

双锥形铜合金药型罩旋压工艺仿真与实验验证

李彦清¹, 卢升旭¹, 李永洲¹, 黄明智¹, 黄涛²

(1. 长春理工大学机电工程学院, 长春 130022; 2. 长春设备工艺研究所, 长春 130012)

摘要: 本文主要针对铜合金药型罩零件进行强力旋压成形模拟仿真, 基于Simufact/Ansys平台建立双锥形铜合金药型罩旋压三维有限元模型, 通过数值模拟对药型罩强力旋压成形过程应力应变的分布规律分析, 得出在药型罩的前端区域和双锥角过渡圆弧区域应力较大。以药型罩旋压后的应力应变分布为分析目标, 得到旋轮安装角、旋轮半径及进给比对应力应变的影响规律。应用仿真优化的工艺参数进行旋压实验, 实验结果表明药型罩满足精度要求, 表明采用模拟仿真的方法和手段, 能够对实际旋压加工起到指导作用。

关键词: 双锥形铜合金药型罩; 强力旋压; 应力应变

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3148-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgxb.20230026

Simulation and experimental validation of spinning process for double-cone-shaped copper alloy dosage form cover in pharmaceutical applications

LI Yan-qing¹, LU Sheng-xu¹, LI Yong-zhou¹, HUANG Ming-zhi¹, HUANG Tao²

(1. School of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Changchun Institute of Equipment and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: This paper mainly focuses on the simulation and experiments of spinning process of copper alloy charge liner. Based on the Simufact/Ansys platform, a three-dimensional finite element model of biconical copper alloy charge liner spinning is established. The stress and strain distribution of the charge liner, during the process of power spinning, is analyzed by numerical simulation method, and the conclusion of analysis is that higher stresses lie in the front area and biconical transition arc area of the charge liner. Aiming at stress-strain distribution of charge liner after spinning, the influences of spinning wheel installation angle, radius of the spinning wheel and the spinning wheel feed ratio on the stress and strain distribution are respectively obtained. The spinning experiments are carried out with the optimized process parameters, the experimental results show that the size of the charge liner meets the accuracy requirements, which indicates that the simulation method can play a guiding role in the actual spinning processing.

Key words: biconical copper alloy charge liner; power spinning; stress and strain

收稿日期: 2023-01-09.

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20200201012JC, 20220101261JC); 吉林省科技发展计划项目(20210201046GX).

作者简介: 李彦清(1972-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 现代机械设计理论与方法. E-mail: liyanqing@cust.edu.cn

通信作者: 黄涛(1982-), 男, 研究员. 研究方向: 旋压成形技术研究. E-mail: 13843082365@163.com

0 引言

在旋压的过程中,既改变了毛坯的形状,又改变了坯料壁厚的旋压方式称为强力旋压。强力旋压的成形过程是通过尾顶或夹具将坯料固定于芯模前端,随着芯模的旋转,毛坯也会转动,设备带动旋轮做纵向、横向进给运动,旋轮本身被动旋转,使毛坯板料逐渐变薄最终成形为旋压件。

目前为止,药型罩的成形方式有很多种,如车削、铸造、冲压、锻造等^[1]。近年来,我们国家的工业发展速度很快,所以对药型罩的成形质量也提出更高的要求。药型罩的旋压成形方式具有非常多的优点,并且在实际生产中应用非常广泛,旋压成形工艺已经成为制造药型罩最主要的成形方式。

目前,针对不同材料等壁厚或变壁厚单锥形件和曲母线形件旋压成形已经有学者做了大量的研究,Huang等^[2]通过 Abaqus 有限元仿真平台探究了摩擦系数、旋轮的进给速度以及旋轮圆角半径对旋制的成形管件的壁厚差及外轮廓尺寸的影响,并通过实际工艺实验对其结果进行验证。张全孝等^[3]研究了钨铜 EFP 材料制备药型罩具有较好的压力加工性能,材料致密度达 98.2%、抗拉强度 315 MPa 和延伸率为 15.3%;张晋辉等^[4]分析了铝合金锥形件强旋壁厚与旋压力的分布情况,得出在旋压稳定阶段,轴向旋压力先减小后增大,径向旋压力逐渐减小,周向旋压力以较小值在一定范围内波动;夏琴香等^[5]分析了单锥角锥形件一道次旋压成形中起皱、减薄、回弹现象产生的原因以及容易出现这些缺陷的部位;Mori等^[6]开发了一种铸造铝合金零件的热剪切旋压工艺,通过降低旋轮的进给速度和增加旋轮工作圆角半径,减少了由剪切旋压变形引起的表面裂纹;Li等^[7]分析了无芯模旋压旋轮轨迹曲线对成形尺寸精度的影响,得出了凹轨迹曲线下,坯料中部出现最大减薄及变形程度,降低曲线曲率形状精度提高;李灵凤^[8]介绍了如何建立变壁厚锥形件强力旋压的有限元力学模型;徐银丽等^[9]对锥形件变薄旋压试验中旋压回弹量进行了三维有限元分析,表明回弹后最大偏离量随芯模转速和旋轮进给比增大在芯模转速较小时变化不大,而在其较大时随其增大有所减小,并随旋轮进给比增大呈先减小后增大再缓慢减小的趋势;吴统超等^[10]分析了坯料直径及成形区与成形外端相互作用对大

型锥形件强旋成形的影响,结果表明了旋压间隙是最重要的影响因素;Childhouse等^[11]通过实验研究了铝合金和低碳钢圆盘形毛坯在进行剪切旋压加工时关键工艺参数对零件几何形状的影响,结果表明了进给比是最关键的加工参数,进给比高会导致起皱破坏,零件表面比较粗糙;陆栋等^[12]采用有限元模拟法分析了旋压成形中工艺参数对损伤的影响,结果表明间隙、进给速率和摩擦力对损伤的影响较大;陈建华等^[13]探究了曲母线形件剪切旋压成形缺陷,通过选取合理的工艺参数值,可有效抑制缺陷产生。

通过对上述结论进行总结分析,本文建立了双锥形铜合金药型罩三维有限元模型,在 Simufact/Ansys 仿真软件平台进行了旋压工艺仿真模拟,获得了在不同旋压工艺参数下,药型罩旋压成形过程中应力应变的分布及变化规律,得出一组或几组最优的工艺参数,为后续工艺实验验证提供有力的理论依据。

1 制订仿真工艺方案

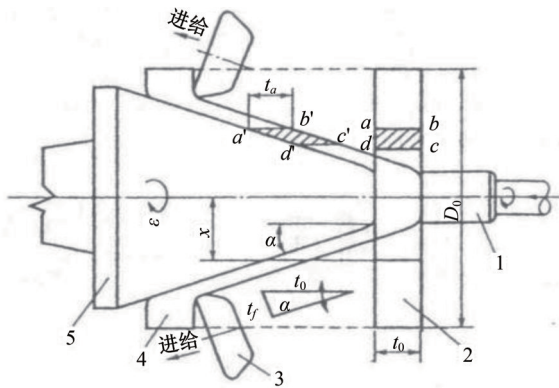
最初的材料采用的是铜,由于纯铜具有优良的综合性能,它的塑性很好,声速(4.7 km/s)和密度(8.9 g/cm³)也比较高,射流的延伸性良好。然后不断加入其他金属进行实验,以提高其侵彻深度和威力,材料的使用范围也变得广泛起来,开始从单一金属转变为合金金属。本文采用铜合金作为研究对象,其材料化学成分如表 1 所示。

本文采用的旋压成形方式为剪切旋压,在理想状态下锥形件强力旋压的成形方式为纯剪切变形。其旋压成形过程如图 1 所示。金属板料在旋压的过程中只沿着芯模轴向的剪切移动,其他方向没有任何的变形。从纵向剪切面观察,abcd 4 个点所围成的区域为矩形,绕芯模轴线旋转后变成圆环,在整个成形过程中,坯料可分为数个大大小小的圆环,在旋轮的作用下每一个圆环沿着芯模轴线旋转并且同时向旋轮进给方向滑移,变成了锥角为 2α 的圆锥形件,变形前后的工件直径与轴向厚度没有发生变化。

表 1 铜合金主要化学成分

Table 1 Copper alloy main chemical composition

元素	百分比/%	元素	百分比/%
Cu	99.96	S	0.01
Ag	0.005	Fe	0.01
Zn	0.01	P	0.005



1-尾顶;2-毛坯;3-旋轮;4-成形件;5-芯模
图 1 强力旋压原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of strong

旋压工艺是旋压件进行旋压成形加工之前,必须进行的一项加工工艺设计,如果不考虑旋压设备方面的影响,它是保证旋压成形质量与旋压精度中非常重要的一个环节。通常情况下,旋压件的成形尺寸及形状都非常接近于所需成品件,但是其成形精度还是有一定偏差,所以通过对工艺参数进行分析研究从而提高成形精度,完成技术指标。

为了能为后续工艺试验提供更具有科学依据的理论支撑,必须将整个试验的仿真过程尽可能地还原。由于成品件为双锥形变壁厚药型罩,所以本文采用的是变壁厚板料强力旋压,变壁厚板料各直径对应的厚度计算公式如下:

$$t_0 = \frac{t_f}{\sin \alpha} \quad (1)$$

式中: t_0 为板料各直径的厚度; t_f 为相对应直径上旋压件厚度; α 为旋压件的半锥角。

式(1)为锥形件纯剪切旋压所遵循的规律,也叫作正弦律。从图 1 也可以看出,成形后由 $a'b'c'd'$ 4 个点围成的平行四边形面积与 $abcd$ 4 个点围成的矩形面积相等,在旋转轴向方向和相同位置上的厚度也相同,所以在旋压前后单元的体积不发生变化,得出纯剪切旋压还遵循体积不变原则。因此,可以得出锥形件纯剪切旋压壁厚减薄率 ϕ_i :

$$\phi_i = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100\% = (1 - \sin \alpha) \times 100\% \quad (2)$$

由上述公式可以看出,旋压件的半锥角 α 越小,壁厚减薄率越大,坯料变形的程度越剧烈。壁厚减薄率也是剪切旋压加工中一个非常重要的工艺参数。本次工艺试验的芯模形状为双锥形直线和圆弧组合,所以旋压件的半锥角在圆弧阶段是

不断变化的,而在双锥直线段半锥角固定不变,所以在圆弧阶段壁厚是不断变化的,而双锥直线段理论上壁厚是不发生变化的。通过所需旋压件的尺寸,可以计算出相对应直径上的板料厚度,从而设计出变壁厚板料,如图 2 所示。

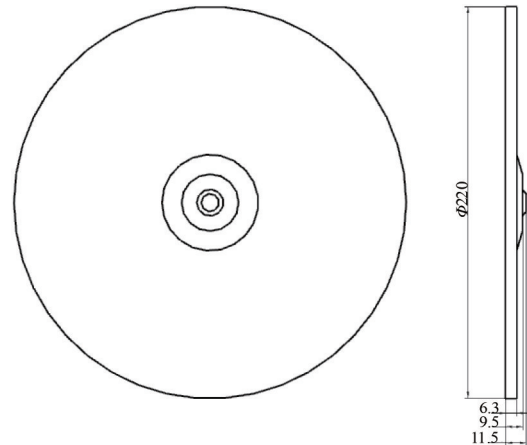


图 2 变壁厚板料示意图

Fig. 2 Schematic diagram of variable wall thickness sheet

1.1 旋轮

旋轮是旋压加工的主要成形工具,也是影响旋压成形质量的重要因素之一。本文的旋压仿真过程中采用的是双旋轮同步无错距强力旋压,旋轮自身为被动旋转,是靠与毛坯接触摩擦带动旋轮旋转,由于锥形件为变直径件,所以在旋压成形过程中其自转速度会随着走过直径的大小而发生变化,在整个旋压成形过程中处于上升状态。

1.1.1 运动轨迹

旋轮的运动轨迹是由旋轮与芯模的间隙 C 来描述的,并且旋压件的壁厚决定了旋轮与芯模之间的间隙 C 。在理论上,旋压件壁厚等于旋轮与芯模之间的间隙,但是一种情况是由于旋压工艺系统在旋压力的作用下会出现弹性变形,造成旋轮相对于芯模的退让,从而导致旋轮与芯模间隙增大。另外一种情况是旋压件的本身在发生塑性变形后也会产生一定的回弹,这两种情况都会使旋压件的壁厚增大,通过对旋压件所需求的壁厚值来调整旋轮与芯模之间的间隙,最终得到旋轮轨迹。

通过 Ansys Workbench 平台对旋轮轨迹进行预处理,将 3 段旋轮轨迹分成连续的坐标点。如图 3 所示,在 A、C 处将轨迹每段分成 2 个坐标点, B 处轨迹分成连续的 50 组坐标点。两旋轮关于 X

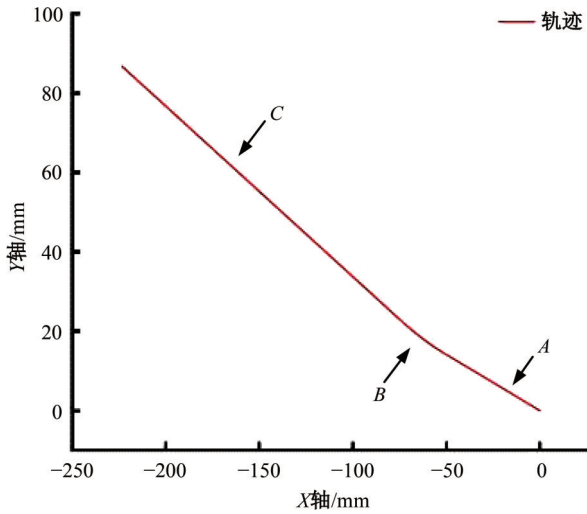


图 3 上旋轮轨迹

Fig. 3 Upward spinning wheel track

轴对称结构,所以只需要将上旋轮 Y 坐标改为相反数即可,从而得出 2 组旋轮轨迹的坐标点。

1. 1. 2 圆角半径及安装角

旋轮的圆角半径是保证旋压成形质量特别重要的因素,旋轮的圆角 γ 过大时,旋轮在旋压过程中与坯料接触面积增大,坯料被碾压的重叠部分增大,这样可以提高旋压件表面的光洁度,但此时旋压力也会逐渐增大,从而容易导致毛坯凸缘朝着旋轮的进给方向前倾倒和失稳等现象。旋轮的圆角 γ 减小,变形区域的接触应力变大,但是接触面积减小,在旋压过程中旋压件贴膜比较好。如果旋轮圆角过小,就不能加大进给速度,且易导致出现旋轮切削坯料“咬入”现象,会使得旋压件表面成形质量差,粗糙度低甚至会出现掉料、拉断等现象。

实际生产中,圆角半径根据毛坯厚度来选择,通常取如下范围:

$$\gamma = (1\sim 3)t_0 \quad (3)$$

式中: t_0 为毛坯厚度。

本文选取 3 种圆角半径: R8 mm, R10 mm, R15 mm。旋轮二维示意图如图 4 所示。锥形件旋轮的安装角直接影响金属能否顺利进入旋轮和芯模之间被碾压,并且它和旋压件锥角大小有关,通常情况下旋轮的工作角大于旋压件的锥角,一般取 45° 到 60° 。这里选用旋轮安装角分别为 45° 与 60° 。

1. 2 工装设计

旋压成形工艺中夹具一般来说是采用尾顶及工装固定夹紧坯料,但由于药型罩芯模前段圆角过小,且在旋压成形过程中旋压件尖端坯料晶粒

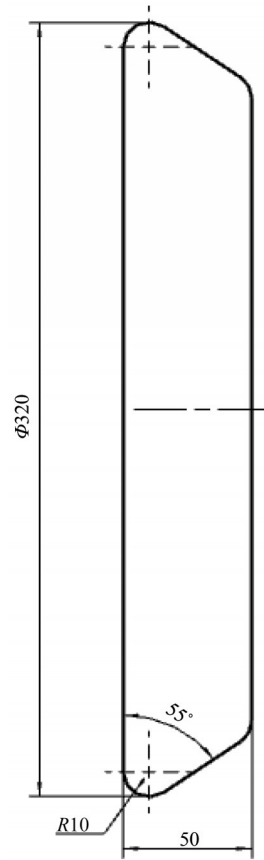


图 4 旋轮二维示意图

Fig. 4 Two-dimensional diagram of the spinning wheel

需自由流动,所以不能采用尾顶进行固定,只能采用圆盘夹具来进行轴向固定,而轴向只能由旋轮来进行补偿,这样的固定方式有可能会对毛坯的贴膜效果造成影响。设计了如图 5 所示的同步夹具,由于该结构过于复杂,在有限元仿真过程中实现难度较大,所以采用如图 6 所示的托料圆板代替同步夹具,从而实现固定夹紧坯料等功能。

1. 3 进给比

在一般情况下,增大旋轮进给比会使旋压件

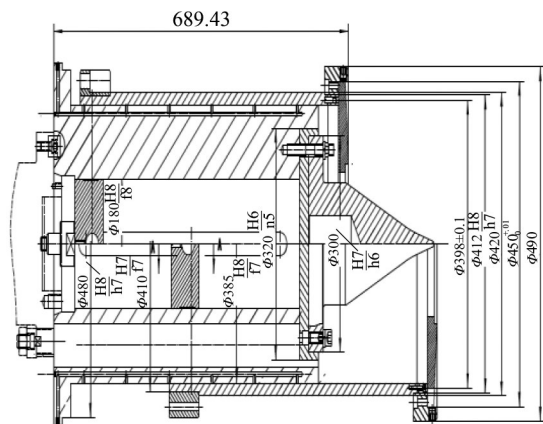


图 5 同步夹具设计图纸

Fig. 5 Synchronous fixture design drawings

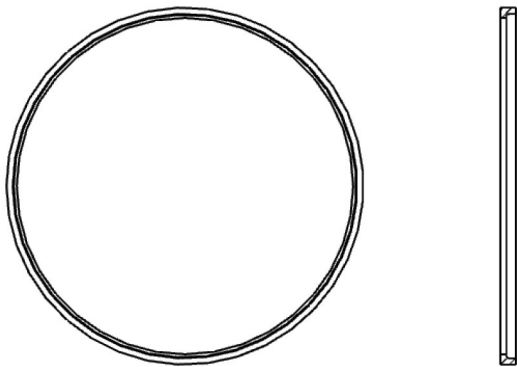


图 6 同步夹具示意图

Fig. 6 Diagram of synchronous fixture

更好地贴膜,但是会降低其表面精度,减小旋轮的进给比,有利于提高零件表面光洁度。目前锥形件旋压加工成形,体心立方晶格的金属材料进给比选择 0.1~1.5 mm/r,本文有限元仿真模拟过程中采用 0.2、0.3、0.45 mm/r 3 种进给比进行对比分析。

1.4 小结

本文旋压仿真模拟中具体工艺参数如下:毛坯材料,铜合金板料;旋轮和芯模材料, Cr12 MoV;旋轮数量, 2 个;旋压方式, 正旋、同步无错距式旋压;旋压道次, 一道次强力旋压。具体旋压工艺方案参数如表 2 所示。

表 2 不同方案的旋压参数

Table 2 Spinning parameters for different solutions

方案	旋轮工作角 $\beta/(\circ)$	圆角半径 R /mm	进给比 f /($\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$)
1	45	10	0.30
2	60	8	0.30
3	60	10	0.30
4	60	15	0.30
5	60	10	0.20
6	60	10	0.45

2 有限元仿真

2.1 有限元模型的建立

本文基于 Simufact 平台建立的双锥形铜合金药型罩三维有限元模型如图 7 所示,为了保证计算结果精度且更符合实际加工工艺,所以仿真模型的尺寸与实际工艺试验尺寸比例为 1:1。假设毛坯在旋压成形前后的体积不发生变化,毛坯与其他模具之间摩擦系统统一定义为库伦摩擦且摩擦系数为 0.1,温度为室温状态。建模时,芯模、旋轮及同步夹具为刚体,坯料为可变形,如图 8 所示,板料采用 Sheetmesh 网格划分方式进行划分,

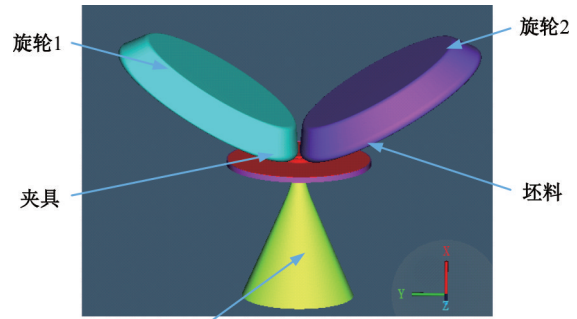


图 7 双锥形药型罩有限元模型

Fig. 7 Finite element model of biconical charge liner

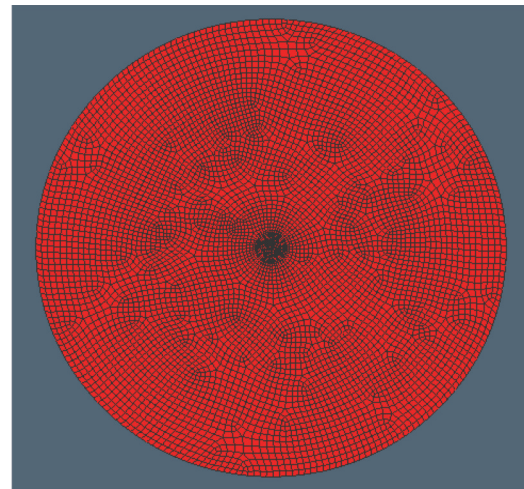


图 8 网格划分

Fig. 8 Grid division

单元类型为六面体单元,径向单元尺寸为 2 mm,厚度方向单元数量为 3,得出单元总数量 52 845 个。定义 X 为母线方向, Y 为径向, Z 为轴向。

2.2 仿真结果

2.2.1 旋轮安装角对应力应变及成形过程的影响

旋轮工作圆角半径 $R=10$ mm, 主轴转速为 220 r/min, 进给速度为 66 mm/min, 进给比为 0.3 mm/r, 当工作角分别为 45° 和 60° 时, 旋压产生的应力、应变对比如图 9、图 10 所示。

2.2.2 旋轮工作圆角半径对应力应变及成形过程的影响

旋轮安装角为 60°, 主轴转速为 220 r/min, 进给速度为 66 mm/min, 进给比为 0.3 mm/r。当旋轮工作圆角半径分别为 8、15 mm 时, 旋压产生的应变应力对比如图 11、图 12 所示。

2.2.3 进给比对应力应变及成形过程的影响

旋轮安装角为 60°, 旋轮工作圆角半径为 10 mm, 主轴转速为 220 r/min, 当进给比分别为 0.2、0.45 mm/r 时, 旋压产生的应变、应力对比如图 13、图 14 所示。

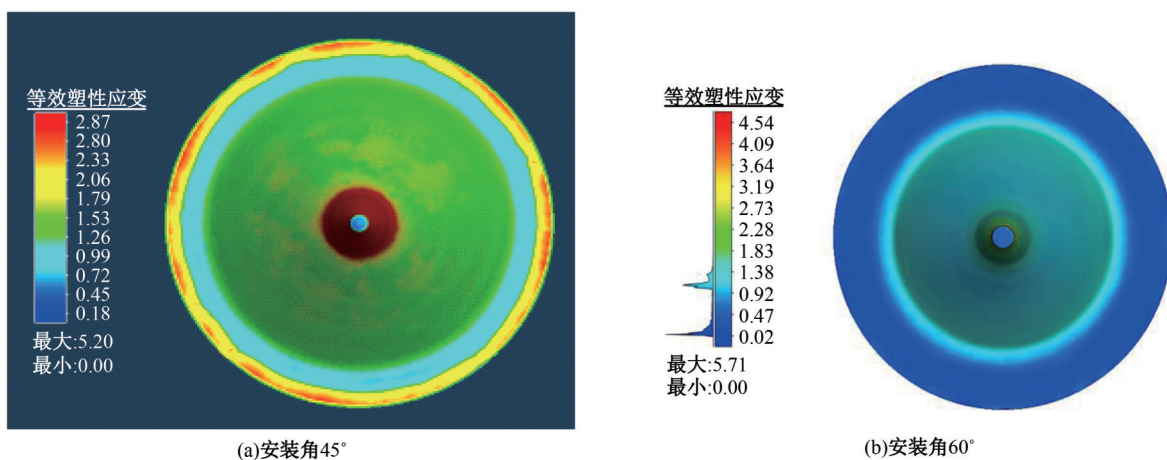


图 9 应变云图(成形状态 95%)

Fig. 9 Strain cloud map(Forming state 95%)

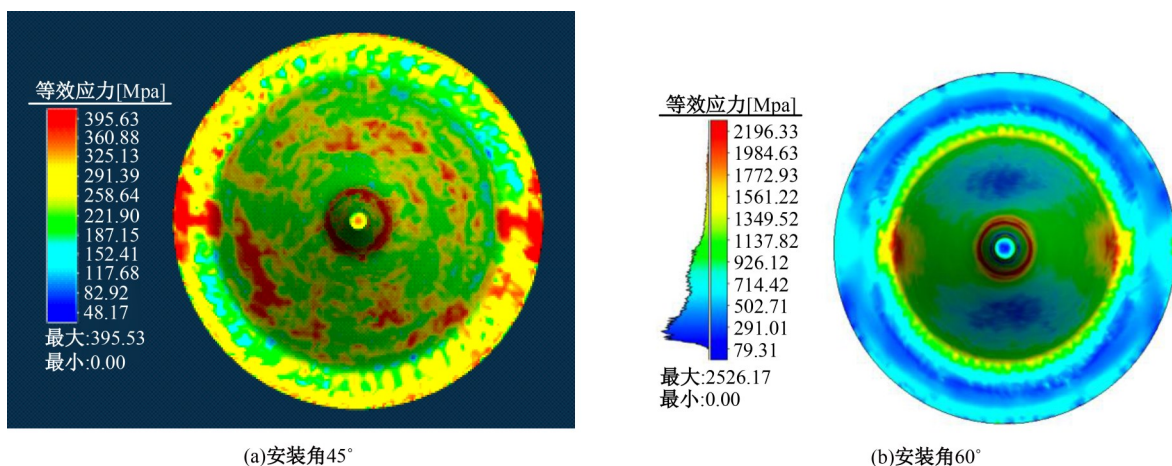


图 10 应力云图(成形状态 95%)

Fig. 10 Stress cloud map(Forming state 95%)

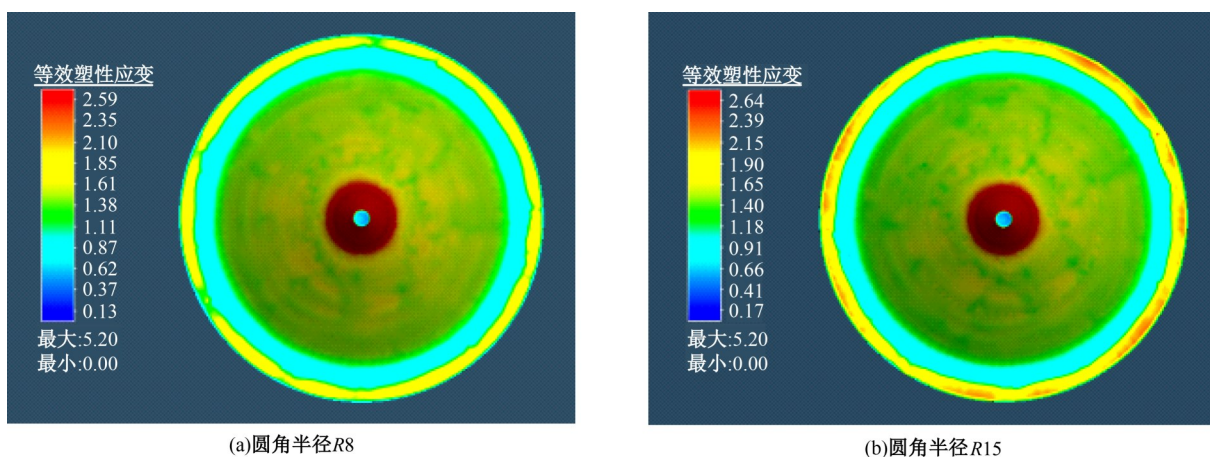


图 11 应变云图(成形状态 95%)

Fig. 11 Strain cloud map(Forming state 95%)

2.3 仿真结果分析

从等效应力与等效塑性应变云图中可以看出,整个有限元仿真结果完成度较好。当旋压成

形状态为 100% 后,分别将每一组仿真结果从 0% 到 100% 在相同位置上沿着母线方向等距选取 10 个节点进行等效应力、等效塑性应变测量,分别得

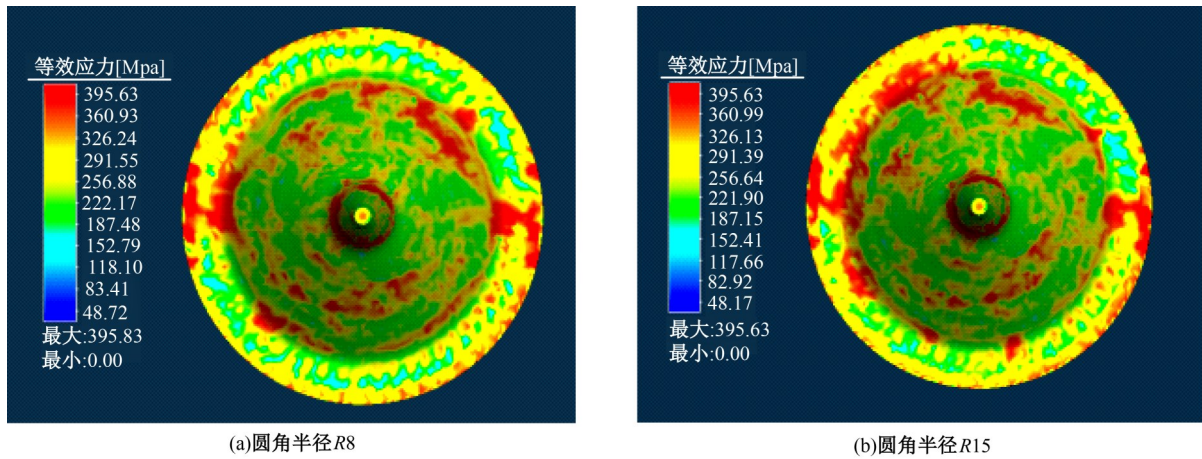


图 12 应力云图(成形状态 95%)

Fig. 12 Stress cloud map(Forming state 95%)

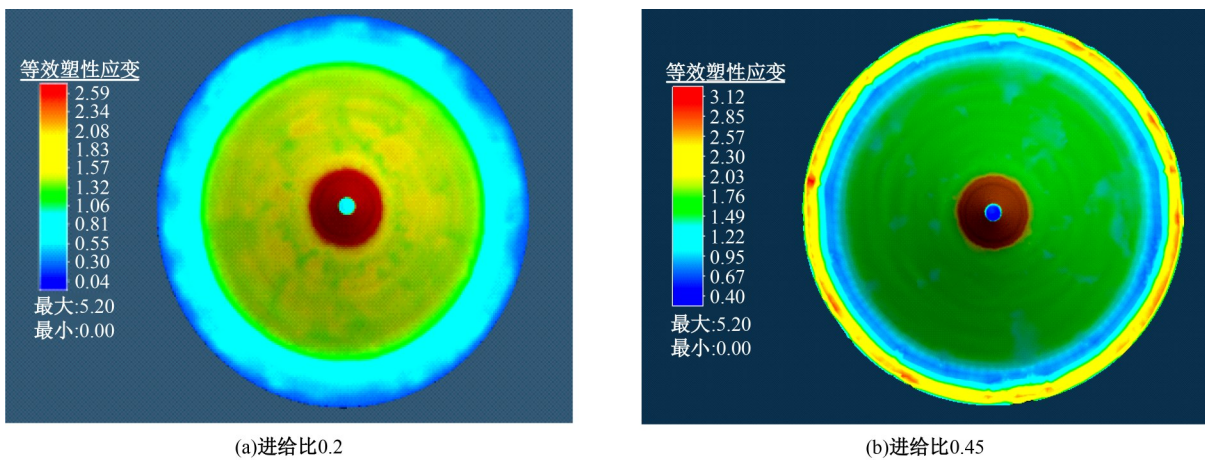


图 13 应变云图(成形状态 95%)

Fig. 13 Strain cloud map(Forming state 95%)

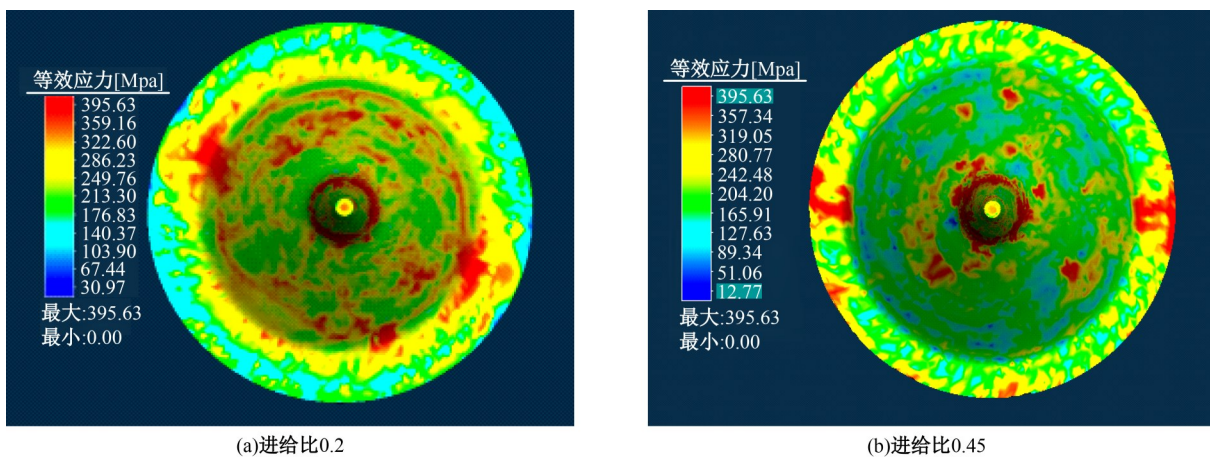


图 14 应力云图(成形状态 95%)

Fig. 14 Stress cloud map(Forming state 95%)

出等效应力、等效塑性应变分布曲线图如图 15、图 16 所示。分析旋轮安装角、旋轮工作圆角半径、进给率等工艺参数在旋压过程中对其应力、应

变的影响。

从等效应力与等效塑性应变云图中可以看出:一方面从旋压过程来看,旋轮圆角与板料接触

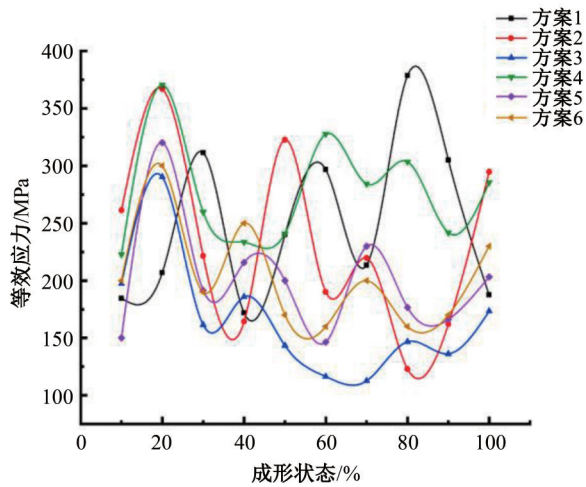


图 15 等效应力分布图

Fig. 15 Equivalent force distribution

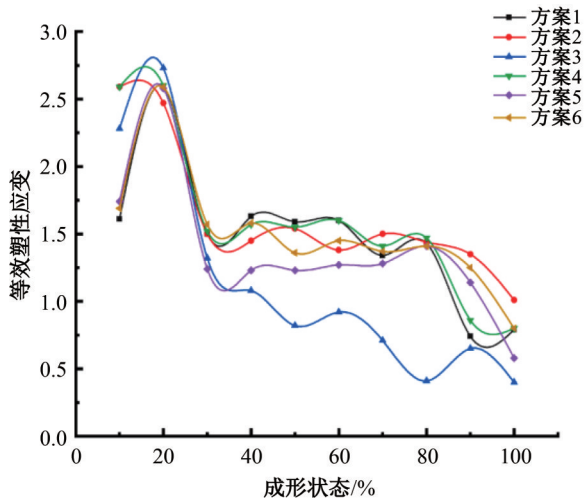


图 16 等效塑性应变分布图

Fig. 16 Equivalent plastic strain distribution

位置始终为等效应力极大值区域,随着旋轮进给等效应力极大值区域也随之变动,而且已成形部分也有等效应力值较大区域。这是因为旋轮在旋压过程中对已成形部分的金属也有拉伸作用。另一方面,从整体旋压结果来看,在旋压件前端区域(成形状态 10% 之前)与双锥角圆弧过渡区域(成形状态 20% 附近)的等效应力值较大。主要原因有两种:第一种是因为前端坯料厚度大,导致强力旋压过程中减薄尺寸较大,从而等效应力值较大;第二种是因为在双锥角圆弧过渡区域,旋轮与芯模之间间隙发生变化,旋轮更接近芯模且减薄尺寸增加,从而等效应力值增大。等效塑性应变呈环状带分布,在旋压开始阶段到双锥角圆弧过渡区域,旋轮附近板坯为大变形区域,所以其等效塑性应变值较大,在后续旋压过程中等效塑性应变值逐渐变小且较平稳。

通过以上图表数据及曲线变化可以看出,当主轴转速为 220 r/min、进给比为 0.3 mm/r、旋轮安装角为 60°、旋轮工作圆角半径 $R=10$ mm 时的应力应变值较小且变化趋势较为平稳,对于成形精度控制上更有利,能够为实际旋压加工提供理论依据。

3 旋压加工实验验证

通过仿真模拟的结果进行相应的实际旋压加工,旋轮安装角 60°、进给比 0.3 mm/r、主轴转速 220 r/min、纵向进给速度 66 mm/min,旋轮圆角半径 10 mm,得到如图 17 所示的实验样件。旋压件表面无明显缺陷,表面光滑完整,有明显的旋压纹路。对其他方案进行相应的实际旋压加工并且得到如图 18 所示的实验样件,其中图 18(a)(b)(c)3 个实验样件,内表面有明显的粗糙感,压下量不够且贴膜质量低导致旋压丢转,所以坯料底部旋透了;(d)实验样件由于进给比较小,旋压丢转所以表面有波纹状纹路。

金属材料在塑性成形过程中材料具有一定的回弹量,并且旋轮与芯模也会发生微小的弹性形变,所以在试验中旋轮与芯模之间的间隙值不等于旋压件的壁厚;铜合金的回弹量较小,所以在进行强力旋压成形时回弹量小于退让量,可忽略不计。通过实际测量的方法调整设备系统的间隙,旋压后再测量旋压件的壁厚,间隙值为理论值的 90%~95%。本试验中给定旋轮与芯模之间的间隙值为理论值的 90%。旋压件的理论壁厚为 2.8、2.6 mm,实际预留间隙值为 2.52、2.34 mm。



图 17 合格旋压实验样件

Fig. 17 Qualified spin test specimen



图 18 不合格旋压实验样件

Fig. 18 Unqualified spin test specimen

在旋压工艺实验完成后,对合格的实验样件进行壁厚尺寸测量,在选取均布规则的 4 条母线基础上,对母线进行等分取点并用仪器测量壁厚,实验数据如表 3 所示。

试验结果:壁厚精度要求 $2.8_0^{+0.1}$ 、 $2.6_0^{+0.1}$ mm,旋压后,所有测量点的壁厚值都达到精度要求,尺寸精度符合要求。

表 3 合格工件壁厚尺寸测量结果

Table 3 Qualified work-piece wall thickness dimension measurement results

等分点	壁厚/mm			
	第 1 条 母线	第 2 条 母线	第 3 条 母线	第 4 条 母线
1	2.84	2.85	2.83	2.84
2	2.86	2.87	2.85	2.87
3	2.80	2.83	2.84	2.86
4	2.83	2.82	2.80	2.83
5	2.75	2.73	2.74	2.75
6	2.73	2.77	2.75	2.71
7	2.64	2.66	2.65	2.68
8	2.66	2.66	2.66	2.62
9	2.68	2.67	2.63	2.65
10	2.61	2.60	2.63	2.64
前端壁厚差	0.06	0.05	0.05	0.04
后端壁厚差	0.07	0.07	0.03	0.06

4 结束语

通过 Simufact/Ansys 三维有限元仿真平台建立双锥形铜合金药型罩有限元模型,接着对毛坯板料进行网格划分和设定材料属性,设计了以旋轮安装角、旋轮圆角半径和旋轮进给比 3 种工艺参数为研究对象的 6 组试验方案进行旋压仿真数值模拟。通过对旋压后应力应变进行分析,得出

旋轮安装角、旋轮圆角半径及进给比对应力场、应变场的影响规律,从应力、应变云图中看出,旋轮圆角与板料接触位置始终为等效应力极大值区域,还可以看出在旋压件前端区域(成形状态 10% 之前)与双锥角圆弧过渡区域(成形状态 20% 附近)的等效应力值较大。从整体仿真结果可以看出,方案 3 等效应力及等效塑性应变值较小且变化趋势较为平稳,最终得出铜合金药型罩旋压成形数值模拟的最优参数组合:旋轮安装角为 60° 、旋轮圆角半径 $R=10$ mm、进给比为 0.3 mm/r。以上述旋压模拟仿真结果为理论依据进行 5 次旋压工艺实验,所得最终实验结果达到技术指标。同时也验证了通过有限元模拟仿真的方法得到的工艺参数,可以作为实际旋压成形加工的重要参考。

参考文献:

[1] 徐恒秋,樊桂森,张锐,等. 旋压设备及工艺技术的应用与发展[J]. 新技术新工艺, 2007, 230(2): 1, 6-8.
 Xu Heng-qiu, Fan Gui-sen, Zhang Rui, et al. The application and development of spinning equipment and technology[J]. New Technology&New Process, 2007, 230(2): 1, 6-8.

[2] Huang C C, Hung J C, Hung C H, et al. Finite element analysis on neck-spinning process of tube at elevated temperature[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2011, 56: 1039-1048.

[3] 张全孝,姚懂,曹连忠,等. 钨铜 EFP 药型罩的制备及成形性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 154-158.
 Zhang Quan-xiao, Yao Dong, Cao Lian-zhong, et al. Preparation and formability of tungsten-copper

- EFP liner[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(3): 154-158.
- [4] 张晋辉,牛婷,温凯,等. 铝合金锥形件强旋壁厚与旋压力分布研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(8): 245-249.
- Zhang Jin-hui, Niu Ting, Wen Kai, et al. Research on distribution of wall thickness and spinning force on power spinning for aluminum alloy conical parts[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 245-249.
- [5] 夏琴香,张帅斌,吴小瑜,等. 锥形件单道次拉深旋压成形的数值模拟及试验研究[J]. *锻压技术*, 2010, 35(1): 52-56.
- Xia Qin-xiang, Zhang Shuai-bin, Wu Xiao-yu, et al. Numerical simulation and experimental investigation on one-path deep drawing spinning of conical part [J]. *Forging&Stamping Technology*, 2010, 35(1): 52-56.
- [6] Mori K, Ishiguro M, Isomura Y. Hot shear spinning of cast aluminium alloy parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(7): 3621-3627.
- [7] Li Y, Wang J, Lu G D, et al. A numerical study of the effects of roller paths on dimensional precision in die-less spinning of sheet metal[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2014, 15(6): 432-446.
- [8] 李灵凤. 变壁厚锥形件强力旋压过程有限元力学模型的建立[J]. *锻压装备与制造技术*, 2006(1): 64-66.
- Li Ling-feng. FEM mechanics modelling of power spinning process of varying thickness conical parts[J]. *China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology*, 2006(1): 64-66.
- [9] 徐银丽,詹梅,杨合,等. 锥形件变薄旋压回弹的三维有限元分析[J]. *材料科学与工艺*, 2008, 16(2): 167-171.
- Xu Yin-li, Zhan Mei, Yang He, et al. Springback law analysis of cone spinning using 3D FEM[J]. *Materials Science and Technology*, 2008, 16(2): 167-171.
- [10] 吴统超,詹梅,古创国,等. 大型复杂薄壁壳体第一道次旋压成形质量分析[J]. *材料科学与工艺*, 2011, 19(1): 126-131.
- Wu Tong-Chao, Zhan Mei, Gu Chuang-guo, et al. Forming quality of the first pass spinning of large-sized complicated thin-walled shell[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 19(1): 126-131.
- [11] Childerhouse T, Long H. Processing maps for wrinkle free and quality enhanced parts by shear spinning [J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 29: 137-144.
- [12] 陆栋,张乐,蒲世翱,等. 304不锈钢锥形件旋压成形工艺参数对损伤的影响[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(11): 162-165.
- Lu Dong, Zhang Le, Pu Shi-ao, et al. Effect of process parameters on damage during spinning forming of 304 stainless steel conical parts[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(11): 162-165.
- [13] 陈建华,马飞,任顺奎,等. 大直径薄壁铝合金封头剪切旋压成形缺陷分析[J]. *精密成形工程*, 2016, 8(2): 64-67.
- Chen Jian-hua, Ma Fei, Ren Shun-kui, et al. Defect analysis of shear spinning of aluminum alloy thin-walled head with large diameter[J]. *Journal of Net-shape Forming Engineering*, 2016, 8(2): 64-67.