

复合盐膏层界面错动的变形机理及数值模拟研究

李世远^{1,2*}, 李扶摇¹, 杨柳³, 卢运虎^{1,2}

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083

* 通信作者, lishiyuan1983@cup.edu.cn

收稿日期: 2019-07-25

国家自然科学基金青年项目(No.51704307)、国家自然科学基金面上项目(No.51774305)和国家自然科学基金青年项目(No.11702296)联合资助

摘要 沉积盆地的盐岩是最优质的盖层, 其下埋藏了世界上 80%~90% 的油气资源, 不仅是世界石油行业关注的焦点, 更是我国油气资源开发的重点。我国深层盐下油气资源丰富, 新探明的油气资源的 40% 位于深层盐层下。油气钻采过程盐下套管损坏程度与频度严重, 据统计近 50% 的套管破坏发生在复合盐膏层界面位置。本文首先对盐岩试件蠕变试验研究进行调研分析, 探究盐岩蠕变的一般规律。然后对复合盐膏层的稳定性进行了研究, 通过调研已有盐膏层套损特性分析, 发现错动因素尚比较缺乏考虑。论文集中分析了界面错动的主控因素以及造成套管变形的机理, 通过 ABAQUS 建立地层变形数值模型, 综合模拟了界面胶结程度, 盐膏层弹性模量、泊松比、地层倾角及蠕变特性等对套管损坏的影响。最后提出了套管变形的防治措施。

关键词 复合盐膏层; 界面错动; 套管变形

Deformation mechanism and numerical simulation of interface dislocation in composite salt gypsum layer

LI Shiyuan^{1,2}, LI Fuyao¹, YANG Liu³, LU Yunhu¹

1 School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract The salt rock in the sedimentary basin is the highest quality cap rock, and 80%~90% of the world's oil and gas resources are buried under it. It is not only the focus of the world petroleum industry, but also the focus of China's oil and gas resources development. China's deep salt oil and gas resources are abundant. At present, 40% of China's newly discovered oil and gas resources are located under the deep salt layer. In the oil and gas drilling process, the extent and frequency of damage to the casing under the salt is serious. According to statistics, nearly 50% of the casing damage occurs at the interface position of the composite salt gypsum layer. In this paper, the creep test of salt rock specimens is first surveyed, and the general law of salt rock creep under uniaxial conditions is mainly explored. Then, the stability of the composite salt gypsum layer was studied. Through

引用格式: 李世远, 李扶摇, 杨柳, 卢运虎. 复合盐膏层界面错动的变形机理及数值模拟研究. 石油科学通报, 2019, 04: 390-402

LI Shiyuan, LI Fuyao, YANG Liu, LU Yunhu. Deformation mechanism and numerical simulation of interface dislocation in composite salt gypsum layer. Petroleum Science Bulletin, 2019, 04: 390-402. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.04.035

the investigation of the analysis of the damage characteristics of the existing salt gypsum layer, it was found that the dislocation factor was still relatively lack of consideration. The paper concentrates on the main control factors of interface misalignment and the mechanism of deformation of the casing, establishes the criterion for the slippage of the fault layer, establishes the stratum-casing numerical simulation through ABAQUS, comprehensively considers the degree of interface cementation, and the elastic modulus of the salt gypsum layer. The influence of the amount, Poisson's ratio, formation inclination and creep characteristics on casing damage. Finally, based on this, the prevention and control measures of casing deformation are proposed, including the optimal design of casing structure under the condition of composite salt gypsum layer.

Keywords composite salt gypsum layer; interface dislocation; casing deformation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.04.035

0 前言

盐膏层是指以盐或石膏为主要成分的地层。在石油钻井行业中,我们通常把主要成分以氯化钠或者其它水溶性无机盐类比如氯化钾、氯化镁、氯化钙、石膏或者芒硝等为主的地层称为含盐膏地层,即盐膏层。经统计发现,沉积盆地的盐岩是最优质的盖层,其下埋藏了世界上80%~90%的油气资源,因此盐膏层不仅是世界石油行业关注的焦点,更是我国油气资源开发的重点。

盐膏层主要由盐岩、石膏和泥岩组成,在我国有着十分广泛的分布,在我国的江汉油田、中原油田、青海油田、四川盆地、华北盆地、新疆油田、长庆油田、胜利油田、吐哈油田、江苏油田、塔里木盆地、渤海等都曾钻遇过盐膏层。截至目前的统计资料,我国新探明的油气资源的40%都位于深层盐层之下。但是由于不同地区的沉积环境和沉积条件不同,导致不同的盐膏层的埋藏深度、厚度和盐膏层的组成成份也有较大的差异。有的盐膏层的深度可以从地表到五千多米,其中单层的厚度从几厘米到八十多米,总厚度更是可以从几十米到二千多米,差异很大。

盐岩和石油地质与石油工程具有紧密的关系。从20世纪80年代以来,许多地质学家对盐构造进行了研究^[1-4]。更多的地质和岩石力学或石油、矿业工作者集中研究了盐岩的蠕变特性^[5-8]。研究主要针对盐矿的安全设计、盐膏层钻井、核废料或油气地下处置库的设计和长期稳定性的评价。国内学者对盐岩蠕变变形及损伤等研究也广泛应用到盐岩储气库建设^[9-14]、盐膏层钻井工程^[15-17]和盐岩二氧化碳地质储存^[18]等方面。本文依据20~200℃盐岩变形机理研究的数据库,归纳了两类主要的变形机制^[19-25]。

据统计,50%套管损坏发生在复合盐膏层界面位置,这一点与传统的复合盐膏层套管设计与防护理论

存在很大差异。因此,解决复合盐膏层界面套管损坏这一技术难题,研究复合盐膏层套管损坏机理至关重要。

1 盐膏层物理性质

盐膏层是指主要成分是由岩盐(NaCl)和石膏(CaSO₄或CaSO₄·2H₂O)所组成的地层。我国的盐膏层主要分布于第三系、石炭系和寒武系地层中,一般是滨海相和潟湖陆相沉积^[17]。一般来说,在绝大部分的盐膏层中,岩盐和石膏的含量都是不相等的,同时盐膏层中还存在着大量的其他矿物,比如常见矿物有石英(SiO₂)、长石和碳酸盐岩等,黏土矿物也经常出现在盐膏层中。钻进盐膏层的时候,经常发生钻井事故如缩径、卡钻、固井质量差以及易挤毁套管等,甚至导致油水井报废。因此钻井作业的设计与施工以及钻井液的配套技术是保证盐膏层顺利钻进的关键,在钻井设计之前对于盐膏层岩石进行矿物组分分析就显得尤为重要。

1.1 盐膏层的分类

根据纯盐层厚度、盐膏层特点以及夹层情况,可以将盐膏层分为两类,第一类是纯盐膏层,第二类是盐、膏、泥复合盐层,相应的这两类盐膏层的岩石矿物组成成分也有很大的差异^[17]。

纯盐膏层,是由大段的结晶状无机盐(大部分为氯化钠和硫酸钙,也可含其他的无机盐类,如氯化钾、氯化钙和芒硝等)组成的,其单层厚度一般较大,从几米到几十米,总厚度从几十米到上千米,最厚可达2000 m以上^[17]。总的来看,这类地层的岩性比较稳定,盐层夹层通常为不易坍塌的白云岩、石灰岩以及层理裂隙不发育、不易坍塌的硬泥岩等。纯盐膏层所含的黏土矿物可以大致分为两类,第一类是以伊利石

为主要成分(93%~99%),另含有少量绿泥石(1%~7%),但有时候绿泥石的含量可以达到100%;第二类是以伊利石(42%~59%)与伊蒙有序间层(21%~47%)为主。在我国较为典型的纯盐膏层区块是江汉油田的潭口地区和四川川中地区。

复合盐膏层,一般来说是指盐、膏、泥的复合盐层,这一类地层的盐层、膏层、泥层相间,互层多而薄,岩性的变化较大,并且含有例如盐膏软泥岩、碎泥与盐结合物以及以盐为胶结物的角砾岩等复杂成分,往往由盐岩、盐膏、石膏、芒硝、泥岩、含膏泥岩、灰质泥岩、泥页岩等多种岩性组成^[7]。对于复合盐膏层的成因,一般认为复合盐膏层是盐湖沉积的产物,其基本的组成物质是碎屑和颗粒、晶块以及化学物质的沉淀结晶体,其中盐岩和石膏通过机械破碎作用和化学作用,不仅改变碎屑岩和团块的外观结构,同时也填充于碎屑或团块的间隙之中,形成了盐膏泥的混合物,也就是复合盐膏岩。其岩性复杂多变,泥岩层理发育,软泥岩含水量较高。黏土矿物也可以分为两类:第一类是以伊利石为主(伊利石含量75%~90%),另含绿泥石(10%~25%);第二类是以伊利石为主(伊利石含量43%~100%),含有伊蒙有序的间层、高岭石、绿泥石等。

1.2 盐膏层的物理特性

一般来说,盐岩的强度相对于其他岩类是较低的,比如在其他条件相同的情况下,盐岩的强度仅仅为大理岩的25%,石英岩的5.9%。然而,盐岩的泊松比较高,少数接近到0.5。从盐岩的弹性特性上来讲,强度和弹性模量都受到温度及围压的影响。当温度升高时,盐岩的强度和弹性模量均会减小,泊松比则会随温度升高而增大;当围压增大时,盐岩的强度、泊松比和弹性模量都会增加。

另外,研究表明,盐岩的蠕变特性与温度、应力水平有关。蠕变特性,即在应力不变情况下,应变增加的情况,会受到温度和应力两个主要控制因素的影响。一般情况下,温度和应力水平升高均会使得盐岩的蠕变速率增大。不同的温度和应力条件下,盐岩的蠕变规律会有差异^[7]。

本文主要通过文献调研和数值模拟的研究方法,研究复合盐膏层由于界面错动造成套损的机理,并进行复合盐膏层条件下套管结构优化设计,以减少在复合盐膏层钻井过程中产生的套损,增加套管的使用寿命,提高经济效益,为钻完井提供合理的指导。

2 复合盐膏层界面错动套损分析

2.1 复合盐膏层界面错动引起套管破坏机理

自然界盐构造运动时盐岩应变速率由位错蠕变和溶解沉淀蠕变两种机制共同控制。位错蠕变控制下的稳态蠕变速率,可归纳为与应力相关的幂次率(非牛顿体流动)方程:

$$\dot{\epsilon}_{DC} = A(\Delta\sigma)^n = A_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)(\sigma_1 - \sigma_3)^n \quad (1)$$

其中 $\dot{\epsilon}_{DC}$ 是稳态应变速率, $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ 是偏应力(或差应力), $A_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ 是盐岩的黏性参数, A_0 是材料属性参数, Q 是激活能, R 是气体参数($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$), T 是温度。溶解沉淀(扩散)蠕变控制下的盐岩稳态蠕变速率,可归纳为与应力有关的牛顿体流动率:

$$\dot{\epsilon}_{ps} = B(\Delta\sigma) = B_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{TD^m}\right) \quad (2)$$

其中稳态应变速率取决于颗粒尺寸 D , $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ 是偏应力(或差应力), $B = B_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)/TD^m$ 是盐岩黏性参数, B_0 是材料属性参数, Q 是激活能, R 是气体参数($R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$), T 是温度。作用于颗粒尺寸的指数 m 影响着应变速率的大小。总体的应变速率应该是两类应变速率之和:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{DC} + \dot{\epsilon}_{ps} \quad (3)$$

比较方程(1)和(2),两类稳态蠕变速率的不同之处在于:(1)幂次的数值 n 影响应变速率(溶解沉淀蠕变取 $n=1$,位错蠕变取 $n=5$);(2)溶解沉淀蠕变控制下的应变速率取决于盐岩颗粒尺寸,而位错蠕变控制下的应变速率与颗粒尺寸无关。两种主要关系:(1)与位错蠕变相关的幂次率关系;(2)与压力溶解相关的线性关系^[26]。图1展示了世界范围内盐岩蠕变室内实验的数据统计,包含了两种蠕变机制在内^[27]。

引起套管变形的主要机理包括以下几点:高强度的地应力释放、盐膏层蠕变和地层界面错动产生剪切应力、泥页岩等易吸水膨胀的岩类成分的吸水膨胀和一些其他的施工因素如频繁的修井作业和施工方式不当等。目前通常认为石油钻井中的套管损坏主要有以下几种形式:套管变形、套管错断、套管缩径、套管挤毁、套管脱扣、套管的腐蚀和磨损等,也可以分为

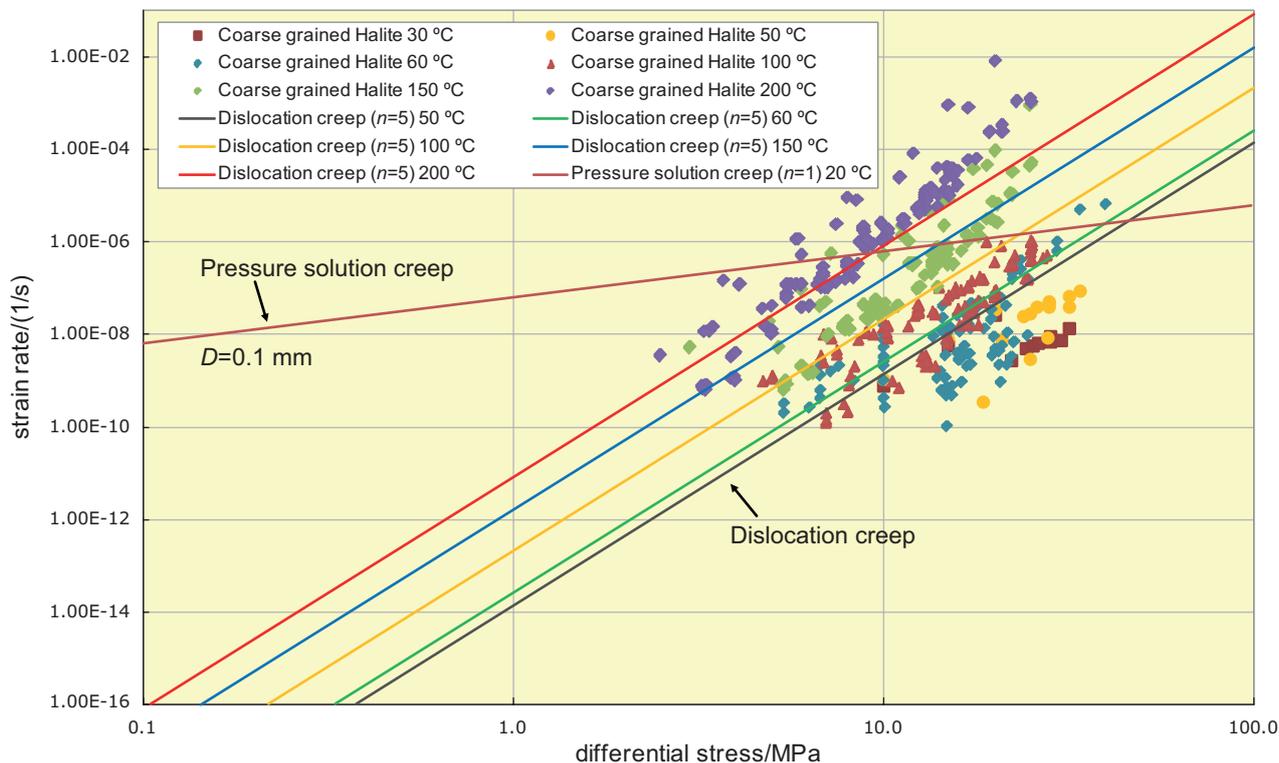


图1 世界范围内盐岩蠕变实验数据统计^[27]

Fig. 1 Data statistics of salt rock creep tests worldwide^[27]

三类。第一类：套管变形但未漏或未穿孔；第二类：套管变形并且穿孔；第三类：套管破裂但没有变形。由于套管的变形，导致卡钻事故经常发生，甚至被迫回填侧钻，更有甚者会导致油井报废，因此，套管损坏会产生很大的经济损失^[28-29]。

界面错动是指，不同的相邻地层间产生了相对的位移，也称为地层滑移。地层滑移将会产生剪切应力，作用在套管上，将会对套管产生剪切破坏，使套管变形。在盐膏层中，尤其是复合盐膏层中，由于其地层中存在大量的盐层、膏层、泥层等组成的既多又薄的互层，这样的复合盐膏层岩性多变不一。

目前，产生界面错动的机理主要有以下几种，分别是由于蠕变速率不同而产生的界面错动、由于重力作用而产生的错动、因注采压差而产生的地层界面错动以及因侧向地应力和其他地质因素而导致的错动。

对于复合盐膏层，近来的研究发现由于界面错动而引发的套管破坏是这一类地层产生套管损坏的主要原因之一。在纯石膏层或是纯盐层，其整体的蠕变速率相差不大，故而在钻井过程中这一类地层受阻的情况较少。但是在复合盐膏层中，岩性极为复杂，盐、泥、膏相间，互层既多又薄，而不同的

岩性有着不同的蠕变速率且差异较大，如纯石膏层的蠕变速率较大，混合层岩性次之，而泥岩的蠕变速率最低。由于复合盐膏层岩性变化频繁，石膏层、盐层、泥层以及混合岩性交替出现，相应的蠕变指数也就呈现频繁的交替现象，就导致出现了地层的界面错动，从而产生了剪切应力作用在套管上，使套管产生了剪切破坏。

同时，重力的影响也可以使地层发生界面错动。如果油田构造类型为背斜构造，地层具有一定的倾角，这样的地层在重力的作用下会有沿着地层倾角而下滑的趋势，但是只有在地层的倾角大于等于岩层内部的摩擦角时才会产生有位移的滑动。在开发过程中，由于油田的注水压力会不断提高，岩层的孔隙压力不断升高，当孔隙压力等于地层的垂向地应力时，岩层的临界倾角变为零度，这时原本就已经倾斜的地层就会在自身重力的作用下向下滑移，从而对地层中的套管施加剪切应力。

除了以上两种原因，注采压差同样会使地层产生滑移。一般来说，注水井井底围压一般要高于生产井的井底围压，才能产生注水的驱油动力。但是对于像复合盐膏层这一类的低渗地层来说，注入水并不能够良好的渗入油井中，因此注水井的井底围压要高过油

井很多,从而产生了从注水井到油井的很大的压差,这个压力作用在岩石骨架上,当超过岩层的剪切强度时,局部地层在这个压差的作用下沿着从注水井到油井的方向产生界面错动,而位于界面错动地层部分的套管就会受到剪切作用,当剪切力超过套管的剪切强度时将会使套管产生剪切破坏。

地层滑移导致的剪切型套管损坏事故时常大范围发生,如塔里木盆地玉科区的YK3井、YK5井以及YK6井等。在这种情形下,套管的破坏通常属于第二类,即套管发生变形且出现穿孔或漏液。

目前,我国的大部分油田如塔里木、中原、江汉、华北、吉林、辽河和胜利等油田都曾有过在钻遇盐膏层时发生卡钻、套管挤毁,甚至油井报废的事故,造成了很严重的经济损失,对现场施工也产生了重要的影响。

2.2 利用ABAQUS软件对复合盐膏层界面错动的有限元分析

利用ABAQUS/CAE软件建立二维地层模型,模型尺寸为 $300\text{ m} \times 450\text{ m}$,据此建立的有限元模型采用 300×450 的几何尺度。通过改变复合盐膏层地层弹性模量 E 、泊松比 ν 、地层倾角 θ ,来分析不同的变量在相同的条件下对地层界面错动的影响。

结合控制变量的原则,本文模型使用了以下的边界条件:上覆地层压力 $4 \times 10^6\text{ Pa}$,侧向压力 $4.5 \times 10^6\text{ Pa}$,第一层与第二层之间的摩擦系数 $\mu_1=0.37$,第二层与第三层之间的摩擦系数 $\mu_2=0.35$,所有地层均为弹性地层。为了分析的准确度将每一块地层沿 x 方向均分为50个分析元。经过文献调研,确定了泥岩层的弹性模量取值范围是:2~16 GPa,泊松比为0.14~0.42。盐岩的弹性模量取值范围是1~9 GPa,泊松比为0.2~0.4。石膏层的弹性模量为0.5~2 GPa,泊松比为0.2~0.35。

模型不考虑地层蠕变的影响,忽略地层本身的重力,以方便计算,仅研究地层弹性模量、泊松比和地层倾角对于界面错动的影响。将地层分为三部分,分别是盐层、泥层以及石膏层,在地层右边施加均匀的地应力,侧向应力大小为 $4.5 \times 10^6\text{ Pa}$,在地层的上方施加大小均匀的上覆岩层压力 $4 \times 10^6\text{ Pa}$ 。同时将第三层的底边设置为不可移动,以便计算。本模型是拟三维模型,既模型是轴对称图形,对称轴即为套管的中心轴,故地层的左侧面为与套管的接触面。

根据图2所建立的模型及其边界条件,通过改变

不同参数,建立了以下11个模型并进行对比分析,从而探究不同参数对套管变形的影响。不同模型的具体参数如表1所示。

2.2.1 以弹性模量为变量的二维地层模型

a. 模型1

模型1为初步建立的对比模型。在图中,U1为 x 方向,其中蓝色表示向 x 轴负方向位移最大,红色表示向 x 轴正方向位移最大。在模型1的模拟结果图(图3)中,可以发现第一层与二层交界部分出现了明显的界面错动,在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为1.89 cm、3.15 cm、3.13 cm。

b. 模型2

在模型1的基础上改变地层的弹性模量 E ,保持地层泊松比 ν 、地层倾角 θ 和受力大小不变,建立模型2。

提高地层弹性模量后,地层的界面错动量变小。在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为1.51 cm、2.51 cm、2.01 cm(图4)。

c. 模型3

在模型2的基础上,继续增大弹性模量 E ,保持其他参数不变,建立模型3。

将模型3与模型1、模型2结果做对比,在其他边界条件不变的情况下,增大地层的弹性模量会使界面错动量变小。与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为0.92 cm、1.54 cm、1.23 cm(图5)。

2.2.2 地层不同排列层序对于界面错动的影响

a. 模型4

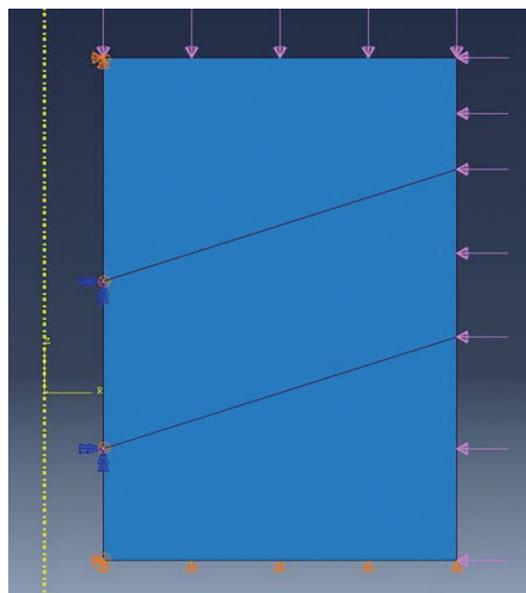


图2 模型建立示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model establishment

在模型 1 的基础上，仅改变地层层序，建立模型 4，模型 4 模拟结果如图 6 所示。

将模型 1 与模型 4 做对比，发现模型 4 中的第二层、第三层界面错动量较层序变化前变大，而第一层界面错动量则变小。在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 1.59 cm、3.18 cm、3.97 cm。

b. 模型 5

继续改变地层层序，建立模型 5。并将模型 5 与

模型 1、模型 4 做对比，模型 5 模拟结果如图 7 所示。

对比模型 1 和模型 4，模型 5 各个层的界面错动量均变大。在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 4.13 cm、3.31 cm、2.48 cm。

c. 模型 6

改变地层层序，建立模型 6，对比模型 6、模型 1、模型 4 和模型 5 的模拟结果，模型 6 的模拟结果如图 8 所示。

经过对比模型 6、模型 1、模型 4 和模型 5 的模拟结果发现，模型 6 的第二层和第三层界面错动量变得更大，地层三层左半部分几乎无错动。在与套管交界

表 1 不同模型具体参数

Table 1 Specific parameters of different models

模型	层序	弹性模量 /GPa	泊松比	地层倾角 /°	上覆压力 /Pa	侧向压力 /Pa
1	①	40	0.16	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	10	0.26			
	③	20	0.25			
2	①	50	0.16	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	12	0.26			
	③	30	0.25			
3	①	80	0.16	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	20	0.26			
	③	50	0.25			
4	①	40	0.16	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	20	0.25			
	③	10	0.26			
5	①	10	0.26	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	40	0.16			
	③	20	0.25			
6	①	10	0.26	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	20	0.25			
	③	40	0.16			
7	①	40	0.20	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	10	0.30			
	③	20	0.34			
8	①	40	0.25	18.43	4×10^6	4.5×10^6
	②	10	0.35			
	③	20	0.40			
9	①	40	0.16	26.57	4×10^6	4.5×10^6
	②	10	0.26			
	③	20	0.25			
10	①	80	0.16	9.46	4×10^6	4.5×10^6
	②	20	0.26			
	③	50	0.25			
11	①	80	0.16	4.76	4×10^6	4.5×10^6
	②	20	0.26			
	③	50	0.25			

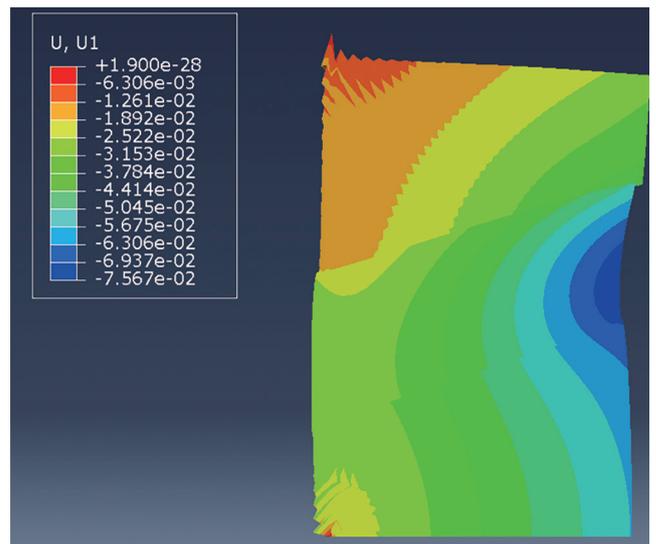


图 3 模型 1 位移云图
Fig. 3 Displacement contour of model 1

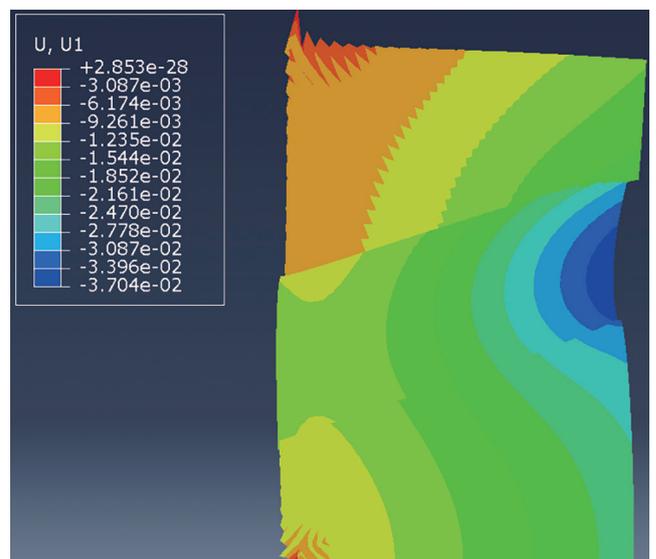


图 4 模型 2 位移云图
Fig. 4 Displacement contour of model 2

面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 4.37 cm、2.62 cm、0.87 cm。

2.2.3 泊松比对于复合盐膏层界面错动的影响

a. 模型 7

在模型 1 的基础上, 保持其他边界条件不变, 改变各个地层泊松比的大小, 建立模型 7, 模型 7 模拟结果如图 9 所示。

模型 7 与模型 1 相比, 界面错动量变小, 第二层与第三层在纵向上的错动量趋于均匀。在与套管交界

面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 1.63 cm、2.96 cm、2.71 cm。

b. 模型 8

继续增大泊松比, 建立模型 8, 模型 8 模拟结果如图 10 所示。

继续增大泊松比, 各层的界面错动均变小了, 同时第二、三层的错动量更加均匀, 趋于一致。在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 1.53 cm、2.62 cm、2.61 cm。

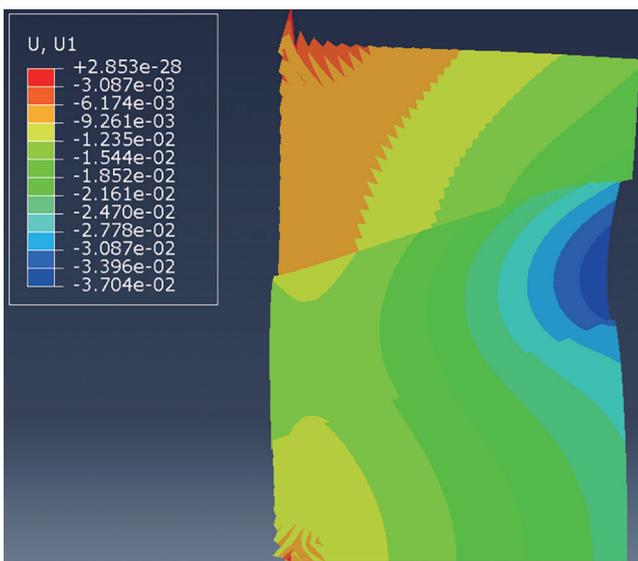


图 5 模型 3 位移云图

Fig. 5 Displacement contour of Model 3

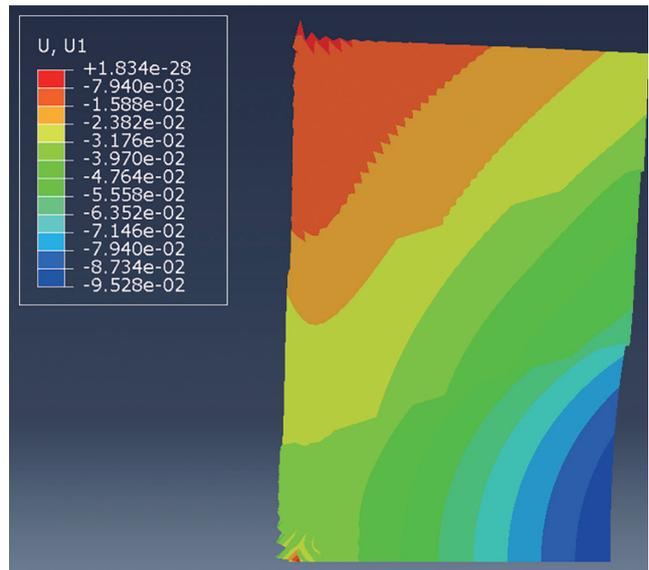


图 6 模型 4 位移云图

Fig. 6 Displacement contour of Model 4

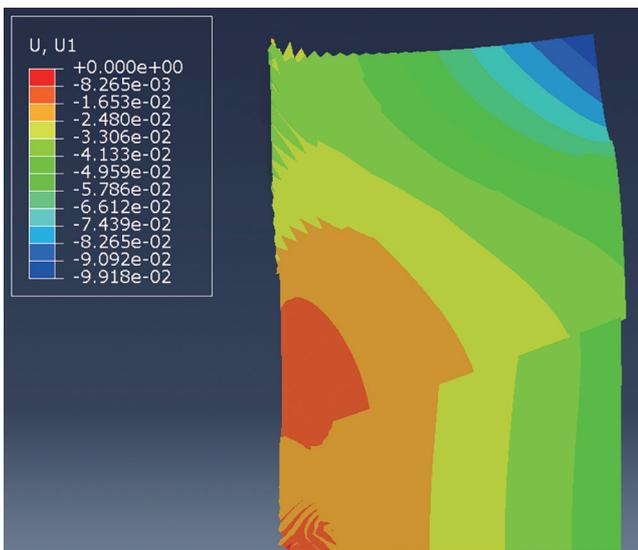


图 7 模型 5 位移云图

Fig. 7 Displacement contour of Model 5

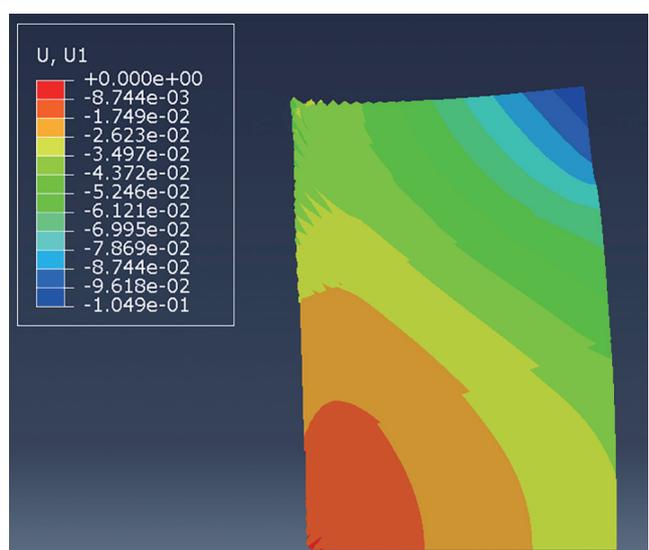


图 8 模型 6 位移云图

Fig. 8 Displacement contour of Model 6

2.2.4 地层倾角对复合盐膏层界面错动的的影响

a. 模型 9

在模型 1 的基础上，保持其他边界条件不变，增大地层的倾角，建立模型 9，模型 9 模拟结果如图 11 所示。

与模型 1 相比，在其他条件不变时，当地层倾角变大后，地层界面错动量变小。在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 1.87 cm、3.12 cm、3.10 cm。

b. 模型 10

在模型 1 的基础上，减小地层倾角，建立模型 10，模型 10 模拟结果如图 12 所示。

当地层倾角减小后，地层的界面错动量增大，且在各个地层与套管的接触面处的错动量更加均衡。在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 1.87 cm、3.12 cm、3.10 cm。

c. 模型 11

在模型 10 的基础上，继续减小地层倾角，建立模型 11，模型 11 模拟结果如图 13 所示。

继续减小地层倾角后，各层的界面错动量继续变大，同时，各层与套管的接触面处的界面错动量更加均匀。在与套管交界面处的最大错动量从第一层到第三层依次为 1.93 cm、3.21 cm、3.20 cm。

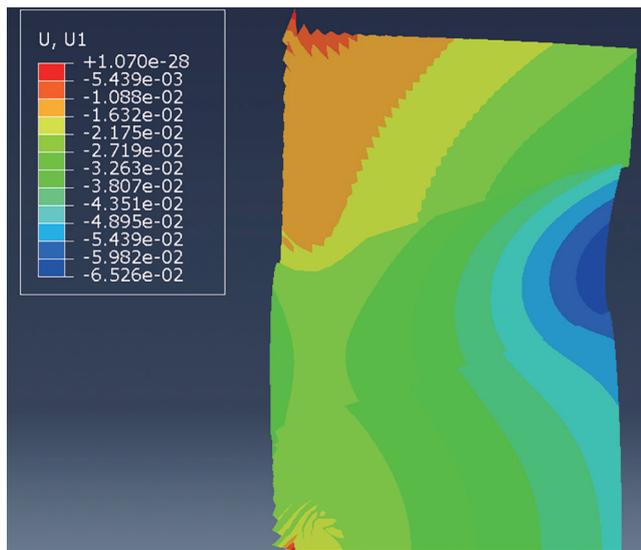


图 9 模型 7 位移云图

Fig. 9 Displacement contour of Model 7

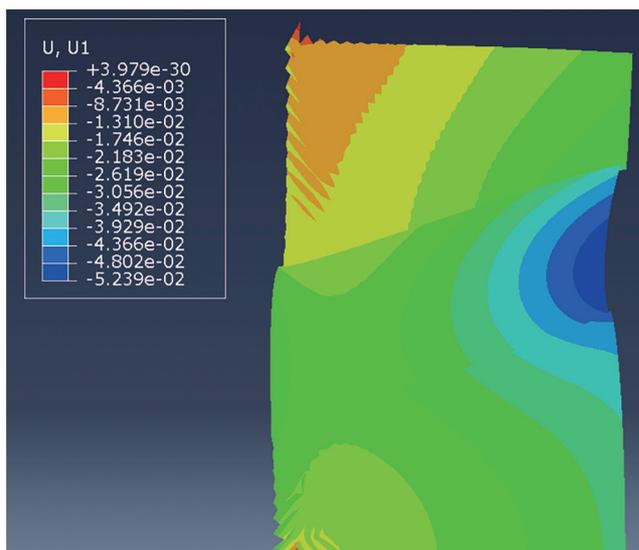


图 10 模型 8 位移云图

Fig. 10 Displacement contour of Model 8

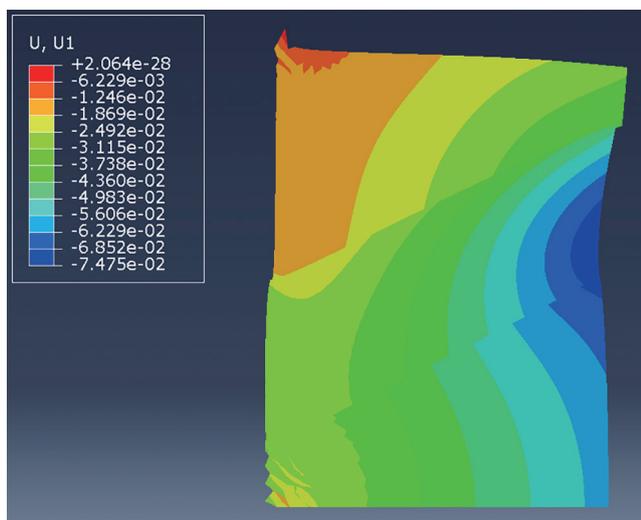


图 11 模型 9 位移云图

Fig. 11 Displacement contour of Model 9

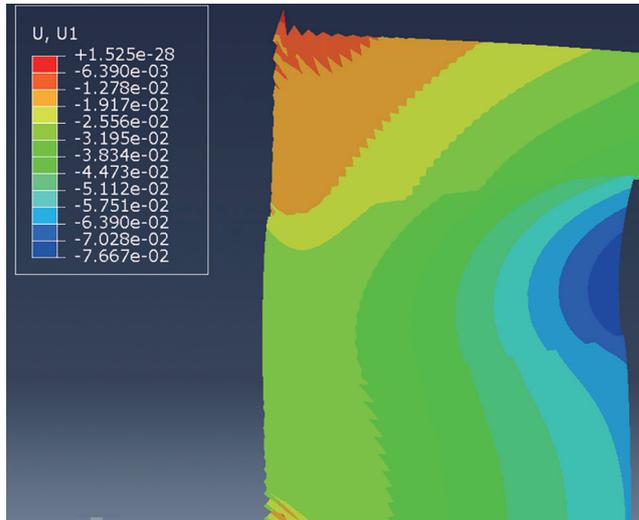


图 12 模型 10 位移云图

Fig. 12 Displacement contour of Model 10

2.2.5 蠕变对于地层错动的影响

针对蠕变对于地层错动的影响,建立了两个模型

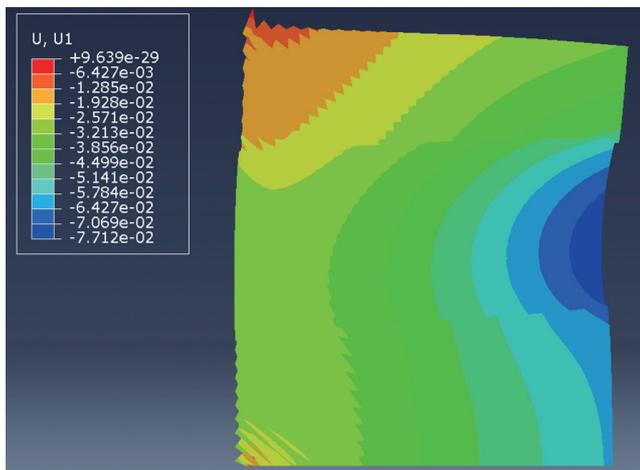


图 13 模型 11 位移云图

Fig. 13 Displacement contour of Model 11

进行对比实验。由于蠕变过程很漫长,为了方便计算,本文简化了模型的边界条件,用位移代替载荷的方式来建立模型。模型 12 是蠕变模型的比对模型实验,同样用位移代替载荷,蠕变时间为 10 000 s。模型 12 和蠕变模型实验结果如图 14 和图 15 所示。

模型 12 产生的地层错动为 1.75 cm,而加入蠕变后,地层的错动量为 1.77 cm,蠕变加剧了地层错动。

3 复合盐膏层界面错动模型结果分析

经过大量的文献调研和对典型案例的分析发现,复合盐膏层发生界面错动的主要影响因素有:(1)地层因素,包括复合盐膏层地层弹性模量 E 、泊松比 ν 以及地层倾角 θ ;(2)钻完井工程因素,包括套管结构、固井质量、井筒尺寸、抗挤安全系数、抗挤强度和等效外挤载荷等施工参数。本文针对地层因素,以盐膏层

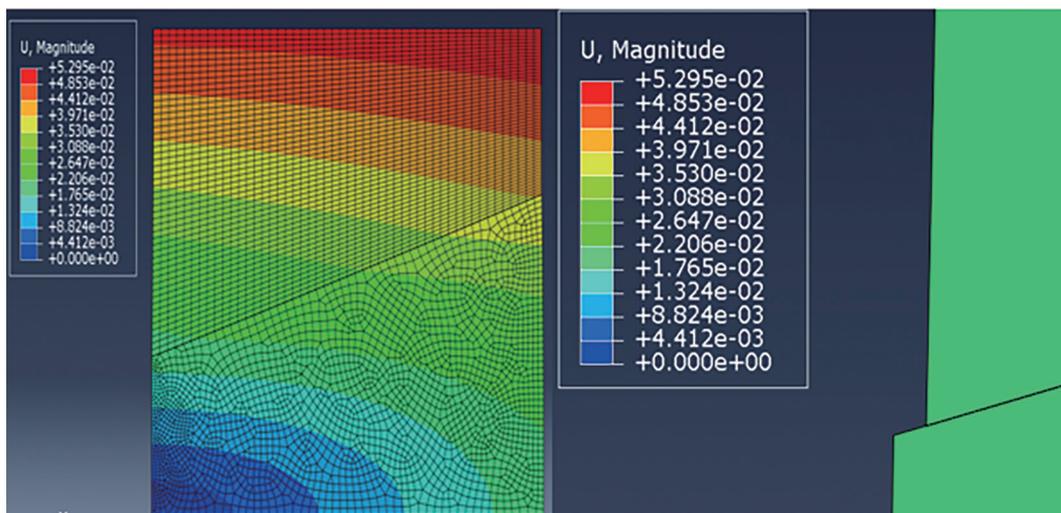


图 14 模型 12 产生的错动

Fig. 14 The dislocation generated by model 12

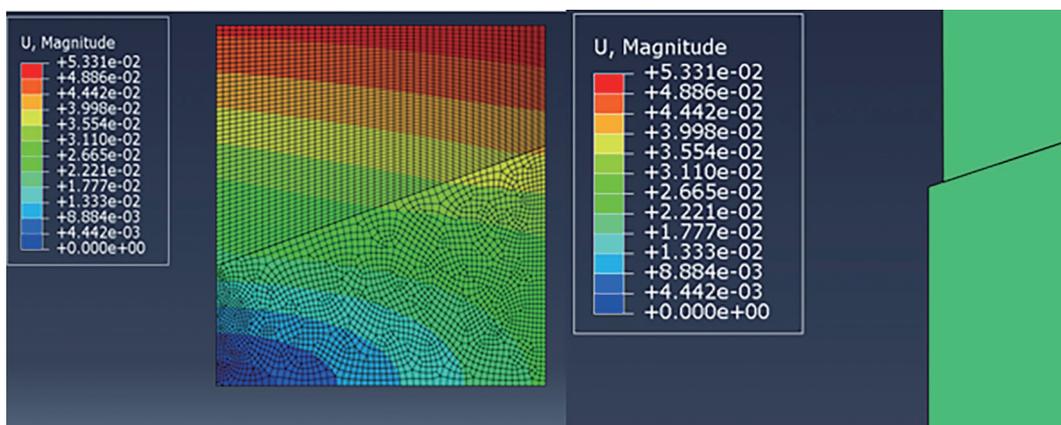


图 15 蠕变产生的错动

Fig. 15 Dislocation caused by creep

地层弹性模量 E 、泊松比 ν 以及地层倾角 θ 为变量进行模型建立,结合建模结果,对盐膏层地层弹性模量 E 、泊松比 ν 以及地层倾角 θ 对于界面错动的影响进行分析。

3.1 地层弹性模量

建立模型 1、模型 2 和模型 3,分析了地层弹性模量对于复合盐膏层界面错动的影响,绘制了地层弹性模量与地层界面错动量变化关系曲线(图 16)。

在地层倾角、泊松比和地应力等其他边界条件不变的情况下,地层的弹性模量增大时,复合盐膏层各个层的界面错动量会随之变小。因此,在地层弹性模量越小的地层中,因界面错动而产生套损的可能性越大。

3.2 地层泊松比

为了研究地层泊松比对于复合盐膏层界面错动的影响,建立了模型 1、模型 7 和模型 8。绘制了地层泊松比与地层界面错动量变化关系曲线如图 17 所示。

在地层倾角、地层的弹性模量和地应力等其他边界条件不变的情况下,当地层的泊松比增大时,复合盐膏层各个层的界面错动量变小。因此,在泊松比越大的地层,因界面错动而产生套损的可能性越小。

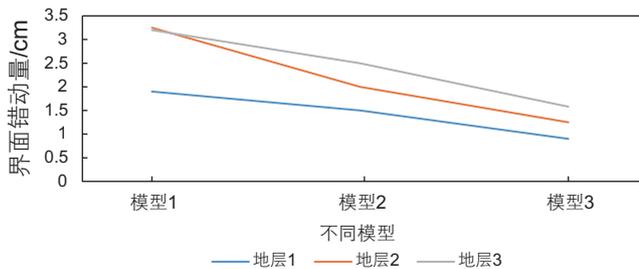


图 16 地层弹性模量与地层界面错动量变化关系曲线
Fig. 16 relation curve between formation elastic modulus and formation interface dislocation momentum

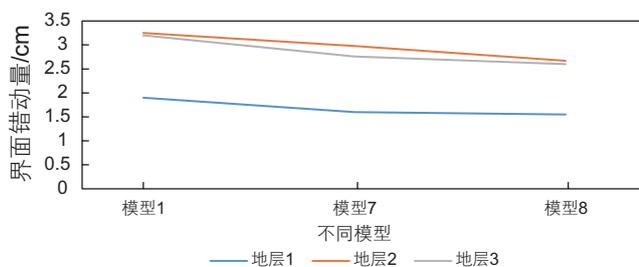


图 17 地层泊松比与地层界面错动量变化关系曲线
Fig. 17 Relation curve between poisson's ratio of formation and momentum change of formation interface

3.3 地层倾角

为了研究地层倾角对于复合盐膏层界面错动的影响,建立了模型 1、模型 9、模型 10 和模型 11。绘制了地层泊松比与地层界面错动量变化关系曲线(图 18)。

当地层弹性模量、地层泊松比与地应力等其他条件不变时,地层倾角变大,界面错动的位移量变小;地层倾角变小,界面错动的位移量则随之变大。但倾角对于界面错动的影响较小,而且各层与套管的接触面处的位移量趋于均匀。分析认为,当地层倾角减小的时候,虽然因界面错动而产生套管损坏的几率减小,但是,套管被挤毁的可能性并没有降低。

除了以上的结果,对比模型 1、模型 4、模型 5 和模型 6 可以发现,各层的弹性模量的排列次序对于界面错动的位移大小同样存在一定的影响,尤其是当弹性模量从上到下依次增大时,地层的界面错动量会比其他排列次序更小。

综上所述,地层弹性模量与界面错动量成反比,即同等条件下地层弹性模量越大,界面错动量越小;地层泊松比与界面错动量成反比,即同等条件下地层泊松比越大,界面错动量越小;地层倾角与界面错动量成反比,即同等条件下地层倾角越大,界面错动量越小。因此,在进行钻井作业套管设计时要注意地层弹性模量小、泊松比小、地层倾角小的地层的界面错动可能对套管的影响。

3.4 蠕变条件对套管损坏的影响

对比弹性模型和蠕变模型的位移云图可以看到,弹性产生的地层错动 1.75 cm,而加入蠕变后,在 10 000 s 蠕变时间条件下地层的错动量为 1.77 cm,蠕变加剧了地层的错动。可以预见,随着时间的增长,蠕变模型产生的地层错动量会越来越大。

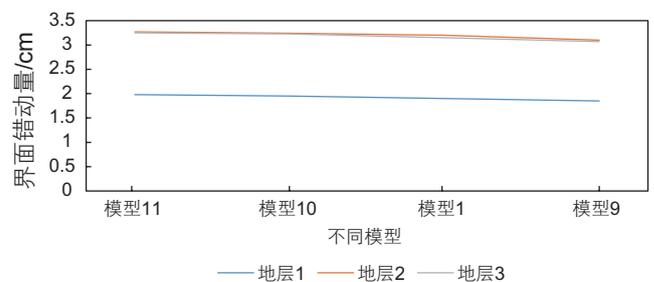


图 18 地层泊松比与地层界面错动量变化关系曲线
Fig. 18 Relation curve between poisson's ratio of formation and dislocation momentum of formation interface

因此, 可以认为复合盐膏层在蠕变条件下会产生更大的错动量, 从而导致套管损坏。在进行钻井作业套管设计时要特别注意蠕变地层对套管的影响, 并要特别针对蠕变进行相应的套管优化。

4 结论与建议

4.1 结论

本文主要探究了地层倾角、地层弹性模量和地层泊松比在复合盐膏层中对于界面错动的影响。其中地层弹性模量对于界面错动的影响是: 在地层倾角、泊松比和地应力等其他边界条件不变的情况下, 当地层的弹性模量增大时, 复合盐膏层的各个层的界面错动量会随之变小。地层泊松比对于界面错动的影响是: 在地层倾角、地层的弹性模量和地应力等其他边界条件不变的情况下, 当地层的泊松比增大时, 复合盐膏层各个层的界面错动量变小。地层倾角对于界面错动的影响是: 当地层弹性模量、地层泊松比与地应力等其他条件不变时, 地层倾角变大, 界面错动的位移量变小; 地层倾角变小, 界面错动的位移量则随之变大, 同时各层与套管的接触面处的位移量更加均匀。

4.2 对于套管设计的建议

复合盐膏层中由于岩性变化多样, 夹层、互层多且薄, 发生界面错动而导致的套管剪切破坏的几率极大。在地层弹性模量和地层泊松比较小、或者是地层倾角较大的地层钻进时, 应该尤为注意可能发生的因界面错动而产生的套管剪切破坏, 应该使用强度更大的套管, 以此来降低产生钻井事故的风险。而对于地层倾角较小的地层, 则应适当注意防止套管挤毁。因

此, 在油田钻井作业正式开始之前, 应该尽可能全面地收集油田的地质数据, 尤其是在复合盐膏层中进行钻井作业前, 地层的弹性模量、泊松比和地层倾角等参数应尽可能的详细、准确, 以避免可能出现的钻井事故或者套管损坏问题, 节省钻井成本, 提高钻井作业的安全性, 保证油田的经济效益。

复合盐膏层的弹性模量、泊松比和地层倾角都能够影响界面错动的错动量, 合理选择套管的材料、钢级、壁厚以及直径都能够避免可能出现的套管剪切破坏。针对复合盐膏层可能出现的界面错动引发的套管剪切破坏提出以下几点设计建议:

(1) 提升套管强度

套管的材料决定了套管的强度, 合理选用套管材料, 增加套管的设计强度, 将有效避免在错动层处的套管出现剪切破坏而导致套管失效。根据数值模拟结果, 界面错动量最大的位置一般出现在上线两种不同地层的交界处, 在进行套管结构设计时, 可以根据地层资料, 在地层交界处设计使用强度更高的套管, 提升套管的抗错动能力。

(2) 适当增大套管直径和壁厚

同样的材料和钢级的条件下, 壁厚越大的套管抗剪切强度越大。因此, 在界面错动层采用大壁厚的套管, 将有效避免套管剪切破坏事故的发生。

与此同时, 套管的直径也对套管的抗剪切能力有一定的影响, 采用大直径套管将有效降低套管损坏的概率。

(3) 合理利用水泥环

在套管与地层之间, 存在水泥环。水泥环的作用不仅仅是固定套管, 还可以在地层界面错动发生时, 在套管和地层之间起到缓冲的作用, 因此应用优质的水泥浆体系, 合理设计水泥环, 并且根据不同的现场条件合理选用水泥添加剂, 提高水泥环的抗剪切能力, 也就是降低了套管的剪切破坏概率。

参考文献

- [1] BACK S, VAN G H, REUNING L, et al. 3D seismic geomorphology and sedimentology of the chalk group, southern Danish North Sea [J]. *J Geol Soc*, 2011, 168(2): 393-406.
- [2] HUDEC M, JACKSON M. Terra infirma: understanding salt tectonics[J]. *Earth Sci Rev*, 2007, 82(1-2): 1-28.
- [3] 徐磊, 操应长, 王艳忠, 等. 东营凹陷古近系膏盐成因模式及其与油气藏的关系[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(3): 30-39. [XU L, CAO Y C, WANG Y Z, et al. Genetic model of salt gypsum rock of Paleogene in Dongying depression and its relationship with hydrocarbon reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2008, 32(3): 30-39.]
- [4] 汤良杰, 余一欣, 陈书平. 含油气盆地盐构造研究进展[J]. *地质前缘*, 2005, 12(4): 375-383. [TANG L J, YU Y X, CHEN S P. Major developments of research of salt tectonics in oil-gas-bearing basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 375-383.]
- [5] URAI J L, SPIERS C J, ZWART H J, et al. Weakening of rocksalt by water during long-term creep[J]. *Nature*, 1986, 324: 554-557.

- [6] WAWERSIK W R, ZEUCH D H. Modeling and mechanistic interpretation of creep of rock salt below 200°C[J], *Tectonophysics*, 1986, 121: 125–152.
- [7] CRISTESCU N D, HUNSCHE U. Time effects in rock mechanics[M]. John Wiley & Sons, 1998, ISBN 0–471–95517–5.
- [8] HUNSCHE U. HAMPEL A. Rocksalt – the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository[J]. *Engineering Geology*, 1999, 52: 271–291.
- [9] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(11): 1602–1604. [YANG C H, CHEN F, ZENG Y J. The research of relation between creep and damage of rocksalt [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(11): 1602–1604.]
- [10] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩蠕变特性和本构关系研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(8): 1267–1271. [LIU J, YANG C H, WU W, et al. Study on creep characteristics and constitutive relation of rock salt. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1267–1271.]
- [11] 任松, 郭松涛, 姜德义, 等. 盐岩蠕变相似模型及相似材料研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 106–110. [REN S, GUO S T, JIANG D Y, et al. Study of creep similar model and creep equivalent material of salt rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 106–110.]
- [12] 胡其志, 冯夏庭, 周辉. 考虑温度损伤的盐岩蠕变本构关系研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2245–2248. [HU Q Z, FENG X T, ZHOU H. Study of creep model of rock salt with thermal damage considered [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2245–2248.]
- [13] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007. [WANG Z Y, LI Y P. The theory and numerical modeling of rock rheology [M]. Beijing: Science Press, 2007.]
- [14] 王志荣, 李亚坤, 张利民, 等. 薄层状盐岩地下储气库工程地质条件及可行性分析[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(1): 148–154. [WANG Z R, LI Y K, ZHANG L M, et al. Analysis of the feasibility and engineering condition of underground gas storage in thin salt rock [J]. *Journal of engineering geology*, 2015, 23(1): 148–154.]
- [15] 葛伟凤, 陈勉, 金衍, 等. 深部盐膏岩地层套管磨损后等效应力分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(1): 75–79. [GE W F, CHEN M, JIN Y, et al. Analysis of equivalent stress on casings after casing wear in deep salt-gypsum formation[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2013, 37(1): 75–79.]
- [16] 邓金根. 控制油井盐层段流变缩径的泥浆密度的计算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(6): 522–528. [DENG J G. Calculation method of mud density to control borehole closure rate [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(6): 522–528.]
- [17] 唐继平, 王书琪, 陈勉. 盐膏层钻井理论与实践. [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. [TANG J P, WANG S Q, CHEN M. The drilling theory and application of salt-gypsum layer [M]. Beijing: Petroleum Engineering Press, 2004.]
- [18] 梁卫国. 盐岩溶腔二氧化碳地质储存研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, (z2): 1545–1550. [LIANG W G, Investigation on Carbon Dioxide Geologic Sequestration in Salt Carvers [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, (z2): 1545–1550.]
- [19] CARTER N L, HORSEMAN S T, RUSSEL J E, et al. Rheology of rock-salt[J], *Journal of Structural Geology*, 1993, 15: 1257–1271.
- [20] HEARD H C, RYERSON F J. Effect of cation impurities on steady-state flow of salt: in Hobbs, B. E. & Heard, H. C. (eds), *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies*, AGU Geophysical Monograph Series: 1986, 36: 99–115.
- [21] PEACH C J, SPIER C J. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock[J], *Tectonophysics*, 1996, 256: 101–128.
- [22] HAMPEL A. Description of the creep of rock salt with the composite model – II. Steady state creep. Aubertin, M., Hardy Jr., H. R. (Eds.), *The Mechanical Behavior of Salt IV*; Proc. of the 4th Conf., (MECASALT IV), Montreal 1996. Trans Tech Publications, Clausthal: 1996. 287–299.
- [23] URAI J L, SPIERS C J. The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation 2007. In: M. Wallner, K. Lux, W. Minkley, H. H. Jr (eds.), *The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt Hannover*.
- [24] URAI J L, SCHLEDER Z, SPIERS C, et al. Flow and Transport Properties of Salt Rocks. 2008. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. and Nelskamp, S. (eds.), *Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg: 277–290.
- [25] BEREST P, BLUM P A, CHARPENTIER J P, et al. Very slow creep tests on rock samples[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 42: 569–576.
- [26] URAI J L, SPIERS C J. The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation[J]. 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, MAY 22–25, 2007.
- [27] LI S Y, URAI J L. Rheology of rock salt for salt tectonics modeling[J]. *Petroleum science*, Nov 2016: 712–724.
- [28] 郭印同. 盐膏岩地层油气井套管损坏机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2015. [GUO Y T. Study on casing damage mechanism of oil and gas wells in salty rock formations [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.]
- [29] 张广清, 陈勉, 耿宇迪, 等. 松软地层套管损坏的影响因素研究[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(1): 112–115. [ZHANG G Q, CHEN

M, GENG Y D, et al. Research on factors affecting casing damage in soft formations [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32 (1): 112-115.]

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)