

镁合金管材的热态内压成形起皱行为分析

汤泽军, 苑世剑, 刘 钢

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用数值模拟和塑性理论分析 AZ31B 镁合金管材的热态内压成形过程的变形机理, 找出临界起皱应力、应力状态及皱纹形状的变化规律。结果表明: 随着温度升高, 管材轴向抗起皱能力下降, 其机理是材料的屈服强度和弹性模量随温度升高而下降; 皱峰和皱谷处应力轨迹均在环向应变伸长和轴向应变压缩的区域; 随着补料量的增大, 皱峰处应力向壁厚减薄的方向发展, 皱谷处应力向壁厚增加的方向发展; 内压与材料屈服强度之比(相对压力)决定初始屈服时皱峰和皱谷处壁厚的变化情况, 即温度较高时, 相对压力较大, 初始屈服时皱峰和皱谷处应力状态越易处于管壁呈减薄趋势的区域; 当温度较低时, 相对压力较小, 初始屈服的皱峰和皱谷处的应力状态越易处于管壁有增厚趋势的区域; 随着温度升高, 相同加载路径下皱纹的高度和波长增大, 皱纹趋向于向中间移动, 且波数减少。

关键词: 镁合金; 热态内压成形; 起皱行为; 数值模拟

中图分类号: TG306

文献标识码: A

Analysis of wrinkling behavior in warm hydroforming of magnesium alloy tube

TANG Ze-jun, YUAN Shi-jian, LIU Gang

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The deformation mechanism was analyzed for an AZ31B magnesium alloy tube in warm hydroforming process by numerical simulation and plasticity theory. The critical wrinkling stress, the stress state and the shape of the wrinkles were obtained. It is shown that the yielding strength and the elastic modulus decrease as the temperature rises, which makes the anti-wrinkling ability of the tube decrease. The stress loci lie at the zone where the circumstantial strain elongates and axial strain is compressive for both the top zone and the bottom zone of the wrinkles wave. The stress at the top zone of the wrinkles wave tends to make the wall thickness thin as the feeding increases. The stress at the bottom zone of the wrinkles wave tends to make the wall thickness thicken. The ratio of the internal pressure to the yielding strength (relative pressure) determines the variation of the wall thickness. If the forming temperature is higher, the relative pressure is greater, which makes the thinning trend of the wall thickness easier at the initial yielding time. If the forming temperature is lower, the relative pressure is smaller, which makes the thickening trend of the wall thickness easier at the initial yielding time. The height and length of the wrinkles wave get larger for the same loading path as the temperature rises. The wrinkles tend to move towards the middle part. The wrinkles wave number decreases.

Key words: magnesium alloy; warm hydroforming; wrinkling behavior; numerical simulation

管材热态内压成形的过程是先加热模具和介质, 通过控制变形区温度提高管材的成形性能, 然后利用

轴向补料和内压的联合作用得到所需形状的工件^[1]。由于需要轴向补料和内压耦合才能成形, 因此, 在管

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50525516); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050213041)

收稿日期: 2009-05-25; **修订日期:** 2009-09-28

通信作者: 苑世剑, 教授, 博士; 0451-86418776; E-mail: syuan@hit.edu.cn

材热态内压成形过程中若轴向补料过大时,会出现起皱缺陷。一般将起皱看成一种缺陷,但文献[2]提出有益皱的概念,认为并非所有的起皱都是有害的,对某些皱纹形状进行控制作为预成形坯,反而有助于提高成形极限。

目前,在常温高压成形过程中,关于起皱缺陷的研究主要集中在加载路径(轴向补料和内压的匹配关系)、管材的力学性能及几何尺寸等方面。文献[3-6]通过理论推导分析了应变硬化指数、各向异性指数、管材初始几何尺寸以及应力比对临界起皱的影响。文献[7-8]针对受轴向载荷和内压耦合作用下纯铜、纯铝以及不锈钢管进行了实验,研究了内压对临界起皱应力的影响规律。

在管材热态内压成形过程中,由于温度的介入,材料的力学性能^[9-10]、成形性能^[11-13]以及摩擦性能^[14]等都发生明显变化,起皱行为也变得更为复杂。目前,关于管材在热成形过程中的起皱行为鲜见报道。为此,本文作者以 AZ31B 变形镁合金管材为对象,利用数值模拟以研究不同温度下管材的临界起皱应力、起皱时的应力状态以及皱纹形状的变化规律。

1 有限元模型

由于试件形状为轴对称,采用二分之一作为数值模拟的模型,如图1所示。管材两端部受到模具约束,管材中间部分处于自由胀形状态,中间部分长度为66 mm。管材和模具分别采用四节点线性减缩积分四边形单元和三维四节点双线性四边形刚体单元划分网格。模具与管材之间采用主-从面接触方式,其中模具是主接触面,管材为从属接触面。接触面之间采用库仑摩擦,摩擦因数取0.125。有限元求解器采用Abaqus6.8的显式计算模块。

镁合金管材为 AZ31B 无缝挤压管,初始直径为

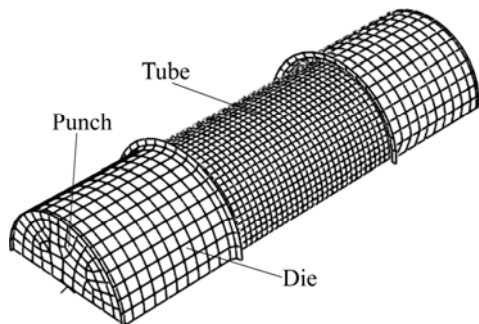


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

44 mm,壁厚为1.8 mm,长度为110 mm。化学成分(质量分数)为: Al 2.72%, Zn 0.86%, Mn 0.21%, Ca < 0.001%, Si 0.016%, Mg 余量。利用电子拉伸试验机固定应变速率为 0.01 s^{-1} , 分别在 20、150、175、200、225、250、275 和 300 °C 的温度下进行拉伸试验,得到不同温度下镁合金管材的应力—应变曲线,结果如图2所示。

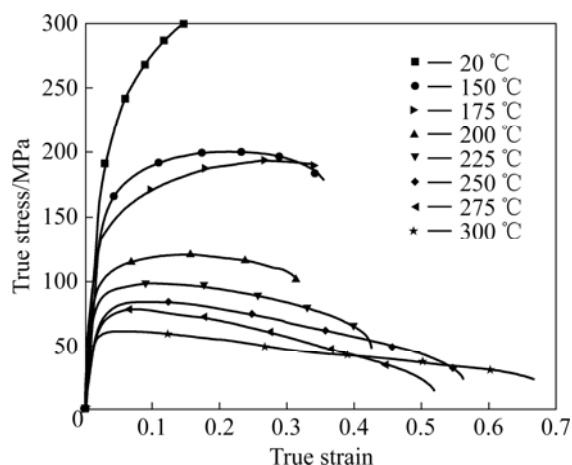


图2 不同温度下 AZ31B 镁合金管材的应力—应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of AZ31B magnesium alloy tube at different temperatures

为便于比较温度对起皱的影响,在数值模拟过程中,所有温度下选用相同加载路径,即建立4 MPa内压之后保持压力数值不变,再使左、右冲头向内单侧补料4.5 mm。

2 温度对临界起皱应力的影响

提取数值模拟结果中的管材与冲头接触力随时间变化的曲线,第1个极大值点即为管材临界起皱时的轴向载荷,除以管材横截面面积可以得到临界起皱应力,结果如图3所示。由图3可见,随着温度的升高,管材发生起皱所需的临界轴向压应力逐渐减小,即管材的抗轴向起皱能力降低。在200 °C前,临界起皱应力下降的幅度大,200 °C以后下降的幅度减缓。

根据文献[15],管材在内高压成形过程中的临界起皱压应力(σ_{cr})可以用式(1)计算:

$$\sigma_{cr} = \alpha \left[\frac{\sigma_s}{\sqrt{1 + \alpha^2 + \alpha}} + \frac{tE_t}{r} \sqrt{\frac{1}{3(1 - \nu^2)}} \right] \alpha - \left(\frac{l}{2\pi r m} \right)^2 \quad (1)$$

式中: σ_s 是管材的屈服强度; α 是轴向压应力与环向

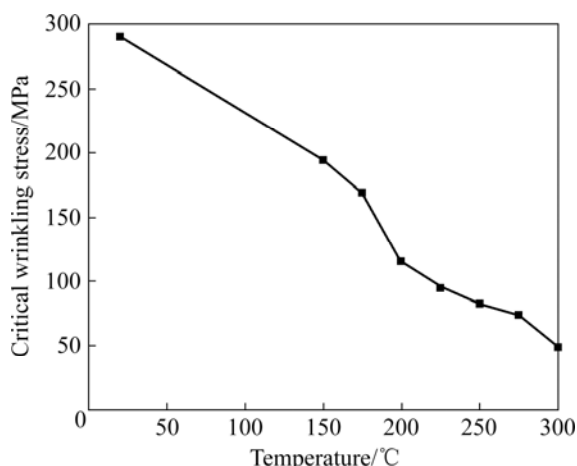


图3 温度对临界起皱应力的影响

Fig.3 Influence of temperature on critical wrinkling stress

拉应力之比; ν 是泊松比; E_t 是切线模量; t 、 l 和 r 分别是管材的初始壁厚、管长和半径; m 是起皱波数。由式(1)可知, 材料的力学性能(屈服强度和切线模量)是影响临界起皱压应力且与温度有关的参数。

温度对 AZ31B 管材力学性能的影响规律根据拉伸性能测试得到, 结果如图 4(a)所示。随着温度的升高, 材料的屈服强度和弹性模量降低。再将屈服强度和弹性模量带入式(1)可知, 临界起皱压应力也随之降低, 结果如图 4(b)所示。因此, 随着温度的升高, 材料屈服强度和弹性模量的降低, 是导致管材抗皱能力下降的根本原因。

3 皱峰与皱谷处应力状态分析

图 5 所示为镁合金管材在 150 °C 下, 内压达到 4 MPa 后保持不变、左、右冲头同时补料 4.5 mm 时获得的起皱管件。图 5 中 A 点对应位置称为皱峰, B 点对应位置称为皱谷。

图 6 所示为 150 °C 和 250 °C 下皱峰皱谷处管材的应力轨迹在平面应力状态屈服椭圆上的变化情况。由图 6 可知, 随着补料量的增大, 皱峰处环向拉应力不断增大而轴向压应力不断减小, 皱谷处环向拉应力不断减小而轴向压应力不断增大, 其应力轨迹均处在环向伸长和轴向缩短的应变状态。但由于初始屈服时的应力状态不同, 其厚向应变状态并不相同。当内压达到 4 MPa 而未补料时, 管材未屈服。开始补料后, 由于 250 °C 下管材的屈服强度较低, 仅需要较小的轴向压应力即可发生屈服, 此时, 其环向拉应力大于轴向压应力, 处于厚向应变增量为负值的区域, 即管壁有

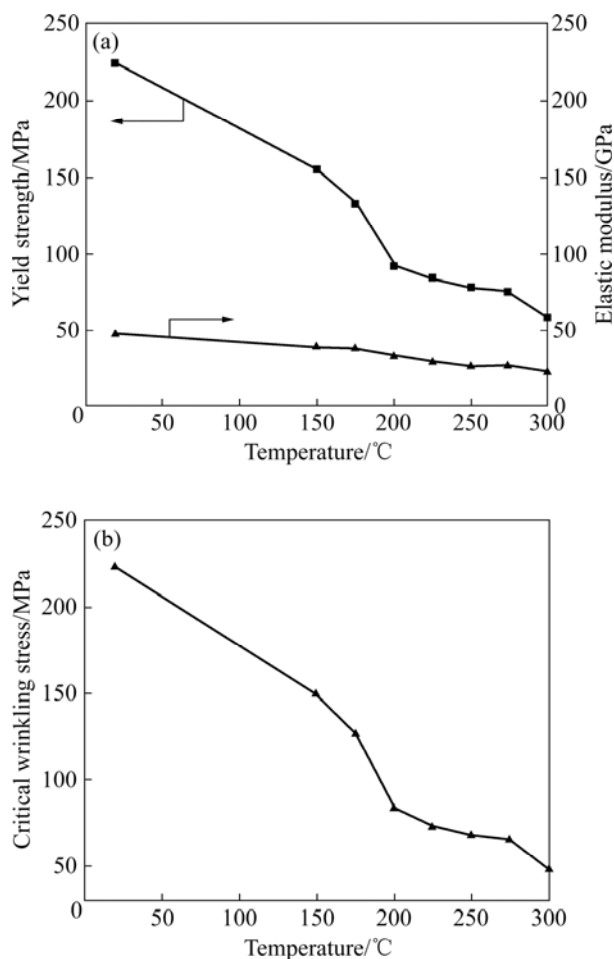


图4 AZ31 管材的力学性能及临界起皱压应力与温度的关系

Fig.4 Relationship between mechanical properties and critical wrinkling stress of AZ31 magnesium alloy at different temperatures: (a) Mechanical properties; (b) Critical wrinkling stress

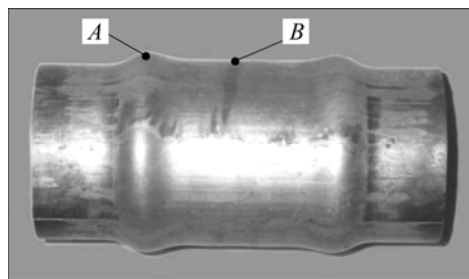


图5 150 °C 下 AZ31 镁合金试件的皱纹形状

Fig.5 Wrinkles' shape of AZ31 magnesium alloy tube at 150 °C

减薄趋势。150 °C 下的屈服强度较高, 需要较大的轴向压应力管材才能发生屈服, 因此, 初始屈服时其应力状态处于厚向应变增量为正的区域, 即管壁有增厚趋势。随着补料量的增大, 皱峰处环向拉应力不断增

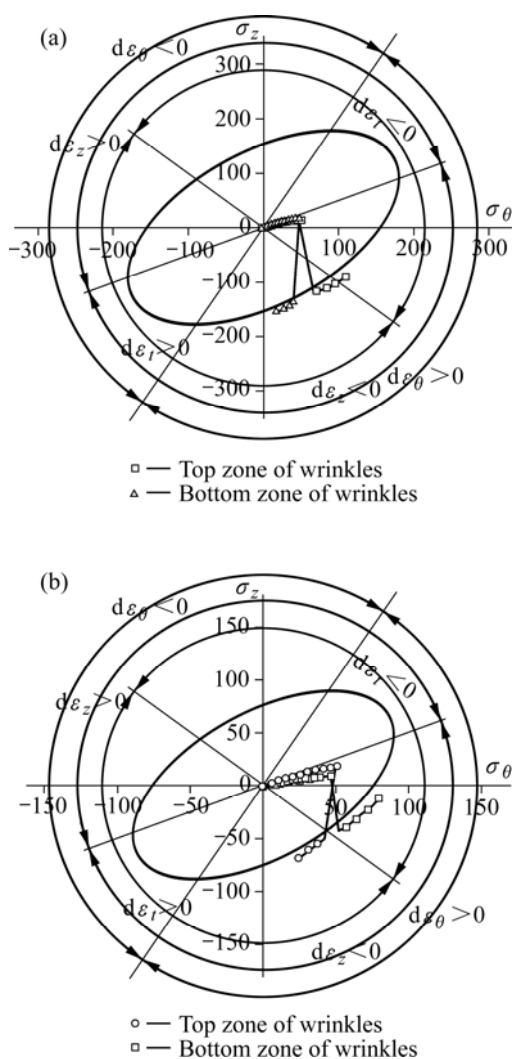


图6 皱峰和皱谷处的应力轨迹

Fig.6 Stress tracks at top and bottom zones of wrinkles:

(a) Stress track at 150 °C; (b) Stress track at 250 °C

大而轴向压应力不断减小, 管壁增厚趋势减弱, 减薄趋势增强。皱谷处环向拉应力减小轴向压应力增大, 管壁有增厚趋势。

若假设变形过程中内压为 p , 则环向拉应力可表示为 $\sigma_\theta = \frac{r}{t}p$ 。根据图6可知, 在初始屈服时, 如果轴向压应力小于环向拉应力, 则应力状态将位于应力应变状态图第四象限且处于厚向应变增量为负的区域, 即

$$\sigma_s^2 = \sigma_z^2 + \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 < 3\sigma_\theta^2 = 3\left(\frac{r}{t}\right)^2 p^2 \quad (2)$$

可知, 当 $\frac{p}{\sigma_s} > \frac{t}{\sqrt{3}r}$ 时, 管材起皱过程中初始屈服应力状态处于厚向应变增量小于零的区域。若定义

p/σ_s 为相对压力, 当温度较高时, 由于管材屈服强度较低, 在相同加载路径下, 相对压力较大, 初始屈服应力状态较易处于厚向应变增量小于零的区域, 即管壁有减薄趋势。而当温度较低时, 相对压力较小, 初始屈服应力状态较易处于厚向应变增量大于零的区域, 即管壁有增厚趋势。

4 温度对皱纹形状和数量的影响

通过提取有限元结果分析皱纹形状在不同温度下的变化规律, 并利用前面的应力分析进行解释。图7所示为不同温度下皱纹形状及数量的比较。可见, 起

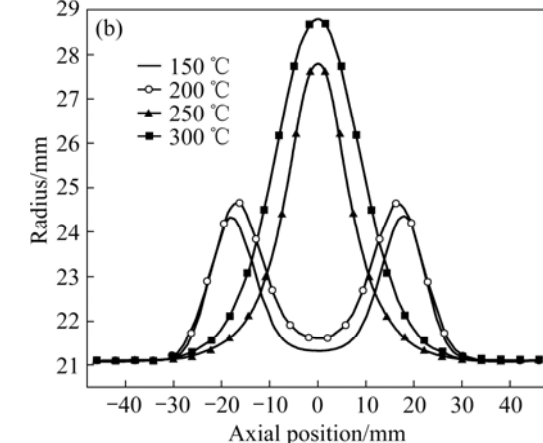
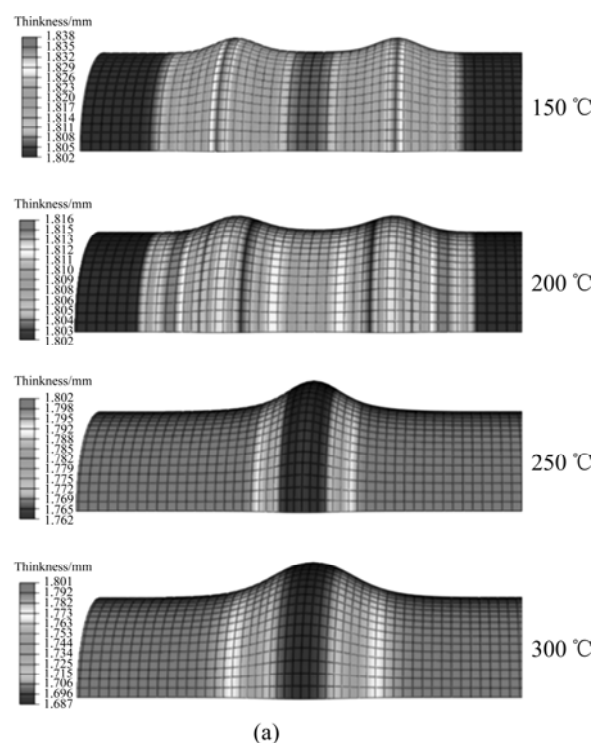


图7 温度对皱纹形状的影响

Fig.7 Influence of temperature on wrinkles' shape: (a) Shape of wrinkles; (b) Radius of wrinkles

皱件保持轴对称形状,且其沿轴向的形状具有正弦曲线特征。随着温度的升高,皱峰半径和皱纹宽度增大,皱谷半径基本不变;皱纹数量呈减少趋势,且皱纹趋向于由两端向变形区中间移动。当温度低于 200℃时,在靠近模具的两端产生 2 个皱纹;当温度在 200℃时,在管材胀形区的中间位置产生 1 个皱纹。

根据应力状态分析结果可知,由于温度越高, p/σ_s 越大,在整个补料过程中,皱峰处于厚向应变增量小于零区域的时间越长,即皱峰处管壁减薄趋势越大。因此,由塑性变形过程中的体积不变原理可知,相同补料量下皱峰处的环向应变将越大,即皱峰半径越大。

5 结论

1) 随着温度的升高,管材轴向抗起皱能力下降,屈服强度和弹性模量随温度下降是其根本原因。

2) 无论温度高低,皱峰、皱谷处应力轨迹均在环向应变伸长和轴向应变压缩的区域。随着补料量的增大,皱峰处应力向壁厚减薄的方向发展,皱谷处应力向壁厚增加的方向发展。

3) 相对压力决定初始屈服的皱峰和皱谷处应力状态在屈服椭圆中所处区域以及壁厚的变化情况,即温度较高时,相对压力较大,初始屈服的皱峰、皱谷处应力状态较易处于管壁有减薄趋势的区域;而当温度较低时,相对压力较小,初始屈服的皱峰、皱谷处应力状态较易处于管壁有增厚趋势的区域。

4) 随着温度的升高,在相同加载路径下皱纹的高度和波长增大,皱纹趋向于向中间移动,且波数减少。

REFERENCES

- [1] 刘 钢,何祝斌,齐 军,汤泽军,苑世剑. 轻合金管材热态内压成形性能测试及样件试制[J]. 锻压技术, 2008, 33(3): 48-51.
LIU Gang, HE Zhu-bin, QI Jun, TANG Ze-jun, YUAN Shi-jian. Hydro-formability evaluation of light-weight alloy tubes and manufacturing of tubular components at elevated temperature[J]. Forging & Stamping Technology, 2008, 33(3): 48-51.
- [2] 王小松,苑世剑,王仲仁. 内高压成形起皱行为的研究[J]. 金属学报, 2003, 39(12): 1276-1280.
WANG Xiao-song, YUAN Shi-jian, WANG Zhong-ren. Research on wrinkling behavior in tube hydroforming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(12): 1276-1280.
- [3] KIM S, KIM Y. Analytical study for tube hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128: 232-239.
- [4] XIA Z C. Failure analysis of tubular hydroforming[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2001, 123: 423-429.
- [5] CHU E, XU Yu. Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46: 263-283.
- [6] 吴洪飞,苑世剑,王仲仁. 内高压成形塑性屈曲分析[J]. 锻压技术, 2001, 26(5): 29-36.
WU Hong-fei, YUAN Shi-jian, WANG Zhong-ren. Plastic buckling analysis of internal high-pressure forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2001, 26(5): 29-36.
- [7] BACK C, MIYAGAWA M. The plastic deformation and strength of circular cylindrical shells under internal pressure and/or axial force (1st report, experiment)[J]. Trans Jpn Soc Mech Eng, 1966, 235(32): 447-456.
- [8] 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 38-39.
YUAN Shi-jian. Modern hydroforming technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 38-39.
- [9] TAN Cheng-wen, XU Shan-na. Effect of temperature on mechanical behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc, 2007, 17(1): 41-45.
- [10] LEE S, CHENA Y H, WANG J Y. Isothermal sheet formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124: 19-24.
- [11] SILLEKENS W H, BOHLEN J. The MAGNEXTRUSCO project: European Community research on hydrostatic extrusion of magnesium[C]// KAINER K U. Proceedings of the 6th Int Conf on Magnesium Alloys and their Applications. Weinheim: Wiley-Verlag, 2004: 1046-1051.
- [12] AUE-U-LAN Y, ESNALOA J A, GUZA D, ALTAN T. Warm forming magnesium, aluminum tubes-A high-temperature process for lightweight alloys[EB/OL]. [2006-10-03]. <http://www.thefabricator.com>
- [13] LIEWALD M, POP R, WAGNER S. Magnesium tube hydroforming[C]// ELÍAS C, FRANCISCO C. Proc of 10th ESAFORM Conference on Material Forming. Zaragoza: Springer, 2007: 417-423.
- [14] TOROS S, OZTURK F, KACAR I. Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207: 1-12.
- [15] 汤泽军,何祝斌,苑世剑. 内高压成形过程塑性失稳起皱分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 34-38.
TANG Ze-jun, HE Zhu-bin, YUAN Shi-jian. Analysis of plastic wrinkling behavior in tube hydroforming process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 34-38.

(编辑 杨 华)