

油气井套管侧向屈曲分析与井下加强工具探讨

尹 飞, 高德利

(中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要:针对油气井套管挤毁的研究多局限于强度分析, 忽视了套管侧向稳定性问题。除小直径或特厚壁的套管外, 常用套管的失效形式应属于失稳损坏。基于外压作用下套管侧向屈曲机制, 分别采用 API 标准和圆筒屈曲分析的方法, 计算套管侧向屈曲的临界压力。另外, 对减小套管计算长度的井下加强工具进行探讨和设计。结果表明: 套管纵向长度对侧向屈曲的临界压力具有重要影响; 若把套管的计算长度减小到某一范围, 可有效地提高套管的抗失稳能力。结果为提高套管抗失稳能力提供了一种新途径, 可作为完井后高挤毁风险套管的加强补救措施。

关键词:钻井; 井筒完整性; 套管挤毁; 屈曲分析; 井下工具; 结构设计

中图分类号:TE 21 **文献标志码:**A

引用格式:尹飞, 高德利. 油气井套管侧向屈曲分析与井下加强工具探讨 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 67-71.

YIN Fei, GAO Deli. Lateral buckling analysis of oil and gas well casing and design of downhole reinforcement tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 67-71.

Lateral buckling analysis of oil and gas well casing and design of downhole reinforcement tool

YIN Fei, GAO Deli

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The current researches on casing collapse are mainly confined to strength analysis, while the problems caused by lateral buckling are less considered. In fact, the most failures of oil and gas well casing, except casings with small diameter or thick wall, can be attributed to the mode of buckling failure. The mechanisms of casing buckling under external pressure were revealed. The critical pressure of casing lateral buckling was calculated using two methods, including an API standard and a cylinder buckling analysis technique. Subsequently, the downhole casing reinforcing tool was designed. The results indicate that the casing length used in the calculation has a great influence on the critical pressure for lateral buckling of casings, and the anti-instability of casings increases with the decrease of the values of casing length adopted in the calculation. The findings can efficiently increase the anti-instability of casings and provide a new remedial measure for casings with high collapse risks after well completion.

Key words: drilling; well integrity; casing collapse; buckling analysis; downhole tool; structure design

油气井套管往往处于复杂工况下, 如异常高压地层、蠕变地层、环空带压、套管磨损及腐蚀, 套管挤毁问题异常突出^[1-7]。套管挤毁将影响油气井的正常钻进和油气开发, 给油田带来巨大的经济损失和安全隐患。目前针对套管挤毁的研究, 大多采用套管强度分析的方法, 即计算套管应力然后与材料屈服强度比

较^[8-9], 忽视了套管的稳定性分析。赵怀文等^[10]很早就意识到采用强度方法分析套管挤毁问题的错误性, 认为套管外压损坏属于弹塑性结构失稳性质, 计算抗挤压力只能用稳定性分析而非强度分析。有些学者研究了含缺陷的套管外压损坏或进行全尺寸挤毁试验, 也发现在外压作用下套管挤毁属于失稳破坏。梁

尔国等^[11]指出磨损套管的挤毁方式是弹塑性“三铰”失稳,未磨损套管的挤毁方式是“四铰”失稳。赵立志等^[12]认为射孔对稳定性产生极大影响。蔡晓闻等^[13]采用水下应变测试的方法进行套管挤毁试验,发现当外压达到一定值时,套管应变急剧变化,然后迅速压溃;套管最终因结构失稳而失效。申昭熙等^[14]分析全尺寸试验结果,认为套管挤毁的失效形式都是失稳。众多计算和试验结果表明,在外压作用下套管挤毁问题不能局限于强度分析,还应综合考虑套管的稳定性。笔者将重点研究套管的稳定性,计算套管侧向屈曲的临界压力及相应失稳模态。另外,借鉴压力容器加强圈的原理,设计井下加强工具,用于提高某些特殊工况下井筒完整性。

1 外压套管屈曲机制

外压套管损坏的失效方式有两种:一种是因强度不足而引起强度损坏;另一种是因刚度不足而引起失稳损坏^[15]。当径厚比较小时,失效方式属于强度损坏;当径厚比较大时,失效方式属于失稳损坏。分析 API 标准中套管尺寸,大部分套管应属于失稳损坏^[16],套管在未屈服前就突然失去原来形状而压扁或褶皱。

失稳是指结构丧失了保持原有平衡状态的能力。失稳是结构丧失承载能力的一种形式,承受外压的结构稳定性是保证其正常工作的必要条件。

套管是一种特殊的圆筒结构,可以借鉴外压圆筒的研究方法及成果分析外压套管的屈曲机制。外压套管失稳前,筒壁内只有单纯的压缩应力;失稳时,套管突然变形,筒壁内产生弯曲应力。外压套管失稳,实际上是套管应力状态由单纯的压缩应力平衡跃变为主要受弯曲应力的新平衡。

套管失稳时的外部压力称为临界压力。临界压力与套管几何尺寸(直径、壁厚、长度)、材料性能(弹性模量、泊松比)及结构因素(形状偏差)有关。在小于临界压力条件下,套管在卸载后能恢复原来形状;在大于临界压力条件下,套管出现的曲波失稳形状将不可自行恢复。

2 套管侧向屈曲临界压力

2.1 API 标准套管挤毁压力

API 标准根据套管径厚比将套管挤毁压力分为 4 种情况进行计算,即屈服强度挤毁压力、塑性挤毁压力、弹塑性挤毁压力和弹性挤毁压力。根据厚壁筒 Lamé 公式,当内壁环向应力达到材料的屈服强度时,对应的外压即为屈服强度挤毁压力。套管的失稳损

坏有塑性失稳、弹塑性失稳、弹性失稳 3 种形式。塑性挤毁压力是套管塑性失稳损坏时的外压,它是在试验基础上并通过数理回归统计得到的经验公式。弹性挤毁压力对应着弹性失稳损坏,它是根据圆柱壳体弹性稳定理论推导出来的。弹塑性挤毁压力由塑性挤毁压力和弹性挤毁压力的曲线过渡得到^[16-17]。

为了更加清楚地理解套管的不同挤毁方式和挤毁压力,基于 API 标准中套管挤毁压力的计算公式,绘制了套管挤毁压力(钢级为 N80)随着套管径厚比的变化关系曲线,如图 1 所示。

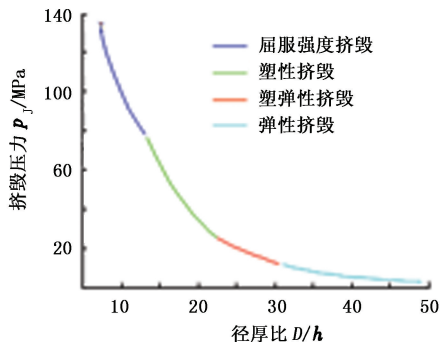


图 1 套管的挤毁压力与径厚比关系

Fig. 1 Relationship between casing collapse pressure and diameter-thickness ratio

由图 1 可知,随着套管径厚比增大,套管挤毁压力急剧降低。 $\Phi 244.5 \text{ mm} \times 13.84 \text{ mm}$ 套管的挤毁压力为 45.628 MPa, $\Phi 244.5 \text{ mm} \times 8.94 \text{ mm}$ 套管的挤毁压力为 16.37 MPa,当径厚比由 17.7 增大到 27.3 时,挤毁压力降低了 64.1%。 $\Phi 339.7 \text{ mm} \times 12.19 \text{ mm}$ 套管的挤毁压力为 15.62 MPa, $\Phi 339.7 \text{ mm} \times 8.38 \text{ mm}$ 套管的挤毁压力为 5.109 MPa,当径厚比由 27.9 增大到 40.5 时,挤毁压力降低了 67.3%。

随着套管径厚比增大,套管的挤毁方式由强度损坏转化为失稳损坏。在 API 标准中,根据径厚比划分了强度损坏与失稳损坏。强度损坏与失稳损坏的临界径厚比:K55 为 14.8;N80 为 13.38;P110 为 12.42。除了小尺寸尾管和特厚壁套管外,常用套管的径厚比一般大于 15,因此大部分套管损坏方式应属于失稳损坏。失稳损坏的临界压力远小于屈服强度损坏的临界压力。

2.2 长度效应的套管临界压力

目前针对套管挤毁问题的研究有很多,但是皆没考虑套管长度对临界压力的影响。其实,套管长度对屈曲临界压力具有重要影响,下文简称为长度效应。

为了研究考虑长度效应的套管临界压力,采用 Mises 公式^[18]计算外压作用套管屈曲临界压力,此公式已经得到广泛应用且准确性通过试验得到验

证^[19]。

根据外压圆筒的 Mises 公式,套管屈曲临界压力为

$$p_{cr} = \frac{E}{\frac{D}{h} \frac{n^2-1}{2} \left[1 + \left(\frac{2nl}{\pi D} \right)^2 \right]^2 + \frac{2E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{D} \right)^3 \left[\frac{2n^2-1-\nu}{1 + \left(\frac{2nl}{\pi D} \right)^2} + n^2 - 1 \right]} \quad (1)$$

式中, p_{cr} 为临界压力,MPa; E 为套管弹性模量,MPa; ν 为套管泊松比; D 为套管外径,mm; h 为套管壁厚,mm; l 为套管长度,mm; n 为屈曲波形数目。

当套管相当长时, l/D 值很大,忽略式(1)中分母包含此比值的平方项,得到长套管的临界压力为

$$p_{cr} = \frac{2Eh^3(n^2-1)}{3(1-\nu^2)D^3} \quad (2)$$

对于长套管,两端刚度对中部起不到有效支撑作用,套管中部容易失稳压扁,横截面变成波形数目为 2 的扁圆形。

将 $n=2$ 代入式(2)中,则有长套管的环向失稳临界压力为

$$p_{cr} = 2Eh^3 / [(1-\nu^2)D^3] \quad (3)$$

由此可见,长套管抗失稳能力与长度无关。各类钢的弹性模量和泊松比相差不大,提高钢级不能显著提高抗失稳能力,所以当井身结构已定时,提高抗失稳能力的唯一有效方法是增加壁厚。油田通常采用厚壁套管来防止套管挤毁。

对于短套管,横截面会变成曲形波,且波形数目大于 2^[20]。波形数目计算式为

$$n = \sqrt[4]{\frac{0.75\pi^2(1-\nu^2)^{0.5}}{(l/D)^2(h/D)}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)中,经过化简,得短套管的环向失稳临界压力为

$$p_{cr} = \frac{2.59Eh^2}{lD\sqrt{D/h}} \quad (5)$$

长套管与短套管的临界压力计算公式不同,判断套管的长、短类型可依据临界长度计算公式

$$l_{cr} = 1.17D\sqrt{D/h} \quad (6)$$

当 $l > l_{cr}$ 时,属于长套管;当 $l < l_{cr}$ 时,属于短套管。

选取几种常用的 API 套管,分析其临界长度,计算结果见表 1。由于现用套管长度为 8~12 m,所以这些套管均属于长套管范畴。根据长套管的环向失稳临界压力计算公式(3),计算临界压力,结果也列入表 1 中。计算的临界压力是 API 抗挤强度的 1.3~1.6 倍,这是因为:在理论计算中假设套管是理想圆筒;在 API 标准中设定了安全系数。若把计算临

界压力除以安全系数(1.3~1.6),则利用临界压力计算公式可得到较准确的结果。

表 1 套管的临界压力

Table 1 Critical pressures of casings

套管 编号	外径 D / mm	壁厚 h / mm	径厚比 D / h	临界长度 l_{cr} / m	临界压力 p_{cr} / MPa	API 外挤 强度/ MPa
1 [#]	177.8	8.05	22.09	0.98	42.84	26.4
2 [#]	244.5	8.94	27.35	1.50	22.56	17.0
3 [#]	339.7	8.38	40.54	2.53	6.93	5.1

分析临界压力公式(5),发现增加套管壁厚和减小套管长度可提高套管的临界压力。假设套管长度是一个变量,经计算,套管临界压力随套管计算长度变化关系如图 2 所示。

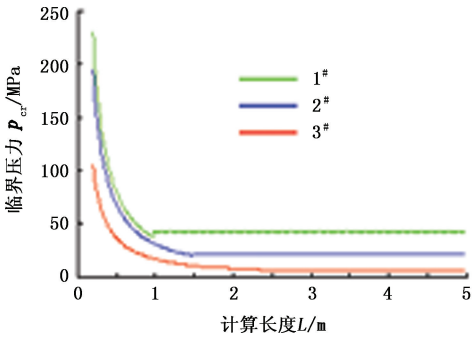


图 2 套管临界压力与计算长度关系

Fig. 2 Relationship between casing critical pressure and casing calculated length

由图 2 可知,当计算长度大于临界长度时,计算长度对临界压力几乎没有影响;当计算长度小于临界长度时,随着计算长度的减小,临界压力急剧增大。由此可见,若设法减小套管计算长度到一定范围内,可以有效地提高套管抗失稳能力。

3 井下套管加强工具

综上所述,提高套管抗失稳能力的方法包括降低套管径厚比和减小计算长度。套管的外径由井身结构设计决定。若套管已经下入井中服役,壁厚也不可能改变。减小套管计算长度是唯一的抵抗套管挤毁的加强补救措施。减小套管计算长度并不是真实地缩短套管,而是在套管内部或外部设置刚性加强圈,从而减小计算长度以提高抗失稳能力。

加强圈的设计主要包括加强圈间距和加强圈截面设计。由图 2 可知,若对于长套管设置加强圈后计算长度仍为长套管,不能提高临界压力,因此设置加强圈至少要使套管计算长度小于临界长度而变成短套管。对于短套管,设置加强圈会使计算长度减小,则提高临界压力。

设计的加强圈间距应该小于临界长度,经分析,格套管临界压力增强情况见表 2。由此可见,加强圈对增加临界压力效果较好。

表 2 套管加强圈效果分析

Table 2 Effect analysis of casing reinforcing ring

套管 编号	外径 <i>D</i> /mm	壁厚 <i>h</i> /mm	临界长度 <i>l_{cr}</i> /m	临界压力 <i>p_{cr}</i> / MPa	加强圈间距 0.5 m		加强圈间距 1.0 m	
					临界压力 <i>p_{cr}</i> /MPa	增强百分 比/%	临界压力 <i>p_{cr}</i> /MPa	增强百分 比/%
1 [#]	177.8	8.05	0.98	42.84	80.05	86.86	42.84	0.00
2 [#]	244.5	8.94	1.50	22.56	67.88	200.89	30.84	36.70
3 [#]	339.7	8.38	2.53	6.93	36.78	430.74	16.94	144.44

加强圈截面设计要求为加强圈的惯性矩要保证加强圈不致在套管失稳前失稳。选取加强圈为矩形截面,加强圈设置示意图如图 3 所示。

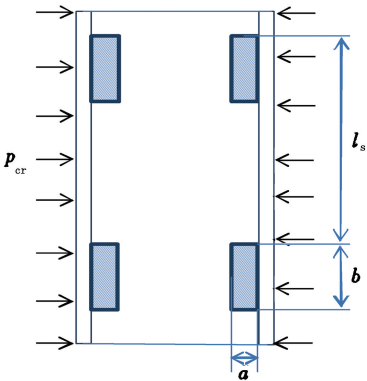


图 3 套管加强圈设置示意图

Fig.3 Sketch map of casing reinforcing ring

每个加强圈承受的载荷为

$$p'_{cr}=p_{cr}l_s.$$
 (7)

式中, p'_{cr} 为加强圈承受外压,MPa; l_s 为加强圈间距,m。

按圆环失稳公式计算所需惯性矩^[21]为

$$I=\frac{p'_{cr}D^3}{24E}.$$
 (8)

矩形截面的惯性矩为

$$I=ba^3/12.$$
 (9)

式中, I 为加强圈惯性矩,m⁴; b 为加强圈宽度,m; a 为加强圈高度,m。

设套管弹性模量为 2.1×10⁵ MPa,加强圈间距 $l_s=0.5$ m,则所需惯性矩及截面设计见表 3。

若能把加强圈下入井中并设置在套管内部,则套管的抗失稳能力会得到提高。由于常规加强圈是一个整体,直径大,难于下入井中。对其进行改进,设计套管加强圈工具,下入过程中工具合拢便于下入,下入后工具张开起到加强圈的作用。井下套管加强工具的三维效果如图 4 所示。

表 3 加强圈截面设计

Table 3 Section design of reinforcing ring

套管	外径 <i>D</i> /mm	壁厚 <i>h</i> /mm	临界压力 <i>p_{cr}</i> /MPa	惯性矩/ 10 ⁻⁸ m ⁴	截面 1		截面 2	
					宽度/m	高度/m	宽度/m	高度/m
1 [#]	177.8	8.05	80.05	4.46	0.16	0.015	0.067	0.02
2 [#]	244.5	8.94	67.88	9.84	0.35	0.015	0.15	0.02
3 [#]	339.7	8.38	36.78	14.30	0.51	0.015	0.215	0.02

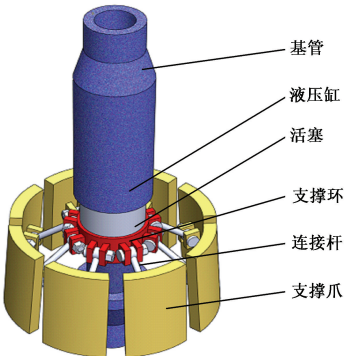


图 4 井下套管加强工具结构

Fig.4 Structure of downhole casing reinforcing tool

井下套管加强工具由支撑爪、连接杆、支撑环、

基管、液压缸、活塞等部分组成。下入时,工具合拢。下入后,从油管施加液压,经液压缸和活塞推动支撑环和连接杆,支撑爪张开后内切于套管形成加强圈。这样,套管一部分外挤压力可以由工具承载,从而提高了套管的抗外挤能力。

4 结 论

- (1) 除小直径或特厚壁套管外,常用套管的外挤失效方式属于失稳损坏,应采用屈曲分析方法。
- (2) 降低套管计算长度是提高套管抗挤毁能力的一种有效方法。
- (3) 设计的井下套管加强工具,为已固井的高

挤毁风险套管提供一种加强补救措施。

参考文献:

- [1] 廖忠会,王希勇. 超高压气井井身结构设计技术[J]. 天然气工业, 2008,28(10):64-66.
LIAO Zhonghui, WANG Xiyong. Casing program design for ultrahigh pressure gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(10):64-66.
- [2] 林元华,曾德智,施太和,等. 软岩层引起的套管外载计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,26(3):539-543.
LIN Yuanhua, ZENG Dezhi, SHI Taihe, et al. Study on computation method for casing load induced by soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(3):539-543.
- [3] 高宝奎,高德利. 高温高压井测试对套管安全的特殊影响[J]. 天然气工业, 2002,22(4):40-42.
GAO Baokui, GAO Deli. Special influence on the testing in high temperature and high pressure well soncasing safety[J]. Natural Gas Industry, 2002,22(4):40-42.
- [4] XU Zhiqian, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan. Casing life prediction using borda and support vector machine methods[J]. Petroleum Science, 2010,7:416-421.
- [5] YIN Fei, GAO Deli. Mechanical analyses of casings in boreholes, under Non-uniform remote crustal stress fields: analytical & numerical methods [J]. CMES, 2012,89(1):25-37.
- [6] SUN Lianzhong, GAO Deli, ZHU Kuanliang. Models & tests of casing wear in drilling for oil & gas[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012,4:44-47.
- [7] GAO Deli, ZHAO Zengxin. Experimental study on mechanical properties degradation of TP110TS tube steel in high H₂S corrosive environment [J]. CMC, 2011,26(2):157-165.
- [8] 杨秀娟,闫相祯,王金龙,等. 疏松砂岩地层套管可靠性分析[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2005,29(6):87-93.
YANG Xiujuan, YAN Xiangzhen, WANG Jinlong, et al. Analysis of casing reliability in looses and stone reservoir [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(6):87-93.
- [9] 路利军,冯少波,张波. 稠油热采井套管柱强度设计方法研究[J]. 石油天然气学报, 2009,31(2):364-366.
LU Lijun, FENG Shaobo, ZHANG Bo. Method for designing casing stem strength in heavy oil steam injection wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009,31(2):364-366.
- [10] 赵怀文,高学仕. 油井套管水力挤压损坏性质[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1991,15(5):39-45.
ZHAO Huaiwen, GAO Xueshi. Study on hydraulic compressive collapse of well casings [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1991,15(5):39-45.
- [11] 梁尔国,李子丰,赵金海. 磨损套管抗挤强度计算模型[J]. 石油钻探技术, 2012,40(2):41-45.
LIANG Erguo, LI Zifeng, ZHAO Jinhai. Model of collapsing strength calculation of worn casing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(2):41-45.
- [12] 赵立志,陶亮,李作平. 射孔后套管的稳定性理论与数值分析[J]. 石油机械, 2007,35(10):12-15.
ZHAO Lizhi, TAO Liang, LI Zuoping. Stability theory and numerical analysis of perforating casing[J]. China Petroleum Machinery, 2007,35(10):12-15.
- [13] 蔡晓闻,高连新,常龙. 套管挤毁试验水下应变测试方法的研究[J]. 钢管, 2009,38(4):66-69.
CAI Xiaowen, GAO Lianxin, CHANG Long. Study on underwater strain-measurement method as used in casing collapse test[J]. Steel Pipe, 2009,38(4):66-69.
- [14] 申昭熙. 套管外压挤毁强度分析与计算[J]. 应用力学学报, 2011,28(5):547-550.
SHEN Zhaoxi. The analysis and calculation of collapse strength of casing[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011,28(5):547-550.
- [15] 李金科,张贤福,刘韞砚. 外压圆筒的计算及数值计算稳定性分析[J]. 压力容器, 2011,28(7):35-39.
LI Jinke, ZHANG Xianfu, LIU Yunyan. Calculation of cylindrical shells under external pressure and numerical computation of stability analysis [J]. CPVT, 2011,28(7):35-39.
- [16] 李志明,殷有泉. 油水井套管外挤力计算及其力学基础[M]. 北京:石油工业出版社, 2006.
- [17] CLINEDINST W O. Bulletin on formulas and calculations for casing, tubing, drill pipe, and line pipe properties APIBULLETIN 5C3-1994 [S]. Washington: American Petroleum Institute, 1994.
- [18] 铁摩辛柯 S P, 盖莱 J M. 弹性稳定理论[M]. 北京:科学出版社, 1965.
- [19] 张吴星. 外压薄壁短圆筒临界失稳压力理论及试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2001,23(2):81-83.
ZHANG Wuxing. The theoretical and experimental research on critical pressure buckling of short thin cylinder under external pressure[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2001,23(2):81-83.
- [20] 谢全利. 压力容器稳定性分析[J]. 化工设备与管道, 2009,46(2):9-11.
XIE Quanli. Stability analysis for pressure vessel [J]. Process Equipment & Piping, 2009,46(2):9-11.
- [21] 丁伯民,曹文辉. 承压容器[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.

(编辑 李志芬)