

圆筒形件拉深工艺的有效压边力研究

赵升吨, 张志远, 林军, 张永

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用高阶厚向异性屈服准则及经典塑性理论, 推导出圆筒形件拉深过程中的应力应变计算公式, 获得了避免拉深破裂的上限压边力解析表达式. 运用能量法研究了突缘产生起皱的能量变化情况, 推导出抑制突缘起皱的下限压边力解析表达式. 在上限压边力和下限压边力解析表达式的基础上, 给出圆筒形件拉深工艺成功的有效压边力区间, 并通过试验对理论计算结果进行了验证. 理论计算和试验结果均表明: 在拉深过程中, 若压边力小于下限压边力, 则拉深件起皱; 若压边力大于上限压边力, 则拉深件破裂; 若压边力位于下限压边力和上限压边力之间, 则拉深件能顺利成形.

关键词: 拉深; 破裂; 起皱; 压边力

中图分类号: TG386.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1012-05

Valid Blank Holding Force for Deep Cylindrical Cup

Zhao Shengdun, Zhang Zhiyuan, Lin Jun, Zhang Yong

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The stress and strain expressions of the flange section in deep drawing are obtained on the basis of classic plasticity theory and the anisotropic yield criterion with a high exponent, and the expressions of the maximum blank holding force free of fracture are deduced. The flange wrinkling is investigated by means of energy method to obtain the expression of the minimum blank holding force free of flange wrinkling. According to the maximum and minimum blank holding force, the valid range of blank holding force can be sought out. The numerical results coincide the experiments well. It is concluded that fracture and wrinkle appear if the blank holding force is beyond its maximum or below the minimum, and the deep drawing operation can be successfully performed if the blank holding force gets between the maximum and the minimum.

Keywords: deep drawing; fracture; wrinkling; blank holding force

在拉深工艺中, 虽然板料性能、模具尺寸及工艺参数等均能对拉深过程产生影响, 但只有压边力是比较容易控制的, 因此多年来对压边力的研究一直是拉深工艺^[1-2]研究的热点问题之一. Abedrabbo等^[3]和王金雷等^[4]均指出, 在液压拉深过程中, 存在一个合适的压边力区间, 若压边力位于此区间之上, 则拉深件由于压边力太大而发生破裂, 若压边力位于此区间之下, 则拉深件由于压边力太小而发生起皱. 文献^[1-2]推导了拉深过程中临界破裂时的极限

拉深力和使突缘区板料不起皱的最小压边力的数学表达式. 在以前的计算中, 对突缘变形区的应力计算进行了简化, 使用面积不变假设计算所得的拟合应变来进行计算. 由于 Hill 厚向异性屈服准则只适用于厚向异性大于 1 的材料, 因此 Hill 又提出了通用性更强更接近实际的高阶厚向异性屈服准则. 鉴于压边力对拉深过程的重要性, 因此很有必要对合适的压边力区间进行更为精确的计算. 本文对拉深过程的有效压边力区间进行了研究, 根据拉深过程面

积不变的假设,应用高阶厚向异性屈服准则,考虑摩擦及弯曲和反弯曲的作用,推导了突缘变形区应力应变的解析表达式,获得了避免发生破裂的上限压边力的解析表达式.采用能量法给出了抑制凸缘起皱的下限压边力解析表达式,并对上述理论进行了试验验证.

1 上限压边力

1.1 突缘区的应力和应变

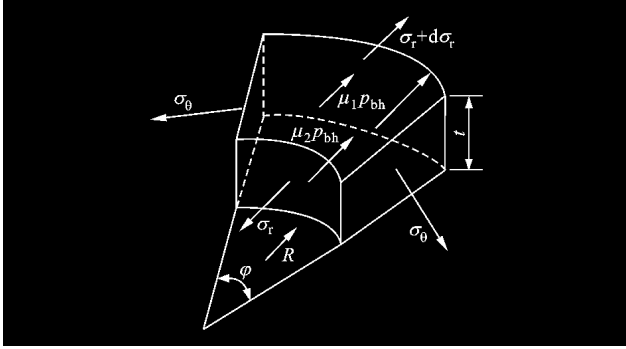
在圆筒形件拉深过程中,半径为 R 处的微体受力情况如图 1 所示,其应力平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dR} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{R} + \frac{(\mu_1 + \mu_2)p_{bh}}{t} = 0 \quad (1)$$

假设板料在板面内是各向同性的,在厚度方向上具有厚向异性,由于筒形件拉深工艺属于轴对称变形,其应力主轴和各向异性主轴一致,因此在拉深过程中,板料的变形满足如下屈服条件和塑性流动法向性原则^[5-6].屈服条件为

$$\sigma_r^a + \sigma_\theta^a + \gamma(\sigma_r - \sigma_\theta)^a = (1 + \gamma)\sigma_s^a \quad (2)$$

式中: γ 为板料的厚向异性; σ_s 为板料的屈服应力; a 是材料的晶格参数,对于体心立方晶格, $a=6$,对于面心立方晶格, $a=8$.



σ_r, σ_θ : 径向、切向应力; μ_1, μ_2 : 板料和压边圈及凹模表面之间的摩擦系数; p_{bh} : 突缘边缘的径向推力; t : 板料厚度; φ : 微体对应的圆心角

图1 突缘变形区微体受力情况示意图

塑性流动法向性原则为

$$d\epsilon_r : d\epsilon_\theta : d\epsilon_t = [\sigma_r^{a-1} + \gamma(\sigma_r - \sigma_\theta)^{a-1}] : [\sigma_\theta^{a-1} + \gamma(\sigma_\theta - \sigma_r)^{a-1}] : [\sigma_r^{a-1} + \sigma_\theta^{a-1}] \quad (3)$$

式中: $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_t$ 分别为径向、切向和厚向应变.假设板料的厚度不变,即 $d\epsilon_t=0$.考虑厚向异性时,突缘变形区的塑性方程为

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \bar{\gamma}\sigma_i \quad (4)$$

$$\bar{\gamma} = \left(\frac{2^{a-1}(\gamma+1)}{1+2^{a-1}\gamma} \right)^{1/a}$$

式中: σ_i 为等效应力.

设材料符合幂指数硬化定律,等效应力可根据实际应力曲线按最大主应变^[7]近似确定,并取其平均等效应力,即

$$\bar{\sigma}_i = K\bar{\epsilon}_i^n \quad (5)$$

式中: $\bar{\sigma}_i$ 为平均等效应力; K 为强度指数; n 为硬化指数; $\bar{\epsilon}_i$ 为平均等效应变,即

$$\bar{\epsilon}_i = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{R_0(R_0^2 - R_t^2 + R_p^2)^{1/2}}{R_t R_p} \right) \quad (6)$$

式中: R_0 为板料毛坯的初始半径; R_t 为突缘外边缘的半径; R_p 为凸模半径.与式(1)联立,考虑边界条件 $\sigma_r(R)|_{R=R_t}=0$,求解可得

$$\sigma_r = K\bar{\epsilon}_i^n \bar{\gamma} \ln \left(\frac{R_t}{R} \right) + \frac{(\mu_1 + \mu_2)p_{bh}}{t} (R_t - R) \quad (7)$$

由式(4)得到

$$\sigma_\theta = K\bar{\epsilon}_i^n \bar{\gamma} \left(1 - \ln \left(\frac{R_t}{R} \right) \right) - \frac{(\mu_1 + \mu_2)p_{bh}}{t} (R_t - R) \quad (8)$$

1.2 筒壁区受力分析

在拉深过程中,突缘变形区材料的变形抵抗力是拉深件筒壁所受拉力的主要组成部分,除此以外,当突缘材料绕过凹模圆角时,还须在凹模圆角区克服摩擦阻力,而筒壁所受的拉力还包括材料流经凹模圆角时所产生的弯曲抗力.考虑凹模圆角区的摩擦力,绕过凹模圆角后的拉力为

$$T' = T e^{\mu_2 \alpha} \quad (9)$$

式中: T 为绕过凹模圆角前的拉力; α 为板料与凹模圆角的包角.

板料流经凹模圆角时所要克服的弯曲抗力为

$$\sigma_w = \frac{2\alpha K \epsilon^n}{\pi(2r_d + t)n^n} \quad (10)$$

式中: r_d 为凹模圆角半径.综上所述,为了能完成拉深,拉深件筒壁所受的最大拉应力为

$$\sigma_{p, \max} = \left(K\bar{\epsilon}_i^n \bar{\gamma} \ln \left(\frac{R_t}{R_p} \right) + \frac{(\mu_1 + \mu_2)F_{bh}}{\pi t(R_t + R_i)} \right) e^{\mu_2 \alpha} + \frac{2\alpha K \epsilon^n}{\pi(2r_d + t)n^n} \quad (11)$$

式中: R_i 为突缘内边缘半径; F_{bh} 为压边力.

1.3 筒壁传力区的承载能力

板料在拉深过程中,在筒壁直段与凸模圆角相切处,筒壁拉伸引起的收缩受到刚性凸模的阻止,变形属平面应变性质, $\epsilon_\theta=0, \epsilon_r=-\epsilon_t$,假设板厚方向的应力 $\sigma_t=0$,由 $d\epsilon_\theta=0$ 和式(3)得

$$\sigma_{\theta} = \frac{\gamma^{1/(\alpha-1)}}{1 + \gamma^{1/(\alpha-1)}} \sigma_r \quad (12)$$

其等效应力及等效应变分别为

$$\sigma_i = \sigma_r S; \quad S = \left(\frac{(1+\gamma)(1+\gamma^{1/(\alpha-1)})^{\alpha-1}}{(1+\gamma^{1/(\alpha-1)})^{\alpha-1} + \gamma} \right)^{1/\alpha};$$

$$\epsilon_i = \epsilon_r \quad (13)$$

式中: S 为与板料厚向异性及晶格参数有关的参数.

当筒壁受力达到最大时, $dF=0$, 此时相应的等效应变为 $\epsilon_{i, \max} = Sn$, 若拉深件的筒壁受力达到承载极限, 继续拉深会发生破裂. 因此, 筒壁的承载极限为

$$F_{\lim} = 2\pi R_p t_0 K S^{n+1} (n/e)^n \quad (14)$$

当筒壁受力达到承载极限值时, 筒壁传力区所受的单位拉深力为

$$\sigma_{\lim} = K S^{n+1} (n/e)^n \quad (15)$$

为了使拉深过程不出现破裂, 则应控制压边力, 使筒壁所受的最大拉应力不超过筒壁的承载能力, 即 $\sigma_{p, \max} \leq \sigma_{\lim}$. 在拉深过程中, 压边力的最大值为不发生拉深破裂的上限压边力 $F_{bh, \max}$, 并满足

$$F_{bh, \max} \leq \frac{\pi t K (R_t + R_i)}{\mu_1 + \mu_2} \cdot$$

$$\left(\left(S^{n+1} (n/e)^n - \frac{2\alpha e^n}{\pi(2r_d + t)n^n} \right) e^{-\gamma_2 \alpha} - K \bar{\epsilon}_i^n \bar{\gamma} \ln \left(\frac{R_t}{R_p} \right) \right) \quad (16)$$

2 下限压边力

若拉深过程中突缘发生起皱, 能量变化主要有: 突缘失稳时所产生的波纹隆起所需的弯曲功 u_w ; 突缘起皱后, 切向应力因周长缩短而释放出的能量 u_{θ} ; 压边力所消耗的功 u_{bh} 等. 根据能量守恒定律可知, 要使拉深过程中突缘不发生起皱, 需满足的条件为

$$u_{\theta} \leq u_w + u_{bh} \quad (17)$$

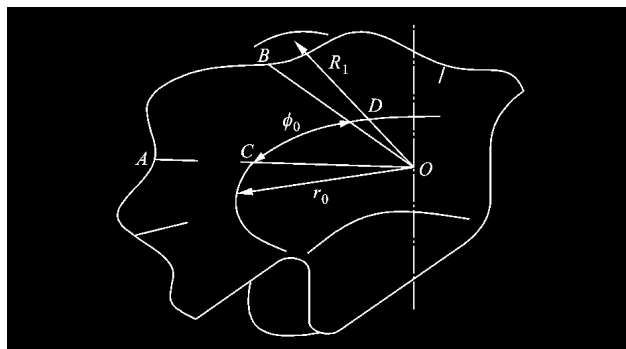
假定突缘起皱后的波纹表面如图2所示, 其数学模型可表示为

$$y = \frac{y_0}{2} \left(1 - \cos 2\pi \frac{\phi}{\phi_0} \right) \left(\frac{R - R_p}{R_t - R_p} \right)^{1/2} \quad (18)$$

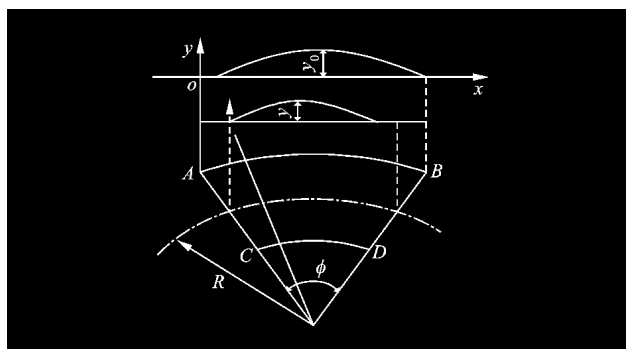
式中: y 为突缘上任一点 (R, ϕ) 处的挠度; y_0 为单波的最大挠度; ϕ 为单波任意弧段所对的圆心角; ϕ_0 为单波所对的圆心角. 由式(18)可知, 当 R 为任意值时, 若 $\phi=0$ 或 $\phi=\phi_0$, 则 $y=0$, 只有当 $R=R_t$ 且 $\phi=\phi_0/2$ 时, $y=y_0$.

2.1 单波周长缩短能和皱纹弯曲功

当拉深件突缘失稳起皱后, 周长缩短, 单波周长的缩短量为



(a) 突缘起皱



(b) 单波皱纹

A、B、C、D: 单波皱纹边界点

图2 拉深件突缘起皱尺寸示意图

$$\Delta L = \frac{1}{2} \int_0^{\phi_0} \frac{1}{R} \left(\frac{dy}{d\phi} \right)^2 d\phi =$$

$$\frac{\pi^2 y_0^2}{2\phi_0^2 (R_t - R_i)} \int_0^{\phi_0} \frac{R - R_i}{R} \sin^2 \left(\frac{2\pi\phi}{\phi_0} \right) d\phi \quad (19)$$

在单波内, 由于周长缩短而释放的能量为

$$u_{\theta} = \int_{R_i}^{R_t} \sigma_{\theta} \Delta S t dR =$$

$$\frac{\pi^2 y_0^2 t}{4\phi_0 (R_t - R_p)} \left\{ K \bar{\epsilon}_i^n \bar{\gamma} \frac{R_p}{2} \left(\ln \left(\frac{R_t}{R_p} \right) \right)^2 - \right.$$

$$\left. \frac{(\mu_1 + \mu_2) F_{bh}}{\pi t (R_t^2 - R_i^2)} \left(\frac{R_t^2 - R_p^2}{2} - R_t R_p \ln \left(\frac{R_t}{R_p} \right) \right) \right\} \quad (20)$$

拉深件突缘发生失稳起皱后, 单波皱纹弯曲功为

$$u_w = \int_{R_i}^{R_t} \int_0^L \frac{1}{24} D \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 t^3 dR dx \quad (21)$$

式中: D 为切线模数, $D = K n \bar{\epsilon}_0^{n-1}$. 因此

$$u_w = \frac{\pi^4 y_0^2 t^3 K n \bar{\epsilon}_i^{n-1} (R_t - R_p)}{24 \phi_0^3 R_t^2 R_p} \quad (22)$$

2.2 压边力单波做功及下限压边力的计算

当拉深件突缘起皱后, 压边力基本上作用在挠度最大的突缘边缘区, 每个单波上所消耗的压边功为

$$u_{bh} = \frac{y_0 \phi_0 F_{bh}}{2\pi} \quad (23)$$

将式(20)、式(22)和式(4)代入式(17)可得

$$F_{bh} \geq \frac{C_1 \phi_0^2 - C_2}{C_3 \phi_0^2 + C_4 \phi_0^4} \quad (24)$$

其中简化常数

$$C_1 = \frac{\pi^2 y_0^2 t}{8(R_t - R_p)} K \bar{\epsilon}_i^{-n} \bar{\gamma} R_p \left(\ln \left(\frac{R_t}{R_i} \right) \right)^2$$

$$C_2 = \frac{\pi^4 y_0^2 t^3 K n \bar{\epsilon}_i^{n-1} (R_t - R_p)}{24 R_t^2 R_p}$$

$$C_3 = \frac{\pi y_0^2 (\mu_1 + \mu_2)}{4(R_t - R_p)(R_t^2 - R_i^2)} \left(\frac{R_t^2 - R_p^2}{2} - R_t R_p \ln \left(\frac{R_t}{R_i} \right) \right)$$

$$C_4 = \frac{y_0}{2\pi}$$

令 $\frac{dF_{bh}}{d\phi_0} = 0$, 推导计算可得

$$\phi_0 = \left(\frac{C_2 C_4 + (C_2^2 C_4^2 + C_1 C_2 C_3 C_4)^{1/2}}{C_1 C_4} \right)^{1/2} \quad (25)$$

此时, 压边力达到最小, 最小压边力即抑制起皱所需的下限压边力为

$$F_{bh, \min} = C_1^2 (C_2^2 C_4^2 + C_1 C_2 C_3 C_4)^{1/2} / [(C_2 C_4 + (C_2^2 C_4^2 + C_1 C_2 C_3 C_4)^{1/2}) \cdot (C_1 C_3 + C_2 C_4 + (C_2^2 C_4^2 + C_1 C_2 C_3 C_4)^{1/2})] \quad (26)$$

3 有效压边力区间

式(16)给出了使拉深过程中板料不发生破裂的压边力的上限, 如果在拉深过程中的压边力不超过该上限, 从理论上来说, 拉深过程中板料的受力将不超过其性能极限, 破裂就不会发生. 若压边力过小, 由严重起皱而引起的破裂则无法通过此式来确定.

式(26)给出了使拉深过程中板料不发生塑性失稳起皱所需的压边力的下限, 若拉深过程中板料所

受的压边力不低于该式的值, 从理论上来说, 拉深过程中板料就不会发生起皱.

综合式(16)和式(26), 若拉深过程中板料所受的压边力处于式(16)和式(26)给定的范围内, 即位于抑制起皱的下限压边力和避免破裂的上限压边力区间内, 就能拉深出既不破裂也不起皱的零件. 该区间越大, 则拉深成形过程就越易于顺利进行, 因此该范围为有效压边力区间. 如图3所示, 若拉深比 β 为 2.1 时, 图 3a 中的上限压边力与下限压边力曲线不相交, 即存在着有效压边力区间. 若试验中调整压边力使拉深过程的压边力位于该区间内, 则拉深可以顺利进行. 当拉深比增大为 2.3 时, 如图 3b 所示, 上限压边力与下限压边力相交或有重合部分, 在拉深过程中, 不管压边力如何调整, 总会有破裂或起皱发生, 使拉深不能顺利进行. 当拉深比为 2.2 时, 上限压边力与下限压边力相切(图 3c), 说明有既不破裂又不起皱的临界压边力存在, 这种情况所对应的拉深比为最大拉深比, 此时板料在该工艺条件下的成形能力达到极限.

4 试验验证

在 XP-S-500 型通用液压机上, 采用所研制的模具装置对不同直径的厚度为 1 mm 的 08Al 板料进行拉深试验, 以验证所推导理论公式的正确性, 试验所用的模具参数如表 1 所示.

试验分 5 组进行, 板料的原始直径分别为 74、76、78、80 和 82 mm, 理论计算的有效压边力区间及试验结果如图 4 所示. 由图可知: 如果试验中的压边力处于本文所计算的有效压边力区间之外, 则拉深

表 1 试验模具参数

R_p/mm	R_t/mm	r_d/mm
18.65	19.75	10

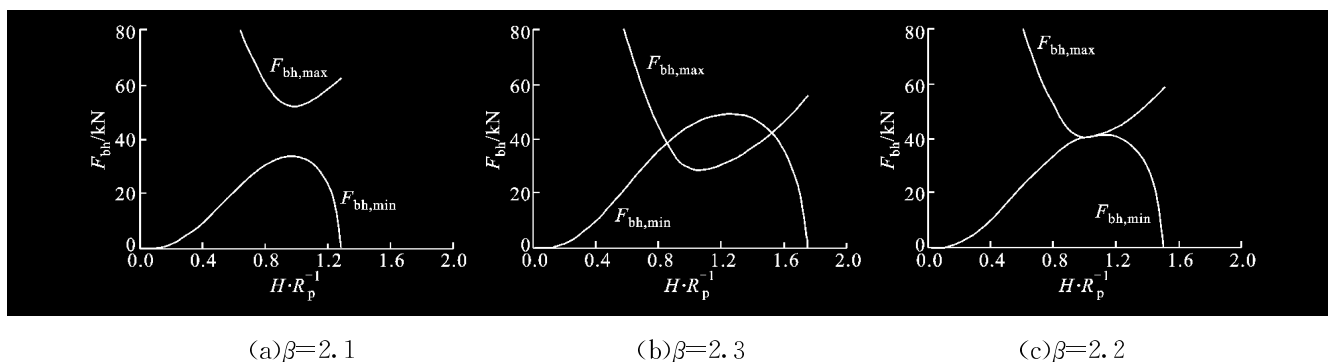


图3 拉深件的上限压边力与下限压边力

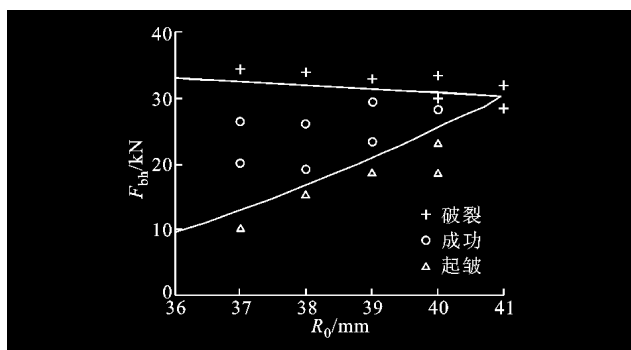
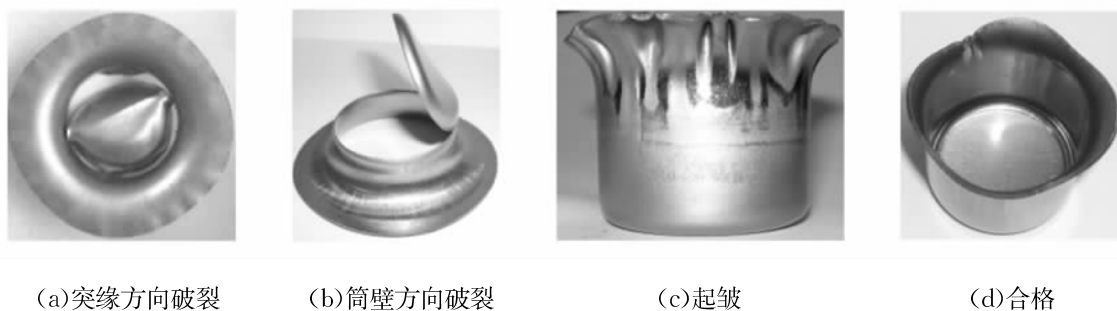


图4 有效压边力区间及试验结果

全部失败;如果压边力大于避免破裂的上限压边力时,则板料发生破裂;若压边力小于抑制起皱的下限压边力时,则板料起皱必然发生.如果压边力位于避免破裂的上限压边力和抑制起皱的下限压边力之间,则拉深可以成功进行.值得注意的是,对于初始直径为 80 mm 的板料,虽然压边力小于上限压边力,但仍有一例出现破裂,这可能是由于板料材料自身的缺陷造成的.总的来说,试验结果与理论计算结果比较一致,说明本文推导的理论公式正确,部分试验结果的照片如图 5 所示.



(a)突缘方向破裂

(b)筒壁方向破裂

(c)起皱

(d)合格

图5 板料的部分试验结果

5 结 论

(1)本文运用高阶厚向异性屈服准则及能量法对筒形件拉深工艺的有效压边力区间进行研究,推导获得了避免拉深破裂的上限压边力及抑制起皱的下限压边力的解析表达式.

(2)对于一定的拉深工艺,当上限压边力曲线与下限压边力曲线不相交时,若拉深过程中的压边力处于本文计算的有效压边力区间内,则可拉深出既不起皱又不破裂的合格拉深件.若上限压边力曲线与下限压边力曲线相交,则拉深过程中起皱或破裂将是不可避免的.若上限压边力曲线与下限压边力曲线相切,则在该工艺条件下板料的成形能力达到极限.

(3)对 1 mm 厚的 08Al 板料在 XP-S-500 型液压机上进行拉深试验,试验结果表明了本文推导的理论计算公式的正确性.

参考文献:

- [1] 赵升吨,王骥,尚春阳,等.筒形件液压拉深过程最优压边力的研究[J].应用力学学报,2004,21(3):101-105.
- Zhao Shengdun, Wang Ji, Shang Chunyang, et al.

Optimal blank holding force in hydraulic drawing process of cylindrical cup[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(3):101-105.

- [2] 王骥.筒形件新型增压充液拉深塑性变形机理及其实现的研究[D].西安:西安交通大学机械工程学院,2005.
- [3] Abedrabbo N, Zampaloni M A, Pourboghra F. Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(3):333-358.
- [4] 王金雷,卫原平,阮雪榆.抛物体形拉深件液压成形工艺的数值模拟[J].塑性工程学报,2001,8(4):143-146.
- Wang Jinlei, Wei Yuanping, Ruan Xueyu. Numerical simulation of the hydromechanical deep drawing parabola workpieces [J]. Journal of Plasticity Engineer, 2001, 8(4):143-146.
- [5] Hosford W F, Caddell R M. Metal forming mechanics and metallurgy[M]. Englewood Cliffs, USA: PTR Prentice-Hall,1993: 270-281.
- [6] Hill R. The mathematical theory of plasticity[M]. New York: Oxford University Press, 1983: 317-340.
- [7] 胡世光,陈鹤峰.板料冷压成形的工程解析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004:109-159.

(编辑 管咏梅)