

◀教授专家专栏▶

水泥环性质对套管抗挤强度影响的有限元分析

徐守余¹ 李茂华¹ 牛卫东²

(1. 中国石油大学(华东) 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061, 2. 胜利石油管理局渤海钻井总公司, 山东 东营 257200)

摘要:套管常在油层和泥岩部位严重损坏, 分析认为这是生产过程中地应力发生了变化, 导致油层孔隙压力或泥岩力学性质改变, 造成地应力重新分布的结果。因此, 水泥环的质量对套管的影响较大。建立了二维平面轴对称和平面应变有限元模型, 利用 Ansys 有限元软件分析了套管在水泥环影响下的变形特征。分析表明, 最大应力在套管内壁产生, 均匀载荷下套管抗挤强度是非均匀载荷的 5~7 倍, 而且载荷椭圆度越大, 套管内壁应力越大。增大水泥环弹性模量可以有效减小套管最大应力, 因此, 均匀载荷下应适当提高水泥环弹性模量, 以达到提高套管抗挤强度的目的。

关键词:套管损坏; 水泥环性质; 弹性模量; 载荷; 抗压强度; 有限元法

中图分类号:TE26 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2007)03-0005-04

油田生产实践表明^[1], 套管在地层中承受外挤载荷变化较大, 在非均匀外挤载荷作用下, 套管的强度特性与均匀外挤载荷作用下有巨大差别^[1-2]。研究表明^[3], 固井后, 套管外水泥环可以使套管抗挤强度提高 23%。因此, 必须要有良好的水泥环来承受一部分外挤力, 降低套管承受的压力, 才会较好地延长套管的使用寿命。笔者根据套管的实际受力利用有限元法建立了平面力学分析模型, 分析了水泥环对套管的影响, 以期得出全面的认识。

1 数值计算模型

1.1 数学模型

计算模型应该较真实地反映均匀与非均匀地应力作用下水泥环对套管的影响, 应用平面应变理论^[4], 通过建立套管-水泥环组合系统的力学模型, 利用 Ansys 有限元软件分析水泥环对套管的影响。根据弹性力学理论^[5], 套管-水泥环在地层中受到的非均匀外挤载荷可以转化为平面应变问题, 如图 1 所示。图中, p_i 为套管内压, MPa; p_e 为套管外压, MPa; p_2 为套管水泥环接触压力, MPa; r_i 为套管内径, m; r_c 为套管外径, m; r_o 为水泥环外径, m。

为分析套管-水泥环的力学模型, 对水泥环-套管系统作如下假设: 1) 水泥环封固连续, 厚度沿环向和长度分布均匀并稳定; 2) 水泥环固结强度沿井身均匀; 3) 套管材料为各向同性的均匀弹性体, 忽略沿长度方向厚度的不均匀度。

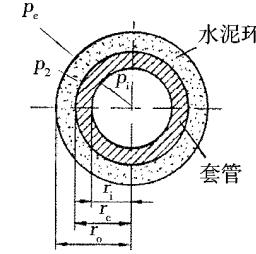


图 1 带水泥环的套管模型

由于套管受水泥环的影响, 地应力通过水泥环内壁传到套管外壁上, 并在套管外壁形成挤压载荷, 水泥环与套管的接触压力应与套管外壁和水泥环内壁应力 σ_r 相等, 即 $\sigma_r = p_2, r = r_c$ 。

利用有限元法对套管-水泥环组合划分网格, 如图 2(a) 所示。套管-水泥环系统属于平面对称问题, 因此可采用半平面分析套管-水泥环系统。平面应力-应变关系为:

$$\sigma = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \mathbf{q}^e \quad (1)$$

式中, \mathbf{D} 为弹性矩阵; \mathbf{B} 为应变矩阵; \mathbf{q}^e 为单元节点位移列阵 $\mathbf{q}^e = \{q_1, q_2, \dots, q_6\}^{eT}, \text{m}$ 。

收稿日期: 2006-12-21; 改回日期: 2007-01-17

基金项目: 中国石油天然气集团公司创新基金项目“渤海湾盆地油田地质灾害分布规律及控制因素研究”(编号: 04E7041) 部分内容

作者简介: 徐守余(1968—), 江苏东台人, 1991 年毕业于石油大学(华东)勘查地球物理专业, 2004 年获中国地质大学理学博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事油气地质环境与灾害、油藏描述与表征方面的教学与科研工作。

联系电话: (0546) 8391714

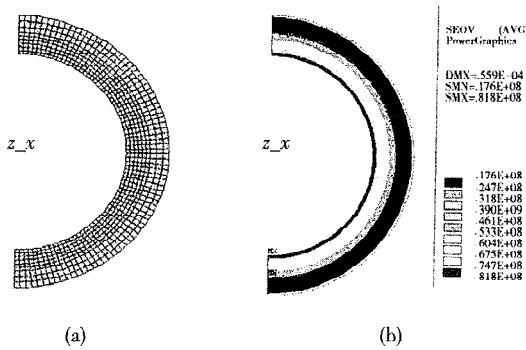


图 2 套管水泥环组合体平面轴对称模型在均匀载荷下的变形

根据虚位移原理,在外力作用下套管单元在节点处发生的虚位移为 $\delta^e \cdot q^e$, 相应得虚应变为 $\delta^e \cdot \epsilon^e$, 考虑虚位移的任意性, 可两边同时消去 $\delta^e \cdot q^e$, 得:

$$F^e = k^e \cdot q^e \quad (2)$$

式中, $k^e = B^T \cdot D \cdot B dA$ 为单元刚度矩阵; F^e 为单元节点上的作用力, $F^e = \{F_x, F_y, F_z\}^{eT}$, N; d 为厚度, m; A 为单元面积, m^2 。

单元分析时得到单元特性方程式(2), 由此可得到所有节点的有限元方程为:

$$k \cdot q = R \quad (3)$$

式中, $k = \sum_{e=1}^{n_e} k^e$ (n_e 为单元总数), 为总刚矩阵; R 为节点载荷列阵, $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}^T$, MPa; q 为所有节点位移分量组成的列阵 $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}^T$, 称为节点位移列阵。

1.2 有限元模型

根据胜利油田胜坨油区的套管井资料, 选取 P110 套管作为模型进行分析。具体参数见表 1。有限元模型采用二维实体, 对模型采用映射网格划分单元。单元类型选择 8 节点 Plane183 实体单元。套管-水泥环系统可看作平面应变轴对称模型。对模型内外两侧施加压力, 套管内压力和水泥环外壁地层应力由胜利油田套管损坏井在地层深度 1 600 m 测得, 其中 $p_i = 15 \sim 25$ MPa, $p_e = 20 \sim 45$ MPa, 取水泥环厚度 $t_c = 0.01$ m。

表 1 计算模型的材料参数

材料	外径/mm	壁厚/mm	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
套管	139.7	12.395	771.2	2.1×10^5	0.26
水泥环	159.7	10~60		$(1\sim60) \times 10^3$	0.21

套管-水泥环接触分析是非线性问题, 对模型两端 x 轴方向约束, 图 2(b) 为 Von Mises 应力当量图 (图中虚线为套管变形前)。图中 DMX 为最大变形

位移, m; SMX、SMN 分别为最大和最小应力, Pa。

2 均匀载荷下水泥环对套管的影响

均匀地应力条件下, 水泥环与套管固结良好, 地应力通过水泥环传递到套管外壁形成应力, 挤压套管造成套管缩径。且在该条件下, 套管-水泥环最大应力在套管内壁均匀分布, 这是造成套管损坏的主要原因, 由模型计算结果可以得到水泥环弹性模量对套管的影响规律, 如图 3 所示。

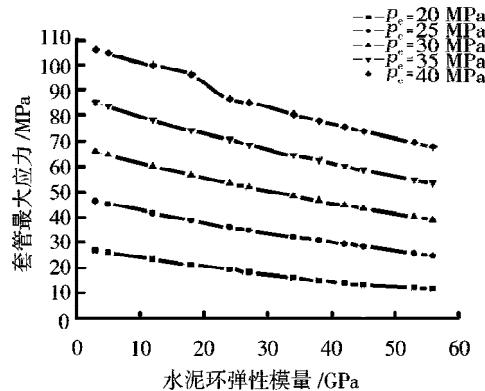


图 3 水泥环对套管应力的影响

为了直接观察水泥环对套管应力的影响规律, 取套管内压 $p_i = 15$ MPa, 水泥环外压 $p_e = 20 \sim 40$ MPa, 由模型计算可看出, 沿套管径向, 套管应力随半径 r 的增加而减小。由图 3 可知, 套管-水泥环在均匀外载作用下, 套管内壁最大应力随水泥环弹性模量增大而减小, 套管外壁最大应力随水泥环外载的增大而增大, 但总体趋势是套管应力随水泥环弹性模量的增大而减小的。这是因为, 在套管水泥环固结良好的条件下, 水泥环可以分担一部分地应力产生的挤压载荷, 因而套管-水泥环接触面上的应力小于地应力直接作用在套管外壁上的应力, 可以减小套管内壁的最大应力, 起到保护套管的作用。因此, 在固井时要提高固井质量, 采用增大水泥环弹性模量的方法保护套管。

取水泥环弹性模量 $E_c = 34$ GPa, $t_c = 0.01$ m, 可以得到套管内压对套管最大应力的影响规律数据 (见表 2)。在不同内压条件下, 当 $p_i = p_e$ 时, 套管内应力达到最小, 此时对套管最有利; 当 $p_i > p_e$ 时, 套管最大应力随 p_i 的增大而增大; 当 $p_e = 0$ 时, 套管的内应力达到最大, 内压 $p_i = 25$ MPa 时在套管内壁产生的应力大于 $p_i = 15 \sim 22$ MPa 时的应力; 当 $p_i < p_e$ 时, 套管应力随水泥环外载的增大而增大, 最大应力随套管内压的增大而减小, $p_i = 25$ MPa 时的套管内壁最大应力小于 $p_i = 15 \sim 22$ MPa 时的应

力。

由此可知,应保证水泥环固结良好,并尽量保持套管的内压与系统外压相等,在深部地层或盐岩蠕变地层地应力较大时,提高套管内压以达到保护套管的作用。

表 2 水泥环不同内压和外载对套管最大应力的影响

p_i /MPa	套管最大应力/MPa				
	15 ^①	18 ^①	20 ^①	22 ^①	25 ^①
0	47.700	57.200	63.500	69.900	79.400
6	28.500	38.060	44.460	50.700	60.200
12	9.310	18.800	25.200	31.500	41.100
15	0.375	9.250	15.600	22.060	31.500
18	9.870	0.435	6.020	12.400	21.900
20	16.300	6.730	0.496	5.980	15.500
22	22.600	13.100	6.760	0.586	9.120
25	32.200	22.700	16.400	10.600	0.623
28	41.800	32.300	25.900	19.600	16.400
32	54.600	45.100	38.700	32.400	22.800
45	104.300	94.800	88.500	82.200	72.700

注:①为套管内压 p_i 。

3 非均匀载荷下水泥环对套管的影响

钻井实践和室内力学试验均证实,绝大多数情况下原场地应力都是非均匀的。研究表明^[6],非均匀地应力对套管受力变形有重要影响。因此,研究非均匀地应力条件下套管的受力特点更具有现实意义和应用价值。

对于非均匀地应力条件下套管应力的求解问题,不少学者进行了研究,并推导出了相应的计算公式^[7-8]。尽管理论上可解,但需要编制专门的程序,求解略显繁琐。笔者采用有限元方法,建立了相应的有限元模型^[9],来研究在不同条件下水泥环性质对套管应力的影响规律。

采用套管-水泥环1/4平面为研究对象,对组合 y 轴采用 x 方向的约束, x 轴采用 y 方向的约束。非均匀载荷分布在水泥环外表面,对套管内壁施加均匀载荷。水泥环外载符合椭圆分布, x 轴为椭圆载荷短半轴,载荷椭圆度短半轴压力 $a=30$ MPa, y 轴为椭圆载荷长半轴,载荷椭圆度长半轴压力 b 分别取30、33、36、39、42、45 MPa。令载荷椭圆度(简称椭圆度) $t=\frac{b}{a}$, t 分别取1.0,1.1,...,1.5;当 $t=1.0$ 时,载荷均匀分布; $t>1.0$ 时,载荷非均匀分布。由计算结果可知,最大应力在椭圆短轴套管内壁产

生,在载荷长轴系统变形最大。表3为不同 t 值下,水泥环弹性模量对套管应力的影响。

由表3可知,非均匀载荷产生的应力约为均匀载荷下应力的5~7倍。随着 E_c 的增加,非均匀载荷对套管的影响程度降低。当 $E_c=58$ GPa时, $t=1.5$ 所对应套管的最大应力约为 $t=1.0$ 的5倍;而 $E_c=3$ GPa时, $t=1.5$ 对应套管的应力约是 $t=1.0$ 的7倍。由此可以看出,在非均匀载荷作用下,水泥环能有效减小套管的最大应力,提高套管的抗挤强度。

表3 不同 t 值下水泥环对套管应力的影响

t	套管最大应力/MPa		
	3 ^①	28 ^①	58 ^①
1.0	70.0	64.4	58.6
1.1	152.0	126.0	110.0
1.2	243.0	186.0	160.0
1.3	316.0	246.0	210.0
1.4	398.0	306.0	260.0
1.5	480.0	366.0	310.0

注:①为水泥环弹性模量 E_c 。

套管-水泥环在非均匀载荷下最大应力变化规律,模型参数见表1,套管内压 $p_i=20$ MPa, $a=30$ MPa,在不同 t 值下套管的最大应力随水泥环弹性模量 E_c 的变化规律如图4所示。

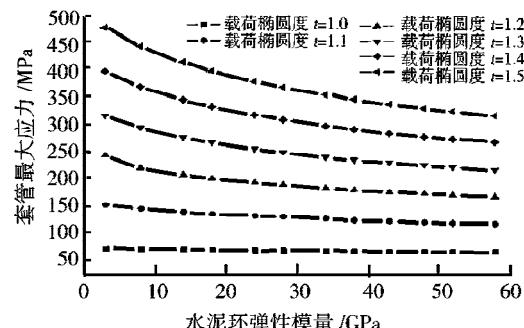


图4 非均匀载荷下水泥环弹性模量对套管的影响

载荷分布均匀即 $t=1.0$ 时,套管最大应力随 E_c 的增加减小程度不明显。随着 t 的增加,套管受到的非均匀载荷增加,增大 E_c 对减小套管内壁最大应力效果明显。 $t=1.5$ 时增大 E_c 对减小套管应力、保护套管的效果较好。生产中 E_c 达不到60 GPa,从图4可以看出, E_c 在15~20 GPa范围内对提高套管抗挤强度较为明显。当 $E_c>20$ GPa时,曲线趋于平缓。油田生产中,建议在工程上 E_c 在15~20 GPa范围内取值,可以较好地减小套管的最大应力。

4 结 论

1) 系统最大应力在套管内壁上产生,均匀载荷下套管的变形远小于非均匀载荷下套管的变形,套管抗挤强度约为非均匀载荷下的5~7倍,因而选取适当的水泥环弹性模量,不仅可以降低成本,还能减小套管应力。

2) 非均匀载荷下,载荷椭圆度越大,套管的应力越大,套管越易损坏,增大水泥环弹性模量能够降低套管的应力,提高套管抗挤强度。根据地应力情况保持水泥环的弹性模量在15~20 GPa范围内,可以有效提高套管抗挤强度的能力。

3) 套管内压对套管应力影响较大,应在生产中尽量保持套管内压和外载相近,以有效减小套管应力,提高套管抗挤强度。

参 考 文 献

[1] Pattilo P D, Last N C, Asbill W T. Effect of non-uniform

loading on conventional casing collapse resistance [R]. SPE79871, 2003.

- [2] 王桂华,盖永革,程远方. 非均匀外挤力作用下套管强度特征分析[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 58~60.
- [3] 宋明, 杨凤香, 宋胜利. 水泥环对套管承载能力的影响规律[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(4): 7~9.
- [4] 郝俊芳, 龚伟安. 套管强度设计与计算[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.
- [5] 程昌钧, 朱媛媛. 弹性力学[M]. 上海: 上海大学出版社, 2005.
- [6] 李军, 陈勉, 张辉, 等. 水泥环弹性模量对套管外挤载荷的影响分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(6): 41~44.
- [7] 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.
- [8] 房军, 赵怀文, 岳伯谦, 等. 非均匀地应力作用下套管与水泥环的受力分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(6): 52~57.
- [9] 李军, 陈勉, 张广清, 等. 易坍塌地层椭圆形井眼内套管应力的有限元分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 45~48.

[审稿 韩志勇]

Finite Element Analysis of Effect of Cement Sheath Property on Casing Collapsing Strength

Xu Shouyu¹ Li Maohua¹ Niu Weidong²

(1. College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Bohai Drilling Com., Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257200)

Abstract: Casings are always damaged heavily in sandstone and mudstone formations. The analysis indicates that the change of the formation stress during production caused the change of the formation pore pressure or the mechanical properties of mud and caused the redistribution of the formation stress. The quality of the cement sheath has very important impacts on casings. Thereafter, a 2D plane axisymmetry and strain finite element model was created. The characteristics of casing deformation under the impact of cement sheath were analyzed using the Ansys finite element software. The analysis indicates that the maximum stress is located in the inner casing; the Casing Collapsing Strength of casing under uniform load is 5~7 times higher than that in non-uniform load; and the higher the load ellipticity, the larger the inner casing stress is. Increasing the cement sheath elasticity modulus can effectively reduce the casing maximum stress; therefore, appropriately increasing the cement sheath elasticity modulus under uniform load can increase the casing collapsing strength.

Key words: casing failure; cement sheath property; modulus of elasticity; load; compressive strength; finite element method

关于在中国科学引文数据库来源期刊中引用

本刊文章将获赠次年全年杂志的启事

论文被引用是质量高且具有理论或应用价值的体现。《石油钻探技术》自创刊以来,一直重视文章的质量,积极鼓励作者引用中文文献和自己发表过的论文,鼓励引用发表在本刊的论文。为此,《石油钻探技术》编辑部郑重许诺:“凡在中国科学技术论文统计源期刊和中国科学引文数据库来源期刊上发表的文章中,引用了本刊刊发的文章3篇以上者,凭当期期刊封面、目次页和文章的复印件(也可通过电话或E-mail告知编辑部期刊的年、期,编辑部据此进行查找),可获赠第二年全年刊物一份,或者优先在本刊发表论文。”