

## 超深井套管三维弹塑性 ABAQUS 有限元分析\*

沈新普

(沈阳工业大学建筑工程学院)

沈新普.超深井套管三维弹塑性 ABAQUS 有限元分析.天然气工业,2007,27(2):54-56.

**摘 要** 针对一个井深为 7500 m 的竖直油井套管地层中有若干段蠕变严重的盐岩层,在固井后,由于盐岩层蠕变对套管产生的压力引起套管产生过量塑性变形,进而被挤毁。工程单位要求对原设计方案进行三维有限元模拟验算,并要求依据所拥有的资料提出新的设计建议。为此,应用 ABAQUS 有限元软件对原设计方案进行了三维弹塑性数值分析,进一步对壁厚增加以后的套管进行了弹塑性数值模拟分析。计算内容有:①原设计外径为 0.34 m、内径为 0.31 m 的套管在内外液体压力以及对称的 15°扇形区盐岩压力作用下的三维弹塑性分析;②新设计建议外径为 0.35 m、内径为 0.315 m 的套管在内外液体压力和非对称的 15°扇形区盐岩压力作用下的三维弹塑性分析;③将上述②的模型所处位置深度增加,即平移使其顶部深度达到 6500 m 时套管的三维弹塑性分析。结果表明,原设计套管厚度不能承受盐岩层所产生的较大压力梯度,而壁厚增加以后的套管设计承载能力能够满足工作环境要求。

**主题词** 钻井 超深井 套管 盐岩层 破坏 弹塑性 ABAQUS 有限元

套管是油气井设备的主要构件,并且随着套管钻井技术的应用普及正变得越来越重要。由于某些地层中存在蠕变严重的盐岩层等特殊地质条件,按照常规设计的套管在遇到盐岩层时经常会发生严重的塑性变形而导致套管不能正常使用。近几年来,这个问题引起了工程界的关注,并得到了若干研究者的较深入地研究。张效羽<sup>[1]</sup>对 2001 年以前的套管分析研究文献做了简要的回顾与综述;练章华和韩建增等<sup>[2]</sup>对套管的挤毁现象做了工程弹塑性有限元分析;Gao De-Li 和 Liu Fengwu 等<sup>[3]</sup>讨论了套管沿全长的屈曲问题;张效羽和徐秉业等<sup>[4]</sup>将模糊识别技术用于在役套管的变形损坏的预测分析;韩建增、李中华等<sup>[5]</sup>讨论了几何缺陷对套管抗挤压强度的影响。虽然有了上述文献,但是对于套管在三维非均匀载荷作用下的破坏现象的数值分析的研究文献仍然不多。

本文要研究的对象是一个井深 7500 m 的竖直油井套管。地层中 6000 m 以下有若干段蠕变严重的盐岩层。在固井后,由于盐岩蠕变对套管产生的压力引起套管产生过量塑性变形,进而被挤毁。工

程单位要求对原设计方案进行三维有限元模拟验算,并要求依据所拥有的资料提出新的设计建议。因此,本文将首先对原设计方案进行三维弹塑性分析,之后进一步对壁厚增加以后的套管进行弹塑性数值模拟分析。

## 一、力学模型

本文研究的套管截面的几何尺寸是外径为 0.34 m、内径为 0.31 m,全长 7500 m。套管在 6000 m 以下的地层中遇到 5 段厚度为 11 m 的盐岩层。盐岩层的压力对称作用在套管上 2 个 15°的扇形区内(见图 1)。套管在盐岩层发生挤毁破坏。由于每段盐岩层之间的距离超过 30 m,笔者认为各段盐岩层对于套管的作用没有相互影响。因此,可以对套管进行分段三维弹塑性计算。经过简化得到的套管的力学模型如图 1 所示,图中套管分为两段,上部为 11 m 的外部受盐岩层和钻井液压力联合作用的部分,下部为 22 m 的仅受钻井液压力的管段部分。

在给定的套管若干深度段上,外部压力一部分(MO、NP段)是液体压力,而另一部分(MN、OP

\* 本文为教育部春晖计划资助项目(编号:Z2005-1-21004)。

**作者简介:**沈新普,1963 年生,教授;1993 年毕业于清华大学工程力学系获博士学位,从事 ABAQUS 有限元数值计算和固体损伤塑性本构研究、以及双孔隙岩体损伤渗流耦合研究;现为沈阳工业大学计算力学所所长、辽宁工程技术大学博士研究生导师、美国 Knowledge System Inc 咨询公司力学顾问。地址:(110023)辽宁省沈阳市铁西区南 13 路 1 号 192 号信箱。电话:(024)25691191。E-mail:xinpusher@vip.sina.com;网址:www.shenxinpu.com

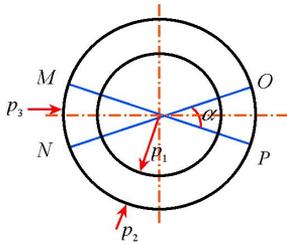


图1 套管截面液体压力分布示意图

段)是盐岩压力。其中： $p_3^{OP} = p_3^{MN}$ ， $p_2^{MO} = p_2^{NP}$ ，内压  $p_1$  均匀分布。图中角度  $\alpha = \pi/12$ 。

由图2可看出，均布载荷  $p_{001} = 120 \text{ MPa}$  均匀分布在上部两个对称的  $15^\circ$  扇形区内。在其上叠加以幅值为  $0.23 \text{ MPa/m}$  的分布盐岩蠕变压力梯度。套管其他部分的外表面上分布有  $0.017 \text{ MPa/m}$  液体压力梯度，每一点上的压力值是从地面  $0 \text{ m}$  处按深度和压力梯度计算得来的。套管置于一个刚性孔内，上部管段与孔壁之间具有刚性接触关系，以模拟扶正器的约束作用，刚性孔与套管间有  $1 \text{ cm}$  的径向间隙。管段下部为3个方向的固定位移约束。套管顶部受到的自重产生的压力为  $440 \text{ MPa}$ 。

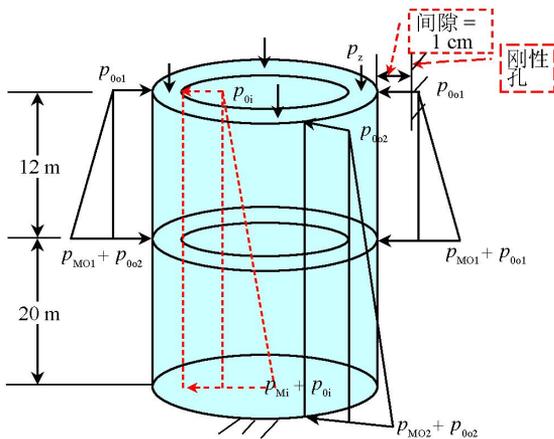


图2 载荷分布与位移约束示意图

按照 ABAQUS 软件要求的格式，上述模型承受有 7 组分布载荷，分别如下。

载荷 1 为上部套管自重引起的竖向载荷 ( $p_z$ )。

载荷 2 为套管内部自上而下液体压力 ( $p_{mi}$ )。

载荷 3 为套管内部自上而下均匀分布内压 ( $p_0$ )。

载荷 4 为套管外部自上而下均匀分布外压 ( $p_0^{MO}$ )。

载荷 5 为套管外部自上而下液体压力 ( $p_m^{MO}$ )。

载荷 6 为套管外部自上而下均匀盐岩分布外压 ( $p_0^{MO}$ )。

载荷 7 为套管外部自上而下梯度盐岩层压力 ( $p_m^{MO}$ )。

套管材料参数取值为：弹性模量  $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，泊松比  $\nu = 0.3$ ，初始屈服极限  $\alpha = 860 \text{ MPa}$ 。

本文给出的计算结果共有 3 组，分别是：①原设计外径为  $0.34 \text{ m}$ 、内径为  $0.31 \text{ m}$  的套管在内外液体压力以及对称的  $15^\circ$  扇形区盐岩压力作用下的三维弹塑性分析；②新设计建议的外径为  $0.35 \text{ m}$ 、内径为  $0.315 \text{ m}$  的套管在内外液体压力和非对称的  $15^\circ$  扇形区盐岩压力作用下的三维弹塑性分析；③将上述②的模型所处位置深度增加，即平移使其顶部深度达到  $6500 \text{ m}$  时套管的三维弹塑性分析。

## 二、三维 ABAQUS 弹塑性有限元计算

ABAQUS 有限元分析模型总共采用了 8688 个节点、1224 个三维 20 节点减缩积分二阶等参单元对所选管段进行离散。

(1) 计算结果 1。计算 1 给出了原设计外径为  $0.34 \text{ m}$ 、内径为  $0.31 \text{ m}$  的套管在内外液体压力以及对称的  $15^\circ$  扇形区盐岩层压力作用下的三维弹塑性分析结果，包括顶部深度位置为  $6400 \text{ m}$  的套管段的有限元等效塑性应变分布图、vonMises 等效应力分布图和网格变形图。表明加载到总载荷的  $91.44\%$  时已经发生了塑性变形，在载荷因子  $0.9144$  以后的加载行为比较难以收敛，这说明原设计套管不能承受盐岩层压力和钻井液压力联合形成的工作载荷。结果中塑性区的值远高于其他地方的值。应该说明的是：ABAQUS 计算应力是在高斯积分点上进行的，但是其后处理显示却在节点上的应力值<sup>[6]</sup>，而 ABAQUS 节点上的应力值则是由高斯积分点上的值线性外推插值得到的，从而产生了较大的偏差。分析认为节点上的应力值在塑性区已超过给定的材料强度极限，只是显示出来的偏差。经检查确认高斯积分点上的应力值严格等于屈服强度值。从变形后网格与变形前网格的比较可知，原设计套管在对称的盐岩层压力和正常工作液压联合作用下，会发生大面积塑性屈服变形。这表明原设计套管强度和刚度均不够，必须加厚套管，才能满足工作载荷的要求。这一点与工程施工现场的实际情况是相符合的。

(2) 计算结果 2。计算 2 为对加厚了的套管（外径为  $0.35 \text{ m}$ 、内径为  $0.315 \text{ m}$ ）在同样的液压和盐岩层的复合载荷作用下的弹塑性行为分析结果。套管段顶部深度位置不变。结果中各处的等效塑性应变

值为零,表明没有塑性区产生。

(3)计算结果 3。在这一组计算中几何模型同计算 2 相同,只是载荷作了修改:顶部深度增加到 6500 m,从而内部液压、外压及盐岩层压力都作了相应增加。结果中各处的等效塑性应变值也为零,表明没有塑性区产生。

### 三、结 论

(1)改进后的套管的有限元数值结果中等效应力值低于塑性屈服应力值,没有塑性区出现,说明改进后套管的强度和刚度均符合工程需要。

(2)应用 ABAQUS 有限元软件在模拟及求解弹塑性接触问题时表现出了超凡的能力。本文在模拟扶正器对套管的约束作用时在简化的管段模型的端部引入了接触约束,从而很好地避免了由于刚性位移约束引起的过大的端部约束力,使得计算结果与实际情况吻合较好。由于套管的细长比很大,对 7500 m 套管全长进行三维整体非均匀分布载荷数值计算的计算量过于庞大,当采用简化管段模型进行分析时,简化模型与套管其余部分的连接模型细节,如位移约束等的选择对模型的计算结果具有比较大的影响。本研究曾经进行的试算表明,当采用固定位移约束(而不是接触约束)模拟上部连接时,

计算得到的端部应力值要增大 10%,从而可能会出现实际上并不存在的塑性区。

(3)三维弹塑性接触数值模能够有效地模拟实际工程结构的受载及变形,为相关设计提供严谨、准确的理论依据。与某些文献中的二维计算相比,三维计算能够模拟局部载荷细节。因此,能够比较好地模拟实际情况。

### 参 考 文 献

- [1] 张效羽.套管有限元计算的若干问题分析[J].天然气工业,2001,21(1):62-65.
- [2] 练章华,韩建增,等.基于数值模拟的复杂地层套管破坏机理研究[J].天然气工业,2002,22(1):48-51.
- [3] GAO DE LIH, LIU FENGWU, XU BINGYE. Buckling behaviour of pipes in oil and gas wells [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(2):126-130.
- [4] 张效羽,徐秉业,赵国珍.模糊识别及预测在役套管的变形损坏[J].天然气工业,1999,19(2):71-74.
- [5] 韩建增,李中华,等.几何缺陷对套管抗挤强度影响的有限元分析[J].天然气工业,2004,24(5):71-72.
- [6] 庄茁,张帆,岑松,等.ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M].北京:科学出版社,2005.

(修改回稿日期 2006-09-27 编辑 钟水清)