

文章编号: 1673-5005(2007)01-0056-07

# 蠕变地层中含缺陷套管外挤压力分布的数值模拟

高德利, 郑传奎, 覃成锦

(中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**将蠕变地层视为粘弹性体,分别采用 Maxwell粘弹性模型和线性强化弹塑性模型,建立了含缺陷套管—水泥环—蠕变地层有限元计算模型,旨在应用数值方法模拟在地质和工程因素及其联合作用下含缺陷套管外壁所受蠕变动压力的分布规律,并对这类套管抗非均匀载荷的能力进行了有限元分析。采用逐步超松弛(SOR)迭代法进行了计算,为加快收敛速度,计算程序支持最佳松弛因子的自动快速搜索。算例分析表明,非均匀地应力条件下,最大地应力方向上套管外挤蠕动压力最小,而最小地应力方向上套管外挤蠕动压力最大;磨损缺陷改变了均匀载荷下套管外挤蠕动压力的分布规律,磨损处蠕动压力明显增大;与非均匀载荷相比,磨损是影响套管外挤蠕动压力分布更为敏感的因素。该数值结果可为复杂条件下含缺陷套管强度设计提供理论指导。

**关键词:**蠕变地层;粘弹性模型;含缺陷套管;外挤压力;数值模拟

**中图分类号:** TE 21 **文献标识码:** A

## Numerical simulation of external pressure distribution of casing string with wear in creep formation

GAO De-li, ZHENG Chuan-kui, TAN Cheng-jin

(Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract** The creep formation was supposed to be viscoelastic materials. Both Maxwell viscoelasticity model and linear hardening elastic-plasticity model were used in this work, respectively. Thus, the analytical model of the assembled body including casing string with wear, cement sheath and creep formation was built based on finite element method (FEM). In order to illustrate the force distribution outside casings with wear, the numerical treatments of geologic, engineering-oriented factors and their combination were studied. And then the casings' resistant capacity to non-uniform loads was also evaluated. The computation program developed such a function as searching for the optimal iterative factor automatically to accelerate its convergence. Furthermore, the successive over relaxation method (SOR) was adopted to solve large-scale FEM equations. Some conclusions were conducted. The maximum external pressure is in the same direction with the minimum geostress and the opposite is also right. The pressure distribution outside casings is greatly changed by wear. The external pressure of the wear zone is obviously raised. So compared with the non-uniform geostress, the external pressure distribution is more sensitive to the wear in casing. These numerical results of the force distribution can be used to guide casing design.

**Key words:** creep formation; viscoelasticity model; casing string with wear; external pressure; numerical simulation

具有蠕变特性的地层在国内外均有广泛分布<sup>[1-4]</sup>。在国内,中原、江汉、塔里木等油田都在不同层位、不同厚度范围内广泛分布盐层、膏层及盐膏层等。在国外,如哈萨克斯坦滨里海盆地,其下二叠统孔谷组的盐膏层十分发育,形成了广泛分布的盐丘

构造,该地区盐下油气目标层埋深一般超过 5 000 m,盐膏层厚度达 2 000 ~ 5 000 m,预测在该地区盐下具有很好的油气勘探开发前景。因此,盐膏层钻井数量大大增加。然而,由于复杂地应力或套管本身缺陷等因素的影响,固井后套管外挤蠕动压力分

收稿日期: 2006-12-18

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(IRTO411)及国家自然科学基金重点项目(50234030)

作者简介: 高德利(1958-),男(汉族),山东禹城人,教授,博士,博士生导师,长江学者,主要从事油气井力学与控制工程研究。

布趋于复杂化<sup>[5-6]</sup>,常导致套管柱发生强度破坏(挤毁),造成重大经济损失甚至人员伤亡。近年来,有关蠕变地层钻井问题的研究比较活跃,如曾义金等<sup>[3]</sup>建立了地层蠕变压力分析模型,研究了盐层埋藏深度、盐岩蠕变特性对套管应力分布的影响;房军等<sup>[4]</sup>通过数值计算讨论了水泥环参数、不同接触条件等因素对套管及水泥环外载平均水平的影响;闫相祯等<sup>[7]</sup>应用逆解法得到了非均匀外载下套管的应力和位移计算式。但以往的有关研究都假定套管横截面是理想圆形,没有考虑套管缺陷(如磨损深度、磨损半径等)对套管外挤蠕动压力分布的影响。笔者基于该点对套管外挤蠕动压力的分布进行详细研究。同时,为了阐明套管刚度对套管外挤蠕动压力分布的影响,以类“8”字型横截面套管为算例,对具有复杂几何形状横截面的套管外挤蠕动压力的分布规律进行分析。

### 1 组合体有限元模型

图 1 是基于离散点建立的含缺陷套管—水泥环—蠕动地层平面应变有限元模型。依中亚项目部施工的哈国 SLK3 井套管设计情况,对井深 5 080 m 处套管外载分布规律进行模拟。模拟分析中采用钢级 P-110 套管,外径  $D = 244.5 \text{ mm}$ ,壁厚  $h_t = 11.99 \text{ mm}$ ,弹性模量  $E_s = 206 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu_s = 0.3$ ;水泥环厚度为  $100 \text{ mm}$ ;盐膏层尺寸取为  $AB = BC = 1\ 000 \text{ mm}$ ,弹性模量  $E_r = 4 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu_r = 0.38$ ,最大地应力按上覆岩层压力梯度  $0.023 \text{ MPa/m}$  计算,钻井液密度为  $1.81 \text{ g/cm}^3$ 。

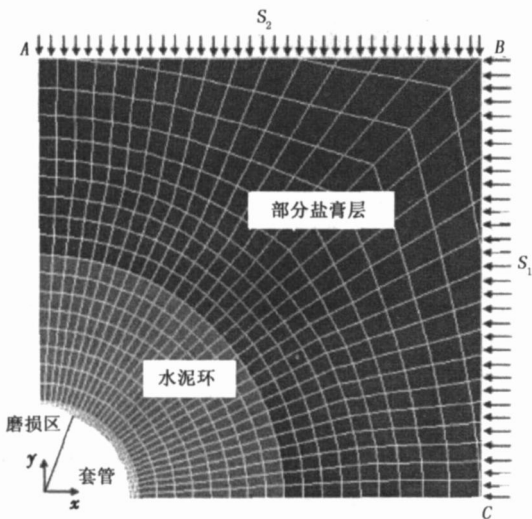


图 1 组合体有限元模型  
 设套管内壁径向上含对称月牙形磨损<sup>[8]</sup>,根据

对称性,位移边界约束为:在  $y = 0$  边界上所有结点  $y$  方向位移为零,相应点  $x$  方向自由度不受约束;在  $x = 0$  边界上所有结点  $x$  方向位移为零,相应  $y$  方向自由度不受约束。力的边界约束为:分别在  $AB$  和  $BC$  边界点上施加单向均匀水平地应力,  $S_1, S_2$  分别为  $0$  和  $90^\circ$  方向的水平主地应力(假设  $S_1 > S_2$ )。最大磨损深度为  $W_{\max}$ 。

### 2 套管弹塑性本构关系

#### 2.1 增量弹塑性本构矩阵

本文中采用增量理论描述套管材料处于弹塑性状态时的应力与应变的关系。由于这一理论在实际应用中需要按照加载过程进行积分,虽然计算较为复杂,但应用计算机编程可以解决该困难,与形变理论(只适用于简单加载且弹塑性小变形)相比,其适用性更加广泛。

增量理论中,材料屈服后,应变增量  $dI_p$  是弹性增量  $dI_e$  和塑性增量  $dI_p$  两部分之和。其中,弹性应变增量和应力增量之间的关系仍然符合虎克定律;而塑性变形并不是惟一确定的,对于同一个应力状态可以存在不同的塑性应变增量。如果采用相关联的流动法则,即使塑性变形不能确定,但是其与屈服面相正交,数学表达式<sup>[9]</sup>为

$$dI_p = \left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right] \cdot dI_e \quad (1)$$

由此,应变增量表示为

$$dI = [D]^{-1} dI_e + \left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right] \cdot dI_e \quad (2)$$

由全微分法则可知

$$dF = \left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right]^T dI + \frac{\partial F}{\partial H} dH = 0 \quad (3)$$

式中,  $H$  为硬化函数。

用  $\left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right]^T [D]$  左乘式(2)并结合式(3)得

$$dI = \left[ [D] - \frac{[D] \left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right] \left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right]^T [D]}{A + \left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right]^T [D] \left[ \frac{\partial F}{\partial I} \right]} \right] dI_e$$

反应硬化条件参数  $A$  可以从单向应力与塑性变形曲线上得到,这里采用线性强化弹塑性模型,故取

$$A = E_T / (1 - E_T / E_0)$$

式中,  $E_0$  为初始弹性模量;  $E_T$  为屈服后的弹性模量。

对等向硬化材料,依 Mises 屈服准则及做功硬化理论<sup>[9-10]</sup>,给出增量弹塑性本构矩阵表达式为



的关系,需要对式 (4) 基于时间进行积分。因其中应力和应变均是未知量,需要进行线性化数学处理<sup>[11]</sup>。对应力偏量进行线性化数学处理过程如下:

$$S = S + \sum_{i=1}^n S_i$$

其中

$$S = 2G e,$$

$$S_i = \int_0^t 2G_i \exp\left(-\frac{t-t_i}{\tau_i}\right) \frac{de}{dt} dt,$$

$$(S_i)_{n+1} = A_1 + A_2,$$

$$A_1 = \int_0^{t_n} 2G_i \exp\left(-\frac{t_i + t - t}{\tau_i}\right) \frac{de}{dt} dt,$$

$$A_2 = \int_{t_n}^{t_{n+1}} 2G_i \exp\left(-\frac{t_i - t}{\tau_i}\right) \frac{de}{dt} dt.$$

$$t = t_{n+1} - t_n.$$

$A_1$  和  $A_2$  的积分结果为

$$A_1 = \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) (S_i)_n,$$

$$A_2 = \exp\left(-\frac{t}{2\tau_i}\right) G_i e$$

其中

$$e = e_{n+1} - e_n.$$

$$G(t) = G + \sum_{i=1}^{n_G} G_i \exp(-t/\tau_i),$$

$$K(t) = K + \sum_{i=1}^{n_K} K_i \exp(-t/\tau_{ik}),$$

$$G_i = C_i (G_0 - G), K_i = D_i (K_0 - K).$$

式中,  $e$  为应变偏量部分;  $t$  为缩减时间;  $C$  为与剪切瞬时反应行为有关的常数;  $G(t)$  为剪切松弛 Kernel 函数;  $D_i$  为与膨胀瞬时反应行为有关的常数;  $K(t)$  为膨胀松弛 Kernel 函数;  $G_0$  为初始剪切弹性模量, MPa;  $\tau_i$  为剪切情况下和离散松弛谱有关的常数;  $K_0$  为初始膨胀弹性模量, MPa;  $\tau_{ik}$  为膨胀情况下和离散松弛谱有关的常数;  $G$  为稳定剪切弹性模量, MPa;  $n_G$  为近似剪切松弛 Kernel 函数的 Maxwell 单元数;  $n_K$  为近似膨胀松弛 Kernel 函数的 Maxwell 单元数;  $K$  为稳定膨胀弹性模量, MPa。

### 4 有限元方程及其求解

如图 1,力边界处理方法如下:与模型外边界  $AB$  或  $BC$  重合的有限单元边界上作用有均布侧压 ( $S_1$  或  $S_2$ ),以压向单元边界为正。当单元边界位于  $BC$  边界上时,面力分量  $p_x = -S_1, p_y = 0$ ;当单元边界位于  $AB$  边界上时,面力分量  $p_x = 0, p_y = -S_2$ 。如果盐膏层取为圆形边界,并设  $r$  为盐层外边界上任一点

外法线方向与  $x$  轴夹角,则根据任意法向量数值理论求解<sup>[12]</sup>。继而可将任意面力在  $x$  及  $y$  方向分解,并组成总体载荷列阵。

套管及水泥环使用平面单元 PLANE183 模拟,盐膏层使用 VISCO88 单元模拟。PLANE183 单元为 8 结点平面单元,每个结点有两个位移自由度  $u_x$  和  $u_y$ ,用来模拟材料的弹塑性、塑性、超弹性等物理性质及蠕变、应力硬化、小变形、大变形等力学行为。VISCO88 为二次等参单元,可以用来模拟材料的热力学粘弹性特性以及应力硬化特性。根据上述特定载荷边界条件,形成载荷列阵并集总,单元刚度矩阵的形成以及集总过程符合一般有限元基本方程的建立方法,不再赘述。

采用逐步超松弛迭代 (SOR) 方法求解大型线性方程组。由于收敛速度与迭代矩阵谱半径相关,而迭代矩阵  $B$  是松弛因子  $\omega$  的函数,故优选松弛因子十分重要。由于  $\omega_{opt} = 2/[1 + \sqrt{1 - \rho^2(B_J)}]$  ( $B_J$  是 Jacobi 迭代法迭代矩阵) 只是对某一类从偏微分方程数值解中得到的线性代数方程组才有明确的结论,因而本文中计算程序采用增量法<sup>[12]</sup>,即

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \Delta\omega$$

这样可以迅速从  $0 \sim 2$  之间获取最佳松弛因子。只有优选的松弛因子使计算误差小于控制精度误差且迭代步数最少时,才能选定该因子为最佳松弛因子,否则,须重新优选。

### 5 数值模拟结果

#### 5.1 均匀地应力下套管外壁受力分布

粘弹性模型中假定初始时刻粘弹性体为刚性,  $E_t \rightarrow \infty$ ,盐膏层没有任何变形。因此,地应力不能瞬时施加在套管上,故初始时刻套管外蠕动压力近似为 0。随蠕动时间延长,均匀地应力被逐渐传递至套管外壁,且该蠕动压力分布均匀。盐膏层蠕动稳定后,施加在套管外的蠕动压力也基本稳定,其稳定值随套管—水泥环—地层刚度变化而有所变化。

#### 5.2 非均匀地应力下套管外壁受力分布

参照图 1,定义地应力载荷非均匀系数为  $n = S_2/S_1$ 。在蠕变地层和水泥环基本参数一定的情况下,地应力非均匀性导致了套管外地层蠕动压力分布的非均匀性(图 2)。且最大地应力方向上 ( $x$  轴方向) 套管外挤蠕动压力最小,而最小地应力方向上 ( $y$  轴方向) 套管外挤蠕动压力最大。当地应力非均匀性增强时,蠕动压力分布的非均匀性增强。

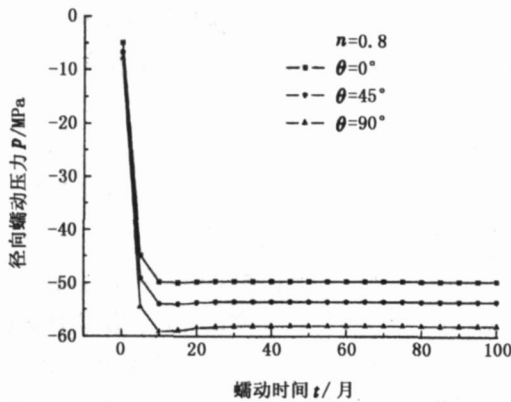


图 2 非均匀地应力对套管径向蠕动压力的影响

### 5.3 均匀地应力下含磨损套管外壁受力分布

由图 3 套管内壁位移曲线可知, 90 方向上不同磨损深度处位移 ( $W_{0.5,90}, W_{1.0,90}, W_{1.5,90}$ ) 较无磨损情况 ( $W_{0,90}$ ) 均有不同程度的减小, 减小量由内壁磨损情况和套管在该方向上总体刚度决定 (套管刚度具有方向性)。

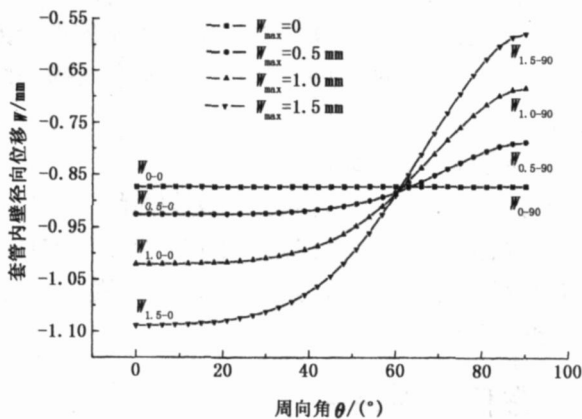


图 3 磨损缺陷对套管内壁位移的影响

图 4 为磨损缺陷下套管外挤蠕动压力分布曲线。

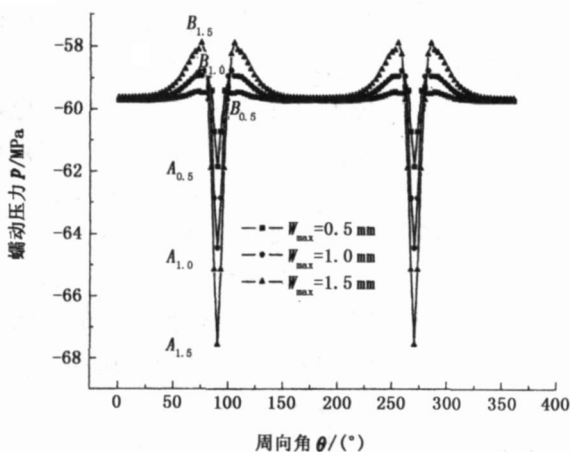


图 4 磨损缺陷对套管外挤蠕动压力分布的影响

与均匀地应力情况相比, 磨损越深, 套管在 x 方

向刚度越小, y 方向刚度越大, 故 y 方向上能够承受更大的蠕动压力。因此, 磨损改变了套管外挤蠕动压力分布规律 (图 4), 最大磨损深度对最大蠕动压力分布影响较大, 且磨损深度最大处蠕动压力最大, 即  $P_{A_{0.5}} < P_{A_{1.0}} < P_{A_{1.5}}$ 。随着磨损深度减小, 蠕动压力减小, 在有、无磨损处出现压力拐点,  $P_{B_{0.5}} > P_{B_{1.0}} > P_{B_{1.5}}$ 。在  $B_x \sim C$  阶段, 离开磨损区越远, 内壁有、无磨损处尖角造成套管刚度变化对蠕动压力分布影响越小, 至逐渐消除。

### 5.4 非均匀地应力下含磨损套管外壁受力分布

最大磨损模拟深度为 1.0 mm, 磨损明显改变了非均匀载荷下套管外挤蠕动压力的分布规律 (图 5), 磨损处蠕动压力明显增大, 但对非磨损区蠕动压力的分布影响较小。与非均匀载荷相比, 磨损是影响套管外蠕动压力分布更为敏感的因素。

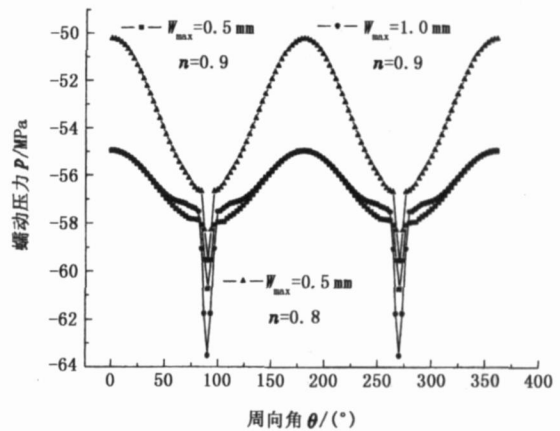


图 5 非均匀载荷与套管磨损联合作用对套管外挤蠕动压力分布的影响

### 5.5 类“8”字型截面套管外挤压力分布

薄壁套管在生产、运送或作业过程中比厚壁套管更容易受到损伤。假设: (1) 套管径向上受到压缩载荷, 与该直径垂直方向上自由, 损伤后套管截面近似“8”字型; (2) 壁厚均匀。计算中套管采用壁厚较薄 N-80 钢级套管, 外径  $D = 127.3 \text{ mm}$ , 壁厚  $h_t = 7.5 \text{ mm}$ , 其余参数值同第 1 节。

如图 6 所示, 类“8”字型套管截面形状几何描述如下: 在直角坐标系中, 套管外壁上任何一点 M 与原点 o 连线 oM 与 x 轴之间夹角为  $\alpha$ 。第一象限中, 外轮廓线方程为

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \left( 1 - \frac{2}{2} \right), \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2};$$

$$= 2 \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}}$$

式中,  $\alpha$  为类“8”字型套管椭圆度, 无量纲;  $R_{\max}$  为类

“8”字型套管长半轴, mm;  $R_{min}$  为类“8”字型套管短半轴, mm;  $R$  为套管外壁上与  $x$  轴夹角  $\theta$  处点的外半径, mm.

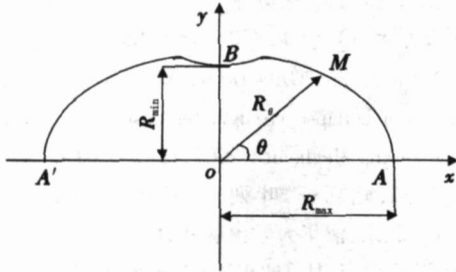


图 6 类“8”字型套管横截面几何示意图

由于类“8”字型截面缺陷造成了套管外挤蠕动压力分布发生较大变化(图 7)。从套管外壁结点基本解位移分析可知,套管刚度明显影响蠕动压力分布,在  $x, y$  方向分别出现最小值和最大值。因此,在长轴和短轴方向出现蠕动压力极值。随着椭圆度增加,最大蠕动压力急剧增加,而最小蠕动压力也有较大幅度降低,蠕动压力非均匀性增强。应力强度数值结果表明,具有类“8”字型截面缺陷套管,在蠕动压力下,首先在套管长轴方向内壁点 A 和短轴方向外壁点 B 处发生塑性屈服破坏。

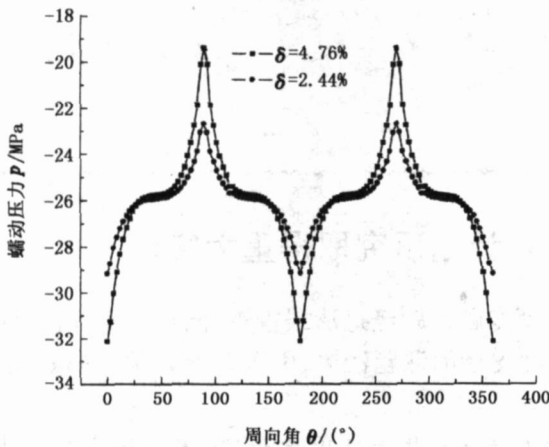


图 7 “8”字型套管外挤蠕动压力分布

### 6 算例分析

以哈国 SKL3 井为例。在模拟计算中,上覆岩层压力梯度取 0.023 MPa/m,则在井深 5 080 m 处,可算得  $S_1 = 5 080 \times 0.023 = 116.84$  MPa;在计算生产套管内钻井液产生的内压力时,假定套管内按 40% 掏空(掏空量越大安全系数越高)。图 8 中给出了该井在井深 5 080 m 处非均匀地应力作用下套管外挤蠕动压力的分布以及在该蠕动压力作用下套管抵抗非均匀载荷的能力。

数值模拟计算结果表明,当地应力非均匀系数

$n < 0.68$  时,地层蠕动压力就超过了套管的抗挤强度,套管将发生塑性挤毁破坏;当  $0.68 < n < 1.0$  时,套管抵抗非均匀载荷的安全能力余量为 0 ~ 18.6%。

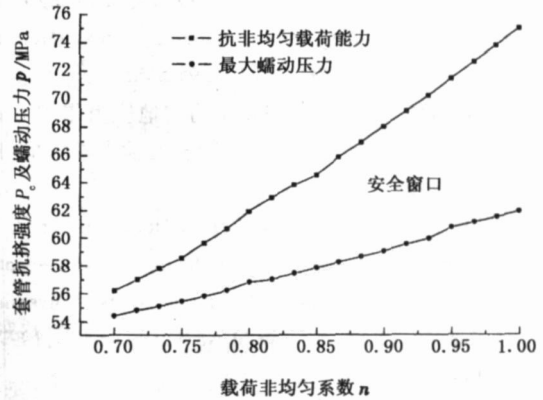


图 8 载荷非均匀系数对套管抗挤强度及外挤最大蠕动压力的影响

此外,本文中方法还能够用来计算不同磨损深度及其与非均匀载荷联合作用的复杂情况下,套管外地层蠕动压力分布规律及其强度问题。

### 7 结 论

(1) 非均匀地应力条件下,盐膏层作用在套管上的蠕动压力是非均匀的。最大地应力方向上套管外挤蠕动压力最小,而最小地应力方向上套管外挤蠕动压力最大。

(2) 磨损缺陷改变了套管不同方向上的刚度比,因而改变了非均匀载荷下套管外挤蠕动压力的分布规律。磨损处蠕动压力明显增大。与非均匀载荷相比,磨损是影响套管外蠕动压力分布更为敏感的因素。

(3) 有限元模型是基于离散点而建立的,便于模拟任意复杂几何形状截面套管外蠕动压力分布以及套管的剩余强度等。能够为复杂条件下含磨损缺陷套管柱强度设计提供理论指导。

#### 参考文献:

[1] 高德利,覃成锦. 含盐膏层井复合套管柱优化设计技术 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (5): 5-6  
GAO De-li, TAN Cheng-jin. Optimized design technology for complex casing string in the wells with salt formation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31 (5): 5-6

[2] MUNSON D E. Multimechanism deformation parameters of domal salt using transient creep analysis [R]. Report SAND99-2104, Sandia Natl Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1999.

- [3] 曾义金,杨春和,陈峰,等. 深井石油套管盐膏层蠕变挤压应力计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 595-598  
ZENG Yi-jin, YANG Chun-he, CHEN Feng, et al Numerical analysis of creep pressing stress of casing in deep salt rock stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 595-598
- [4] 房军,岳伯谦,赵怀文,等. 非均匀地应力作用下套管和水泥环表面受力特性分析[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1997, 21(1): 46-48  
FANG Jun, YUE Bo-qian, ZHAO Huai-wen, et al The stress analysis on the surface of the casing and cement under nonuniform loading[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997, 21(1): 46-48
- [5] KHALAF F. Increasing casing collapse resistance against salt-induced loads[R]. SPE 13712, 1985.
- [6] LASTN C, MUJICA Santiago, PATTILLO Philli, et al Casing deformation and integrity in a tectonic setting: evaluation, impact and management [R]. SPE 73498, 2002
- [7] 闫相桢,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): 103-106  
YAN Xiang-zhen, YANG Xiu-juan, FENG Yao-rong, et al Displacement inverse analysis of casing external loads of creep stratum [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1): 103-106
- [8] 覃成锦,高德利,徐秉业. 含磨损缺陷套管强度分析的数值方法[J]. 工程力学, 2001, 18(2): 9-13  
TAN Cheng-jin, GAO De-li, XU Bing-ye. Numerical analysis of collapse strength for casing with wearing [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(2): 9-13.
- [9] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1990: 25-34
- [10] HUEBNER K H, THORNTON E A. Finite element method for engineering [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1982
- [11] SMO J C. On fully three-dimensional finite strain viscoelastic damage model: formulation and computational aspects[J]. Comput Meth in Appl Mech Eng, 1987, 60: 153-173
- [12] 郑传奎,覃成锦,高德利. 含磨损缺陷套管抗内压强度数值计算研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 76-79  
ZHENG Chuan-kui, TAN Cheng-jin, GAO De-li Numerical calculation of burst strength for casings with wearing defects [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 76-79.

(编辑 李志芬)

## 中国石油大学(华东)承担国家“863”计划研究取得重大突破

“十一五”国家高技术研究发展计划(863计划)2006年度专题课题经过形式审查、同行专家评议、课题评审以及领域专家咨询、公告等立项程序,最终确定了本年度支持的课题清单,中国石油大学(华东)有11个项目获得批准立项。

获得支持的项目包括海洋技术领域5项,分别是石油工程学院步玉环负责的“深水固井技术基础研究”、张建国负责的“声波防蜡降粘及解堵增产技术研究”、董长银负责的“大斜度井砾石充填模拟及工艺技术”、机电工程学院陈国明负责的“近海石油老龄平台延寿技术研究”、储运与建筑工程学院何利民负责的“深海立管中严重段塞流消除方法及配套分离系统研究”。资源环境技术领域6项,分别是地球资源与信息学院李振春负责的“双重复杂条件下地震叠前深度域保幅成像研究”、杜启振负责的“高精度全波地震成像及反演技术”、石油工程学院倪红坚负责的“井底岩屑磨料脉冲射流钻井技术研究”、葛际江负责的“稠油油藏混气表面活性剂驱”、机电工程学院金有海负责的“井下多相分离、同井采油回注及油砂混举技术研究”,数学与计算科学学院同登科负责的“深部煤层气开采运移规律及数值模拟研究”。

(摘自中国石油大学(华东)校园网)