

宽板塑性弯曲成形过程中的板厚变化规律¹⁾

罗文波

(湘潭大学基础力学与材料工程研究所, 湘潭 411105)

摘要 根据宽板弯曲过程中的变形与应力分布特征, 提出了一种计算弯曲过程中板料厚度随弯曲程度变化的新的近似解答方法. 该方法基于塑性增量理论, 应用塑性成形过程的体积不变假设和弯曲过程的平面假设. 作为算例, 得到了理想刚塑性材料的板料厚度、变薄系数以及应变中性层内移系数随板料弯曲内表面曲率半径变化的规律, 并与实验数据进行了比较, 两者吻合良好.

关键词 板材弯曲成形, 变薄系数, 理想塑性

1 引言

弯曲是板料冲压的一种典型的变形方式, 当弯曲件在宽度方向的尺寸远大于其厚度和弯曲半径时, 可以近似认为板料宽度方向的变形为零, 因此宽板的弯曲成形为平面应变变形过程. 在宽板弯曲成形过程中, 随着成形部位弯曲半径的减小, 板料厚度也随之减小. 板料弯曲过程中的板厚变薄规律对于制订弯曲成形工艺和控制产品尺寸精度都有重要的现实意义, 但现有文献对板厚变薄规律的理论分析还显得不够. 文献 [1] 曾讨论过一种近似解法, 其实质是认为理想刚塑性宽板弯曲过程中全量应变中性层与应力中性层重合, 显然这是不成立的. 文献 [2] 假设成形过程中外表面切向伸长量与内表面切向缩短量成正比, 其比值为外表面和内表面到应力中性层的法向距离之比, 给出了一种板厚变薄规律的计算方法, 虽然计算结果与实验值吻合较好, 但这种假设较强. 本文提出一种计算弯曲过程中板料厚度随弯曲程度变化的新的近似解答方法, 该方法基于塑性增量理论, 应用塑性成形过程的体积不变假设和弯曲过程的平面假设, 得到了理想刚塑性材料的板料厚度、变薄系数以及应变中性层内移系数随板料弯曲内表面曲率半径变化的规律, 并与实验结果进行了比较.

2 宽板弯曲成形中板厚变化的计算方法

设宽板在弯曲过程中恒保持圆弧状, 图 1 为弯曲成形过程中微小时间间隔 dt 前后的构形, 图中 ρ_σ 为应力中性层的曲率半径. 由图可见, 经过时间 dt , 弯板内半径由 r 变为 $r + dr$, 外半径由 R 变为 $R + dR$, 厚度由 h 变为 $h + dh$, 而弯曲中心角 α 变为 $\alpha + d\alpha$. 假设塑性成形过程中体积不变, 则有 $d(\pi(R^2 - r^2)\alpha/2\pi) = 0$, 即

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{2(rdr - RdR)}{R^2 - r^2} \quad (1)$$

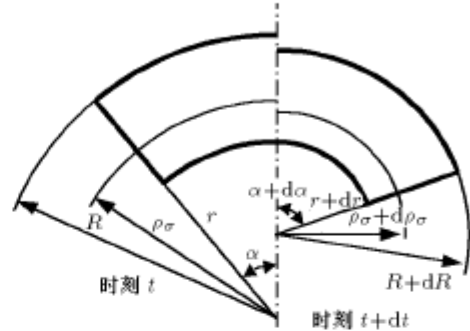


图 1 宽板塑性弯曲成形过程中的尺寸变化

在弯曲成形过程中, 弯板外层部分受拉而伸长, 内层部分受压而缩短, 若忽略挤压应力 σ_r 的影响, 并考虑到塑性成形过程中体积不变, 则按塑性增量理论有 $d\varepsilon_\theta(r) = d\lambda(r)\sigma_\theta(r)/2$, 因此笔者认为在任何变形瞬时弯板中应力中性层的环向长度 $(\rho_\sigma\alpha)$ 不发生变化, 即 $\alpha d\rho_\sigma + \rho_\sigma d\alpha = 0$, 于是

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = -\frac{d\rho_\sigma}{\rho_\sigma} \quad (2)$$

由式 (1) 和 (2), 有

$$\frac{dR}{dr} = \frac{r}{R} + \frac{R^2 - r^2}{2R\rho_\sigma} \frac{d\rho_\sigma}{dr} \quad (3)$$

上式给出了宽板弯曲过程中弯板外半径随内半径变化的关系, 具体结果可结合 ρ_σ 与 r, R 的关系通过迭代求解

$$R_{i+1} = R_i + \frac{1}{2} \left(\left. \frac{dR}{dr} \right|_i + \left. \frac{dR}{dr} \right|_{i+1} \right) (r_{i+1} - r_i) \quad (4)$$

若已知某时刻弯板的内半径 r_i 和外半径 R_i 或板厚 h_i (显然 $R_i = r_i + h_i$), 则由式 (3) 和 (4) 就可以根据下一时刻的内半径 r_{i+1} 求得该时刻的外半径 R_{i+1} 和板厚 h_{i+1} , 重复计算过程即可获得整个弯曲成形过程中弯板外半径和板厚随内半径的变化规律. 作为算例, 下面计算理想塑性板材弯曲成形中的板厚变薄系数.

3 理想塑性宽板弯曲的板厚变化

对于理想塑性板材弯曲成形过程中, 其径向应力分量 σ_ρ 为^[3]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \ln \frac{\rho}{R} & \rho > \rho_\sigma \\ \sigma_\rho &= \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \ln \frac{r}{\rho} & \rho < \rho_\sigma \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

因径向应力 σ_ρ 在应力中性层 ($\rho = \rho_\sigma$) 处连续, 因此由式 (5) 可知弯曲应力中性层的曲率半径为

$$\rho_\sigma = \sqrt{Rr} \quad (6)$$

2003-04-23 收到第 1 稿, 2003-08-13 收到修改稿.

1) 湖南省教育厅青年项目 (02B005) 资助.

于是, $\frac{d\rho_\sigma}{dr} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{r}{R}} \frac{dR}{dr} + \sqrt{\frac{R}{r}} \right)$, 将此式和式(6)代入式(3)得

$$\frac{dR}{dr} = \frac{R(R^2 + 3r^2)}{r(r^2 + 3R^2)} \quad (7)$$

代入式(4), 并令 $R^* = R/h_0$, $r^* = r/h_0$, 其中 h_0 为板料的初始厚度, 则有

$$R_{i+1}^* = R_i^* + \frac{1}{2} \left[\frac{R_i^*(R_i^{*2} + 3r_i^{*2})}{r_i^*(r_i^{*2} + 3R_i^{*2})} + \frac{R_{i+1}^*((R_{i+1}^*)^2 + 3(r_{i+1}^*)^2)}{r_{i+1}^*((r_{i+1}^*)^2 + 3(R_{i+1}^*)^2)} \right] (r_{i+1}^* - r_i^*) \quad (8)$$

对于已知的 r_i^* , R_i^* 和 r_{i+1}^* , 可由上式解得 R_{i+1}^* . 设当板料弯曲成形至 $r_0^* = 9$ 时, 板厚几乎无变化, 即板料外半径 $R_0^* = 10$, 则由式(8)求得板料无量纲化外半径 R^* 随无量纲化内半径 r^* 的变化规律, 并进而得到板料变薄系数 ($\eta = R^* - r^*$) 以及应变中性层的内移系数^[3] ($K = \eta^2/2 - (1-\eta)r^*$) 随内半径 r^* 的变化规律如图 2 所示.

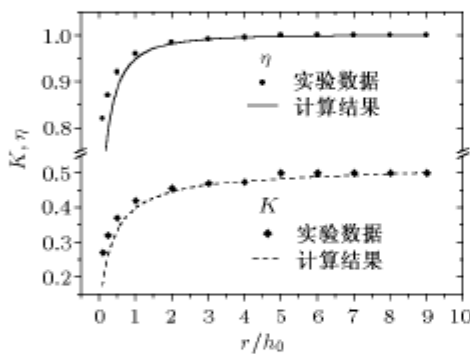


图 2 宽板弯曲成形中变薄系数 η 与应变中性层的内移系数 K 随内半径 r 的变化规律

图 2 所示的计算结果与当前广泛应用的查表所得的实验数据吻合良好. 可见本文提出的关于宽板弯曲塑性成形过程中的板厚变薄的计算方法是行之有效的, 对深入研究弯曲

变形过程和科学地制订弯曲成形工艺具有一定的理论价值和实用意义.

参 考 文 献

- 1 河合望著. 应用塑性加工学. 赖耿阳译. 台湾: 复汉出版社, 1980 (He Hewang. Applied Plastic Processing. Taiwan, China: Fuhun Press, 1980 (in Chinese))
- 2 彭炎荣, 段继承, 李兆飞等. 宽板弯曲过程中板厚的变化规律. 模具技术, 2003, 121: 10~12 (Peng Yanrong, Duan Jicheng, Li Zhaoifei, et al. Thickness thinning of wide sheet during plastic bending. Die and Mould Technology, 2003, 121: 10~12 (in Chinese))
- 3 肖景容, 姜奎华. 冲压工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1990 (Xiao Jingrong, Jiang Kuihua. Stamping Technology. Beijing: China Machine Press, 1990 (in Chinese))

THICKNESS VARIATION IN FORMING BY PLASTIC BENDING OF WIDE SHEET

LUO Wenbo

(Institute of Fundamental Mechanics & Material Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract A new approximate solution to thickness reduction of plastic bending sheet is presented by considering the characteristics of deformation and stress distribution. The proposed method is based on the incremental theory, and volume invariance and planar cross-section are assumed. As a calculation example, the sheet reduction ratio and the distance from the neutral plane to inner boundary are calculated and compared with published data. A fairly good agreement is obtained between the calculated results and the experimental data.

Key words sheet bending forming, thickness reduction ratio, perfect plasticity

升阶试函数族在矩形板大挠度问题中的应用

李辉荣

(西南石油学院机电工程学院, 成都 610500)

摘要 为解决加权残值法求近似解的计算精度问题, 将摄动法与加权残值法相结合, 首先以板中心挠度为摄动参数进行摄动, 将矩形板大挠度非线性偏微分方程组分解为线性偏微分方程组, 然后用最小二乘法求解. 求解中构造并应用了可以由控制参数 f 调节的升阶试函数族, 计算结果与实验结果基本一致, 与以前的研究比较, 计算精度明显提高. 该方法

对于寻求最佳试函数和最佳近似值是一种有效的方法.

关键词 矩形板, 大挠度, 摄动法, 加权残值法, 升阶试函数族

用加权残值法求近似解, 试函数的选取直接影响计算精度. 但所选试函数是否为最佳选择, 解答是否收敛到最佳近