

## 摘 要

楔横轧是一种高效、低耗、产品质量好的轴类零件成形新工艺、新技术，是当今先进制造技术的组成部分。楔横轧经过几十年的发展，其实践经验技术已达到很高水平。但由于楔横轧成形机理十分复杂，加之影响因素众多，理论上某些方面还有待于进一步的探讨和研究。而有限元模拟技术有助于解决这些问题，但由于有限元模拟技术在楔横轧成形模拟中的应用正处于起步阶段<sup>[1]</sup>，其研究面较窄，人们对于阶梯轴的楔横轧成形仍采用传统的实践实验法进行研究。因此，进行楔横轧阶梯轴成形过程的有限元仿真与分析，对于楔横轧的理论发展和技术推广有着重大的意义。

首先，分析了楔横轧的轧制原理及轧齐理论，并进行了深入研究，得出了一些关键结论：轧制时金属的流动规律，轧件的主要缺陷——中心疏松与轧件端面凹心等发生机理，为零件质量打下基础。

然后根据楔横轧原理进行模具设计。得出了确定各个工艺参数的一般原则及方法。这一方法为今后进行楔横轧的设备设计奠定了基础。

最后，在上述工作的基础上实现了轧制成形过程、轧制应力场与应变场，模具设计与制造的数据模拟及仿真。证明了所提出的楔横轧有限元建模的可行性及实用性。

轴类零件楔横轧塑性成形数值模拟要首先建模，导入 ANSYS/LS-DYNA 后定义单元类型<sup>[2]</sup>、实常数、材料模型，通过复制移动等生成轧辊和工件，划分网格后生成有限元模型，然后定义接触、定义约束、定义载荷，设定求解参数，求解。

求解完成后，用 1S-PREPOST 程序查看并分析求解的结果<sup>[3]</sup>，观察轧制变形过程，查看应力、应变场的动态变化、端部凹心缺陷等。通过楔横轧塑性成形的数值模拟能够为零件轧制成形工艺优化，模具设计，产品质量检测提供先进的分析工具。

**关键字** 楔横轧；有限元分析；塑性成形；模具设计

---

**ABSTRACT**

Cross wedge rolling technology is one kind highly effective, low consumption new process, as a part of current advanced technique of manufacture. With the development in past years, practice and experiment technology of cross wedge rolling has been to a high level. Yet the deforming mechanism of cross wedge rolling is quite complicated, with multitudinous factors affecting, there are still questions in theory to need discussing and researching further. Fortunately, technology of finite element simulation can help to resolving these problems. However, application of the technology used in simulating deformation of cross wedge rolling is too short in this field. The axis components formed by cross wedge rolling researched by traditional experimental methods. So the finite element method and the analysis of the axis components in cross wedge rolling means much to Cross wedge rolling.

First, rolling principles and theories of Cross wedge rolling are analyzed, and conducted in-depth study. A number of key conclusions drawn : Rolling metal flow law , the major flaws of Rolling, Pathogenesis of center porosity and rolling end-concave heart and so on . Lay the foundation for the quality of parts. And then mold design is carried out under the principle of cross wedge rolling. Come to the general principles

and methods of various process parameters. This approach carried out for the cross wedge rolling devices designed. Finally, Based on the above-mentioned work, achieved the Rolling forming process, Rolling stress field and strain field, data simulation and emulation of mold design and manufacture. Finite Element Modeling of cross wedge rolling are proved Feasible and practical which are proposed before.

It is a new technology which is used to form axis components. The numerical simulation of axis class components in cross wedge rolling plastic forming need to modeling first, after induced into ANSYS/LS-DYNA, we may define the unit type, the real constant, the material model, and so on produce the roller and the work piece by the duplication and migration .After meshing the model, it will produce a finite element model, then definite the contact, definite the restraint, definite the load, hypothesis solution parameter and solve at last. After completing the solution, we can examines the result with the LS-PREPOST procedure and observe rolling distortion process, the stress, the dynamic change of strain field and the concave heart flaw and so on. It can provide a useful tool for model design, quality checking and so on .

**Keywords:** the finite analysis; plastic making; Model design, numerical simulation

## 原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：张淑娟 日期：2009.11.29

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：张淑娟 导师签名：王其山 日期：2009.11.29

## 第一章 绪论

### 1.1 楔横轧技术及其发展概况

#### 1.1.1 零件轧制特点与分类

零件轧制是指用轧制工艺成形机器零件的方法<sup>[4]</sup>。传统的轧制方法只能成形等截面的型材，如管材、板材、圆材、方材等。零件轧制与传统的间歇整体锻造成形不同，工件为连续局部成形，所以又称为特殊锻造<sup>[5]</sup>。

零件轧制工艺与传统锻造工艺比较，具有如下特点<sup>[6]</sup>：

- ◇ 工作载荷小。由于是连续局部成形，工作载荷很小。只有一般锻模的几分之一到几十分之一。
- ◇ 设备重量轻。由于工作载荷小，所以设备重量轻、体积小及投资省<sup>[7]</sup>。
- ◇ 生产率高。一般高几倍到几十倍。
- ◇ 产品精度高。产品尺寸精度高、表面粗糙度低，具有显著的节材效果。
- ◇ 工作环境好，冲击与噪声都很小，工作环境显著改善。
- ◇ 易于实现机械化自动化生产。

零件轧制工艺的缺点：通用性差，需要专门的设备和模具，而且多数模具的设计、制造及生产工艺调整比较复杂。所以，零件轧制工艺多用于种类少批量大零件的生产。

#### 1.1.2 楔横轧技术简介

楔横轧(Cross Wedge Rolling)是一种高效的轴类零件塑性成形新工艺和新技术<sup>[8]</sup>。它既是冶金轧制技术的发展，因为它将轧制等截面型材，发展到轧制变截面的轴类零件；它又是机械锻压技术的发展，因为它将断续整体塑性成形，发展到连续局部塑性成形。所以，楔横轧技术在学科上属冶金和机械的交叉，在产品生产上属新兴科技产业<sup>[9]</sup>。楔横轧和传统锻造、切削工艺比较，生产某些大批量

的轴类毛坯，具有生产效率高、劳动条件好、模具寿命长、产品能耗低等优点，现在已经得到了飞速的发展。楔横轧可以生产各种形式的圆截面阶梯轴类零件，各阶梯之间可以任意角度过渡。根据工件特点可以为模锻供坯，也可以做机械加工的供坯工序。一般来说，凡是轴类零件一般都可以用楔横轧进行生产<sup>[10]</sup>。

### 1.1.3 轴类零件制造方法比较

楔横轧与机械加工方法比较

#### (一)楔横轧与切削方法比较

楔横轧与切削生产轴类零件方法的特点是：相同之处,都是局部连续成形；不同之处：楔横轧为塑性成形，即金属流动成形，切削为金属去除成形。与切削比较，楔横轧的优缺点如下<sup>[11]</sup>：

楔横轧加工方法的优点：

- 1) 生产效率高。楔横轧每 1min 生产 8~10 件，是切削方法的 3~10 倍<sup>[12]</sup>。
- 2) 节约材料。楔横轧的材料利用率一般为 80%~95%，切削为去除加工，零件形状不同材料利用率也不同，一般为 50%~70%，材料利用率平均提高 30% 左右<sup>[13]</sup>。
- 3) 零件性能提高<sup>[14]</sup>。轧制后的零件晶粒可以细化。金属流线保持连续并沿零件外分布，零件的静强度与疲劳强度都有增加<sup>[15]</sup>。
- 4) 模具寿命长<sup>[16]</sup>。一副模具一般能生产 8~20 万件产品等。

楔横轧方法的缺点是：

- 1) 坯料需要加热。轧制直径 6mm 的轴类零件都要加热，不仅要增加能源消耗，而且要一套加热设备。
- 2) 模具大、费用高。

#### (二)楔横轧与锻造方法比较

楔横轧与锻造生产轴类零件方法的特点为：相同之处：都是圆形坯料经加热后塑性成形。不同之处：楔横轧为局部、连续成型；模锻为整体、断续成形。

与模锻比较，楔横轧优缺点如下：

楔横轧方法的优点：

- 1) 生产效率高。楔横轧每 1min 生产 8~10 件，模锻生产轴类零件，需多道工序，每 1min 生产 2~4 件<sup>[17]</sup>。
- 2) 工作载荷小<sup>[18]</sup>。楔横轧的工作载荷只是模锻的几分之一到几十分之一，所以设备重量小，模具寿命长。
- 3) 设备利用率高。楔横轧成形的零件精度高，可以成形接近直角的台阶，没有飞边损失，仅有料头损失，材料利用率提高 15%~25%。
- 4) 噪声小。楔横轧的噪声小于 60db<sup>[19]</sup>，模锻的噪声大于 100db<sup>[20]</sup>等。。

楔横轧方法的缺点：

- 1) 模具大并且复杂<sup>[21]</sup>。楔横轧的模具都比较大，并且复杂，所以工艺调整也相对复杂。
- 2) 设备不通用<sup>[22]</sup>。楔横轧机只能成形轴类零件，或者为非轴类零件制作坯料，不如模锻设备锻造的零件范围等。

#### 1.1.4 楔横轧技术的应用与发展

##### (一) 楔横轧技术在国外的应用

楔横轧原理最早出现于 1885 年的德国，这种新思想由于当时落后的机制工艺及技术水平而未能实现<sup>[23]</sup>。1879Lebeky 因提出板式楔横轧机而获得专利。6 年之后，Simonds 因试图用二辊楔横轧机轧出汽车用轴而获得专利<sup>[24]</sup>。又过了 8 年，Erkenzweig 在板式楔横轧机上进行了轧制实验<sup>[25]</sup>。到了 1961 年原捷克斯洛伐克 Letnary 汽车制造厂工程师 Jiri Holub 将这项工艺与设备用于汽车轴类零件以及五金工具坯等工业生产，并在莱比锡国际博览会上展出，得到了世人的广泛重视，从而成为众所周知的轴类零件成形新工艺和新技术<sup>[26]</sup>。20 世纪 60 年代后期，原东德 Erfurt 公司楔横轧设备研制工程小组完成了平板式楔横轧轧机的设计与制造<sup>[27]</sup>，即 UWQ40×400 型板式楔横轧机。它采用焊接结构，全自动控制，并以此为基础形成 UWQ 系列轧机。这项技术在原苏联也得到广泛的应用，除有辊式、板式楔横轧机外，还有单辊弧形式楔横轧。生产的产品有汽车、拖拉机、电机的轴类零件。日本三菱重工于 20 世纪 60 年代也开始研制楔横轧工艺<sup>[28]</sup>，并从 1968 年开



始正式生产 MCR 型二辊式楔横轧机，并将楔横轧技术用于生产汽车轴类零件。

## (二) 楔横轧技术在我国的应用

我国早在 20 世纪 50 年代就开始楔横轧工艺的探讨和试验工作<sup>[29]</sup>。1963 年，重庆大学等科研单位开始楔横轧汽车球销的实验研究工作，到 1970 年获得初步成功<sup>[30]</sup>。这是我国楔横轧工艺走向实用的最早尝试，但由于某些原因未能应用于工业生产。上海锻压机床三厂研制成功单辊弧形式楔横轧鲤鱼钳毛坯新工艺<sup>[31]</sup>，是我国最早将楔横轧应用于生产的单位，并收到了较好的经济效果。但由于单辊弧形式楔横轧在模具制造、工艺调整等方面都十分困难，故一直没有得到推广。北京钢铁学院(现北京科技大学)从 70 年代初开始，在孔型斜轧基础上开展楔横轧技术的研究开发与推广工作，先后帮助建成楔横轧生产线 40 多条，开发并应用于生产的零件达到了 130 余种<sup>[32]</sup>。80 年代以来，机械部济南铸锻研究所、郑州机械所、北京机电研究所、吉林工业大学，先后开展楔横轧的研究和开发工作，也都取得了不同的进展。图 1-1 所示为部分楔横轧产品<sup>[33]</sup>。

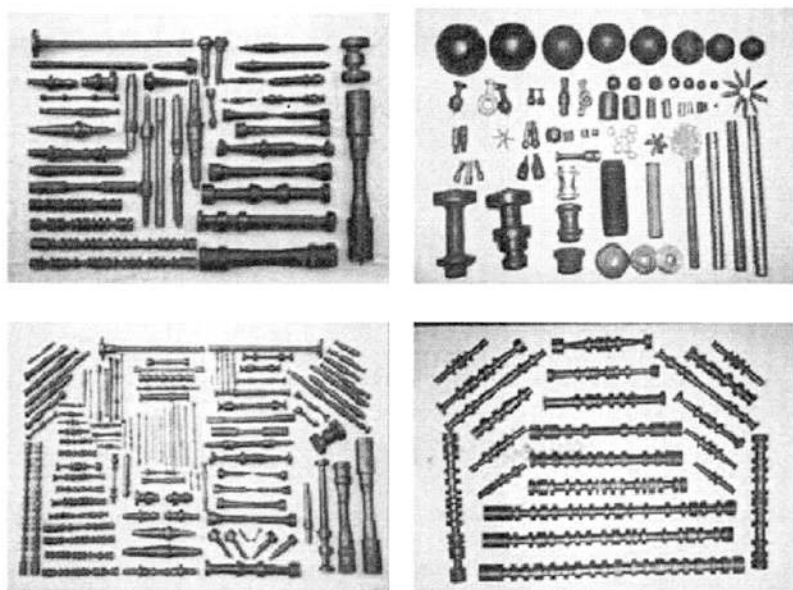


图 1-1 部分楔横轧产品

## 1.2 课题来源、背景、目的

### 1.2.1 课题的来源及背景

金属塑性成型技术是现代化制造业中金属加工的重要方法之一。它是金属材料在模具和锻压设备作用下发生变形,获得所需的形状、尺寸和性能的制作加工过程。金属塑性成型过程是一个复杂的弹塑性大变形过程,该过程涉及几何非线性、材料非线性、边界条件非线性等一系列难题。影响成形的因素很多,如模具和毛坯形状、材料特性、摩擦和润滑、加工温度以及工艺参数等等,因此若工艺分析不完善、模具设计不合理或者材料选择不当,则会造成产品达不到质量要求,造成大量的次品和废品,增加模具的设计制造时间和费用。

应用塑性成形的数值模拟方法主要有上限元法、边界元法、和有限元法。上限元法常用于分析较为简单的准稳态变形问题<sup>[34]</sup>;而边界元法主要用于模具设计分析和温度计算<sup>[35]</sup>;对于大变形的体积成形和板料成形,变形过程常呈非稳态,形状、边界、材料性质等都会发生很大的变化,有限元法可由试验和理论方法给出的本构关系、边界条件、摩擦关系式,按变分原理推导出场方程<sup>[36]</sup>,根据离散技术建立计算模型<sup>[37]</sup>,从而实现对复杂成形问题进行数值模拟,分析成形过程中的应力应变分布及其变化规律,由此提供较为可靠的主要成形工艺参数。

### 1.2.2 课题的研究目的

当前,有限元法已成为分析和研究金属塑性成形问题的最重要的数值分析方法之一,它具有以下优点:

- ◇ 由于单元形状具有多样性,有限元法适用于任何材料模型、任意边界条件、任意的结构形状,在原则上一般不会发生处理上的困难。
- ◇ 能够提供金属塑性成形过程中变形力学的详细信息(应力应变场、速度场、温度场、网格畸变等),为优化成形工艺参数及模具的结构设计提供详细而可靠的依据。
- ◇ 虽然有限元法的计算精度与所选择的单元类型、单元的大小等有关,但随

着计算机技术的发展，有限元法将提供高精度的技术结果。

- ◇ 用有限元法编制的计算机程序通用性差强，可以用于求解大量复杂的问题，只需修改少量的输入数据即可。
- ◇ 由于计算过程完全计算机化，既可以减少一定的实验工作，又可直接与 CAD/CAM 实现集成，使模具设计过程自动化。

### 1.2.3 楔横轧轧制成形模拟的研究意义

准确掌握楔横轧在轧制变形过程中的金属流动规律、应力应变场分布、温度分布等是认识和解决楔横轧中零件的成形规律、缺陷发生原因、轧制力能参数大小等的基础<sup>[38]</sup>。为此人们使用密栅云纹方法、滑移线方法<sup>[39]</sup>等来研究分析楔横轧的应力应变与金属流动等规律，其研究结果对认识并解决楔横轧中的某些理论与实际问题起到了积极作用。但由于上述方法的一些前提假设与实际相差很大等原因许多情况下做出的结果不是很精确甚至不能得出结果<sup>[40]</sup>。随着数值模拟和计算机技术的飞速发展，人们开始用塑性有限元数值模拟研究、分析和解决轧制过程中的问题。

## 1.3 小结

楔横轧是一种高效、低耗、产品质量好、绿色的轴类零件成形新工艺、新技术，是当今先进制造技术的组成部分，是世界公认的轴类零件成形新技术。研究楔横轧对于创新工艺，提高产品质量有重要意义。

## 第二章 理论原理

## 2.1 轧制原理

## 2.1.1 轧辊与轧件的相对运动

## (一) 轧辊与轧件的圆周速度

图 2-1 为典型楔横轧轧制的两个视图。轧辊以逆时针主动旋转，带动轧件顺时针旋转。

轧辊上任意一点的圆周速度  $v$  为

$$v = \omega_1 R = \frac{\pi D n_1}{60} \quad (2-1)$$

式中  $\omega_1$ 、 $n_1$ ——分别为轧辊的角速度与转速；

$R$ 、 $D$ ——分别为轧辊上任意一点的半径与直径；

轧辊的圆周速度，如图 2-1 所示，呈三角形  $O_1 B B$  分布。

轧辊表面圆周速度最大值在  $B$  处（楔顶处），其速度  $v_B$  为

$$v_B = \omega_1 R_B = \frac{\pi D_B n_1}{60}$$

式中  $R_B$ 、 $D_B$ ——分别为轧辊楔顶面（ $B$  处）的半径与直径。

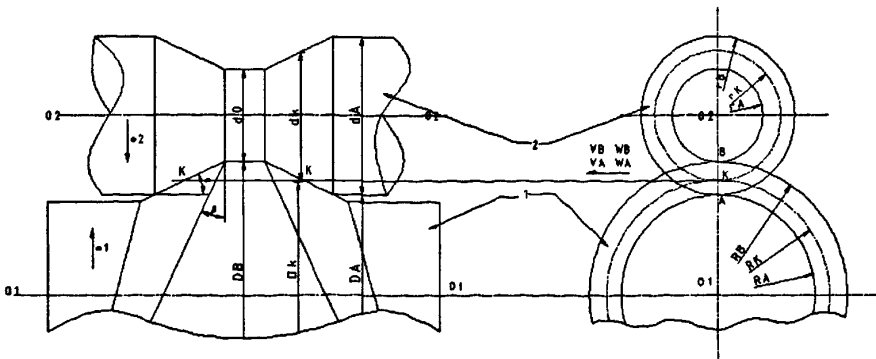


图 2-1 典型楔横轧轧制主侧视图

轧辊表面圆周速度最小值在 A 处（指与轧件接触表面中），其速度  $v_A$  为

$$v_A = \omega_1 R_A = \frac{\pi D_A n_1}{60}$$

式中  $R_A$ 、 $D_A$ ——分别为轧辊与轧件接触表面中最小半径与直径。

将轧件视为绝对刚体，当正常稳定轧制时，轧件上任一点的圆周速度  $\omega$  为

$$\omega = w_2 r = \frac{\pi d n_2}{60} \quad (2-2)$$

式中  $w_2$ 、 $n_2$ ——分别为轧件的角速度与转速；

$r$ 、 $d$ ——分别为轧件上任意一点的半径与直径。

轧件的表面圆周速度最大值在 A 处，其速度  $\omega_A$  为

$$\omega_A = w_2 r_A = \frac{\pi d_A n_2}{60}$$

式中  $r_A$ 、 $d_A$ ——分别为轧件表面最大半径与直径（即轧件的外径）。

轧件表面圆周速度最小处在 B 处（指与轧辊接触表面中），其速度  $\omega_B$  为

$$\omega_B = w_2 r_B = \frac{\pi d_B n_2}{60}$$

式中  $r_B$ 、 $d_B$ ——分别为轧件与轧辊楔顶面接触表面的半径与直径。

## （二） 轧辊与轧件间的相对滑动

当正常稳定轧制时，并将轧件视为绝对刚体时，轧辊与轧件的相对运动如下：

1) 在 K 处，轧辊与轧件的圆周速度是相等的。在 K 处轧辊与轧件做无相对滑动的滚动。K 点位置应根据轧件自身力矩平衡条件来确定，即作用于轧件上的力矩之和为零。但由于孔型形状、压力分布、摩擦系数等十分复杂，很难用分析式求解，但可以用实测轧辊转速  $n_1$  与轧件转速  $n_2$  的方法求得。

2) 在 KB 段，轧辊的圆周速度  $v$  大于轧件的圆周速度  $\omega$ ，之间产生相对滑动。由于 B 处压力大，相对滑动也很大，所以在轧辊 B 处附近是最容易磨损的。在 KA 段，轧辊的圆周速度  $v$  均小于轧件的圆周速度  $\omega$ ，之间产生相对滑动。尽管 A 处的相对滑动较大，但此处的压力并不大，所以在 A 处附近的磨损不如 B 处附近严重。

## (三) 轧件上的扭矩

以楔横轧轧件作为平衡对象,由于相对滑动发生的摩擦力对轧件形成力偶矩,沿轧件长度上是变化的。此力矩  $M$  在轧件内产生的剪应力  $\tau$  应小于轧件热状态下的屈服剪应力  $\tau_s$ 。否则发生扭转塑性成形,即

$$\tau = \frac{M}{W_r} \leq \tau_s \quad (2-3)$$

式中  $W_r$ ——轧件的剪切模量。

## 2.1.2 轧件的旋转条件

## (一) 横轧的旋转条件

楔横轧与斜轧的旋转条件都是建立在简单横轧旋转条件基础上的,与简单横轧的旋转条件原理相同。所谓简单横轧是指忽略导板、导管等作用在轧件上的外力,忽略轧件的自重与惯性力,且轧制线与轧机中心一致。

当垂直于轧制轴线剖开时,轧制情况如图 2-2 所示,轧辊给轧件作用四个力:两个  $P$  力与两个  $T$  力。他们对称作用于轧件, $P$  为正压力,它的方向一边通过轧辊中心  $O_1$ ,另一边通过接触弧  $\overline{AB}$  的中间位置(近似值),即  $P$  力的方向与  $\overline{O_1O_2}$  夹角为旋转角  $\psi$  的一半; $T$  为轧辊给轧件的摩擦力,它与  $P$  力垂直,其大小与正压力  $P$  成正比,即

$$T = \mu P \quad (2-4)$$

式中  $\mu$ ——轧辊与轧件间的摩擦系数。

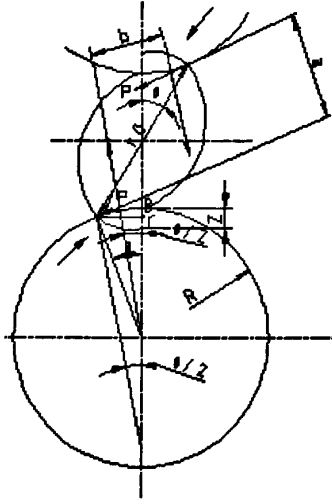


图 2-2 简单横轧的受力图

轧件能够旋转起来的条件应该是 T 力组成的力偶矩  $M_T$  大于或者等于 P 力组成的力偶矩  $M_P$ ，即

$$M_T \geq M_P$$

$$T a \geq P b$$

式中 a——两个 T 力之间的垂直距离；B——两个 P 力之间的垂直距离。

横轧由于  $\psi$  角很小，C 值可以省略，旋转条件的公式简化成

$$\mu \geq \frac{R+r}{r} \tan \frac{\psi}{2} = \left(1 + \frac{r}{R}\right) \tan \frac{\psi}{2} \quad (2-5)$$

代入公式，计算简化得

$$\mu^2 \geq \left(1 + \frac{d}{D}\right) \left[ \frac{Z}{d} + \left(\frac{Z}{d}\right)^2 \right]$$

$Z/d$  称为相对压缩量。 $Z/d$  值较小， $(Z/d)^2$  值更小可以忽略不计，这样可以得到更为简单的旋转条件关系式，即

$$\mu^2 \geq \left(1 + \frac{d}{D}\right) \frac{Z}{d} \quad (2-6)$$

### (二) 楔横轧的旋转条件

楔横轧的旋转条件是建立在简单横轧基础上的，即可以运用先前公式计算或校核出楔横轧能否旋转的问题。

图 2-3 为典型楔横轧展开图。图中  $\beta$  为轧辊的展开角,  $\alpha$  为轧辊的成形角,  $d_0$  为轧件未轧钱的原始直径,  $d_1$  为轧件轧后直径。满足楔横轧旋转条件是指从 I-I 位置轧制到 II-II 位置中轧件无整体打滑, 即轧件以轧制直径  $d_k$  作无滑动的滚动 (故  $d_k$  又称作轧件的滚动直径)。

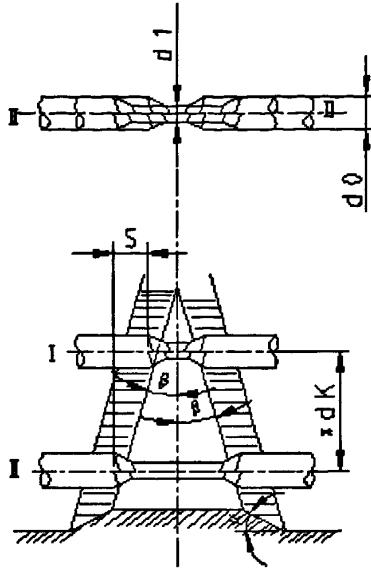


图 2-3 典型楔横轧展开图

楔横轧旋转条件普遍式为:

$$\tan \alpha \tan \beta \leq \frac{m d \mu^2}{\pi d_k \left(1 + \frac{d}{D}\right) k} \quad (2-7)$$

### 2.1.3 模具的展宽角

展宽角  $\beta$  (又称楔展角) 是楔横轧中最主要的工艺参数之一。也是轧辊孔型设计中最主要的参数之一。 $\beta$  角设计的越大, 轧辊的直径  $D$  越小, 这对轧辊的加工制造、节省模具的材料、减少整个设备的外形尺寸及重量等有利, 但它受旋转条件的限制。



按旋转条件公式，改造成

$$\beta \leq \tan^{-1} \left[ \frac{md\mu^2}{\pi d_k k \left(1 + \frac{d}{D}\right) \tan \alpha} \right] \quad (2-8)$$

那么根据旋转条件，允许最大的展宽角（或称极限展宽角）为

$$\beta' \leq \tan^{-1} \left[ \frac{md\mu^2}{\pi d_k k \left(1 + \frac{d}{D}\right) \tan \alpha} \right] \quad (2-9)$$

式中  $g$ ——滚动系数。

一般  $g=0.4 \sim 0.7$  (当轧过的顶面修低时  $g$  更大)，若去  $g=0.5$ ，则得到

$$\beta' \leq \tan^{-1} \left[ \frac{m\mu^2}{\pi(d_1 + \Delta r) \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D}\right) k \tan \alpha} \right] \quad (2-10)$$

#### 2.1.4 轧件端面移动量

当楔形模具从轧件中部楔入时，将引起轧件上未参见变形的端部向外移动，其移动距离称为轧件端面移动量。图 2-5 表示了轧制过程进行到任意位置  $y$  时，轧件端面移出的距离  $t$ ，图中  $oa$  即轧件端面移动量曲线。

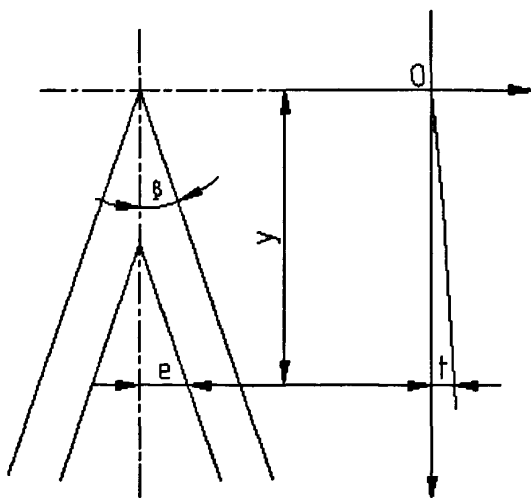


图 2-4 端面移动量曲线示意图

金属体积在压力加工中具有不可压缩性（铸造金属加工压力加工的最初阶段除外），因此在变形前后，其总体积保持不变，这一结论称之为体积不变定律。根据体积不变定律，轧件端面移出的体积应该等于被模具挤开的体积。然而，由于轧件是在旋转中产生变形的，所以轧件被挤开的体积并不等于模具凸起的体积。因此需要根据楔横轧工艺的特点，建立在模具压入的任意位置计算轧件上已变形区体积的数学几何模型，并推导出相应公式。

楔横轧的工艺特点决定了在正常展宽阶段，轧件变形区表面为阿基米德螺旋面，其螺距  $h=2\pi r_k \tan \beta$ 。该螺旋面与垂直与轧件轴线平面的交线为阿基米德螺旋线。该螺旋线的极坐标方程可表示为：

$$\rho = a^{\phi} \quad (2-11)$$

式中  $\rho$ ——极径； $\phi$ ——极角； $a$ ——参数。

根据阿基米德螺旋面的几何数学性质及特定螺距  $h$ ，可得参数  $a$  的表达式为

$$a = r_k \tan \beta \tan \alpha \quad (2-12)$$

式中  $\beta$ ——模具展宽角； $\alpha$ ——模具成形角； $r_k$ ——轧件旋转半径。

在楔入过程中，轧件变形区的几何形状是变化的，所以在计算被模具挤开的体积时，需分阶段进行分析。

## 2.2 轧齐理论

阶梯轴类的台阶，按其位置可分为外台阶和内台阶。当形成某些特定形状内台阶时，需要轧齐理论设计轧辊模具。

### 2.2.1 轧齐原理

在楔横轧成形工艺中，布置在轧辊模具上的楔形凸起，主要由楔入段，展宽段和精整段等部分组成。多数情况下，在展宽段和精整段还存在过渡段。

展宽段中，在轧辊模具的作用下，轧件上形成两个相差  $180^\circ$  对称的变形区。在变形区中，金属成螺旋状径向压缩和轴向延伸，在轧件已成形区和未变形区之

间形成具有阿基米德螺旋面特性的螺旋状斜台阶。这种变形属于螺旋状的局部连续小变形。

模具精整段的形状是与轧件表面几何形状相对应的纵向型槽。轧件表面一般由圆柱面、圆锥面和圆弧面等台阶组成。他们相对模具中心线的位置分为内台阶和外台阶。

过渡段中，模具展宽段与精整段间的自然过渡交线（图 2-5 中 BH 线，简称自然交线）的形状与走向，有模具成形角、展宽角和轧件表面形状决定。

### （一）螺旋台阶产生原因

产生螺旋状台阶的原因可用体积不变定律解释。如图 2-5 所示，在产品内台阶倾角  $\theta$  大于模具成形角  $\alpha$  的情况下，模具的自然过渡交线为 BH 线。其特点为轧件首先达到模具上的 B 点，后达到 H 点。当轧件达到自然交线的开始点 a-a 线时，轧件上形成倾角为  $\alpha$  的内斜台阶，它的体积是  $ABA'B'$  所包围的圆锥台体积。该体积显然大于倾角为  $\theta$  的  $HBH'B'$  所包围的圆锥台体积。由于变形特点是旋转的局部连续小变形，因此这种内侧金属受挤压时将外侧已变形金属推出的现象也是在螺旋中逐渐产生的，故在产品的内台阶上留下螺旋状台阶。

### （二）过渡设计准则

为了避免推空现象出现，应适当变动自然交线，在模具展宽段和精整段间新设计一个过渡段。即在模具展宽段适当位置上逐渐减少或改变模具成型面，使金属被挤压而造成的轧件内台阶已成形部分向外的延伸量（轧件端面移动量）不大于模具成形面变化部分的轴向展宽量。这样就可以保证在变形过程中轧件与模具表面变化部分的良好接触。

模具成形面变化部分的轴向展宽量小于轧件端面展宽量，就会形成推空；反之，将会使压到已成形的大直径处，增大轧制时的瞬时变形量，对轧制产生不利影响，严重时轧件颈部会产生较深的螺旋痕甚至缩颈。因此，设计模具过渡段必须遵循的准则就是使模具成形面变化部分的轴向展宽量与轧件端面移动量相一致。

### （三）体积平衡原理

满足过渡段设计准则的轧齐曲线方程可以利用体积不变原理得到。这个原理

可以描述为：在轧齐过程中任意位置，参与变形的体积在变形前后总量不变。它也可以称为总体积平衡。其数学表达式为

$$\sum V(r_0)_i = \sum V(r)_i \quad (2-13)$$

式中  $\sum V(r_0)_i$  —— 轧齐开始时螺旋斜锥体各部分体积之和；

$\sum V(r)_i$  —— 轧齐过程中任意位置剩余螺旋斜锥体及轧齐开始后形成的已成形区各部体积之和。

该原理也可描述为：在轧齐过程中任意位置，轧件螺旋斜锥体与内台阶之间的体积差恒等于轧件颈缩处还需伸长的体积。它也可称为差平衡原理。

### 2.2.2 直角台阶的轧齐曲线

#### (一) 基本关系

在模具展宽段，轧件形成如图 2-6 所示螺旋状斜台阶。根据轧齐原理，把这样形状的台阶轧成内直角台阶，需要用轧齐曲面将模具展宽段按要求过渡到精整段。由于精确求解比较困难，所以各种类型的台阶曲线应由简化的台阶模型导出的轧齐曲线（称为简化轧齐曲线），在应用时乘以适当系数进行修正。

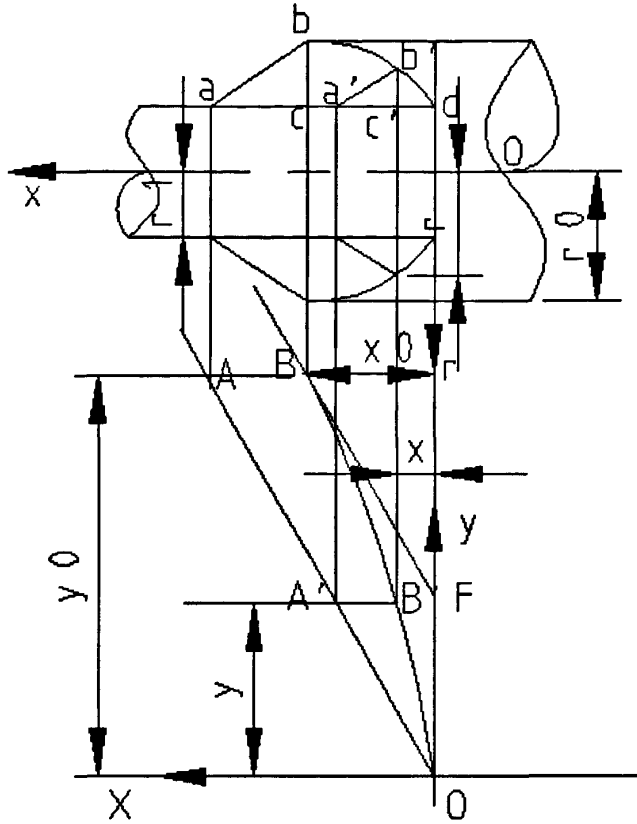


图 2-6 直角台阶轧齐曲线图形

设直角正交坐标系  $xyz$  如图所示，过渡段由成形面  $ABA'B'O$  与垂直于轧辊模具母线的轧齐曲面  $BB'O$  所组成。在  $xoy$  平面轧齐曲线与轧齐曲面重合。随着轧齐曲线上动点  $B'$  由  $B$  到  $O$ ，轧件上已成形内直角台阶的高度由零逐渐增大并向外移动，直至内直角台阶完整形成。 $B'$  点与  $y$  轴的距离就是轧齐曲线在该点的提前量。

在上图所示的坐标系中，轧齐曲线上任意点  $B'$  的坐标值均应满足下述几何关系

$$y = [x + (r - r_1) \cot \alpha] \cot \beta \quad (2-14)$$

式中  $\alpha$  —— 模具成形角；  $\beta$  —— 模具展宽角；  $r$  —— 轧件任意位置半径；

$r_1$  —— 轧件轧后半径；  $y$  —— 轧齐曲线上任意点沿模具展开方向上的长

度； $x$ ——轧齐曲线上任意点的提前量。

## (二) 轧齐曲线

根据过渡段模具设计准则和体积平衡原理，内直角台阶过渡段的设计要求是，在轧齐过程中任意位置，内台阶还未轧齐的空心圆锥体体积恒等于轴颈处需要伸长的体积。空心圆锥体的体积是图中三角形面积绕轧件轴线旋转一周所形成的体积  $V_{abc}$ 。所以有

$$V_{abc} = V_x \quad (2-15)$$

式中  $V_{abc}$ ——任意位置空心圆锥体体积； $V_x$ ——轴颈处需伸长的体积。

代入公式，积分求解的

$$X = \left( \frac{r^3}{3r_1^2} - r + \frac{2r_1}{3} \right) \frac{1}{\tan \alpha} \quad (2-16)$$

$$Y = \frac{r^3 - r_1^3}{3r_1^2 \tan \alpha \tan \beta} \quad (2-17)$$

X、Y 即为任意位置半径  $r$  为参数在  $xoy$  平面上的直角台阶轧齐曲线方程。

## 2.3 小结

楔横轧的轧制原理、轧齐曲线是研究楔横轧工艺的理论基础，这对于研究零件轧制过程、轧辊磨损的原因以及扭转变形缺陷等都有直接关系。仿真模拟楔横轧需要输入某些参数，因此我们要对楔横轧的轧制原理和轧齐理论有一定了解。

## 第三章 模具设计

### 3.1 模具设计的一般原则

在设计楔横轧模具时，一般应遵循下述四个原则或者条件。

#### (一) 对称原则

楔横轧模具上的左右两条斜楔，在工艺上希望完全对称。这样在轧制过程中模具两边作用于轧件两边的力  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$  是对称的，因而不会由于轴向力  $P_z$  不等而产生轴向窜动，也不会由于轧件两边转速不一致而扭曲。

对于对称的轴类零件，只需要在工艺上加以注意，就可以避免产生扭曲现象。

但是，多数轴类件在长度上是不对称的，为了使作用于轧件两边的力符合对称原则，有四种解决办法：

- (1) 成对轧制。将不对称的两个轴类件相对在一起轧制。这种办法不公将非对称轴类件变为完全对称的轧制，并且使轧机的生产率提高一倍，介对某些长轴类件，往往受到模具尺寸的限制而无法采用。较适合短轴类零件。
- (2) 分段对称轧制。将非对称轴分段用对称楔轧制。
- (3) 长棒料预轧楔轧制。用预轧楔的方法将非对称轴类件变为对称轧制。预轧楔轧制是一种有效地将非对称轴的轧制变为对称轧制或接近对称轧制的方法，它是长棒轧制为基础的。
- (4) 对称力轧制。可将左右两条斜楔的工艺参数（成形角  $\alpha$  与展宽角  $\beta$ ）采取不等数值，使其作用于轧件的力，尤其是轴向力尽可能相等的办法。

#### (二) 旋转条件

设计楔横轧模具时，轧件在模具孔型的带动下能正常地旋转，是楔横轧必须先决条件。楔横轧旋转条件的判别式为：

$$\tan \alpha \tan \beta \leq \frac{d_1 \mu^2}{\pi d_k (1 + \frac{d_1}{D_1})} \quad (3-1)$$

式中  $d_1$ ——轧件轧后的直径；

$d_k$ ——轧件的滚动直径；

$D_1$ ——轧辊上模具的楔顶直径。

从旋转条件判别式可以看出：

1) 模具与轧件间的摩擦系数  $\mu$  越大，旋转条件越好，而且是平方关系的影响。所以增加摩擦系数  $\mu$  是保证旋转条件最重要的最有效的因素。

2) 模具的成形角  $\alpha$ 、展宽角  $\beta$ 、轧件的轧后直径与模具楔顶直径之比  $d_1/D_1$  越小，旋转条件越好。但这些参数还受其他重要条件的限制，调整余地不大。根据理论与实践，成形角  $\alpha$  大多在以下范围内选择： $18^\circ \leq \alpha \leq 34^\circ$  展宽角大多在以下范围内选择： $4 \leq \beta \leq 12^\circ$ 。

### (三) 颈缩条件

楔横轧的变形是径向压缩轴向延伸，因此在设计楔横轧模具时，应满足轧件不因轴向力过大将轧件拉细这个条件。轧件不被轴向力  $P_z$  拉细的判别条件为

$$2P_z < \frac{1}{4} \pi d_1^2 \sigma$$

或

$$P < \frac{\pi d_1^2 \sigma}{8 \sin \alpha} \quad (3-2)$$

式中  $\sigma$ ——轧件材料的变形阻力。

从上式中可以看出：当轧件的材料、轧制温度及轧后直径  $d_1$  等确定后，轧件是否会拉细，主要决定于成形角  $\alpha$  的大小， $\alpha$  角越大越易拉细。当断面收缩率比较大时，容易产生拉细现象，故成形角应取较小的数值。实验证明，展宽角  $\beta$  越大，螺旋状凹痕越易产生，而中间拉细整体颈缩越不易产生。

### (四) 疏松条件



楔横轧的轧件，由于金属纤维沿零件的外形连续分布、晶粒细化等，轧后零件的质量得到提高。实践和理论都说明：横轧时，圆形毛坯在连续转动中径向小变形量压缩时，毛坯除轴向延伸外，径向也产生扩展，因而在毛坯的心部产生拉应力。当毛坯旋转时，若轴向阻力过大，毛坯横向扩展积累，心部的拉应力增加，当达到材料强度极限时，心部就出现超过允许级别的疏松甚至空腔，这是不允许的。

模具设计除遵循以上四个原则或者条件外，还应使设计出的模具所占用的周期尽可能短，以及加工制造尽可能方便等。

## 3.2 工艺参数的确定

### (一) 断面收缩率 $\psi$

断面收缩率  $\psi$  为轧件轧前面积减去轧后面积与轧前面积之比，即

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} = 1 - \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 \quad (3-3)$$

式中  $d_0$ ——轧件轧前直径； $d_1$ ——轧件轧后直径。

楔横轧一次的断面收缩率  $\psi$  一般应小于 75%，否则容易产生轧件的不旋转，螺旋颈缩甚至拉断等问题。如果轴类件产品之间相差很大，断面收缩率  $\psi$  大于 75%，一般采用在同一轧辊模具上两次楔入轧制，即每次楔入轧制的压缩率小于 75%，两次总压缩率大于 75% 的方法；在个别情况下，即采用局部堆积（毛坯直径增大）轧制的方法使断面收缩率  $\psi$  大于 75%。

对于小的断面收缩率  $\psi$ ，为避免中心疏松应选择小的展宽角与大的成形角。

所以说，楔横轧最有利的断面收缩率  $\psi$  为： $\psi = 50\% \sim 60\%$ 。在这个范围的断面收缩率，可以选择较大展宽角轧制。

### (二) 成形角 $\alpha$

断面收缩率 $\psi$ 和成形角 $\alpha$ 是楔横轧模具设计两个最重要、最基本的工艺设计参数之一。成形角 $\alpha$ 对轧件的旋转条件、疏松条件、以及轧制压力与力矩都有显著的影响。一般情况下， $\alpha$ 角越大、旋转条件越差，容易产生颈缩，但中心疏松条件改善。根据理论与实践，成形角 $\alpha$ 大多在以下范围内选择

$$18^{\circ} \leq \alpha \leq 34^{\circ}$$

断面收缩率 $\psi$ 不同时，成形角 $\alpha$ 应该选择不同的数值。一般 $\psi$ 越大，越容易产生颈缩和不旋转问题，而不易发生中心疏松，故 $\alpha$ 应选择较小值。

表 3-1 断面收缩率与成形角的关系

断面收缩率 $\psi$ /%	80~70	70~60	60~50	<50
成形角 $\alpha$ /(°)	18~24	22~33	26~32	>28

### (三) 展宽角 $\beta$

展宽角 $\beta$ 与成形角 $\alpha$ 一样，是楔横轧模具设计中最重要、最基本的工艺设计参数。展宽角 $\beta$ 对轧件的旋转条件、疏松条件、颈缩条件以及轧制压力与力矩都有显著的影响。一般情况下， $\beta$ 角越大，旋转条件越差，容易产生颈缩，轧制压力与力矩增加，但中心疏松条件改善。根据理论与实践，展宽角大多在以下范围内选择

$$4^{\circ} \leq \beta \leq 12^{\circ}$$

为了减少模具的长度，在模具设计时在允许的条件下应尽可能选取较大的 $\beta$ 角。断面收缩率 $\psi$ 对展宽角 $\beta$ 的影响比较复杂，一般情况是：

当 $\psi > 70\%$ 时，应该选择较小的 $\beta$ 值，否则容易产生缩颈；当 $\psi < 35\%$ 时，也应该选择较小的 $\beta$ 值，否则容易产生疏松。

表 3-2 断面收缩率与展宽角的关系

断面收缩率 $\psi / \%$	80~70	70~60	60~50	50~40	<40
展宽角 $\beta / (^\circ)$	4~8	5~9	7~12	5~9	<8

需要指出，对于塑性较差的材料，以及工艺上需要较低温度轧制的碳钢或低碳合金钢，轧制较小直径的轧件，由于降温快，塑性较差，在选择展宽角时应该选择较小的数值。

### 3.3 模具设计

工件成形过程草图（如图 3-1 所示）

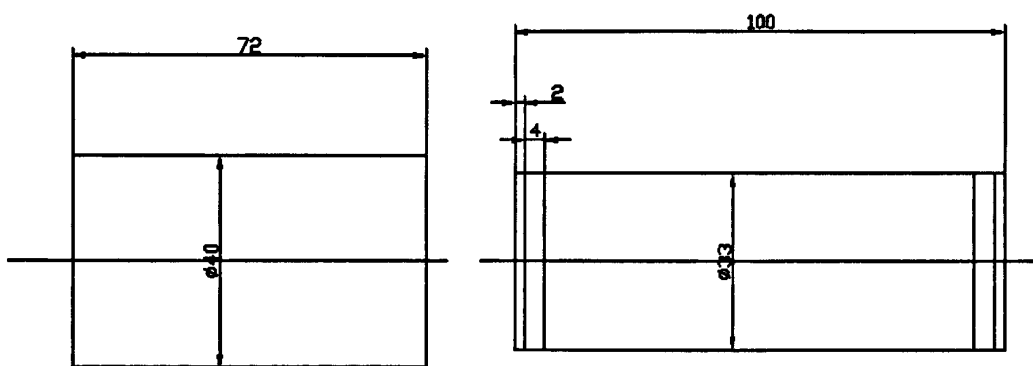


图 3-1 毛坯和工件草图

#### (1) 毛坯和坯料尺寸确定

##### 1. 毛坯尺寸

根据零件外形尺寸制定毛坯尺寸，毛坯尺寸直径  $\phi = 40\text{mm}$ ，毛坯轴向尺寸为零件轴向最大直径处单侧增加 2mm，两端需要切除料头，每端增加 4mm 加工余量。

##### 2. 坯料长度与直径的确定

###### (1) 坯料直径 $\phi_0$

$$\text{取 } \phi_0 = d_0 = 40\text{mm}$$

(2) 坯料长度  $L_0$ 

$$\begin{aligned}
 L_0 &= \frac{V}{S_0} + 2\Delta L \\
 &= \frac{\frac{\pi}{4}d^2l}{\frac{\pi}{4}d_0^2} + 2\Delta L \\
 &= \frac{33^2 \times 100}{40^2} + 2 \times 2 = 72.06\text{mm}
 \end{aligned}$$

## (2) 模具型腔设计

## 1. 热态毛坯尺寸

热态毛坯尺寸等于冷态毛坯尺寸乘以热膨胀系数，即

$$d_{\theta n} = d_n k_D \quad (3-4)$$

$$l_{\theta n} = l_n k_L \quad (3-5)$$

代入数值得：

$$d_{\theta} = dk_D = 33 \times 1.01 = 33.33\text{mm}$$

$$l_{\theta} = lk_L = 72.06 \times 1.015 = 73.14\text{mm}$$

## 2. 模具精整区型腔尺寸

模具精整区型腔尺寸由热态毛坯尺寸确定。轴向尺寸与热态毛坯尺寸一致。径向尺寸为热态毛坯最大直径处增加 1mm 深度为基圆间隙。

## (3) 模具孔型设计

## 1. 成型方案（如图 3-2 所示）

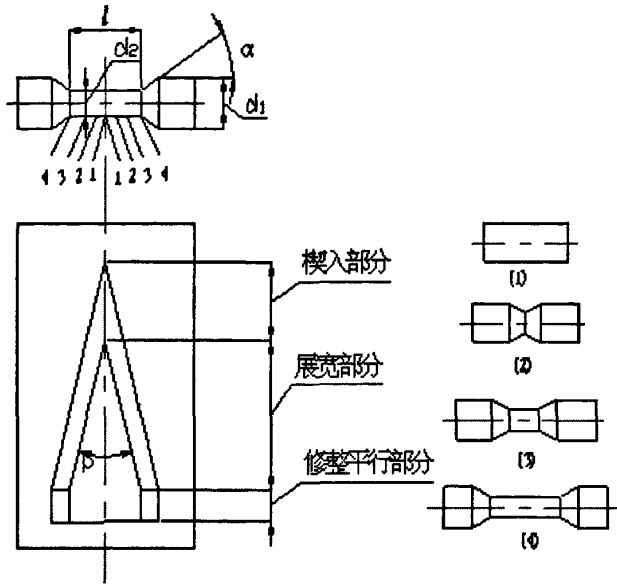


图 3-2 成形方案简图

2. 计算断面收缩率  $\psi$ ，初选  $\alpha$ 、 $\beta$

断面收缩率 
$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} = 31.9\%$$

根据断面收缩率与展宽角和成形角的关系，取

$$\beta = 7^\circ; \alpha = 30^\circ$$

3. 孔型几何尺寸计算

设已知轧辊的最大直径  $D_{\max} = 608\text{mm}$ ，此时对应轧辊半径  $R = 304\text{mm}$

1) 楔入段长度及圆心角

$$\begin{aligned} L_1 &= h_1 \cot \alpha \cot \beta \\ &= \left( \frac{d_0 - d_1}{2} K_D + \delta \right) \cot \alpha \cot \beta \\ &= \left( \frac{40 - 33}{2} * 1.01 + 1 \right) \cot 30^\circ \cot 7^\circ \\ &= 63.97\text{mm} \end{aligned}$$

式中  $\delta$  为基圆间隙，取  $\delta = 1\text{mm}$

$$\phi_1 = \frac{360L_1}{2\pi R_1} = 360 * 63.97 / 2 * 3.14 * 617 = 5.94^\circ$$

2) 楔入精整段长度与圆心角

$$L_2 = 0.5\pi d_k = 0.5 * 3.14 * 33 = 51.84\text{mm}$$

$$\phi_2 = 57.296 \frac{L_2}{R_1} = 57.296 * 51.84 / 617 = 4.81^\circ$$

3) 展宽段长度及圆心角

$$L_3 = \frac{1}{2} L_1 \cot \beta$$

$$= 63.97 * \cot 7^\circ = 260.5\text{mm}$$

$$\phi_3 = 57.296 \frac{L_3}{R_1} = 57.296 * 260.5 / 617 = 49.1^\circ$$

4) 展宽精整段长度及圆心角

$$L_4 = 0.5\pi d_k = 0.5 * 3.14 * 33 = 51.84\text{mm}$$

$$\phi_4 = 57.296 \frac{L_4}{R_1} = 57.296 * 51.84 / 617 = 9.77^\circ$$

4. 轧齐曲线计算

$$S_0 = \left( \frac{r_0^3}{3r_1^2} - r_0 + \frac{2r_1}{3} \right) \frac{1}{\tan \alpha} \quad (3-6)$$

$$S_1 = (r_0 - r_1) \cot \alpha_1 \quad (3-7)$$

将  $S_0$ 、 $S_1$  数值带入轧齐曲线方程

$$X = (S_1 + S_0) - X_1 - \frac{\tan \alpha}{r_1} X_1^2 - \frac{\tan^2 \alpha}{3r_1^2} X_1^3$$

$$Y = X \cot \beta$$

$$Z = r_1 + X_1 \tan \alpha$$

5. 成形楔加工导程计算

$$T=2\pi R \tan \beta=2*3.14*617/2*\tan 7^{\circ}=237.88\text{mm}$$

### 6. 楔横轧模具装配图

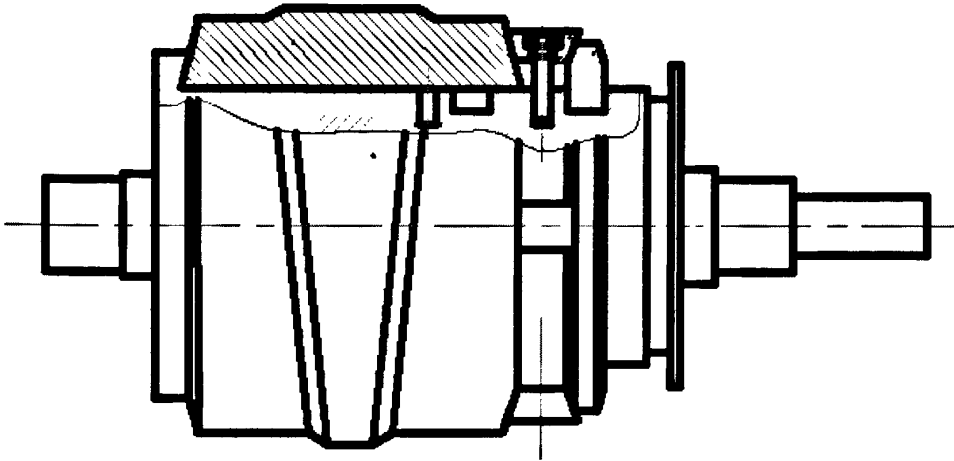


图 3-3

### 3.4 小结

由于楔横轧的楔形曲线复杂，在用 SOLID EDGE 软件建模时出现了一定的困难，最终在用扫略方法建模时尽管曲线出现一定误差，但大体上表示处楔形的特征，对其零件轧制影响不大，也能进行模拟仿真。在软件间的传输问题上，老师跟我们同学也是进行了很多很多次的摸索试验，终于找到 SOLID EDGE 与 ANSYS 间的传输转换。在解决了文件的导入问题后我们又偶然发现了其模型尺寸大小被缩小至千分之一，后又经实体放大后彻底完成了两软件间的数据传输。

## 第四章 塑性变形有限元分析

### 4.1 ANSYS10.0/LS-DYNA 的基本知识

#### 4.1.1 ANSYS 介绍

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发，它能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer, NASTRAN, Alogor, I-DEAS, AutoCAD 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 有限元软件包是一个多用途的有限元法计算机设计程序，可以用来求解结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题。因此它可应用于以下工业领域：航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统、运动器械等。

ANSYS 软件提供的分析类型如下：

- ◇ 结构静力分析
- ◇ 结构动力学分析
- ◇ 结构非线性分析
- ◇ 动力学分析
- ◇ 热分析
- ◇ 电磁场分析
- ◇ 流体动力学分析
- ◇ 声场分析
- ◇ 压电分析

软件主要包括三个部分：前处理模块，分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；

ANSYS 的前处理模块主要有两部分内容：实体建模和网格划分。



### （一） 实体建模

ANSYS 程序提供了两种实体建模方法：自顶向下与自底向上。自顶向下进行实体建模时，用户定义一个模型的最高级图元，如球、棱柱，称为基元，程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型，如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱。无论使用自顶向下还是自底向上方法建模，用户均能使用布尔运算来组合数据集，从而“雕塑出”一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算，诸如相加、相减、相交、分割、粘结和重叠。在创建复杂实体模型时，对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动、延伸和拷贝实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造、通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成、用于网格划分的硬点的建立、移动、拷贝和删除。自底向上进行实体建模时，用户从最低级的图元向上构造模型，即：用户首先定义关键点，然后依次是相关的线、面、体。

### （二） 网格划分

ANSYS 程序提供了使用便捷、高质量的对 CAD 模型进行网格划分的功能。包括四种网格划分方法：延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸网格划分可将一个二维网格延伸成一个三维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分，然后选择合适的单元属性和网格控制，生成映像网格。ANSYS 程序的自由网格划分器功能是十分强大的，可对复杂模型直接划分，避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后，用户指示程序自动地生成有限元网格，分析、估计网格的离散误差，然后重新定义网格大小，再次分析计算、估计网格的离散误差，直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；

后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流

迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

#### 4.1.2 LS-DYNA 介绍

LS-DYNA 是世界上最著名的通用显式动力分析程序，能够模拟真实世界的各种复杂问题，特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题，同时可以求解传热、流体及流固耦合问题。在工程应用领域被广泛认可为最佳的分析软件包。与实验的无数次对比证实了其计算的可靠性。

由 J. O. Hallquist 主持开发完成的 DYNA 程序系列被公认为是显式有限元程序的鼻祖和理论先导，是目前所有显式求解程序（包括显式板成型程序）的基础代码。1988 年 J. O. Hallquist 创建 LSTC 公司，推出 LS-DYNA 程序系列，并于 1997 年将 LS-DYNA2D、LS-DYNA3D、LS-TOPAZ2D、LS-TOPAZ3D 等程序合成一个软件包，称为 LS-DYNA。PC 版的前后处理采用 ETA 公司的 FEMB，新开发的后处理为 LS-POST。LS-DYNA 的最新版本是 2001 年 5 月推出的 960 版。

LS-DYNA 程序 960 版是功能齐全的几何非线性（大位移、大转动和大应变）、材料非线性（140 多种材料动态模型）和接触非线性（50 多种）程序。它以 Lagrange 算法为主，兼有 ALE 和 Euler 算法；以显式求解为主，兼有隐式求解功能；以结构分析为主，兼有热分析、流体-结构耦合功能；以非线性动力分析为主，兼有静力分析功能（如动力分析前的预应力计算和薄板冲压成型后的回弹计算）；军用和民用相结合的通用结构分析非线性有限元程序。

利用 LS-DYNA 在产品开模前，对其进行相关的模拟仿真可以很好地解决以上问题。相对于传统的试验方法，采用 LS-DYNA 对其进行虚拟仿真具有如下明显的优点：

- ◇ 减少试验次数和试验成本。
- ◇ 可以直接动态地显示整个跌落碰撞过程各种物理量的变化。
- ◇ 不仅可以观察产品的外部特性和现象，而且能观察产品的内部特征及现象。

- ◇ 边界条件方便控制，仿真的可重复性好。
- ◇ 设计初期进行模拟可及早发现产品的特性，并减少问题的产生。

## 4.2 楔横轧轧制成形模拟

楔横轧是一种高效、低耗、产品质量好的轴类零件成形新工艺、新技术，是当今先进制造技术的组成部分。

### 4.2.1 启动 ANSYN/LS-DYNA

在 ANSYN Launcher 界面中（如图 3-1 所示），选择 ANSYN Mechanical/LS-DYNA(步骤)，然后设置工作目录为刚建的目录，为 E:\毕业设计\cwr, 并输入工作名 cwr, 单击 Run 按钮，即可进入 ANSYS/LS-DYNA 的图形界面。

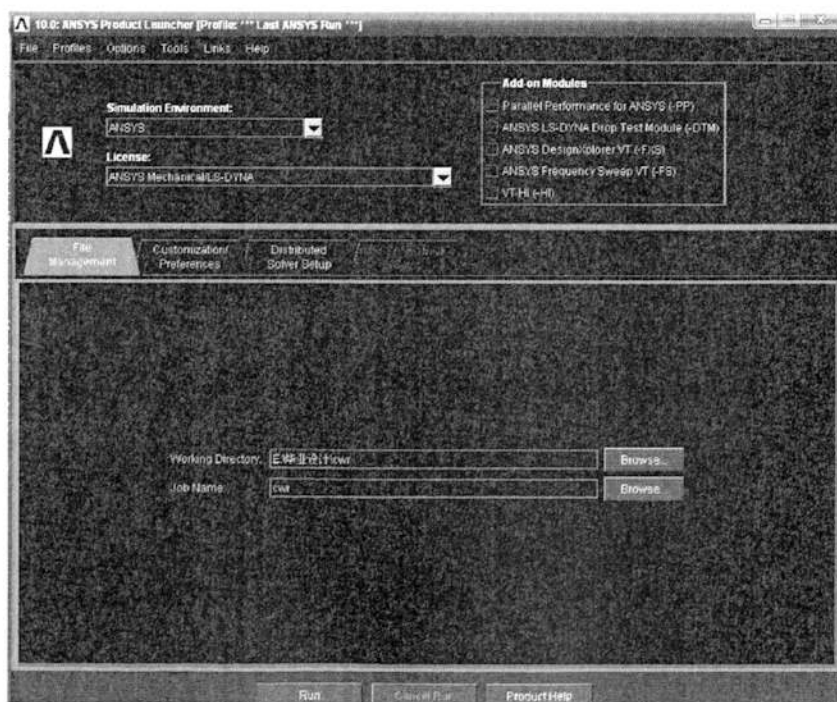


图 4-1 启动 ANSYS/LS-DYNA

### 4.2.2 导入模型

由于模具建模是在 SOLID EDGE 中完成，需进行格式转化。

在 SOLID EDGE 软件中将建模另存为，选择 PAROSOLID 类型文件；在 ANSYS 中用 File>Import>PARA... 命令，选中 cwr.x-t 文件，单击 OK 导入模型。由于软件间单位与接口问题，模型被缩小为千分之一，需放大。选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Scale>Volumes 命令，选 Picked All>Ok, 在对话框中输入 1000 倍的放大倍数（如图 4-2）。为减少网格单元数目，我们只需对工件与轧辊模具表面进行参数设置，为减少计算机运行时间，要删除模型体和相应面线单元。选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Volume Only 和 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Area and Below 命令完成体面单元的删除。

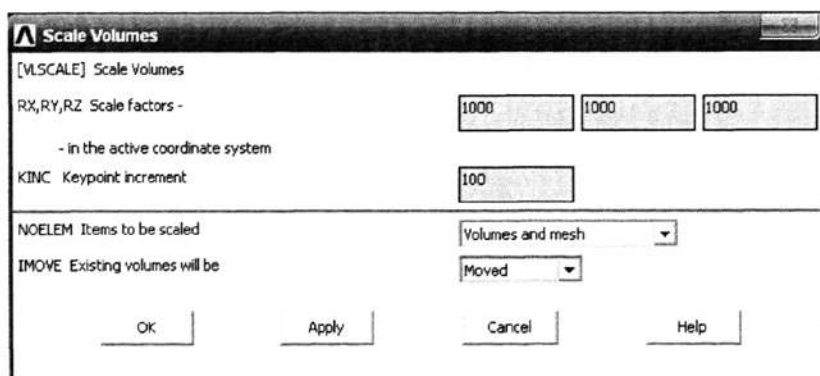


图 4-2 模型放大

### 4.2.3 定义单元类型、时常数、材料模型

根据工作要求，上下模具采用 SHELL163 壳单元，轧件则采用 SOLID164 实体单元。同时还需要定义一种 MESH200 四边形单元，它不用于求解，没有与之相关的自由度或材料特性，而仅用于网络划分。

(一) 过滤图形界面。为了简化菜单和功能，可以应用 Main Menu>Preferences 命令，在弹出的图形界面对话框中选用 LS-DYNA Explicit，单击 OK 确认（如图 4-3 所示）。

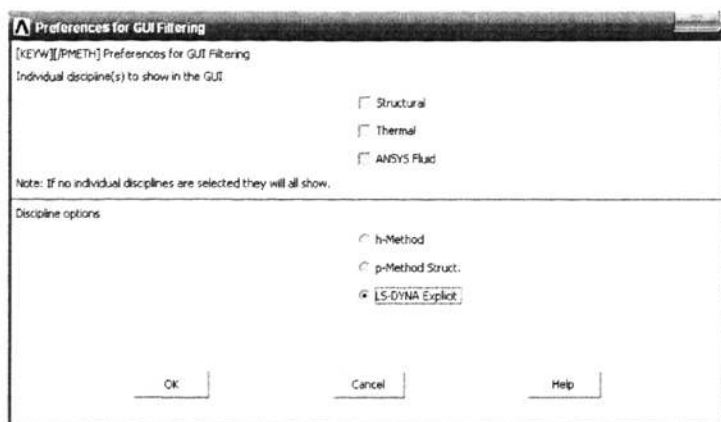


图 4-3 过滤图形界面对话框

(二) 定义单元类型。选择 Main Menu> Preprocessor>Element Type >Add/Edit /Delete 命令，在弹出对话框(图 4-4 所示)中按 Add... 按钮，弹出单元类型库对话框。在对话框的单元类型库 Library of Element Type 中分别选择 LS-DYNA Explicit、Thin Shell163 壳单元，单击 Apply 按钮即可完成 Shell163 壳单元的定义，这时该对话框的已定义单元类型 (Defined Element Types) 中会出现上述定义的单元，同样可以定义 SOLID164 实体单元和 MESH200 四边形单元。

在选择单元类型以后，还需要对 MESH200 四边形单元进行设置。在单元类型对话框中，首先选中 MESH200 四边形单元，然后单击 Options... 按钮，弹出 MESH200 四边形单元选项对话框，在单元形状下拉列表中选择 K1>QUAD 4-NODE，然后单击 OK 按钮，完成对 MESH200 四边形单元形状的设置，最后单击 Close 按钮退出单元定义类型对话框 (如图 4-5 所示)。

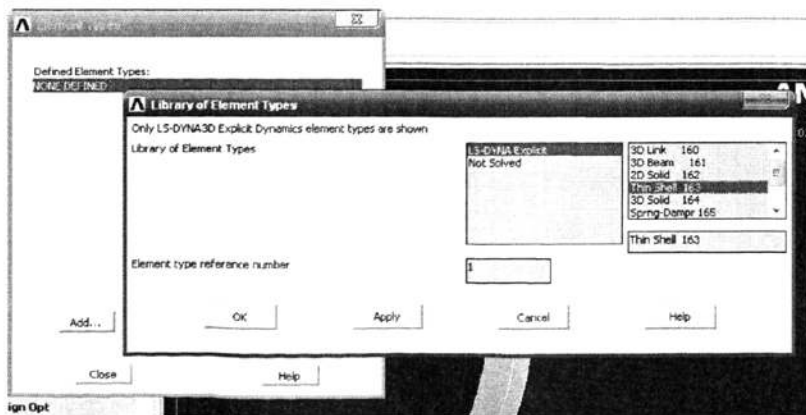


图 4-4 单元定义对话框

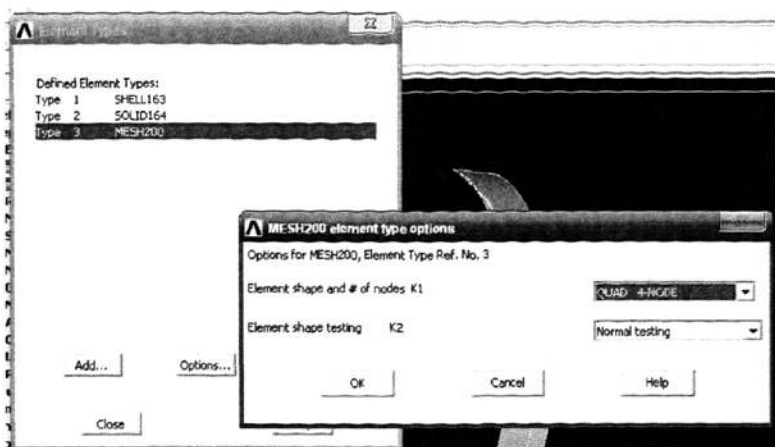


图 4-5 设置 MESH200 单元选项

(三) 定义时常数。需要定义单元的时常数，每种单元可能有好几个时常数，也可能没有时常数。对于此课题，需要定义的时常数包括剪切因子、积分点、壳厚。选择 Main Menu > Preprocessor > Real Constants 命令，在 Real Constants 对话框（如图 4-6）中单击 Add ..... 按钮，再在 Element Type for Real Contents 对话框中选中 SHELL163 壳单元并单击 OK 按钮，然后在时常数号设置框中输入实常数号，单击 OK 按钮，这时弹出壳单元的实常数设置框。分别在剪切因子、积分点数、壳厚中输入 5/6、1、1，单击 OK 按钮，即可完成外壳的壳单元实常数的定义。最后单击实常数定义对话框中的 Close 按钮退出该对话框。

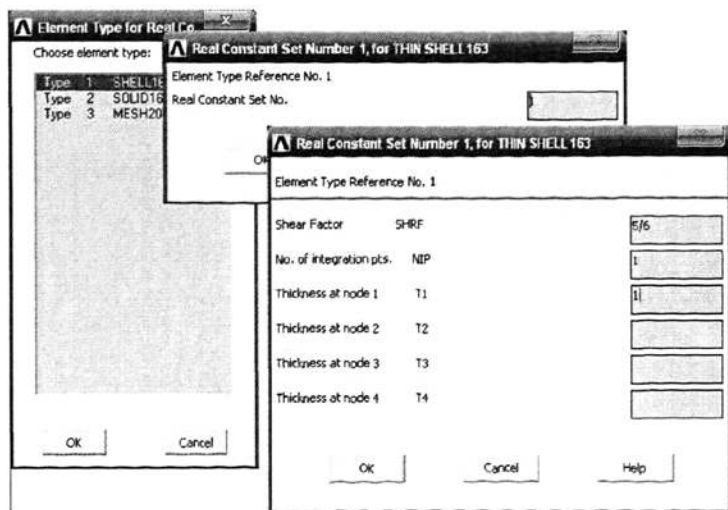


图 4-6 实常数定义框

表 4-1 真实应力-应变曲线

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
应变	0	0.05	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
应力	30.0	52.1	57.3	61.2	64.2	66.6	68.5	71.2	72.0	72.5	72.7	72.7	72.7	72.4

表 4-2 应变速率对应力的比例因子曲线

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
速率	1.0	5.0	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
因子	1.0	1.30	1.46	1.56	1.64	1.70	1.75	1.81	1.84	1.87	1.91	1.94	1.97	1.99

(四) 定义材料模型。本例中，坯料采用弹塑性与应变率相关的材料模型，而模具则定义为刚体，因此需要定义三种材料模型。

材料模型 1：上模采用刚体，且限制除 Z 方向转动外的所有自由度，因此只允许 Z 方向转动；

材料模型 2：轧件采用多段线性塑性材料模型。

材料模型 3：下模采用刚体，且限制 Z 方向转动外的所有自由度，因此只允许 Z 方向转动。

为了定义坯料材料模型，必须先定义真实应力-应变曲线（其数值对应关系见表 4-1）和应变速率对应力的比例因子曲线（其数值对应关系见表 4-2）。

(1) 定义数组。选择 Utility Menu>Parameters>Array Parameters > Define/Edit 命令，在弹出的数组对话框中单击 Add...按钮，弹出增加一个新数组参数对话框，在数组名、维数中分别 STRN、14 输入，最后单击 Apply 按钮确定应变数组的定义（如图 4-7 所示）。同样可以定义应力数值 STRN、应变速率数组 SN、应力比例因子数组 SS，它们的维数均为 14。

接下来必须对数组中的数值进行定义，在数组参数对话框中数组列表选中，沿后单击按钮，此时弹出数组数值对话框。在该对话框的数值定义区输入相应的数值，输入完十组后，按向下按钮输入其他四组数据，最后选择 File>Apply/Quit 命令确定数组 STRN 中数值的定义，并离开数值定义对话框（如图 4-8 所示）。同样可以确定 STRS、SN、SS 数组。

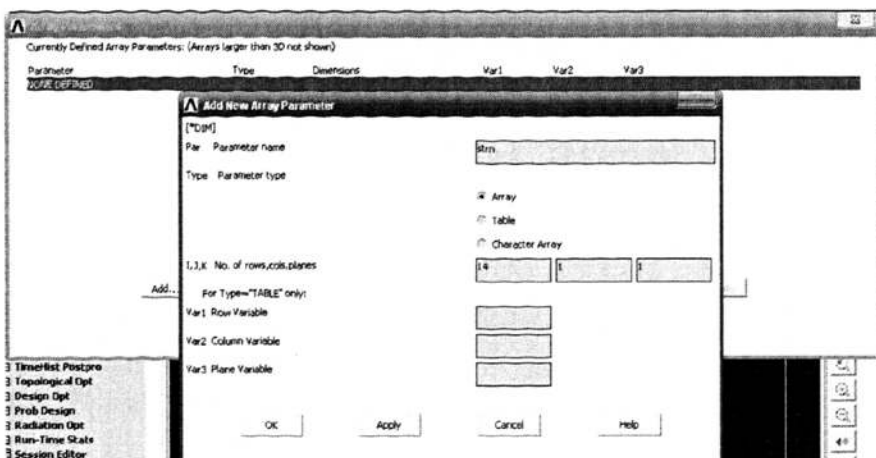


图 4-7 应变数组 STRN 的定义

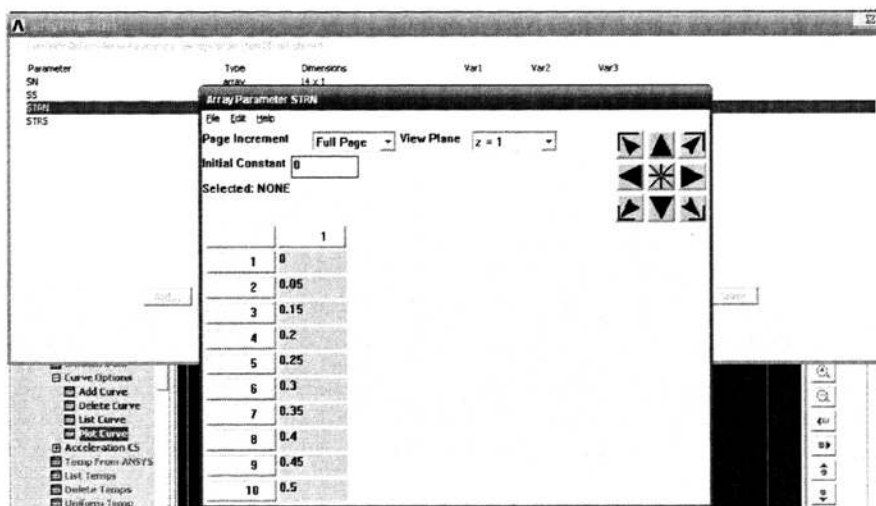


图 4-8 应变数组 STRN 中数值的定义

(2) 定义曲线。定义完各数组并输入相应的数值后，就能定义相应的曲线了。选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Curve Options>Add Curve 命令，在弹出的定义曲线对话框中的曲线 ID 号输入 1，在横坐标值、纵坐标值下拉列表中分别选择 STRN、STRS，然后单击 OK 按钮退出曲线定义对话框（如图 4-9 所示）。

定义完曲线之后，还可以通过图形显示检查刚定义过的曲线的正确性，选择命令，在弹出的对话框中选择曲线号，然后单击按钮即可。图 4-10 所示为定义过的应力-应变曲线。



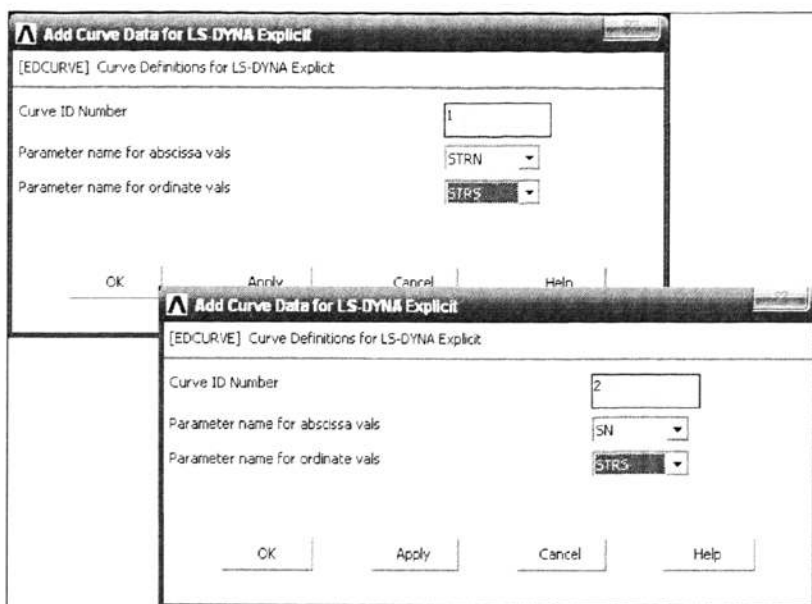


图 4-9 定义曲线

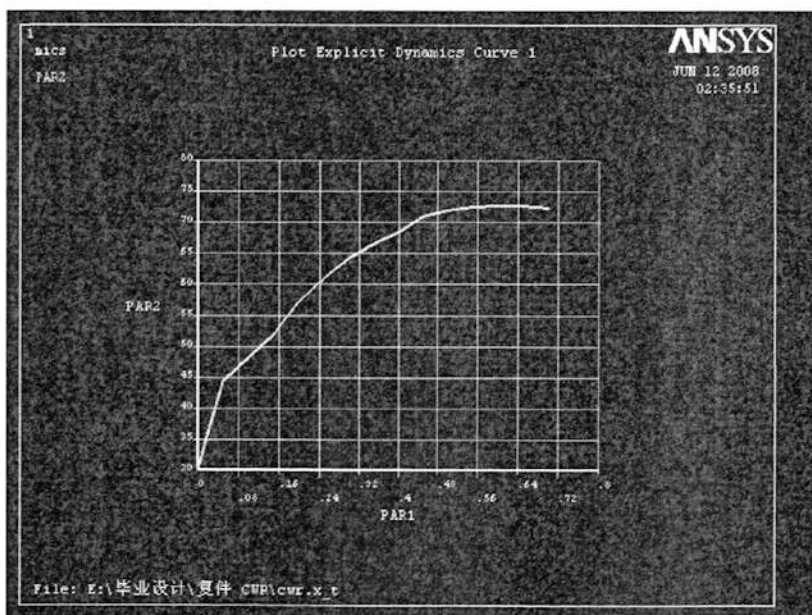


图 4-10 显示应力-应变曲线

(3) 定义上模具材料模型。选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。在该对话框中选择相应的材料类型，即刚性材料模型。然后在弹出的材料参数对话框中输入相应的参数，即质量密度 DENS 为  $7.82E-005$ 、弹性模量 EX 为  $2.10E5$ 、泊松

比 NUXU 为 0.3，并限定刚体运动的自由度，最后单击 OK 按钮，即可完成上模材料模型的定义（如图 4-11 所示）。

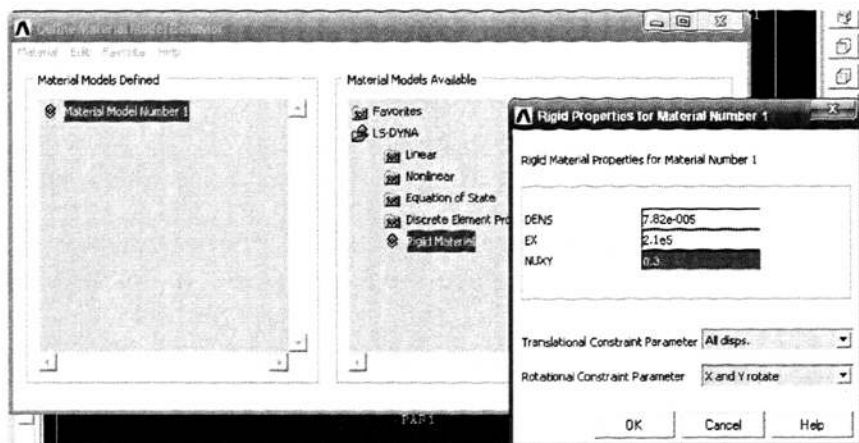


图 4-11 下模具材料模型定义

(4) 定义下模具材料模型。由于下模具的材料参数均相同，因此可以选择材料模型定义对话框中的 Edit>Copy ...，在弹出的对话框中的源材料下拉列表中选择 1，在目标材料文本中输入 2，然后单击 OK 按钮，就完成了下模具材料模型的定义（如图 4-12 所示）。

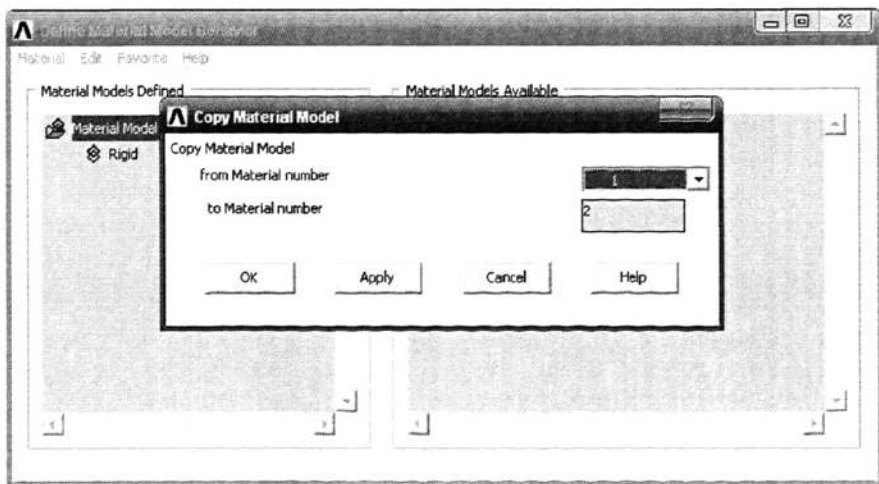


图 4-12 上模具材料模型定义

(5) 定义轧件材料模型。选择材料模型定义对话框中的 Material>New Model ... 命令，在弹出的材料 ID 号定义对话框中输入相应的材料 ID 号 3，并单击 OK 按钮，然后在材料模型定义对话框右侧的材料库中选多段线性弹塑性材料模型，并在弹出的材料参数对话框中输入相应的数值，即质量密度为 7.85E-005，

弹性模量为 90000，泊松比为 0.3，曲线参考号 LCID(1)和 LCID(2)分别为 1、2。然后单击 OK 按钮完成轧件的材料模型的定义（如图 4-13 所示）。定义完成上述材料模型后，可以选择 Material>Exit 命令，推出材料模型定义对话框。

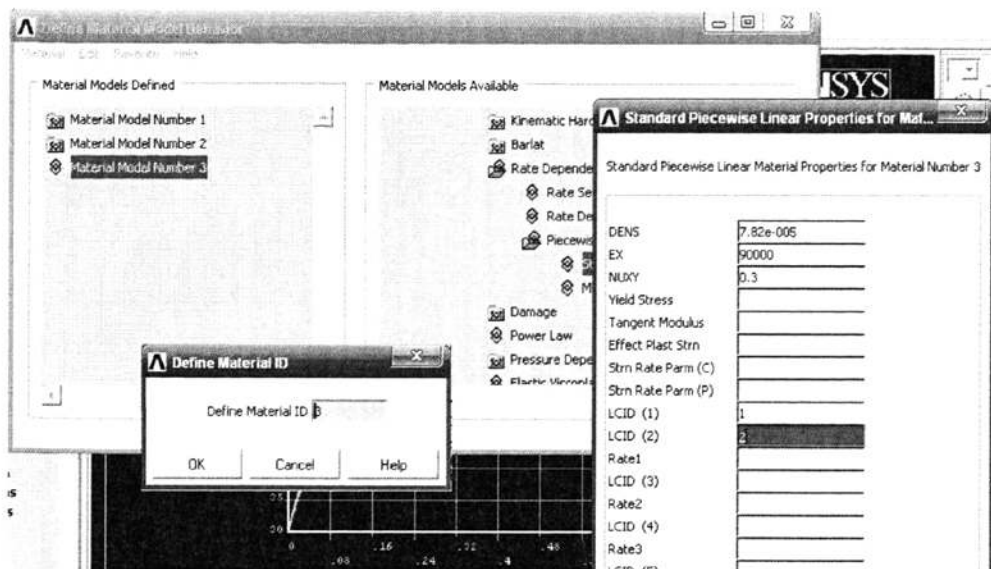


图 4-13 坯料材料模型定义

#### 4.2.4 建立模具有限元模型

##### (一) 建立下模具有限元模型

(1) 指定网格属性。执行 Main Menu>Meshing>Mesh Tool 命令，在弹出的网格工具对话框单元格属性下拉列表中选择 Areas 并单击 Set 按钮，然后在面属性拾取对话框中单击 Pick All 按钮，此时会弹出面属性设置对话框。在该对话框中，选择材料号 MAT 为 1，单元类型号 TYPE 为 1SHELL163。最后单击 OK 按钮确认面属性设置操作（如图 4-14 所示）。

(2) 网格尺寸控制。在网格工具对话框中，单击 Lines 后的 Set 按钮，然后单击线拾取框中的 Pick All 按钮，此时会弹出单元尺寸控制对话框，在该对话框的 SIZE 中输入 3，最后单击 OK 按钮确认尺寸控制设置操作（如图 4-15 所示）。

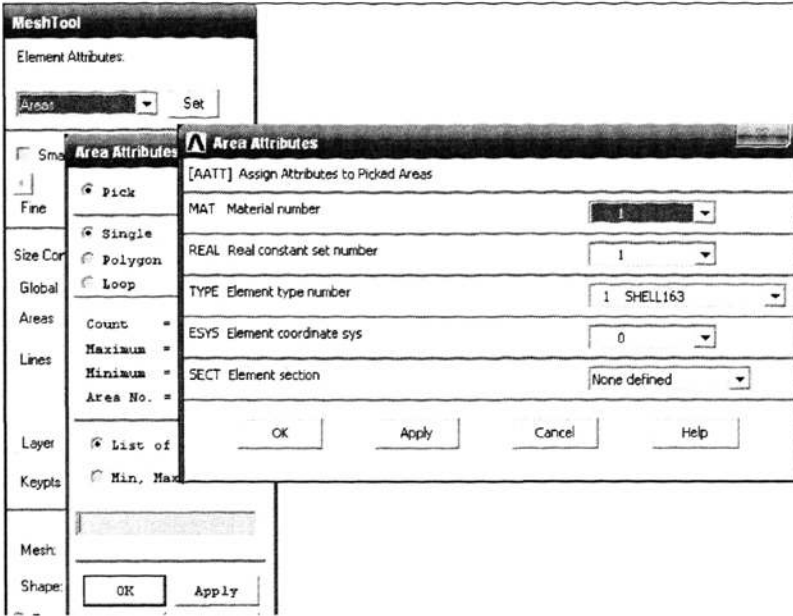


图 4-14 指定网格属性

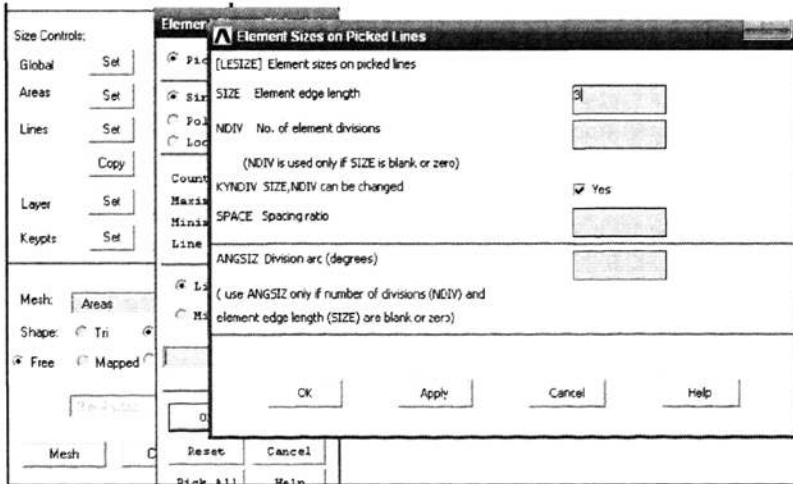


图 4-15 网格尺寸控制

(3) 划分网格。在网格工具 Mesh 下拉列表中选择 Areas，在分别设置网格形状和网格划分类型为 Quad、Free，然后单击 Mesh 按钮（如图 4-16 所示）。最后在弹出的面选取对话框中单击 Pick All 按钮，就完成了下模具的网格划分。

最后单击 Close 按钮退出网格划分工具对话框，确认基圆网格的划分。



图 4-16 划分网格

## (二) 生成上模具有限元模型

由于上下模具的对称性，可以将下模具镜像后移动至其中心处。但如果直接镜像面会改变面的方向，从而导致因接触错误而产生负体积使得计算终止。因此，本例中直接对节点和单元进行旋转和移动操作。

(1) 旋转下模具。由于 ANSYS/ LS-DYNA 不直接提供旋转功能，因此需要在柱坐标系下间接来实现旋转操作。选择 Utility Menu>Work Plane>Change Active CS to>Global Cylindrical 命令，将坐标系改为柱坐标系。

执行 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Nodes>Copy 命令，在弹出的复制节点对话框中单击 Pick All 按钮。特别值得注意的是，应记下该对话框中显示的节点最大值，用于节点和单元的复制移动。此时会弹出新的节点复制对话框，在 DY 设置框中输入旋转的角度值 180，在 INC 设置框中输入 20000，为方便后续操作该值可取上面记录的最大值后面的一个整数。最后单击 OK 按钮完成节点的旋转工作（如图 4-17 所示）。

完成了旋转节点的操作之后，接下来要完成相应的单元旋转操作。选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Elements>User Numbered 命令，在弹出的单元复制对话框中单击 Pick All 按钮，同节点类似，记下该对话框的中显示的单元最大值。此时会弹出新的单元复制对话框，在 IINC、INC 设置框中均输入 20000，该值可取上面记录的最大值后面的一个整数，这样可以方便后续操作。最后单击 OK 按钮完成单元的旋转操作（如图 4-18 所示）。

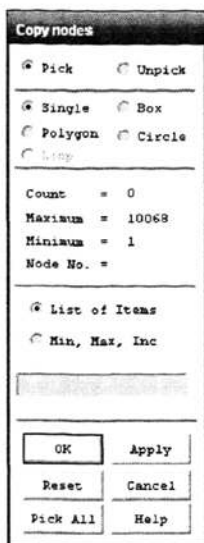


图 4-17 旋转模具上的节点

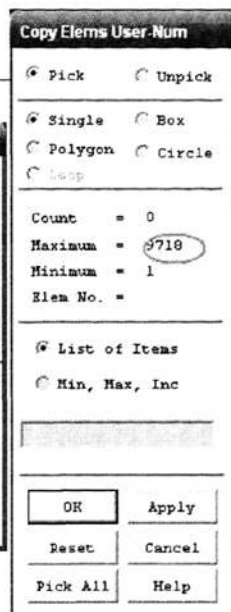
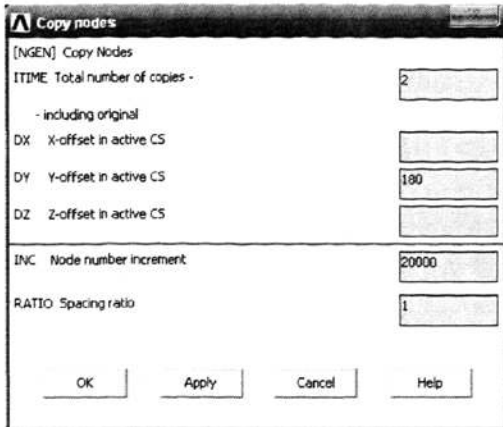


图 4-18 旋转模具上的单元

(2) 移动并生成上模具。移动操作必须还在笛卡尔坐标系下完成，为此必须首先将坐标系统转换为笛卡尔坐标系，执行 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cartesian 命令可完成坐标系统的转换操作。

执行 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Nodes>Copy 命令，弹出复制节点拾取框，在 Min, Max, Inc 文本框中输入 20001, 30068, 1，然后单击 OK 按钮。特别值得注意的是，记下该对话框中显示的节点最大值，它十分有用。此时会弹出新的节点复制对话框，在 DY 设置框中输入 657，该值即为两轧辊之间的中心距，在 INC 设置框中输入 40000，该值取上面记录的最大值后面的一个整数的两倍，这样可以方便后续的操作，最后单击 OK 按钮完成节点的移动工作（如图 4-19 所示）。

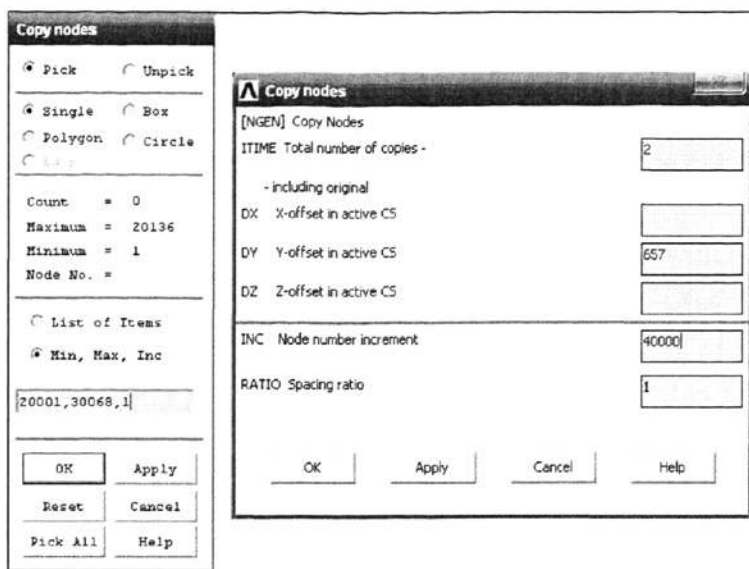


图 4-19 移动模具上的节点

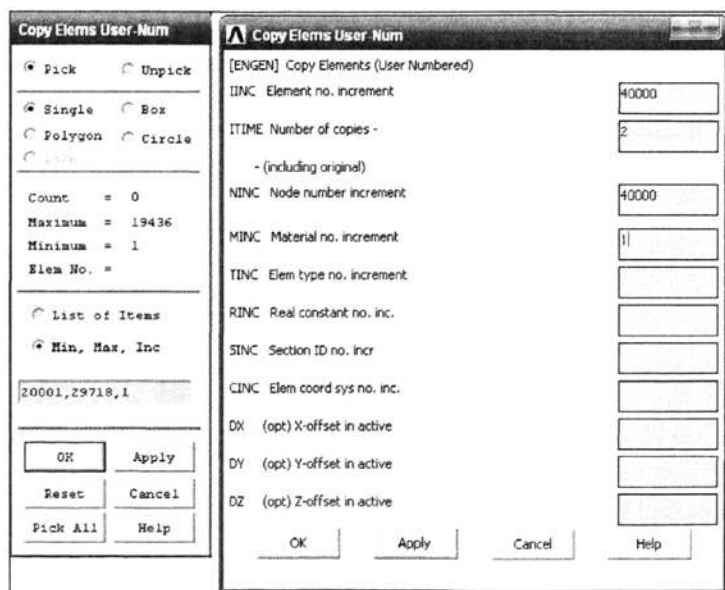


图 4-20 移动模具上的单元

完成了旋转节点的操作以后，接下来就要完成相应的单元旋转操作了。选择 Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Elements>User Numbered 命令，弹出复制单元拾取框，在 Min, Max, Inc 文本框中输入 20001, 29718, 1，然后单击 OK 按钮，同节点类似，记下该对话框中显示的单元最大值，它十分有用。此时会弹出新的单元复制对话框，在 IINC、INC 设置框中均输入 40000，该值均取上面记录的最大值后面的一个整数两倍，在 MINC 设置框中输入 1，最后单击 OK 按钮完成单元

的移动和材料号的修改操作（如图 4-20 所示）。

(3) 删除过渡单元和节点。选择 Main Menu >Preprocessor >Modeling >Delete >Elements 命令,在弹出的对话框中的 Min, Max, Inc 文本框中输入 20001, 33181, 1, 然后单击 OK 按钮删除过渡单元。

选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Nodes 命令,在弹出的对话框中的 Min, Max, Inc 文本框中输入 20001, 33424, 1, 然后单击 OK 按钮删除过渡节点。

### (三) 轧件有限元模型的建立

(1) 移动工作平面至轧件中心处。在进行操作之前,为了使得图形显示区易于操作,可以选择 Utility Menu>Polr>Areas 命令,对图形进行适当缩放从而给后续操作带来方便。

执行 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments 命令,在弹出的移动工作平面对话框的 X、Y、Z Offsets 文本框中输入 0, 328.5, 0 (其中 Y 值即为两轧辊之间中心距的一半),并单击 OK 按钮(如图 4-21 所示)

(2) 建立拖拉基面有限元模型。选择 Main Menu >Preprocessor >Modeling >Create>Areas>Circle>Solid Circle 命令,在弹出的对话框中的 Radius 文本框中输入轧件的半径 20,并单击 Ok 按钮确认(如图 4-22 所示)。

由于后续的操作大部分都是和刚建立的基面有关,因此可以选中他,选择 Utility Menu>Select>Entities 命令,在弹出的实体对话框中实体对象类型下拉列表中选择 Areas,然后单击 OK 按钮,并在图形显示区选中刚建立的基面,然后单击面选择对话框中的 OK 按钮确定选择操作。接着执行 Utility Menu>Select>Everything Below>Selected Areas 命令,可以发现图形显示区只有基面了(如图 4-23 所示)。



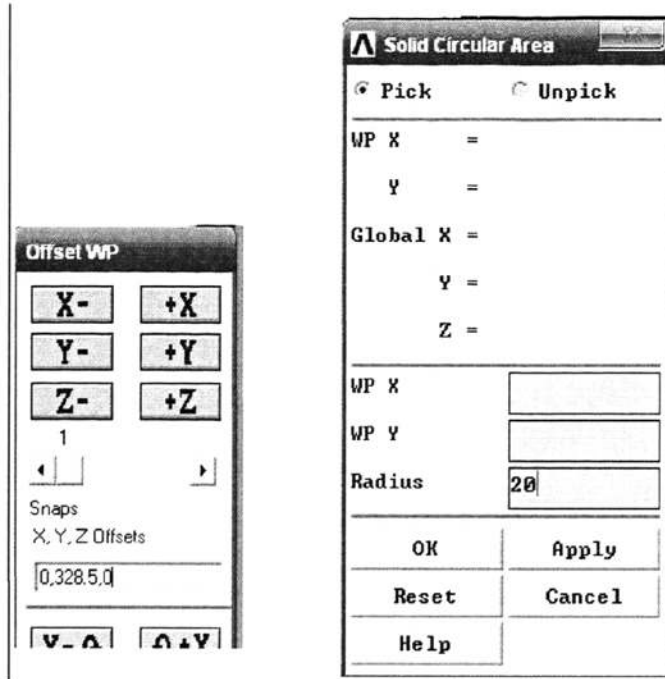


图 4-21 移动工作平面

图 4-22 创建软件

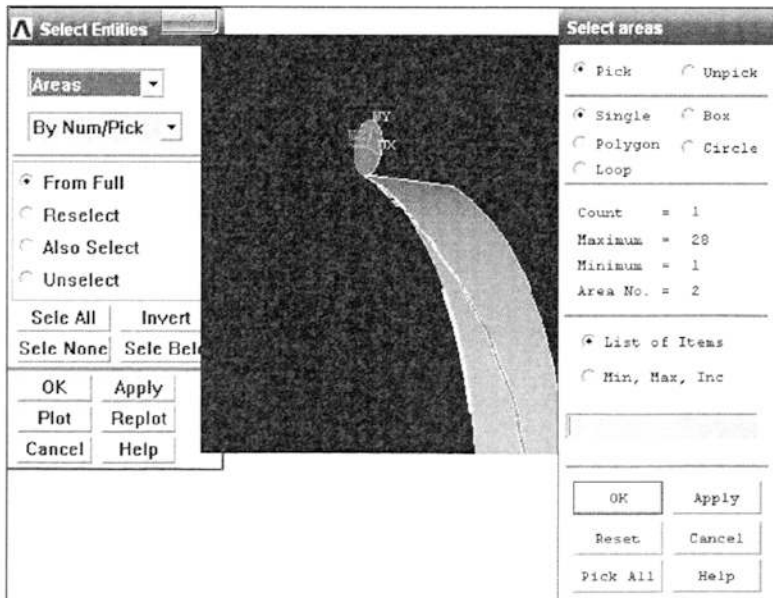


图 4-23 选择软件截面圆

(3) 对圆进行分割。执行 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments 命令，在弹出的移动工作平面对话框的 XY, YZ, ZX Angles 文本框中输入 0,90,0,并单击 Ok 按钮。执行 Main Menu >Preprocessor >Modeling > Operate >Booleans>Divide>Area by WorkPlane 命令，单击用工作面切分对话框中的 Pick

All 按钮选中基面，然后单击 OK 按钮确认切分操作。

执行 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increment 命令，在弹出的移动工作平面对话框的 XY, YZ, ZX Angles 文本框中输入 0, 0, 90，并单击 Ok 按钮（如图 4-24 所示）。执行 Main Menu >Preprocessor >Modeling >Operate >Booleans >Divide>Area by WorkPlane 命令，单击用工作面切分对话框中的 Pick All 按钮选中基面，然后单击 OK 按钮确认切分操作。

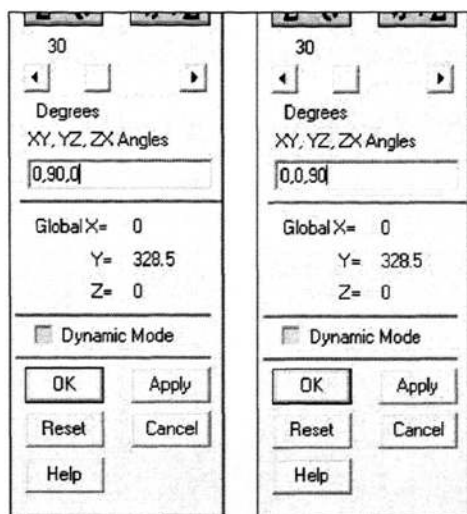


图 4-24 旋转工作平面

(4) 指定轧件截面圆属性。执行 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Meshing >MeshTool 命令，弹出网格工具对话框，在单元属性下拉列表中选择 Areas 并单击 Set 按钮，然后在面属性拾取对话框中单击 Pick All 按钮，此时弹出的面属性 设置对话框。在该对话框中，选择材料号 MAT 为 3，单元类型号 TYPE 为 3MESH200。最后单击 OK 按钮确认属性设置操作（如图 4-25 所示）。

(5) 网格尺寸控制。在网格工具对话框中，单击 Lines 后的 Set 按钮，然后单击线拾取框中的 Pick All 按钮，此时会弹出单元尺寸控制对话框，在该对话框的 NDIV 中输入 20，最后单击 OK 按钮确认尺寸控制设置操作（如图 4-26 所示）。

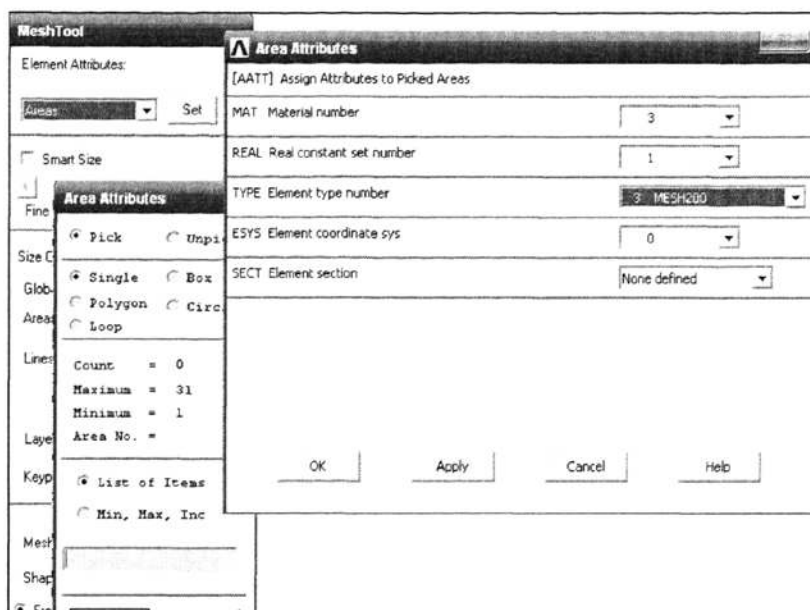


图 4-25 指定软件截面圆属性

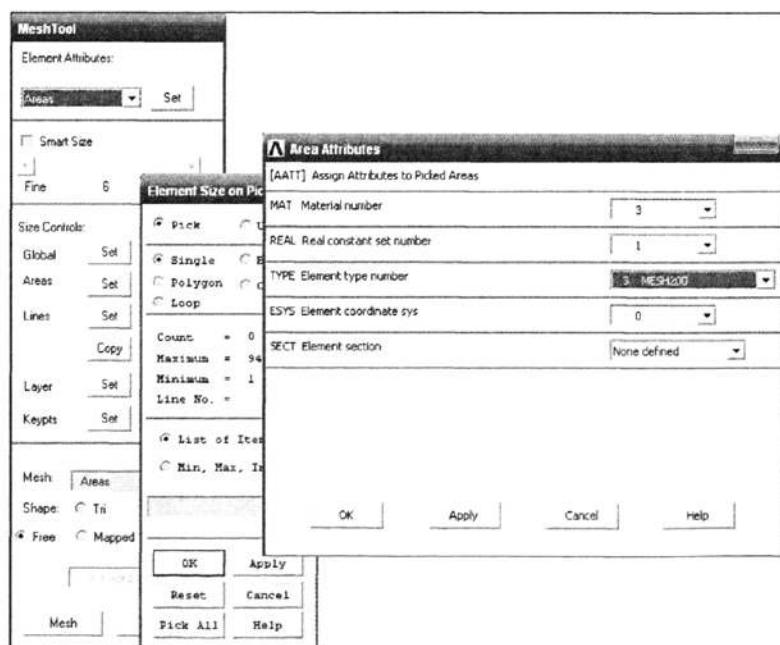


图 4-26 网格尺寸控制

(6) 划分网格。在网格工具 Mesh 下拉列表中选择 Areas，再分别设置网格形状和网格划分类型为 Quad、Mapped，然后单击 Mesh 按钮(如图 4-27 所示)。最后在弹出的面选取对话框中单击 Pick All 按钮，就完成了基面的网格划分。最后单击 Close 按钮退出网格划分工具对话框，确认基圆网格的划分。



图 4-27 划分软件截面圆网格

(7) 设置拖拉选项。在进行拖拉网格之前，要对拖拉进行一些必要的设置。选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Elem Ext Opts 命令，弹出单元拖拉选项对话框。在该对话框的 TYPE 的下拉列表中选择 2SOLID164 单元，在 MAT 下拉列表中选择 3，在 VAL1 中输入 35，并选中 ACLEAR 选项。最后单击 OK 按钮确认设置操作（如图 4-28 所示）。

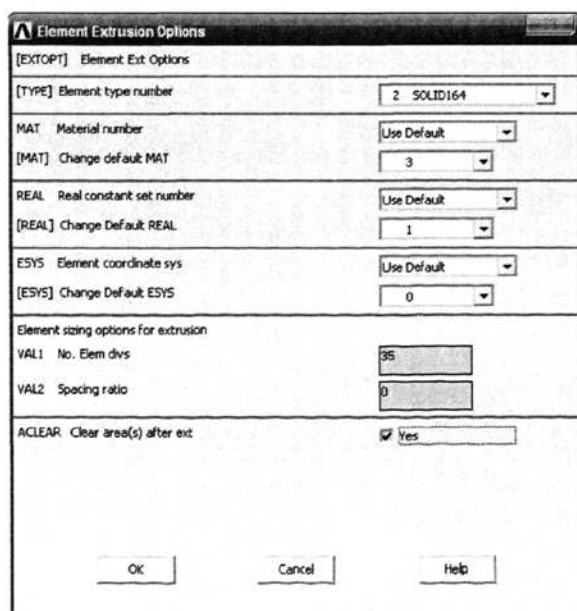


图 4-28 设置拖拉选项

(8) 拖拉基面。选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas>Along Normal 命令，在图形显示区中选择其中一个面，然后单击 Extrude Areas along Normal 拾取框中的 OK 按钮，此时会弹出 Extrude Areas along Normal 拾取框，在该对话框的 DIST 中输入 36，并单击 OK 按钮确认拖拉操

作。同样，可以依次完成所有基面的网格拖拉操作（如图 4-29 所示）。

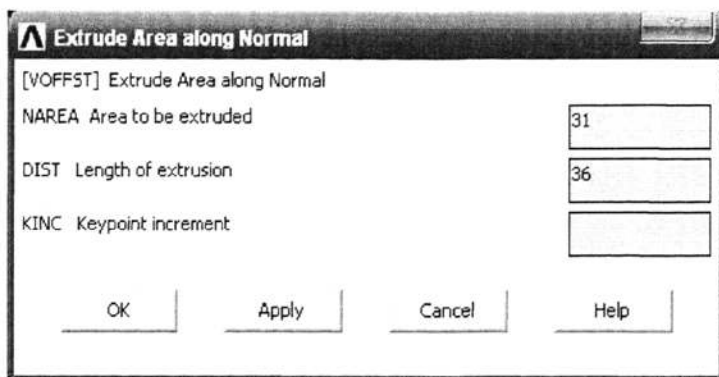


图 4-29 拖拉网格生成软件模型

(9) 合并压缩节点、单元、关键点。选择 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Merge Items 命令，在弹出对话框的 Label 下拉列表中选择 Nodes，并单击 Apply 按钮以合并节点。同样依次合并关键点 Keypoints 和单元 Element，最后单击 Ok 按钮退出该对话框（如图 4-30 所示）。

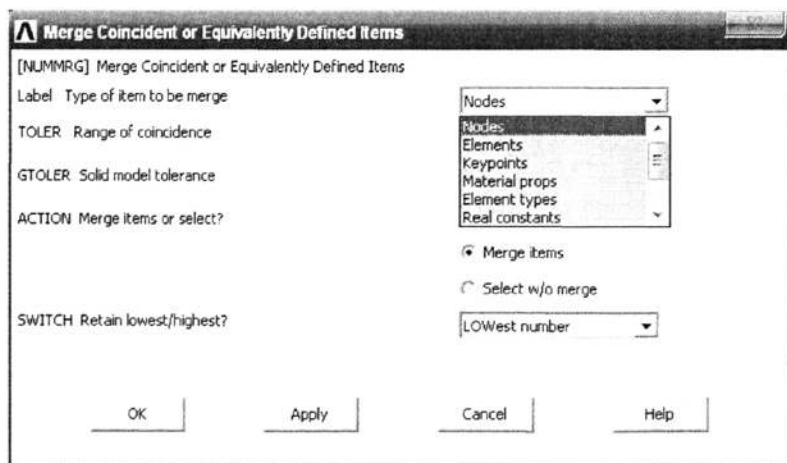


图 4-30 合并图元

(10) 创建软件柱面的节点组。执行 Utility Menu>Select>Entitls 命令，弹出实体对象类型下拉列表中选择 Areas、By Unm/Pick，并单击 OK 按钮。然后在图形选择显示区选择软件四个表面，最后单击面选择对话框中的 OK 按钮确认选择（如图 4-31 所示）。

然后执行 Utility Menu>Select>Entitls 命令，在弹出的实体选择对话框中依次设置为 Node、Attached to、Areas、all、Reselect，最后单击 OK 按钮确认

(如图 4-32 a 所示)。

为了检查节点是否选择正确, 可以选择 Utility Menu>Plot>Nodes 命令, 以便显示刚选择的节点 (如图 4-32 b 所示)。

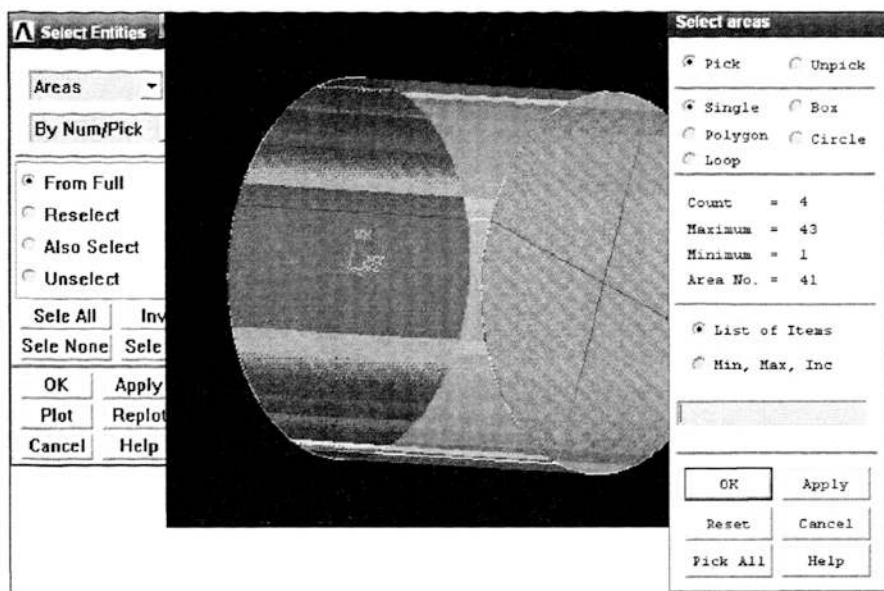
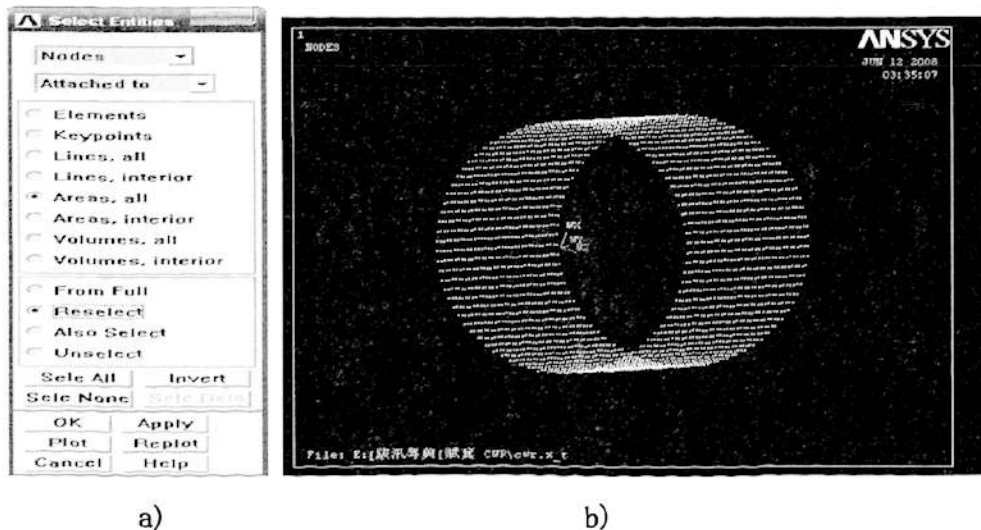


图 4-31 选择软件四个柱面

最后执行 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component 命令, 在弹出的创建组件对话框中的 Cname 文本框中输入 worksurf, 在 Entity 下拉列表中选择 Nodes。最后单击 OK 按钮, 完成节点组件的创建, 如图 4-33 所示。



a)

b)

图 4-32 选择软件柱面节点组件

在创建完轧件表面节点组件以后，还必须通过 Utility Menu >Select > Everything 命令恢复整个模型的全部实体对象选择。

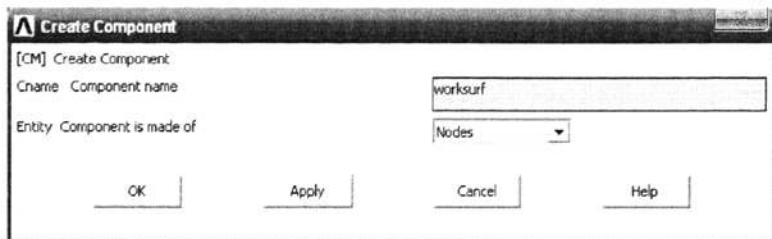


图 4-33 创建轧件柱面节点组

#### 4.2.5 定义接触

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Option>Parts Option, 在弹出的对话框中选择 Create All Parts 项, 然后单击 OK 按钮创建 Parts。选择 Main Menu>LS-DYNA Option>Contact>Define Contact 命令, 弹出 Contact Parameter Definitions 对话框, 在 Contact Type 列表框中选择 Surface to Surf 和 Automatic (ASTS), 即自动接触类型, 在 Static Friction Coefficient 和 Dynamic Friction Coefficient 文本框中分别输入 0.45、0.3, 最后单击 OK 按钮确认, 此时会弹出 Contact Options 对话框。在该对话框中的 Contact Component or Part no 下拉列表中选择 WORKSURF, 即轧件柱面, 在 Target Component or Part no 下拉列表中选择 1, 即下模具, 最后单击 OK 按钮, 完成轧件和模具之间的接触定义 (如图 4-34 所示)。

同样可以定义轧件与上模具之间的接触, 此时 Target Component or Part no. 选择 2, 即上模具, 其他参数相同。

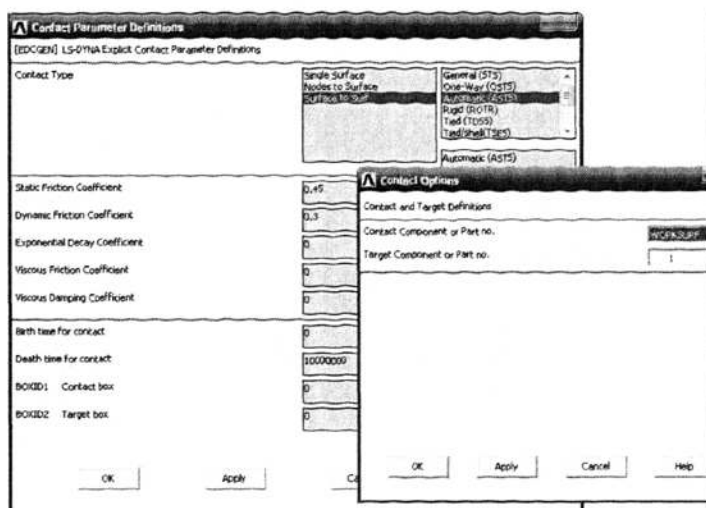


图 4-34 定义接触

#### 4.2.6 定义约束

(一) 约束轧件回转轴。选择 Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Option > Constraints > Apply > On Lines 命令，在图形显示区域选择轧件回转中心轴，然后单击 Apply U, ROT on Lines 拾取框中的 OK 按钮，在弹出的 Apply U, ROT on Lines 对话框中的 Lab2 列表选择 UX，在 Apply as 下拉列表中选择 Constant value，在 VALUE 文本框中输入 0，然后单击 Apply 按钮确认（如图 4-35 所示）。

同样可以约束 UY、ROTX、ROTY 方向的运动，最后单击 OK 按钮退出 Apply U, ROT on Lines 对话框。

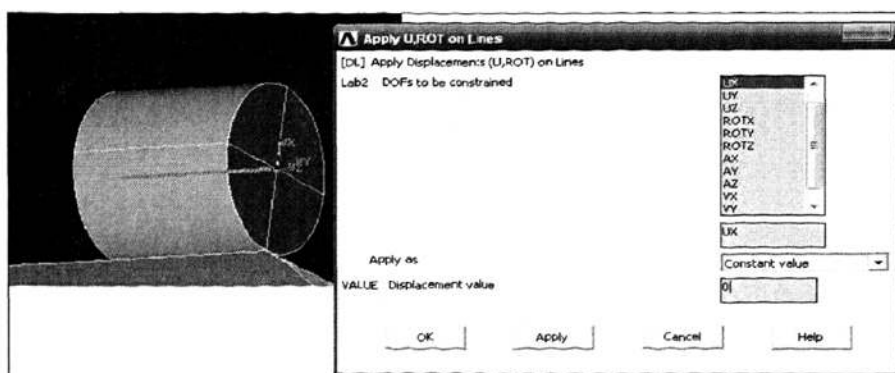


图 4-35 约束轧件回转轴



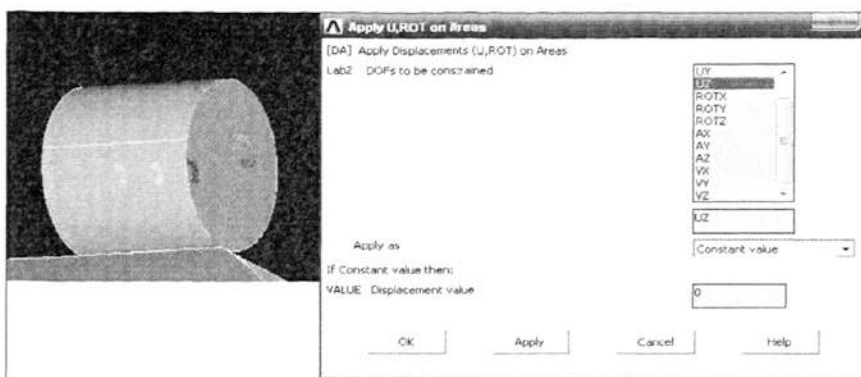


图 4-36 约束软件对称面

(二) 约束软件对称面。选择 Main Menu > Preprocessor > LS—DYNA Option > Constraints > Apply > On Areas 命令，在图形显示区域选择软件的对称面，然后单击 Apply U, ROT on Areas 拾取对话框中的 OK 按钮，在弹出的 Apply U, ROT on Areas 对话框中的 Lab2 列表中选择 UZ，在 Apply as 下拉列表中选择 Constant value，在 VALUE 文本框中输入 0，然后单击 Apply 按钮确认（如图 4-36 所示）。同样方法完成约束 ROTX、ROTY 方向的运动，最后点击 OK 按钮约束对话框。

#### 4.2.7 定义载荷

(一) 定义载荷数组。选择命令 Utility Menu>Parameters>Array Parameters>Define/Edit 命令，在弹出的数组对话框中单击 Add  $\bullet\bullet$  按钮，弹出增加一个新数组参数对话框，在数组名、维数中分别输入 CTIME, 2，最后单击 Apply 按钮确定应变数组的定义，如图所示。接下来对数组中的数值进行定义，在数组参数对话框中数组列表中选中，沿后单击按钮，此时弹出数组数值对话框。在该对话框的数值定义区输入相应的数值，最后选择 File>Apply/Quit 命令确定数组 CTIME 数值的定义，并离开数值定义对话框。同样方法完成对 RBOZ 数组的定义。其时间-位移数值见表 4-3。

表 3-3 时间-位移数值取值

No	CTIME	RBOZ
1	0	1.57
2	1.34	1.57

(二) 施加载荷。选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Option>Loading Option>Specify Loads 命令, 弹出 Specify Loads for LS-DYNA Explicit 对话框, 在 Load Options 下拉列表中选择 Add Loads, 在 Load Labels 列表中选择 RBOZ, 在 Component name or PART number 下拉列表中选择 1, 在 Parameter name for time values 下拉列表中选择 CTIME, 在 Parameter name for date values 下拉列表中选择 RBOZ, 最后单击 OK 完成载荷的施加操作 (如图 4-37)。同样的方法完成上模具载荷的定义。

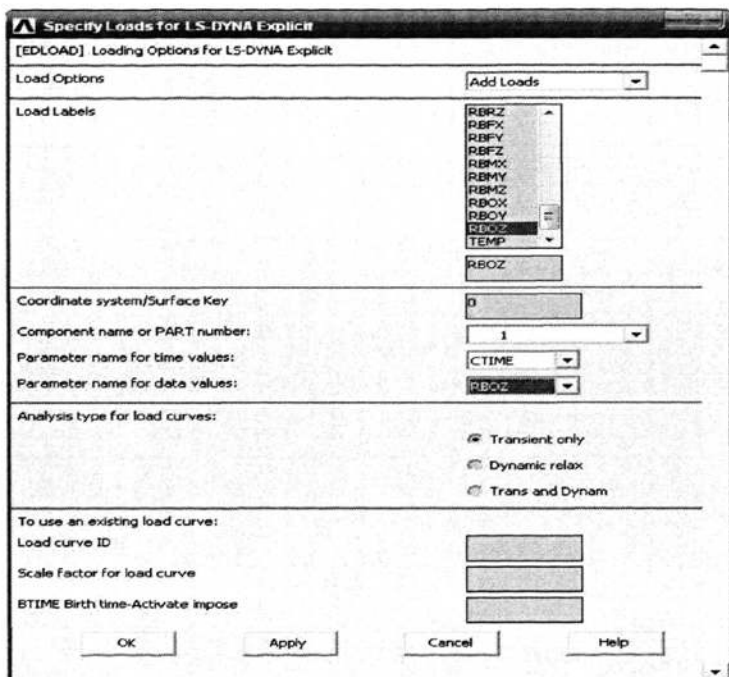


图 4-37 施加载荷对话框

#### 4.2.8 定义模具的质量中心

为了使模具能绕旋转轴运动, 还必须定义上下模具的质量中心。

(一) 定义载荷数组。选择 Utility Menu>Array Parameters>Define/Edit 命令, 在弹出的 Array Parameters 对话框中, 单击 Add... 按钮, 弹出 Add New Array Parameters 对话框, 在 Parameter name 文本框中输入 LCVECT, 在 Parameters type 一栏中选择 Array, 在 No. of rows, cols, planes 文本框中依次输入 3、1、1,

最后单击 Apply 按钮确认 LCVECT 数组的定义。此时还会弹出 Array Parameters 对话框, 在该对话框中 Parameter name 文本框中输入 UCVECT, 在 Parameters type 一栏中选择 Array, 在 No. of rows, cols, planes 文本框中依次输入 3、1、1, 最后单击 OK 按钮确认 UCVECT 数组的定义。

然后选中 Array Parameters 对话框中 Currently Defined Array Parameters 列表中的 LCVECT 项并单击 Edit 按钮, 弹出 Array Parameter LCVECT 对话框, 在文本框中输入 LCVECT 的数值, 其值见表 4-4. 然后选择该对话框中的 File/Apply/Quit 命令, 即完成 LCVECT 数组的赋值。采用类似的操作可以为 LCVECT 数值赋值, 其值见表 4-4. 最后单击 Close 按钮, 关闭 Array Parameters 对话框。

表 4-4 上下模具质量中心坐标值

No	LCVECT	UCVECT
1	0	0
2	0	657
3	0	0

(二) 选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Define Inertia 命令, 在弹出的 Part inertia Define 对话框的 PART number 下拉列表中选择 1, 在 TM 文本框中输入 50. 在 INRT\_Vect inertia vector 单选列表中选择 Define 选项, 然后单击 OK 按钮, 此时弹出新的 Part inertia Define 对话框。在 Define Inertia Vector 文本框中输入 LI, 在 Ixx, Ixy, Ixz 文本框中输入分别输入 100、0、0, 在 Iyy, Iyz, Izz 文本框中输入分别输入 100、0、100, 并选中 Define Coordinate Vector 的 Select 选项, 然后单击 OK 按钮, 弹出 Part Inertia Definition 对话框。在 Select Coordinate Vector 单选列表中选择 LCVECT, 最后单击 OK 按钮确认 (如图 4-38 所示)。

以上定义了下模具的转动中心。同样的方法, 可以完成上模具转动中心的定义, 此时在应在 PART number 下拉列表中选择 2, 在 Define Inertia Vector 文本框中输入 UI, 在 Select Coordinate Vector 下拉列表中选择 UCVECT, 其他参数相同。

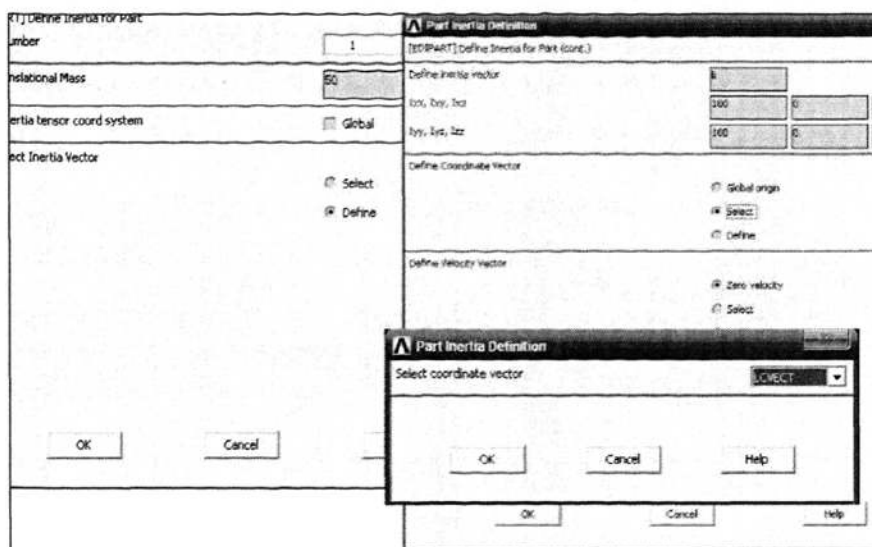


图 4-38 定义模具的质量中心

#### 4.2.9 求解控制与求解

(一) 设置分析时间。执行 Main Menu>Solution>Time Controls>Solution Time 命令，在弹出的 Solution for LS-DYNA Explicit 对话框的 TIME 文本框中输入 1.33，然后单击 OK 按钮确认（如图 4-39 所示）。

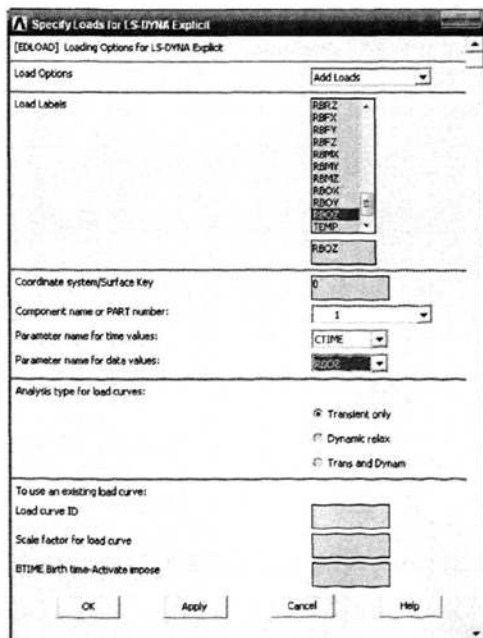


图 4-39 设置求解时间

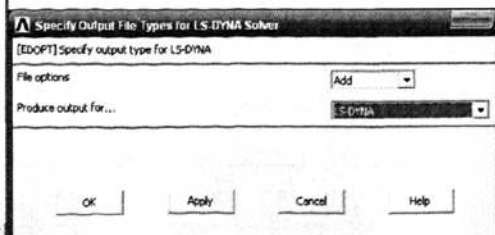


图 4-40 设置结果文件输出类型

(二) 设置结果文件输出类型。执行 Main Menu>Solution>Output Controls>Output File Type 命令，弹出 Specify Output File Types for LS-DYNA Solver 对话框，设置输出文件的格式为 LS-DYNA，然后单击 OK 按钮确认（如图 4-40 所示）。

(三) 设置结果文件输出步数。选择 Main Menu>Solution>Output Controls>File Output Freq>Number of Steps 命令，弹出 Specify File Output Frequency 对话框，输入二进制结果文件输出步数为 100，时间历程文件输出步数为 100，重启动文件输出步数为 1，最后单击 OK 按钮确认（如图 4-41 所示）。

(四) 能量控制。选择 Main Menu>Solution>Analysis Options>Energy Options 命令，弹出 Energy Options 对话框，激活 Stonewall Energy、Hourglass Energy 和 Sliding Interface、Rayleigh Energy 单选项，并单击 OK 按钮确认（如图 4-42 所示）。

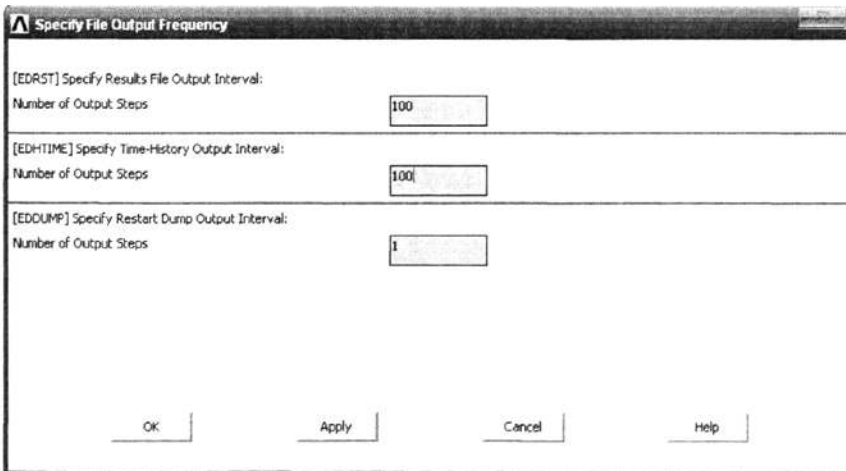


图 4-41 设置结果文件输出类型

(五) 计算内存大小控制。选择 Main Menu>Solution>Analysis Options>Restart Options 命令，弹出 Restart Options for LS-DYNAExplicit 对话框，在 words of memory requested 文本框中输入 100000000，并单击 OK 按钮确认（如图 4-43 所示）。

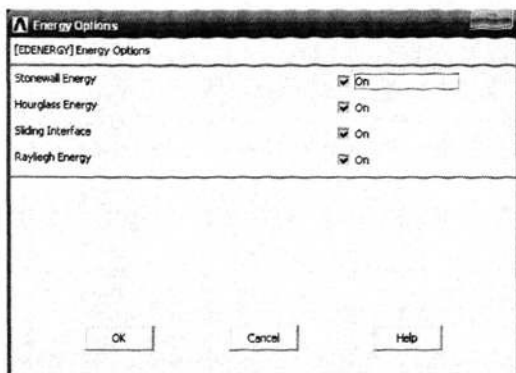


图 4-42 能量控制对话框

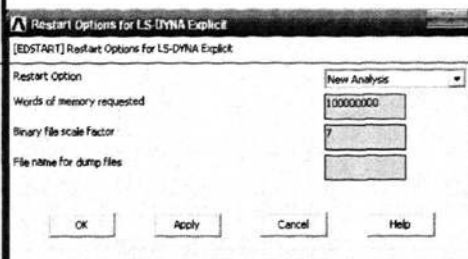


图 4-43 内存大小对话框

(六) 沙漏控制。选择 Main Menu>Solution>Analysis Options> Hourglass Ctrl>Local 命令，弹出的 Define Hourglass Material Properties 对话框，在 VAL1 文本框中输入 4，在 VAL2 文本框中输入 0.145，并单击 OK 按钮确认（如图 4-44 所示）。

在上述所有设置完成之后，就可以通过 Main Menu>Solution>SOLVE 命令向 LS-DYNA 求解器提交求解了，在此过程中会出现警告对话框，直接单击 OK 按钮确认即可。

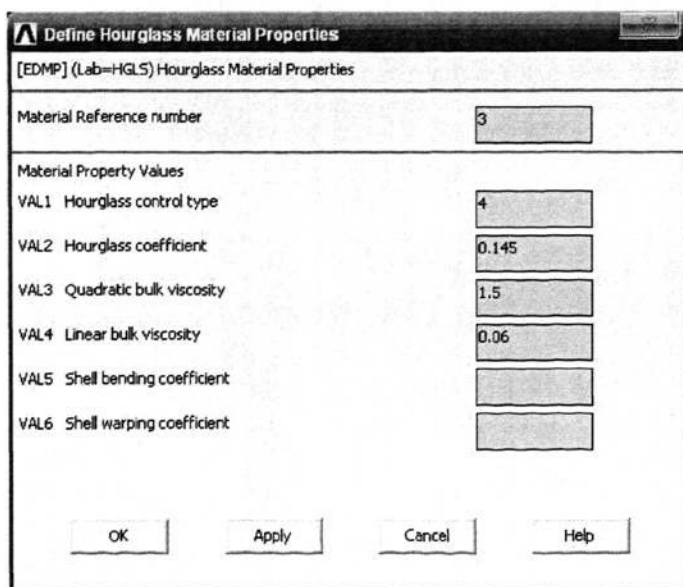


图 4-44 沙漏对话框

在计算过程中，还可以在信息输出窗口中通过 SW 系列开关对求解过程进行监控。求解完成以后，会弹出 Solution is done! 提示框，关闭之。

### 4.3 计算结果及结果分析

LS-PREPOST 是专门为 LS-DYNA 求解器开发的后处理器，它能提供快速的后处理功能，如计算结果的图形、动画显示与输出、结果数据的图示与分析等功能。

(一)读入结果文件。选择 LS-PREPOST 的菜单项 File>Open>Binary Plot 命令，在弹出的对话框中选择工作目录下的二进制结果文件 d3plot，并单击打开按钮确认，就可以将结果文件读入 LS-PREPOST 后处理器中（如图 4-45）。

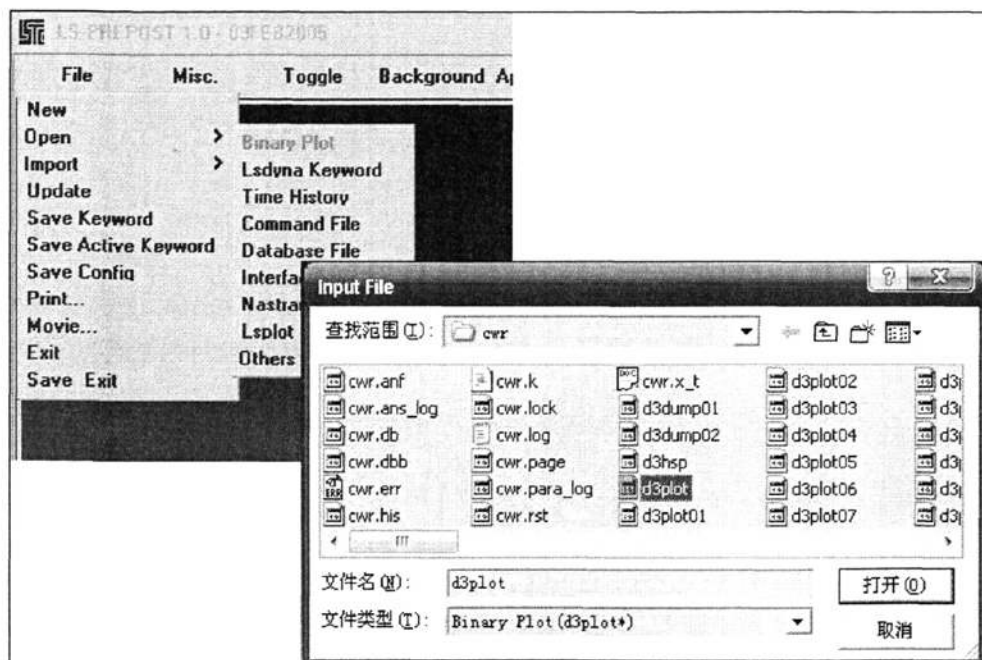


图 4-45 读入结果文件

(二)镜像模型。由于分析时只取了二分之一的模型进行求解，这里要通过镜像操作来显示完整的图形。执行菜单项 Misc>Reflect>Reflect about XY plane 命令，就完成了整个模型的显示。

## 4.3.1 应变场特征

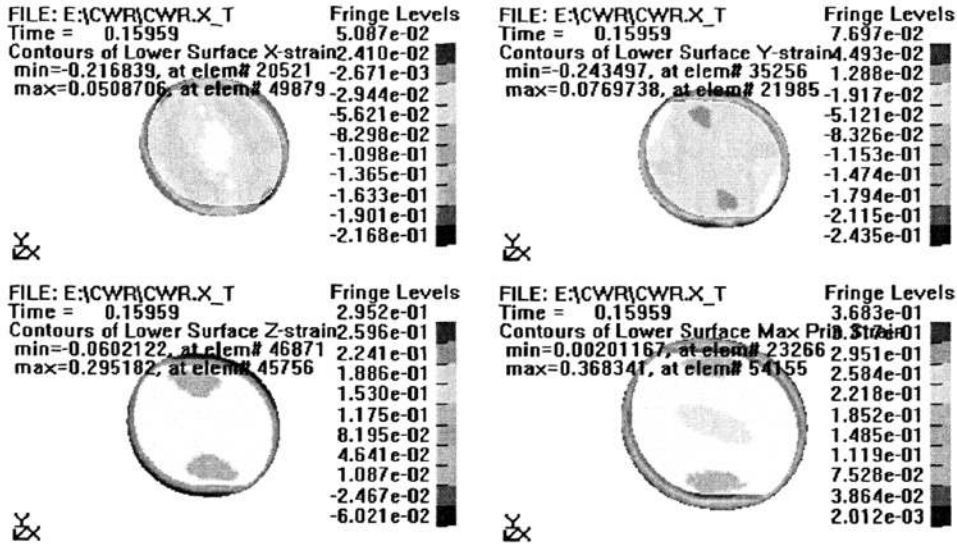


图 4-46 楔横轧起楔段横截面上的应变场

图 4-46 为轧件起楔段横截面上的应变场，分别为 X、Y、Z 和最大应变表示图，从图中可以看出轧件应变仅发生在与模具接触的局部，其他部位应变很少，基本没有发生变形。

图 4-47 为楔横轧起楔段纵截面上的应变场，分别为横向、纵向轴向和最小应变标示图。从图中可以看出轧件应变仅发生在与模具接触下的局部，其他部位应变很少，基本没有发生形变。



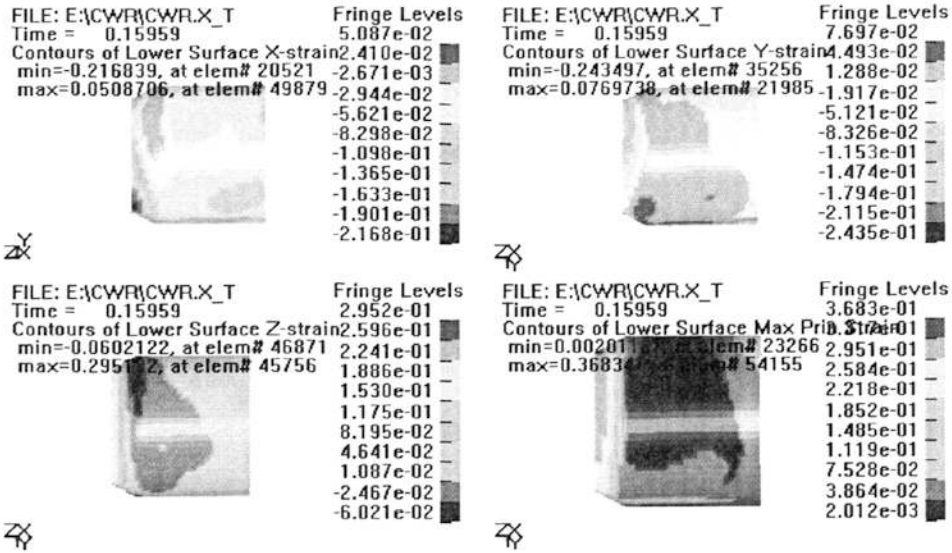


图 4-47 楔横轧起楔段纵截面上的应变场

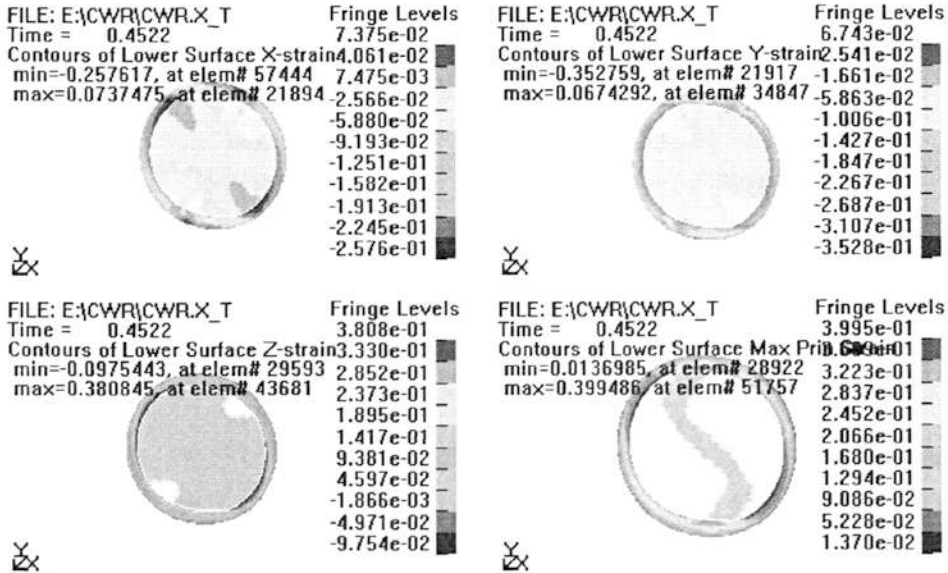


图 4-48 楔横轧展宽段横截面上的应变场

图 4-48 楔横轧展宽段横截面上的应变场，分别为横向、纵向、轴向和最大应变表示图。从图中可以看出在展宽段轧件横截面上产生很不均匀的应变场，但存在基本趋势和规律，即横向和纵向主要是压缩应变，轴向主要是拉伸应变。

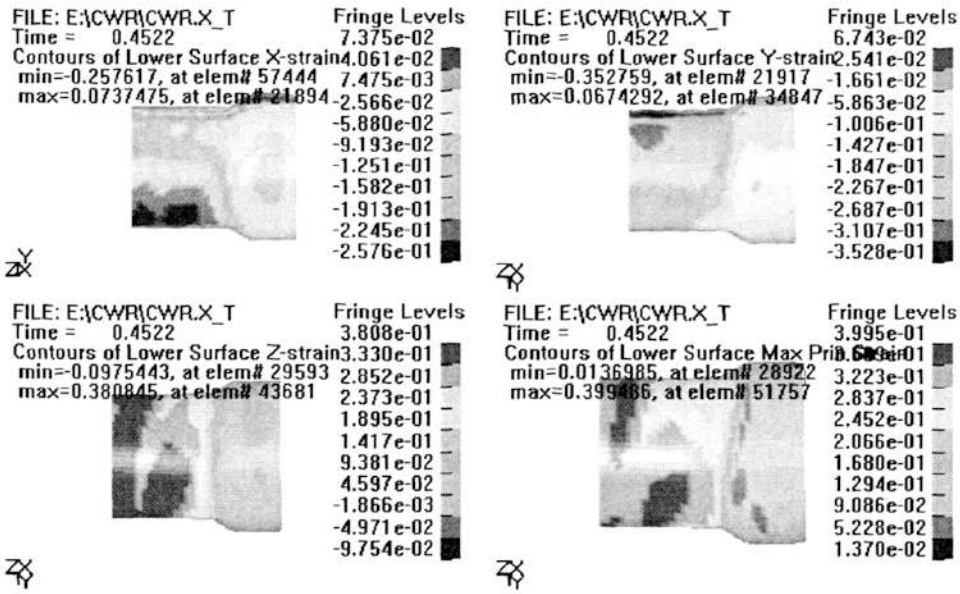


图 4-49 楔横轧展宽段纵截面上的应变场

图 4-49 楔横轧展宽段纵截面上的应变场分别为横向、纵向、轴向和最大应变表示图。从图中可以看出，在左端已轧细部分三个方向应变均为压缩应变切分分布比较均匀，在成形区内向右逐步减少。

### 4.3.2 应力场特征

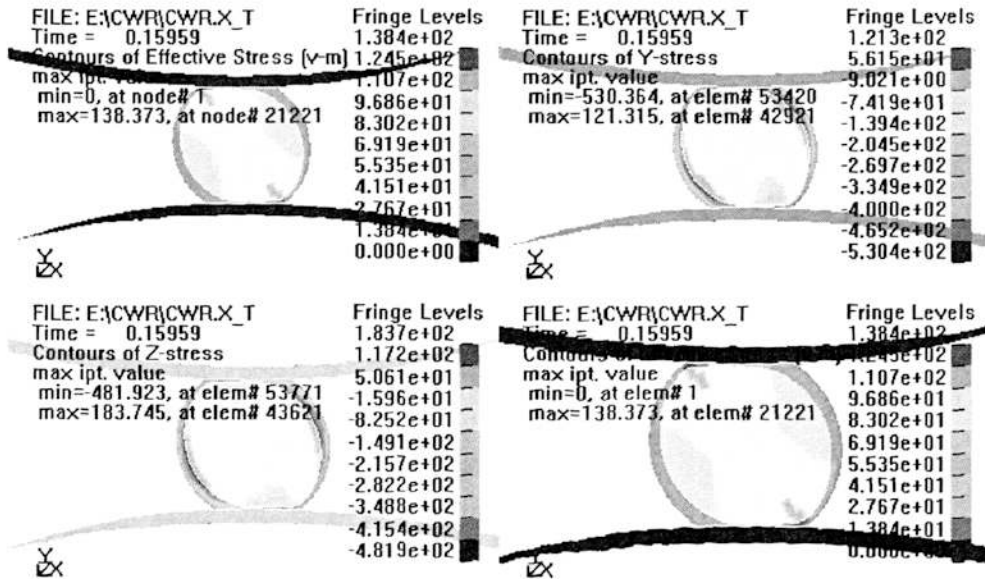


图 4-50 楔横轧起楔段横截面上的应力场

图 4-50 楔横轧起楔段横截面上的应力场，分别为横向、纵向、轴向和最大应力表示图。从图中可以看出在轧件与模具接触的局部，由于金属流动受阻，造成三个方向的应力均为压应力，在接触点其值最大，离接触点越远其压力值越小。

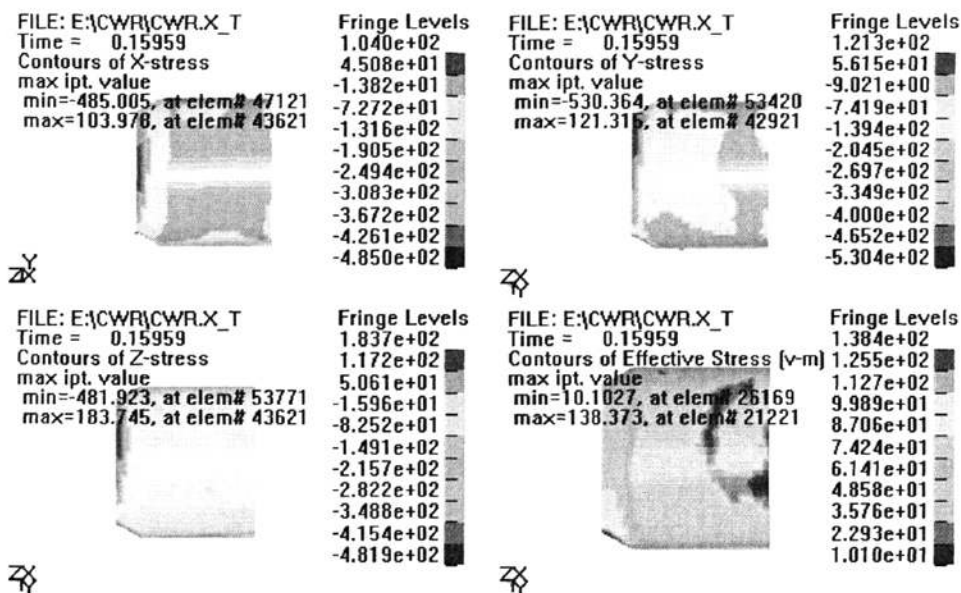


图 4-51 楔横轧起楔段纵截面上的应力场

图 4-51 为楔横轧起楔段纵截面上的应力场，分别为横向、纵向、轴向和最大应力表示图。从图中可以看出在轧件与模具接触的局部，由于金属流动受阻，造成三个方向的应力均为压应力，在接触点其值最大，离接触点越远其压力值越小，并下降到零。

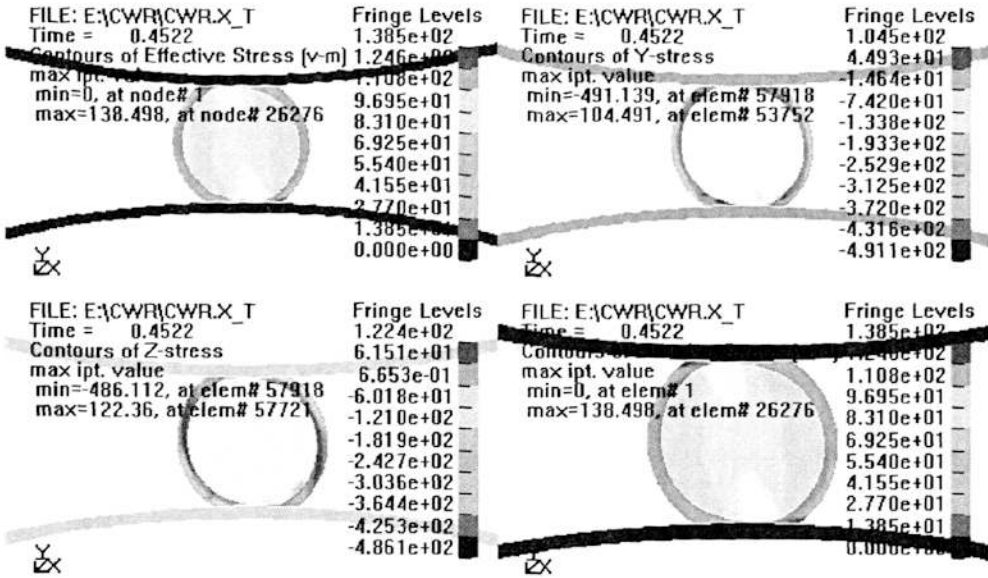


图 4-52 楔横轧展宽段横截面上的应力场

图 4-52 楔横轧展宽段横截面上的应力场，分别为横向、纵向、轴向和最大应力表示图。从图中可以看出在轧件与模具接触的局部，由于金属流动受阻，造成三个方向的应力均为压应力，在接触点其值最大，离接触点越远其压力值越小。

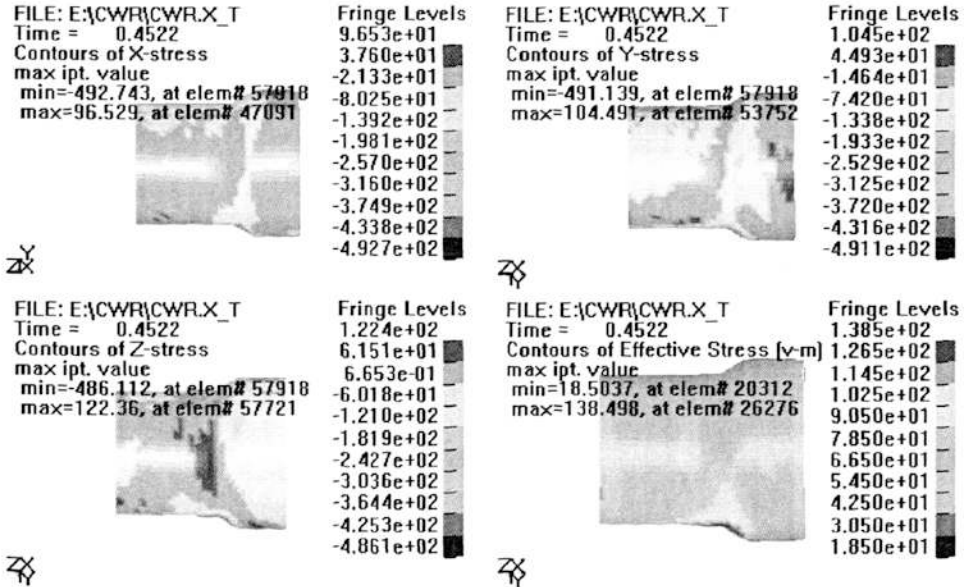


图 4-53 楔横轧展宽段纵截面上的应力场

图 4-53 楔横轧展宽段纵截面上的应力场，分别为横向、纵向、轴向和最大应力表示图。从图中可以看出，在轴向轧件与模具接触的整个外层，三个方向应力均为压应力，从外层向中心逐步减少。

### 4.3.3 端部凹心

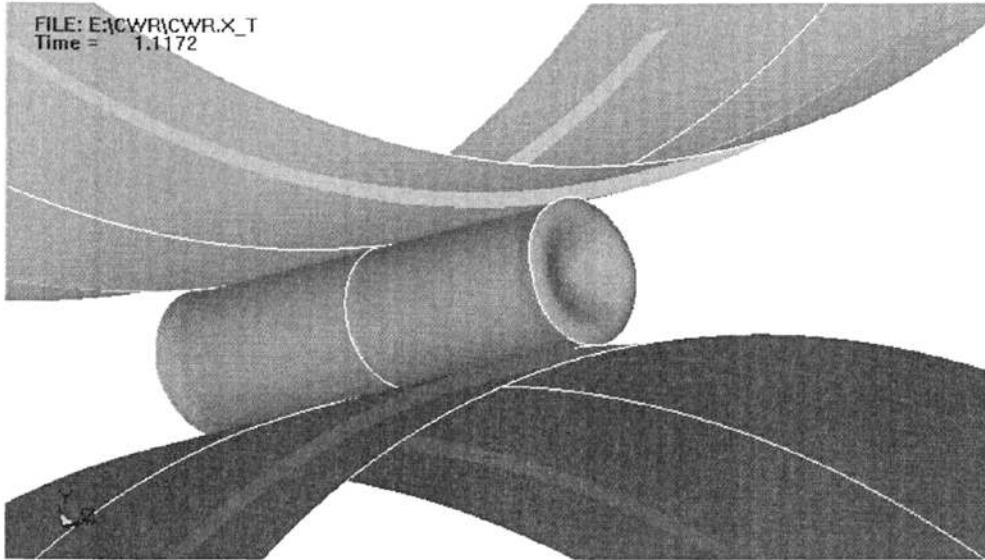


图 4-54 端部凹心缺陷

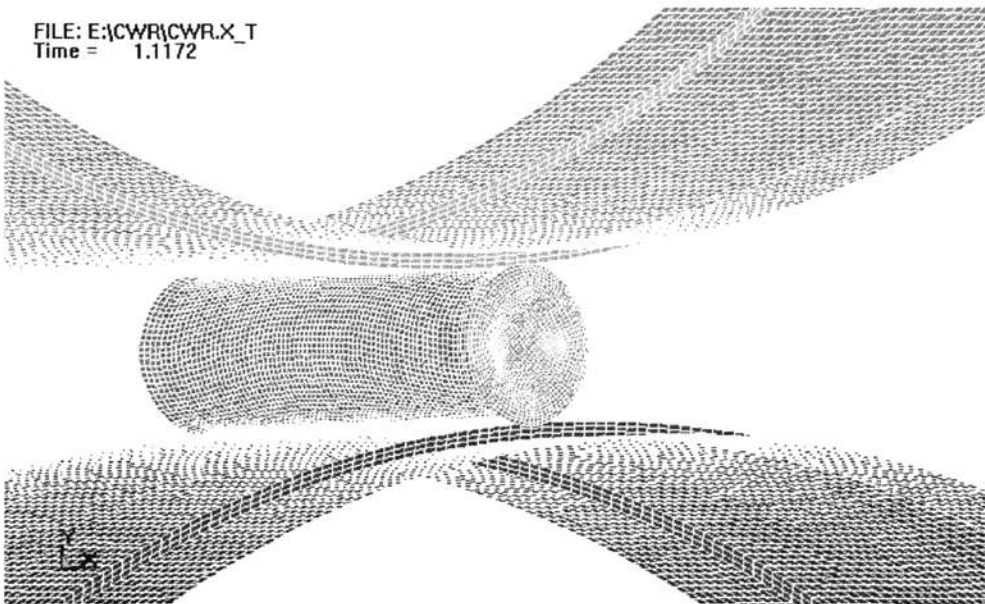


图 4-55 端部凹心缺陷

心部疏松和空腔是楔横轧产品中容易出现的主要缺陷之一，它会削弱工件的材料强度，并最终导致零件失效。（如图 4-54、4-55 所示）。

## 4.4 小结

楔横轧塑性变形的过程要求设置很多参数，所以其成形模拟过程要求我们认真的做好、做完每一步，稍有遗漏或错误可能导致前功尽弃或输出错误的结果。但同时由于 ANSYS 的完善与强大，给我们的模拟分析带来了很大的方便。

LS-PREPOST 后处理器能够很好的表现出工件所受的应力应变等塑性变形相关参数，达到了我们此课题的目的要求——模拟分析塑性变形过程。利用软件进行有限元分析能够节省资金，方便产品设计参数的调整，可多次模拟，提高效率，对应用生产十分有益。

## 结论与展望

### 一、结论

金属塑性成型技术是现代化制造业中金属加工的重要方法之一。它是金属材料在模具和锻压设备作用下发生变形,获得所需的形状、尺寸和性能的制作加工过程。金属塑性成型过程是一个复杂的弹塑性大变形过程,该过程涉及几何非线性、材料非线性、边界条件非线性等一系列难题。影响成形的因素很多,如模具和毛坯形状、材料特性、摩擦和润滑、加工温度以及工艺参数等等,因此若工艺分析不完善、模具设计不合理或者材料选择不当,则会造成产品达不到质量要求,造成大量的次品和废品,增加模具的设计制造时间和费用。

在轴类零件楔横轧塑性成形理论及数值模拟中,成功的运用 ANSYS 软件进行了有限元分析,并能够在后处理中分析结果数据。并能够利用 ANSYS/LS-DYNA 软件针对一些典型轴类零件的楔横轧塑性成形过程进行数值模拟分析。取得了以下研究成果:

(1) 分析了楔横轧塑性成型原理,并在此基础上得出了楔横轧的旋转条件及颈缩条件、疏松条件。

楔横轧的轧件,由于金属纤维沿零件的外形连续分布、晶粒细化等,轧后零件的质量得到提高。实践和理论都说明:横扎时,圆形毛坯在连续转动中径向小变形量压缩时,毛坯除轴向延伸外,径向也产生扩展,因而在毛坯的心部产生拉应力。当毛坯旋转时,若轴向阻力过大,毛坯横向扩展积累,心部的拉应力增加,当达到材料强度极限时,心部就出现超过允许级别的疏松甚至空腔,这是不允许的。

(2) 解决了 SOLID EDGE 与其的接口问题,大大方便了二者间的数据交换。

由于楔横轧的楔形曲线复杂,在用 SOLID EDGE 软件建模时出现了一定的困难,最终在用扫略方法建模时尽管曲线出现一定误差,但大体上表示出楔形的特征,对其零件轧制影响不大,也能进行模拟仿真。在软件间的传输问题上,老师跟我们同学也是进行了很多很多次的摸索试验,终于找到 SOLID EDGE 与 ANSYS

间的传输转换。在解决了文件的导入问题后又偶然发现了其模型尺寸大小被缩小至千分之一，后又经实体放大后彻底完成了两软件间的数据传输。

(3) ANSYS 软件对楔横轧的模拟仿真形象的反映出工件塑性变形过程，准确表示应力应变场，验证了楔横轧件在轧制时的变形过程，证明了前面提出的模型设计成型角及展宽角的确定方法的可行性，正确性。对于生产能节省资金，方便产品设计参数的调整，可多次模拟，提高效率，对生产有着重要实际意义。

## 二、展望

本文在楔横轧模具设计及数值模拟方面虽然取得了一定的成绩，但是影响成形的因素很多，我所做的工作只是一小部分，还很不完整，因此需要进一步展开研究。比如：

(1) 最大的不足是模具的三维建模不够准确，由于楔横轧楔形曲线复杂，用除料或扫略很难准确判别生产三维实体，研究楔横轧的楔形曲线和怎样利用曲线方程建模将是我下一步研究的内容。

(2) 常数定义及参数设置上可能不是很准确，有可能会有一些误差，这些问题都是我以后需要改进的地方。

这次课题让我进一步熟悉以前的知识，也了解了一些新工艺，新方法，让我积累了软件仿真模拟的经验，这都为我以后的学习工作打下良好的基础。



## 参考文献

- 1 John D.Reid. Ls-Dyna Examples Manual. California: Livermore Software Technology Corporation, April 2003:12-15
- 2 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2006年4月:32-35
- 3 G.R.Liu S.S.Quek. The Finite Element Method in Engineering. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2004:345-346
- 4 胡正寰, 许协和, 沙德元. 斜轧与楔横轧原理、工艺设备. 北京: 冶金工业出版社, 1985:85-89
- 5 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册. 北京: 人民邮电出版社, 2007:121-123
- 6 王富耻, 张朝晖. 10.0 有限元分析理论与工程应用. 武汉: 电子工业出版社, 2006:32-35
- 7 胡正寰. 楔横轧技术的现状与展望 [J]. 锻压技术, 1995, NO. 5:34-38
- 8 甘永立. 几何量公差与检测第七版. 上海: 上海科学技术出版社, 2005年7月:56-65
- 9 续丹, 黄胜, 侯贤斌. Solid Edge 实践与提高教程. 北京: 清华大学出版社, 2007:133-135
- 10 胡正寰. 回转成形设备(机械工程手册第三篇第十章)北京: 机械工业出版社, 1996:134-140
- 11 梁继才等. 空心件楔横轧参数对轧件壁厚变化的影响[J]. 农业机械学报, 1996, No. 1:20-25
- 12 王景梁, 徐春国, 任广升. 楔横轧盛开螺旋面表达方式的研究 [J]. 塑性工程学报, 1998, No. 4:33-38
- 13 白志斌等. 楔横轧变形区前沿变形程度研究 [J]. 农业机械学报, 1998, No. 1:56-58
- 14 徐春国, 王景梁, 任广升. 楔横轧盛开直角台阶精确截齐曲线的计算. 塑性工程

- 学报, 1999, No. 2:55-60
- 15 梁继才, 付沛福, 李义. 楔横轧工艺成型阶梯轴类件时轧件表面缺陷形成条件分析. 塑性工程学报, 2000, No. 1:34-35, 87
  - 16 白志斌, 任广升, 张承鉴. 楔横轧变形载荷的计算. 吉林工业大学学报, 1989, No. 3:58-59
  - 17 梁继才等. 空心件楔横轧压扁失稳的实验研究. 吉林工业大学学报, 1994, No. 4:64-65
  - 18 冯建春, 胡正寰. 确定楔横轧工艺参数的模糊推理方法. 北京科技大学学报, 1997, No. 3:78-79
  - 19 张康生, 胡正寰. 楔横轧轧齐基本理论研究, 锻压技术, 1996, No. 4:45-48
  - 20 何汉武, 熊有伦. 模具面向的制造的设计研究. 武汉: 华中理工大学学报, 1999:70-72
  - 21 Yaomin Dong, Tagavi KA, Lovell MR, Zhi Deng. Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure. Beijing, International journal of mechanical science. 2000: 42
  - 22 Willem F. Brouvoort and Frederik W:Jansen. Feature Modeling and Conversion-key Concepts to Concurrent Engineering, Beijing, Computers in Industry Press. ESNB 7-80183-020-2, 2002:65
  - 23 R. B. Douglas, The application of CAD/CAM techniques at Harland and Wolff, Computer Aided Design, 1986, 5:34
  - 24 JJ Shah. Assessment of Feature Technology. Computer Aided Design, 1991, No. 5:56
  - 25 Qiang Li. Investigation of the morphology of internal defects in cross wedge rolling. Journal of Materials Processing Technology, 2002:125-126, 248-257
  - 26 Zb. Pater. A study of cross wedge rolling process. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 80:370-375
  - 27 冯建春. 楔横轧模具设计理论及智能 CAD 方法的研究. 北京科技大学博士学位

- 论文, 1995:87-90
- 28 郭长武, 栾槐馥, 田福生. 三辊楔横轧轧辊压力的研究. 东北工学院学报, 1992, No 6:65-66
- 29 Masami Ishii, et. al. The development of high precision cross-rolling method, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf Rotary Metalworking Processes, 1984:32
- 30 Yao Ming Dong. Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure, Beijing, International Journal of Mechanical Sciences, 2000:1233-1253
- 31 Yang Hongqing, Wang Baoyu, Hu Zhenghuan. Research on Machining Features Sequencing for Cross Wedge Rolling Tool, Beijing, Aviation Industry Press. 2002:33-35
- 32 Tselikov AL, Lugovsko VM, Tretiyakov EM. The theory of transverse cold rolling in three-roll mills. Russian Engineering Journal 1961, 7:79
- 33 Tselikow AI. Calculation theory of force on rolling machines. Moscow, Metallurgizdat, 1962:332
- 34 Zb. Pater and W. Weonski, Determination of the Contact Area Between the Rolling Tools and the Workpiece in Cross Rolling Process. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 45:105-110
- 35 Zb. Pater. Numerical simulation of the cross wedge rolling process including upsetting, Journal of materials Processing Technology, 1998, 92-93:468-473
- 36 Zb. Pater, etc. Study of the process stability of cross wedge rolling, Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92-93:458-462
- 37 Reimund Neugebauer, etc. Optimisation of processing routes for cross rolling and spin extrusion. Journal of Materials Processing Technology, 2002:125-126
- 38 Neuberger. G. Transverse Tolling. Metal Forming, 1968:78
- 39 楠兼敬, 大西利美, 铃木隆充等. The central cavity in transversely hot

rolled shafts. Journal of JSTP13, 1972:140

40 团野敦, 栗野泰吉. Effect of rolling conditions on formation of central cavity in 2-roll cross rolling. Journal of JSTP17, 1976:181

## 致 谢

很荣幸我的课题是在王建明教授的亲切关怀和悉心指导下完成的，他严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。从课题的选择到设计的最终完成，王老师都始终都认真负责，细心的指导。在此，我再次向导师王建明教授表示崇高的敬意和衷心的感谢。

我因为上班而花费了大量时间，耽误了课题研究的进程，是王老师不断的敦促鼓励我，让我充分利用时间，多次向我们介绍有限元分析的方法原理，耐心给我讲解 ANSYS 软件各部分功能，让我对有限元成形模拟有了更深的认识，在此我真诚的说声：谢谢您，导师!!