

---

## 摘要

本课题的研究目的是基于 CAE 强力旋压成形工艺参数对药型罩形状的影响。应用有限元数值模拟的方法，对药型罩强力旋压成形过程进行模拟仿真。根据模拟分析的需要，设计出强力旋压成形用到的模具和坯料，并建立三维有限元模型来进行成形模拟仿真。通过对比分析的方法得出不同工艺参数对成形的影响，并确定出旋压所需的最佳工艺参数。在最佳工艺参数下，将一个4mm 厚的毛坯通过两次强力旋压成形，最终得到一个1.8mm 厚的药形罩，并对成形过程中的应力应变云图的分布规律和载荷时间曲线的变化趋势进行了详细的分析，得出以CAE 有限元软件对药形罩强力旋压成形的模拟是可行的。

**关键词：**药型罩；强力旋压；数值模拟；工艺参数

---

## **Abstract**

The purpose of this research is to study the influence of the parameters of the CAE spinning forming process on the shape of the liner. By using the finite element numerical simulation method, the simulation of the forming process of the liner is simulated. According to the need of simulation analysis, the mould and billet used in the spinning process were designed, and the 3D finite element model was established to simulate the forming process. The influence of different process parameters on the forming process was obtained by the comparison and analysis, and the optimum process parameters were determined. Under the optimum process parameters, a 4mm thick blank by two powerful spinning, finally get a 1.8 mm thick drug shaped cover, and the forming process should be the trend of stress and strain nephogram distribution and load time curve were analyzed in detail.

**Key words:**liner;numerical simulation;process parameters

---

## 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 旋压发展与概述 .....	1
1.2.1 旋压的定义 .....	1
1.2.2 旋压的分类和特点 .....	2
1.2.3 国内外研究现状及发展趋势 .....	3
1.2.4 旋压的应用领域 .....	4
1.3 选题背景和意义 .....	5
1.4 本文研究内容 .....	5
1.5 本章小结 .....	错误!未定义书签。
<b>2 药型罩强力旋压及有限元理论基础</b> .....	6
2.1 有限元法简介 .....	6
2.2 药型罩强力旋压基本理论 .....	7
2.2.1 旋压原理及受力分析 .....	7
2.2.2 坯料变形特征 .....	8
2.2.3 正弦规律 .....	8
2.2.4 正弦偏离率 .....	9
2.3 刚塑性有限元法理论基础 .....	10
2.3.1 刚塑性有限元法特点 .....	10
2.3.2 刚塑性材料基本假设 .....	11
2.3.3 刚塑性体塑性力学基本方程及边界条件 .....	11
2.4 本章小结 .....	13
<b>3 药型罩强力旋压的建模与仿真</b> .....	14
3.1 DEFORM 软件平台简介 .....	14
3.2 药型罩强力旋压三维有限元模型的建立 .....	14
3.2.1 坯料的设计 .....	14
3.2.2 旋轮的设计 .....	14
3.2.3 芯模的设计 .....	15

---

3.2.4	尾顶的设计 .....	16
3.2.5	模具的装配 .....	16
3.3	药型罩强力旋压成形仿真 .....	17
3.3.1	材料模型的选则 .....	17
3.3.2	网格的划分 .....	17
3.3.3	旋压模拟时运动方式的确定 .....	19
3.3.4	摩擦系数设置 .....	19
3.3.4	控制步数的设定 .....	20
3.4	本章小结 .....	20
4	强力旋压模拟结果与分析 .....	21
4.1	工艺参数的影响 .....	21
4.1.1	减薄率对成形的影响 .....	21
4.1.2	偏离率对成形的影响 .....	22
4.1.3	进给速度对壁厚偏差的影响 .....	23
4.1.4	芯模圆角半径对成形的影响 .....	24
4.2	应力场分析 .....	26
4.3	应变场分析 .....	30
4.4	载荷时间曲线分析 .....	34
5	结论 .....	37
	致谢 .....	38
	参考文献 .....	39
	附录 A .....	41
	附录 B .....	46

# 1 绪论

## 1.1 引言

药型罩是破甲弹和反坦克火箭弹的重要性能件，通过成型装药的聚能效应压垮药型罩，形成一束高速的金属射流来击穿装甲<sup>1</sup>。目前生产药型罩的方法通常有冷冲压和强力旋压的方法。经过冷冲压成形得到的药型罩具有生产效率高，并且质量稳定等优点而被工厂普遍应用，已经成为了一种工艺比较成熟、质量相对比较稳定的加工方法。与冷冲压得到的药型罩相比，经过强力旋压加工成形的药型罩，具有高精度、壁厚均匀、机械性能好、生产工艺简化等优点<sup>2</sup>，而被目前广泛采用。

本章简要介绍了旋压的定义、旋压的分类和旋压的特点、国内外发展现状、应用领域以及选题背景和意义，在此基础上确定了本文的研究方法和主要的研究内容。

## 1.2 旋压发展与概述

### 1.2.1 旋压的定义

旋压就是使用旋压工具对高速旋转的坯料施加相应压力，使之产生逐点连续的塑性变形而得到所需要的空心回转体零件的一种塑性加工方法<sup>3-8</sup>。旋压时，将金属平板毛坯或者是预制毛坯卡紧在数控机床旋压机的芯模上，使坯料在芯模和尾顶夹持下随机床主轴一起转动，旋轮沿着芯模母线的方向做进给运动，进而能够获得我们所需要的形状和所需要尺寸的制品。具体旋压生产示意图如图1.1所示。

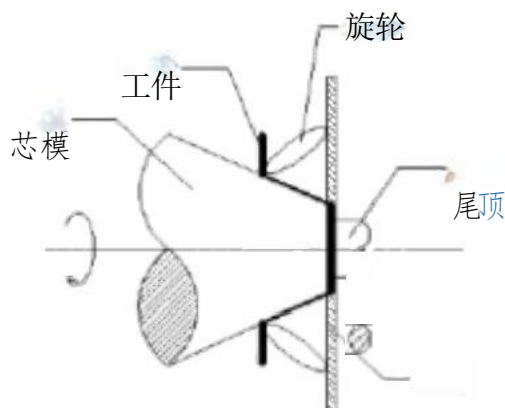


图1.1 旋压示意图

### 1.2.2 旋压的分类和特点

根据坯料在成形过程中壁厚的变化情况，将旋压类型分为普通旋压和强力旋压(变薄旋压)，又称为普旋和强旋。

普通旋压主要是改变坯料的形状，坯料的壁厚几乎不变或者变化很少。这类旋压主要是将坯料的直径尺寸进行改变来成形工件，通过旋轮对转动的坯料进给运动来实现薄壁回转体的无切削成形工艺。普旋在变形过程中的特征是金属毛坯产生直径上的扩张和收缩，这样带来的壁部厚度变化认为是从属；根据在旋压成形过程中温度的不同，普通旋压又可以分为冷旋压和热旋压。冷旋压就是室温条件下旋压，通常室温旋压经常用于那些延展性好，还有一些用于在加工的时候硬化指数很低的一些材料。像我们常用的一些材料有纯铝、铜、金、银等。热旋压通常能旋压一些塑性低的材料、硬化指数高的材料，还有当机床能力不足的时候都可以采用热旋压，像铝-镁合金、钛合金等。然而在生产中发现坯料直径上的变化非常容易导致失稳或者是局部减薄，因此普通旋压的过程通常是分为多道次进给逐步实现的。多道次普旋示意图如图1.2所示。

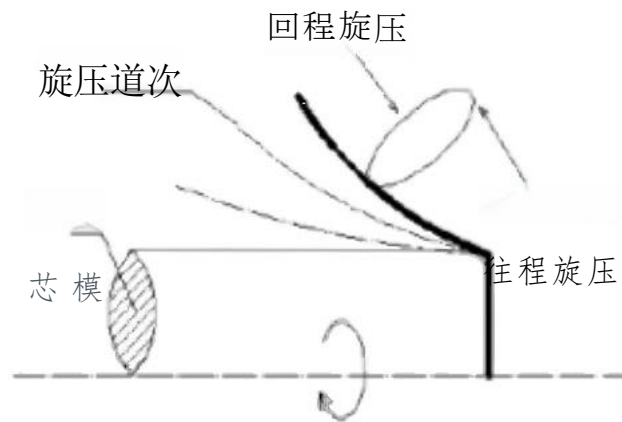


图1.2多道次普选示意图

强力旋压又被称为变薄旋压，是指在成形过程中坯料的厚度和坯料的形状同时改变的旋压成形过程。强力旋压和普通旋压相比最大的区别是强力旋压是体积成形范畴，在强力旋压成形过程中虽然坯料的壁厚变薄，但是坯料的体积几乎不变，得到的成品形状由芯模的形状尺寸来决定。由于在强力旋压过程中，坯料的壁厚减小，所以导致旋压的

---

面积变大，故而压应力是其应力状态中起最主要作用的。而且强力旋压可以在一次旋压中有较大的减薄量，所以强力旋压在生产效率明显强于普通旋压。根据旋压时旋压件的种类和材料变形时候原理的不同，强力旋压又可以分为筒形件流动强力旋压和异形件剪切强力旋压。筒形流动旋压适用条件是一些带底和不带底的筒形件，主要是用来使管状

形状的壁厚得到缩减。异形剪切旋压常用于具有锥形、抛物线形、喇叭形以及各种曲母线形状工件的成形。根据旋压时金属的流动方向强力旋压又可分为正旋和反旋。本文研究的是等壁厚单锥药型罩属于锥形件，因此采用剪切旋压即强力旋压方式来成形，并且金属材料流动方向为正向。如图1.3所示。

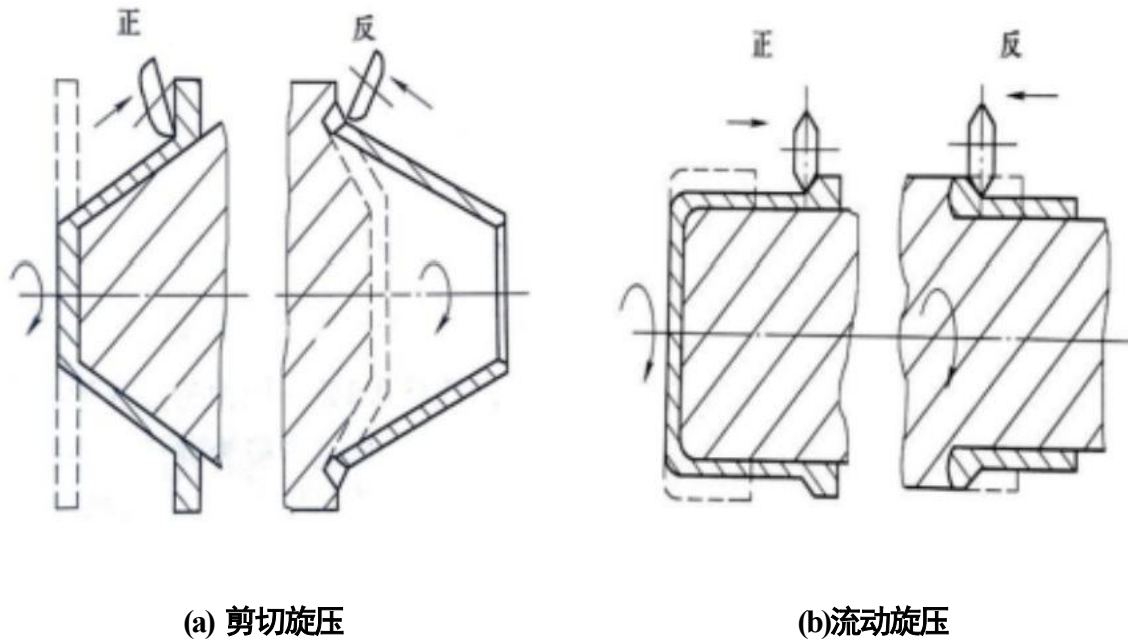


图1.3变薄旋压的正向旋压与反向旋压

### 1.2.3 国内外研究现状及发展趋势

目前国内主要有一些重点高校和科研院所利用有限元软件进行旋压成形这方面的相关研究。以西北工业大学、哈尔滨工业大学、北京有色金属研究所等单位最为代表。杨合等<sup>10</sup>借助于 ABAQUS 软件以带横向内筋的铝合金薄壁壳体为研究对象，通过数值模拟和旋压试验相结合的方法研究了在不同工艺的条件下的大型复杂薄壁壳体在成形过程中的决定性影响因素，确定了该工艺中合理的工艺参数。徐银丽等<sup>11</sup>通过动态显示计算成形、静态隐式计算回弹的方法分析了在成形模拟仿真过程中芯模转速、旋轮进给率分别对锥形件强力旋压在回弹前后等效应力、等效应变和壁部厚度的影响规律，得出了锥形件在回弹前后塑性应变和壁部厚度基本不发生改变，但等效应力差随着芯模转速增大和旋轮进给率减小而减小这一结论。马明娟等<sup>12</sup>通过ABAQUS/Explicit 有限元软件模拟仿真，通过控制坯料局部厚度、控制旋轮与芯模的间隙解决了在强力旋压过程的中后期旋轮前方出现金属堆积导致坯料旋压时被过渡拉薄这一缺陷。高西成等<sup>13</sup>通过 LS-DYNA3D 软件里面的动态显示模块，模拟了薄壁筒形件在收口旋压时的成形，分析



---

了在成形过程中毛坯的周向应变和毛坯壁部厚度变化规律。江树勇等<sup>14</sup>在塑性屈服准则定理下，通过分析了筒形件在强力旋压逐点塑性成形过程中坯料与旋轮的周向接触区和成形区前方的应力、应变分布，研究了带有内筋的筒形件在强力旋压过程中的成形机理。夏琴香等<sup>15</sup>通过MARC 和 ANSYS 有限元软件进行模拟仿真，然后跟实验相结合的方法基于三维非轴对称倾斜管、直管件的缩口阶段进行强力旋压过程研究。华南理工大学的学者基于筒形件的缩径旋压工艺通过ANSYS有限元软件，建立了三旋轮强力旋压有限元模型，分析了在成形过程中坯料的应力和应变的分布规律，主要研究了在强力旋压开始时，旋轮与坯料接触处附近存在局部变薄，在口部存在扩径现象的两种缺陷进行分析发现造成变薄的主要原因是受到的约束不够和弹性变形量过大<sup>6</sup>。以李克智为代表的燕山大学的学者通过DEFORM-3D有限元软件，对铝合金汽车的轮毂和筒形件进行模拟仿真研究，得出了工作角、减薄率、进给率、毛坯原始厚度、旋轮圆角半径等为影响旋压成形工艺的参数<sup>[17-19]</sup>。韩志仁等<sup>2</sup>采用有限元程序LS-DYNA3D对筒形件内旋压工艺进行了模拟仿真研究，通过对变形区的应力应变分布进行分析，得出了工艺参数不合理是内表面产生裂纹主要原因的结论。

国外的有限元旋压技术已日臻完善。在有限元强力旋压理论研究、有限元与生产设备相结合等已有相当规模的积累<sup>[20-23]</sup>。日本旋压技术以葉山益次郎为代表，基于大量的旋压实验揭示了普通旋压成形机理<sup>24</sup>。其中叶林基于纯剪切变形模型和三向扎压变形模型<sup>25</sup>。卡尔巴克赛格格<sup>126</sup>和阿维佐<sup>[271]</sup>两位学者分别采用理论解析和实验结合的方法研究了强力旋压过程中金属的变形规律，进一步认识了金属的流动规律及产品性能，通过坐标网格法、填孔法等实验方法得出了旋压过程中坯料沿着轴向有相当少量的流动，整个旋压过程可以近似默认为只发生剪切变形。

#### 1.2.4 旋压的应用领域

旋压技术在国防建设中得到了广泛的应用。旋压成形弥补了导弹、火箭等方面在卷焊大直径薄壁壳体在焊接时，焊缝容易出现脆裂和应力集中等不足。例如大型火箭壳体在应用旋压成形这一技术之后能保证成形之后整体没有缝隙。雷达的天线反射面能通过普旋成形。最熟知的发动机的燃烧室可以通过变薄旋压来成形。还有制导的导弹里面的舱锥形件等都可以采用剪切旋压来成形<sup>128]</sup>。

旋压技术在民用方面也有广泛的应用，尤其是在民品和机械制造等方面用的更为广泛。铁路、石化、冶金建筑、城市公用设施等这些行业中都离不开旋压技术。轿车的铝

---

制轮和大客车的钢制轮经过变薄旋压技术成形之后能实现车轮的等强度要求，旋压能达到延长车轮寿命、减重、省油、并且能提高承载能力的好处。尤其是整体铝制轮在成形的时候采用了锻坯经劈开式旋压与变薄旋压还有普通旋压这三种旋压工艺的组合，使其有广阔的应用前景。在日常生活中会发现许多民品都是来自旋压成形技术，像不锈钢的保温瓶，照明器中的各种灯罩等。我们的生活简直离不开旋压制品。

### 1.3 选题背景和意义

药型罩是破甲弹和反坦克火箭弹的重要性能件，其破甲性能除与药型罩的结构形状、尺寸等有关外，还与药型罩材料、制造方法及加工质量有直接关系。强力旋压是大量生产药型罩的一种最主要加工方法，它可以对不同锥角的单锥、双锥、喇叭及曲线等各种复杂形状的药型罩进行加工。旋压后的药型罩，对低速旋转的弹丸具有一定的抗旋补偿作用，给破甲带来一定的好处<sup>291</sup>。近年来逐渐取代了其他加工方法。强力旋压是目前加工药型罩的最有效方法，是一种无切削或少切削的压力加工方式，得到的旋压件的尺寸精度不逊色于切削加工，而且在材料利用率和力学性能都优于机械加工。强力旋压时，坯料会发生塑性变形，由于受力状态好，所以瞬间内发生塑性变形的区域会很小。由于逐点受压变形，故显示出较高的塑性和较大的变形比。因此，对塑性较低、难以变形的金属材料更显示出其优越性。强力旋压加工工艺流程短，工艺装置简单，并且材料利用率高，产品成本低。旋压加工还有自检作用。旋压过程中逐点成型时，将会对毛坯材料中存在的细小裂纹、夹杂等破坏金属连续性的疵病扩大和暴露，因此对旋压成型件的材料起到了自检作用，保证了产品质量的可靠性。

本课题采用强力旋压对单锥药型罩进行工艺试验，并与有限元模拟仿真技术相结合，通过对比试验确定出不同工艺参数对成形的影响，这对实际生产中具有重要的作用，通过有限元技术能够提前预防和解决药型罩在工厂实际生产中可能出现的一些缺陷。因此本文的研究具有重要的理论研究价值和应用价值。

### 1.4 本文研究内容

- (1) 药型罩强力旋压成形工艺方案设计。
- (2) 利用PRO/E 软件建立药型罩强力旋压所需模具和坯料的三维有限元模型。
- (3) 设置合理的参数进行模拟运算。
- (4) 分析不同参数对旋压成形的影响，并确定出最佳工艺参数。

---

(5) 在最佳参数下得到的药形型罩，进行应力、应变、载荷分析。

---

## 2 药型罩强力旋压及有限元理论基础

### 2.1 有限元法简介

有限元方法最早是由Turner 和 Clough 等人<sup>30</sup>在研究飞机结构力学时提出的研究方法，但是当时因为这种方法是通过矩阵位移法推广到弹性力学平面，所以当时不叫有限元法，被称为直接刚度法。有限元法是后来Clough 正式命名的。早期的有限元法都是以虚功原理和最小势能原理为基础建立的，随着各国学者对有限元法认识的不断加深，有限元法的基本理论和才发展成熟，后来各国学者们渐渐的将研究方向放在板壳单元和高精度单元，还有非线性问题的迭代求解方法上。这些都适用于新型材料的有限元方法上、多尺度有限元方法上、多场耦合等问题的研究上。

有限元方法在本质上其实就是求解微分方程组近似解答的方法，它的核心思想就是离散，其实就是将连续的结构体都先假想成有限数目的单元组合体，然后对每一个单元体都进行物理性质的分析，将每一个单元体都分析完之后最后再将这些离散的单元全部组合起来，重新得到原来连续体的最相近的结构，最终得到我们所需要的近似的结果。由于有限元方法步骤统一、思想简单，能通过计算机编程对各种力学问题给以统一的步骤处理，再加上计算机运算速度的增加，不到十年时间就开发出了适用于各类行业问题的商业软件。例如有限元法可以虚拟汽车的碰撞试验、水下爆炸试验等。在产品实物试验前，先通过有限元对这些过程进行虚拟试验。通过有限元的虚拟在实物试验前就能提前发现问题，然后通过优化设计确定合理的方案。这样一来能减少实物试验，不仅能降低成本还能降低产品生产周期。

本次所做的是基于CAE 的药型罩的强力旋压工艺设计，实际上是金属的塑性成形过程，这是一个非常复杂的过程。只有通过有限元技术才能观察变形过程中的晶粒生长演化和位错运动。这个过程是一个强烈的非线性过程，不仅包括材料的非线性，也就是所说的应力和应变之间不再是线性的，还有几何非线性和边界非线性。其中几何非线性是指在变形较大时，此时应变和位移不再是线性的；边界非线性是指像摩擦和接触边界这些边界条件在随着物体的运动而发生变化。此次药型罩强力旋压塑性成形是以刚塑性变形理论为基础进行研究。

---

## 2.2 药型罩强力旋压基本理论

### 2.2.1 旋压原理及受力分析

药型罩的强力旋压原理：用尾顶把毛坯压紧在芯模的端面上，使毛坯跟随芯模绕着机床的轴线一同旋转。在液压的作用下，旋轮沿靠着模板移动，旋压时旋轮与芯模之间保持一定的空隙，用以保证足够的压力辊轧坯料，使毛坯沿着轴向方向逐点一次成型。在旋压的时候，因为旋轮跟坯料的接触面积比较小，所以用很小的变形压力就能够获得较大的金属变形。

药型罩在强力旋压的条件下，受力可以为如下的三个力：沿着圆周方向的切应力 $F_t$ ，沿着芯模母线方向的拉应力 $F_r$ ，垂直药型罩罩壁的压应力 $F_z$ 。由于本次采用板料直接旋压，所以根据小林公式可以推导出这三向分应力之间的关系如下：

$$F_t = c \frac{1}{\sqrt{3}} t_0 \bar{R} \cos \alpha \quad (2.1)$$

$$F_r = F_t \frac{S_r}{S_t} \quad (2.2)$$

$$F_z = F_t \frac{S_z}{S_t} \quad (2.3)$$

式中  $t_0$ ——材料厚度；

$f$ ——旋压进给量；

$\bar{R}$ ——材料的平均应力；在此处键入公式。

$\alpha$ ——药型罩半锥角；

$c$ ——修正系数(通常取 $c \geq 1.5$ )；

---

S——旋轮与坯料接触面积在径向的投影面积；

S<sub>1</sub>——旋轮与坯料接触面积在切向的投影面积

；

S<sub>2</sub>——旋轮与坯料接触面积在轴向的投影面积

。 如果采用预制件进行强力旋压时：

$$F_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} t_0 \sqrt{R} (\cos \alpha - \sin \alpha \cot \alpha_0) \quad (2.4)$$

式中  $\alpha_0$ ——预制件半锥角。

从(2.4)式中可以看出：当 $\alpha$ 已经确定时，影响三向分应力的主要参数仅为坯料的厚度 $t_0$ 和进给量 $f$ 。

### 2.2.2 坯料变形特征

药型罩属于锥形件，在剪切旋压过程中，平板坯料在旋轮的挤压和剪切的综合作用下，厚度方向始终遵循体积不变定律和正弦规律，在这两个规律下变形，最终通过预定的减薄率得到我们想要的圆锥体。药型罩在变薄剪切旋压时，始终不改变毛坯的外径而仅仅改变毛坯的厚度。坯料在变形过程中分为三个区域未成形区1、成形区2和已成形区3这三个区域，如图1所示，其中未成形区是工件的凸缘，又被称为工件的法兰。凸缘、成形区、已成形区这三个区域相互联系，其中成形区为接触区，在变形的时候凸缘金属产生附加变形，凸缘金属产生的附加变形反过来又会作用于接触区，并且接触区产生的附加变形又会影响到已成形区

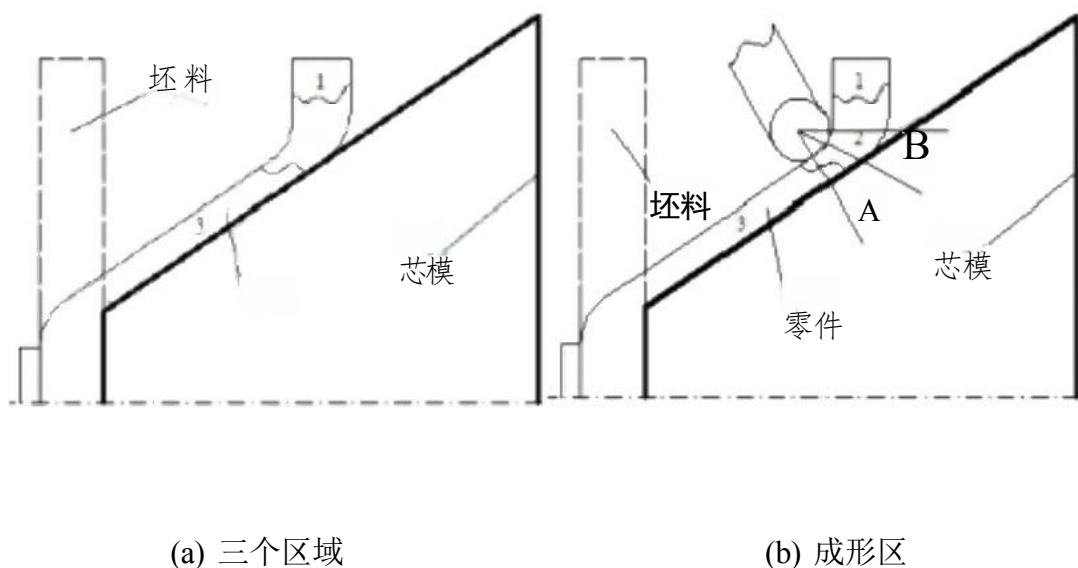


图2.1剪切旋压变形特征示意图

### 2.2.3 正弦规律

药型罩在变薄旋压时最典型的特征就是随着坯料厚度的减薄，坯料的外径不发生任何变化。也就是说在药型罩旋压成形过程中，坯料上的任何一点无论在什么时候到坯料

---

的中心距离都是不变的，我们把这一规律称为正弦规律。并且在剪切旋压时坯料的厚度 遵循下式：

$$=t\sin\alpha \quad (2.5)$$



在上式中， $t_1$  为制件的壁厚，即本篇文章中药型罩的理论壁厚， $t_0$  为坯料的厚度， $\alpha$  为芯模的半锥角。如下图2.2所示，显而易见坯料中的材料只发生轴向的位移，而工件的径向外径和坯料始终保持一致。在图中可以发现矩形坯料abcd的面积和a'b'c'd'的面积相等，根据直角三角形bce，通过勾股定理可以求得上式。

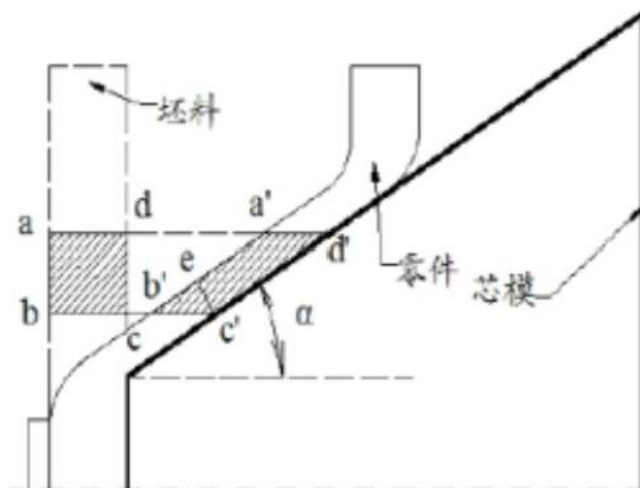


图2.2坯料变形示意图

在实际生产过程中，由于误差、零件的回弹等因素导致强力旋压成形过程并不能完全得遵循正弦规律。因此，下面需要引出一个新的规律，即正弦偏离率。

#### 2.2.4 正弦偏离率

正弦偏离率是在正弦规律中衍生出的一个概念。当锥形件剪切旋压时，正弦偏离率为工件实际壁厚 $t_1$ 对理论壁厚 $t$ 的偏差程度，用 $\Delta t$ 表示；即：

$$\Delta t = (1 - t_1/t) \quad (2.6)$$

正弦偏离率 $\Delta t$ 分为三种情况：

当 $\Delta t=0$ 时，此时称为零偏离，这时候的旋压规律恰好满足正弦规律，是最理想的剪切变形状态，得出的工件最符合标准。在零偏离时凸缘始终保持平直的状态，旋压件在变形上呈现出对称分布，而且已成形区的中间层的金属变形是相等的，中间层变形大于内外的两侧，并且会发现内外两侧的金属在变形上也是对称相等的[32]：

---

当 $\Delta > 0$ 时，此时称为正偏离，这时候工件的实际壁厚大于理论壁厚，工件会有附加拉伸变形，未成形区部分容易发生倾斜，导致后果是未成形区的内外侧金属变形不相同，在径向处的应变呈现出外径应变大内径应变小，导致未成形区从外侧到内测拉入锥体的

金属越来越少，已成形区的锥体部分则需要承受拉入多余的金属，应变从外侧到内侧逐渐减小。正偏离时，工件的尺寸精度降低，工件的可旋性也降低，并且未成形区容易起皱。

当 $\Delta I < 0$ 时，此时称为负偏离，这时候工件的实际壁厚小于理论壁厚，工件有附加轧压变形，旋压力会急剧增加，材料的可旋性虽然得到改善，但是旋轮前方容易出现金属的堆积。当成形产生负偏离时，会导致已成形区的锥体壁厚出现过量减薄的现象，始多余的金属被挤入未成形区，这样一来，未成形区的金属受到变形压缩的影响会导致失稳倾斜。在负偏离状态下，锥体和未成形区的径向应变都会外侧大于内侧。

正弦偏离率三种情况示意图如下：

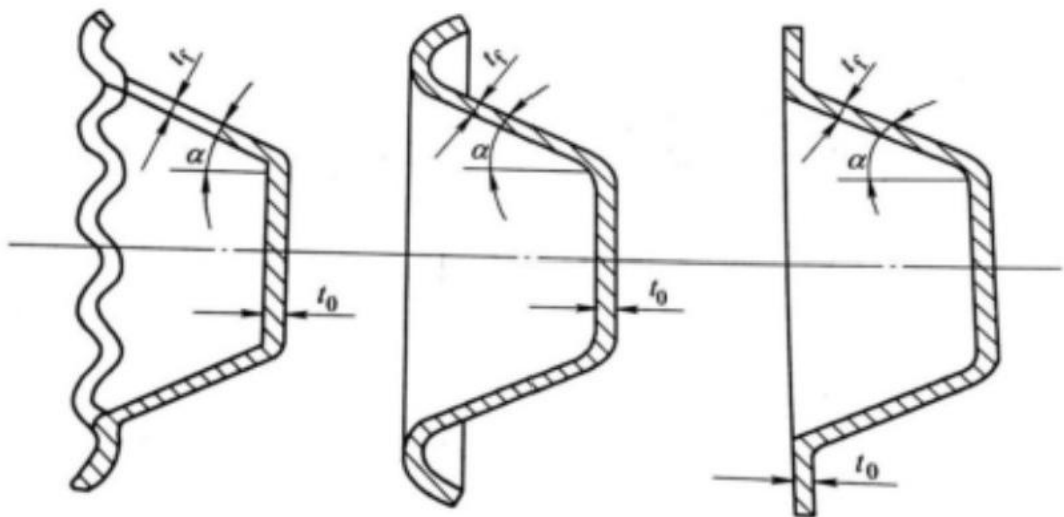


图2.3锥形剪切旋压偏离率的三种情况

## 2.3 刚塑性有限元法理论基础

### 2.3.1 刚塑性有限元法特点

刚塑性有限元法是在1973年才被Lee C H和S.Kobayshi 提出来，这种方法的理论基础是变分原理，根据小应变的位移关系，最主要的是这种方法忽略了变形体在塑性变形阶段时的弹性变形，不用考虑回弹的问题，这种方法与以往方法不同之处还在于它考虑了材料在塑性变形阶段时候的体积不变条件，所以可以用来计算大变形的一些问题。

---

这种方法在变分原理的基础上，通过引入流函数法、Lagrange乘子法、罚函数法、Poisson 系数 $\nu$  接近0.5法、材料可压缩性法等方法可以建立不同的约束方法。这种方法与弹塑

---

性有限元方法相比，在求解的过程中不要求单元的逐步屈服问题，而且没有应力的累积误差，所以这种方法的优点就体现出来了，可以通过数目较少的单元来求解大变形量的问题。用刚塑性有限元法再求解问题时，相比弹塑性有限元法在计算量和处理问题复杂程度这些方面要简单容易得多。并且使用刚塑性有限元模型可以大大减少有限元方程列式和求解过程。因为刚塑性有限元法在计算时不是采用应变位移方程，而是采用速率方程，所以避开了应变与位移之间的几何非线性问题[331]。

但是，正是因为刚塑性有限元法的这种简化思想，忽略弹性变形，所以刚塑性有限元法这种方法仅适用于对塑性变形区的分析，不能分析弹性变形区的应力状态，所以这种方法不能够解决卸载问题和残余应力、残余应变等问题。本文药型罩强力旋压成形属于逐点塑性成形，由于材料的回弹对成形的影响较大，故不适用弹塑性材料，而刚塑性有限元法恰好适用于本文研究内容。

### 2.3.2 刚塑性材料基本假设

实际上，金属在塑性成形过程时，金属的弹性变形阶段永远小于塑性变形阶段，往往将弹性变形阶段忽略掉。尤其是强力旋压过程，药型罩的强力旋压过程属于逐点塑性成形，弹性变形阶段可以忽略不计，所以这里将材料模型直接简化为刚塑性模型，并且为了方便数学上处理计算，将变形过程中的某些过程理想化。所以，材料需满足如下假设：

- (1) 不计材料的弹性变形；
- (2) 材料的变形流动服从Levy-Mises流动法则；
- (3) 材料是均质各向同性体；
- (4) 材料满足体积不可压缩性；
- (5) 不计体积力与惯性力；
- (6) 加载条件(加载面)给出刚性区与塑性区的界限；

### 2.3.3 刚塑性体塑性力学基本方程及边界条件

刚塑性材料在发生塑性变形时，应满足如下方程：

- (1) 平衡微分方程：

$$\sigma_{j,j}=0 \quad (2.7)$$

当变形体在外力作用下处于平衡状态的时候，变形体内部点之间应力的变化是连续的变化着。但是各个应力分量之间的变化不是独立的而是互相关联的，必须满足(2.7)式的平衡微分方程。

(2) 小变形几何方程：

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}) \quad (2.8)$$

当物体发生了变形之后，导致物体有了速度场，进而引起了应变速率。速度分量和应变速率分量应满足(2.8)式关系。

(3) 屈服准则方程：

$$\frac{1}{2} \dot{\sigma}_{ij} \dot{\sigma}_{ij} = k^2 \quad (2.9)$$

本文材料为理想刚塑性材料，(2.9)式中k为常数。上式也被称作Von-Mises 屈服准则。此准则认为材料的屈服与坐标选择没有关系，而是取决于应力的偏张量。

(4) 本构关系：

$$= \lambda \sigma; \quad (2.10)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \quad (2.11)$$

在式(2.6)、式(2.7)中， $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} (\dot{\sigma}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^2}$ ——等效应力  
 $\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^2}$ ——等效应变速率

上述本构关系方程忽略了弹性变形，它描述的是在塑性变形中成形过程中应力与应变之间的关系。本文药型罩强力旋压属于逐点塑性成形，恰好适用于本文的研究。

(5) 体积不变条件：

$$\dot{\rho} + \rho \text{div} \mathbf{v} = 0 \quad (2.12)$$

在药型罩强力旋压塑性成形时，体积遵循不变条件，即在旋压成形前后体积一直是不变的。这也是锥形件强力旋压体积成形原理的本质。

---

(6) 边界条件:

$$O\mathbf{n}=\mathbf{F}; \quad (2.13)$$

$$(2.14)$$

$$u_1=\bar{u}$$

---

## 2.4 本章小结

本章先是介绍了有限元方法的思想，依靠有限元方法来仿真模拟药型罩强力旋压的塑性成形过程。紧接着详细的写出了药型罩在强力旋压过程所遵循的变形机理，即正弦定理。只有完全满足正弦定理成形出来的药型罩才是最满意的。事实上由于误差的影响导致不能完全按照正弦定理进行，于是分析了什么是偏离率，以及偏离率导致的后果。最后介绍了在选取坯料成形模拟的时候，坯料应按照刚塑性材料选取计算，如果选取弹塑性材料，则需要考虑回弹问题，回弹的存在对药型罩成形影响较大，并且每处的回弹值也不近相同，故选取刚塑性材料才是最明智的选择。选取刚塑性材料后，需要以六大假设条件、刚塑性方程和边界条件为理论基础进行研究。



---

## 3 药型罩强力旋压的建模与仿真

### 3.1 DEFORM 软件平台简介

药型罩的塑性成形问题很难求得精确的解，而DEFORM-3D有限元方法是目前能进行分析非线性问题的最有力的工具<sup>34)</sup>。DEFORM-3D 软件是SFTC 公司独立推出的一款集成了原材料、成形、热处理和机加工的一款软件。这款软件是模拟复杂金属在成形过程中三维金属流动的分析软件，并且这款软件是以工艺模拟有限元系统为基础，专门用来分析各种金属材料在成形过程中的三维金属流动，非常形象生动的提供工艺分析数据，最主要的是能提供成形过程中材料和温度的流动。DEFORM-3D软件在锻造、拉拔、轧制、旋压等成形技术方面最具有典型代表，因为它拥有强大的模拟引擎，能够分析多个关联对象耦合时候的大变形和热特性，而且非常容易使用，所以它在模仿材料流动成形这方面是最理想的工具。

### 3.2 药型罩强力旋压三维有限元模型的建立

#### 3.2.1 坯料的设计

因为药型罩属于锥形件，所以按照锥形件在强力旋压成形时的结构来设计。锥形件的外形有直母线等壁厚、直母线变壁厚、曲母线等壁厚等形状。除了直母线等壁厚锥形件可以使用等厚度板坯外，其余形状的锥形件受厚度和锥角的影响，不能使用等壁厚板坯，只能使用不等厚度的板坯或者是等壁厚的孟形预成形的毛坯。变壁厚药型罩可以通过板料先经冷冲压形成一个孟形的毛坯之后，再经过强力旋压成形得到。本次设计的药型罩为等壁厚药型罩，故选取等厚度圆板坯。具体尺寸参数如表3.1所示。

表3.1坯料的几何参数

参数	数值/mm
直径	108
厚度	4

### 3.2.2 旋轮的设计

药型罩在强力旋压的过程中，旋轮会与圆板坯料直接接触，会产生很大的接触压力，还会产生剧烈的摩擦和温度。与坯料接触的旋轮工作面的形状将直接影响到药型罩的形状，所以旋轮一定要有合理的结构外形和尺寸；还要有足够的耐热性能和足够的强度和

刚度。旋轮的顶端圆角半径 $r$ ,小那么旋压力就会小,药型罩的贴模效果就好,旋轮顶端圆角 $r$ ,以药型罩表面粗糙值不大、药型罩不粘模为标准来确定选取范围<sup>35</sup>,选取公式如下。

$$r_p=(1\sim 4)t_o \quad (3.1)$$

上式中坯料的厚度 $t_o$ 为4mm,顶端圆角半径 $r$ ,取10mm。旋轮直径 $D_p$ 的大小对药型罩的强力旋压过程没有明显的影响。旋轮直径取值稍微大些有利于提高药型罩表面的光洁度,但是同时导致旋压力也会增加。由于本文药型罩属于小零件,坯料直径才108mm,所以这里旋轮直径可以设计的小些,本次采用双旋轮进行旋压,防止单旋轮旋压过程中坯料受力不均导致偏离现象,将两个旋轮分别定义为轮1和轮2,其中设置轮1作为主模。旋轮截面图如下图所示。

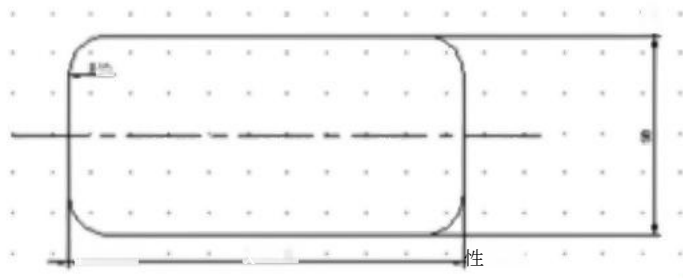


图3.2旋轮几何参数示意图

### 3.2.3 芯模的设计

在药型罩强力旋压过程中,芯模受到尾顶和旋压力的作用,芯模的表面跟成形的药型罩内表面相接触。成型的时候,金属材料沿着芯模的表面进行流动,药型罩内表面的光洁度取决于芯模的工作表面。本次药型罩是经过两次旋压成形,那么在每次旋压的时候,芯模都必须根据每次减薄率的不同重新设计半锥角和尺寸。药型罩进行剪切旋压时,每道次芯模半锥角 $\alpha$ 都应该根据相应道次的累计减薄率 $w$ 来确定<sup>36</sup>,见下式所示。

$$y_u=(t_o-t_a)/t_o=1-\sin\alpha \quad (3.2)$$

$$\sin\alpha=1-wL \quad (3.3)$$

当第一道次减薄率为 $w_1$ 的时候,此时芯模的半锥角为 $\sin\alpha_1=1-w_1$ ;

---

当第二道次的累计减薄量为 $\Delta t_2$ 时,即 $\Delta t_2$ 等于第一道次减薄量和第二道次减薄量之合,其累计减薄率 $w_2=(4o-t_2)/t_0$ ,第二道次芯模半锥角为 $\sin a_2=1-w_2$ 。

在本次旋压中 $t_0=4\text{mm}$ , 第一道次减薄量为 $1.2\text{mm}$ , 减薄率为

$$30\%, \sin\alpha=1-0.30=0.70=\sin 45^\circ$$

第二次减薄量为 $1.0\text{mm}$ , 累计减薄量为 $2.2\text{mm}$ , 累计减薄率为 $55\%$ ,

$$\sin\alpha=1-0.55=0.45=\sin 26.6$$

这两次减薄率分别对应的芯模尺寸如下图所示:

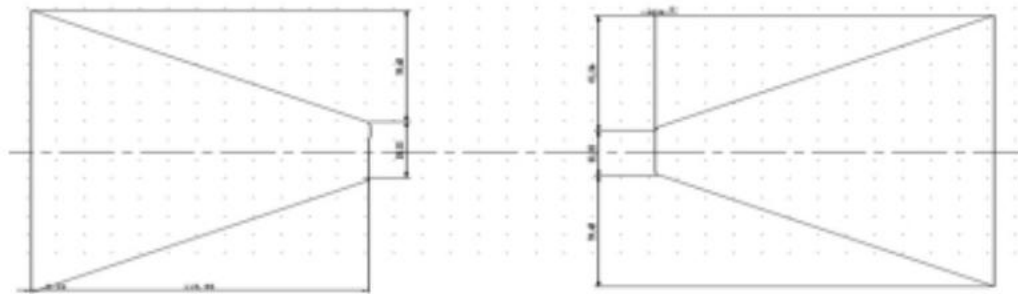


图3.3 减薄率对应的芯模尺寸

### 3.2.4 尾顶的设计

在药型罩强力旋压成形过程中, 尾顶的作用就是压紧坯料、防止坯料和芯模之间发生相对转, 借助芯模端面和坯料之间的摩擦力, 坯料被固定在芯模和尾顶之间。因此, 尾顶能够承受足够的压力来传递在旋压成形的时候需要的转矩。尾顶在设计的时候, 尾顶的工作端面应该设计成圆角的形状, 以防止压伤坯料; 为了避免旋压时产生回挤和压不紧的现象, 尾顶工作端面直径在设计的时候应该稍微大些。具体尺寸参数如下表所示。

表3.2尾顶的几何参数表

参数	数值/mm
直径	14
高度	50
圆角半径	1

### 3.2.5 模具的装配

在Pro/Engineer软件中将毛坯、旋轮、尾顶、芯模按照设计好的尺寸依次建立三维模型。在保存过程中，将所有模具弦高调到最小，避免端面棱角过大、不光滑，对成形产生不利的影响。最后分别以STL 格式导入到DEFORM-3D 软件中，将导入好的模型重新定位装配到一起，装配图如下图所示。

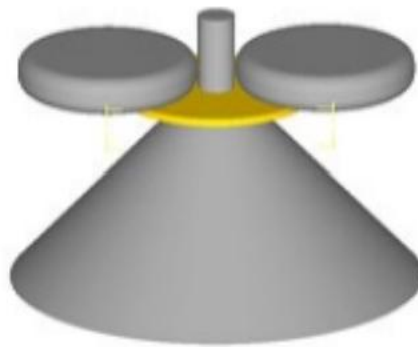


图3. 4模具装配图

### 3. 3 药型罩强力旋压成形仿真

#### 3. 3. 1 材料模型的选则

传统工艺通常选取紫铜(纯铜)作为生产药型罩的材料,但铜属于价高稀有的金属,并且在火箭生产中用量很大,各国都在寻找替代品,随着工业水平的逐渐发达,许多新型材料问世,常见的替代品有铜合金、钼合金、钽合金等,这些材料比紫铜强度高、力学性能好,广泛应用于导弹的结构件以及大炸高条件下的破甲弹药型罩、核反应堆及 EFP 药型罩等<sup>371</sup>。本次选用材料为CuZn40Pb2,是一种具有良好的切削性能、耐磨性、高强度极为重要的、应用最广泛的一种复杂材料。DEFORM-3D是以修订过的拉格朗日定理为理论基础,它属于有限元法之中的刚塑性有限元法。它的材料模型一共有四种:刚性材料模型、塑性材料模型、多孔材料模型和弹性材料模型。将材料模型定义为塑性材料模型,同时将旋轮、尾顶、芯模定义为刚性材料模型。由于药型罩在成形时采用冷旋工艺,故本次将温度定义为室温20摄氏度。

#### 3. 3. 2 网格的划分

网格的划分是把几何模型问题变为离散化的有限元网络,DEFORM-3D采用四面体单元对网络进行划分。在详细设置里选取绝对划分方式,设置最小网格尺寸为1.5mm,尺寸比率为2,然后先选取表面网格生成,随后在选取固体网格生成。网格生成后还要检查网格生成错误,具体示意图如图3.5所示。

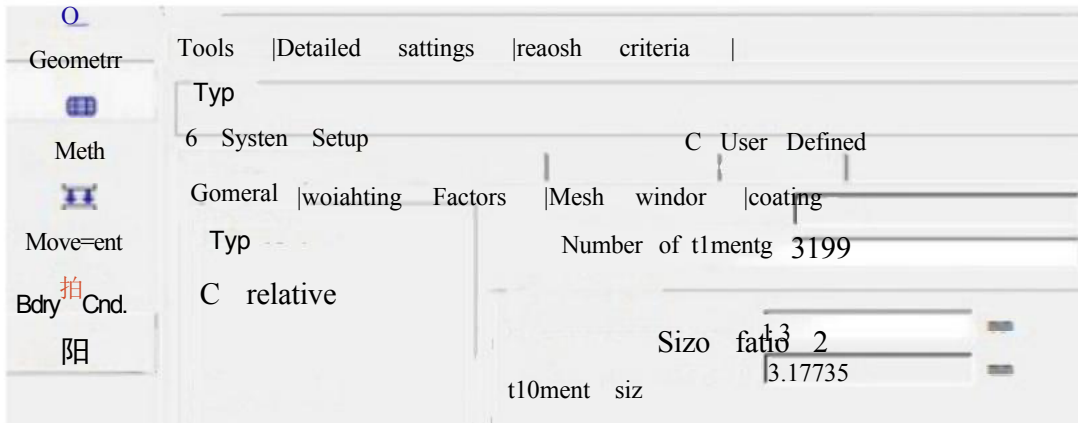


图3.5 网格生成过程

本次坯料一共划分31996个网格，节点数目是6728。划分好的网格示意图如图3.6所示。

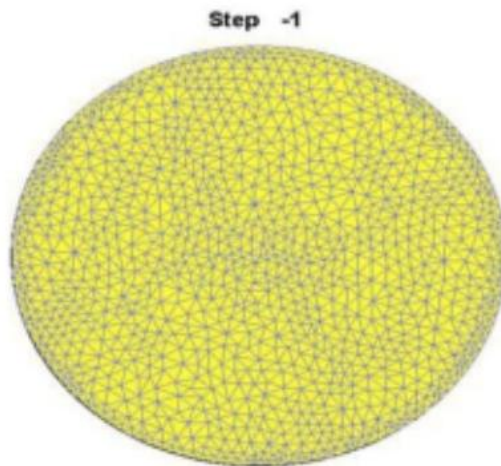


图3.6 网格划分示意图

整个旋压过程是在体积不变准则条件下进行的，划分好的网格还需要设置体积补偿参数，防止体积在旋压过程中缩减。设置体积补偿参数后能够保证整个过程能够在体积不变准则的理想条件下进行，体积参数示意图如图3.7所示。

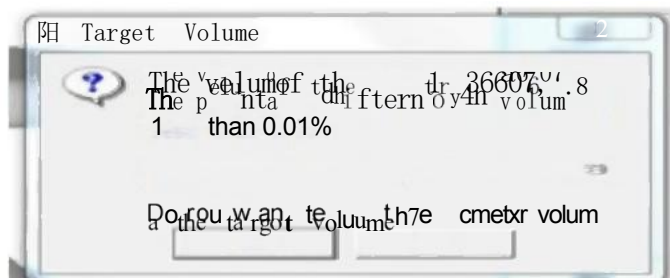
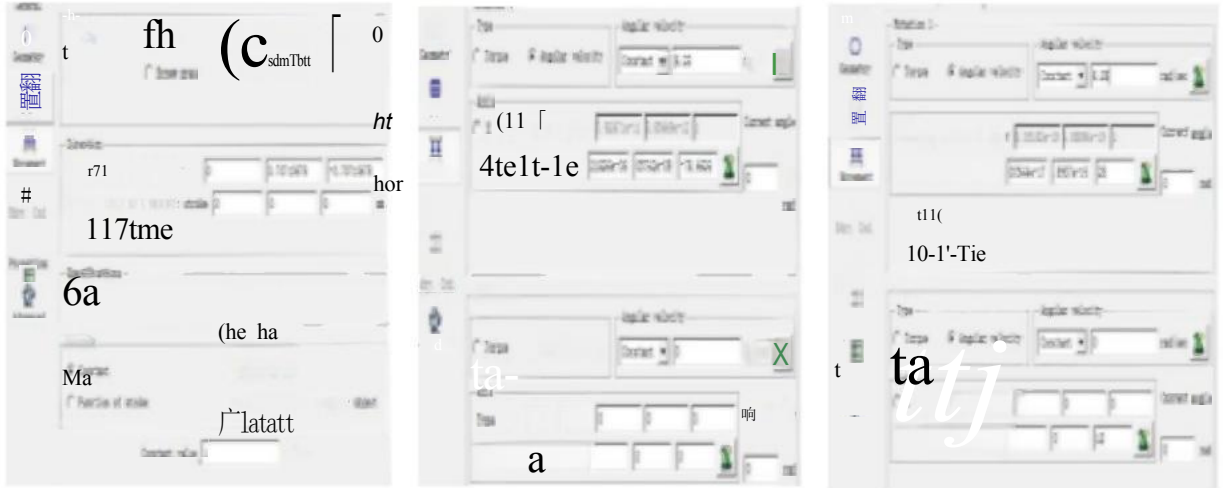


图3.7 体积参数补偿设定



### 3.3.3 旋压模拟时运动方式的确定

本次旋压成形的模拟是以工厂中实际生产作为参考，芯模和尾顶将坯料固定并做同步高速旋转，只旋转而不进给。旋轮设置进给速度，进给方向通过速度矢量方向定义，使速度矢量方向与芯模母线方向相同，操作时X轴不定义速度矢量，具体示意图如图3.7所示。



(a) 旋轮运动参数设置

(b) 芯模运动参数设置

(c) 尾顶运动参数设置

图3.7运动参数设置

### 3.3.4 摩擦系数设置

摩擦系数设置目的是防止运动中发生滑动脱离现象的产生，确保整个过程能顺利顺利进行，设置好的示意图如图3.8所示。

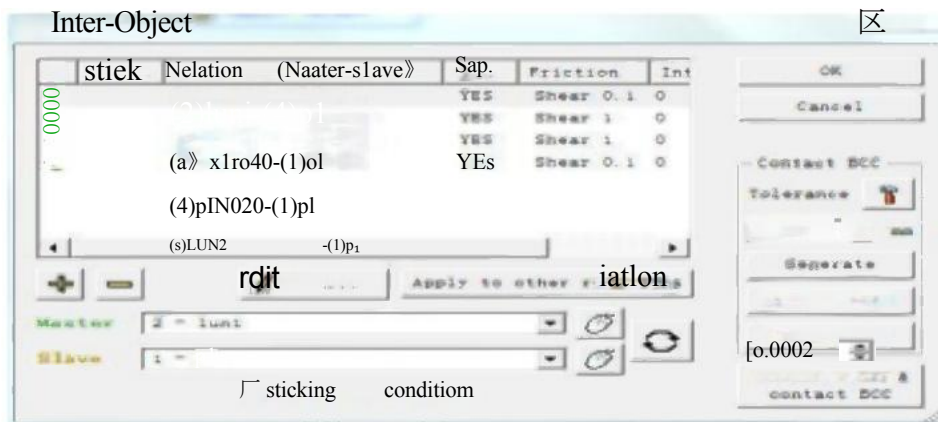


图3.8摩擦系数设置

---

由图3.8可以看出，芯模和尾顶与坯料接触的摩擦系数均为1.0, 这样设置目的是确保芯模尾顶坯料始终不发生相对运动，起到固定作用。两个旋轮与坯料的摩擦系数设置均为0.1, 使旋轮在与坯料接触过程中能够容易发生相对运动，有助于逐点成形。

### 3.3.4 控制步数的设定

在计算机进行仿真模拟运算时，需要设置控制步数。步数设置过多增加计算量，步数过少不利于仿真运算。步数设置通常有两种，一种是步长设置，以最小三分之一网格尺寸为步长进行设定；第二种是以步时进行设定，总的步数与步时的乘积就是总的运动时间。由于旋压属于大变形问题，采用步长运算导致步数过少、易出错，故选用步时运算。在保存时，如果步数过多，应将保存步数值增大，否则生成的文件较大。具体数据如图3.9所示。

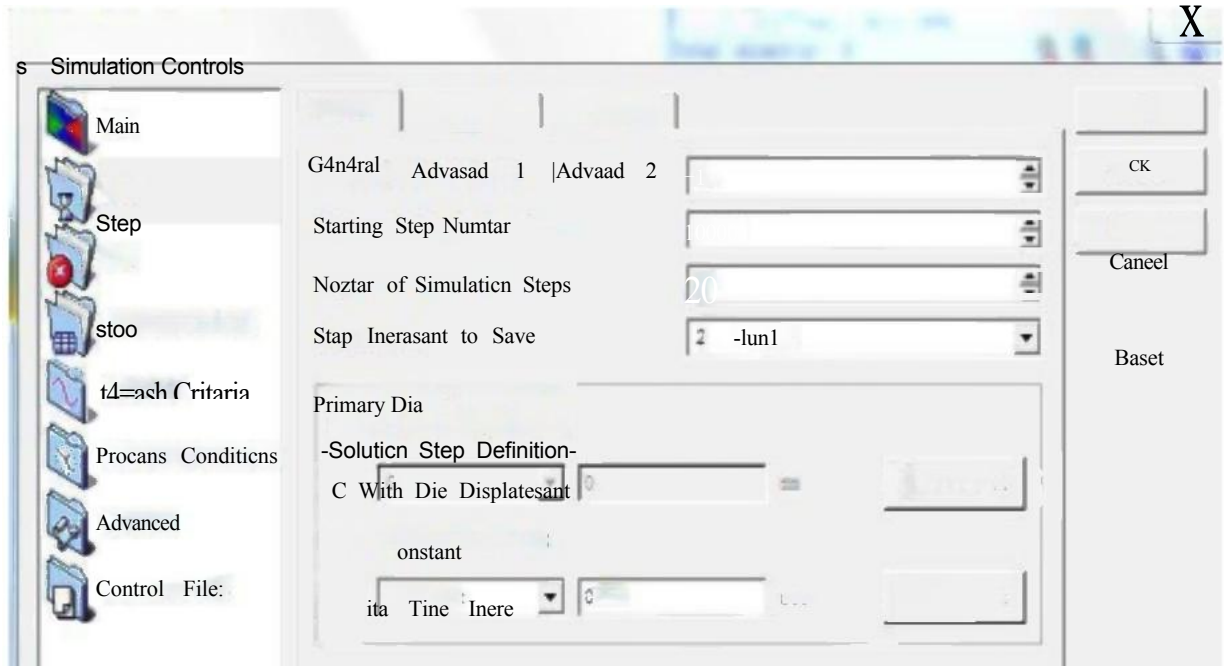


图3.9步数控制

## 3.4 本章小结

本章为药型罩强力旋压的三维建模与仿真阶段，根据DEFORM-3D 平台进行药型罩强力旋压的成形仿真。先是介绍了 DEFORM-3D 软件，随后列出了在本次药形罩强力旋压成形时的具体实施步骤。

## 4 强力旋压模拟结果与分析

### 4.1 工艺参数的影响

#### 4.1.1 减薄率对成形的影响

减薄率是影响药型罩强力旋压成形的关键因素，减薄率的大小与药型罩成形后的形状质量息息相关，如果能够找出减薄率与药型罩成形后的最佳形状质量关系，能够对实际生产具有指导作用。为了可以更加直观的表现出不同减薄率对药型罩成形后外形的影响，分别按照表4.1所列的参数进行强力旋压工艺参数的选取并进行仿真对比试验，并根据不同参数下所做的仿真结果来进行分析和对比，图4.1为不同减薄率下旋压成形的示意图。

表4.1不同减薄率对比试验参数

减薄率 (%)	芯模转速 (rad/s)	偏离率	进给速度 (mm/s)	芯模圆角半径 (mm)
30	6.28	0	1	2
50	6.28	0	1	2
70	6.28	0	1	2

图4.1 (a) 为减薄率30%时的成形结果图，从图中可以看出药型罩表面比较光泽，形状质量好；图4.1 (b) 为减薄率50%时的成形结果图，从图中可以看出药型罩表面略微出现鼓包现象，说明减薄偏大；图4.1 (c) 为减薄率70%时的成形结果图，从图中可以看出药型罩表面出现大量鼓包。从图4.1中的(a)(b)(c) 三幅图对比可知，当减薄率为30%时最合理，随着减薄率增加药型罩开始出现鼓包现象，减薄率过大很难得到良好的外形。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/807113026113006150>