

# 基于有限元法的深水钻井隔水管压溃评估

刘秀全<sup>1</sup>, 陈国明<sup>1</sup>, 宋 强<sup>1</sup>, 畅元江<sup>1</sup>, 许亮斌<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学海洋油气装备与安全技术研发中心, 山东青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100028)

**摘 要:**压溃是深水钻井隔水管主要的失效模式之一, 现有的理论算法无法考虑缺陷对隔水管压溃的影响。因此, 考虑磨损和腐蚀对隔水管压溃性能的影响, 建立了深水钻井隔水管非线性压溃有限元评估方法, 并与深水钻井隔水管压溃理论评估方法进行了对比。结果表明: 有限元压溃分析方法与 API RP 2RD、DNV OS F101 推荐算法的分析结果基本一致, 验证了隔水管压溃有限元分析方法的准确性; 压溃过程的初始阶段隔水管发生弹性变形, 当内外压差达到临界压力时, 隔水管开始发生塑性变形, 弹性阶段向塑性阶段的突变点即为隔水管压溃临界点; 完好隔水管压溃后截面呈扁平状, 缺损隔水管压溃后截面呈锥形; 随着隔水管缺陷尺寸增大, 隔水管临界压溃压力逐渐降低。

**关键词:**深水钻井 隔水管 压溃 有限元法 缺陷

**中图分类号:** TE951 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)04-0043-05

## Collapse Assessment for Deepwater Drilling Risers on the Basis of Finite Element Method

Liu Xiuquan<sup>1</sup>, Chen Guoming<sup>1</sup>, Song Qiang<sup>1</sup>, Chang Yuanjiang<sup>1</sup>, Xu Liangbin<sup>2</sup>

(1. Research Centre of Offshore Oil and Gas Equipment and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing, 100028, China)

**Abstract:** Collapse is one of the major failure modes in deepwater drilling risers. In the existing theoretical algorithm, the effects of defects on riser collapse cannot be considered. This paper describes the effects of wear and corrosion on the potential for riser collapse, sets up a method of finite element evaluation for nonlinear collapse of deepwater drilling risers, and details how the verification and analysis for the method were carried out. It showed that the analysis results of finite element stress analysis coincided well with that recommended by API RP 2RD and DNV OS F101, the accuracy of finite element analysis method for riser collapse was verified. At the initial stage of riser collapse, risers were elastically deformed. After the difference between internal and external pressures reaches a critical value, risers were plastically deformed. The point of abrupt change from elastic to plastic deformation is the critical point of riser collapse. After collapsing, the original intact risers became flat and some risers that had defects initially became cone-shaped. In addition, the critical collapse pressure of risers decreased gradually with the increase of the defect sizes of risers.

**Key words:** deepwater drilling; riser; collapse; finite element method; defect

深水钻井隔水管系统是水下井口与钻井平台之间最重要的连接单元, 其主要功能是提供井口防喷器与钻井平台之间的钻井液往返通道, 支撑辅助管线, 引导钻具, 作为下放与撤回井口防喷器组的载体<sup>[1-4]</sup>。当发生井漏、井涌、井喷或隔水管紧急脱离时, 隔水管内部的钻井液减少, 内外压差增大, 有可能导致隔水管发生压溃失效。例如, 1982 年, 一艘半潜平台在墨西哥湾进行钻井作业, 作业水深为 533.00 m, 当钻至井深 1 700.00 m 时, 由于隔水管内部钻井

**收稿日期:** 2015-04-21; **改回日期:** 2015-07-01。

**作者简介:** 刘秀全(1987—), 男, 山东枣庄人, 2009 年毕业于中国石油大学(华东)机械设计制造及其自动化专业, 2014 年获中国石油大学(华东)机械工程专业博士学位, 讲师, 主要从事深水钻井隔水管技术与装备研究。

**联系方式:** (0532)86983393, lxqmcae@163.com。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“海洋深水油气安全高效钻完井基础研究”(编号: 2015CB251200)和国家科技重大专项“深水钻井隔水管作业管理及安全评价技术”(编号: 2011ZX05026-001-05)联合资助。

液柱压力发生变化,突然发生隔水管压溃事故<sup>[5]</sup>。2013年,位于安哥拉海域的 Ensco DS1 钻井船采用隔水管下放防喷器,由于防喷器未打开、海水无法进入隔水管内部,下放至 1 210.00 m 水深时张紧力突然增大,调查发现隔水管出现压溃失效。隔水管压溃事故不但会导致隔水管结构破坏,还可能引起其余钻井装备的损坏甚至井控失败,给海洋钻井作业带来较大危害,因而有必要进行隔水管压溃评估方法研究。

目前,国内外学者已提出多种隔水管压溃评估方法,主要包括经典算法、Southwell 方法、Timoshenko 方法、Shell 方法、Haagsma-Schaap 方法、DNV 方法、修正经典算法等<sup>[6-8]</sup>。美国石油学会和挪威船级社也针对管柱压溃问题制定了相关规范:API BULLETIN 5C3 给出了不同材料和径厚比的管柱压溃经典算法;API RP 2RD 和 API RP 1111 选取 Shell 方法作为管柱压溃计算方法;挪威船级社则在 Haagsma-Schaap 方法的基础上稍作修正提出 DNV 算法,作为 DNV OS F101 等规范中的推荐做法<sup>[9-12]</sup>。上述推荐理论算法可进行完好隔水管的压溃分析,但都没有考虑缺陷对隔水管压溃性能的影响。实际中,隔水管服役期间受海洋自然环境、钻井液以及钻杆偏磨的影响,易出现磨损、腐蚀等缺陷。目前,采用有限元建模技术可以考虑缺陷对隔水管压溃的影响。

因此,笔者利用有限元建模技术,建立了隔水管压溃有限元评估方法,对隔水管压溃有限元评估方法进行了验证,并利用该方法进行了缺陷隔水管的压溃分析,可为深水钻井隔水管设计提供依据。

## 1 隔水管压溃有限元评估方法

隔水管压溃是典型的材料非线性稳定性问题,隔水管压溃失效前载荷和位移平稳增大,隔水管压溃失效后(达到极值点之后),隔水管开始释放应变能,载荷-位移曲线呈现负斜率<sup>[13]</sup>。针对该类非线性问题,一般采用 Newton-Raphson 和 Riks 非线性算法进行求解,而采用 Newton-Raphson 非线性算法进行求解时,无论采用载荷控制方法还是位移控制法均难以确定极值点及其后面的载荷-位移,且计算不易收敛、结果不准确。Riks 方法是较为稳定的结构非线性分析方法,在一个载荷步内进行多次迭代并自动调整载荷步增量,可以实现结构屈曲前后

的路径跟踪。根据 Riks 理论,加载过程中载荷增量和位移增量的关系可表示为<sup>[14]</sup>:

$$k_T \Delta x = \lambda P_0 + R_F \quad (1)$$

式中: $k_T$  为切线刚度矩阵; $\Delta x$  为位移增量向量; $P_0$  为参考载荷向量; $R_F$  为残余力向量; $\lambda$  为载荷因子。

式(1)的未知变量为位移增量向量  $\Delta x$  和载荷系数  $\lambda$ ,  $n$  次迭代下的方程组未知量个数为  $n+1$ ,所以需要补充一个控制方程,可表示为:

$$\Delta x^T \Delta x + \lambda^2 P_0^2 = (\Delta l)^2 \quad (2)$$

式中: $\Delta l$  为迭代搜索中的弧长,即保证迭代计算过程中弧长不发生变化,进行隔水管压溃分析时要不断进行每个载荷增量下的迭代计算,直至残余力满足收敛要求。

目前,有限元分析软件 ABAQUS 和 ANSYS 已集成了 Riks 方法,并具有结构失稳、屈曲等非线性稳定性方面的计算功能,其中 ABAQUS 软件在大变形非线性分析方面具有较强的优势,因此,笔者选用 ABAQUS 软件进行隔水管压溃失效评估。考虑到隔水管系统结构为细长形,为典型的平面应变问题,只需建立隔水管截面有限元分析模型。以外径 533.4 mm、壁厚 22.2 mm 的完好隔水管为例,采用 ABAQUS 软件建立隔水管压溃有限元分析模型,采用 CPS8R 单元划分网格,并在隔水管外围施加压力,如图 1 所示。隔水管的材料一般为 X80 钢,其屈服强度为 552 MPa,隔水管材料的应力-应变曲线如图 2 所示。采用 Riks 方法对隔水管进行非线性压溃分析,得出隔水管压溃过程中的压力-位移曲线(见图 3),完好隔水管压溃后的截面形状如图 4 所示。

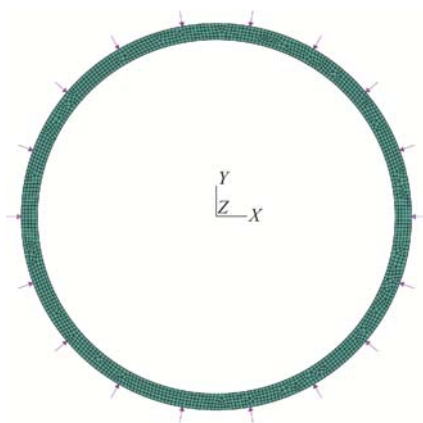


图 1 隔水管压溃有限元分析模型

Fig. 1 Finite-element analysis model for riser collapse

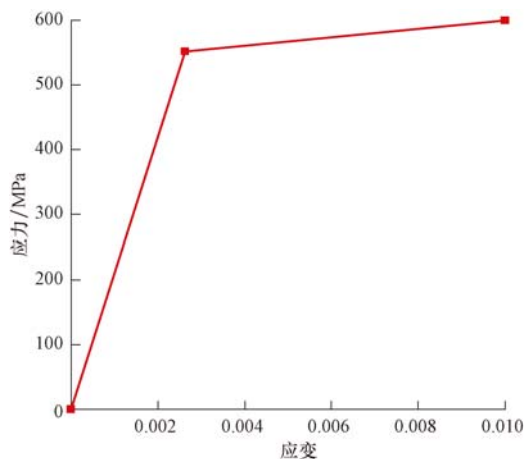


图 2 隔水管应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of risers

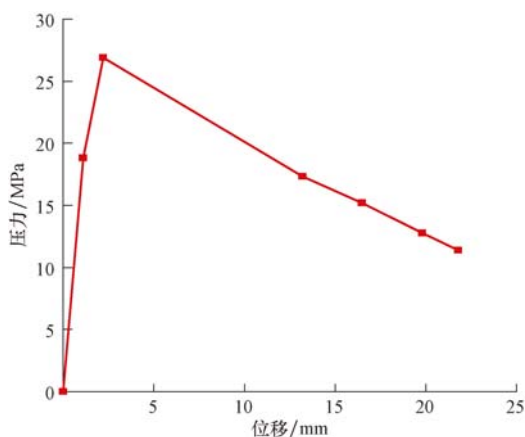


图 3 隔水管压力-位移曲线

Fig. 3 The pressure-displacement curve of risers

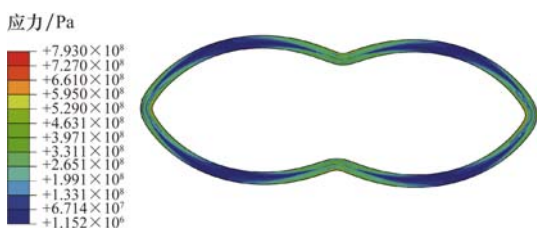


图 4 完好隔水管压溃截面

Fig. 4 Collapse cross-section of intact risers

由图 3 和图 4 可知:隔水管非线性压溃分析是一个不断迭代的过程,初始阶段隔水管发生弹性变形,隔水管位移变化较小,隔水管外部压力升高较快;当内外压差达到临界压力时,隔水管发生失稳,隔水管开始发生塑性变形,隔水管位移增大较快,压力出现一定程度的下降;由弹性阶段向塑性阶段的突变点即为隔水管压溃临界点,此时对应的压力即为隔水管临界压溃压力,压溃后隔水管的截面发生明显变化,基本呈扁平状。

## 2 隔水管压溃有限元分析方法验证

目前,API BULLETIN 5C3,API RP 2RD,API RP 1111 和 DNV OS F101 均给出管柱压溃理论分析方法,其中 API BULLETIN 5C3 较早给出了管柱压溃的经典算法<sup>[10]</sup>,API RP 2RD,API RP 1111 和 DNV OS F101 均是在经典算法的基础上对管柱压溃算法进行了改进,分析精度较高<sup>[11-12]</sup>,因此选取 API RP 2RD,API RP 1111 和 DNV OS F101 的推荐做法进行隔水管压溃有限元分析方法验证。API RP 2RD,API RP 1111 和 DNV OS F101 的推荐做法分别为:

$$p_{API} = \frac{p_{eb} p_{fy}}{\sqrt{p_{eb}^2 + p_{fy}^2}} \quad (3)$$

$$(p_{DNV} - p_{eb})(p_{DNV}^2 - P_{fy}^2) = p_{DNV} p_{eb} p_{fy} f_0 \frac{D}{t} \quad (4)$$

式中:  $p_{fy}$  和  $p_{eb}$  分别为屈服压溃和弹性压溃失效临界压力,MPa;  $D$  为隔水管外径,mm;  $t$  为隔水管壁厚,mm;  $f_0$  为隔水管椭圆度;  $p_{API}$  和  $p_{DNV}$  分别为 API 和 DNV 推荐算法的临界压溃压力,MPa。

以  $\phi 533.4 \text{ mm} \times 80$  钢隔水管为例,分别采用深水钻井隔水管压溃规范推荐方法和有限元评估方法进行壁厚 25.4、23.8、22.2、19.0 和 12.7 mm 隔水管的压溃评估,结果如图 5 所示。

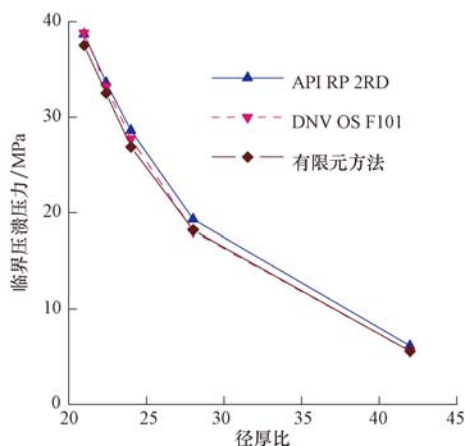


图 5 不同计算方法计算出的隔水管临界压溃压力

Fig. 5 Critical collapse pressures of risers calculated with different methods

由图 5 可知,有限元压溃分析方法与 API、DNV 推荐算法的隔水管压溃压力分析结果基本一致,验证了隔水管压溃有限元分析方法的准确性。

### 3 实例分析

正常钻进过程中钻杆位于隔水管系统内部,钻杆以一定的转速在隔水管内旋转,隔水管系统与钻杆发生接触和摩擦,进而发生磨损,隔水管磨损形状一般为月牙形。此外,深水钻井隔水管使用过程中长期与海水、钻井液等接触,隔水管会出现腐蚀缺陷,常采用长方体描述腐蚀缺陷,一般腐蚀长度与深度之比取4:1。基于建立的深水钻井隔水管压溃有限元评估方法,建立了缺损隔水管压溃有限元分析模型,隔水管外径为533.4 mm、壁厚为22.2 mm,材料为X80钢,材料特性曲线如图2所示。进行缺损隔水管压溃有限元分析,压溃前隔水管的受力分布如图6所示,压溃后的隔水管截面形状如图7所示。

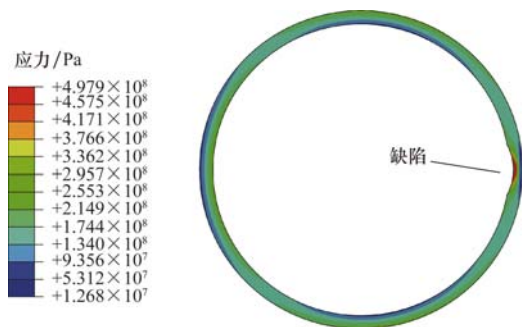


图6 缺损隔水管应力分析

Fig. 6 Stress analysis on defective risers

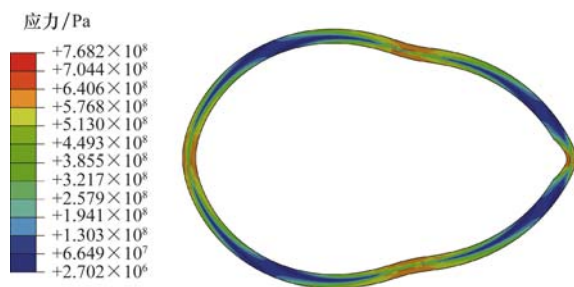


图7 缺损隔水管压溃分析

Fig. 7 Collapse analysis on defective risers

由图6和图7可知:隔水管缺陷会引起隔水管结构突变,缺陷处的隔水管出现应力集中;随着隔水管外部压力增大,缺陷处的隔水管应力先达到屈服强度,隔水管开始发生压溃变形,进而引起整个隔水管压溃失效。与完好隔水管的压溃变形(见图4)相比,缺陷处隔水管压溃变形较为明显,整个压溃截面呈现锥形。

为了进一步定量评估缺陷对隔水管压溃性能的

影响,针对深水钻井隔水管磨损和腐蚀2种缺陷类型,分别进行不同磨损率(磨损深度与隔水管壁厚之比)、腐蚀率(腐蚀深度与隔水管壁厚之比)下的深水钻井隔水管压溃有限元分析,结果如图8和图9所示。

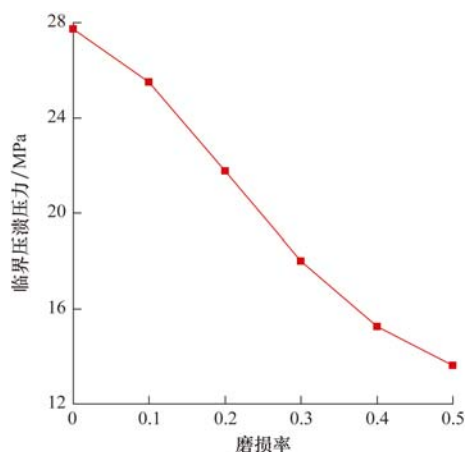


图8 磨损对隔水管压溃的影响

Fig. 8 Impacts of wear on riser collapse

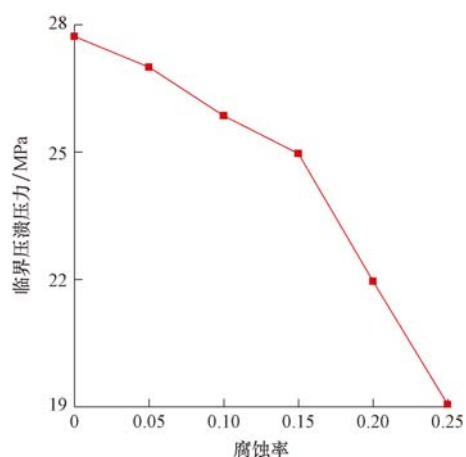


图9 腐蚀对隔水管压溃的影响

Fig. 9 Impacts of corrosion on riser collapse

由图8和图9可看出,含磨损和腐蚀缺陷的隔水管压溃性能较差,且随着深水钻井隔水管缺陷尺寸增大,隔水管临界压溃压力逐渐降低,说明磨损和腐蚀均是影响隔水管抗压溃能力的重要因素。

### 4 结论与建议

1) 针对理论算法无法进行缺损隔水管压溃评估的问题,建立了深水钻井隔水管非线性压溃有限元评估方法,并与API和DNV的推荐算法进行了对比验证,验证了隔水管压溃有限元分析方法的准确性。



2) 隔水管非线性压溃分析是一个不断迭代的过程,初始阶段隔水管发生弹性变形,隔水管位移变化较小;当内外压差达到临界压力时,隔水管发生失稳,隔水管开始发生塑性变形,隔水管位移增大较快,压力会出现一定程度的下降,弹性阶段向塑性阶段的突变点即为隔水管压溃临界点。

3) 完好隔水管压溃后截面呈扁平状。缺损隔水管最先在缺陷处发生压溃变形,进而引起整个隔水管截面压溃失效,压溃后的隔水管截面呈锥形,且随着隔水管缺陷尺寸的增大,隔水管临界压溃压力逐渐降低。

4) 深水钻井隔水管压溃受材料性能、隔水管结构参数以及隔水管内外压力等因素的影响,且各参数均呈现一定的随机性,建议进一步考虑影响隔水管压溃参数的概率分布,开展深水钻井隔水管压溃可靠性研究。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 张磊,畅元江,刘秀全,等. 深水钻井隔水管与防喷器紧急脱离后的反冲响应分析[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(3): 25-30.  
Zhang Lei, Chang Yuanjiang, Liu Xiuquan, et al. Recoil analysis for deepwater drilling riser after emergency disconnection with blowout preventer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 25-30.
- [2] ISO 13624-1 Petroleum and natural gas industries: drilling and production equipment: part 1: design and operation of marine drilling riser equipment[S].
- [3] 刘秀全,陈国明,彭朋,等. 深水钻井隔水管单根寿命管理方法[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 40-44.  
Liu Xiuquan, Chen Guoming, Peng Peng, et al. Deepwater drilling riser joints management [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 40-44.
- [4] 隋秀香,梁羽丰,李铁明,等. 基于多普勒测量技术的深水隔水管气侵早期监测研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 90-94.  
Sui Xiuxiang, Liang Yufeng, Li Yiming, et al. Early monitoring of the gas-cut in deepwater riser based on doppler measuring system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 90-94.
- [5] Erb P R, Ma Tien-Chi, Stockinger M P. Riser collapse: a unique problem in deep-water drilling[R]. IADC/SPE 11394, 1983.
- [6] Benjamin A C, Cunha D J S. Assessment of hydrostatic collapse of submarine pipelines: historical review of the classic methods: proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, Calgary, September 24-28, 2012[C].
- [7] Benjamin A C, Cunha D J. Assessment of hydrostatic collapse of submarine pipelines: the classical approach revisited: proceedings of the ASME 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, July 1-6, 2012[C].
- [8] Kavanagh W K, Lou J, Hays P. Design of steel risers in ultra deep water: the influence of recent code requirements on wall thickness design for 10,000ft water depth[R]. OTC 15101, 2003.
- [9] API BULLETIN 5C3—1994 Buttlein on formulas and calculations for casing, tubing, drill pipe and line pipe properties[S].
- [10] API RP 1111—1999 Design, construction, operation, and maintenance of offshore hydrocarbon pipelines[S].
- [11] API RP 2RD—1998 Design of risers for floating production systems (FPSs) and tension-leg platforms (TLPs)[S].
- [12] DNV OS F101—2005 Submarine pipeline systems[S].
- [13] 秦荣. 工程结构非线性[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
Qin Rong. Nonlinear engineering structure[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [14] 刘金梅,周国强,韩国有. 弧长法在服役石油井架非线性全过程仿真中的应用研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2): 229-233.  
Liu Jinmei, Zhou Guoqiang, Han Guoyou. Application of arc-length method to full range nonlinear simulation of derrick in-service[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(2): 229-233.

[编辑 刘文臣]