数设为0.15;添加对称与无摩擦约束,模拟阀芯与插头体所建有限元模型的对称边界;对插头体断面建立固定约束。添加约束完成后,对阀芯左端面受力作用面施加140 MPa压力,完成加载,然后进行计算。阀芯等效力云图如图11所示。

由图11可知,阀芯最大应力发生在与插头体接触啮合的轴肩根部,其值为312 MPa,小于所选材料的许用应力,所以整体结构设计安全。

阀芯变形云图如图12所示。由图可知,最大变形量发生在卡爪最底部,其值约为0.26 mm,变形量较小,满足刚度要求。

阀芯轴肩与插头体内孔配合,在受液体压力的过程中,轴肩除了受剪切应力之外,其表面还承受

挤压应力。阀芯接触应力云图如图 13 所示。由图可知, 最大应力为 561 MPa, 小于许用挤压应力, 因此认为阀芯轴肩在挤压状态下安全。

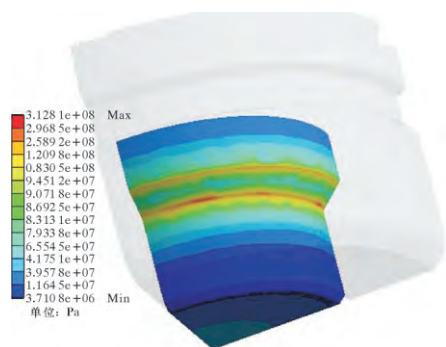


图 11 阀芯等效应力云图

Fig. 11 Nephogram of equivalent stress for valve element

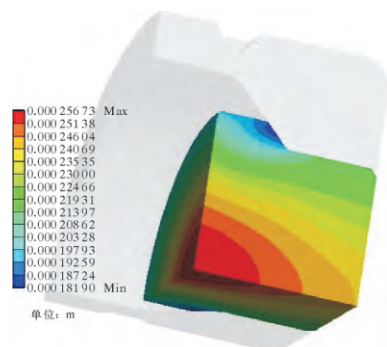


图 12 阀芯变形云图

Fig. 12 Deformation nephogram of valve element

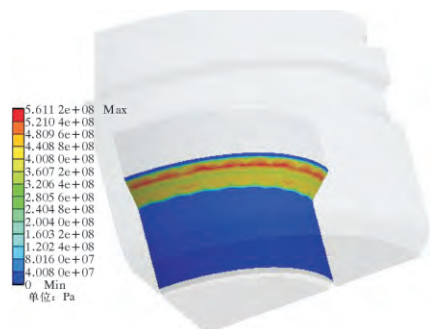


图 13 阀芯接触应力云图

Fig. 13 Nephogram of contact stress for valve element

4 结 论

(1) 压裂作业船超高压快速脱离装置在接头分离过程中几乎无泄漏, 可减少油液损失, 保持环境的清洁和安全, 防止污染物进入装置内部; 该装

置还可保证分离和对接时夹气量最少, 以增强整个管道流路的稳定性。

(2) 在压裂作业时对限位块进行有限元分析, 得到插头体卡槽的应力, 验证了压裂作业时快速接头连接的可靠性, 限位块结构满足强度要求。

(3) 对接头脱离后阀芯的受力状况进行分析, 找出了危险面为插头体内部拐角处, 对危险断面倒圆角可增加插头体强度。分析结果表明阀芯结构满足强度要求。

参 考 文 献

- [1] 戴莹, 付喜艳. 锻造海上压裂利器 [N]. 中国石化报, 2011-12-29 (1).
- [2] 吴汉川. 我国压裂设备现状及国产装备研发目标 [J]. 石油机械, 2008, 36 (9): 154-158.
- [3] 薄玉宝. 海上油气田工程压裂作业船及装备配置技术探讨 [J]. 海洋石油, 2014, 34 (1): 98-102.
- [4] 宁波, 关利永, 王显庄, 等. 海洋油气增产作业船现状分析 [J]. 石油机械, 2011, 39 (增刊 1): 121-123.
- [5] 罗晓明. 管路快速接头新结构 [J]. 工程机械, 1995 (1): 3-4, 12.
- [6] 刘宁, 宁晓颖, 陈紫薇. 海上探井大型压裂工艺技术研究与实践 [J]. 石油与天然气化工, 2012, 30 (1): 216-218.
- [7] 秦大鹏, 吴汉川, 李丽丽, 等. 集成压裂机组研制 [J]. 石油矿场机械, 2007, 36 (1): 56-60.
- [8] 雷刚, 王启中, 许亚彬, 等. 2000 型海洋压裂橇组的研制 [J]. 石油机械, 2011, 39 (7): 22-24.
- [9] 张继信, 樊建春, 詹先觉, 等. 水力压裂工况下 42CrMo 材料冲蚀磨损特性研究 [J]. 石油机械, 2012, 40 (4): 100-103.
- [10] 王文斌. 机械设计手册 (液压传动与控制) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

第一作者简介: 李增亮, 教授, 生于 1962 年, 2008 年毕业于中国石油大学 (北京) 机械设计及理论专业, 获博士学位, 现从事流体机械方面的研究工作。地址: (266580) 山东省青岛市。E-mail: lizl@upc.edu.com。

收稿日期: 2016-06-01

(本文编辑 丁莉萍)