

## 流场诱导 API 圆螺纹油管接箍失效分析及结构优化

严仁田<sup>1,2</sup>, 王 峰<sup>3</sup>, 张德平<sup>3</sup>, 朱红钧<sup>1</sup>, 曾德智<sup>1</sup>

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石油长城钻探工程有限公司, 辽宁盘锦 124010; 3. 中国石油吉林油田分公司采油工艺研究院, 吉林松原 138000)

**摘要:**油管柱失效的主要形式是油管螺纹连接失效。目前对油管螺纹连接失效的研究主要集中在载荷作用下的螺纹受力和变形分析,对螺纹连接处流场突变导致失效的研究较少。利用流体动力学计算方法,对 API 圆螺纹油管接箍流场内部的流体建立控制方程,采用 FLUENT 软件进行流场模拟,对接箍连接的“J”形区的压力、速度分布情况进行了分析,并提出了改进措施,对流道进行优化。“J”形区的流场模拟计算发现,流体因高速流动产生涡流和压力突变,进一步影响流体性质并冲击接箍内壁。API 油管接箍结构优化后,避免了压力和速度的突变,有利于流体流通,为油管的优化设计提供了理论依据。

**关键词:**油管接箍 失效分析 流场诱导 结构设计

中图分类号:TE319<sup>+</sup>.2; TE931<sup>+</sup>.2 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2012)05-0111-04

## Failure Analysis of API Tubing Round Threaded Connection Induced by Flow Field

Yan Rentian<sup>1,2</sup>, Wang Feng<sup>3</sup>, Zhang Deping<sup>3</sup>, Zhu Hongjun<sup>1</sup>, Zeng Dezhi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation(Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Great Wall Drilling Company, PetroChina, Panjin, Liaoning, 124010, China; 3. Petroleum Production Technology Research Institute, Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan, Jilin, 138000, China)

**Abstract:** The thread connections invalid of API tubing is the main form of tubing string failure according to the statistics from oilfields. Study on thread connection failure has been mainly focused on the force and deformation analysis under loads, few have been related to the flow field mutations of threaded connections. Therefore, it is necessary to study the failure mechanism by flow field mutations. In this paper, based on the computation fluid dynamics, governing equations of flowing fluid in thread connection have been built. Then, flow characteristics(distribution of pressure and velocity) in the connection of API round thread tube were simulated by FLUENT. Finally, technical measures that can improve the flow mutations have been proposed. According to the simulation and calculation of flow field in the "J"-shaped area, it was concluded that vortex and pressure mutation induced by high-speed flow would affect the fluid properties, leading the fluid to attack the inner wall of the connection. The newly designed API round thread could avoid the mutation of pressure and velocity, which was favorable for fluid flow, providing theoretical basis for the optimization design of tube.

**Key words:** tubing connection; failure analysis; flow induced; structure design

随着油气田开发的不断深入,井下管柱的工作条件日益恶劣,各油田相继发生了多起 API 油管失效事故,造成了巨大的经济损失。统计表明,油管失效事故约有 64%发生在螺纹连接部位<sup>[1-2]</sup>。造成油管失效的原因很复杂,国内外学者也从不同角度进行了大量研究,一方面,油管加工尺寸偏差、矿场操作以及抽油杆的摩擦使油管内壁近管端处发生机械损伤,导致油管失效<sup>[3]</sup>;另一方面,油管内流动着腐

收稿日期:2011-07-07; 改回日期:2012-06-08。

**作者简介:**严仁田(1985—),男,四川成都人,2012 年毕业于西南石油大学油气井工程专业,在读硕士研究生,主要从事钻井新技术和油井管力学研究。

**联系方式:**islandyan@126.com。

**基金项目:**国家自然科学基金项目“酸性气井环空带压机理及诊断、预测研究”(编号:51074135)部分研究内容;四川省杰出青年学术技术带头人后续资助计划“酸性气井环空带压机理及安全可靠性研究”(编号:2011JQ0058)部分研究内容;中国石油吉林油田分公司资助项目“CO<sub>2</sub> 驱注采井管柱完整性设计”(编号:JS10-W-14 JZ-32-51)部分研究内容。

蚀性流体,油管接箍处流场突变加速了管壁的腐蚀<sup>[4-6]</sup>,导致油管失效。目前,对流场变化诱导油管失效的研究相对较少。

API 连接式油管接箍紧扣后,在接箍中间有长度为 25.4 mm 的凹槽,称为“J”形区,油管在实际加工中由于存在公差,“J”形区的大小是变化的。油管柱内的流道变化会引起旋涡流场和压力突变。笔者基于 FLUENT 软件,模拟了 API 连接式油管接箍处的流场和压力分布规律,研究了流道结构变化与流场诱导失效的关系,并在此基础上设计了 API 圆螺纹油管专用密封内衬组合结构,解决了油管接箍流场诱导失效问题。

## 1 数学模型

假设管内流体为连续、均匀、不可压缩的黏性牛顿流体,基于柱坐标系建立数学模型,得到连续性方程、运动微分方程、湍流动能守恒方程以及湍流耗散守恒方程<sup>[7-8]</sup>,并联立求解。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_a) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r) = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho$  为流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $r$  为流场半径, m;  $v_a$  为稳态条件下,流体的轴向流动速度, m/s;  $v_r$  为稳态条件下,流体的径向流动速度, m/s。

运动微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_a^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_a v_r) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_a}{\partial x} \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_a}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_a}{\partial x} \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} & \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_a v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r^2) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_r}{\partial x} \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_r}{\partial x} \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] - 2 \mu_{\text{eff}} \frac{v_r}{r^2} - \frac{\partial p}{\partial r} & \quad (3) \end{aligned}$$

其中

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{\kappa_p^2}{\epsilon_p} \quad (5)$$

式中: $\mu_{\text{eff}}$  为有效动力黏度, Pa·s;  $p$  为流场压力, MPa;  $\mu$  为分子动力黏度, Pa·s;  $\mu_t$  为湍流黏度, Pa·s;  $C_\mu$  为经验常数值, 在  $\kappa_p - \epsilon_p$  模型中  $C_\mu = 0.09$ 。

由于湍流的复杂性,只有在雷诺数较小时才有可能对湍流作精确的数值模拟,因此采用修正的低

雷诺数  $\kappa_p - \epsilon_p$  模型研究管壁附近的流场分布。湍流模型方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_a \kappa_p) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r \kappa_p) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \kappa_p}{\partial x} \right] +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \kappa_p}{\partial r} \right] + P_\kappa - \rho \epsilon_p \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_a \epsilon_p) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r \epsilon_p) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon_p}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon_p}{\partial r} \right] +$$

$$\frac{\epsilon}{\kappa} (C_{\epsilon 1} f_1 P_\kappa - C_{\epsilon 2} f_2 \rho \epsilon) \quad (7)$$

式中: $\kappa_p$  为湍动能;  $\epsilon_p$  为湍流耗散率;  $P_\kappa$  为产生总的湍动能;  $f_1$ 、 $f_2$  为湍流模型中的相关函数;  $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ ,  $\sigma_\kappa$  和  $\sigma_\epsilon$  为  $\kappa_p - \epsilon_p$  模型中常值, 分别取  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_\kappa = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

## 2 模拟分析

在 Auto CAD 中建立 1:1 的 API 圆螺纹油管接箍处几何模型,用 Gambit 进行网格划分,并导入 FLUENT 软件,对流场进行模拟分析。

### 2.1 几何模型

选用 API 标准不加厚圆螺纹油管,油管外径 73.03 mm,内径 62.00 mm。为便于观察分析,对沿轴剖面的二维流场进行计算,如图 1 所示。

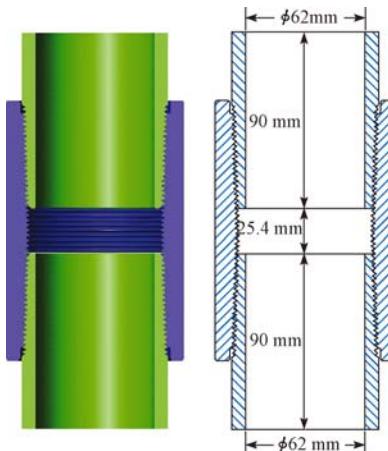


图 1 API 圆螺纹接箍三维及沿轴向剖面的二维结构

Fig. 1 Flow field structure of 3D and 2D section along the axis of API round thread connection

### 2.2 流场分析

某油田的一口采油井以产液量 25 m<sup>3</sup>/d 进行生产,井深 1 200 m 处地层温度 60.3 ℃,原油饱和压

力 5.02 MPa, 管内流体为含水 30% 的油水混相流。将接箍下端设为入口截面, 上端设为出口截面, 管壁设为墙边界。

油管内流体在接箍处的压力分布如图 2 所示。从图 2 可以看出, 整个接箍处流道主体的压力较大且基本相同; 在靠近管壁的位置, 存在一层较薄的流体边界层, 其压力较低。在油管接箍处有凹槽的“J”形区, 压力的波动较为明显。

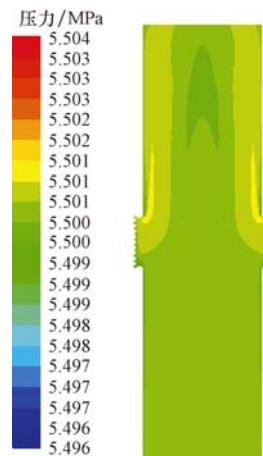


图 2 流场压力分布

Fig. 2 Pressure distribution of the flow field

整个流道内, API 圆螺纹油管接箍的“J”形区前端压力小幅降低, 而在“J”形区内压力迅速下降, 然后回升(见图 3)。“J”形区内压力波动严重, 并出现局部低压区。低压区内的压力已降到饱和蒸汽压 5.02 MPa 以下, 此时液相汽化产生气泡, 气泡随着液相流动。当气泡进入正常压力区或高压区时, 气泡将瞬时破灭, 气泡周围的液流质点高速填充气泡破灭前的体积, 产生很大的冲击力。冲击力作用在管壁, 导致表面出现坑蚀或微裂纹。产生的坑蚀或微裂纹会形成新的低压区, 产生更多的气泡撞击管壁。

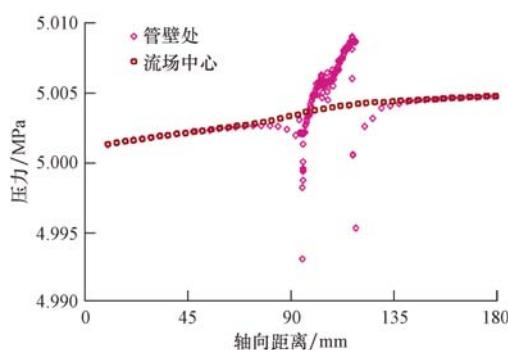


图 3 流场总压力分布

Fig. 3 Total pressure distribution of the flow field

油管内流体在接箍处沿轴向的速度分布如图 4 所示。从图 4 可以看出, API 圆螺纹油管接箍处流道主体的速度较大, 且在凹槽处有速度突降。管壁附近存在较薄的一层流体边界层, 流体边界层内的流速较低。

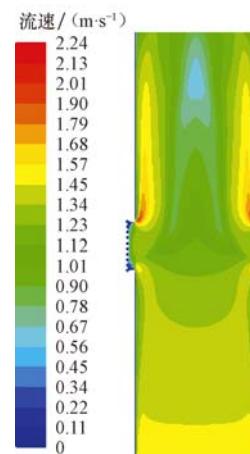


图 4 轴向速度分布云图

Fig. 4 Velocity distribution along the axis

从图 5 可以看出, 在管内中心位置和进出口平滑段的速度矢量几乎平行, 流体稳定流过; 在“J”形区两端速度突变明显; 在“J”形区内出现了与流道主体速度方向相反的区域, 表现出明显的涡流现象。

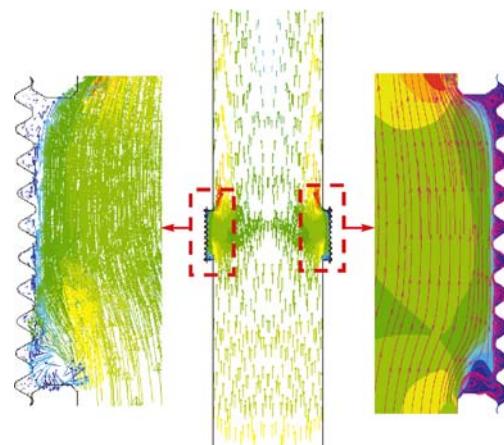


图 5 速度矢量和流线分布

Fig. 5 Velocity vector and flow line distribution

在 API 圆螺纹油管接头“J”形区内, 流场速度变化较大, 最大速度为 2.24 m/s, 最小速度为 0。“J”形区前端形成较大旋涡, 且速度较低, 每个螺纹的牙底均有涡流形成; “J”形区的末端速度逐渐增大, 对公扣的端面形成冲刷。在涡流区内, 流体速度变化较大, 加剧了低压区内气泡的聚集, 形成气泡群, 对接箍螺纹和公扣端面造成撞击和冲刷。

油井分别以 25, 30 和 35 m<sup>3</sup>/d 的产液量进行生

产,得到不同的接箍流场分布(见图 6)。不同产液量的接箍流场分布相似,产量越大,速度变化越大,涡流越明显。由于接箍处的“J”形区内同时存在低压区和涡流区,原油的举升阻力加大,不利于油井生产。接箍螺纹、公扣端面内壁在压力和流场的双重作用下,很容易发生穿孔失效,当含有二氧化碳等酸性腐蚀气体的原油在油管内流动时,这种影响更加显著。

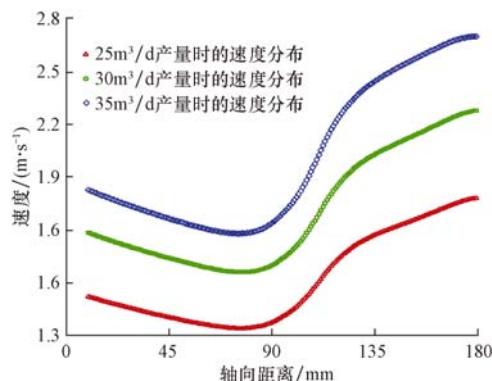


图 6 不同生产方案下轴向流速趋势

Fig. 6 Velocity distribution along the axis of different production cases

### 3 内衬密封组合设计

油管接箍凹槽的缺陷,导致 API 标准圆螺纹失效的可能性增加,因此优化油管接箍尤为重要。国内外厂家提出了多种特殊扣接箍,其基本原理是金属对金属的密封,要求密封接触面有足够的压应力,以密封高压流体。然而这样对加工精度、上扣扭矩要求较高,造价和维护费用也很高。可在 API 圆螺纹基础上进行结构优化,达到密封效果并降低成本。

如图 7 所示,在“J”形区内设置金属衬套和聚四氟乙烯密封圈。金属衬套两端外壁为锥面,与金属衬套接触的密封圈内壁亦为锥面,二者相互配合,实现了锥度配合长度在不同公差范围内“J”形区大小变化的自动调整,避免了聚四氟乙烯密封圈的膨胀

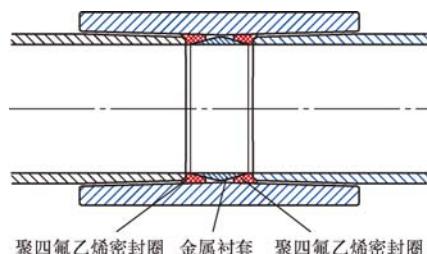


图 7 密封组合结构装配

Fig. 7 The structure of sealing assemblage

变形。上卸扣试验表明,该内衬密封组合结构能够使聚四氟乙烯密封环挤入螺纹缝隙内,不仅避免了流场的结构变化,也封堵了螺纹间隙,避免了管内流体通过间隙腐蚀螺纹。

### 4 结 论

1) 油管接箍连接处流场突变是导致油管失效的原因之一,研究流道结构与流场诱导失效之间的协同效应,可更有效防止油管柱失效。

2) 油管接箍中部“J”形区内存在比较明显的涡流现象,产生的压力波动会形成低压区,流体产生汽化而撞击管壁,加速油管接箍的腐蚀失效。

3) 设计的内衬密封组合结构可以有效避免流道突变,改善接箍螺纹部位的流场分布,建议对该结构进行进一步试验,以验证其效果。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] Schwind B. Mobile qualifies three tubing/casing connection product lines[J]. Hart's Petroleum Engineer International, 1998, 71(11): 59-62.
- [2] 刘绘新,苏永平.川东气田油管腐蚀现象的基本特征[J].天然气工业,2008,20(5):388-390.  
Liu Huixin, Su Yongping. Essential features of tubing corrosion phenomena in Chuandong Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2008, 20(5): 388-390.
- [3] 杨海滨,狄勤丰,王文昌.抽油杆柱与油管偏磨机理及偏磨点位置预测[J].石油学报,2005,26(2):100-103.  
Yang Haibin, Di Qinfeng, Wang Wenchang. Prediction of serious abrasion position and mechanism of uneven abrasion between sucker rod string and tubing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 100-103.
- [4] Zhu Hongjun, Lin Yuanhua, Zeng Dezhi. Flow induced corrosion of API round thread connection[R]. SPE 132053, 2010.
- [5] Jordau K G. Erosion in multiphase production of oil & gas[R]. NACE 98058, 1998.
- [6] 张智,施太和,周理志,等.油气田开发过程中的流场诱导腐蚀[J].石油钻探技术,2005,35(3):79-81.  
Zhang Zhi, Shi Taihe, Zhou Lizhi, et al. Flow induced corrosion during reservoir development [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 35(3): 79-81.
- [7] 陈义良.湍流计算模型[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1991:8-20.  
Chen Yiliang. Turbulent model[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1991:8-20.
- [8] 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2010:106-111.  
Zhu Hongjun, Lin Yuanhua, Xie Longhan. FLUENT analysis and simulation tutorial[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2010:106-111.