

# 椭圆管件正圆过程影响塑性极限的关键参数探析

王红<sup>1</sup>, 任冬亮<sup>2</sup>, 齐冲<sup>2</sup>

(1. 日照职业技术学院, 山东 日照 276826;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 船舶与海洋工程学院, 山东 威海 264209)

**摘要:** **目的** 椭圆管件是最常见的圆柱管件变形状态,通常采用缩径方式矫圆,研究矫圆过程中影响塑性变形的关键参数。 **方法** 建立了椭圆柱管件正圆模型,找到了影响截面最大应力值的关键参数,即椭圆度和厚度半径比,并进行了无量纲化。采用控制变量法,运用非线性有限元软件 ABAQUS,模拟了不同椭圆度和厚度半径比的椭圆管件,正圆过程中的截面最大应力值。 **结果** 通过对比大量数据,得出了椭圆管正圆椭圆度和半径厚度比影响曲线以及塑性临界曲线。 **结论** 为揭示缩径矫圆机理,完善矫圆的预测提供了参考。

**关键词:** 椭圆管件; 椭圆度; 半径厚度比; 屈服应力; 缩颈正圆

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.018

**中图分类号:** TG376.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2014)05-0102-06

## Analysis of Key Parameters of the Plastic Limit during Round Setting of Oval Tube

WANG Hong<sup>1</sup>, REN Dong-liang<sup>2</sup>, QI Chong<sup>2</sup>

(1. Rizhao Polytechnic, Rizhao 276826, China; 2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

**ABSTRACT:** **Objective** Oval tube is the most common deformation of cylindrical tube, which is usually set round by radius shrinkage. The aim of this paper is to investigate the key parameters influencing the plastic deformation during the round setting process. **Methods** This paper established round setting model for cylindrical tube, identified the key parameters that affected the value of the maximal stress, the ovality and the thickness to radius ratio, and the model was made dimensionless. Using the variable controlling method and the nonlinear finite element software ABAQUS, oval tubes with different ovality and thickness to radius ratios were simulated, achieving the maximal stress values during the round setting process. **Results** By comparing large amounts of data, influencing curve of perfect circle ovality and radius to thickness ratio of the oval tube and the plastic critical curve were obtained. **Conclusion** The study provided reference for revealing the radius shrinkage round setting mechanism and improving the prediction of round setting.

**KEY WORDS:** oval tube; ovality; radius to thickness ratio; yield stress; necking down round setting

大型管件在现代工业领域,如油气运输、化工等领域,具有十分广泛的应用前景。通常制造大口径

直缝埋弧焊管的成形方法主要有 UO 成形扩径法<sup>[1-2]</sup>、JCO 成形扩径法<sup>[3]</sup>、扩径缩径结合法。对于

大型管件,其椭圆度是影响其性能的重要因素。国内学者运用的基本假定认为,当管件的管径与壁厚之比大于10,通常就可以认为是薄壁管件,并忽略正圆过程中的塑性变形,通过实验所得的结果与其理论解有一定的偏差<sup>[4-5]</sup>。针对这一偏差,文中通过运用 ABAQUS 大量的数值模拟得出结论,认为正圆过程中塑性变形的忽略需要具体结合管件材料参数和几何参数,不能简单依照经验忽略。

文中针对于普通的钢材料形成的椭圆形构件,采用缩径方式矫圆,探究正圆的过程中影响塑性变形的关键参数。

## 1 材料性能

材料的力学性能是最根本的特征,为不失一般性,这里采用工程上运用最广的 20#钢,不考虑各向异性,忽略包辛格效应,采用双线性硬化材料模型,即:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & |\varepsilon| \leq \varepsilon_E \\ D\varepsilon + \sigma_0 & |\varepsilon| \geq \varepsilon_E \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中: } \varepsilon_E = \frac{\sigma_s}{E} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \sigma_s \left( 1 - \frac{D}{E} \right) \quad (3)$$

式中: $\sigma$  为应力; $\varepsilon$  为应变; $E$  为弹性模量; $D$  为塑性切线模量; $\sigma_s$  为材料拉伸初始屈服应力; $\sigma_0$  为截距应力; $\varepsilon_E$  为弹性极限应变。拉伸时  $\sigma_0$  前的符号为正,反之为负。20#钢的双线性硬化材料模型参数取值为: $E=206\ 000\ \text{MPa}$ ,  $D=2533\ \text{MPa}$ ,  $\sigma_s=299\ \text{MPa}$ ,  $\sigma_0=295\ \text{MPa}$ ,  $\varepsilon_E=0.001\ 45$ 。

## 2 变形截面的参数:椭圆柱截面参数

由于缩径矫圆的管件长度远大于横截面几何尺寸(约为80倍),矫圆过程中各个管件截面受力状况相同,假定任意截面正圆过程中保持为平面,截面不发生畸变,则该接触问题可以简化为平面应变问题进行模拟。

对于任意椭圆,其关键几何参数为长半轴和短半轴;对于管件,其关键几何参数为半径和壁厚。为了描述所有椭圆柱管件,引入2个无量次量:半径壁厚比  $\alpha$  和椭圆度  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{r}{t} \quad (4)$$

其中: $r$  表示半径; $t$  表示厚度。

$$\beta = \frac{2(b-a)}{a+b} \quad (5)$$

其中: $b$  表示长半轴; $a$  表示短半轴。

由于正圆过程符合平面假定,容易证得所有椭圆平面符合:

$$2r = a + b \quad (6)$$

综合式(4)~(6),可以根据无量次化,将所得的数据推广到多种几何相似的椭圆管件。

## 3 有限元模型建立及定性分析

有限元模型见图1,模具正圆半径为63.5 mm,椭圆柱截面的半径壁厚比  $\alpha$  取值范围为10~100,椭圆度  $\beta$  取值范围为1%~20%。由于几何形状及边界条件的对称性,均采用1/4圆环,以节约计算成本,单元采用 CPS4R。

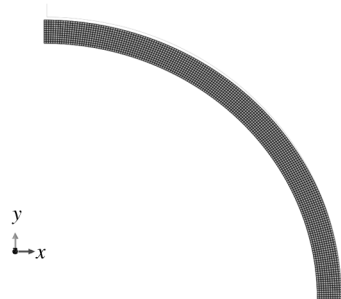


图1 有限元计算模型

Fig. 1 Finite element computational model

不同半径厚度比的计算结果云图如图2所示。

如图2所示,椭圆柱面在正圆过程中,由于不同的椭圆度以及不同的厚度半径比,会出现4种典型应力云图,有助于定性了解正圆过程中最大应力分布状况。4种情况分别为:大范围的塑性变形(图2a);长半轴以及短半轴附近有明显的塑性变形(图2b);长、短半轴附近有不明显的塑性变形(图2c);长半轴附近以及短半轴外侧有明显的塑性变形。

## 4 模拟结果分析

采用单因子变量法,分别先后控制半径壁厚比

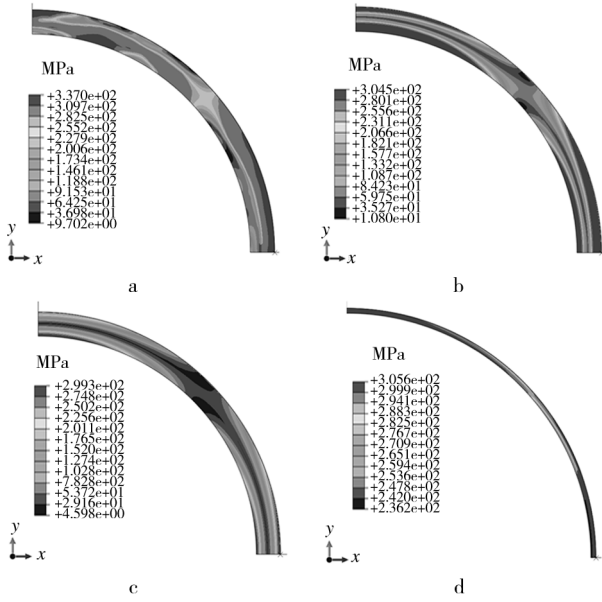


图2 正圆过程椭圆管截面应力云图

Fig. 2 The stress nephogram of the oval tube during round setting process

$\alpha$  和椭圆度  $\beta$ , 改变另一个量, 用 ABAQUS 计算椭圆截面上的最大应力, 并依此判定是否发生塑性变形。在某半径壁厚比  $\alpha$ , 定义首次出现塑性变形的椭圆度  $\beta_0$ , 为该半径壁厚比的临界椭圆度。同理, 在某固

表1 较厚管件不同椭圆度下管件正圆最大应力值

Table 1 The maximal round setting stress value of thick tubes under different ovality

| $\beta$<br>/% | $\alpha$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 1.0      | 1.5   | 1.7   | 1.9   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 4.0   | 5.0   | 6.0   | 7.0   |
| 10            | 173.1    | 254.5 | 289.2 | 299.3 | 299.8 | 300.8 | 302.3 | 304.5 | 307   | 312.4 | 318.3 |
| 15            | 113.8    | 157.9 | 178.9 | 213.2 | 262   | 273.1 | 299.8 | 301.1 | 303.3 | 305.1 | 307.2 |
| 20            | 83.7     | 113.1 | 128.6 | 157.4 | 210.3 | 215.9 | 271.2 | 299.6 | 301.5 | 303.2 | 304.9 |
| 30            | 56.2     | 82.3  | 112.7 | 133.4 | 152.2 | 170.7 | 192.3 | 242.5 | 299.4 | 300.5 | 300.8 |

表2 较薄管件不同椭圆度下管件正圆最大应力值

Table 2 The maximal round setting stress value of thin tubes under different ovality

| $\beta$<br>/% | $\alpha$ |       |       |       |       |       |
|---------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 3        | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| 40            | 169.4    | 208.4 | 286.4 | 299.7 | 300.5 | 302.1 |
| 50            | 131.1    | 193.5 | 255.7 | 283.2 | 299.9 | 301.6 |
| 100           | 78.7     | 113.7 | 162.6 | 216.4 | 283.6 | 299.9 |

由图4可知, 当椭圆度小于2%时, 随着椭圆度增加, 椭圆截面最大应力值急剧上升, 趋近屈服应力值; 当椭圆度在2%~5%, 最大应力值增长速度减

定的椭圆度  $\beta$ , 定义首次出现塑性变形的半径壁厚比  $\alpha_0$ , 为该椭圆度条件下的临界半径壁厚比。

#### 4.1 椭圆度

给定半径壁厚比  $\alpha$ , 改变椭圆度  $\beta$ , 计算截面最大应力值, 结果见图3。

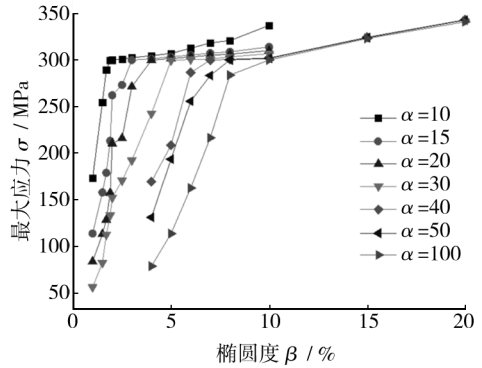


图3 不同椭圆度对应的最大应力值

Fig. 3 The maximal stress value corresponding to different ovality

如图3所示, 根据半径壁厚比  $\alpha$  的不同取值, 可以明显分为2个阶段, 分别见表1 ( $10 < \alpha < 30$ ) 和表2 ( $40 < \alpha < 100$ ), 最大应力值分别见图4和5。

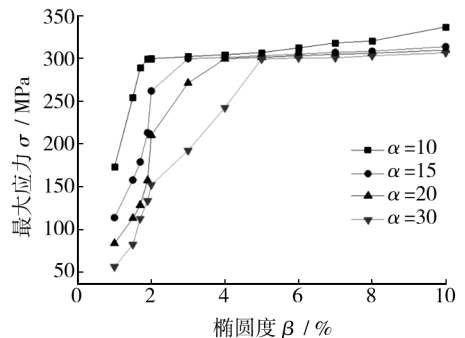


图4 不同椭圆度厚管件最大应力值曲线

Fig. 4 The maximal stress curve of thick tubes under different ovality

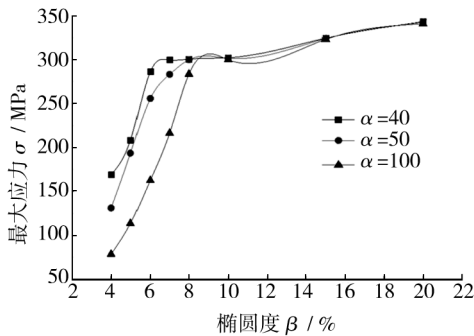


图5 不同椭圆度薄管件最大应力值曲线

Fig.5 The maximal stress curve of thin tubes under different ovality

小,不同半径壁厚比的管件先后达到屈服应力值,半径壁厚比 $\alpha$ 越小的管件越早达到屈服应力椭圆度,即临界椭圆度越小;当椭圆度大于5%,所列的4种半径壁厚比( $10<\alpha<30$ )的椭圆管件均超过屈服应力值,截面发生塑性变形。这一性质与平面梁弯曲原理相符,这也从侧面说明仿真结果与实际情况基本相符。

如图5所示,对于 $10<\alpha<30$ ,当 $4\%<\beta<8\%$ 时,椭圆柱面正圆过程中,随着椭圆度增加,椭圆截面最大应力值快速上升,趋近屈服应力值;当椭圆度 $8\%\leq\beta\leq10\%$ 时,不同半径壁厚比的管件先后达到屈服应力值,半径壁厚比 $\alpha$ 越小的管件越早达到屈服应力椭圆度,即临界椭圆度越小;当椭圆度 $\beta>10\%$ 时,椭圆截面都出现塑性变形,最大应力值增长缓慢。

4.2 半径壁厚比

给定椭圆度 $\beta$ ,改变半径壁厚比 $\alpha$ ,计算不同壁厚比对应的最大应力,结果见图6。

根据椭圆度的不同,将实验结果细分为3组:小

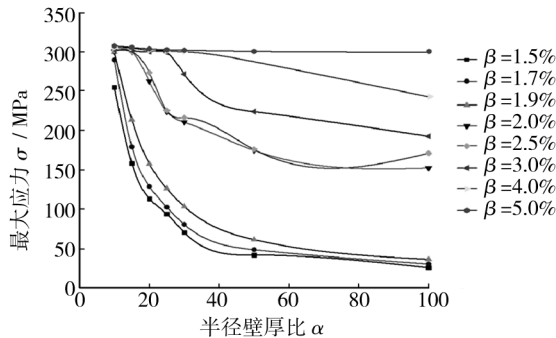


图6 不同壁厚半径比对应的最大应力值曲线

Fig.6 The maximal stress value curve corresponding to different  $\alpha$

椭圆度( $\beta<2\%$ )、中等椭圆度( $2\%<\beta<5\%$ )、大椭圆度( $\beta\geq5\%$ ),分别见表3、表4和表5。

表3 小椭圆度不同半径壁厚比对应的最大应力值

Table 3 The maximal stress value corresponding to different  $\alpha$  with small  $\beta$

| $\beta$<br>/% | $\alpha$ |       |       |       |       |      |      |
|---------------|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|               | 10       | 15    | 20    | 25    | 30    | 50   | 100  |
| 1.5           | 254.5    | 157.9 | 113.1 | 93.9  | 70.3  | 41.8 | 25.6 |
| 1.7           | 289.2    | 178.9 | 128.6 | 102.3 | 80.5  | 48.5 | 30.2 |
| 1.9           | 299.3    | 213.2 | 157.4 | 125.9 | 103.2 | 61.3 | 36.1 |

表4 中等椭圆度不同半径壁厚比对应的最大应力值

Table 4 The maximal stress value corresponding to different  $\alpha$  with medium  $\beta$

| $\beta$<br>/% | $\alpha$ |       |       |       |       |       |       |
|---------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 10       | 15    | 20    | 25    | 30    | 50    | 100   |
| 2.0           | 299.8    | 299.4 | 262.0 | 223.6 | 210.3 | 174.4 | 152.2 |
| 2.5           | 300.8    | 299.7 | 273.1 | 224.8 | 215.9 | 175.6 | 170.7 |
| 3.0           | 2.3      | 301.0 | 299.8 | 298.7 | 271.2 | 223.6 | 192.3 |
| 4.0           | 304.5    | 304.3 | 301.1 | 300.1 | 299.6 | 287   | 242.5 |

表5 大椭圆度不同半径壁厚比对应的最大应力值

Table 5 The maximal stress value corresponding to different  $\alpha$  with large  $\beta$

| $\beta$<br>/% | $\alpha$ |       |       |       |       |       |       |
|---------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 10       | 15    | 20    | 25    | 30    | 50    | 100   |
| 4             | 304.5    | 304.3 | 301.1 | 300.1 | 299.6 | 287   | 242.5 |
| 5             | 307      | 305.1 | 303.3 | 302.1 | 301.5 | 300.1 | 299.4 |
| 10            | 337      | 313.8 | 310.0 | 305.4 | 306.7 | 305.6 | 305.3 |

如图7所示可知,对于 $\beta<2\%$ ,截面最大应力值随着厚度半径比的增大而减小,说明正圆过程中壁

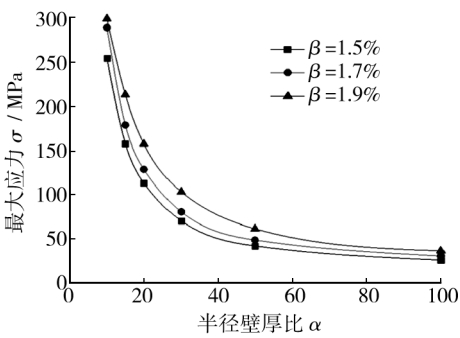


图7 不同壁厚半径比对应的最大应力值曲线

Fig.7 The maximal stress value curve corresponding to different

厚相对薄的管件更不容易发生塑性变形。

如图8所示,对于 $2\% < \beta < 5\%$ 的椭圆柱,截面最大应力值随着厚度半径比的增大而减小,并且在 $\alpha > 40$ 时,最大应力值趋于稳定。

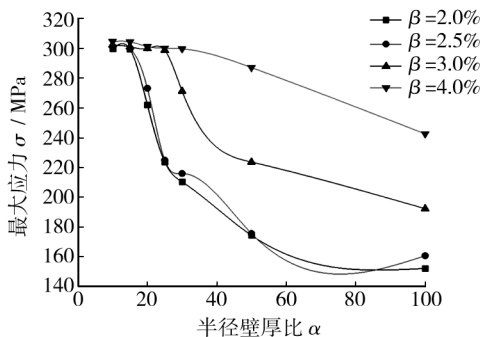


图8 中等椭圆度不同半径壁厚比对应的最大应力值曲线

Fig.8 The maximal stress value curve corresponding to different under medium ovality

如图9所示,当 $\beta \geq 5\%$ 时,随着半径壁厚比的增加,其最大应力值并没有明显的下降,可以将 $\beta \geq 5\%$ 作为评价大椭圆度的指标。

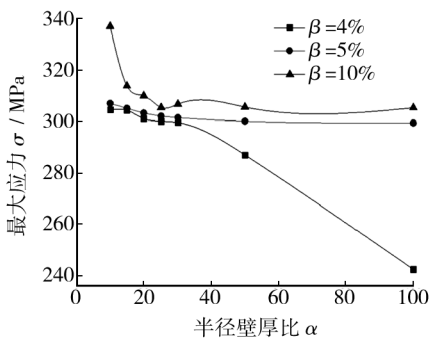


图9 大椭圆度不同半径壁厚比对应的最大应力值曲线

Fig.9 The maximal stress value curve corresponding to different under large ovality

统计数据样本,将最大应力达到屈服应力值对应的椭圆度和半径厚度比提取出来,共9组数据: $\alpha$ 为10,12,13,16,20,35,45,65,110,分别对应 $\beta$ 为1.9%,2%,2.5%,3%,4%,5%,6%,7%,8%,得到椭圆管件正圆过程塑性临界曲线,如图10所示。

如图10所示,对于20#钢所制成的管件,椭圆变形后进行压膜矫圆,判断在正圆阶段是否发生塑性变形,只需知道半径厚度比 $\alpha$ 和椭圆度 $\beta$ ,可以通过图10进行判断。当具体的半径厚度比 $\alpha$ 和椭圆度 $\beta$ 对应的点落在曲线上时,在管件截面短轴附近开

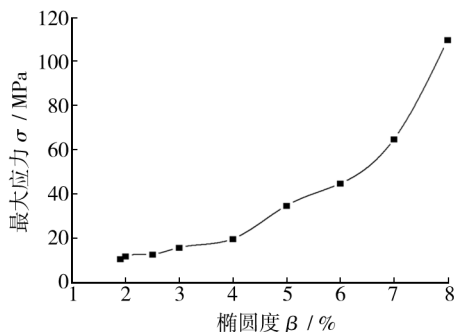


图10 椭圆管件正圆过程的塑性临界值

Fig.10 The plastic critical value curve of the oval tube during round setting

始发生塑性变形;当对应点在曲线上方时,一定发生塑性变形;反之,对应点在曲线下方时,将不会发生塑性变形。

拟合公式为:

$$\alpha = a\beta^2 + b\beta + c \quad (7)$$

其中, $a, b, c$ 均为常数,对于20#钢,具体取值为 $a=0.0834, b=15.67, c=31.89$ 。即:

$$\alpha = 0.0834\beta^2 + 15.67\beta + 31.89 \quad (8)$$

经验证,该公式预测值与模拟数据吻合,方差 $R^2=0.9812$ ,有较好的近似程度。

## 5 结论

文中针对椭圆形圆柱壳的正圆过程,建立了有限元模型,进行了模拟计算,得出结论如下。

1) 运用ABAQUS将椭圆管件正圆过程这一接触问题简化并模拟,得到了不同椭圆度和厚度半径比对最大应力的影响,指出了传统的研究预测理论直接忽略正圆过程会导致截面变形不足,提出了一条判定指标。

2) 正圆过程中,对于固定的厚度半径比,随着椭圆度的增大,截面最大应力值也增大,当椭圆度大于5%,发生塑性变形几乎是必然的,因此 $\beta=5\%$ 是临界椭圆度。

3) 正圆过程中,对于固定的椭圆度,随着半径厚度比的增大,截面最大应力值减小,在椭圆度小于5%时,半径厚度比大于50时,截面应力明显减小并趋于稳定。

4) 得出了塑性临界值判定方程,可以根据椭圆

管的几何参数方便地判定其在正圆过程中是否发生塑性变形。

### 参考文献:

- [1] 李建,赵军,马瑞. 管线钢管 JCO 精确弯曲成形技术[J]. 光学精密工程,2010(3):638—645.  
LI Jian, ZHAO Jun, MA Rui. Precise Bending Pipeline Steel Pipes with JCO Forming[J]. Optics and Precision Engineering,2010(3):638—645.
  - [2] LI Jian, ZHAO Jun, ZHAN P P. Design and Development of Quality Inspection System for Forming the Longitudinal-seam Submerged Arc Pipes with JCOE Process[C]. Proceedings of the 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering,2009.
  - [3] 肖曙红. 管线用直缝焊管机械扩径及其影响因素研究[J]. 石油机械,2007(3):1—4.  
XIAO Shu-hong. Effect Factors Analysis on Mechanical Expansion for Straight Welded Pipe[J]. Petroleum Machinery,2007(3):1—4.
  - [4] 殷璟,赵军,屈晓阳,等. 大型管件扩径矫圆弹复分析[J]. 机械工程学报,2011(12):32—42.  
YIN Jing, ZHAO Jun, QU Xiao-yang, et al. Springback Analysis of Expanding and Setting Round for Large Diameter Pipe[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011(12):32—42.
  - [5] 刘世泽,王利树,谢仕强. UOE 焊管制造过程中影响屈服强度的因素分析[J]. 焊管,2004(3):11—17.  
LIU Shi-ze, WANG Li-shu, XIE Shi-qiang. Factors Analysis on Affected Yield Strength during the Manufacture of UOE Welded Pipe[J]. Welded Pipe and Tube,2004(3):11—17.
  - [6] WANG F, CUI W, PAN B, et al. Normalised Fatigue and Fracture Properties of Candidate Titanium Alloys Used in the Pressure Hull of Deep Manned Submersibles[J]. Ships and Offshore Structures, 2013 ( ahead-of-print ): 1—14.
  - [7] PAN B, CUI W. An Overview of Buckling and Ultimate Strength of Spherical Pressure Hull under External Pressure[J]. Marine Structures,2010,23(3):227—240.
  - [8] PAN B B, CUI W C, SHEN Y S, et al. Further Study on the Ultimate Strength Analysis of Spherical Pressure Hulls[J]. Marine Structures,2010,23(4):444—461.
  - [9] 张新华. 喷丸强化技术及其应用与发展[J]. 航空制造技术,2007(Z1):454—459.  
ZHANG Xin-hua. The Application and Development of Shot Peening Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2007(Z1):454—459.
  - [10] 张东海. 膨胀管技术的现状及未来[J]. 特种油气藏,2007,14(1):3—6.  
ZHANG Dong-hai. Current situation and Future of Expansion Pipe Technology[J]. Special oil and Gas Reservoir, 2007,14(1):3—6.
  - [11] 高军伟,谢光伟,周后俊,等. 自增强技术的研究[J]. 机械研究与应用,2008,21(6):21—23.  
GAO Jun-wei, XIE Guang-wei, ZHOU Hou-jun, et al. Research on Autofrettage Technology[J]. Mechanical Research and Application,2008,21(6):21—23.
  - [12] Sadat A B, Bailey J A. Residual Stresses in Turned AISI 4340 steel[J]. Experimental Mechanics, 1987, 27(1):80—85.
  - [13] DAHLMAN P, GUNNBERG F, JACOBSON M. The Influence of Rake Angle, Cutting Feed and Cutting Depth on Residual Stresses in Hard Turning[J]. Journal of Materials Processing Technology,2004,147(2):181—184.
  - [14] GUNNBERG F, ESCURSELL M, JACOBSON M. The Influence of Cutting Parameters on Residual Stresses and Surface Topography during Hard Turning of 18MnCr5 Case Carburised Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology,2006,174(1):82—90.
  - [15] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of Measuring Residual Stresses in Components[J]. Materials & Design,2012,35:572—588.
- ~~~~~
- (上接第49页)
- [18] CHINO Y, HUANG X S, SUZUKI K, et al. Texture and Mechanical Properties of Mg-3Al-1Zn-0.5Mn-1.5Ca Alloy Produced by Torsion Extrusion[J]. Materials Transactions,2010,51(5):872—877.
  - [19] LI Feng, CHU Guan-nan, LIU E L, et al. Investigation of Metal Extrusion Forming through Steadily Rotating Container[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2011,225(12):2927—2937.
  - [20] LI Feng, BIAN Nan, XU Y C, et al. Theoretical Analysis of Extrusion through Rotating Container: Torque and Twist Angle[J]. Computational Materials Science, 2014, 88(6):37—44.