

煤层气多分支水平井完井管柱许可造斜率设计

闫相祯 张衍涛 王同涛 杨秀娟

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东 东营 257061)

摘 要:根据煤层气多分支水平井完井管柱在造斜段的受力变形特点,将完井管柱的变形分为线弹性、弹塑性和扁化变形(塑性流动)阶段,利用弹塑性大变形理论建立了完井管柱承受弯矩与造斜率间关系的计算模型,推导出造斜段完井管柱许可造斜率计算公式。对沁水盆地某煤矿使用的多分支水平井完井管柱的造斜率进行了模拟计算,并与室内实验值进行对比,分析了完井管柱的外径、壁厚和屈服强度对完井管柱许可造斜率的影响。计算结果表明:建立的煤层气多分支完井管柱许可造斜率计算模型与实验值具有很好的一致性,可满足工程需要;完井管柱从线弹性极限变形状态进入弹塑性极限变形状态,井眼许可造斜率变化很小;完井管柱线弹性、弹塑性和扁化变形阶段的许可造斜率随外径的增加而降低,随壁厚和屈服强度的增加而提高,但壁厚影响不显著。

关键词:多分支水平井;完井管柱;许可造斜率;弹塑性变形

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

Permitted build-up rate of completion strings in multi-branch CBM well

YAN Xiang-zhen, ZHANG Yan-tao, WANG Tong-tao, YANG Xiu-juan

(College of Storage & Transportation and Architectural Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: According to the field force state of completion strings, the deformations of completion strings in the bend part of multi-branch horizontal well in coal bed methane (CBM) exploration were divided into three phases, which were elastic phase, elastic-plastic phase and ovality phase. The large deformation theory was used to obtain the relationship between the bend subjected to completion strings and build-up rate of well. The equations of completion strings permitted build-up rate were obtained for different deformation phrases, respectively. The completion strings of the Qingshui Basin coal mine in Western China were studied as an example. The simulation results were verified by the experiments. Also, the influences of outer diameter, thickness and yield strength of completion strings on the permitted build-up rate were studied. The comprehensive results indicate that the equations of permitted build-up rate are agreement with the experiments results. The permitted build-up rates change small when the deformation of completion strings become from elastic phrase to elastic-plastic phrase. The permitted build-up rates of elastic phase, elastic-plastic phase and ovality phase decrease with outer diameter increasing and increase with the thickness and yield strength. The thickness of completion strings has unapparent affects on the permitted build-up rates.

Key words: multi-branch horizontal well; completion strings; permitted build-up rates; elastic-plastic deformation

多分支水平井(包括鱼骨型分支水平井)技术应用于煤层气开发过程中,能够最大限度地沟通煤层割理(微裂隙)和裂缝系统,增加井眼在煤层中的波及面积和泄气面积^[1-6],降低煤层裂隙内气液两相流的

流动阻力,大幅度提高单井产量,减少钻井数量。由于煤层气多分支水平井弯曲段造斜率大,一般可以达到 $3 \sim 10 (^{\circ})/m$,完井管柱在弯曲造段受到很大的弯曲载荷作用,将会产生很大的弯曲应力和塑性变形,

可能导致完井管柱发生弯曲挤毁破坏^[7-10]。煤层气一般埋深较浅,完井管柱下入过程中受到自重等载荷作用较小,造斜段完井管柱发生失效破坏主要是弯曲作用造成的,因此造斜段完井管柱造斜率的设计成为多分支水平井在煤层气开采过程中的关键技术之一。现阶段对多分支水平井完井管柱造斜段许可造斜率的研究主要以实物实验和有限元模拟计算为主,通用性较差、耗时且费用比较高。因此,笔者根据煤层气多分支水平井完井过程中管柱在造斜段受力变形特点,利用大变形理论建立了完井管柱受到弯曲载荷作用下的受力变形模型,得到了完井管柱受到弯矩与造斜率间的关系,研究了完井管柱的外径、壁厚和屈服强度对完井管柱许可造斜率的影响,为多分支水平井弯曲段许可造斜率设计和校核提供了参考和依据。

1 完井管柱造斜段力学模型

完井管柱在受到弯曲载荷作用下,使得完井管柱在弯曲内侧发生压缩作用,在外侧产生拉伸作用。在

造斜率比较小时,弯曲内外侧应力均比较小,完井管柱变形为线弹性变形;随着造斜率的增加,弯曲应力逐渐增加,使得部分区域的应力大于完井管柱的屈服强度,出现塑性区,完井管柱发生弹塑性变形;当完井管柱弯曲内外侧位置处的壁厚区域完全发生塑性变形,塑性区将沿着管柱截面向弯曲中心轴线移动,发生塑性流动,管柱将发生扁化变形^[7-8,11-13];当弯曲段完井管柱截面全部进入塑性区,发生塑性失稳,进入挤毁阶段,完井管柱承受弯矩载荷能力显著下降(图1)。因此,可以把煤层气多分支水平井完井管柱在造斜段的变形受力过程分为4个阶段:线弹性阶段、弹塑性阶段、扁化阶段(塑性流动)和挤毁阶段(塑性失稳)。由于挤毁阶段为瞬间过程,对造斜段完井管柱造斜率设计没有实际意义,因此本文分别对前3个阶段完井管柱受力变形进行分析,得出相应的许可造斜率。

为了便于计算和理论推导,假设^[10,14]:完井管柱轴线与井迹曲线平行;完井管柱材料为理想弹塑性材

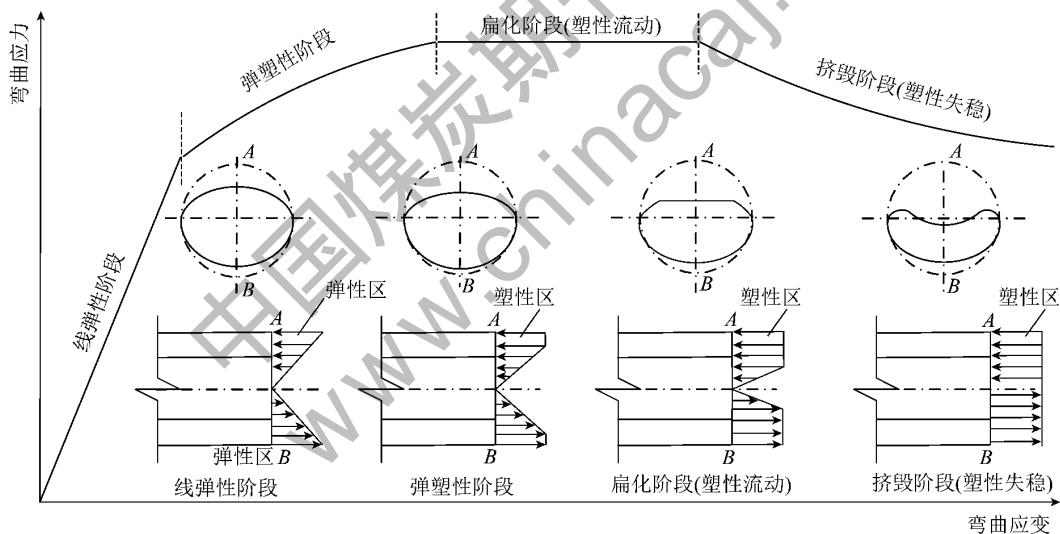


图1 弯矩载荷作用下完井管柱不同阶段的应力-应变

Fig. 1 Stress-strain of completion strings subjected in different phase

料。取多分支水平井弯曲段内的一段完井管柱作为研究对象,考虑到多分支水平井完井管柱造斜率比较大,完井管柱可能发生塑性变形,则需要引入大变形计算方法,在大挠度的情况下,曲率应写为 $1/\rho = d\theta/ds$,则挠曲线微分方程为

$$\frac{d\theta}{ds} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (1)$$

则有

$$\frac{d^2y}{dx^2} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^3} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (2)$$

式中 θ 为弯曲角度函数; s 为沿挠曲线长度; $M(x)$ 为

弯矩函数; E 为弹性模量,Pa; I 为惯性矩, m^4 ; y 为弯曲挠度函数; x 为距离原点位移变量。

当弯矩增加时,由弹性和塑性的本构关系^[15]可导出统一的应力-造斜率关系,即

$$\sigma = E \tilde{Z} k \quad (|k| \leq k_y) \quad (3)$$

考虑到实际使用方便,可以得到多分支水平井完井管柱在弯曲段中的弯矩-造斜率关系,即

$$\frac{M}{M_y} = \frac{k}{k_y} \quad (|k| \leq k_y) \quad (4)$$

$$\frac{|M|}{M_y} = \frac{2}{3\pi} \left[\left(5 - \frac{2k_y^2}{k^2}\right) \sqrt{1 - \frac{k_y^2}{k^2}} + \right.$$

$$\frac{3k}{k_y} \arcsin\left(\frac{k_y}{k}\right) \quad (k > k_y) \quad (5)$$

式中 σ 为弯曲应力, Pa; \tilde{z} 为计算点距离中性轴的距离, m; k 为弯曲段造斜率, ($^\circ$)/m; k_y 为线弹性变形阶段的完井管柱临界造斜率, ($^\circ$)/m; M 为弯曲段完井管柱上作用的弯矩, N·m; M_y 为线弹性变形阶段完井管柱极限弯矩, N·m。

1.1 线弹性阶段

在线弹性变形阶段,完井管柱受到的弯矩随着造斜率线性增加,当 k 大到某一数值 k_y 时,完井管柱外径上两点 A 、 B 将首先进入屈服,此时完井管柱截面上的应力分布如图 2(a) 所示。根据式(2)~(4)可以得到完井管柱弹性极限弯矩和许可造斜率为

$$M_y = \frac{2\sigma_y I}{D} \quad (6)$$

$$k_y = \frac{360\sigma_y}{\pi ED} \quad (7)$$

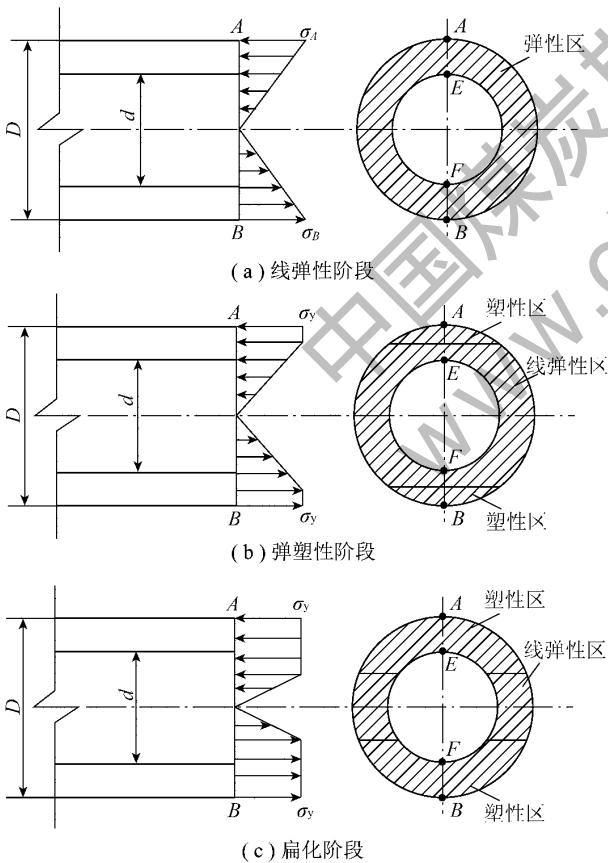


图 2 完井管柱应力

Fig. 2 The completion strings stress

1.2 弹塑性阶段

当 $k > k_y$ 时,随着造斜率进一步增大,完井管柱上塑性区的范围会逐渐扩大,当 $k = k_2$ 时,完井管柱横截面内径上两点 E 、 F 进入屈服,此时完井管柱横截面

上的应力分布及塑性区范围如图 2(b) 所示,这种应力状态称为完井管柱的弹塑性应力状态,此时弯矩已经不再随着造斜率线性增加,而是按照式(8)分布。则由式(2)、(5)得到完井管柱所受弯矩为

$$M_2 = \frac{4\sigma_y}{3} \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} +$$

$$\frac{\sigma_y}{16d} \left\{ D^4 \left[\arcsin \frac{d}{D} - \frac{d}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \times \left(1 - \frac{2d^2}{D^2}\right) \right] - \frac{\pi}{2} d^4 \right\} \quad (8)$$

所对应的井眼许可造斜率为

$$k_2 = \frac{11\ 520M_2}{\pi^2 E(D^4 - d^4)} \quad (9)$$

式中 M_2 为完井管柱弹塑性变形阶段承受的极限弯矩, N·m; k_2 为完井管柱弹塑性变形时许可造斜率, ($^\circ$)/m。

1.3 扁化阶段

在扁化阶段,随着造斜率的继续增加,塑性区域由 E 、 F 两点继续向完井管柱截面中轴线移动,此时完井管柱横截面上的应力分布如图 2(c) 所示。由于受到弯曲作用完井管柱已经出现明显的椭圆度,当 k 大到某一数值 k_3 时,完井管柱横截面全部进入屈服,完井管柱横截面产生塑性铰,将发生塑性失稳,出现挤毁的临界状态,称为完井管柱的扁化屈服状态,完井管柱挤毁阶段的极限弯矩为

$$M_3 = \frac{\sigma_s}{6} (D^3 - d^3) \quad (10)$$

所对应的井眼许可造斜率为

$$k_3 = \frac{11\ 520M_3}{\pi^2 E(D^4 - d^4)} \quad (11)$$

式中 M_3 为完井管柱扁化变形阶段承受的极限弯矩, N·m; k_3 为完井管柱的扁化屈服状态许可造斜率, ($^\circ$)/m。

2 算例分析及结果讨论

2.1 计算结果对比

为了验证计算结果的正确性和可靠性,笔者分别利用本文给出计算公式对沁水盆地某煤矿多分支水平井使用的完井管柱许可造斜率进行了模拟计算。同时,对 2 根尺寸为 $\phi 60.30\text{ mm} \times 6.45\text{ mm}$ 和 $\phi 73.00\text{ mm} \times 6.45\text{ mm}$ 、钢级为 N80 的完井管柱进行了室内弯曲试验,测得的实验值见表 1、2,并与本文计算结果相对比。试验仪器和设备主要:MTS 材料试验机、手动液压油泵、位移传感器和 YJ-21 电阻应

变仪等。试验完井管柱变形计算可以简化为一简支梁(图 3),受到集中载荷作用,试验主要对截面 MM 处的弯矩和弯曲度进行测试。

表 1 $\phi 60.30 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$ 完井管柱
试验值与本文计算值对比

Table 1 Comparison of calculated results and experimented values of $\phi 60.30 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$ completion strings

载荷/kN	0	3.5	5.5	11.5	15.0	18.0
弯矩/(kN·m)	0	1.98	3.12	6.50	8.48	10.17
实测弯曲度/((°)·m ⁻¹)	0	2.79	4.53	9.27	12.63	15.23
计算弯曲度/((°)·m ⁻¹)	0	2.86	4.51	9.40	12.92	15.83
实测弯曲半径/m	∞	20.54	12.65	6.18	4.54	3.76
计算弯曲半径/m	∞	20.03	12.70	6.10	4.43	3.62
相对误差/%	0	-2.45	0.44	-1.38	-2.24	-3.79

表 2 $\phi 73.00 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$ 完井管柱
试验值与本文计算值对比

Table 2 Comparison of calculated results and experimented values of $\phi 73.00 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$ completion strings

载荷/kN	0	6.00	10.00	24.75	30.50	33.00
弯矩/(kN·m)	0	2.51	4.19	10.37	12.78	13.83
实测弯曲度/((°)·m ⁻¹)	0	0.91	1.55	3.76	4.37	4.85
计算弯曲度/((°)·m ⁻¹)	0	0.92	1.54	3.81	4.47	4.76
实测弯曲半径/m	∞	62.96	36.97	15.24	13.11	11.81
计算弯曲半径/m	∞	62.28	37.21	15.04	12.82	12.04
相对误差/%	0	-1.09	0.65	-1.31	-2.24	1.89

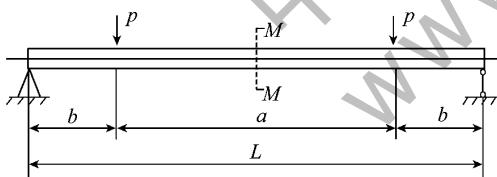


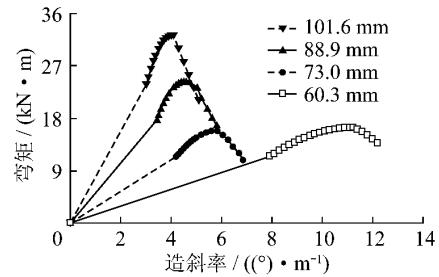
图 3 完井管柱弯曲试验

Fig. 3 The bending test of completion strings subjected

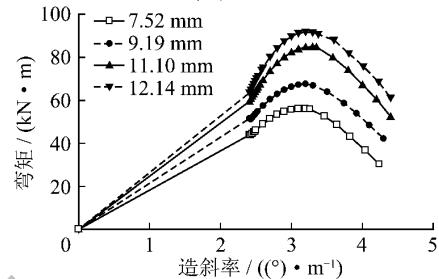
由表 1、2 可知,本文计算得到完井管柱在多分支水平井弯曲段受到的弯矩和弯曲度与实验结果具有很好的一致性,在线弹性变形阶段时,计算结果与实验误差一般在 1% 左右,而在弹塑性变形阶段一般在 3% 左右,说明计算模型具有很高的精度和准确度,可以满足实际工程计算要求。

2.2 影响完井管柱许可造斜率因素分析

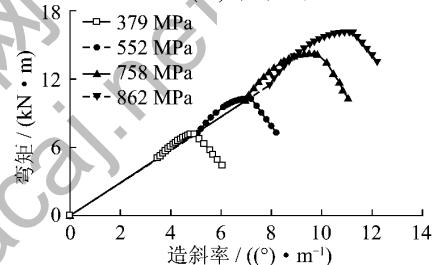
通过上述的分析和理论推导可知完井管柱的外径、壁厚和屈服强度对完井管柱的许可造斜率影响比较显著。笔者分别对上述 3 个参数进行模拟计算,分析了它们对完井管柱许可造斜率的影响,得到的计算结果如图 4 所示。



(a) 不同外径



(b) 不同壁厚



(c) 不同屈服强度

图 4 完井管柱弯矩与井眼造斜率关系

Fig. 4 Relationship between moment and built-up rate

多分支水平井完井管柱在弯曲段部分随着井眼造斜率的增加首先发生线弹性变形,管柱受到的弯矩载荷与造斜率成线性关系(图 4),当完井管柱弯曲内外侧管壁上的应力达到屈服应力时,管柱开始进入弹塑性变形阶段。完井管柱由线弹性极限变形状态进入弹塑性极限变形状态,许可造斜率变化较小,说明当完井管柱进入线弹性屈服状态后,井眼造斜率略有增加,进入塑性屈服状态,两者之间的许可造斜率变化很小。例如, $\phi 73.00 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$ 完井管柱,线弹性极限许可造斜率为 $4.19 (^\circ)/\text{m}$,弹塑性极限许可造斜率为 $4.89 (^\circ)/\text{m}$,建议在多分支水平井完井管柱许可造斜率设计过程中采用线弹性极限状态许可造斜率作为设计临界值。在进入扁化阶段后,完井管柱将发生塑性失稳破坏,导致完井管柱抵抗弯矩载荷能力急剧下降,发生弯曲挤毁破坏。

从图 4(a) 可知,当壁厚保持不变时,完井管柱在线弹性、弹塑性和扁化变形阶段的许可造斜率随着外径的增加而显著降低。例如,壁厚为 6.45 mm 时,外径为 60.30 、 73.00 和 88.90 mm 完井管柱弹性阶段许可造斜率分别为 7.92 、 4.19 和 $3.44 (^\circ)/\text{m}$ 。在外径

不变时,完井管柱的弹性、塑性和扁化阶段极限造斜率都随着壁厚的增加而增加,但增幅不显著(图4(b))。随着钢级的增加而显著的提高(图4(c))。通过上面的分析,建议在短半径和超短半径多分支水平井中,采用小直径、高钢级和中等壁厚的完井管柱,确保生产的安全和经济。

3 结 论

(1) 根据煤层气多分支水平井完井管柱在造斜段受力变形特点,把完井管柱变形分为线弹性、弹塑性和扁化变形阶段,采用大变形理论推导了完井管柱受到的弯矩与井眼造斜率间的定量关系,并给出各变形阶段许可极限造斜率计算公式,分析了外径、壁厚和屈服强度对许可造斜率的影响。同时,通过对2根完井管柱进行室内试验,对本文计算结果进行了验证。

(2) 本文的计算结果与室内试验结果具有很好的一致性,误差在5%以内,说明本文计算模型具有很高的计算精度,可以满足实际工程需求。

(3) 本文计算结果表明:完井管柱由线弹性极限变形状态进入弹塑性极限变形状态,井眼许可造斜率变化很小,建议在多分支水平井完井管柱许可造斜率设计过程中采用线弹性极限状态许可造斜率作为设计临界值。完井管柱线弹性、弹塑性和扁化变形阶段的许可造斜率随着外径的增加而降低,随着壁厚和屈服强度的增加而提高,但壁厚影响不显著。建议在短半径和超短半径多分支水平井中,采用小直径、高钢级和中等壁厚的完井管柱。

参考文献:

- [1] 王同涛,闫相桢,杨秀娟.基于塑性铰模型的煤层气完井筛管抗挤强度分析[J].煤炭学报,2010,35(2):273-277.
Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan. Collapse pressure of perforated liner casing in CBM exploration basing on plastic hinge model[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2):273-277.
- [2] Karen Bybee. A parametric study of horizontal and multilateral wells in coalbed-methane reservoirs[J]. JPT, 2006, 58(8):71-72.
- [3] Mutalik P N, Magness W D. Production data analysis of horizontal CBM wells in Arkoma Basin[J]. SPE:103206-MS, 2006.
- [4] Meszaros G. Geosteering. Horizontal coalbed methane reservoirs: a case study[J]. SPE:107714-MS, 2007.
- [5] 席长丰,吴晓东,王新海.多分支井注气开发煤层气模型[J].煤炭学报,2007,32(4):402-406.
Xi Changfeng, Wu Xiaodong, Wang Xinhai. A model for enhanced coalbed methane and CO₂ sequestration with multilateral wells[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4):402-406.
- [6] Whittles D N, Lowndes I S, Kingman S W. The stability of methane captures boreholes around a long wall coal panel[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 71(2-3):313-328.
- [7] Elchalakani M, Zhao X L, Grzebieta R H. Plastic mechanism analysis of circular tubes under pure bending[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44:1117-1143.
- [8] Somya Poonaya, Chawalit Thinwongpituk, Umphisak Teeboonma. An analysis of collapse mechanism of thin-walled circular tubes subjected to bending[J]. International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering, 2007, 1(3):144-149.
- [9] Poonaya S, Teeboonma U, Thinwongpituk C. Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes subjected to bending[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47:637-645.
- [10] 王同涛,闫相桢,杨秀娟等.中短半径水平井弯曲段套管剩余抗挤强度分析[J].石油矿场机械,2009,38(9):28-32.
Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan, et al. Residual collapsing strength analysis of bending part casing in medium/short radius horizontal wells[J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(9):28-32.
- [11] Tomasz Wierzbicki, Monique V Sinmao. A simplified model of Brazier effect in plastic bending of cylindrical tubes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997, 71:19-28.
- [12] Zhang L C, Yu T X. An investigation of the Brazier effect of a cylindrical tube under pure elastic-plastic bending[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1987, 30:77-86.
- [13] Yao Yanping, Lu Mingwan, Zhang Xiong. Elasto-plastic behavior of pipe subjected to steady axial load and cyclic bending[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 229:189-197.
- [14] Alejandro J Lagreca, Stefan Z Miska, James R Sorem. Modeling of acceptable hole curvature for running casing strings-preliminary study[J]. SPE:38614-MS, 1997.
- [15] Xue Jianghong, Michelle S, Hoo Fatt. Buckle propagation in pipelines with non-uniform thickness[J]. Ocean Engineering, 2001, 28:1383-1392.