

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.02.004

## 套管水泥环组合应力计算边界条件分析

李国庆

(中国石油大庆钻探工程公司钻井三公司,黑龙江大庆 163413)

**摘要:**合理的套管应力计算是套管柱强度设计和套管损坏判别的依据。目前常用计算套管应力的方法是将非均匀地应力作用于已经形成的套管水泥环组合体之上,再根据计算结果进行套管应力及变形分析,而实际上非均匀地应力所引起的应力集中效应在固井之前已经在井壁岩石处释放,并不能作用到套管水泥环组合体之上。在非均匀地应力作用下一般形成椭圆形井眼,水泥凝固之前井壁岩石在非均匀地应力和井内液柱压力的作用下已经达到平衡,套管与水泥环组合不需要承担由非均匀地应力所产生的载荷,短期内套管水泥环组合承受均匀的液柱压力;油田长期开发过程中由于地层岩石具有流变性,逐渐将部分甚至全部垂向地应力转嫁到套管水泥环组合体之上,使其承受均匀地应力的作用,从而造成套管被挤扁和缩径。非均匀地应力形成的椭圆形水泥环改变了套管柱周向应力分布,但并不能将非均匀地应力作为套管水泥环应力计算的边界条件。

**关键词:**套管水泥环 边界条件 非均匀地应力 套管损坏

中图分类号:TE21 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2012)02-0020-05

## Analysis of Boundary Condition of Stress Calculation on Casing/Cement-Sheath

Li Guoqing

(No. 3 Drilling Company, Daqing Drilling & Exploration Engineering Company, Daqing, Heilongjiang, 163413, China)

**Abstract:** Reasonable calculation of casing stress is the basis for design of casing string strength and for judging whether casing failure happened. At present, the common method of casing stress calculation is to apply the non-uniform in-situ stress to the casing/cement-sheath. Then according to the calculation results, casing string stress and deformation are analyzed, but in fact, stress concentration effect caused by non-uniform in-situ stress is already released on sidewall rock before well cementation, and can not be applied to casing/cement-sheath. Usually an oval hole is formed on the effect of non-uniform in-situ stress, the sidewall rock already reaches balance under the effect of non-uniform in-situ stress and fluid pressure before cement setting, so the load caused by non-uniform in-situ stress is not taken by casing/cement-sheath, and in short period uniform stress of salt water column is taken by casing/cement-sheath. In the long period development of oilfield, due to rheological property of formation rock, some even all of vertical crustal stress will be taken forward to casing/cement-sheath, then casing/cement-sheath will take the effect of uniform crustal stress, what is the main reason for casing collapse and necking down. The circumferential stress distribution is changed by oval cement sheath which is formed by non-uniform in-situ stress. But non-uniform in-situ stress can not be concerned as the boundary condition of stress calculation on casing/cement-sheath.

**Key words:** casing/cement-sheath; boundary condition; non-uniform in-situ stress; casing failure

油气井套管损坏是目前各大油田尤其是老油田所面临的棘手问题,由此造成了巨大的经济损失<sup>[1-2]</sup>。目前套管损坏问题主要从预防和修复两方面入手,即进行合理的套管柱强度设计和根据套管变形量进行套损早期判别修复,而这都要以准确的套管柱应力计算为基础。现有套管柱应力计算都以

收稿日期:2010-03-08;改回日期:2012-02-13。

**作者简介:**李国庆(1959—),男,黑龙江齐齐哈尔人,1982年毕业于大庆石油学院钻井工程专业,2009年获中国地质大学(北京)地质工程专业博士学位,总工程师,高级工程师,主要从事油气井工艺理论方面的研究。

**联系方式:**(0459)4891544。

非均匀地应力作为边界条件,即先在没有施加地应力的地层上钻孔、下套管固井,然后对套管水泥环组合施加非均匀地应力<sup>[3-7]</sup>,从而得出非均匀地应力对套管应力的影响,以及在该条件下的套管变形。但非均匀地应力在钻孔之前就已经存在<sup>[8]</sup>,在其作用下钻井过程中一般形成椭圆形井眼,钻井以及固井过程中靠井内液柱压力平衡一部分地应力的作用,此时非均匀地应力所引起的载荷作用不到水泥环和套管上。基于此思想,笔者提出了合理的套管水泥环组合力学模型边界条件。

## 1 固井之前井眼形态

油气井井眼形成后,会打破原有地下力学系统的平衡,井眼周围岩石应力集中,致使油气井井壁不稳定。由于地质构造的形成特征,地层通常受非均匀地应力的作用,在该地应力作用下井眼通常为椭圆形(如图 1 所示),目前大多数井眼的井径测井曲线也证明了这一点。形成椭圆形井眼的原因很多,包括非均匀地应力作用下井眼的弹性变形以及井壁岩石的剪切失稳破坏。以往的计算表明,井壁发

生弹性变形的变形量跟井眼尺寸相比可以忽略不计,即椭圆形井眼主要是由井壁岩石剪切失稳造成的。井壁岩石发生剪切破坏的原因可分为化学和力学两方面,笔者在此主要分析力学原因引起的破坏。

对于直井,设远场水平地应力分别为  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$ ,井内液柱压力为  $p_w$ ,井壁周围岩石应力分布计算公式为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cdot \left( 1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) \left( 1 - 3 \frac{r_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + \frac{r_w^2}{r^2} p_w \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{r_w^2}{r^2} p_w - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \frac{r_w^2}{r^2} p_w \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) \left( 1 + 3 \frac{r_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \quad (3)$$

式中:  $\sigma_H$  为最大水平主应力, MPa;  $\sigma_h$  为最小水平主应力, MPa;  $p_w$  为井内液柱压力, MPa;  $\sigma_r$  为径向应力, MPa;  $\sigma_\theta$  为切向应力, MPa;  $r_w$  为井眼半径, m;  $r$  为井壁某点距井眼轴线的距离, m;  $\tau_{r\theta}$  为剪切应力, MPa。

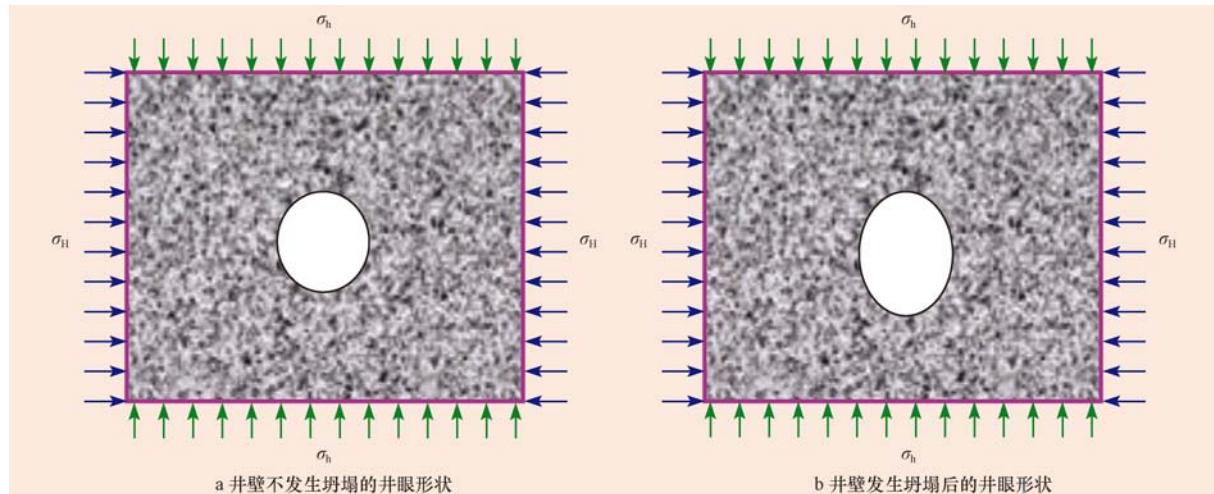


图 1 非均匀地应力作用下的井眼形状

Fig. 1 The wellbore shape under non-uniform in-situ stress

井壁岩石的剪切破坏是由于井内钻井液密度过低所致。非均匀地应力引起井壁周围各向应力不均,必然造成在不同井周角上保持井壁岩石不发生坍塌所需要的钻井液密度(井内液柱压力)也不同。在计算地层坍塌压力时,必须保证井周各方向井壁岩石都能维持稳定。

根据莫尔强度理论,可由  $\tau-\sigma$  平面上的应力莫尔圆和莫尔包络线判断岩石内某点处于复杂应力状

态下是否被破坏。对于不同的岩石,莫尔强度条件的形式是不相同的,如页岩几乎不能承拉,所以包络线收缩到原点,或者在受拉象限的很小范围内,岩石力学中大多采用直线形式的包络线。

岩石的强度条件可以用库仑方程来表示:

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad (4)$$

式中:  $\tau$  为剪应力, MPa;  $\sigma$  为正应力, MPa;  $C$  为岩石内聚力, MPa;  $\varphi$  为岩石内摩擦角, ( $^\circ$ )。

根据应力莫尔圆关系,正应力和剪应力可以由 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 表示,则式(4)也可以表示为:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2C \cot \varphi} = \sin \varphi \quad (5)$$

式中: $\sigma_1$ 为最大主应力,MPa; $\sigma_3$ 为最小主应力,MPa。

根据该准则对非均匀地应力作用下的井眼椭圆度、井径扩大率与井眼内钻井液液柱压力的关系进行了计算,结果如图2所示。计算中所取基本数据: $H=2000$  m,  $\sigma_H=40$  MPa,  $\sigma_h=30$  MPa,  $r_w=0.115$  m,  $C=10$  MPa,  $\varphi=20^\circ$ 。

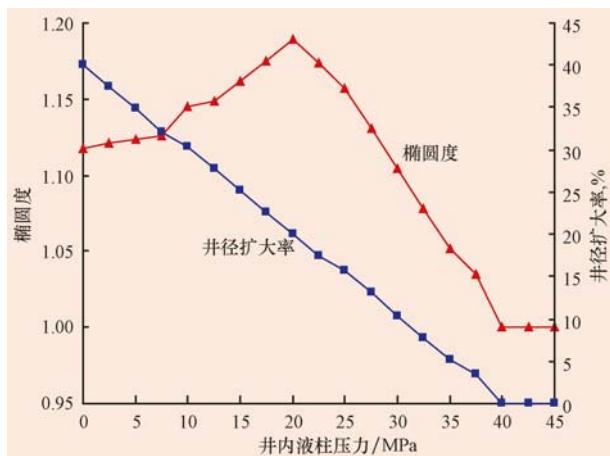


图2 井内液柱压力与井眼椭圆度、井径扩大率的关系曲线

Fig. 2 The relation curve of fluid pressure in wellbore with wellbore ellipticity and hole diameter enlarging rate

从图2可以看出:随着井内液柱压力的升高,井径扩大率逐渐减小,说明井内液柱维持井壁稳定的能力不断提高,即增加井内液柱压力可以防止井壁岩石发生剪切破坏;井眼的椭圆度随着井内液柱压力增大先增大后减小。分析其原因为:当井内液柱

压力较低时,井眼各个方向的岩石都发生剪切破坏,液柱压力越低,破坏范围越大,此时与井眼所受最大应力的 $90^\circ$ 方向破坏最严重,该方向为椭圆的长轴,在所受最大应力的 $0^\circ$ 方向也有所破坏,该方向为椭圆的短轴,随着液柱压力升高,椭圆的长轴和短轴都相应减小,但两者的比值即椭圆度却相应升高;当井内液柱压力增加到一定值时,井眼内液柱压力能够保持最大应力 $0^\circ$ 方向的井壁稳定,此时椭圆的短轴不再发生改变,随着液柱压力的继续升高,保持井壁稳定的角度范围不断扩大,椭圆长轴方向破坏范围也随之减小,长轴与短轴的比值相应减小,直至井内液柱压力增加到某一值时能够保证井眼内任何方向的岩石都不会发生剪切破坏,井眼的长轴与短轴相等,即在该液柱压力作用下井眼维持圆形。

目前钻井过程中所用钻井液的密度一般为 $1.2\sim1.4$  kg/L,根据计算可知,在该密度液柱压力作用下井壁都会发生不同程度的坍塌形成椭圆形井眼,其椭圆度为 $1.10\sim1.15$ 。坍塌后井壁岩石在非均匀地应力和井内液柱压力的作用下已经达到平衡,不能再继续施加到井眼形成之后的套管水泥环组合体上。

## 2 油田常用套管应力计算模型

常用的套管水泥环组合体的力学模型都是在其形成以后加上非均匀地应力,其建模过程如图3所示。该类模型认为在下套管注水泥之前,地层都没有受到非均匀地应力的作用,而在水泥凝固以后,该组合体才受到非均匀地应力的作用。由于地应力的

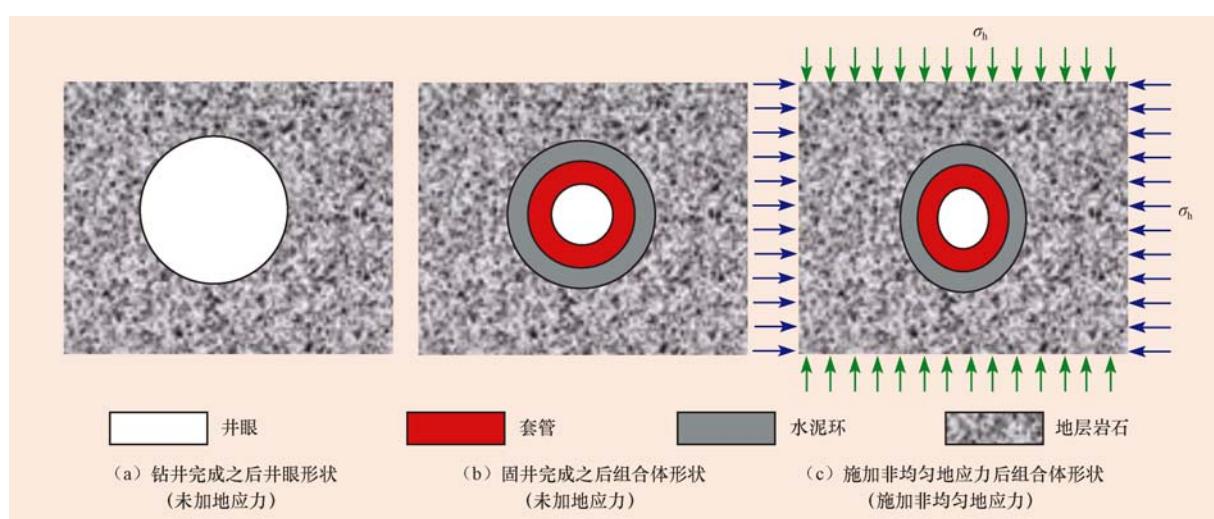


图3 常用套管水泥环组合力学模型建模思路

Fig. 3 The common mechanical model method for casing/cement-sheath

非均匀性使套管水泥环组合体发生变形,在此基础上分析套管的应力应变、水泥环对套管的保护作用以及计算套损量<sup>[9-13]</sup>。该建模思路与实际情况存在较大差别,其力学模型并不能真实地反映套管水泥环组合体在固井完成后的短期内以及长期开发条件下的应力变化。

### 3 计算边界条件分析

#### 3.1 固井完成后的短期内套管水泥环力学模型边界条件

在实际钻井和完井作业中,地应力已经存在,钻头旋转所产生的井眼为近似圆形,由于非均匀地应力的作用,在圆形井眼上产生应力集中,沿最小主应力方向的应力最大,会引起井眼发生剪切破坏,导致最终形成的井眼一般为椭圆形。该椭圆形井眼承受了非均匀地应力的作用,地应力所引起的应力已经得到释放,此时在井内液柱压力的作用下井眼保持

稳定。固井作业时,水泥浆顶替钻井液填充在椭圆形环形空间中,在水泥浆的凝固过程中,水泥颗粒、水泥与井壁之间以及水泥与套管之间形成一种空间网架结构,使水泥浆的一部分重量悬挂在井壁和套管上,即所谓“失重”,从而降低了水泥浆的液柱压力。水泥在初凝期强度很低,具有一定的可塑性,井壁和套管将通过变形恢复作用减小环空容积,对水泥浆的水化体积收缩进行一定程度的补偿,从而使体系表现出一定的弹性。在水泥初凝时,其静水压力被圈闭在水泥结构的孔隙中,形成孔隙压力,由于水泥在水化中生成的固相体积总是小于失去的液相体积,因而总体积不断减少,导致孔隙压力不断下降,甚至降为零,但目前常用的套管柱设计中通常认为,水泥浆凝固后水泥环所承受的压力为液柱压力。即水泥凝固以后井眼保持为椭圆形,套管与水泥环都已经不受非均匀地应力的影响,套管所受的外挤力为液柱压力,甚至更低。固井完成后的短期内套管水泥环建模过程如图 4 所示。

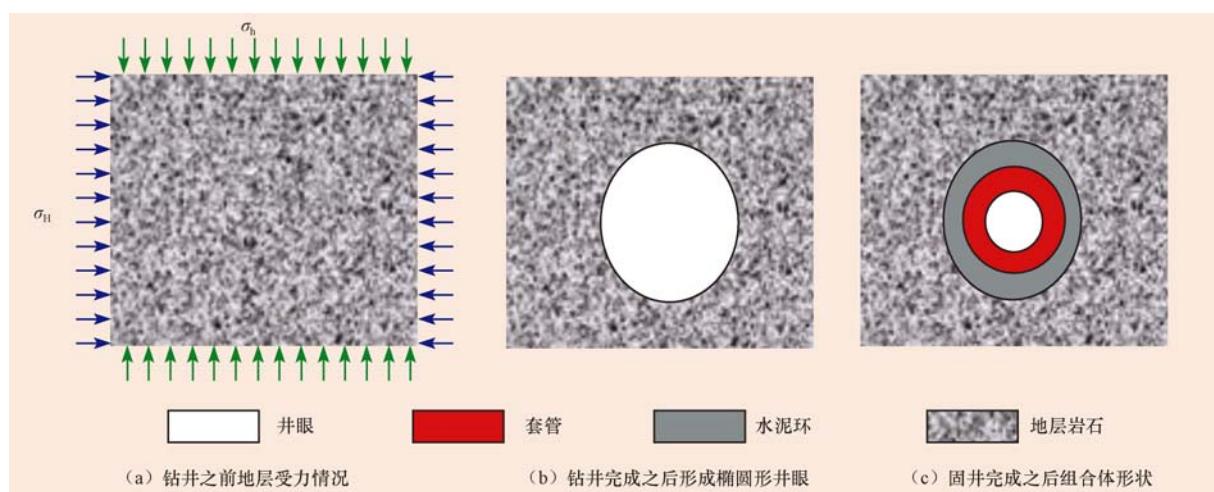


图 4 固井完成后的短期内套管水泥环力学模型边界条件

Fig. 4 Boundary condition of mechanical model on casing/cement-sheath in a short period after cementing

#### 3.2 长期开发条件下套管水泥环组合力学模型边界条件

固井完成后的短期内套管承受均匀液柱压力,但由于地层岩石大多具有流变性,同时注入水加快了岩石的流变速度。在开采过程中地层岩石在三维方向发生流变,这种应变受到套管和水泥环的抵制,流变地层施加给套管一个不断增加的外挤载荷,经过充分长的时间后外载荷趋于稳定,逐渐趋近为地层的上覆岩层压力。岩石的流变性将部分甚至全部上覆岩层压力转嫁到套管水泥环组合体上,当外载

荷超过套管的抗外挤强度时,套管产生屈服,其变形量不断增加,直至套管被破坏。此时套管水泥环组合承受的应力由液柱压力变为均匀的垂向地应力,在该应力作用下套管发生椭圆形变。

油田套管力学模型不能把非均匀地应力作为边界条件,但并不是说非均匀地应力与套管受力之间没有联系。油田后期开采过程中产生的高压、局部泥岩蠕变力、岩层整体滑移推动力等都会对已经形成的套管水泥环组合产生附加应力,在该附加应力作用下套管水泥环组合的应力分布与水泥环形状、厚度等有关,而非均匀地应力是决定水泥环形状、厚

度的直接原因。固井完成以后产生的附加应力对套管水泥环组合的影响则可以应用图 3 所示的建模过程进行计算,关于该思路的理论研究已经取得了丰硕的成果,笔者在此不再一一赘述。

## 4 结 论

1) 非均匀地应力一般会引起井壁发生剪切破坏形成椭圆形井眼,在注水泥固井之前非均匀地应力所引起的应力集中效应已经得到释放。

2) 在套管水泥环组合体上施加非均匀地应力进行力学计算的建模思路不符合工程实际情况,固井完成以后套管水泥环组合体不承受非均匀地应力所引起的载荷,短期内套管所承受的外挤力仅为液柱压力,甚至更低。

3) 由于地层岩石的流变性能够将垂向地应力转嫁到套管水泥环组合体上,此时套管水泥环组合承受均匀地应力的作用,在此地应力的作用下套管发生形变。因此,不能将非均匀地应力作为其力学模型的边界条件。

**作者附言:**现有套管水泥环组合力学模型对于套管柱设计做出了重要的贡献,笔者也曾经也采用过该模型,但随着认识的不断深入,逐渐意识到了其不合理的地方。但由于笔者水平有限,文中观点难免有不妥之处,敬请各位专家学者批评指正。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 廖华林,管志川,冯光通,等.深井超深井套管损坏机理与强度设计考虑因素[J].石油钻采工艺,2009,31(2):1-6.  
Liao Hualin, Guan Zhichuan, Feng Guangtong, et al. Casing failure mechanism and strength design considerations for deep and ultra-deep wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(2): 1-6.
- [2] 阚庆山,刘汝东,苏娟.套损井修复技术在中原油田的应用[J].断块油气田,2009,16(3):121-122.  
Kan Qingshan, Liu Rudong, Su Juan. Application of repairing technology for casing damage well in Zhongyuan Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(3): 121-122.
- [3] 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.  
Li Jun, Chen Mian, Zhang Hui, et al. Effects of cement sheath elastic modulus on casing external collapse load[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 2005, 29(6): 41-44.
- [4] 王耀峰,李军强,杨小辉,等.水泥环弹性模量和泊松比与地层性质匹配关系研究[J].石油钻探技术,2008,36(6):25-29.  
Wang Yaofeng, Li Junqiang, Yang Xiaohui, et al. Research on matching cement's elastic modulus and Poisson's ratio[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(6): 25-29.
- [5] 李茂华,徐守余,牛卫东.水泥环对油气井套管力学性能影响的分析计算[J].钻采工艺,2007,30(4):98-101.  
Li Maohua, Xu Shouyu, Niu Weidong. Analysis of effect of cement sheath on casing mechanical property in oil-gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(4): 98-101.
- [6] 殷有泉,陈朝伟,李平恩.套管-水泥环-地层应力分布的理论解[J].力学学报,2006,38(6):835-842.  
Yin Youquan, Chen Zhaowei, Li Ping'en. Theoretical solutions of stress distribution in casing-cement and stratum system[J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 38(6): 835-842.
- [7] 李军,陈勉,柳贡慧,等.套管、水泥环及井壁围岩组合体的弹塑性分析[J].石油学报,2005,26(6):99-103.  
Li Jun, Chen Mian, Liu Gonghui, et al. Elastic-plastic analysis of casing-concrete sheath-rock combination[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 99-103.
- [8] 李子丰,张永贵,阳鑫军.蠕变地层与油井套管相互作用力学模型[J].石油学报,2009,30(1):129-131.  
Li Zifeng, Zhang Yonggui, Yang Xinjun. Mechanics model for interaction between creep formation and oil well casing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 129-131.
- [9] 马旭,龚伟安,谢建华,等.套管水泥环的室内破坏试验及力学分析[J].石油机械,2000,28(4):15-18.  
Ma Xu, Gong Weian, Xie Jianhua, et al. Lab test of destruction of cement sheath outside casing[J]. China Petroleum Machinery, 2000, 28(4): 15-18.
- [10] 杨恒林,陈勉,金衍,等.套管水泥环刚度与强度对抗挤性能影响分析[J].天然气工业,2006,26(11):93-95.  
Yang Henglin, Chen Mian, Jin Yan, et al. Effects of stiffness and strength of casing/cement-sheath on collapsing strength [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11): 93-95.
- [11] 陈占峰,朱卫平,狄勤丰,等.岩盐地层中水泥环弹性模量和厚度对套管强度的影响[J].石油钻探技术,2009,37(5):58-61.  
Chen Zhanfeng, Zhu Weiping, Di Qinfeng, et al. Effects of cement sheath elasticity modulus and thickness on casing strength in salt beds[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5): 58-61.
- [12] 曾德智,林元华,李双贵,等.非均匀地应力下水泥环界面应力分布规律研究[J].石油钻探技术,2007,35(1):32-34.  
Zeng Dezhi, Lin Yuanhua, Li Shuanggui, et al. Study of stress distribution of cement sheath cross section non-uniform formation stress [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35 (1): 32-34.
- [13] 邹灵战,邓金根,曾义金,等.深井盐层套管非均匀载荷计算与套管设计方法研究[J].石油钻探技术,2008,36(1):23-37.  
Zou Lingzhan, Deng Jingen, Zeng Yijin, et al. Investigation of casing load calculation and casing design for deep salt formation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 23-37.