

板料数控渐进成形中变形力的研究

周六如

(南昌大学机电工程学院, 南昌 330031)

摘要:研究了板料数控渐进成形变形力的2种计算方法:按照纯剪切变形的方式计算变形力;按照剪切和弯曲综合变形的方式计算变形力。同时,通过实验测量出渐进成形的实际变形力。通过比较,实验测定的变形力与假定剪切弯曲变形计算的变形力相近,可以认为渐进成形是一种剪切弯曲变形。

关键词:渐进成形;板料成形;变形力

中图分类号: TG381 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2010)01-0010-05

A Study of NC Incremental Sheet Metal Forming Force

ZHOU Liu-ru

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: NC incremental sheet metal forming force is an important process parameter. It is studied by shear deformation and shear-bending deformation. The true forming force is measured by experiment. By comparison, the result is very close. A conclusion is drawn that NC incremental sheet metal forming process is a shear-bending deformation. This is a convincing basis for equipment selection and forming mechanism.

Key words: incremental forming; sheet metal forming; forming force

板料数控渐进成形工艺是一种柔性的成形工艺,它根据板料零件的成形要求设计数控程序,然后通过数控机床的进给系统,成形工具按照一定的轨迹逐步地成形板料,直到得到需要的零件。这种成形工艺不需要专用的模具,它可以通过修改控制产品形状的数控程序来调节成形工具的成形轨迹。因此,它的成形周期短,产品变化快。这种工艺非常适合于小批量、多品种和复杂的板料产品^[1-4]。

板料数控渐进成形过程中,变形力是这个过程的重要参数。设备和工具的工作条件及其成形时所需要的功率等,都与此有着密切的关系。文中主要研究板料数控渐进成形变形力的计算。

1 板料数控渐进成形原理

板料数控渐进成形原理如图1所示。首先,将被加工板料放在支撑模型上,在板料四周用压板在托板上夹紧板料,托板可以沿着导柱自由上下滑动;然后将该装置固定在3轴联动的数控机床上。加工时,成形工具对板料压下设定的压下量,并且沿设计的工具路径移动。在板料成形过程中,计算机控制成形工具在 x 方向的移动和 z 方向的下降运动。在高度相同的每一层中,成形工具在 $x-y$ 平面作轮廓线运动。在形成所需第1层截面轮廓后,成形工具在 z 轴方向下降相同的压下量,再按第2层截面轮

收稿日期: 2009-12-14

作者简介: 周六如(1963-),男,江西莲花人,博士,副教授,主要研究方向为板料成形及模具 CAD/CAM/CAE。

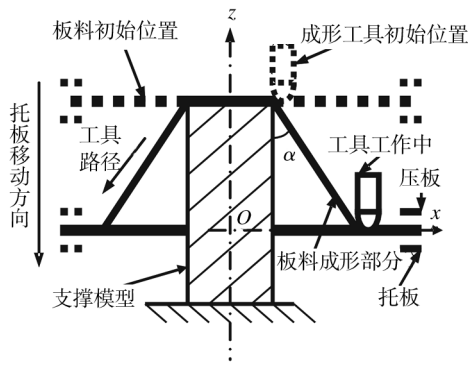


图1 板料数控渐进成形原理
Fig. 1 Diagram of NC incremental forming principle

廓轨迹运动,并且形成第2层轮廓。如此重复,直到整个工件成形完成。

2 实验

实验装置主要由成形工具、支撑模型、托板、压板、成形机等组成。

成形工具是带半球头的工具,球头直径为 30 mm,由工具钢制成,头部进行研磨和抛光。成形工具固定在板料数控渐进成形机的工具卡盘里。使用的材料是 08Al 板,厚度为 2 mm。板料剪成尺寸为 330 mm×330 mm 的正方形。要成形的方形台的边长为 100 mm,高度为 50 mm。成形工具和板料的被加工面,用润滑油润滑。

根据设计的工艺,进行成形,得到方形台如图 2 所示。

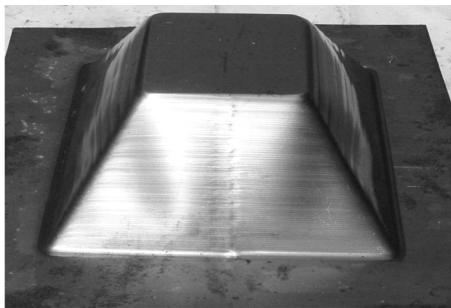


图2 已成形的方锥台
Fig. 2 Formed square cone

3 变形力的计算

工具头作用于板料的 A 点的变形合力 p 可以分

解为 p_z, p_y, p_x 等 3 个互相垂直的分力, p 的方向是变化的,如图 3b 所示。因而,变形力及其分力有如下关系式:

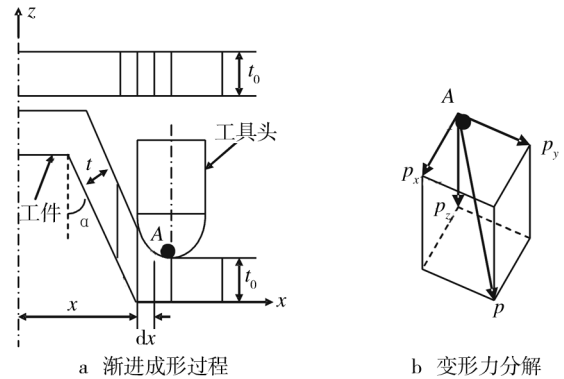


图3 变形力分析
Fig. 3 Diagram of deformation force analysis

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \bar{p}_z + \bar{p}_y + \bar{p}_x, \text{ 或} \\ p &= \sqrt{p_z^2 + p_y^2 + p_x^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p_x ——径向分力,其方向与工件壁面法向一致, N;

p_y ——切向分力,其方向是与工件周向相切, N;

p_z ——沿壁向分力,其方向与工件壁面平行, N。

数控渐进成形变形力的计算可按照以下 2 种方式进行。

3.1 按照纯剪切变形的方式计算变形力

1) 假定。假定锥台件的变形过程中材料只存在沿 z 轴作剪切变形,如图 3a 所示。

2) 应变。根据上述假定,在变形中材料发生 zx 平面上的切应变。由图 3a 可知,球头距毛坯轴线的距离为 x 、瞬时变形厚度为 dx 的单元体沿轴向滑移的距离为下降量 h 。于是,切应变等于单元体轴向滑移的距离 h 除以单元体的厚度 dx ,即:

$$\gamma = \frac{h}{dx} = \cot\alpha \quad (2)$$

3) 切向力。由于工具头作用于工件所做的功主要是切向力所做的功,所以,切向力 p_y 的数值可根据它所作的功或功率与变形功或功率相平衡条件近似导出。如果材料所受的剪应力为 τ ,切应变为 γ ,则单位体积材料的塑性变形功为:

$$W = \int_0^\gamma \tau d\gamma = \int_0^{\cot\alpha} \tau d\gamma \quad (3)$$

由于材料的变形硬化, τ 将是 γ 的函数。又因为 τ - γ 的曲线比 σ - ε 拉伸曲线难于得到, 所以可将公式(3) 改写为如下的形式:

$$W = \int_0^{\tau} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

由于只存在剪切应变 γ , 所以根据变形能量不变条件可知, γ 与 $\bar{\varepsilon}$ 的关系为: $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}}\gamma$, $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变, 因此也可以写成:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}}\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}}\cot\alpha$$

如果成形件的半径为 R , 变形区宽度为 dR , 工具头半径为 r , 工具下降量为 h , 成形半锥角为 α , $\angle ECF = \alpha$, C 、 F 分别为工具球头与 BF 的切点, EF 长度为 f , FG 长度为 a , O_2G 长度为 b , 如图 4 所示, 那么, 根据几何关系可得:

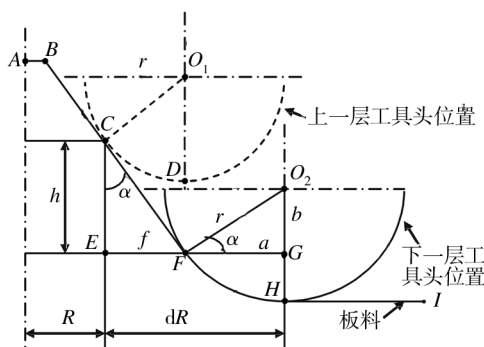


图 4 变形分析示意

Fig. 4 Diagram of deformation analysis

$$a = r \cos \alpha, b = r \sin \alpha,$$

$$dR = f + a = h \tan \alpha + r \cos \alpha,$$

则在渐进成形中, 加工一层后变形区材料变形体积 V 为:

$$V = dR \cdot t_0 \cdot 2\pi R$$

$$= 2\pi R t_0 (h \tan \alpha + r \cos \alpha)$$

于是, 可求得加工一层后的体积变形能为:

$$E_1 = W \cdot V$$

$$= 2\pi R t_0 (h \tan \alpha + r \cos \alpha) \int_0^{\tau} \sigma d\varepsilon \quad (5)$$

切向力 p_y 在一层中所做的功为:

$$E_2 = p_y \cdot 2\pi R \quad (6)$$

由于 $E_1 = E_2$, 所以由公式(5) 和(6) 可以求得切向力为:

$$p_y = t_0 (h \tan \alpha + r \cos \alpha) \int_0^{\tau} \sigma d\varepsilon \quad (7)$$

为了简化计算, 可采用如下方法:

采用平均应力 $\bar{\sigma}_0 = \left(\int_0^{\tau} \sigma d\varepsilon \right) / \bar{\varepsilon}$, 根据 Mises 准

则, $\bar{\sigma}_0 = \sigma_s$, 代入公式(7) 得切向力 p_y 为:

$$p_y = t_0 (h \tan \alpha + r \cos \alpha) \bar{\sigma}_s \bar{\varepsilon} \quad (8)$$

4) 沿壁向力 p_z 和径向力 p_x 假设在渐进成形过程中成形工具与工件接触面上为平均压力 p , 接触面在切向、径向和沿壁向的投影面积分别为 F_y 、 F_x 和 F_z , 则 2 个方向的分力为:

$$p_y = p F_y, p_x = p F_x, p_z = p F_z$$

由上述方法取得径向力 p_x 和沿壁向力 p_z 可以表示为:

$$p_z = p_y \frac{F_z}{F_y}, p_x = p_y \frac{F_x}{F_y} \quad (9)$$

根据图 4 的几何关系, 工具头与工件的接触面在切向的投影面积为弧线 FH 与直线 FG 、 GH 所包围的面积, 即:

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{90 - \alpha}{360} \cdot \pi r^2 - \frac{1}{2} ab \\ &= \frac{90 - \alpha}{360} \cdot \pi r^2 - \frac{1}{2} r^2 \sin \alpha \cos \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

接触面在水平方向的投影面积为 $\frac{1}{4}$ 圆面积, 而

轴向和径向的投影面积分别如下:

$$\left. \begin{aligned} F_z &= \frac{1}{4} \pi a^2 \sin \alpha = \frac{1}{4} \pi (r \cos \alpha)^2 \sin \alpha \\ F_x &= \frac{1}{4} \pi a^2 \cos \alpha = \frac{1}{4} \pi (r \cos \alpha)^2 \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(8) 代入式(9), 可得沿壁向力和径向力分别为:

$$\left. \begin{aligned} p_z &= t_0 (h \tan \alpha + r \cos \alpha) \bar{\sigma}_s \bar{\varepsilon} \cdot \frac{F_z}{F_y} \\ p_x &= t_0 (h \tan \alpha + r \cos \alpha) \bar{\sigma}_s \bar{\varepsilon} \cdot \frac{F_x}{F_y} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

5) 变形力的计算。工具头球半径 $r = 5$ mm, 板料厚度 $t_0 = 1.0$ mm, 下降量 $h = 0.25$ mm, 成形半锥角 $\alpha = 45^\circ$, 08Al 板的屈服应力 $\sigma_s = 165.79$ MPa, 成形中的等效应变为:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cot \alpha \approx 0.5774$$

根据公式(10) 和(11) 可以得到面积:

$$F_z = 6.942 \text{ mm}^2$$

$$F_x = 6.942 \text{ mm}^2$$

$$F_y = 3.567 \text{ mm}^2$$

根据公式(8)可得:

$$p_y = t_0(h \tan \alpha + r \cos \alpha) \sigma_s \bullet \frac{1}{\sqrt{3}} \cot \alpha$$

$$\approx 362.36 \text{ N}$$

根据公式(12)可得:

$$p_z = 705.18 \text{ N}, p_x = 705.18 \text{ N}, \sqrt{p_z^2 + p_x^2} \approx 997 \text{ N}。$$

所以,总的合力为:

$$p = \sqrt{p_y^2 + p_z^2 + p_x^2} \approx 1061 \text{ N}$$

3.2 按照剪切和弯曲综合变形的的方式计算变形力

3.2.1 假设

在此假定渐进成形是以沿壁向的剪切变形为主,但同时还存在着弯曲与反弯曲变形,如图5所示。

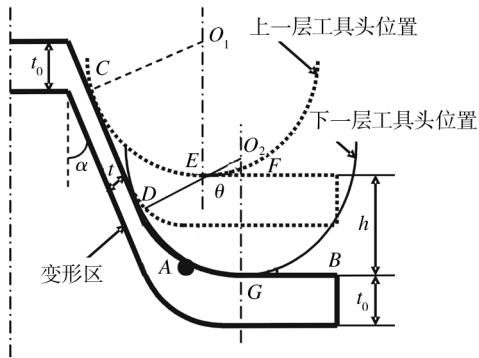


图5 渐进成形变形

Fig. 5 Diagram of deformation in incremental forming

3.2.2 应变

在图5中,上一层工具头与变形区的切点为C,当工具头完成一层加工后,板料到达AB位置,工具头与变形区的切点为D。变形区的变形包括弧DG弯曲和弧CE到直线CD的反弯曲的合成,因此,变形区A点的总应变包括弯曲应变和反弯曲应变。设应变分量为径向应变 ε_x 、切向应变 ε_y 、沿壁向应变 ε_z ,及剪应变 γ_{xz} 、 γ_{yz} 和 γ_{xy} 。

首先,计算A点由弯曲引起的应变。在A点,

$$\varepsilon_y = 0, \gamma_{xy} = 0。$$

两个切应变分量为: $\gamma_{xz} = \frac{\partial z}{\partial x} = \cot \alpha,$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial z}{\partial y} = \tan \theta = \frac{\sqrt{2rh-h^2}}{r-h} \quad (13)$$

图5中变形区的弯曲应变 ε_r 可用下式近似计算:

$$\varepsilon_r \approx \frac{\frac{t_0}{2}}{r + \frac{t_0}{2}} = \frac{t_0}{2\left(r + \frac{t_0}{2}\right)}$$

可以近似地认为: $\varepsilon_z \approx \varepsilon_r$

又根据体积不变条件,有:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$$

故可得:

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_z = -\varepsilon_r \approx -\frac{t_0}{2\left(r + \frac{t_0}{2}\right)} \quad (14)$$

所以,A点由弯曲引起的等效应变 $\bar{\varepsilon}_1$ 为:

$$\bar{\varepsilon}_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xz}^2 + \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2)} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{6\varepsilon_r^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2)} \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_r^2 + \frac{1}{4}(\gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2)} \end{aligned} \quad (15)$$

然后,计算A点由反弯曲引起的应变,这时应变分量 ε_y 和3个剪应变分量都为0, ε_x 和 ε_z 与上面的相同,所以A点由反弯曲引起的等效应变为:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_2 &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2} \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_r \end{aligned} \quad (16)$$

由(15)和(16)可得A点总的等效应变为:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2 \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{\varepsilon_r^2 + \frac{1}{4}(\gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2)} + \varepsilon_r \right] \end{aligned} \quad (17)$$

将公式(13)和(14)代入,得:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{\left(\frac{t_0}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \left((\cot\alpha)^2 + \left(\frac{\sqrt{2rh-h^2}}{r-h}\right)^2 \right)} + \frac{t_0}{2} \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{\left(\frac{t_0}{r+\frac{t_0}{2}}\right)^2 + \left((\cot\alpha)^2 + \left(\frac{\sqrt{2rh-h^2}}{r-h}\right)^2 \right)} + \frac{t_0}{r+\frac{t_0}{2}} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

3.2.3 切向力和沿壁向力

参照公式(8)和(12)可得,切向力公式为:

$$p_y = t_0 (h \tan\alpha + r \cos\alpha) \bar{\sigma}_s \bar{\varepsilon} \quad (19)$$

沿壁向力和径向力的公式分别为:

$$p_z = t_0 (h \tan\alpha + r \cos\alpha) \bar{\sigma}_s \bar{\varepsilon} \bullet \frac{F_z}{F_y} \quad (20)$$

$$p_x = t_0 (h \tan\alpha + r \cos\alpha) \bar{\sigma}_s \bar{\varepsilon} \bullet \frac{F_x}{F_y} \quad (21)$$

3.2.4 变形力的计算

实际条件与剪切变形的一样,即工具头球半径 $r=5$ mm,板料厚度 $t_0=1.0$ mm,下降量 $h=0.25$ mm,成形半锥角 $\alpha=45^\circ$,08Al板的屈服应力 $\sigma_s=165.79$ MPa,只有等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 不同。将数据代入公式(18)后可得等效应变为: $\bar{\varepsilon}=0.7216$ 。

根据公式(19)、(20)和(21)可得:

$$p_y = 453 \text{ N}, p_z = 881 \text{ N}, p_x = 881 \text{ N},$$

$$\sqrt{p_z^2 + p_x^2} = 1246 \text{ N}。$$

总的变形力为: $p=1326$ N。

3.3 实验测定的变形力与计算的变形力的比较

通过动态应变仪在无模成形机上实际测量的变形力表示见表1。

表1 实验测定的变形力与计算的变形力的比较

Table 1 The deformation force comparison between experiment and calculation

实验测量	纯剪切	剪切+弯曲
1180 N	997 N	1246 N

注: $r=5$ mm, $\alpha=45^\circ$, $h=0.25$ mm。

从表1中可以看出,纯剪切时的 $\sqrt{p_z^2 + p_x^2}$ 与实际测量的 $\sqrt{p_z^2 + p_x^2}$ 相差 15.5%,剪切+弯曲时的 $\sqrt{p_z^2 + p_x^2}$

与实际测量的 $\sqrt{p_z^2 + p_x^2}$ 相差 5.6%,所以,实验测定的变形力与假定剪切弯曲变形计算的变形力相近,渐进成形过程主要是剪切弯曲变形过程。

4 结语

板料数控渐进成形过程中,变形力是这个过程的重要参数。设备和工艺装备的工作条件及其成形时所需要的功率等,都与此有着密切的关系。

数控渐进成形变形力的计算可按照以下2种方式进行。

- 1) 按照纯剪切变形的方式计算变形力;
- 2) 按照剪切和弯曲综合变形的方式计算变形力。

实验测定的变形力与假定剪切弯曲变形计算的变形力相近,从而可以认为渐进成形过程主要是剪切弯曲变形过程。实际变形力的计算按照方式2进行。

参考文献:

- [1] MATSUBARA S. A. Computer Numerically Controlled Dieless Incremental Forming of a Sheet Metal [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B, Journal of Engineering Manufacture, 2001, (215): 959-966.
- [2] ISEKI H. Approximate Deformation Analysis and FEM Analysis for the Incremental Bulging of Sheet Metal Using a Spherical Roller [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 1-3(111): 150-154.
- [3] 周六如,肖祥芷,莫健华. 板料零件数控渐进成形工艺研究[J]. 塑性工程学报,2003,10(4): 27-29.
- [4] PARK J J, KIM Y H. Fundamental Studies on the Incremental Sheet Metal Forming Technique [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, (140): 447-453.