

非均匀载荷和内压作用下石油套管的抗挤能力分析

周雄¹, 林国庆², 钟莹莹¹, 方丽萍¹, 梁金禄¹

(1. 钦州学院石油与化工学院, 广西高校北部湾石油天然气资源有效利用重点实验室, 广西钦州 535000; 2. 宜宾华润燃气有限公司, 四川宜宾 644000)

摘要: 油井套管往往处于管内外复杂的受力环境下, 揭示和分析这些因素对套管抗挤能力的影响就显得非常重要, 并可为套管强度设计提供理论依据。根据套管在受到外部非均匀载荷和内压作用下的受力特点和材料力学理论, 建立了单位长度的理想圆管的环向应力的计算模型, 得到了套管内外壁的环向应力分布规律。计算结果表明: 套管发生破坏失效位置在圆周方向与最大水平地应力成 90° 角的内壁上。依据 Von Mises 屈服准则由失效点得到了非均匀外挤载荷和内压作用下套管屈曲时抗外挤能力的新公式。实例计算表明: 在影响套管的抗挤能力的因素中, 外载荷的非均匀系数对套管抗外挤能力影响最大, 外载荷的非均匀系数越大, 套管抗外挤能力下降得越快; 在外载荷非均匀性较小的条件下, 提高套管外载荷承载能力可通过增大内压和减小套管径厚比来实现。

关键词: 非均匀载荷; 内压; 环向应力; 破坏失效位置; 抗外挤能力; 径厚比

中图分类号: TE925; TH123.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)08-0076-05

Analysis on Anti-collapse Ability of Oil Casing under External Non-uniform Load and Internal Pressure/ZHOU Xiong¹, LIN Guo-qing², ZHONG Ying-ying¹, FANG Li-ping¹, LIANG Jin-lu¹ (1. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Beibu Gulf Oil and Natural Gas Resource Effective Utilization, College of Petroleum and Chemical Engineering, Qinzhou University, Qinzhou Guangxi 535000, China; 2. Yibin China-Resources Gas Co., Ltd., Yibin Sichuan 644000, China)

Abstract: Oil casing is usually under the complicated internal and external stress environment. The study and analysis on the influence of these factors on casing collapse resistance ability are very important, which can provide theoretical basis for casing strength design. Based on the stress characteristics of casing under external non-uniform load and internal pressure and the theory of material mechanics, a calculation model of hoop stress of ideal casing at unit length is established, the distribution regularity of hoop stress of internal and external casing surfaces is revealed. The calculation shows that the yield failure point is at the internal surface in circumferential direction of 90 angle with maximum horizontal crustal stress. A new formula of external collapse resistance ability under non-uniform external collapse load and internal pressure during casing buckling is derived from the failure point by Von Mises yield criterion. Calculation examples show that non-uniformity coefficient of external load has the greatest impact on external collapse resistance ability among all the influence factors on collapse resistance ability of casing. The larger the non-uniformity coefficient of external load is, the faster the collapse resistance ability of casing declines; under less external load non-uniformity, the external load bearing capacity of casing can be improved by increasing the internal pressure and decreasing casing diameter-thickness ratio.

Key words: non-uniform load; internal pressure; hoop stress; yield failure point; external collapse resistance ability; diameter-thickness ratio

在油气钻井形成井眼后, 地下岩层的天然应力会得到释放并传递作用到套管上, 会对套管产生挤压作用, 特别是流变性盐岩、高陡构造等深井复杂地层, 对套管会产生比较大的非对称性挤压作用, 从而导致套管挤毁失效^[1-4], 对油气开采造成很大的影

响。目前套管的强度特性大都采用均匀的径向载荷来表述, 而非均匀载荷下的套管强度特性与均匀载荷下的强度特性存在巨大差别^[5-6]。笔者考虑了套管在外部非均匀载荷和内部液柱压力的作用下, 根据材料力学原理建立了圆管环向应力的计算模型,

收稿日期: 2017-02-02

基金项目: 广西高校中青年教师基础能力提升项目(编号: KY2016LX440); 广西高校北部湾石油天然气资源有效利用重点实验室开放课题基金(编号: 2015KLOG08)

作者简介: 周雄, 男, 汉族, 1988年生, 硕士, 主要研究方向为油气工程管柱力学和管道安全, 广西钦州市钦南区滨海大道12号钦州学院石油与化工学院, zxcqs2010@126.com。

揭示了套管挤毁失效的位置,并用均匀外挤载荷下套管的强度来等效2种外部载荷作用下套管的强度,分析套管的抗外挤能力,为复杂地层套管抗挤强度设计提供依据。

1 套管力学模型

1.1 基本假设

地下岩层中,石油套管受到的外挤压力是非均匀性的,可用最小水平地应力和最大水平地应力来表示,其特点是靠近最小水平地应力方向外挤载荷减小,靠近最大水平地应力方向外挤载荷增加,如图1(a)所示,外挤力的分布模型通常可表示为^[7-8]:

$$p(\theta) = p_0 + p_1 \cos(2\theta) \quad (1)$$

式中: $p(\theta)$ ——作用在套管外壁上的径向非均匀载荷,MPa; θ ——沿半径方向与 x 轴所成的夹角, $(^\circ)$; p_0 ——径向非均匀载荷中的均匀部分,MPa; p_1 ——径向非均匀载荷中的非均匀部分,MPa。

为描述套管外壁上的径向载荷的非均匀程度,定义外载荷的非均匀系数为

$$k = 1 - p_{\min}/p_{\max} \quad (2)$$

式中: p_{\min} 、 p_{\max} ——径向非均匀载荷的最小值和最大值,MPa。

当外载荷的非均匀系数 k 为0时,套管仅受到均匀挤压力作用, k 越大,表示套管受到外载荷的非均匀性越强。此外考虑到套管内部流体的存在,流体会对套管内壁有均匀的液柱静压力作用 p_2 。

对套管结构进行分析时,取轴向尺寸为单位长度、均匀壁厚的理想圆管为研究对象,考虑到套管的结构和受力的对称性,采用1/4结构物理模型,如图1(b)所示,并作出如下假设:

(1)套管为中等厚度单位长度的圆管,其切应力相对较小可以忽略不计^[9-10];

(2)圆管两端截面 A 、 B 处的转角为零, A 截面仅受轴向力和弯矩的作用,仅在 x 方向有位移, B 截面仅在 y 方向有位移;

(3)套管材料的本构关系为理想的双线性弹性模型;

(4)不考虑套管绕轴线的扭转作用的影响。

1.2 计算原理

在对套管发生破坏失效的因素进行分析时,环向应力起着主要作用^[11],因此有必要对套管的环向应力的分布进行分析。选取单位长度圆环上任意

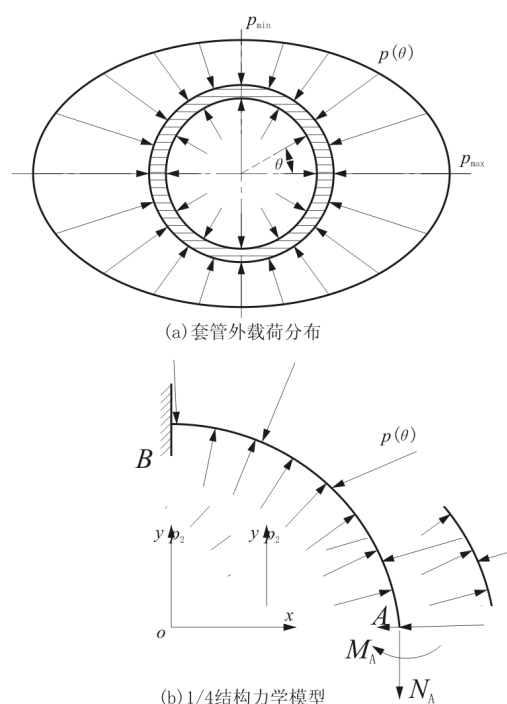


图1 非均匀载荷下套管外载荷分布及力学模型

角度 θ 的一个截面为研究面,如图2所示,由静平衡可得:

$$M(\theta) = -(1/3)p_1 R_0^2 \cos(2\theta) \quad (3)$$

$$N(\theta) = -(p_0 - p_2) R_0 + (1/3)p_1 R_0 \cos(2\theta) \quad (4)$$

式中: $M(\theta)$ ——某一 θ 角截面上作用的弯矩, $N \cdot \text{mm}$; $N(\theta)$ ——任意 θ 角上截面上的法向拉力, N ; R_0 ——圆环任一截面形心轴的曲率半径, mm 。

根据材料力学理论,任意角 θ 截面的环向应力表达式^[9]为:

$$\sigma_\theta = -\frac{M(\theta) \cdot y}{S_p} + \frac{N(\theta)}{A} \quad (5)$$

式中: y —— θ 角截面上某点到中性轴的距离, mm ,见图3; ρ ——该截面上某点对应的曲率半径, mm ; A ——截面面积,所取圆管为单位长度,则 $A = hl$, mm^2 ; S ——该截面对中性轴 z 的静矩, $S = Ae$, mm^3 ; e ——形心轴 z' 到中性轴 z 的距离, $e = R_0 - r$, mm ; r ——截面中性轴 z 对应的曲率半径, m ,其计算如下:

$$r = h / \ln\left(\frac{\lambda}{\lambda - 2}\right) \quad (6)$$

式中: λ ——套管外半径与厚度的比值,简称径厚比, $\lambda = D/h$; D ——圆管外径, mm ; h ——圆管的壁厚, mm 。

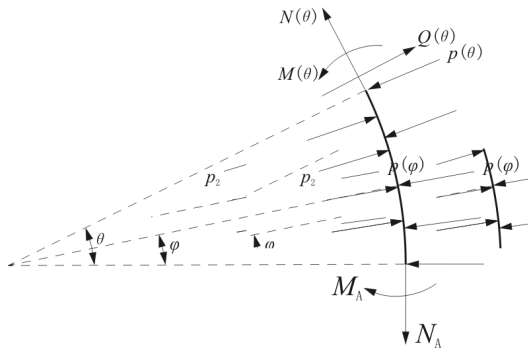


图2 截面受力分布图

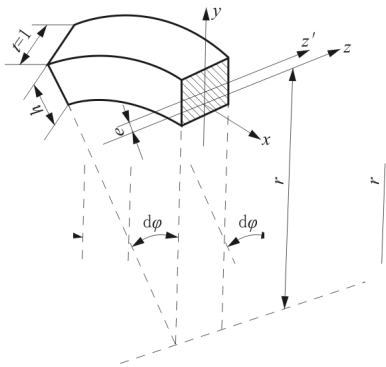


图3 套管某一截面示意图

在外载荷的作用下,套管发生破坏的位置主要集中在壁面位置,则内、外壁的环向应力分别为:

$$\sigma_{0i} = \frac{M(\theta)(r - R_0 + h/2)}{S(R_0 - h/2)} + \frac{N(\theta)}{A} \quad (7)$$

$$\sigma_{0o} = \frac{M(\theta)(R_0 + h/2 - r)}{S(R_0 + h/2)} + \frac{N(\theta)}{A} \quad (8)$$

式中: σ_{0i} ——套管内壁上的环向应力,MPa; σ_{0o} ——套管外壁上的环向应力,MPa。

2 套管环向应力分析

为分析套管在外载荷下的危险截面位置,以N80型号套管为例,其中其外径为177.8 mm,壁厚10.36 mm,取非均匀载荷 $p_0 = 60$ MPa, $p_1 = 10$ MPa,内压 $p_2 = 10$ MPa,分析套管内、外壁环向应力的情况,其变化规律如如图4所示(环向应力值有正负值,这里取绝对值)。

从图4可以看出,在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内,套管外壁环向应力随圆周角的增加而减小,最大值为601 MPa,位于 0° 圆周角位置;套管内壁环向应力随圆周角的增加而增加,最大值为696 MPa,位于 90° 圆周角位置。很显然,外壁上应力最大值要比内壁上

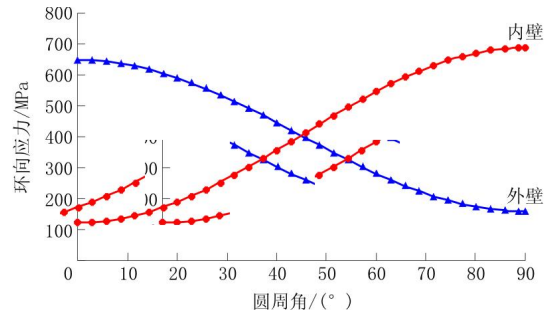


图4 非均匀载荷作用下套管环向应力变化规律

应力最大值小。因此,内壁上圆周方向与最大水平地应力成 90° 夹角的点是套管承载的危险点,工程上也是用该危险点的应力状态判断套管是否达到挤毁(屈服)失效条件^[11],从而为套管抗挤强度设计提供依据。

3 套管抗外挤能力计算模型

油田工程中描述套管挤毁的有2种模式:一是稳定性不够,套管呈现弹性失稳破坏;二是强度不够,套管发生材料屈服破坏。油井套管的径厚比 D/t 一般在 $10 \sim 25$ 之间,Von Mises屈服准则更具有代表性^[12]。现有套管挤毁(屈服)公式是针对均匀外挤载荷而言的,因而在有非均匀外挤载荷和内压作用的情况下,套管挤毁公式不能直接使用。

根据Von Mises屈服准则,套管破坏失效主要是发生不可恢复的变形,即塑性屈服,进行强度校核时,各点的Von Mises等效应力可表示为:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{r\theta}^2]} \leq \sigma_s \quad (9)$$

式中: σ_e ——套管中任意点的等效应力; σ_r ——径向应力; $\tau_{r\theta}$ ——切应力,由于套管径厚比 $\lambda > 10$,套管内的切应力相对较小可以忽略^[9-10]; σ_z ——套管轴向应力,在平面应变情况下,发生屈服时套管轴向应力 $\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)$,一般钢材取 $\mu \approx 0.33$; σ_s ——套管发生塑性变形时的屈服强度。

当等效应力达到屈服强度 σ_s 时,套管即发生破坏失效,则等效应力表示为:

$$\sigma_e = [(1.4489/2)(\sigma_\theta - \sigma_r)^2]^{1/2} \quad (10)$$

在外载荷作用下,危险点在 $\theta = 90^\circ$ 的套管内壁处,其径向应力 $\sigma_r = p_2$,则等效应力最大值表示为:

$$\sigma_{\max} = 0.851k \left\{ \frac{(\lambda - 1) - \beta(\lambda + 1)}{2} + \frac{k}{12(2 - k)} \left[2(\lambda - 1) + (\lambda - 1)^2 \frac{1/\ln \frac{\lambda}{\lambda - 2} - \frac{\lambda}{2} + 1}{\left(\frac{\lambda - 1}{2} - 1/\ln \frac{\lambda}{\lambda - 2}\right)\left(\frac{\lambda}{2} - 1\right)} \right] \right\} p_0 \quad (11)$$

其中:

$$k = 1 - \frac{p_0 - p_1}{p_0 + p_1} \quad (12)$$

$$\beta = p_2/p_0 \quad (13)$$

式中: k ——外载荷的非均匀系数; β ——内压对套管

$$\left\{ \frac{(\lambda - 1) - \beta(\lambda + 1)}{2} + \frac{k}{12(2 - k)} \left[2(\lambda - 1) + (\lambda - 1)^2 \frac{1/\ln \frac{\lambda}{\lambda - 2} - \frac{\lambda}{2} + 1}{\left(\frac{\lambda - 1}{2} - 1/\ln \frac{\lambda}{\lambda - 2}\right)\left(\frac{\lambda}{2} - 1\right)} \right] \right\} p_0 \leq 1.1749\sigma_s \quad (14)$$

对于套管的抗外挤强度,这里用等效均匀载荷强度 p_c 来表示;当 $p_1 = 0, \beta = 0$ 时,即为均匀外挤

外挤强度的影响系数,以下简称内压影响系数,内压越大, β 越大。

将式(11)代入(9),可以得到套管在危险点的等效应力满足屈服条件时,有:

$$\frac{p_c}{p_{c0}} = \frac{1}{1 - \beta \frac{\lambda + 1}{\lambda - 1} + \frac{k}{6(2 - k)} \left[2 + (\lambda - 1) \frac{1/\ln \frac{\lambda}{\lambda - 2} - \frac{\lambda}{2} + 1}{\left(\frac{\lambda - 1}{2} - 1/\ln \frac{\lambda}{\lambda - 2}\right)\left(\frac{\lambda}{2} - 1\right)} \right]} \quad (15)$$

载荷作用下的抗外挤强度,记为 p_{c0} ,则套管抗外挤能力可表示为:

4 实例分析

以 N80 型号(外径 177.8 mm,壁厚 10.36 mm)套管为例进行计算,在不同内压下外载荷非均匀系数 k 对套管承载能力的影响如图 5 所示,可以看出,当内压影响系数不变时,套管的抗外挤能力随着非均匀系数的增加显著降低,且变化率随非均匀系数增加逐渐变缓。另外,内压的存在能增强套管的抗外挤能力,特别是在外载荷非均匀系数较小的情况下,如在非均匀系数 $k = 0$ 时, $\beta = 0.2, 0.4, 0.6$ 时的套管承载能力比没内压($\beta = 0$)时分别提高了约 1.3、1.8、3.0 倍;当在外载荷非均匀系数较大的情况下,内压的增大对套管抗外挤能力增强作用很小。

因此工程实际中,在非均匀系数较小时,增加内压不失为一种保护套管的方法。

图 6 中给出了该套管在内压 $p_2 = 0(\beta = 0)$ 时,在不同外载荷非均匀系数的情况下,径厚比 λ 对套管抗外挤能力的影响。随着径厚比的增加,套管抗外挤能力逐渐减小,计算结果与文献[11]保持一致,从而验证了本文所得解析模型的可靠性。外载荷非均匀系数较小时,套管承载能力随套管的径厚比变化范围大,而在非均匀系数较大时,径厚比对套管承载能力的影响很小。因此工程应用中,在非均匀系数不大的情况下时,抗外挤能力也可通过减小径厚比得到增强。

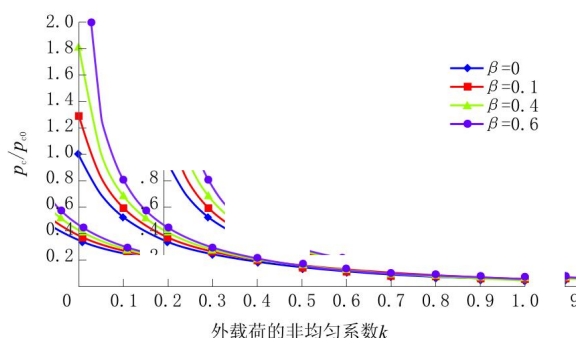


图 5 外载荷非均匀系数对套管抗外挤能力的影响

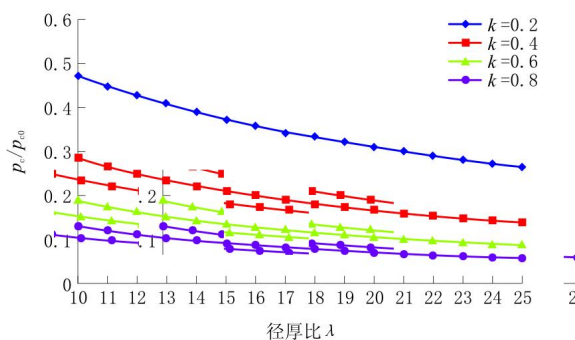


图 6 套管径厚比对套管抗外挤能力的影响

比较图5和图6可知,外载荷的非均匀系数对套管抗外挤能力影响最大,是影响套管抗外挤能力的主要因素,而通过增加内压和减小径厚比来提高套管抗外挤能力只有在外载荷非均匀性较小的条件下才会起到明显作用。

5 结论

(1)建立了非均匀载荷和均匀内压作用下套管的受力模型,以影响石油套管破坏的主要因素为出发点,得到了套管环向应力分布规律,环向应力分布研究表明,内壁上圆周方向与最大水平地应力成 90° 夹角的点是套管承载的危险点,该点的应力状态可判断套管是否达到屈服失效条件。

(2)油井套管的径厚比一般大于10,根据 Von Mises 屈服准则,套管的等效应力最大的位置与承载的危险点(环向应力最大处)保持一致,套管的抗外挤强度可用在非均匀载荷和均匀内压作用下套管达到屈服时的均匀载荷强度来表示。

(3)当内压影响系数不变时,套管的抗外挤能力随着非均匀系数的增加显著降低,且变化率随非均匀系数增加逐渐变缓。在其他条件不变的情况下,增大径厚比会削弱套管的抗外挤能力。

(4)在影响套管的抗挤能力的因素中,外载荷的非均匀系数对套管抗外挤能力影响最大,是影响套管抗外挤能力的主要因素,只在外载荷非均匀性

较小的条件下,增加内压和减小径厚比才能有效提高套管抗外挤能力。

参考文献:

- [1] 申昭熙,马耀荣,解学东,等. 外压作用下套管抗挤强度研究[J]. 石油矿场机械,2007,36(11):5-9.
- [2] 殷有泉,李志明,张广清,等. 蠕变地层套管载荷分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2381-2384.
- [3] 王晓页,王奎升,王凤祥,等. 非均匀地应力下套管变形和整形复位分析[J]. 石油矿场机械,2009,38(5):9-14.
- [4] 张志全,伍家忠,罗跃. 港西油田套管变形原因分析及对策[J]. 江汉石油学院学报,2002,24(4):83-84.
- [5] 郑俊德,张艳秋,王文军,等. 非均匀载荷下套管强度的计算[J]. 石油学报,1998,19(1):119-123.
- [6] 张建华,王悦. 非均匀地应力下套管的抗外挤强度理论解[J]. 内蒙古石油化工,2007(6):123-125.
- [7] 曾德智,林元华,李双贵,等. 非均匀载荷下厚壁套管抗挤强度分析[J]. 天然气工业,2007,27(2):60-62.
- [8] 闫相祯,杨秀娟,冯耀荣,等. 蠕变地层套管外载计算的位移反分析法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):102-106.
- [9] 周雄,何世明,郭元恒,等. 非均匀载荷套管抗外挤能力分析[J]. 机械设计与制造,2014,(10):213-216.
- [10] 蔡正敏,张树佳,陈香凯,等. 非均匀布载荷下石油套管抗挤强度问题研究[J]. 石油矿场机械,2009,38(12):31-34.
- [11] 周雄,何世明,郭元恒,等. 非均匀椭圆载荷下套管抗外挤能力分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):16-19.
- [12] 韩建增,张先普. 非均匀载荷作用下套管抗挤强度初探[J]. 钻采工艺,2001,24(3):48-50.