

金属橡胶冲压成形数值模拟分析

黄 凯, 白鸿柏, 路纯红, 曹凤利

(军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 以自动毛坯缠绕工艺为支撑, 基于实际材料、工艺参数, 建立了空间弯曲螺旋线参数化方程、金属橡胶及毛坯的细观结构数值模型。通过数值模型, 预测了构件的成形压力、模具摩擦力、模具应力、构件成形尺寸、回弹量、固相体积分、接触点数、材料细观结构和组织分布等特性, 预测结果与实验结果吻合良好。数值模型具有明确的物理意义和良好的可靠性, 对于金属橡胶的制备具有较强的指导作用, 为金属橡胶的细观尺度研究提供了途径。

关键词: 金属橡胶; 空间弯曲螺旋线; 冲压成形; 细观结构; 特性预测

中图分类号: TB31; TB34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)03-0681-07

金属橡胶 (Metal Rubber/Wire Mesh) 是一种高弹性大阻尼多孔材料, 具有非线性刚度、大阻尼、耐辐射、耐高/低温、耐腐蚀、疲劳寿命长等优点, 可以制成弹性阻尼元件、过滤元件、吸声元件、密封元件, 具有重要的应用价值和广阔的应用前景^[1-5]。

国内外学者对金属橡胶材料进行了广泛研究。俄罗斯萨马拉国立航空航天大学的学者^[6]用叠层悬臂梁构成的 A. H. 别拉乌索夫—A. A. 特洛伊尼科夫模型和由角锥元件副构成的 A. A. 特洛伊尼科夫—C. Д. 巴拉斯模型对材料的力学特性进行描述。陈艳秋、曹凤利^[7,8]在材料上取一微元体, 假设微元体由按层的微元弹簧组成, 并用悬臂曲梁理论计算微元弹簧的刚度, 研究了金属橡胶的本构关系。Li Yuyan^[9]采用多孔材料理论研究金属橡胶, 假设材料内部为中空立方体多孔结构, 并引入小曲梁模型对材料的刚度特性进行计算。国内外学者根据金属橡胶的组织结构特点和工作机理, 提出了很多细观结构模型, 取得了显著成果。然而这些细观结构多是用唯象的非线性刚度阻尼结构对金属橡胶进行描述, 模型参数缺乏实际的物理意义, 对选取制备工艺参数的指导作用有限。Huang Mingji、董秀萍^[10,11]首次建立了金属橡胶的三维空间参数化模型, 该模型包含了金属丝及螺旋卷尺寸、螺旋卷排布等信息, 更加接近实际结构, 但是由于建模过程的简化, 并且在材料成形过程中金属丝的变形不符合力学规律, 使得模型与实际材料的组织结构差距较大。

当前, 虽然金属成形工艺的数值模拟技术得到了广泛研究^[12]。但是由于金属橡胶及毛坯的细观结构

十分复杂, 材料内部线匝的几何构型、空间位置和接触状态难以获取, 目前鲜有对金属橡胶冲压成形过程的理论研究和数值模拟, 材料的制备多依靠经验及实验试凑。本研究以自动毛坯缠绕工艺为支撑, 基于实际的材料、工艺参数, 建立了空间弯曲螺旋线参数化方程和金属橡胶细观结构数值模型, 对冲压成形过程进行了数值计算, 对冲压成形过程相关特性进行了预测。

1 空间弯曲螺旋线参数化模型

金属橡胶毛坯中螺旋卷的基架线一般不是直线, 而是空间曲线。建立毛坯的数值模型之前, 首先要对以空间曲线为基架线的弯曲螺旋线进行数学描述。

1.1 建模方法

有一条空间曲线 Γ 是某弯曲螺旋卷的基架线, Γ 的参数方程为:

$$\begin{cases} X = \varphi(q) \\ Y = \psi(q), q \in [q_1, q_2] \\ Z = \eta(q) \end{cases} \quad (1)$$

式中, q 为参数, $[q_1, q_2]$ 为参数 q 的取值范围。

在 Γ 的端点 $(\varphi(q_1), \psi(q_1), \eta(q_1))$ 处建立 1 个局部坐标系 $oxyz$, z 轴的正向取切向量 $(\varphi(q_1)', \psi(q_1)', \eta(q_1)')$ 的方向, x 轴与 y 轴的方向选取满足右手定则。在局部坐标系的 oxy 面建立 1 个以 o 为圆心的圆, 圆上有一初始相位为 θ_0 的点 p 以 $d\theta/dt$ 的角速度在圆上转动, 在局部坐标系中该点的运动方程为:

收稿日期: 2015-03-20

基金项目: 武器装备“十二五”预先研究项目

作者简介: 黄 凯, 男, 1987 年生, 博士生, 军械工程学院, 河北 石家庄 050003, E-mail: hk420604@163.com

$$\begin{cases} x = r \cos(\theta + \theta_0) \\ y = r \sin(\theta + \theta_0) \\ z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, r 为圆的半径, θ_0 为初始相位。

点 p 在圆上转动的同时, 局部坐标系沿基架线 Γ 进行移动, 移动过程中, 局部坐标系的 z 轴始终保持与空间曲线 Γ 的切向量 $(\varphi(q)', \psi(q)', \eta(q)')$ 同向。点 p 的移动轨迹就是所求的空间螺旋线。

1.2 参数化方程

若基架线是一条圆柱螺旋线, 方程为:

$$\begin{cases} X = R \cos \Psi \\ Y = R \sin \Psi \\ Z = p(\Psi - \Psi_1) + Z_0 \end{cases}, \Psi \in [\Psi_1, \Psi_2] \quad (3)$$

式中, Ψ 为参数, $[\Psi_1, \Psi_2]$ 为参数 Ψ 的取值范围, R 为基架线 Γ 的半径, Z_0 为起点 Z 轴坐标, p 为系数。按 1.1 节的方法在基架线起点 $(R \cos \Psi_1, R \sin \Psi_1, Z_0)$ 处建立一个局部坐标系 $o_1x_1y_1z_1$, 定义为初始局部坐标系。初始局部坐标系 z_1 轴的单位方向向量在全局坐标系下的描述为:

$$\lambda_1 = (z_{11}, z_{12}, z_{13}) = \left(\frac{-R \sin \Psi_1}{\sqrt{R^2 + p^2}}, \frac{R \cos \Psi_1}{\sqrt{R^2 + p^2}}, \frac{p}{\sqrt{R^2 + p^2}} \right) \quad (4)$$

然后计算初始局部坐标系 x_1 轴、 y_1 轴的单位方向向量在全局坐标系下的描述。图 1 是向量 λ_1 在全局坐标系下的位置示意图, λ_1 在 XOY 平面的投影与 Y 轴的夹角为 α , 先将 λ_1 绕 Z 轴旋转 α 到 YOZ 平面内, λ_1 变为 λ_1' , λ_1' 与 Z 轴夹角为 β , 再将 λ_1' 绕 X 轴旋转 β 使 λ_1 与 Z 轴重合, 旋转矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\alpha = \arccos(\cos \Psi_1)$, $\beta = \arccos(\frac{p}{R^2 + p^2})$ 。

初始局部坐标系 x_1 轴的单位方向向量 $(1, 0, 0)$ 在全局坐标系中的描述为 (x_{11}, x_{12}, x_{13}) , y_1 轴的单位方向向量 $(0, 1, 0)$ 在全局坐标系中的描述为 (y_{11}, y_{12}, y_{13}) , 分别由下式求得:

$$[x_{11}, x_{12}, x_{13}, 1] = [1, 0, 0, 1]C^{-1} \quad (6)$$

$$[y_{11}, y_{12}, y_{13}, 1] = [0, 1, 0, 1]C^{-1} \quad (7)$$

全局坐标系原点 $(0, 0, 0)$ 和单位方向向量 $(1, 0, 0)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ 在初始局部坐标系下的描述分别为 (u_0, v_0, w_0) 、 (u_x, v_x, w_x) 、 (u_y, v_y, w_y) 、 (u_z, v_z, w_z) , 坐标变换为:

$$[u_0, v_0, w_0, 1] = [0, 0, 0, 1]AB \quad (8)$$

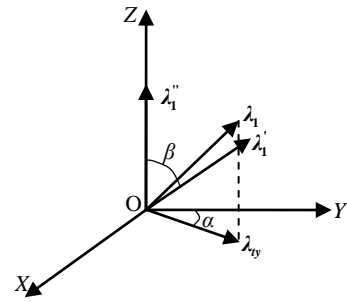


图 1 向量的旋转变换

Fig.1 Rotation transformation of vector

$$[u_x + u_0, v_x + v_0, w_x + w_0, 1] = [1, 0, 0, 1]AB \quad (9)$$

$$[u_y + u_0, v_y + v_0, w_y + w_0, 1] = [0, 1, 0, 1]AB \quad (10)$$

$$[u_z + u_0, v_z + v_0, w_z + w_0, 1] = [0, 0, 1, 1]AB \quad (11)$$

式中, $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R \cos \Psi_1 & -R \sin \Psi_1 & -Z_0 & 1 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{11} & z_{11} & 0 \\ x_{12} & y_{12} & z_{12} & 0 \\ x_{13} & y_{13} & z_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

则可求 (u_0, v_0, w_0) 、 (u_x, v_x, w_x) 、 (u_y, v_y, w_y) 、 (u_z, v_z, w_z) 。

p 点转动的同时, 局部坐标系沿着空间曲线移动, 定义移动过程中的局部坐标系为目标坐标系 $o_2x_2y_2z_2$, 如图 2 所示, λ_1 为 z_1 轴的单位方向向量, λ_2 为 z_2 轴的单位方向向量。 p 点在局部坐标系内的转动和局部坐标系沿 Γ 的运动共同形成了 p 点的轨迹, 为了计算动点 p 的轨迹方程, 将这一过程等效为: 点 p 始终在初始局部坐标系内转动, 将初始局部坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 通过几何变换变成目标局部坐标系 $o_2x_2y_2z_2$, 从而得到点 p 的全局坐标。

根据公式 (3) 和曲线积分, 曲线 Γ 的总长度为:

$$L = (\Psi_2 - \Psi_1) \sqrt{R^2 + p^2} \quad (12)$$

若空间弯曲螺旋线的螺数为 n , 每个螺数对应的基架线长度为 L/n 。局部坐标系下 p 点的坐标见公式 (2), p 点相位为 θ 时, 在圆上转动了 $0.5\theta/\pi$ 圈。局部坐标系移动了 $0.5\theta/\pi$ 个螺数, 局部坐标相应的移动距离为:

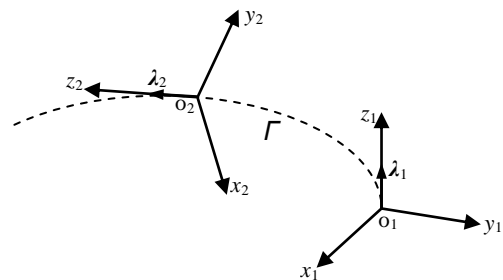


图 2 局部坐标系几何变换

Fig.2 Geometric transformation of local coordinate

$$l = L\theta / (2\pi n) \tag{13}$$

局描述为：

根据曲线积分，又有：

$$l = (\Psi - \Psi_1) \sqrt{R^2 + p^2} \tag{14}$$

联立式 (12)、(13)、(14) 可得：

$$\Psi = \frac{(\Psi_2 - \Psi_1)\theta}{2\pi n} + \Psi_1 \tag{15}$$

目标局部坐标系的原点坐标在全局坐标系的描述为 $(R\cos\Psi, R\sin\Psi, p(\Psi - \Psi_1) + Z_0)$ ， z_2 轴单位方向向量的全

$$\lambda_2 = \left(\frac{-R\sin\Psi}{\sqrt{R^2 + p^2}}, \frac{R\cos\Psi}{\sqrt{R^2 + p^2}}, \frac{p}{\sqrt{R^2 + p^2}} \right) \tag{16}$$

初始局部坐标系中 p 点坐标为 $(r\cos(\theta + \theta_0), r\sin(\theta + \theta_0), 0)$ ，p 点的全局坐标 (p_x, p_y, p_z) 通过如下坐标变换计算：

$$[p_x, p_y, p_z, 1] = [r\cos(\theta + \theta_0), r\sin(\theta + \theta_0), 0, 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -u_0 & -v_0 & -w_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z & 0 \\ v_x & v_y & v_z & 0 \\ w_x & w_y & w_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

初始局部坐标系绕向量 μ 旋转一定角度 ζ 使 λ_1 、 λ_2 重合， ζ 为 λ_1 、 λ_2 夹角， μ 、 ζ 分别为：

$$\mu = \lambda_1 \times \lambda_2 = \left(\frac{PR(\cos\Psi_1 - \cos\Psi)}{R^2 + p^2}, \frac{PR(\sin\Psi_1 - \sin\Psi)}{R^2 + p^2}, \frac{R^2(\sin\Psi\cos\Psi_1 - \cos\Psi\sin\Psi_1)}{R^2 + p^2} \right) \tag{18}$$

$$\zeta = \arcsin \frac{\sqrt{2p^2R^2(1 - \cos\Psi_1\cos\Psi - \sin\Psi_1\sin\Psi) + R^4(\sin\Psi\cos\Psi_1 - \cos\Psi\sin\Psi_1)^2}}{R^2 + p^2} \tag{19}$$

绕 μ 的旋转变换过程为：(a) 平移初始局部坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ ，使其原点与全局坐标原点重合；(b) 旋转局部坐标系，使转轴向量 μ 与 Z 轴正方向同向；(c)

关于 Z 轴进行指定角度 ζ 的旋转；(d) 取 (a)、(b) 的逆变换将局部坐标系移至原位置。公式为：

$$[p'_x, p'_y, p'_z, 1] = [p_x, p_y, p_z, 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R\cos\Psi_1 & -R\sin\Psi_1 & -Z_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$\begin{bmatrix} \cos\zeta & \sin\zeta & 0 & 0 \\ -\sin\zeta & \cos\zeta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R\cos\Psi_1 & -R\sin\Psi_1 & -Z_0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

式中， γ 是向量 μ 在 XOY 平面的投影与 Y 轴的夹角， ϕ 为 μ 转动到 YOZ 平面后与 Z 轴的夹角。对旋转后的

局部坐标系进行平移至目标局部坐标系，即可得到动点 p 的轨迹：

$$[p''_x, p''_y, p''_z, 1] = [p'_x, p'_y, p'_z, 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ R(\cos\Psi - \cos\Psi_1) & R(\sin\Psi - \sin\Psi_1) & p(\Psi - \Psi_1) & 1 \end{bmatrix} \tag{21}$$

最终联立式 (17) (20) (21) 可以得到以 θ 为参数的 p 点全局参数化方程 (p''_x, p''_y, p''_z) 。

2 制备工艺及毛坯数值模型

2.1 自动毛坯缠绕工艺

数控毛坯缠绕设备由导丝机构、缠绕机构、定螺距拉伸机构、缠绕直径检测机构、控制系统等组成，实现了从螺旋卷定螺距拉伸到毛坯缠绕的全自动精确控制。缠绕前，先通过定螺距拉伸装置拉伸螺旋卷，使螺旋卷发生塑性变形至指定螺距，拉伸后的螺旋卷在缠绕时只有很小的弹性收缩力。

本研究以自动毛坯缠绕工艺为支撑，实现金属橡

胶缠绕轨迹的可重复性和准确性，从而保证毛坯数值模型和实际毛坯各项工艺参数的一致性。最终使构件数值模型与实际制品在细观结构上保持一致，保证各项指标预测的可靠性。

2.2 毛坯数值模型

缠绕毛坯时，刚刚缠绕的螺旋卷会与已缠绕的毛坯组织发生嵌入勾连，金属丝微段在原螺旋卷中的相对位置发生了空间移动，使得很难准确预知毛坯内部金属丝的空间坐标，并且在毛坯内部，金属丝之间存在大量未知的接触状态。因此，直接建立金属丝在毛坯中的几何构型和接触状态十分困难。

自动毛坯缠绕工艺中，螺旋卷按层缠绕在芯轴上，

螺旋卷的基架线轨迹为圆柱螺旋线。本研究在毛坯周向方向上截取一部分进行分析。截取的部分毛坯模型由众多被截断的弯曲螺旋卷微段构成。根据毛坯径向尺寸和缠绕层数，计算每一层螺旋卷微段的基架线半径。根据自动毛坯缠绕设备的缠绕轨迹，确定每一条螺旋卷微段的基架线方程。然后根据本研究第一节的方法，建立每一条弯曲螺旋卷微段的几何模型。为了保证所有螺旋卷微段之间在初始时刻都互不接触，除最内层螺旋卷微段外，将每一层螺旋卷微段在径向方向上向外偏移一定距离，偏移后的数值模型如图 3 所示。可见，毛坯数值模型是以一系列空间弯曲螺旋卷微段为初始基本结构建立的。在实际缠绕毛坯的过程中，螺旋卷的弹性收缩力很小，因此为了简化问题，建立空间弯曲螺旋卷微段的几何模型时，不考虑缠绕毛坯时螺旋卷中的弹性应力。

初始时刻，外套模型在数值模型的径向最外端，沿径向向内移动外套模型至实际位置。同时，原本互不接触的螺旋卷微段在外套模型的作用下，相互勾连嵌入，模拟实际毛坯中金属丝之间复杂的接触状态。在此过程中，必须要合理地处理各螺旋卷微段的约束状态，使螺旋卷微段在移动过程中，保持缠绕轨迹，使毛坯数值模型能够真实反映缠绕毛坯时的轨迹信息。

毛坯数值模型中，金属丝的材质、直径和螺旋卷的构型尺寸、缠绕轨迹等模型参数全部基于实际的材料和工艺参数，使毛坯数值模型能够在很大程度上反映实际的毛坯组织结构，为后续冲压成形的模拟打下坚实的基础，毛坯的组织结构对比如图 4 所示。

3 冲压成形预报及可靠性验证

冲压加载实验采用 WDW-T200 微机控制电子万能试验机加载，模具及装配如图 5 所示。

3.1 宏观组织结构对比

材料的组织结构形态是金属橡胶最基本的特征，数值模型首先要在组织结构形态上和实际一致。图 6 为回弹后数值模型和实际金属橡胶构件在不同表面的

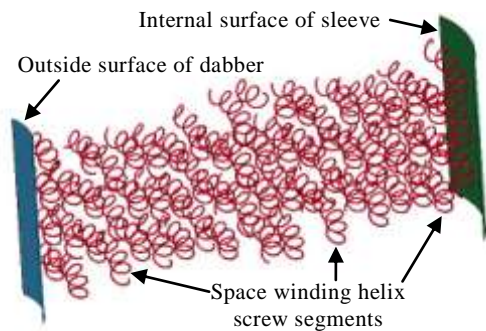


图 3 螺旋卷微段初始位置

Fig.3 Helix screw segment initial position

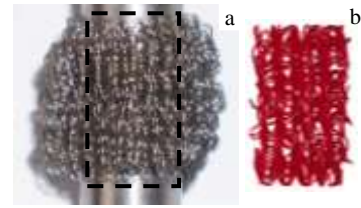


图 4 毛坯组织结构对比

Fig.4 Comparison of blank tissue structure: (a) real blank and (b) numerical model of blank

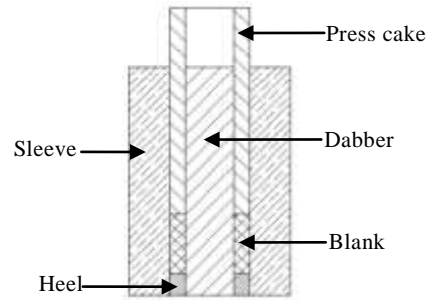


图 5 模具及装配

Fig.5 Assembled mould

组织结构形态对比。可以看出，无论是模型的宏观特征还是金属丝的细观走向，数值模型和实物构件都十分相近，说明通过数值计算得到的材料组织结构是与实际相符的。

3.2 成形压力预估

不同加载方式的压力曲线的预报对于研究冲压工艺对制品性能的影响及指导材料的制备具有十分重要的意义。算例中截取全构件周向尺寸的 1/6 进行研究，在进行预报时，需将数值模型得到的成形压力乘以放大系数 6，对全构件成形压力进行预测。若分析时取全构件周向尺寸的 1/n，则放大系数为 n。全构件预测成形压力和实验成形压力对比如图 7 所示。可见，成形压力预估曲线与实验曲线吻合良好，实现了成形压力的准确预估。

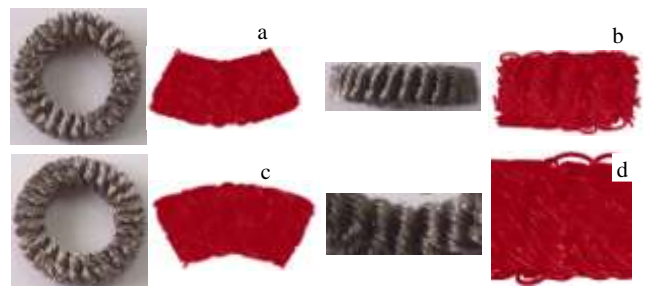


图 6 材料组织结构形态对比

Fig.6 Comparison of material tissue structure: (a) upper surface, (b) outside surface, (c) under surface, and (d) internal surface

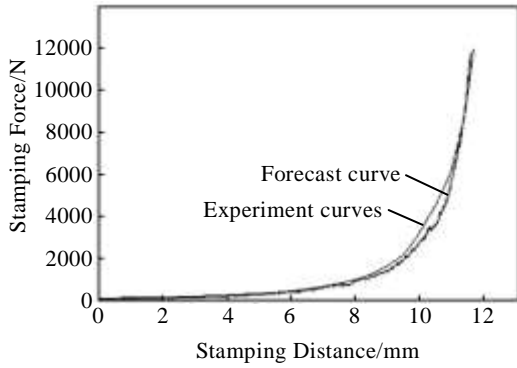


图 7 全构件成形压力预估

Fig.7 Forming force forecast of product

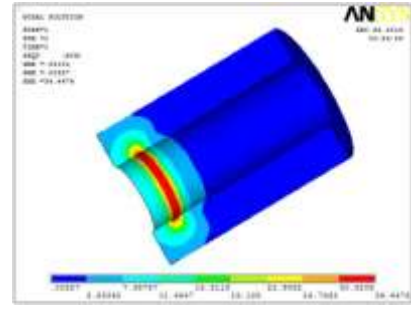


图 9 柔性外套模型应力状态

Fig.9 Stress state of deformable sleeve

3.3 摩擦力预估

金属橡胶冲压成形过程中，毛坯与模具之间的摩擦作用导致构件在成形方向上组织不均匀。通过对冲压过程中摩擦力曲线的预估，进而对冲压方式进行调整。用压块压力减去垫块压力，得到全构件成形方向摩擦力的预估，如图 8 所示。可见，成形方向摩擦力随冲压量的增加呈指数形式增大。

3.4 模具应力预估

冲压成形过程中模具会承受相应的反力作用，如果模具所受应力过大，会导致模具变形甚至破坏。本研究对模具受力进行预报，用于指导模具的强度设计。算例中，成形压力最大时，外套模型所受最大压强为 31 MPa，受力面积为 35.3 mm²，柔性外套模型的应力如图 9 所示。

3.5 成形尺寸及回弹量预估

退模后制品尺寸的预报对制品的应用、模具的设计具有重要意义，可以大大减少实验试凑的人力物力成本。表 1 为回弹前后构件尺寸对比，其中径向尺寸指环形构件壁厚。由表 1 可知，数值计算的厚度回弹量为 1.33 mm，实验的厚度回弹量为 1.48 mm，预报

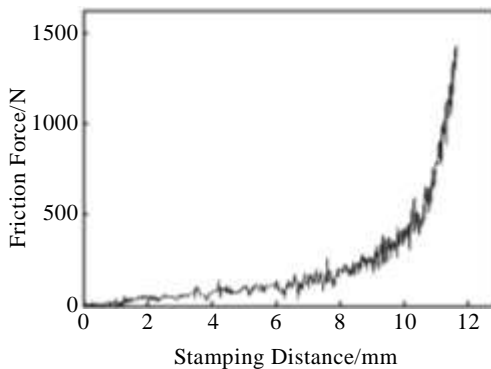


图 8 摩擦力曲线

Fig.8 Friction force curve

表 1 回弹尺寸对比

Table 1 Springback size comparison (mm)

	Numerical calculation	Experiment
Thickness before springback	3.37	3.30
Thickness after springback	4.70	4.78
Radial size before springback	4.00	4.00
Radial size after springback	4.40	4.44

误差为 10.1%；数值计算的径向回弹量为 0.4 mm，实验的径向回弹量为 0.44 mm，预报误差为 9.1%。可见，数值计算在成形尺寸和回弹量方面的预报是可靠的。

3.6 固相体积分数预估

金属橡胶作为一种多孔材料，由金属固体和孔隙相两相组成，固相体积分数是制备吸声元件和过滤元件要考虑的重要参数。预估构件尺寸后，可以通过式 (22) 较容易地计算固相体积分数 k 。

$$k = m / (\rho V) \tag{22}$$

式中， m 为用料质量， ρ 为金属丝材料密度， V 为预估回弹后构件体积，算例中构件的固相体积分数预测值为 0.305，实验固相体积分数计算值为 0.298，预测误差为 2.3%，可见，预测结果可靠。

3.7 接触点数预估

金属橡胶的主要耗能方式为内部线匝之间接触点的干摩擦作用，对接触点数的预报就是对金属橡胶耗能能力的间接预估。数值模型中，计算金属丝轴线节点之间的距离，若该距离小于阈值 Δ ，则认为是一个接触点。在一个金属丝接触对中，两轴线节点连线一般不是两段接触金属丝的垂线，因此两节点间的距离一般会略大于金属丝直径。当取阈值 Δ 为 1.1 倍的金属丝直径时，算例中数值模型的接触点数随冲压成形及回弹过程的变化如图 10 所示。图 10 中，虚线前的部分为冲压成形过程，随着冲压过程的进行，金属丝线匝之间的距离越来越小，接触点数量逐渐变大；虚线后的部分为回弹过程，回弹后，金属丝线匝之间的

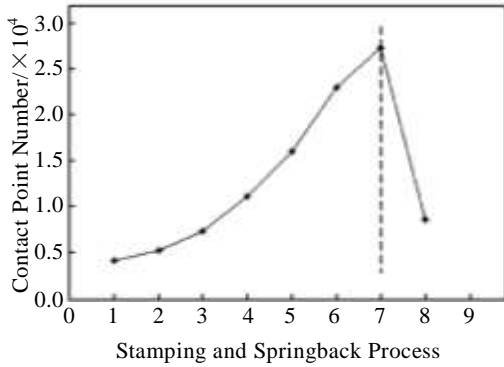


图 10 接触点数量变化

Fig.10 Variation of contact point number

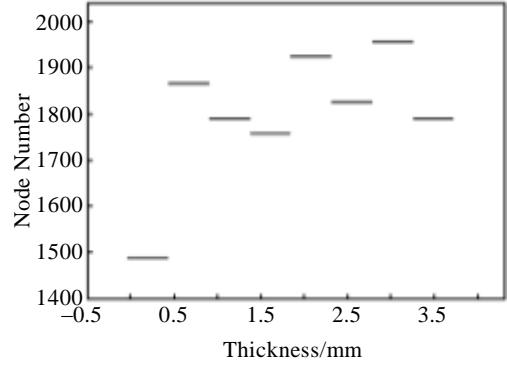


图 12 厚度方向材料组织分布

Fig.12 Tissue distribution along the thickness direction

距离相对于回弹前变大，接触点数量减小。可见，数值模型预报的接触点数量变化规律与实际是相符的，说明数值模型对接触点数量预报的合理性。

3.8 材料组织分布预估

一般地，由于毛坯与模具之间的摩擦作用以及螺旋卷缠绕轨迹的影响，金属丝线匝或材料孔隙在金属橡胶制品中的分布不是绝对均匀的。通过数值模型，可以在制备前预估当前工艺参数所制备的金属橡胶制品的均匀性并加以改进。图 11 为算例模型径向方向的节点密度分布。可见，构件中径向方向的中部材料密度最大，两侧最小。这是因为在内外表面存在无金属材料的浅槽，使靠近内外表面的区域材料密度相对稀疏(图 6b、图 6d)，且算例中构件的径向尺寸(构件壁厚)较小，所以造成了中部材料密度较大，内外逐渐减小的变化趋势。

图 12 为沿厚度方向(由下表面至上表面)模型的节点分布情况。可见，构件底部的材料组织比较稀疏，这是由于在冲压成形时，垫块不动，压块自上而下进行冲压，且成形方向上毛坯与模具存在摩擦作用，使得冲压时金属丝在毛坯上部的堆积速度快于下部，且

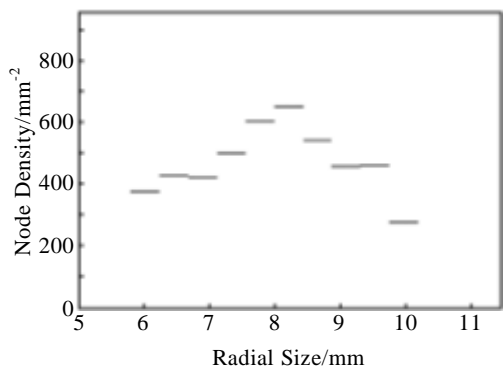


图 11 径向材料组织分布

Fig.11 Radial material tissue distribution

算例中构件的厚度尺寸较小，体现为底部材料组织密度比上部小。

3.9 细观组织结构预估

金属橡胶材料内部细观结构复杂，如果不能获得细观几何结构和接触状态的准确信息，则难以研究材料内部线匝间的细观作用机理。而数值模型可以较容易地得到金属丝微段的几何构型、空间坐标和接触状态，为金属橡胶的细观尺度研究提供了可能。

4 结 论

1) 金属橡胶毛坯、冲压成形过程和成形构件的数值模型完全基于实际的材料、工艺参数，模型参数物理意义十分明确。数值模型能够与实际毛坯、冲压实验、实际构件保持很好的一致性。

2) 通过数值模型，实现了成形压力、模具摩擦力、模具应力、构件成形尺寸、回弹量、固相体积分数、接触点数、材料细观结构和组织分布的准确预测，预测结果可靠性强，可以指导实际金属橡胶材料的制备，大大减小了以往实验试凑的人力物力成本。

3) 数值计算可以得到金属橡胶材料内部复杂的细观组织结构，为金属橡胶细观尺度研究提供了途径。

参考文献 References

[1] Bugra Ertas H. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*[J], 2009, 131: 1

[2] Bugra Ertas H, Luo Huageng. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*[J], 2008, 130: 1

[3] Yan Hui(闫辉), Jiang Hongyuan(姜洪源), Zhao Hongyu(赵宏宇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(12): 2092

[4] Jiang Hongyuan(姜洪源), Guo Yadong(国亚东), Chen Zhaobo(陈照波) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金

- 属材料与工程)[J], 2009, 38(12): 2116
- [5] Mark Zarzour, John Vance. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*[J], 2000, 122: 326
- [6] ЧЕГОДАЕВ Д Е, МУЛЮКИНО П, КОЛТЫГИНЕ В. Translated by Li Zhongying(李中郢). *Design of Metal Rubber Product*(金属橡胶构件的设计)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 98
- [7] Chen Yanqiu(陈艳秋), Guo Baoting(郭宝亭), Zhu Zigen(朱梓根). *Journal of Aerospace Power*(航空动力学报)[J], 2002, 17(4): 416
- [8] Cao Fengli(曹凤利), Bai Hongbai(白鸿柏), Ren Guoquan(任国全) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2012, 48(24): 61
- [9] Li Yuyan, Li Xiaoling, Huang Xieqing. *Mechanics of Composite Materials*[J], 2011, 47(5): 571
- [10] Huang Mingji, Dong xiuping, Liu Guoquan. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*[J], 2010, 17(1): 75
- [11] Dong Xiuping(董秀萍), Huang Mingji(黄明吉), Li Xingyi(李星逸) *et al. Materials Science & Technology*(材料科学与工程)[J], 2010, 18(6): 785
- [12] Li Guangyao(李光耀), Wang Hu(王琥), Yang Xujing(杨旭静) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2010, 46(10): 31

Numerical Simulation of Metal Rubber Press Forming

Huang Kai, Bai Hongbai, Lu Chunhong, Cao Fengli
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Space winding helix parametric equation and a meso structure numerical model for metal rubber as well as its blank were established with raw material and process parameters of product based on automatic blank twine technology. Forming force, mould friction force, mould stress, product size, springback value, solid phase volume fraction, contact point number, material meso structure and tissue distribution were predicted by the numerical model. Forecast results are coincident with the experiment. The numerical model is physically significant and reliable definitely. The model is directive for manufacture of metal rubber and makes it possible to research metal rubber in meso scale.

Key words: metal rubber; space winding helix; press forming; meso structure; characteristic prediction

Corresponding author: Huang Kai, Candidate for Ph. D., Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, P. R. China, E-mail: hk420604@163.com