

板料拉弯结构弯曲模的凹模圆角半径分析

施于庆

(浙江科技学院 机械与汽车工程学院,杭州 310023)

摘要: 拉弯结构的模具设计有助于减小U形件弯曲后的回弹,但模具的凹模圆角半径设计会对抑制回弹的效果产生影响。通过拉弯时板料受力情况分析计算得出:凹模圆角半径大于凸模圆角半径,U形件有向内侧回弹趋势;凹模圆角半径小于凸模圆角半径,U形件有向外侧回弹趋势;而凹模圆角半径等于凸模圆角半径,则控制回弹的效果最理想。

关键词: 拉弯模具;凹模圆角半径;分析计算;回弹

中图分类号: TG386.32

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2016)05-0344-06

Analysis on shoulder radius of die in sheet-metal bending die with stretch construction

SHI Yuqing

(School of Mechanical and Automobile Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,
Hangzhou 310023, China)

Abstract: The die construction with stretch bending is useful to reduce springing back after bending of U-shape. But springing back is affected by shoulder radius of die. Analysis on its load conditions in sheet-metal for U-shape is given. The calculation results show that when shoulder radius of die is larger than shoulder radius of punch, springing back of U-shape is inside; when shoulder radius of die is smaller than shoulder radius of punch, springing back of U-shape is outside; when shoulder radius of die is equal to shoulder radius of punch, result of controlling springing back is ideal.

Keywords: stretch bending die; shoulder radius of die; analysis and calculation; springing back

U形件的板料弯曲是一个大挠度的非线性塑性成形过程,板料在压制过程中产生复杂的应力应变后引起的回弹是板料弯曲难以解决的问题之一^[1]。拉弯工艺或拉弯结构的模具设计能改善板料弯曲过程中的受力情况,可抑制弯曲后产生的回弹或将回弹控制在一个可控范围内,达到产品设计要求^[2]。减小

收稿日期: 2016-01-02

作者简介: 施于庆(1959—),男,浙江省杭州人,教授,硕士,主要从事板料成形研究。

回弹的方法一般有补偿法和修正法,前者是预先估计一个回弹量,在模具设计时就考虑回弹量大小;后者是减少板料与模具的接触面积来实现减小回弹^[3]。但在实际生产中,这两种方法的效果并不理想。变压边力在弯曲过程加载变化的压边力,有助于改善受力情况,但还是要与拉弯结构配合使用,而且这种方法实现起来成本比较高^[4]。U形件弯曲时,在模具上增加类似于拉深结构上的压料圈,通过在压料圈上加载压力在板料上下平面上产生切向摩擦力,使板料在流经凹模圆角产生拉弯作用并被拉进凹模模腔里成形,是一种比较理想结构设计。压料圈上加载的压边力产生切向摩擦力,使得板料内外层都产生拉应力,尽量抵消内层的压应力,如果压边力减小,就会使得弯曲结束后板料内部抵消变形抗力的抗弯内力矩减小,而抵消变形抗力的抗弯内力矩就是产生回弹的主要因素之一。凸模圆角半径和凹模圆角半径设计的大小会对应力中性层位置产生不同偏移值,板料受到内外层压力和拉力对应力中性层就有不同的弯曲力矩,使弯曲结束后板料内部抵消变形抗力的抗弯内力矩不同,进而影响回弹量的大小。

1 板料弯曲时应力分析和计算

图1所示的是板料的U形件不加压边圈的弯曲,图2是板料弯曲的受力状态。

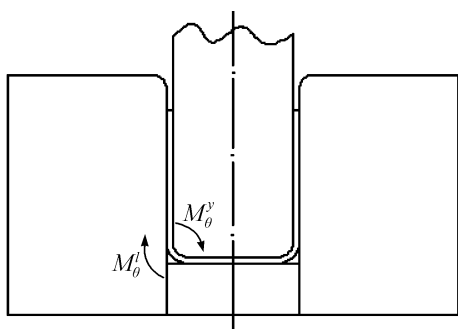


图1 U形件弯曲

Fig. 1 U-shape bending

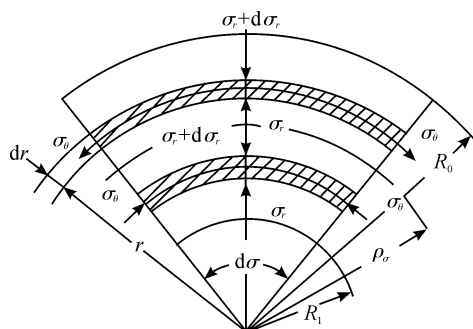


图2 宽板弯曲时的单元体上的作用力

Fig. 2 Press on unit during sheet-metal bending of wide plate

外层取单元体在厚度方向上的力学平衡方程为:

$$\sigma_r r d\alpha - (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\alpha - 2\sigma_\theta dr \sin \frac{d\alpha}{2} = 0。$$

以 $\sin \frac{d\alpha}{2} \approx \frac{d\alpha}{2}$ 代入上式并略去高次项整理得

$$d\sigma_r = -(\sigma_r + \sigma_\theta) \frac{dr}{r}。 \quad (1)$$

内层取单元体在厚度方向上的力学平衡方程为

$$d\sigma_r = (\sigma_\theta - \sigma_r) \frac{dr}{r}。 \quad (2)$$

板料冷弯曲产生加工硬化时,采用不同的实际应力-应变曲线进行分析将有不同的计算结果。为方便计算,不计中间弹性变形的影响,采用近似硬化直线作为简化模型。应力-应变关系式为

$$\sigma = \sigma_{s0} + K \epsilon，$$

式中: σ_{s0} 为材料在完全退火状态下的屈服强度; K 为硬化模数; ϵ 为对数应变,在半径 r 处, $\epsilon = \ln \frac{r}{\rho_\epsilon}$ (ρ_ϵ 为应变中性层曲率半径)^[5]。

对外层金属 $r > \rho_\epsilon$: 当为平面应变状态时,塑性补充条件为

$$(\sigma_\theta + \sigma_r) = 1.55 \left(\sigma_{s0} + K \ln \frac{r}{\rho_\epsilon} \right)。 \quad (3)$$

对内层金属 $r < \rho_\epsilon$: 当为平面应变状态时,塑性补充条件为

$$(\sigma_\theta - \sigma_r) = 1.55 \left(\sigma_{s0} - K \ln \frac{r}{\rho_\epsilon} \right)。 \quad (4)$$

将式(3)和式(4)分别代入式(1)和式(2),不考虑径向和平面应变状态时的中间主应力,积分得外层:

$$\sigma_{\theta}^l = 1.55 \left[\sigma_{s0} \left(1 - \ln \frac{R_0}{r} \right) + \frac{K}{2} \left(2 \ln \frac{r}{\rho_{\epsilon}} - \ln^2 \frac{R_0}{\rho_{\epsilon}} + \ln^2 \frac{r}{\rho_{\epsilon}} \right) \right], \quad (5)$$

内层:

$$\sigma_{\theta}^y = 1.55 \left[\sigma_{s0} \left(1 + \ln \frac{r}{R_1} \right) - \frac{K}{2} \left(2 \ln \frac{r}{\rho_{\epsilon}} - \ln^2 \frac{R_1}{\rho_{\epsilon}} + \ln^2 \frac{r}{\rho_{\epsilon}} \right) \right], \quad (6)$$

式中: σ_{θ}^l 和 σ_{θ}^y 分别为拉应力和压应力。

有硬化时的应力中性层,若考虑材料的加工硬化,由式(5)和式(6)可得

$$\frac{2\sigma_{s0}}{K} \ln \frac{R_0 R_1}{\rho_{\sigma}^2} + \ln \frac{R_0}{R_1} \ln \frac{R_0 R_1}{\rho_{\epsilon}^2} = 0.$$

如果在弯曲过程中应力中性层与应变中性层重合,则 $\rho_{\sigma} = \rho_{\epsilon}$ 。由于 $\frac{2\sigma_{s0}}{K} + \ln \frac{R_0}{R_1} \neq 0$,

所以有

$$\ln \frac{R_0 R_1}{\rho_{\sigma}^2} = 0,$$

从而有

$$\rho_{\sigma} = \sqrt{R_0 R_1}.$$

对于图1和图2所示的板料弯曲,外层拉应力 σ_{θ}^l 产生的拉力 P_l 对应力中性层的弯矩 M_{θ}^l (图1和图3),根据式(5)有

$$M_{\theta}^l = P_l s = P_l (r - \rho_{\sigma}) = \int_{\rho_{\sigma}}^{R_0} \sigma_{\theta}^l b (r - \rho_{\sigma}) dr.$$

同理,内层压应力 σ_{θ}^y 产生的拉力 P_y 对应力中性层的弯矩 M_{θ}^y ,根据式(6)有

$$M_{\theta}^y = P_y (\rho_{\sigma} - r) = \int_{\rho_{\sigma}}^{R_1} \sigma_{\theta}^y b (\rho_{\sigma} - r) dr.$$

M_{θ}^l 和 M_{θ}^y 虽然大小不同,但围绕应力中性层同方向旋转,弯曲结束后,在 U 形件上就会存在抵抗的 M_{θ}^l 和 M_{θ}^y 的并与之方向相反的残留的 $M_{\theta}^{l'}$ 和 $M_{\theta}^{y'}$ (图4),使回弹产生或不可避免。

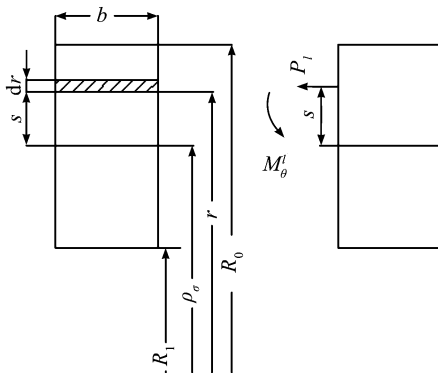


图3 板厚方向上的弯矩

Fig. 3 Bending moment on plate's thickness direction

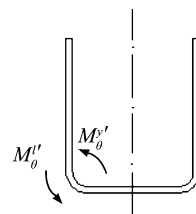


图4 残留的 $M_{\theta}^{l'}$ 和 $M_{\theta}^{y'}$

Fig. 4 Residual $M_{\theta}^{l'}$ and $M_{\theta}^{y'}$

2 拉弯结构模具的圆角半径对回弹的影响

拉弯结构模具在 U 形件弯曲过程中增加压边圈(图5),压边圈上加载压边力 F_y ,于是,在板料与压边圈、板料与凹模上平面产生切向摩擦力 f ,使得凹模圆角处垂直于应力中性层到板料与压边圈接触最外层的面产生拉力,垂直于应力中性层到板料与凹模接触最内层的面产生压力。分别有拉力对应力中性层的弯矩和压力对中性层的弯矩存在。施加在凹模圆角处的中性层这个拉力和压力产生弯矩

旋向相同,可以互相叠加。同理,凸模圆角处的拉力和压力产生弯矩旋向相同,也可以互相叠加。但两者叠加后的弯矩旋向不同。弯曲结束后,抵消凸模圆角处叠加弯矩的残留弯矩使工件产生回弹,而抵消凹模圆角处叠加弯矩的残留弯矩抑制工件产生回弹。所以,拉弯结构模具的优势是比较显著的。但如果不同凸模圆角半径 r_p 和凹模圆角半径 r_d 的设计,还是会对抑制工件产生回弹作用有所影响。

将式(5)和式(6)分别写成凸模圆角半径 r_p 处和凹模圆角半径 r_d 处的内层应力和外层应力,则凸模圆角半径 r_p 处的内层应力 σ_p^l 和外层应力 σ_p^y 如下:

$$\sigma_p^l = 1.55 \left[\sigma_{s0} \left(1 - \ln \frac{r_p + t}{r} \right) + \frac{K}{2} \left(2 \ln \frac{r}{\rho_\epsilon} - \ln^2 \frac{r_p + t}{\rho_\epsilon} + \ln^2 \frac{r}{\rho_\epsilon} \right) \right],$$

$$\sigma_p^y = 1.55 \left[\sigma_{s0} \left(1 + \ln \frac{r}{r_p} \right) - \frac{K}{2} \left(2 \ln \frac{r}{\rho_\epsilon} - \ln^2 \frac{r_p}{\rho_\epsilon} + \ln^2 \frac{r}{\rho_\epsilon} \right) \right].$$

凹模圆角半径 r_d 处内层应力 σ_d^l 和外层应力 σ_d^y 如下:

$$\sigma_d^l = 1.55 \left[\sigma_{s0} \left(1 - \ln \frac{r_d + t}{r} \right) + \frac{K}{2} \left(2 \ln \frac{r}{\rho_\epsilon} - \ln^2 \frac{r_d + t}{\rho_\epsilon} + \ln^2 \frac{r}{\rho_\epsilon} \right) \right],$$

$$\sigma_d^y = 1.55 \left[\sigma_{s0} \left(1 + \ln \frac{r}{r_d} \right) - \frac{K}{2} \left(2 \ln \frac{r}{\rho_\epsilon} - \ln^2 \frac{r_d}{\rho_\epsilon} + \ln^2 \frac{r}{\rho_\epsilon} \right) \right].$$

式中: t 为板料厚度。

1) 凸模圆角半径和凹模圆角半径相等,即 $r_p = r_d$ 时,由图6和图7所示拉弯过程中受力分析,可得凹模圆角半径上下弯矩

$$M_d^l = \int_{\rho_\sigma^d}^{r_d+t} \sigma_d^l b (r - \rho_\sigma^d) dr,$$

$$M_d^y = \int_{\rho_\sigma^d}^{r_d} \sigma_d^y b (\rho_\sigma^d - r) dr.$$

同理,凸模圆角半径内外弯矩

$$M_p^l = \int_{\rho_\sigma^p}^{r_p+t} \sigma_p^l b (r - \rho_\sigma^p) dr,$$

$$M_p^y = \int_{\rho_\sigma^p}^{r_p} \sigma_p^y b (\rho_\sigma^p - r) dr.$$

因此有

$$\sum M_p = M_p^l + M_p^y,$$

$$\sum M_d = M_d^l + M_d^y.$$

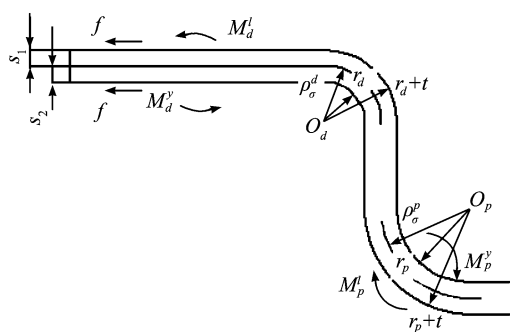


图6 拉弯过程中受力分析

Fig. 6 Pressure analysis in stretch bending

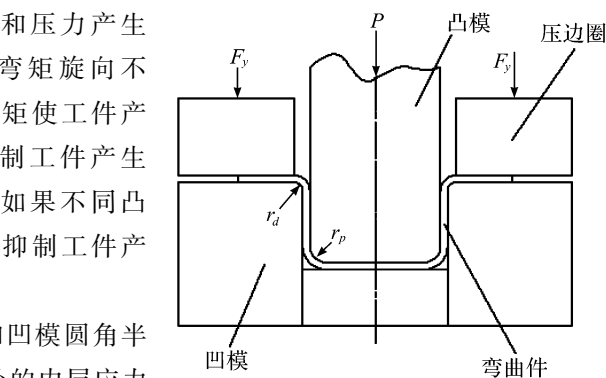


图5 拉弯结构模具

Fig. 5 Die with stretch bending

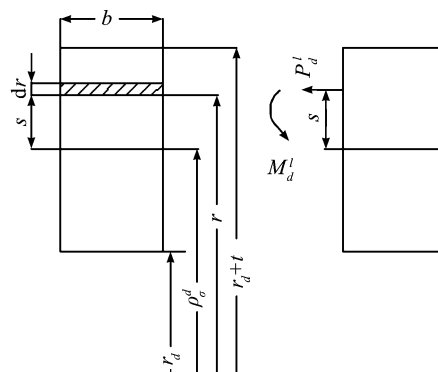


图7 拉弯过程中弯矩分析

Fig. 7 Analysis on bending moment in stretch bending

由于压边力 F_y 产生的切向摩擦力 f 存在,总可以使 $\sum M_p$ 和 $\sum M_d$ 在数值上相等。设弯矩顺时针为负,逆时针为正,则

$$\sum M_d = -\sum M_p. \quad (7)$$

假设抵抗 $\sum M_d$ 和 $\sum M_p$ 残留的 $\sum M'_d$ 和 $\sum M'_p$ 在数值上也相等,则

$$\sum M'_p = -\sum M'_d, \quad (8)$$

式(8)中: $\sum M'_p$ 为产生回弹, $\sum M'_d$ 为抑制回弹。

进一步分析:虽然凸模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 和凹模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 相等,但并不在同板料的同一层位置上,式(7)或式(8)只是数值上的相等。故结论是:因压制时,凸模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 的计算,是从板料与凸模(上面)这边接触的,而凹模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 与板料是从凹模(下面)这边接触的。另外,由应力 $\sigma = E\epsilon = E \frac{y}{\rho}$ 可知, y 为应变中性层, ρ 为曲率半径,又 y 所处的位置并不在板料的厚度中间,由于 ρ_σ^d 与 ρ_σ^d 的方向是不一致的,因此并没完全平衡。但 ρ_σ^d 位置离板厚中间的距离和 ρ_σ^d 位置离板厚中间的距离是相同的,只要凹模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 到最外层的距离与凸模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 到最内层的距离差值很小,就可认为两者产生的弯矩在同一位置上。

设凹模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 到最外层的距离 s_1 为

$$r_d + t - \rho_\sigma^d = r_d + t - \sqrt{r_d(r_d + t)}, \quad (9)$$

凸模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^p 到最内层的距离 s_2 为

$$\rho_\sigma^p - r_p = \sqrt{r_p(r_p + t)} - r_p, \quad (10)$$

两者的差值

$$\Delta s = r_d + t - \sqrt{r_d(r_d + t)} - \sqrt{r_p(r_p + t)} + r_p.$$

按一般的板料弯曲的厚度与内弯曲半径的设计要求,通过计算,差值 Δs 小到可忽略不计。因此可认为,残留的 $\Delta M'_d$ 和 $\Delta M'_p$ 大小相等,方向相反并在板料的同一层位置上,对抑制回弹效果明显。与压边圈接触处的摩擦力 f 对凹模圆角处板料应力中性层的力矩用 M_f^l 表示,且

$$M_f^l = fs_1 = f[r_d + t - \sqrt{r_d(r_d + t)}].$$

与凹模上平面接触处的摩擦力 f 对凹模圆角处板料应力中性层的力矩 M_f^y 表示,且

$$M_f^y = fs_2 = f[\sqrt{r_p(r_p + t)} - r_p],$$

因

$$s_1 - s_2 = (r_d + t - \sqrt{r_d(r_d + t)}) - (\sqrt{r_p(r_p + t)} - r_p) = \Delta s,$$

所以可认为,由于上下摩擦阻力引起的 M_f^l 和 M_f^y 在弯曲过程中就相互抵消。对弯曲结束后的回弹没有影响。

2) 凹模圆角半径大于凸模圆角半径,即 $r_d > r_p$ 时,由计算可得

$$\begin{aligned} \sum M_d &= M_d^l + M_d^y > \sum M_p = M_p^l + M_p^y, \\ \sum M'_d &> \left| \sum M'_p \right|. \end{aligned}$$

弯曲结束后,U形件有向内侧回弹的趋势。

3) 凹模圆角半径小于凸模圆角半径,即 $r_d < r_p$ 时,由计算可得

$$\begin{aligned} \sum M_d &= M_d^l + M_d^y < \sum M_p = M_p^l + M_p^y, \\ \sum M'_d &< \left| \sum M'_p \right|. \end{aligned}$$

弯曲结束后,U形件有向外侧回弹的趋势。

3 算 例

某载重车纵梁材料 16MnL,料厚为 8 mm,U 形件内圆角半径设计要求为 12 mm,设模具中的凸模圆角半径和凹模圆角半径相等, $r_d = r_p = 12(\text{mm})$,则:

$$\rho_\sigma^p = \sqrt{R_0 R_1} = \sqrt{20 \times 12} = 15.49(\text{mm}),$$

$$\rho_\sigma^d = \sqrt{R_0 R_1} = \sqrt{20 \times 12} = 15.49(\text{mm}).$$

凹模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 到最外层的距离 s_1 ,由式(9)算得:

$$s_1 = r_d + t - \rho_\sigma^d = r_d + t - \sqrt{r_d(r_d + t)} = 12 + 8 - 15.49 = 4.51(\text{mm}),$$

ρ_σ^d 位置离板厚中间的距离:

$$s_1 - t/2 = 4.51 - 4 = 0.51(\text{mm}).$$

凸模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^p 到最内层的距离 s_2 ,由式(10)算得:

$$s_2 = \rho_\sigma^p - r_p = \sqrt{r_p(r_p + t)} - r_p = 15.49 - 12 = 3.49(\text{mm}),$$

ρ_σ^p 位置离板厚中间的距离:

$$t/2 - s_1 = 4 - 3.49 = 0.51(\text{mm}).$$

两者的差值 $\Delta s = s_1 - s_2 = (r_d + t - \sqrt{r_d(r_d + t)}) - (\sqrt{r_p(r_p + t)} - r_p) = 4.51 - 3.49 = 1.02(\text{mm})$ 。

4 结 语

拉弯结构模具有助于抑制回弹,但是,凸模和凹模圆角半径设计也是一个关键因素。凸模圆角半径由冲压结构设计要求所得,一般不能更改;而凹模圆角半径由模具设计时确定,由分析计算结果可得:凹模圆角半径大于或小于凸模圆角半径都不是最理想的结构设计,只有取凹模圆角半径等于凸模圆角半径的结构设计时,才是最理想的。此时,虽然凹模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 和凸模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^p 在数值上相等,压制时,由于两者方向不同,凹模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^d 到最外层的距离与凸模圆角处的应力中心层曲率半径 ρ_σ^p 到最内层的距离不同,但两者的距离差值很小(可忽略不计),于是可认为两者产生的弯矩在同一位置,因此对抑制回弹的效果最佳。

参考文献:

- [1] 施于庆. 抑制汽车纵梁弯曲回弹的弯曲模改进设计[J]. 浙江科技学院学报, 2014, 26(6): 405.
- [2] 施于庆. 冲压工艺及模具设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012: 132.
- [3] 王桂英. 冲压工艺与模具设计[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2010: 122.
- [4] 韩雄伟, 李欣星, 陈祖红. 基于 BP 神经网络的铝合金板料弯曲回弹的研究[J]. 模具工业, 2011, 37(9): 22.
- [5] 李尧. 金属塑性成形原理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 144-146.