

doi: 10.7690/bgzdh.2014.08.009

旋压成型中旋轮轨迹设计及对成型结果的影响

苏鹏, 魏战冲

(中国空空导弹研究院工程技术部, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为提高旋轮加载轨迹设计的通用性, 实现旋轮加载轨迹参数化控制, 研究直线、圆弧和渐开线加载轨迹曲线规则设计方法。基于非线性有限元模拟软件 ABAQUS/Explicit 平台, 建立多道次普通旋压的三维动态显示有限元分析模型, 并研究不同加载轨迹的优缺点。结果表明: 渐开线加载轨迹厚度分布较均匀, 最大等效应变接近圆弧加载轨迹, 优于其他 2 种轨迹。

关键词: 多道次普通旋压; 钣金件; 旋轮轨迹; 有限元模拟

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Roller Trace Design and Impact on Outcome of Spin Forming Molding

Su Peng, Wei Zhanchong

(Engineering Technology Department, China Airborne Missile Academy, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to improve the design universal of roller loading trace and realizing roller loading trace parameter control, research on loading trace principle design of straight line, arc and involute. Based on non-linear FEM simulation software ABAQUS/Explicit platform, establish multi-pass general spin 3D dynamic display FEM analysis model, research on advantages and disadvantages of different loading trace. The results show that the thickness distribution of involute loading trace is uniform, max equivalent strain accesses arc loading trace, which is better than other 2 traces.

Keywords: multi-pass conventional spinning; sheet metal work piece; roller trace; FEM simulation

0 引言

多道次普通旋压是指旋轮需要通过多次旋压毛坯才能完成工件的成形过程^[1]。多道次普通旋压变形有条件好、产品性能高、尺寸公差小、材料利用率高、轻量化、柔性化及可制成整体无缝空心回转体零件等优点, 广泛应用于航空航天、汽车等精密加工技术领域^[2-3]。

多道次普通旋压是集几何、物理、边界非线性为一体的不均匀变形问题, 是多因素耦合作用的复杂塑性变形过程, 单纯采用理论解析方法, 难以准确、有把握地解决实际问题。采用实验研究的方法, 一般难以对问题做出普适性的回答和规律性的指导, 而且耗费大量的人力、物力, 并且生产周期长。随着计算机软硬件技术和有限元模拟技术的不断发展与完善, 数值模拟方法不仅能够解释变形过程的基本原理和分析产生缺陷的原因, 还能够提供快速准确的方法对工艺参数进行控制和优化, 避免了以往方法不够精确的理论结果和昂贵的试验消耗^[4-6]。

多道次普通旋压成形关键是旋轮运动行程的构成及旋轮运动规则, 即旋轮运动轨迹。旋轮轨迹对变形量、成形质量和加工效率有很大影响, 因此在

多道次普通旋压中最重要的问题是确定旋压轨迹。目前, 对于多道次普通旋压数值模拟研究相对较少^[7-8]。笔者基于非线性有限元模拟软件 ABAQUS/Explicit 平台, 建立多道次普通旋压的三维动态显示有限元分析模型, 基于该模型研究揭示不同旋压轨迹旋压过程中的厚度、应变的变化规律, 为相关工艺参数的确定提供技术支持。

1 加载轨迹设计

多道次普通旋压成形加载轨迹曲线为一系列的平面曲线, 通过旋轮的平面运动与芯模和尾顶共同作用带动毛坯旋转, 形成旋轮与毛坯的相对螺旋运动。为了提高旋轮加载轨迹设计的通用性, 实现旋轮加载轨迹参数化控制, 笔者主要介绍直线、圆弧和渐开线加载轨迹曲线规则设计方法。

加载轨迹设计首先要确定加载轨迹道次的起点。多道次普通旋压成形是将毛坯逐渐压贴到芯模上的过程, 芯模决定了成形零件的最终形状, 因此加载轨迹设计应以芯模截面线作为依据。加载轨迹道次起点对应芯模截面线偏移线上对应的点, 其设计方法为: 假设毛坯体积不发生变化, 厚度均匀为一定值, 这样变形后面积为变形前面积乘以一个系

收稿日期: 2014-04-04; 修回日期: 2014-05-25

作者简介: 苏鹏(1972—), 男, 河南人, 学士, 高级工程师, 从事金属工艺成型及加工研究。

数,可计算毛坯的变形后截面线长度 L_0 ,再通过截面线长度来计算轨迹起点。设置最后道次长度为 $EndPassLenth$ 、第 1 道次长度为 $FirstPassLenth$ 、道次数为 $PassNumber$ 和计算指数 n ,由于最后道次与第 1 道次长度不在计算道次起点的范围内,所以计算道次起点的有效长度为: $L=(L_0-EndPassLenth-FirstPassLenth)$,计算第 i 道次起点对应的截面线长度 L'_i ,计算方程为 $L'_i = FirstPassLenth+(L \times i / (PassNumber-1))^n$ 。

1.1 直线轨迹规划

加载轨迹设计主要是参数的设定,设计直线加载轨迹规则的主要参数为:

- 1) 起始角度: 第 1 道次直线加载轨迹与垂直方向的夹角;
- 2) 进程余角: 最后一道次直线加载轨迹与芯模方向的夹角;
- 3) 进程角增量系数: 进程直线角度按幂函数方程变化的指数;
- 4) 进程终点: 旋轮终止点相对于体积积分计算出来的加载轨迹的比例系数;
- 5) 压拉起点: 在曲线为拉压时,道次转换时的转换点;
- 6) 返程渐压: 旋轮回程返回到芯模的交点与道次间距的比例系数;
- 7) 返程回旋: 向后回旋到芯模的交点位置与道次间距的比例系数。

直线加载轨迹线参考点采用体积不变准则计算和厚度均匀定值准则,直线方程如下:

$$y = kx + b \tag{1}$$

其体积积分方程如下式:

$$V = m \int_a^b \sqrt{1+k^2} y dx \tag{2}$$

由式 (1) 与式 (2) 得体积最终积分方程

$$V = m \int_a^b \sqrt{1+k^2} (kx+b) dx \tag{3}$$

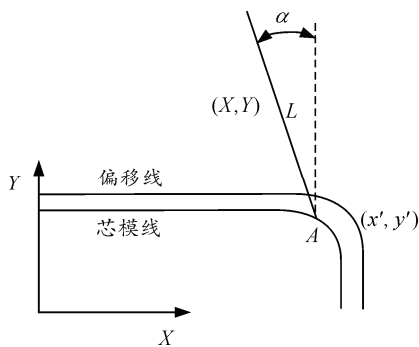


图 1 直线加载轨迹计算

直线加载轨迹计算以芯模为参考依据,再平移得到以芯模偏移线为基准的加载轨迹,其以芯模为参考的加载轨迹如图 1 所示。

1.2 圆弧轨迹规划

加载轨迹设计主要是参数的设定,设计圆弧加载轨迹规则的主要参数为:

- 1) 起始角度($^\circ$): 第一道次圆弧加载轨迹切线与垂直方向的夹角;
- 2) 进程余角($^\circ$): 最后一道次圆弧加载轨迹切线与芯模主轴方向的夹角;
- 3) 进程角增量系数: 进程圆弧切线角度按幂函数方程变化的指数;
- 4) 进程半径比率指数: 各道次圆弧半径变化幂函数的指数,但指数为正时,以后各道次半径是递增,当为负数时,以后各道次的半径是递减;
- 5) 进程终点: 旋轮终止点相对于体积积分计算出来的加载轨迹的比例系数;
- 6) 压拉起点: 在曲线为拉压时,道次转换时的转换点;
- 7) 返程半径系数: 返程圆弧与进程圆弧半径比例系数;
- 8) 返程渐压: 旋轮回程返回到芯模的交点与道次间距的比例系数;
- 9) 返程回旋: 向后回旋到芯模的交点位置与道次间距的系数;
- 10) 最大圆弧半径: 进程圆弧半径的上限;
- 11) 曲线凹凸性: 圆弧是逆时针还是顺时针(对于进程凹为顺时针,凸为逆时针,回程反之)。

圆弧加载轨迹线上的参考点采用体积不变和厚度均匀定值原则计算,圆弧的参数方程如下式:

$$\begin{cases} x = x(t) = x_0 + R \cos t \\ y = y(t) = y_0 + R \sin t \end{cases} \tag{4}$$

体积的积分方程如下式:

$$V = m \int_a^b y(t) \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)} dt \tag{5}$$

由式 (4) 与式 (5) 可以得到体积积分参数方程

$$V = m \int_a^b (y_0 + R \sin t) \sqrt{(-R \sin t)^2 + (-R \cos t)^2} dt \tag{6}$$

由式 (6) 简化得到体积积分方程

$$V = mR \int_a^b (y_0 + R \sin t) dt \tag{7}$$

圆弧加载轨迹计算以芯模为参考依据，再平移得到以芯模偏移线为基准的加载轨迹，其以芯模为参考的加载轨迹如图 2、图 3 所示。

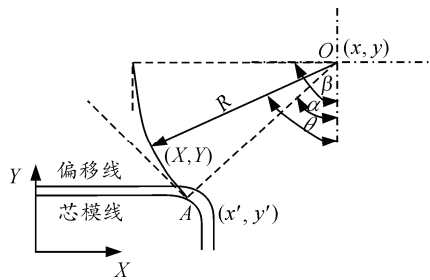


图 2 圆弧轨迹

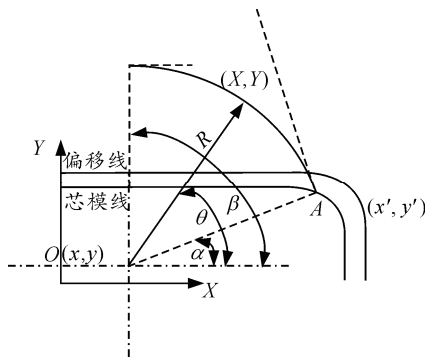


图 3 圆弧轨迹(局部)

1.3 渐开线轨迹规划

加载轨迹设计，主要是参数的设定，设计渐开线加载轨迹规则的主要参数内容为：

- 1) 起始角度：第一道次渐开线加载轨迹切线与垂直方向的夹角；
- 2) 进程余角：最后一道次渐开线加载轨迹切线与芯模方向的夹角；
- 3) 进程角增量系数：进程渐开线切线角度按幂函数方程变化的指数；
- 4) 进程半径比率指数：各道次渐开线基圆半径变化幂函数指数，但指数为正时，各道次半径是逐渐增加，当为负数时，各道次的半径是逐渐减少；
- 5) 起点渐开线角度：渐开线曲线起点对应的渐开线的角度；
- 6) 渐开线旋转角度：在第一道次旋转角度的基础上按幂指数函数增加的，旋转角度指数是旋转角度增加的幂函数的指数；
- 7) 进程终点：旋轮终止点相对于体积积分计算出来的加载轨迹的比例系数；
- 8) 压拉起点：在曲线为拉压时，道次转换时的转换点；
- 9) 返程半径系数：返程圆弧与进程渐开线基圆半径的比例系数；

10) 返程渐压：旋轮回程返回到芯模的交点与道次间距的比例系数；

11) 返程回旋：向后回旋到芯模的交点位置与道次间距的系数；

12) 最大旋转角度：主要是为了限制渐开线旋转的最大角度；

13) 曲线凹凸性：曲线向上或向下翻转样式。

渐开线加载轨迹线的上参考点采用体积不变和厚度均匀准则计算。

1.3.1 凹曲线方程

渐开线参数方程如式 (8) 所示 (X_{10}, Y_{10}) 为基圆圆心坐标：

$$\begin{cases} x = -[R \cos \theta + \theta R \sin \theta] \cos(-n) + [R \sin \theta - \theta R \cos \theta] \sin(-n) + X_{10} \\ y = [R \cos \theta + \theta R \sin \theta] \sin(-n) + [R \sin \theta - \theta R \cos \theta] \cos(-n) + Y_{10} \end{cases} \quad (8)$$

体积积分方程如下式：

$$V = m \int ds \quad (9)$$

渐开线微段长度计算方程如下式：

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = R \theta d\theta \quad (10)$$

毛坯周向面积微元方程如下式：

$$ds = 2\pi y dl \quad (11)$$

由式 (9)、式 (10) 与式 (11) 得体积积分的参数方程

$$V = m \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{((R \cos \theta + \theta R \sin \theta) \sin(-n) + (R \sin \theta - \theta R \cos \theta) \cos(-n) + Y_{10}) R \theta d\theta}{(R \sin \theta - \theta R \cos \theta) \cos(-n) + Y_{10}} \quad (12)$$

由式 (12) 得最终体积参数方程

$$V = m \{ R^2 [(\theta^2 \cos \theta - 3 \cos \theta - 3 \theta \sin \theta) \sin \alpha + (3 \sin \theta - 3 \theta \cos \theta - \theta^2 \sin \theta) \cos \alpha] + 0.5 Y_{10} R \theta^2 \} \Big|_{\theta_0}^{\theta} \quad (13)$$

1.3.2 凸曲线方程

渐开线参数方程如式 (14) 所示 (X_{10}, Y_{10}) 为基圆圆心坐标：

$$\begin{cases} x = (R \cos \theta + \theta R \sin \theta) \cos(-n) + (R \sin \theta - \theta R \cos \theta) \sin(-n) + X_{10} \\ y = -(R \cos \theta + \theta R \sin \theta) \sin(-n) + (R \sin \theta - \theta R \cos \theta) \cos(-n) + Y_{10} \end{cases} \quad (14)$$

由式 (9)、式 (10) 与式 (11) 得体积积分的参数方程

$$V = m \int_{\theta_0}^{\theta} (-R \cos \theta + \theta R \sin \theta) \sin(-n) + (R \sin \theta - \theta R \cos \theta) \cos n + Y_{10} R \theta d\theta \quad (15)$$

由式 (15) 得最终体积参数方程

$$V = m \{ R^2 [(3 \cos \theta + 3 \theta \sin \theta - \theta^2 \cos \theta) \sin \alpha + (3 \sin \theta - 3 \theta \cos \theta - \theta^2 \sin \theta) \cos \alpha] + 0.5 Y_{10} R \theta^2 \} \Big|_{\theta_0}^{\theta} \quad (16)$$

渐开线加载轨迹计算以芯模为参考依据, 再平移得到以芯模偏移线为基准的加载轨迹, 其以芯模为参考的加载轨迹如图 4、图 5 所示。

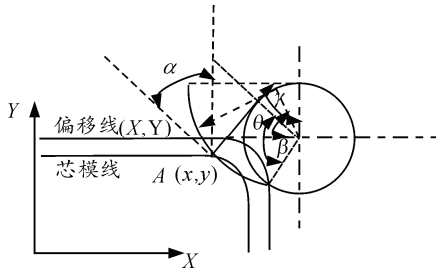


图 4 渐开线轨迹

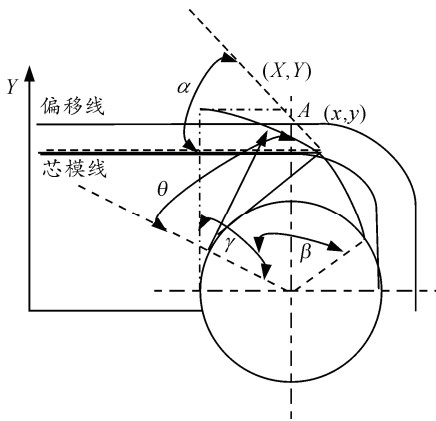


图 5 渐开线轨迹 (局部)

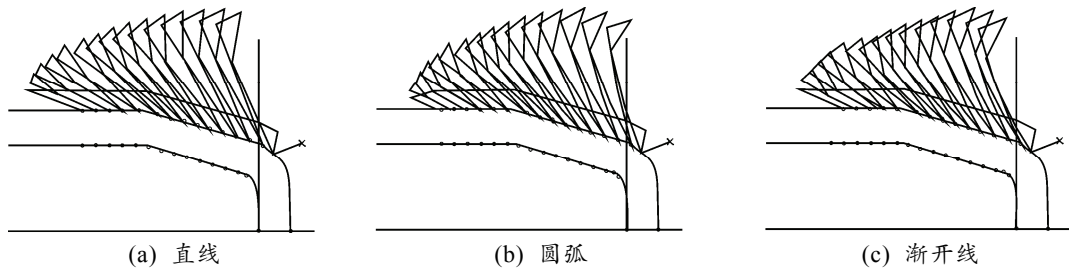


图 6 加载轨迹

直线、圆弧和渐开线 3 种加载轨迹多道次普通旋压成形后零件厚度分布云图和等效应变分布云图如图 7 和图 8 所示。由图 7 比较可知, 直线轨迹厚度分布云图比较均匀, 渐开线轨迹厚度分布次之, 而圆弧轨迹厚度分布最不均匀。由图 8 比较可知, 直线轨迹最大等效应变明显大于圆弧与渐开线, 而

渐开线本身并没有凹凸性之分, 为了区分渐开线是根据渐开线由原方程得到, 还是对称以后得到的, 由原方程得到的为凸渐开线, 反之为凹渐开线。

2 加载轨迹方式的影响

选取直线、圆弧和渐开线 3 种加载轨迹和有渐压与无渐压的加载方式进行数值仿真模拟, 并对每种形式加载轨迹和加载方式的多道次普通旋压成形的规律进行比较与分析。

由于等效应变的极大值与旋压过程中的毛坯开裂失效有密切关系, 而最终厚度分布是评价成形质量和精度的最重要指标, 因此笔者选择最大等效应变和最终零件厚度分布作为评定成形质量和精度的指标。

主要参数: 毛坯初始直径为 155.0 mm, 芯模转速为 1 500 r/min, 旋轮进给率为 1.5 r/min, 旋轮与芯模之间间隙为 1.8 mm, 旋轮圆弧半径为 12 mm, 旋轮半径为 72 mm, 尾顶压力为 50 kN, 旋轮与毛坯之间摩擦系数为 0.1, 芯模与毛坯之间摩擦系数为 0.2, 质量放大因数为 25, 采用面面接触, 其他参数为系统默认值。

笔者主要讨论直线、圆弧和渐开线加载轨迹对成形结果的影响, 仿真模拟的直线、圆弧和渐开线 3 种加载轨迹如图 6 所示。加载轨迹采用开始与中间阶段带有渐压, 最后阶段无渐压。为比较轨迹形式的影响因素, 道次数目和起点位置相同, 圆弧半径与渐开线起始处半径相同。

渐开线的最大等效应变稍微大于圆弧轨迹, 但是区别不太大。综合比较 3 种加载轨迹, 渐开线加载轨迹在满足厚度均匀的情况下, 最大等效应变较小。因此, 在 3 种加载轨迹中渐开线加载轨迹是最好的, 其次是圆弧轨迹, 而对于直线轨迹由于最大等效应变出现在尾顶处, 可能出现零件底部破裂。

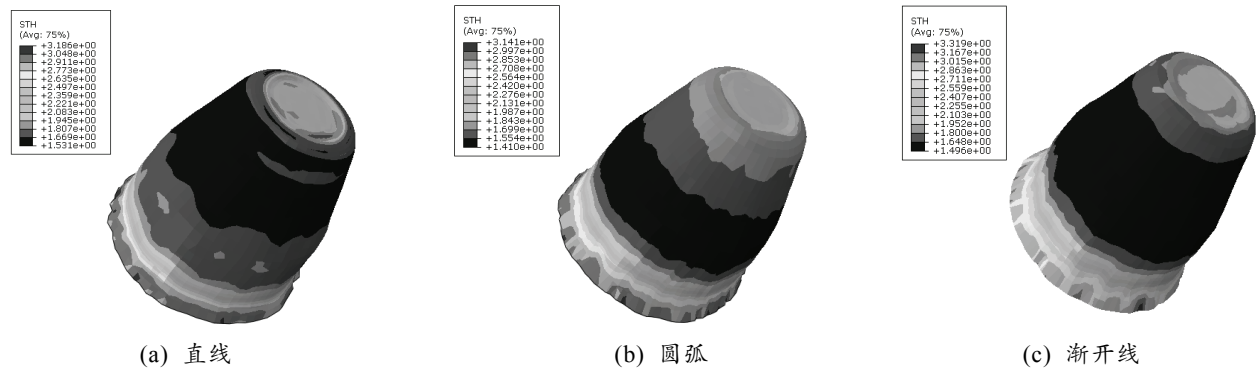


图 7 厚度分布云图

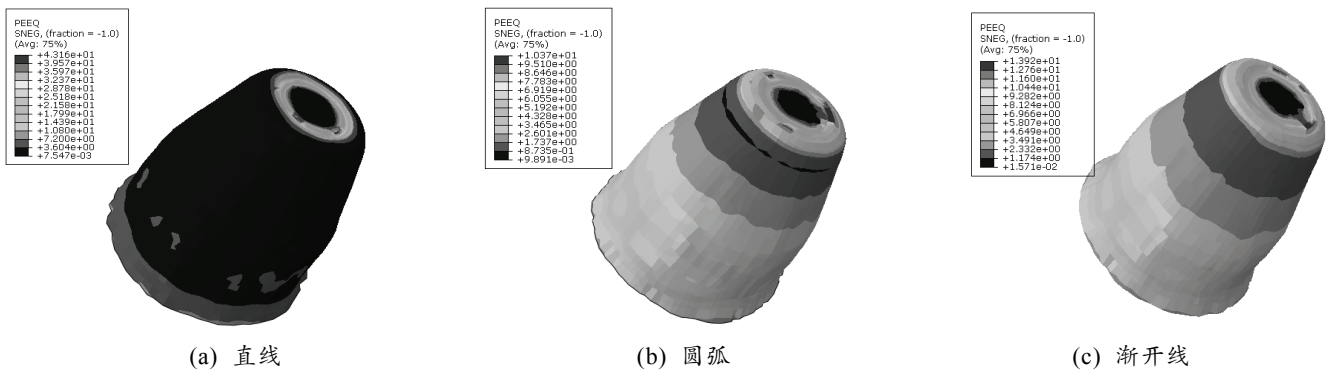


图 8 等效应变分布云图

直线、圆弧和渐开线 3 种加载轨迹对多道次普通旋压零件各道次最小厚度的影响如图 9 所示。由图可知：在变形过程的前期，3 种加载轨迹毛坯最小厚度都急剧减小，并且直线加载轨迹下降速度最快，渐开线次之，圆弧最缓慢；中期对于直线和渐开线最小厚度变化很小，而对于圆弧轨迹最小厚度变化有所减缓，但是减小量也比较大；后期 3 种轨迹的最小厚度变化都比较小。变形前期 3 种轨迹环节的形成都比较严重，旋轮行进受的局部阻力加大，使壁部减薄量比较大；中期圆弧形成环节还比较严重，而渐开线和直线基本不形成环节，尤其是直线；后期 3 种轨迹基本不形成环节，旋轮行进受到的局部阻力很小，致使变形量非常小。即在只考虑厚度的情况下，直线和渐开线轨迹都比较好。

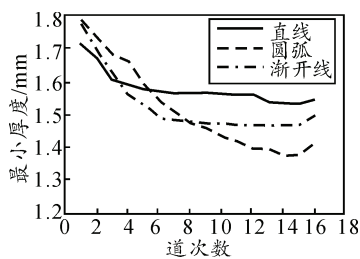


图 9 最小厚度

直线、圆弧和渐开线 3 种加载轨迹对多道次普通旋压零件各道次最大等效应变的影响如图 10 所示。

由图可知：在变形的前期，3 种轨迹最大等效应变基本重合，都发生在道次起始点，中期和后期最大等效应变发生在与尾顶接触处，对于圆弧和渐开线，等效应变变化比较平缓，而对于直线变化比较剧烈，以指数形式增加，这样容易出现零件底部破裂。综上所述，在只考虑等效应变的情况下，圆弧和渐开线轨迹都比较好。

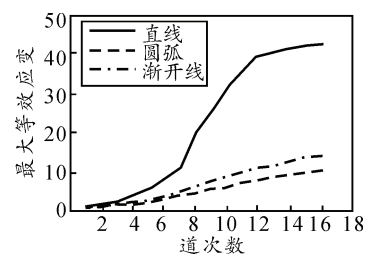


图 10 最大等效应变

通过上述分析，综合各种性能，渐开线加载轨迹是 3 种加载轨迹中比较好的加载轨迹。

3 结论

笔者针对多道次普通旋压的成形特点，对旋压数字化制造中所需要的关键算法进行了研究，设计了适合旋压的加载轨迹算法，解决了设备与加载轨迹参数化设计的衔接问题，主要包括：