

摘要

曲母线变壁厚筒形件旋压成形工艺是在普通筒形件旋压成形工艺的基础上发展起来的一种复合工艺。

为了得到曲母线筒形件的旋压成形特点和变形规律，本文对不锈钢 U 型密封圈的成形进行了分析研究。针对 U 型密封圈的形状特点提出了两种工艺方案，分析了采用旋压工艺方案的可行性，并对其进行比较，对密封圈的旋压成形过程进行了有限元数值分析，为进行必要的生产实验和实际产品的生产提供了依据。

根据实际工件的尺寸及成形情况建立了不锈钢 U 型密封圈旋压时的数学模型，并对边界、接触、摩擦等条件进行分析，确定了旋轮的运动轨迹。应用 ANSYS/LS-DYNA 软件对其成形过程进行了三维有限元数值模拟，得出了成形过程中变形区应力、应变的分布规律，分析了旋压成形时的金属流动规律和变形机理，并分析了不同旋轮进给速度、不同壁厚坯料和不同旋轮直径等工艺参数下密封圈的成形情况和应力、应变及旋压力的变化规律。最后，根据模拟结果分析了密封圈在旋压成形过程中出现的缺陷及原因。

模拟结果表明，曲母线变壁厚筒形件用旋压的方法成形是可行的，有限元数值模拟能够为旋压生产提供重要的参考依据。

关键词 ANSYS/LS-DYNA；曲母线；旋压力；数值模拟；U 型密封圈

Abstract

Curvilinear generatrix spinning of cylinders is a techniques that is based on tube spinning.

In this paper, aiming at U-shape gland, with the analysis of deforming features and rule of deforming for curvilinear generatrix spinning of cylinders, finite element theory is applied to process of deformation, which provide experimental analysis and manufacture of realistic product for complex spinning of cylinders with necessary reference.

Taking boundary condition, contact, friction and spatial trajectory into account complex spinning of cylinders according to the dimension and deformation with realistic work-piece. ANSYS software is applied to 3D numerical simulation of U-shape gland. The stress and strain distributions on shaping are obtained, and the plastic flow law and deformation mechanism of the metal with respect to U-shape gland deformation were analyzed. Figuration of U-shape gland, rule of variety of stress, strain and spinning force with ratio of thinning and feeding, the thick of the work-piece and the diameter of the roller were analyzed. In the end, associate with experiment, all kinds of vices of U-shape gland deforming were analysis as well as how to be.

From the result we can see that it is feasible to shape up the U gland with the process method of spinning. The method of numerical simulation can provide important consult to factual production.

Keywords ANSYS/LS-DYNA; curvilinear generatrix cylinders; force of spinning; numerical analysis; U-shape gland

第1章 绪论

1.1 旋压概述及课题背景

旋压是利用旋压工具对旋转坯料施加压力，使之产生连续的局部塑性变形而成形为所需空心回转零件的塑性加工方法，是制造薄壁回转体零件常用的一种工艺方法。同其它加工方法相比，旋压件适用于多品种、小批量的场合，具有所需设备吨位小、投资少、综合性能好、材料利用率高等优点。目前，不论在工艺研究、设备设计与制造，还是理论研究和应用等方面都有很大的发展^[1]。

通常旋压可分为两大类，即普通旋压和强力旋压。普通旋压简称普旋，成形过程中，板厚基本不变，旋压成形主要靠坯料直径方向的收缩或扩张来实现。其主要特征是能明显的看到坯料外径的变化。普旋成形又可根据工件的变形特点完成成形、压筋、收口、扩口、翻边、卷边等各种工序，成形各种薄壁轴对称空心回转体工件。

强力旋压简称强旋，其成形过程为，主轴卡盘将毛坯夹紧，芯模和坯料在主轴带动下一起旋转，旋轮作进给运动，并在摩擦的作用下进行自转，使毛坯连续逐点的变薄并贴靠芯模而成为所需的工件，旋轮的运动轨迹是由控制系统来确定的。强力旋压按变形的性质和工件的形状分为锥形件、筒形件、复合型工件强力旋压三类。锥形件强力旋压采用板坯或较浅的预制空心毛坯，按正弦规律 $t = t_0 \sin \alpha$ 变形。筒形件强力旋压采用短而厚，内径基本不变的筒形毛坯，按照体积不变原理进行变形。

曲母线筒形件是筒形件特殊的一种，其成形工艺较一般筒形件复杂，成形时，坯料变形区金属的流动规律将不再等同于普通筒形件的旋压成形，在曲母线的成形过程中，既有形状的变化，也有壁厚方面的变化，使得成形过程的变形机理变得更加复杂。成形过程中应力、应变的分布，旋压力的变化情况等都将随着母线的不同而出现不同于普通筒形件旋压时的规

律。相应的，各工艺参数对旋压成形的影响也将发生变化，不能再按照普通的筒形件的旋压规律进行选择，采取的成形工艺也就有所不同，在本课题中不锈钢 U 型密封圈，根据壁厚的变化情况，采用了普通旋压和强力旋压复合的工艺进行了旋制，其中更有扩口和翻边两种加工工艺。

近些年，我国工业水平飞速发展，对旋压产品的复杂性、高性能、高精度的要求显得尤为突出，尤其是曲母线形件越来越多，曲母线的复合旋压成形工艺也就是因此而生。但是，到目前为止，还很难找到曲母线变壁厚工件成形工艺的相关文献资料，各种介绍旋压的书籍也只是对普通工件的旋压进行介绍，没有提到过曲母线形工件的成形情况^[2-11]。因此，曲母线形变壁厚工件的复合旋压工艺的采用和完善，更有利于制件的成形和质量的保证，并促进旋压复合工艺的研究及应用。

1.2 旋压技术发展简史

旋压作为一种成形工艺方法，最早起源于我国古代的陶瓷制坯作业。经过长期的生产实践，大约公元十世纪初，我国劳动人民开始用旋压方法制作金属容器，从而使旋压在金属成形工艺中占有了一定地位。到了十四世纪，旋压技术才由我国传入欧洲。

最古老的旋压机用人力驱动。使用棒形工具推压材料成形，生产效率很低。然后发展为电力驱动，并使用旋轮作为成形工具后，才使旋压的成形能力和技术水平有了很大的提高。但是，在漫长的岁月中，旋压技术一直局限于普通旋压这种变形方式。直到上个世纪中叶，旋压技术才由普通旋压发展到强力旋压，并迅速扩大了应用范围。

虽然旋压技术是在我国发源的，但在解放前却没有得到多大发展。解放后，随着国民经济各领域对制件的要求不断增加，适用于旋压成形的工件加工促进了旋压技术及设备的发展。在六十年代初期，北京航空工艺研究所研制出 SY 系列强力旋压机床，还与工厂合作成功地将这种技术用于航空产品的成批生产。同时北京有色金属研究总院也开始了立式旋压机的研制并旋制了各种钢管、铝管等急需产品。国内从事生产的单位已包括许多冶金厂、研究所和重要的机械工厂。旋压的材料包括钨、钼、铌、β 钛

合金、超高强度钢等等。旋压毛坯的初级加工已采用了离心铸造、电渣重熔、环轧、冷拔以及粉末压制等手段。经过几十年的发展，我国在旋压工艺、设备设计制造、理论研究及技术推广等方面，都取得了较大成绩，不少产品及其性能都达到了国际先进水平。

伴随着先进制造技术的推广和应用，旋压设备已经达到数控及自动控制的要求，并结合 CAD/CAM/CAE 等技术的应用使得其生产产品成形的形状及质量控制上都达到了较高的水平。随着旋压技术研究的深入发展，复合旋压的应用越来越多。复合旋压有两种类型，一种是工序复合，另一种是在一道成形工序中就有两种性质不同的旋压工艺。如汽车的轮辐的旋压，是属于工序中的复合；而在本课题中浮动式密封圈的成形，则是在同一道次中就存在着普旋和强旋两种旋压工艺的有机结合。复合旋压的重要性不仅体现在几种旋压工序的复合，尤其体现在同一工序中存在着的多种旋压工艺的情况。

1.3 旋压成形的塑性研究方法

旋压成形过程是一个复杂的弹塑性大变形过程，这是既有材料非线性，又有几何非线性，再加上复杂的边界接触条件的非线性，这些因素使得变形机理非常复杂，难以用准确的数学关系式来进行描述。到目前为止，金属塑性成形过程的研究方法主要有主应力法、滑移线法、上限法、边界元法和有限元法等。

主应力法假设把问题简化成平面问题或轴对称问题，滑移线法仅适用于处理理想刚塑性体的平面应变问题，本文中不锈钢 U 型密封圈的旋压成形属于局部接触大位移变形，属于空间三维的变形问题，不能简单的抽象成轴对称问题，或者平面应变和平面应力问题，因此很难用理论推导的方法分析其变形问题。尤其对其自身的变形特点及影响因素采用大变形弹塑性有限元进行数值分析不失为一种比较合理的选择。

有限元数值模拟方法的优点是功能强、精度高、解决问题的范围广，可以用不同形状、不同大小和不同单元类型的单元来描述任意形状的变形体，适用于任何边界条件，可以方便的处理各种摩擦，考虑材料性能等各

种工艺参数对成形过程的影响，可获得成形过程中任意时刻的力学信息和金属流动情况。并可在计算机上实现成形过程，反复演示、计算和优化，这是其它方法所无法比拟的。

有限元方法需要完善的地方主要有：

(1)基本理论方面 有限元技术要在多学科交叉，宏观和微观结合方面有所突破，这样才能对金属塑性成形中的各向异性、复合材料的成形、微观组织演化等方面提供更加可靠和高质量的数据信息。从而有助于建立正确反映材料特征和本构关系的有限元模型。

(2)边界接触模型 金属成形过程中模具与变形金属接触边界的动态确定和边界摩擦的处理是有限元模拟的难点，也是今后有限元技术的着力点^[12-15]。

因此，与实际成形的条件结合较真实的建立其数学模型和边界条件才能发挥出其特有的功能和作用。

1.4 旋压成形数值模拟技术的研究

1.4.1 数值模拟方法在旋压加工中的应用

有限元理论在不断发展和完善，用计算机对旋压工艺进行数值模拟的研究日益增多，在分析旋压成形过程的变形机理、受力、以及合理的选取工艺参数等方面都取得了很大进展。三维有限元数值模拟可以考虑旋压的几何轨迹、旋轮与毛坯接触界面的形状、毛坯随芯模的旋转运动、旋轮的纵向进给等因素，使之更符合实际工艺条件。

目前，对旋压变形过程的有限元数值模拟大多还只是在简化了一些影响因素下的数值条件，与真实的成形过程仿真还有相当的差距。随着旋压加工优越性的日益突出，以及各种价格昂贵的新型难变形结构材料应用的日益广泛，通过高精度的数值模拟计算，反映旋压的成形规律，已经成为该领域中迫切需要解决的重要基础性的研究课题。同时，更加结合实际、面向生产，体现在以下几个方面^[16]：

(1)通过对旋压成形工艺过程的模拟分析，确定各主要工艺参数对金属

毛坯成形的影响，从而达到优化工艺参数的目的。

(2)通过模拟实现对成形工艺及模具设计合理性的监测与评价，并能对产品的成形缺陷进行预测。

(3)将有限元模拟与金属材料微观组织的变化结合起来，预测和控制热塑性变形过程中材料的微观组织。

但是，由于实际旋压加工过程的复杂性，在有限元数值模拟时进行了过多的简化和假设，使得模拟过程不会和实际的加工过程相符合，存在很多缺陷和不足，尤其是在三维有限元数值模拟方面，还有许多地方需要改进。主要难点有：

(1)网格生成是几何定义和有限元分析的桥梁，复杂三维问题的网格生成以及重划分仍旧是亟待完善的难题。三维网格具有空间几何实体描述和三维网格的自动生成算法的复杂性，使得三维网格，尤其是六面体网格的生成和重划分成为制约有限元技术发展的瓶颈。

(2)发展高效率的线性方程组求解算法对金属成形的有限元分析具有重要意义。

(3)有限元分析的求解精度评估及三维实体的几何信息的精确描述。

(4)三维动态接触算法及摩擦算法的处理有待进一步研究^[17-19]。

1.4.2 旋压工艺数值模拟的研究概述

长期以来，旋压生产通常依靠经验，反复试验，才能够确定合理的工艺参数、旋压道次、旋轮运动轨迹等。随着有限元数值模拟在旋压技术中的应用，使研究从以试验为主转为计算机数值模拟与试验相结合，减少了试旋的次数，降低了成本，提高了生产效率，推动了旋压技术的发展。

文献[20,21]就多道次普旋中各道次的旋轮轨迹曲线做了深入研究。就普旋过程中壁厚减薄问题，文献[22,23]分别通过数值模拟和实验研究发现并证实了选取较大旋轮圆角半径和较小的进给比可以有效地防止壁厚减薄。

筒形件强力旋压成形在生产薄壁超长高精度筒形件上具有突出的优点，故得到广泛的应用。近几年来，有不少学者尝试用有限元法分析旋压

成形过程。依据工件形状或变形特点，分别建立了不同的力学模型和数学模型，并使得这方面的研究工作更进一步深化。

文献[24~26]采用三维刚塑性有限元，考虑了旋轮的几何轨迹，旋轮与毛坯的接触界面的形状，以及毛坯随芯棒的旋转运动，对筒形件反旋加工进行了模拟分析。发现旋轮作用区周向两侧存在两个产生切向收缩变形的区域，当两侧区域的收缩变形大于旋轮作用区的切向伸长量时，就产生了缩径，反之则产生了扩径。在此基础上，文献[27~31,41]运用三维弹塑性有限元，以三旋轮筒形件强力旋压为对象，取毛坯的 1/3 建立力学模型，考虑旋轮与毛坯及毛坯与芯模的接触问题，通过给定旋轮初始位移进行加载，对反旋成形过程进行数值模拟，得到了变形区应力与应变场的基本分布规律。结果发现，筒形件强旋时，与旋轮接触的坯料径向被压缩而沿轴向和切向伸长。

文献[32~33]根据强旋时的实际接触情况，采用数值计算方法分别计算了筒形件正旋和反旋时的旋压力，系统分析了旋轮工作角、旋轮圆角半径、减薄率、进给比、旋轮直径及毛坯壁厚等工艺参数对旋压力的影响。

1.5 选题意义及主要研究内容

对曲母线形变壁厚工件的复合旋压，尤其是内旋，国内外的研究都比较少，对于其变形特点、工艺的复合等方面都需要很好的研究。

曲母线形件的旋压过程中，在旋压过程部分，坯料、旋轮、芯模以及其他辅助工具的受力情况很复杂，而且旋轮的运动轨迹也很复杂，在 ANSYS 中建立有限元模型时，要在保证成形过程真实性的前提下进行必要的简化和假设，以便数值模拟的顺利进行。由于复杂的边界条件、物理条件以及几何条件的非线性，在建立模型时应当很好的进行工艺方案及旋压过程的分析。

本课题针对一个典型的曲母线形变壁厚不锈钢 U 型密封圈进行研究。U 型不锈钢密封圈是金属密封圈的一种，主要应用在橡胶密封圈所不足用的防锈、防腐蚀的阀体密封上，如在化工等方面的阀或泵等有特殊用途。国内某些厂家现在生产的浮动式阀座里面的密封圈一般都是通过进口，然

后组装生产。本课题的研究对于相应的产品开发、生产都有一定的实际意义。

密封圈采用的是内旋成形，由于旋压过程中，旋轮只是和筒形毛坯内壁接触，内层金属流动变形较大，而筒形毛坯外层部分金属变形相对较小，而曲母线筒形件的成形主要是要求金属进行流动变形，以生成曲面部分。本文将分析不同的工艺参数，主要是进给率、减薄率、坯料壁厚和旋轮直径，对筒形毛坯内壁金属径向变形的影响，以找到最适宜工件成形的工艺参数。

本课题主要对密封圈的复合旋压成形工艺进行数值模拟分析，通过对有限元分析软件 ANSYS 建立密封圈旋压成形的三维有限元模型，进行整个成形过程的数值模拟分析，以观察密封圈旋压成形的可行性及可能出现的一些情况，得出在毛坯料进行变形过程中，锥角的成形以及应力、应变的分布情况，分析旋压力的变化，预测缺陷的出现，最终为实际工件的成形提供参考。

第2章 工艺方案的选择及旋压工艺分析

2.1 引言

本课题中所研究的“U”型不锈钢密封圈，主要是应用在弹性金属密封蝶阀，该阀精密的弹性密封圈与经过镀铬抛光的蝶板密封面接触，二者有机的结合，具有耐高温、高压、低温等特点，因此被广泛应用于介质温度 $\leq 550^{\circ}\text{C}$ 的供热、供汽、供水及煤气、油品、酸碱等不同介质的管路上作调节流量、截断或接通流体。如图 2-1 示。

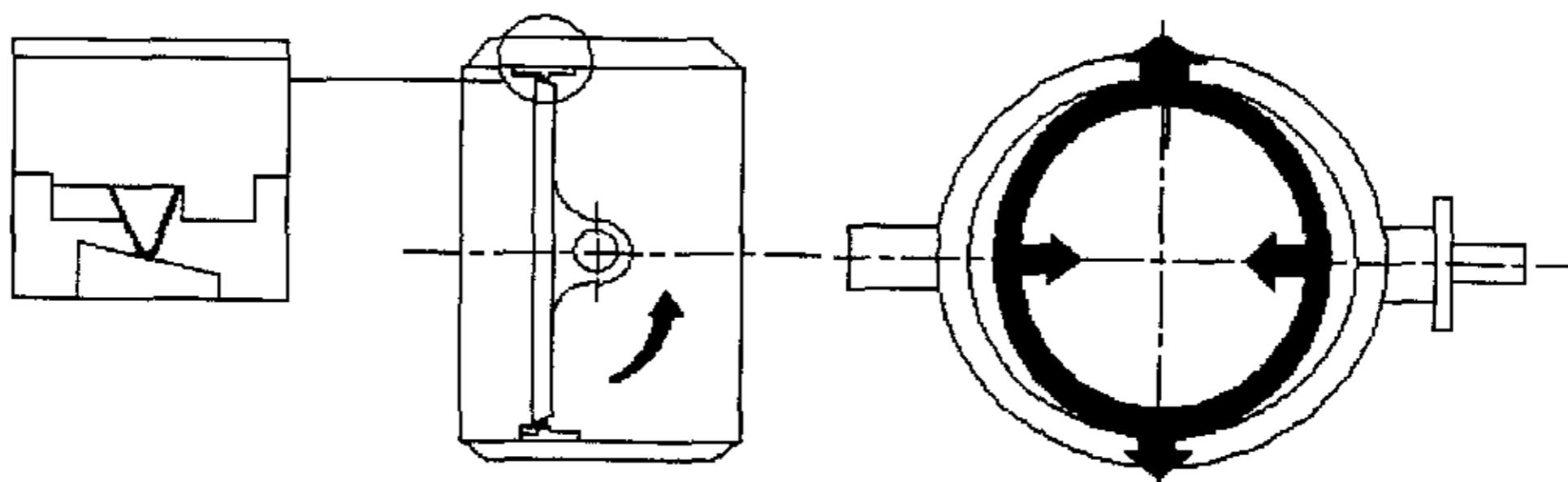


图 2-1 浮动式阀座密封圈示意图

Fig.2-1 Sketch map of floating gland

这种阀座密封圈浮动，具有一定的弹性，可以在较深的阀体槽内作径向扩伸或定位，因而在各种条件下均可进行自调整以保持最佳密封位置。由于结构独特，蝶板与阀座靠机械力进行密封，而不依附于介质压力，因此无论压力大小，它均可达到双向密封，而且阀体收缩也不会影响密封圈造成夹持的现象。Neilisc 蝶板成椭圆形，并以双偏心安装。当蝶板与圆形阀座密封圈接触时，将密封圈向外挤压造成其短轴处与密封圈接触。当阀门开启时，接触立即解除，密封圈恢复其原来形状，这样就防止了磨损；该蝶阀的三维偏心距，经过严格的计算，“U”型密封圈与蝶板几乎无磨擦，使用寿命长，可以经受几十万次运行，并具有越关越紧的功能。

针对本课题中所研究的“U”型不锈钢密封圈的外形特征，加工成形方式可以采用胀形、冲压或者旋压等。密封圈材质是1Cr18Ni9Ti，属于铬镍奥氏体不锈钢，具有优良的抗氧化酸均匀腐蚀性、良好的延展性、韧性以及冲压性和拉深性能，广泛用于航空、航天、化工、食品、医疗等部门。但是它不能用热处理的方法强化，为了达到要求的各项指标，冷加工是强化的唯一手段，所以旋压成为首选。另外，旋压精度高，成形质量好，可以达到所要求的尺寸和形状精度，这也是本课题采用旋压加工方法的原因所在。

2.2 旋压成形的两种不同工艺方案

就密封圈本身形状而言，它的成形趋势是材料沿着径向流动，内外径扩大，成形锥角部分时坯料向外翻出一定的角度，整个旋压加工过程是扩口和翻边两种工艺方法的复合。在加工的每一道工序里，同时存在着坯料形状的变化和壁厚的减薄，普通旋压和强力旋压又是共同存在。所以，纵观它的成形过程，是典型的复合旋压。

针对不同的旋压成形特点，考虑了两种不同的旋压加工工艺方案。第一种方案采用的是分步加工，先扩口，再翻边。扩口是先成形出锥形段，这个过程壁厚和形状同时发生变化；翻边是为了成形圆弧段，在圆弧段坯料的厚度不变，锥形段向外翻出，只有坯料形状发生变化，壁厚基本上不减薄。这种加工方法将不同的旋压工艺有机结合；第二种方案是旋轮连续加工一道次或多道次成形，然后再对成形件进行形状精整和尺寸校正，这种加工方法旋轮自动加工，通过控制旋轮的运动轨迹来控制坯料的成形，即借助于控制旋轮在每一时刻的位移来对控制坯料的变形程度，在一道次中，同时完成扩口和翻边，得到所要求的形状和壁厚。前者可通过手动或半自动旋压机来完成，后者必须在数控旋压机上完成进给要求。

2.2.1 分步加工旋压工艺方案

2.2.1.1 旋压扩口变形 旋压扩口方法可以普通在旋压机床进行扩口加工，它是利用旋压工具(旋压头、旋轮或者滚轮)使管坯端口沿径向扩张的

成形方法。利用旋压头旋压扩口的成形过程如图 2-2 所示。旋压头 1 边旋转边轴向运动，使管坯 3 端口内壁在单位压力 q 作用下逐渐扩口成形。根据管件的使用要求，扩口加工可制出管端为锥形、筒形或其他形状的零件。在本文中的密封圈的扩口形状如图 2-3a 示^[34]。

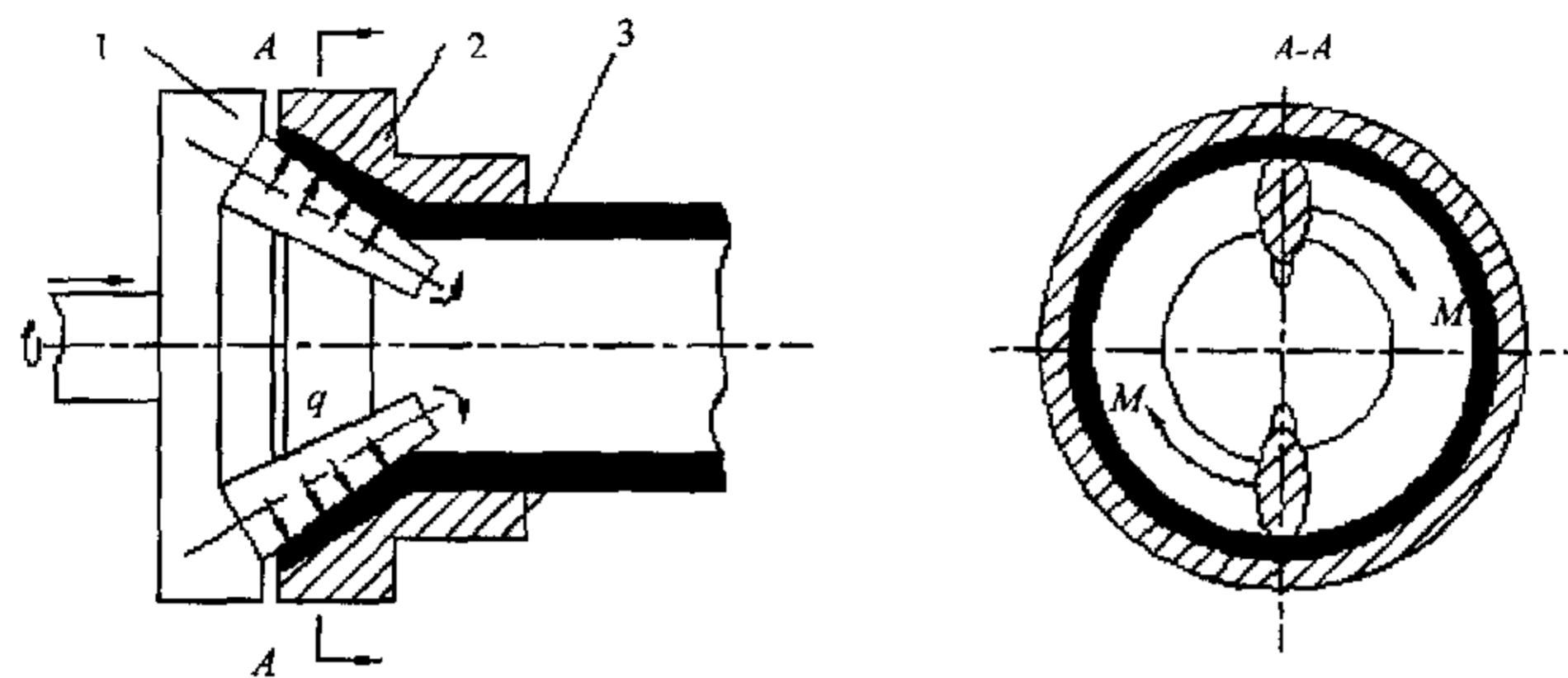


图 2-2 旋压头扩口成形过程

Fig.2-2 Process of expanding

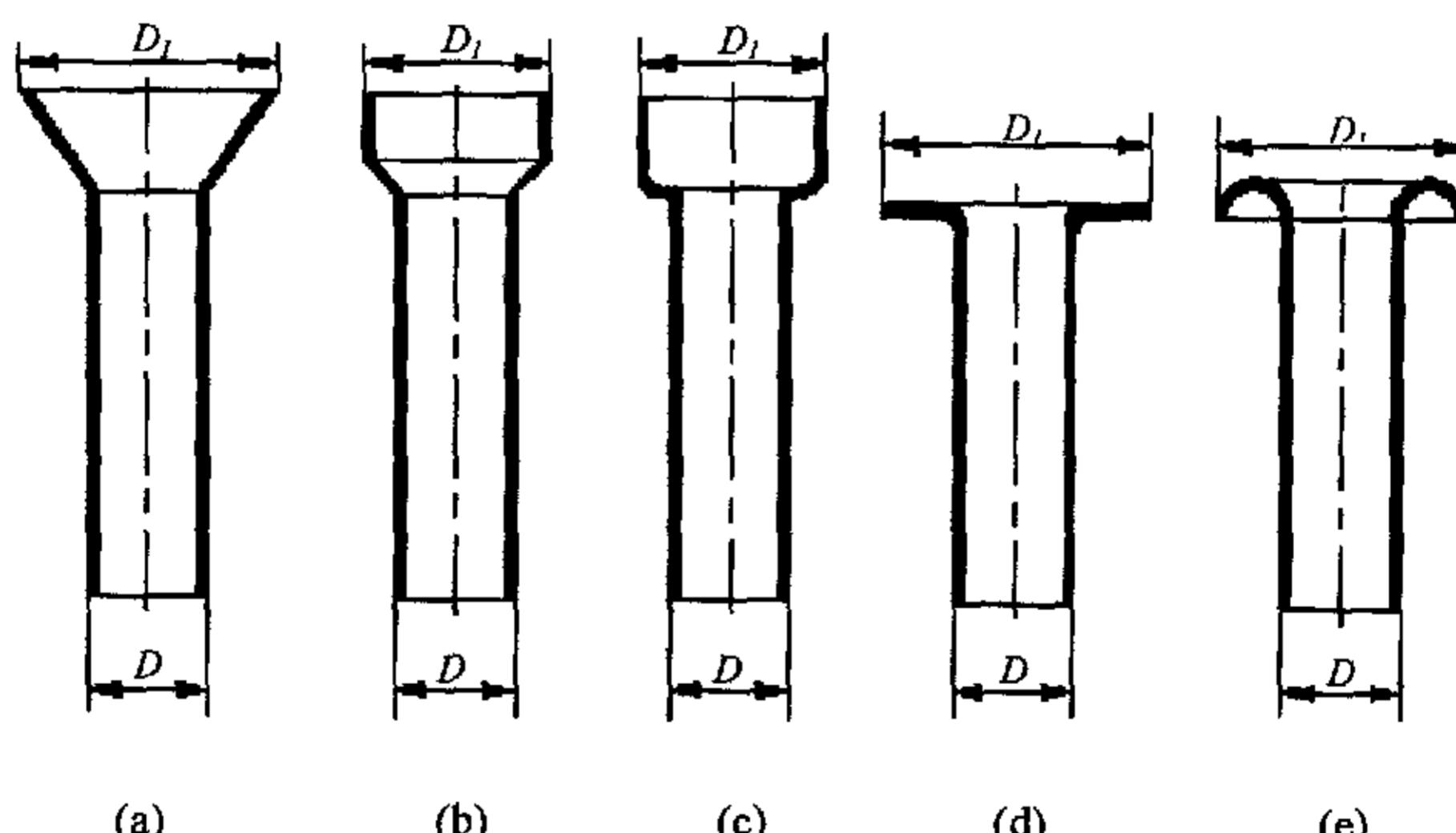


图 2-3 管端扩口形状

Fig.2-3 Figure of nozzle inflation

2.2.1.2 扩口变形特点 旋压扩口时，旋轮由中部向外旋，属于正旋，此时的变形区处于三向应力状态，两向压力和一向拉应力，即径向为压应力，切向与轴向为拉应力。变形区与已变形区的界面上有拉应力，变形区与未变形区的界面压力为零，该区自由向前移动。同时，变形区还受旋轮与芯模对工件的正压力和摩擦力。变形区应力应变的变化如图 2-4 示。

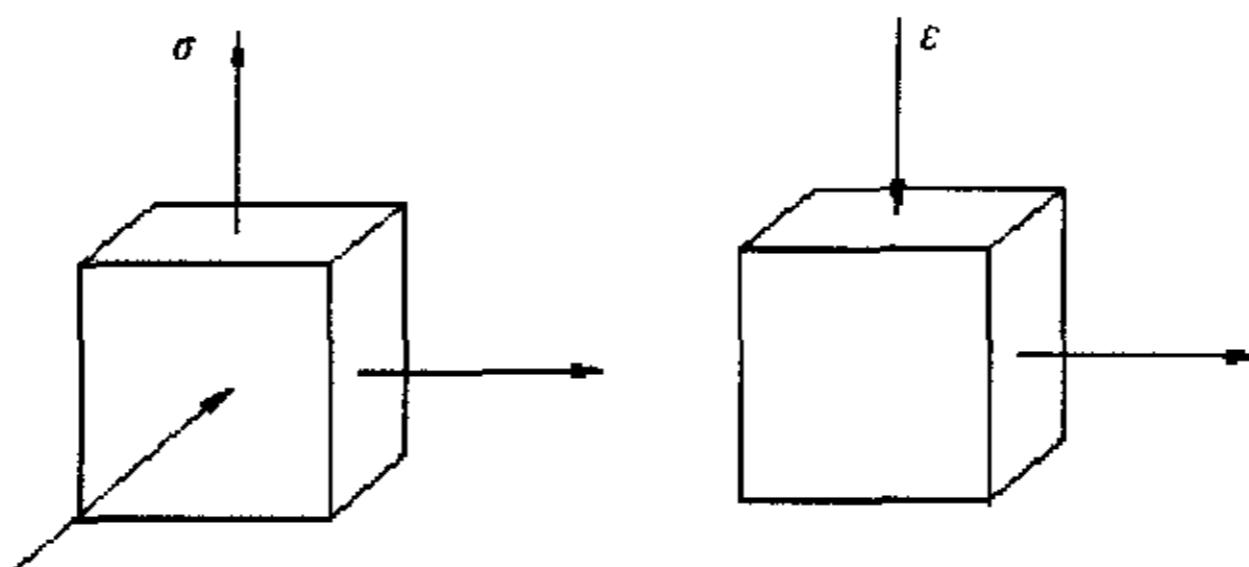


图 2-4 旋压扩口变形区受力图

Fig.2-4 Stress and strain of flaring transmutation area

当锥形段较短的时候，可以用锥形凸模扩口得到。冲压的方法是整体变形，变形区应力应变状态如图 2-5 示。

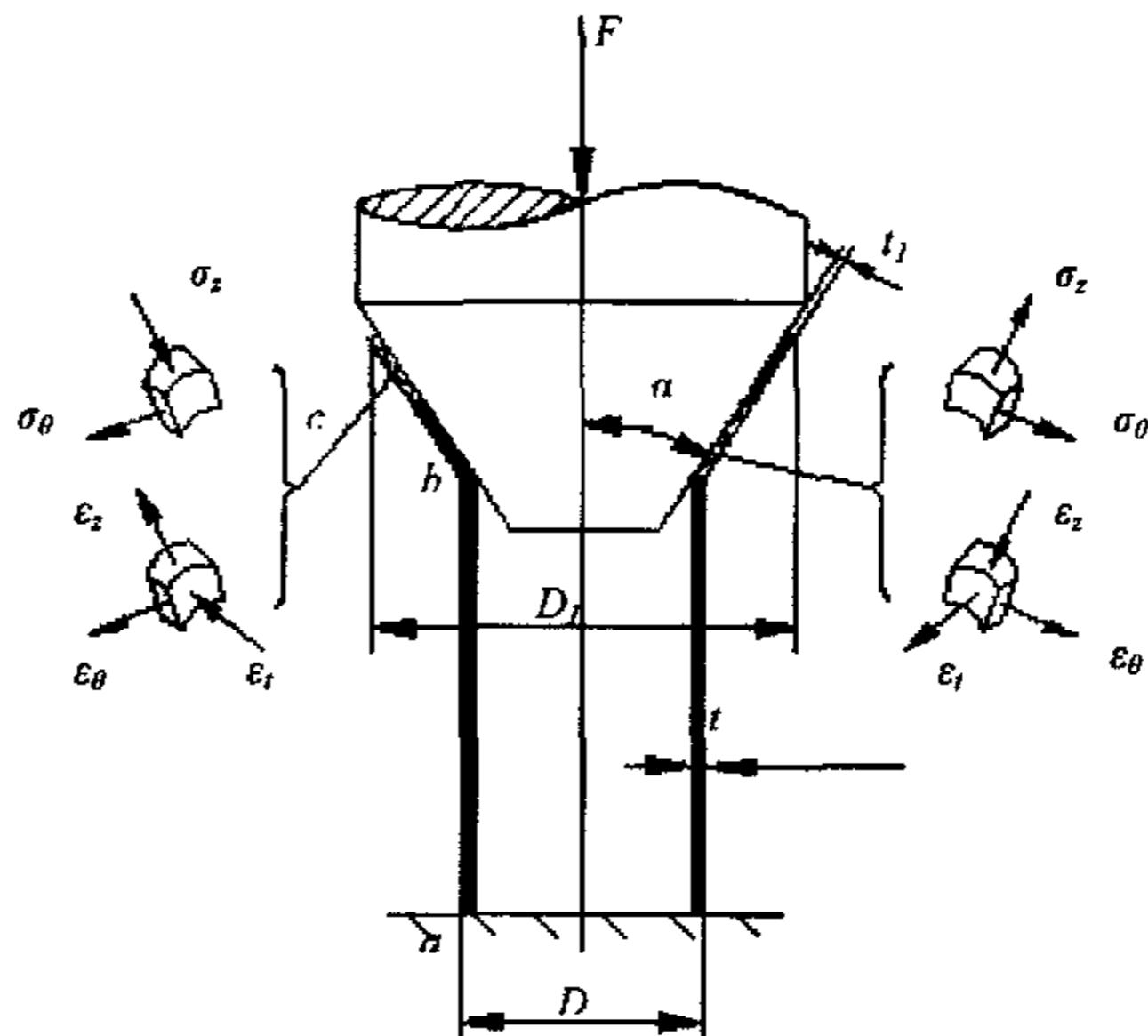


图 2-5 扩口变形区应力应变状态

Fig.2-5 Sress-strain state of pipe anamorphic area

旋压扩口和冲压扩口两种方法在变形区单元的应力应变状态是不一样的，在普通冲压方法加工时，只受一拉一压两个应力，这和旋压变形区的两压一拉是不同的。在坯料变形的时候，由于第三个方向压应力的存在，会对金属的流动产生一定的阻碍，使金属流动速度减慢，这样一来，在变形时，金属流动比较平稳，不会导致金属的堆积，引起层皱的缺陷。这是采用旋压加工的优势所在。

扩口部分的壁厚与变形程度大小有关，壁厚减薄量由扩口内缘向外缘线性变化。扩口部分的壁厚变薄还与扩口方法有关。当采用旋压扩口时，由于成形过程中材料是在较大单位压力作用下逐渐变形，故扩口部分的壁厚变形相对均匀，其扩口外缘的壁厚可按下式估算

$$t_1 = t \frac{D}{D_1} \quad (2-4)$$

式中 t_1 —— 扩口外缘的壁厚

t —— 扩口前管坯壁厚

D —— 扩口前管坯外径

D_1 —— 扩口外缘直径

2.2.1.3 扩口变形程度 扩口变形程度是以扩口部分最大的切向变形来衡量的，具体表示方法如下：

(1) 扩口率

$$\varepsilon = \frac{D_1 - D}{D} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中 D —— 扩口前管坯直径

D_1 —— 扩口后外缘直径

(2) 扩口系数 K

$$K = \frac{D_1}{D} \quad (2-6)$$

扩口系数与扩口率的关系为

$$K = \varepsilon + 1 \quad (2-7)$$

由该式易见，扩口率越大，扩口系数越大，则表示扩口变形程度越大。

当扩口系数过大时，就会在扩口管件口部产生破裂。

2.2.1.4 扩口管坯尺寸 对于给定形状、尺寸的扩口管件，其管坯直径及其壁厚通常取与管件要求的筒体直径及壁厚相等。而管坯的长度尺寸，应根据管端扩口形状，按扩口前后体积不变条件确定扩口部分所需的管坯长度后，再加上管件筒体部分的长度即可。对于图 2-6 所示的锥形扩口，其锥形部分所需的管坯长度可用下式计算

$$l_o = \frac{l}{6} \left[2 + K + \frac{t_1}{t} (1 + 2K) \right] \quad (2-8)$$

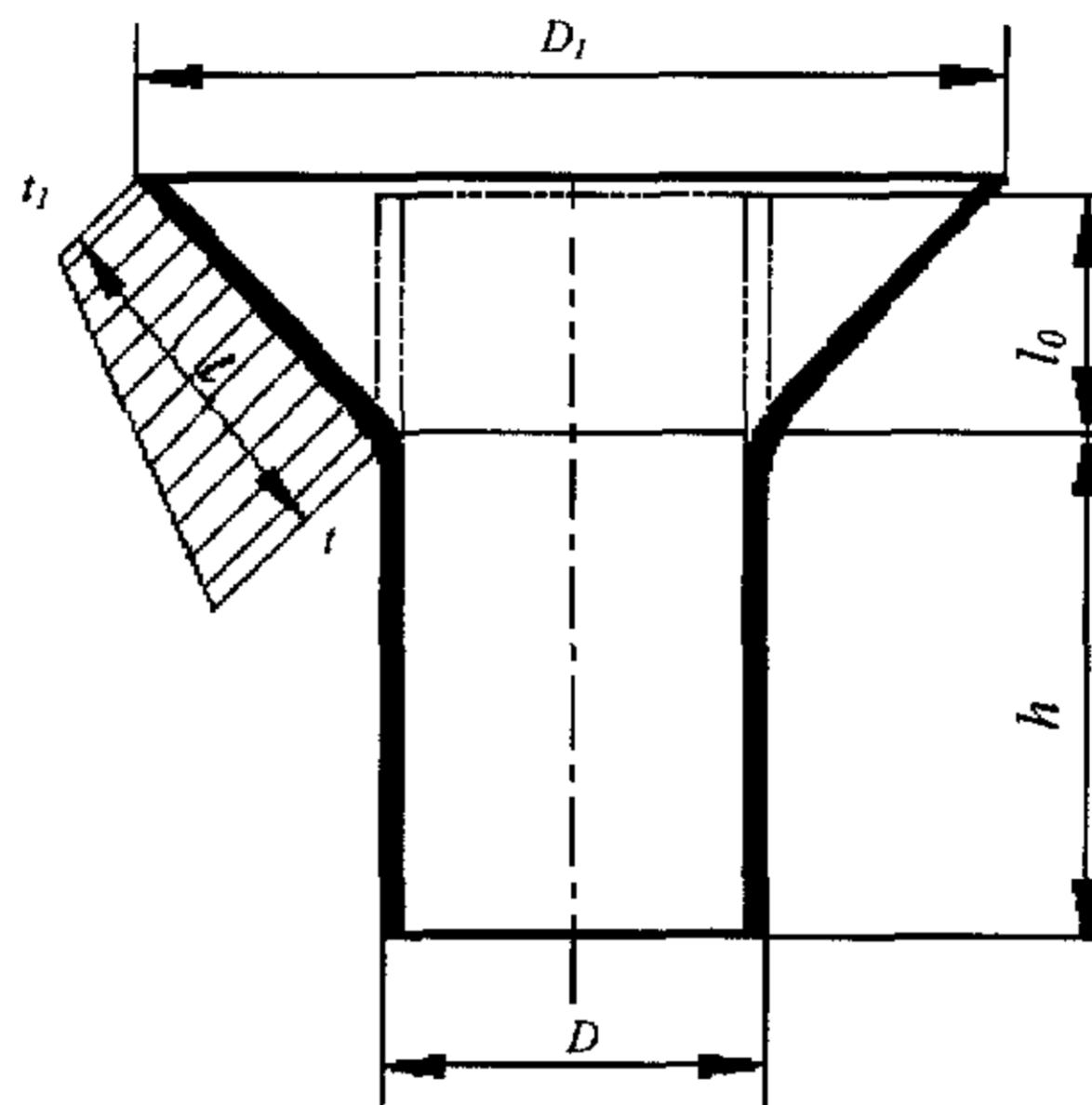


图 2-6 锥形件扩口尺寸

Fig.2-6 Dimension of cone-shaped work-piece

式中 l ——锥形母线长度

K ——扩口系数， $K = D_1/D$

t ——扩口前管坯壁厚

t_1 ——扩口后口部壁厚

2.2.1.5 扩口方法 用于旋压扩口的旋压头分为滑动旋压头和滚动旋压头两种，图 2-7 所示即为滑动旋压头。双刃式滑动旋压头适用于小直径铝管；

三刃式滑动旋压头多用于直径较大的铝管。滑动旋压头用高碳工具钢制造，或在刃口上镶嵌硬质合金，以提高旋压头使用寿命。滚动旋压头用于直径较大的铝、碳钢、不锈钢等管材扩口，旋压头材料可用高碳工具钢或球墨铸铁。滚动旋压头扩口质量比滑动旋压头好，管件扩口部分的内表面粗糙度可达 $R_a 0.2\sim0.4 \mu\text{m}$ 。旋压头轴向进给速度应适宜，一般可取50 mm/min。本文中扩口用的是旋轮。

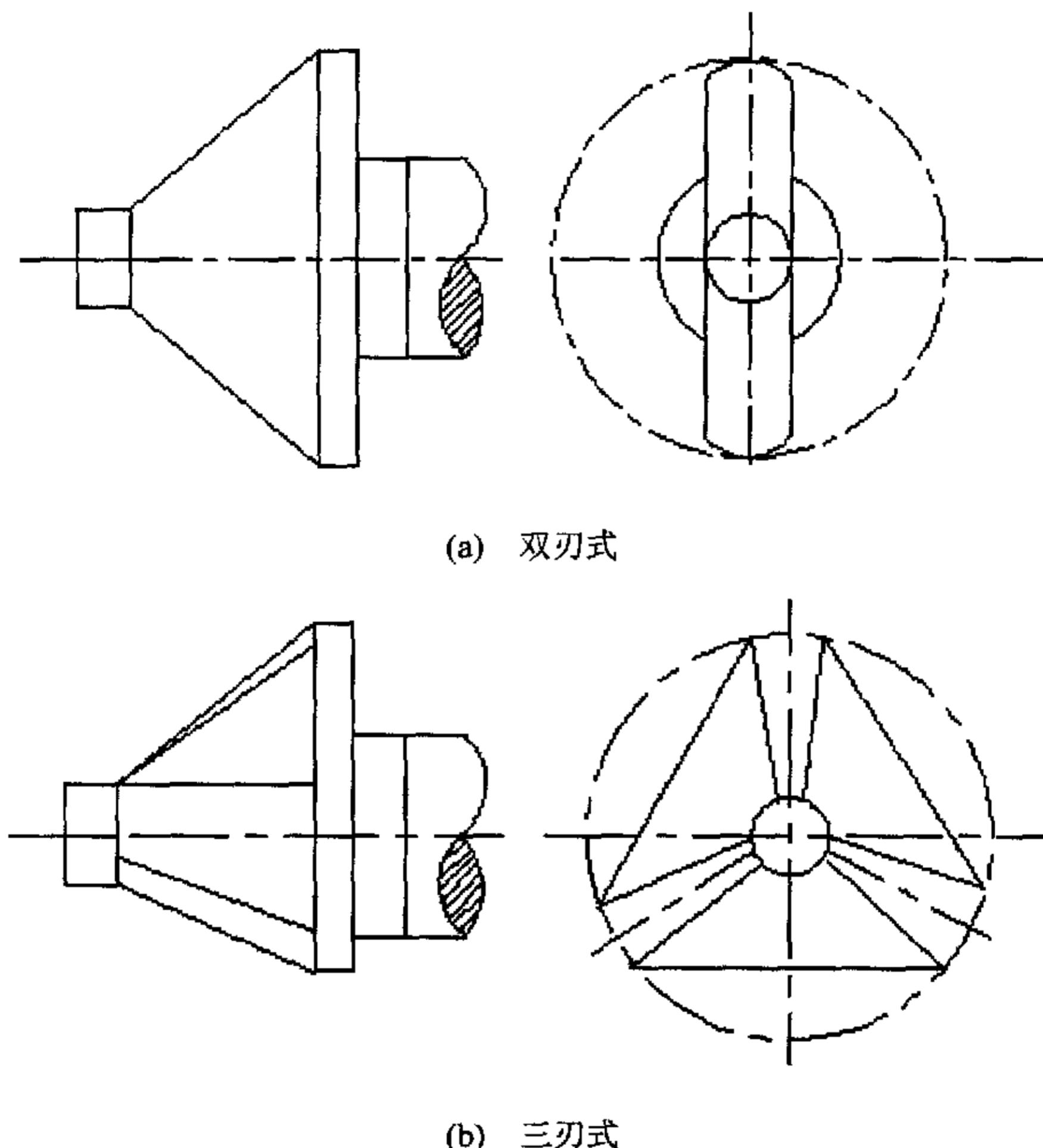


图 2-7 滑动旋压头

Fig.2-7 Sliding stick

旋压扩口可用机油或工业凡士林作润滑剂。旋压扩口转速可参考表2-1选取。

表 2-1 旋压扩口转速

Table 2-1 Rotate speed of spinning expanding

加 工 方 法	转 速 (r/min)	材 料	1Cr18Ni9Ti
			<18 mm
滑动扩口	直径	>18 mm	45~60
滚动扩口		300~500	117~261

在旋压扩口前应先检查管材端头处是否有氧化层、毛刺及椭圆度，若有这些缺陷，需在扩口前及时打磨与校圆，以保证扩口质量。旋压扩口中常见的质量缺陷有：喇叭口的纵向裂纹、喇叭口边缘壁厚过度变薄等。产生纵向裂纹的主要原因如下：

- (1)材料表面有较多的拉痕或划痕，扩口时由于塑性变形区应力集中而导致纵向开裂。
- (2)旋压头与夹紧模块的轴线不重合，扩口时管壁受力不均。
- (3)旋压头设计与制造不良，锥体自传不灵活，与管壁产生滑动摩擦。
- (4)管材组织不均匀，热处理状态不合要求等。

在旋压扩口工艺中，旋压头扩口适用于在管端成形喇叭口。对于管端的其他扩口形状，可采用相应的旋压扩口工具。

2.2.1.6 翻边 除了在变形中占主要地位的扩口，还存在着翻边的影响。翻边加工是在管壁上预制孔的边缘弯曲成一定角度(大多是 90°)的直壁的加工工艺。翻边分为内翻边和外翻边，本文密封圈的成形部分属于外翻边成形。在翻边过程中，孔径不断增大，直至成形结束。变形区材料主要受切向拉应力和轴向拉应力作用，使切向产生伸长变形。愈靠近孔边缘的金属，切向拉应力愈大，壁厚变薄也愈严重。径向由于凸模的摩擦，故拉应力较小。厚向应力忽略不计，故视为平面应力状态。

翻边变形属于伸长类变形，当切向拉应变达到一定程度时，材料在孔边缘即产生缩颈，然后破裂。因此，防止，孔边缘破裂是翻边成形的主要问题，而一次翻边极限变形程度，也主要是受材料伸长率的限制。翻边示

意图如图 2-8 示。

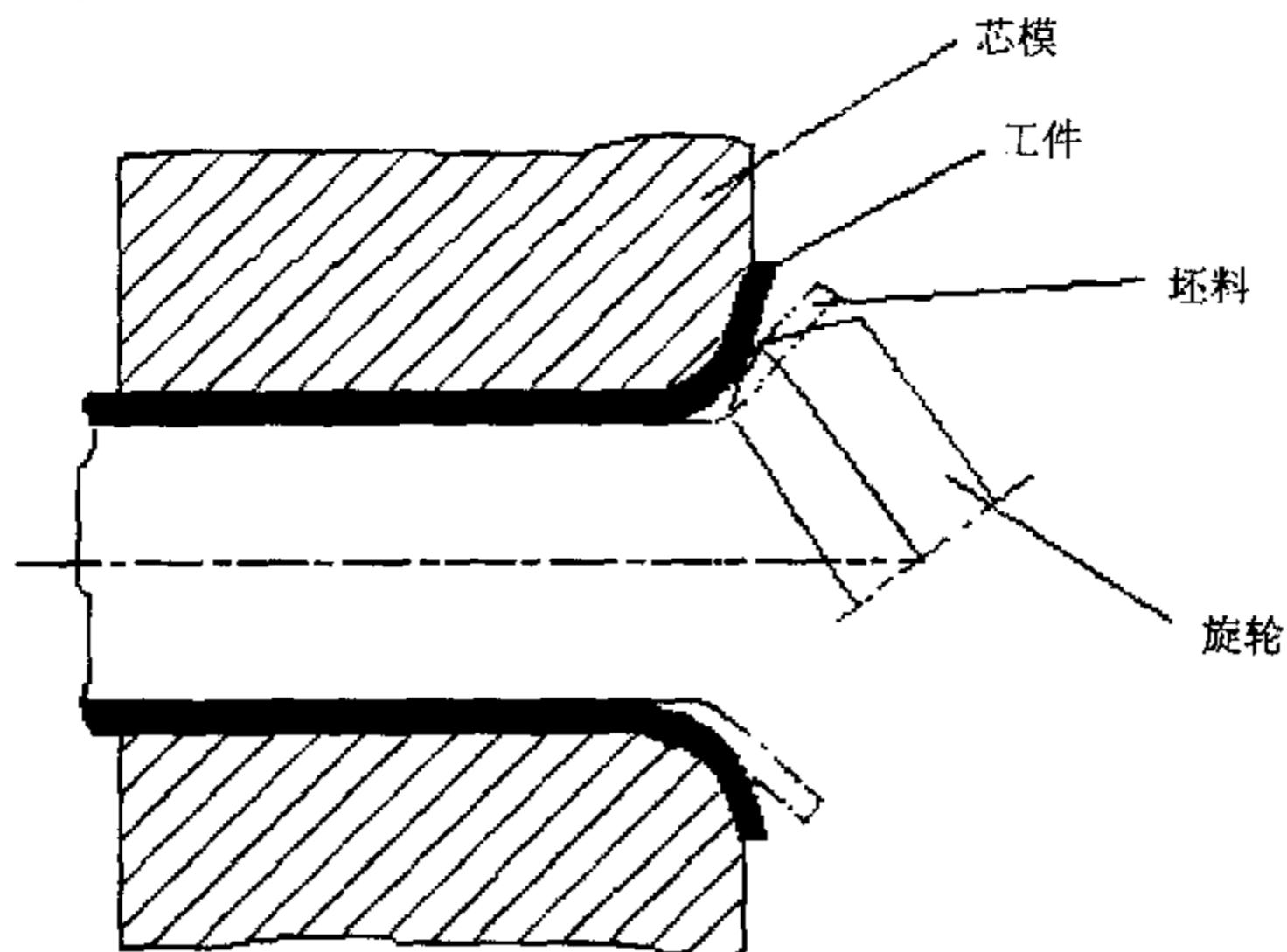


图 2-8 翻边示意图

Fig.2-8 Sketch map of flanging

2.2.2 连续旋压加工成形

对于筒形坯料，除了铝合金以外的普通材料，一道次的减薄率可以达到 0.7~0.8，但是考虑到旋压件的精度和表面质量而取 0.55 为上限，要达到更大的壁厚减薄率就需要进行多道次旋压。密封圈的材质是 1Cr18Ni9Ti 属于冷作硬化钢，如果进行强力的冷加工，如本文中密封圈的旋压，材料内部就会由奥氏体组织迅速变成马氏体组织，造成强度急增，塑性下降，这样增加了后续道次加工的难度。如果坯料的厚径比 t_0/d 达到 0.03 以上，是能够进行一道次旋压成形的。

在密封圈连续旋压加工成形过程中，既包含着普通旋压，也包含着变薄旋压：既有扩口的同时也有翻边的成分。坯料为筒形坯，加工时，先成形一半，然后断料，将半成品反向夹紧固定，旋轮依照同一轨迹旋压成形，这样就可以得到整个的成形件。密封圈的成形过程中，曲线段部分成形时的应力应变状态在很大程度上和翻边一致。只不过，普通翻边翻起角度大，高度小；旋压翻边时一道次翻起较高，变形较普通翻边复杂。旋压加工示

意图如图 2-9 示。

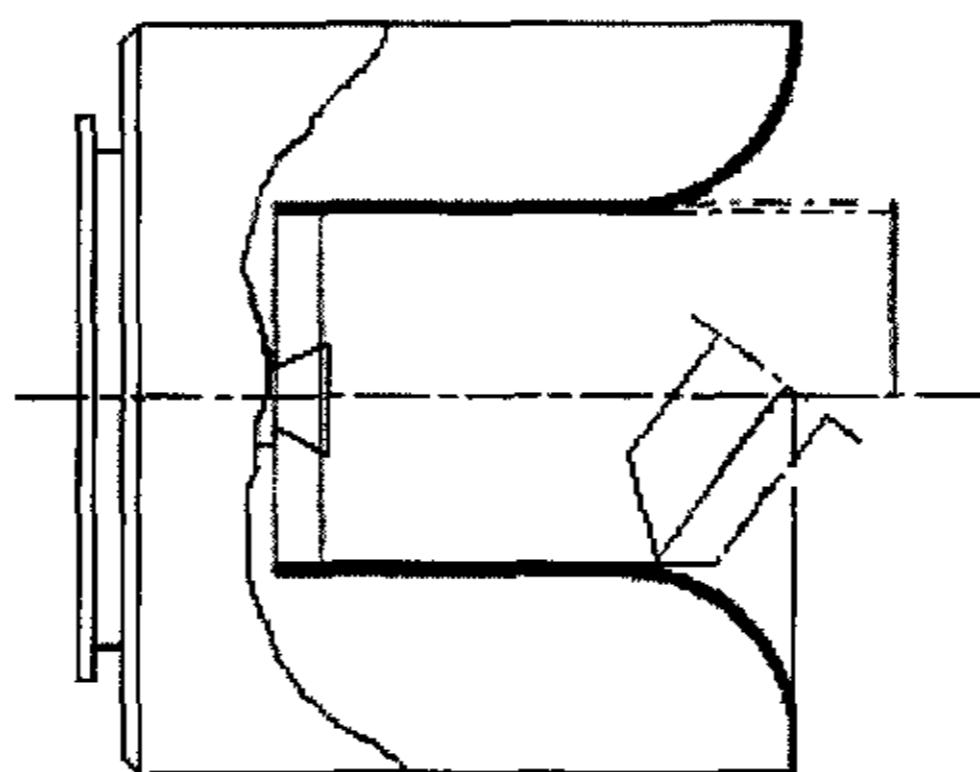


图 2-9 旋压加工示意图

Fig.2-9 Sketch map of spinning processing

2.3 不锈钢密封圈旋压工艺参数的分析

旋压工艺参数的选择合适与否，将直接影响导成形工件的质量，选择不当甚至使旋压过程不能稳定进行。对密封圈的旋压进行有限元数值模拟，目的就是为合理的选择工艺参数提供有效依据。影响密封圈成形的工艺因素很多，有旋轮的形状、旋轮进给率、旋压道次、旋压力等。由于锥角的存在，密封圈的旋压工艺参数的选择同一般的筒形件强力旋压有所不同。

2.3.1 旋轮形状

筒形件强力旋压所用的旋轮形状如图 2-10 所示，其中用的最多的就是 c 种，它对软钢、合金钢和不锈钢等较硬材料尤为合适。它的退出角能使成形工件获得光亮的表面，但它产生的旋压力比 b 种的大。为了模拟的准确性，旋轮的有限元建模将完全按照 c 种的形状建立，以便和实验相对照。旋轮的成形角 α 是一个非常重要的工艺参数， α 越大，隆起就越高而造成金属的非稳定流动，所以 α 有个上限。铝及其合金更容易产生隆起，故其成形角 α 不能取大值。但当 α 取得小时，就会使旋轮与毛坯的接触面积增大，同时使旋压力相应增大而带来不利的影响，因此成形角 α 在 $20^\circ\sim30^\circ$ 的范围内选定。

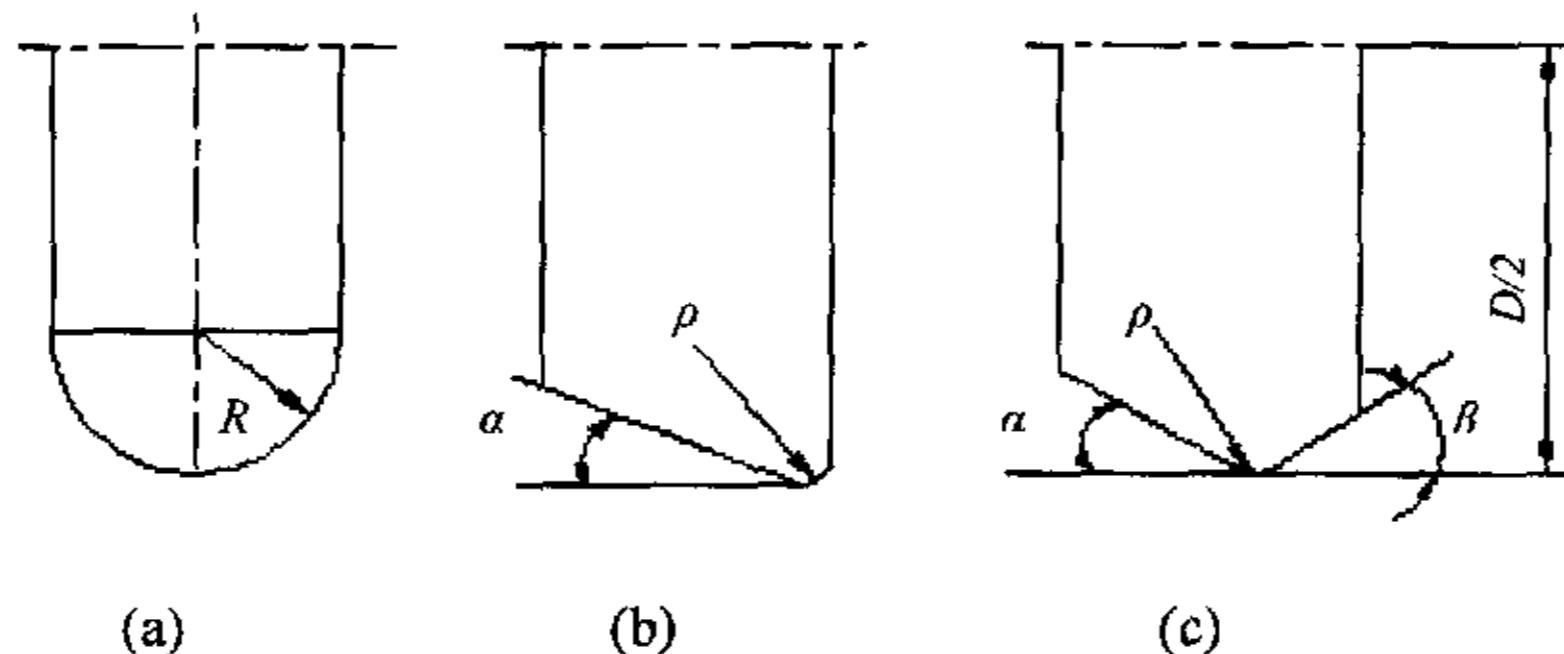


图 2-10 筒形件强力旋压所用旋轮的形状

Fig.2-10 Rollers' figure of the power spinning

旋轮圆角半径 ρ 一般是凭经验取值。 ρ 取的过大造成旋压力增加，工件内径扩大并使薄壁件起皱； ρ 取的过小则容易产生材料的剥离。对硬料可取 $\rho/D=0.015\sim0.03$ ，其中 D 为旋轮的直径，对软料最好取大一些。旋轮外径 D 的选取也很重要。 D 取的过小时使金属的周向流动增加，从而使工件的精度变差。当 D 取的过大时则旋压力与 \sqrt{D} 成正比的增加。通常取用的 D 值是 $(1.2\sim2)d$ ，其中 d 为芯模直径^[38]。在本文中，针对密封圈的成形，最佳参数是通过做大量的模拟得到的。

2.3.2 旋轮进给率

选择旋轮进给率的原则是，在可能的条件下，尽量取大一些。但是过大的进给率会使工件过分牢固的贴在芯模上，而不利于成形后取下工件，还可能导致旋压中的开裂；过小的进给率会使零件内径扩大，尺寸精度恶化，尤其是薄壁筒形件旋压时，很容易产生起皱。

进给率在 $0.5\sim3.0 \text{ mm/r}$ 的范围选取，常用的进给率是 $0.5\sim1.5 \text{ mm/r}$ 。在变薄旋压壁厚管坯时，开始受设备能力限制，进给率不能很大，由此造成工件有一定的扩径量，随后的道次进给率加快可以弥补。

图 2-11 是不锈钢在不同的旋轮进给比和不同的壁厚减薄率下旋压成功区的示例。如果进给量太大，将使旋轮前面形成突起，导致材料的堆积，出现起皮；而过小，又会由于弹性变形的缘故，本来就很小的材料变形流动量分布在沿壁厚方向不同的流动面上，引起材料的夹层现象。

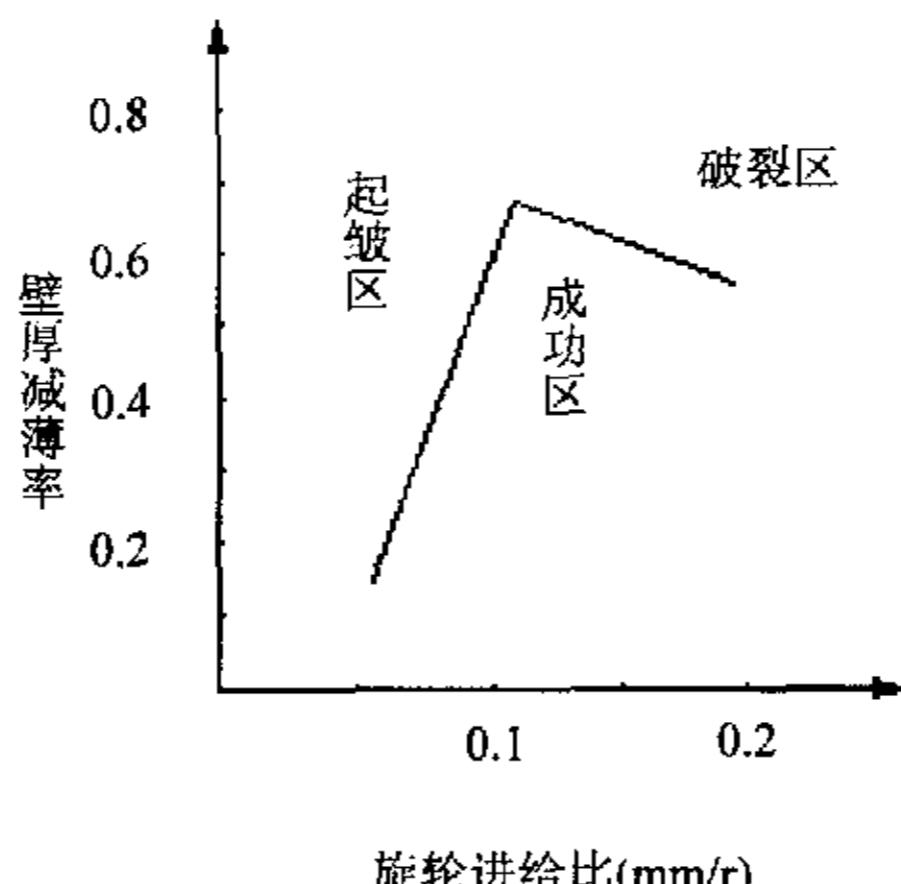


图 2-11 旋压成功区的图示

Fig.2-11 Successful region of spinning

由此可见，为了促成金属的稳定流动，不产生缺陷，对于旋轮进给速度和壁厚减薄率的取值要进行控制，这样的话，才可以旋出成功件，不造成材料的浪费。

由于锥角的形成，进给率对旋压件的影响会出现一些新的情况，进给率过大，将不利于成形后工件的取下，而且容易出现皱曲、鼓包等缺陷；进给率过小，又会导致坯料金属的同一区域和旋轮接触的增加，使得工件的质量无法保证。数值模拟将对几种不同减薄率下的旋压过程进行分析，以得出进给率对密封圈旋压成形的影响规律。

2.3.3 旋压道次

对除铝合金外的普通材料进行筒形件变薄旋压时，一道次的壁厚减薄率 R 可以达到 0.7~0.8。但是考虑到旋压件的精度和表面质量而取 $R=0.55$ 为限。要想达到更大的壁厚减薄率及需要进行多道次旋压。如果每道次要改变旋轮形状而更换旋轮就会降低生产率。把旋轮顶端圆角半径 ρ 取为工件壁厚 t_0 的十倍以下，就可以用一个旋轮完成全部道次。在多道次旋压时后期道次的壁厚减薄率 R_1 可以加大。这是因为初期道次的壁部厚，旋压力大，而且随着成形率的增加材料的隆起变小。

材料经过多道次旋压后，会发生加工硬化，材料很难再发生塑性流动，

硬化越严重，曲线很难形成，所以中间需要进行多次退火。另外，如果多道次旋压，前面已经成形的部分对坯料外壁金属的周向和径向流动将产生阻碍作用，使旋压产生断裂等缺陷。因此，曲母线形件的旋压成形一般采用一道次成形，或者采用不同的芯模实现预成形和终成形。在本课题中弹性密封圈的模拟成形就采用的是一道次成形，但是当壁厚很薄时，会有不贴模的现象发生，这时，只需在其变形基础上再加一道整形工序进行精整便可以达到目的。

2.3.4 旋压力

筒形件强力旋压成形时，旋压力通过旋轮的工作面均匀的作用于工件和旋轮的接触面上。作用力的合力通过接触面的重心，其方向为接触面的重心处的法向。人们感兴趣的不是旋压力的合力而是其分力，因为需要根据旋压力的分量来分别确定旋压设备所需的功率和进给机构的动力。一般将旋压力合力分解为互相垂直的三个分力，即轴向分力、径向分力和周向分力。

旋压力是设计机床、编制工艺流程、设计工艺设备的科学依据。迄今为止，已有萨玛塞(E.Thamasett)、小林(S.Kobayashi)、叶山益次郎(M.Hayama)、陈适先及马泽恩等对旋压力的计算进行了分析并给出了近似表达式，但由于其计算手段过于简单及对实际条件的过多简化，其计算结果不尽如人意^[31-33]。

2.4 本章小结

本章着重对不锈钢密封圈旋压加工采用的两种不同工艺方案进行了论证，分析了影响密封圈成形的主要工艺参数，介绍了旋压力，为有限元数值模拟中工艺参数的选择提供了参考。

第3章 数值模拟的理论分析

3.1 引言

数值模拟是人们在广泛吸收现代数学、力学理论的基础上，借助于计算机来满足工程要求的数值分析。目前在工程领域内常用的有限元法、边界单元法、离散单元法和有限差分法。本文用的是有限单元法。基本思想是将旋压问题的求解域划分为一系列单元，单元之间仅靠节点连接。单元内部点的待求量如应力、应变的变化等可由单元节点量通过选定的函数关系插值得到。单元形状简单，易于建立节点量之间的方程式，然后将各个单元方程集在一起而形成方程组，计入边界条件后即可对方程组求解。

有限元法作为一种有效的数值方法被广泛应用于金属成形过程的数值模拟方面。利用有限元法可在计算机上模拟分析旋压加工时从坯料到制件的整个成形过程，可以求出应力场、应变场、位移场和变形所需的旋压力的大小，还可以给出旋压成形过程中坯料几何形状、尺寸、性能的改变，除此之外，还可以预测缺陷的产生和分析成形质量等。在进行实际加工时，一切都依照经验、依靠试验确定参数的选取范围，有了数值模拟的结果，就可以控制参数的取值在一个较小的范围内，这样就无需做大量的试验研究，减小了工作量。

本文所研究的密封圈的旋压成形是局部大位移变形，模拟应用的是 ANSYS 软件，大变形弹塑性有限元理论。

3.2 大变形弹塑性有限元法基础理论

3.2.1 物体的构形及描述

为了描述物体变形前后两种不同的状态，引入了参考构形和变形构形。我们把物体中所有物质点瞬时位置的集合—某一瞬时物体在空间所占据的区域定义为该物体的构形^[34]。令 $t=0$ 时，物体的初始构形为 V_0 ，物体上的

任一质点 P 的位置坐标为 $x_i (i=1, 2, 3)$ 。设此后在某一瞬时 t , 物体发生了变形, 此时物体的构形称为变形构形。P 点变形后被移动到 Q 点, 其位置坐标为 $x'_i (i=1, 2, 3)$ 。如果令两坐标系重合, 变形后的构形如图 3-1 所示。

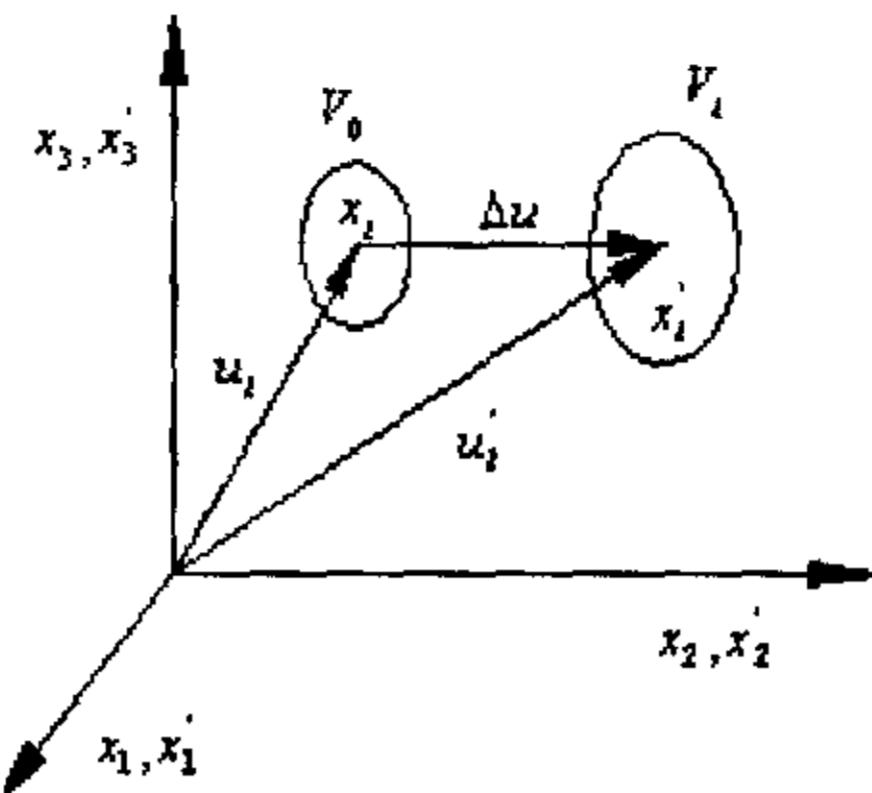


图 3-1 物体的构形描述

Fig.3-1 Description of object

显然, 对于同一质点而言, 变形前后坐标的关系为

$$x'_i = x'_i(x_1, x_2, x_3, t) \quad i=1, 2, 3 \quad (3-1)$$

物质中质点的运动有两种描述方式。我们把以 $x_i (i=1, 2, 3)$ 和 t 作为独立的变量来描述物体的运动(或变形), 称为物质描述(material description)或拉格朗日 (Lagrange) 描述, 其中 $x_i (i=1, 2, 3)$ 和 t 称为拉格朗日变量。这种描述是随着运动的质点来研究质点的运动状态。另一种描述运动(或变形)的方法称为空间描述(spatial description), 它以 $x'_i (i=1, 2, 3)$ 和 t 作为独立的变量。这种描述又称为欧拉(Euler)描述, 其中 $x'_i (i=1, 2, 3)$ 和 t 称为欧拉变量。空间描述的研究方法不是跟随着运动的质点研究其运动状态, 而是研究各不同质点经过空间某一点 $x'_i (i=1, 2, 3)$ 时的状态。或者说, 拉格朗日描述是以变形前的状态, 即以已知的初始构形 V_0 为参考状态来描述物体的运动, 而欧拉描述则是以当前的构形为参考状态来描述物体的运动状态。通常, 采用物质描述来求解固体力学方面的问题, 而空间描述则更适合于求解流体力学方面的问题^[35~37]。

3.2.2 弹塑性大变形有限元形式方程

对等参单元，坐标和位移插值公式是

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^0x_i = \sum_{k=1}^n N_k {}^0x_i^k \\ {}^t x_i = \sum_{k=1}^n N_k {}^t x_i^k \\ {}^{t+\Delta t} x_i = \sum_{k=1}^n N_k {}^{t+\Delta t} x_i^k \\ {}^0 u_i = \sum_{k=1}^n N_k {}^0 u_i^k \\ u_i = \sum_{k=1}^n N_k u_i^k \end{array} \right. \quad (3-2)$$

式中 ${}^t x_i^k$ ——节点 k 相当于 t 时刻的 i 方向的坐标

${}^0 u_i^k$ ——节点 k 相当于 t 时刻的 i 方向的位移

N_k ——节点 k 的形函数

n ——单元插值节点的总数

按照一般有限元方法，利用(3-2)导出积分式中所要用的位移倒数，于是

$$({}_0^t [K_L] + {}_0^t [K_{NL}]) \{U\} = {}^{t+\Delta t} \{R\} - {}_0^t \{F\} \quad (3-3)$$

其中载荷矢量 ${}^{t+\Delta t} \{R\}$ 常规方法插值求得， ${}_0^t [K_L] \{U\}$ ， ${}_0^t [K_{NL}] \{U\}$ 和 ${}_0^t \{F\}$ 分别是

$\int_V {}^0 C_{yrs} {}^0 e_{rs} \delta_0 e_y {}^0 dV$ ， $\int_V {}^t S \delta_0 \eta_y {}^0 dV$ 和 $\int_V {}^t S_y \delta_0 e_y {}^0 dV$ 的有限元矩阵形式，

即

$${}_0^t [K_L] = \int_V {}^t [B_L] {}_0^t [C] {}^0 [B_L] {}^0 dV \quad (3-4)$$

$${}_0^t [K_{NL}] = \int_V {}^t [B_{NL}] {}^T {}_0^t [S] {}_0^t [B_{NL}] {}^0 dV \quad (3-5)$$

$${}_0^t [F] = \int_V {}^t [B_L] {}_0^t [S] {}^0 dV \quad (3-6)$$

式中 ${}^t [B_L]$ 和 ${}^t [B_{NL}]$ ——应变、位移转换阵的线性和非线性形式

${}_0^t [C]$ ——增量材料特性阵

 $[C]_0'[S]$ ——Kirchhoff 应力构成的矩阵

3.2.3 弹塑性本构方程

由于金属的弹塑性本构关系具有非线性性质，且与其应变过程和加载路径有关，故本构关系是一种瞬态关系。

目前，采用的本构关系可分为两类：一种是全量理论(形变理论)；另一种是增量理论(塑性流动理论)。弹塑性有限元法多采用增量理论，本文中应用的也是增量理论。

在大变形弹塑性有限元法中，要得到的本构方程，可以从小变形弹塑性理论的本构关系推广得到，它是比小变形弹塑性变形本构方程更有普遍意义的双重非线性本构方程^[38]。

对于金属材料的大变形弹塑性问题，按有限变形理论求解时，仍可近似地应用小变形理论中的普朗特—劳斯方程。

大变形弹塑性加—卸载准则与小变形弹塑性加—卸载准则形式上相同，只要把其中的应力认为是柯西应力即可；大变形弹塑性速率型(或增量型)本构方程也与小变形弹塑性增量型本构方程在形式上类似，只要把其中的应力和应变分别改用柯西应力的久曼导数和变形速率，应力偏量和等效应力分别改用柯西应力偏量和等效的柯西应力即可。

本构方程的张量分量形式为

$$\tau_{ij}^v = D_{ijkl} e_{kl} \quad (3-7)$$

式中 D_{ijkl} ——弹塑性张量

τ_{ij}^v ——柯西应力张量的久曼导数

e_{kl} ——阿尔曼斯应变速率张量

根据塑性流动理论，对于各向同性硬化材料，按普朗特—劳斯方程来确定 D_{ijkl} 。

速率型的普朗特—劳斯方程为

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \epsilon_{kl} - \alpha \cdot \lambda \sigma_{ij} \right] \quad (i,j,k,l=1,2,3) \quad (3-8)$$

其中

$$\lambda = \frac{1}{\frac{2}{3}\sigma^2 \left(1 + \frac{2}{3} \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon^p} \frac{1+\nu}{E} \right)} \sigma_{ij} \varepsilon_{kl} \quad (3-9)$$

式中 δ_{ij} —— 克罗内克尔符号

α^* —— 载荷性质判断因子

塑性加载过程或中性变载过程 $\alpha^* = 1$

弹性加载过程 $\alpha^* = 0$

卸载过程 $\alpha^* = 0$

式(3-8)是在小变形理论基础上得到的, σ_{ij} 为应力分量; σ'_{ij} 为应力偏量; ε_{ij} 为应变分量; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变, E 为弹性模量; ν 为泊松比。

把式(3-8)应用于大变形有限元分析时, 把 σ_{ij} 改为 τ_{ij}^v , ε_{kl}^i 改为 e_{kl}^i , 欧拉应力 σ 改为柯西应力 τ , 把式(3-9)代入(3-8)后得

$$\tau_{ij}^v = \frac{E}{1+\nu} \left[\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \alpha^* \frac{\tau_{ij} \tau_{kl}}{\frac{3}{2} \tau^{-2} \left(1 + \frac{2}{3} H \frac{1+\nu}{E} \right)} \right] e_{kl}^i \quad (3-10)$$

对比式(3-7)和式 (3-10), 可得

$$D_{ijkl} = \frac{E}{1+\nu} \left[\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \alpha^* \frac{\tau_{ij} \tau_{kl}}{\frac{3}{2} \tau^{-2} \left(1 + \frac{2}{3} H \frac{1+\nu}{E} \right)} \right] \quad (3-11)$$

这样, 对于各向同性金属材料的三维弹塑性变形, 从小位移小应变的本构方程式(3-8)出发, 就得到了更普遍意义上的本构方程式(3-11), 它既适用于小位移小应变的情况, 也适用于大位移大变形的情况。

3.2.4 增量形式的平衡方程式与 T.L. 公式

3.2.4.1 增量形式的平衡方程 对于非线性问题, 在使用变分原理或虚功原理时, 应考虑结构经受大位移、大应变和应力应变关系非线性的情况。因此在考虑非线性结构的平衡方程时, 必须建立起当前的位移, 并使用增

量形公式，采用逐步求解的方法。

采用 Lagrangian 描述。描述物体在 $t=0$ 时刻的位形的坐标是 0x_i ， t 时刻位形的坐标是 ${}^t x_i$ ， $t+\Delta t$ 时刻的位形的坐标是 ${}^{t+\Delta t} x_i$ 。其中，左上标代表物体的位形，右下标代表物体坐标分量。

如已知离散时间点 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, t$ 时刻的形态，利用虚功原理所建立的方程可解出 $t+\Delta t$ 时刻的静动态变量。

虚功方程表示了物体在 $t+\Delta t$ 时刻的平衡，表达为：

$$\int_{+{\Delta t}_v} {}^{t+\Delta t} \sigma_{ij} \delta_{t+\Delta t} e_{ij} {}^{t+\Delta t} dV = {}^{t+\Delta t} R \quad (3-12)$$

式中 ${}^{t+\Delta t} \sigma_{ij}$ —— 应力张量笛卡儿分量

${}_{t+\Delta t} e_{ij}$ —— 无限小应变张量笛卡儿分量

${}^{t+\Delta t} R$ —— 外力的虚功

$$\delta_{t+\Delta t} e_{ij} = \delta \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial {}^{t+\Delta t} x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial {}^{t+\Delta t} x_i} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \delta u_i}{\partial {}^{t+\Delta t} x_j} + \frac{\partial \delta u_j}{\partial {}^{t+\Delta t} x_i} \right] \quad (3-13)$$

$${}^{t+\Delta t} R = \int_{+{\Delta t}_v} {}^{t+\Delta t} f_i \delta u_i {}^{t+\Delta t} dV + \int_{+{\Delta t}_v} {}^{t+\Delta t} t_i \delta u_i {}^{t+\Delta t} dS \quad (3-14)$$

式中 ${}^{t+\Delta t} f_i$ —— 作用在物体上的外力

${}^{t+\Delta t} t_i$ —— 作用在物体上的面力矢量

δu_i —— 虚位移矢量的第 i 个分量

3.2.4.2 T.L.公式 现在的问题是求解基本方程(3-12)，它是对应于 $t+\Delta t$ 时刻的位形，考虑物体的平衡和协调条件得出的，必然涉及到合适的应力和应变描述，而且，本构关系也要通过应力的计算而包括在方程中。

为了描述 $t+\Delta t$ 时刻的平衡状态，通常采用 Lagrangian 进行描述。它有两种表达方法，即以 $t=0$ 时刻状态为度量基准的 T.L. 描述方法和以 $t=t$ 时刻状态为度量基准的 U.L. 描述方法。

在此我们主要介绍 T.L. 描述方法。

T.L. 方法的主要特点是：式(3-12)和式(3-14)中的变量是参照物在 $t=0$ 时刻的位形定义的。方程(3-14)中的外加载荷由下式定义为

$$\int_{\Delta V}^{t+\Delta t} t_i^{t+\Delta t} dS = \int_S t_i^0 dS \quad (3-15)$$

$$\int_{\Delta S}^{t+\Delta t} f_i^{t+\Delta t} dV = \int_V f_i^0 dV \quad (3-16)$$

在这里, 我们假设外力 $t_i^{t+\Delta t}$ 和 $f_i^{t+\Delta t}$ 的方向和数值并不依赖于物体在 $t+\Delta t$ 时刻的位形。于是, 方程式(3-12)中的 Cauchy 应力积分式变为

$$\int_{\Delta V}^{t+\Delta t} \sigma_{ij} \delta_{t+\Delta t} e_j^{t+\Delta t} dV = \int_V t_0^{t+\Delta t} S_{ij} \delta_0^{t+\Delta t} \varepsilon_j^0 dV \quad (3-17)$$

其中, $t_0^{t+\Delta t} S_{ij}$ 是 $t+\Delta t$ 时刻但在 $t=0$ 时刻位形中定义的 Kirchhoff 应力张量的迪卡尔分量, $\delta_0^{t+\Delta t}$ 是参考 $t=0$ 时刻的位形在 $t=\Delta t$ 时刻的 Green 应变张量的迪卡尔分量的变分。

将方程式(3-15)、式(3-16)和式(3-17)代入方程式(3-12)中, 即可得到相对于 0 时刻位形的物体在 $t+\Delta t$ 时刻位形的平衡方程。即

$$\int_V t_0^{t+\Delta t} S_{ij} \delta^{t+\Delta t} \varepsilon_j^0 dV = t^{t+\Delta t} R \quad (3-18)$$

其中, $t^{t+\Delta t} R$ 由下式给出为

$$t^{t+\Delta t} R = \int_S t_0^{t+\Delta t} t_i \delta u_i^0 dS + \int_V t_0^{t+\Delta t} f_i \delta u_i^0 dV \quad (3-19)$$

将 $t+\Delta t$ 时刻的应力和应变分别看成 t 时刻的应力和应变及增量应力和应变之和, 并将增量应变写成线性部分和非线性部分之和, Kirchhoff 应力增量与 Green 应变增量由本构张量 C_{yrs} 相联系, 即可得到 T.L. 描述的非线性方程。为了便于求解, 将其线性化即得增量形式的 T.L. 方程

$$\int_V C_{yrs} e_{rs} \delta_0 e_{ij}^0 dV + \int_V t_0' S_{ij} \delta_0 \eta_{ij}^0 dV = t^{t+\Delta t} R - \int_V t_0' S_{ij} \delta_0 e_{ij}^0 dV \quad (3-20)$$

3.3 动态分析有限元法

本文中, 旋压加工不锈钢 U 型密封圈时, 旋轮与被加工件都在转动, 并在一定成形轨迹的进给中实现工件的成形。是典型的动态分析, 用的是动态分析有限元法。

3.3.1 动态分析有限元法的特点

动态分析又称动力分析，包括固有特性分析和响应分析。

动态分析与静力分析的一个根本区别就是结构所受的载荷是随时间变化的动载荷。

在动态分析有限元法中，仍以节点位移 $\{q\}$ 作为基本未知量，但这时 $\{q\}$ 不仅是坐标的函数，也是时间的函数，即

$$\{q\} = \{q\}(x \ y \ z \ t) \quad (3-21)$$

因此节点具有速度 $\{\dot{q}\}$ 和加速度 $\{\ddot{q}\}$ 。利用节点位移插值表示单元内任一点的位移时，一般采用与静力分析相同的形函数，即

$$\{d\} = [N]\{q\}^e \quad (3-22)$$

其中， $[N]$ 就是静力分析中的形函数矩阵。当单元数量较多时，上述插值可以得到较好的插值精度。在线弹性条件下，单元内的应变和应力与节点位移的关系仍为

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\}^e \quad (3-23)$$

$$\{\sigma\} = [D][B]\{q\}^e \quad (3-24)$$

但这时的位移、应变和应力都是某一时刻的瞬时值，它们都是随着时间 t 变化的函数。

由于节点具有速度和加速度，结构将受到阻尼和惯性力的作用。

根据达朗伯原理，引入惯性力和阻尼力之后，结构仍处于平衡状态，因此，动态分析中仍可采用虚位移原理来建立单元特性方程，然后，再根据整体平衡条件与静力分析相同的集成方式，就可得到整个结构的平衡方程。

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{R(t)\} \quad (3-25)$$

式(3-25)又称为运动方程，它不再是静力问题那样的线性方程，而是一个二阶常微分方程组，其求解过程要复杂许多，所以建立有限元模型时要特别注意控制模型规模。

动态分析有限元法的基本思想与静力分析是一致的，只是由于有限元方程的形式不一样，而求解方程的方法和计算内容不同。

3.3.2 动态分析有限元法的一般步骤

在应用动态分析有限元法时，一般按照以下的步骤进行：

(1)结构离散 该步骤与静力分析完全相同，只是由于两者分析内容不同，对网格形式的要求有可能不一样。例如，静力分析要求在静力集中部位加密网格，但在动态分析中，由于固有频率和振型主要与结构的质量和刚度分布有关，因此它要求整个结构采用尽可能均匀的网格形式。

(2)单元分析 单元分析的任务仍是建立单元特性矩阵，形成单元特性方程。在动态分析中，除刚度矩阵外，单元特性矩阵还包括质量矩阵和阻尼矩阵，采用虚位移原理来求单元特性矩阵。单元质量矩阵通常采用一致质量矩阵和集中质量矩阵。

(3)总体矩阵集成 它的任务是将各单元特性矩阵装配成整个结构的特性矩阵，从而建立整体平衡方程。

(4)固有特性分析 结构的固有特性由结构本身决定，与外部载荷无关，它由一组模态参数定量描述。模态参数包括固有频率、模态振型、模态质量、模态刚度和模态阻尼比等，其中最重要的参数是固有频率、模态振型和模态阻尼比。固有特性分析就是对模态参数进行计算，其目的一是避免结构出现共振和有害的振型，二是为响应分析提供必要依据。

(5)响应分析 目的是计算架构在动载荷作用下，节点位移、速度和加速度的变化规律。求解方法主要有振型叠加法和直接积分法。

(6)结果处理和显示 分析完毕后，对计算结果进行必要的处理，并按一定方式显示，以研究结构的动态特性和对给定动载荷的响应情况。在动态分析中，结构的各种响应常常用时间历程曲线表示，结构的振型常用变形图或动画显示，其他模态参数可通过列表方式列出。

3.4 显式动态分析概述

目前在国际上的商品化软件中，关于接触问题大变形弹塑性有限元算法主要分为两大类。一类是采用显式动态算法，如本课题所采用的 ANSYS/LS-DYNA 和 LSDYNA3D、ABAQUS/Explicit 等；另一类是采用隐

式算法，如 ANSYS、Marc 等。所谓“显式”是指某一时间段结束时的状态仅取决于该时间段开始时的位移、速度和加速度，即当前时刻的位移只与前一时刻的加速度与位移有关，将质量矩阵与阻尼矩阵对角化后，这种算法可直接计算当前时刻的位移，不必形成刚度矩阵，不需求解联立方程，因而使计算过程大大简化。显式动态分析方法对于求解高速动力学事件、复杂接触问题、复杂的后曲面问题、高度非线性准静态问题、材料失效和破坏等非常有效。旋压、锻压以及薄板成型等属于高度非线性准静态问题。

3.4.1 显式时间积分

ANSYS/LS-DYNA 采用中心差分方法对时间进行积分求解，来完成用一个时间段的运动学条件去计算下一个时间段的运动学条件。在时间段开始时，程序求解动力平衡方程，即用节点质量矩阵 M ，乘以节点加速度 \ddot{u} ，等于节点的合力(外力 P 与单元内力 F 之间的差)

$$M\ddot{u} = P - F \quad (3-26)$$

在当前时间段开始时(t 时刻)的加速度为

$$\ddot{u}|_t = M^{-1}(P - F)|_t \quad (3-27)$$

因为显式算法常采用一个对角的或者块状的质量矩阵，所以求解加速度是不麻烦的，不必同时求解联立方程。任何节点的加速度完全取决于节点的质量和作用在节点上的力，致使节点计算成本低。

加速度是由中心差分法的时间积分取得的，即假定加速度为常数以求得速度的变化，用这个速度的变化值加上前一个时间段中点的速度来确定当前时间段的中心速度

$$\dot{u}|_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{u}|_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\Delta t|_{t+\Delta t} + \Delta t|_{\Delta t}}{2} \cdot \ddot{u}|_t \quad (3-28)$$

速度沿时间积分的结果加上此时间段开始时的位移，确定了时间段结束时的位移

$$u|_{t+\Delta t} = u|_t + \Delta t|_{t+\Delta t} \cdot \dot{u}|_{t+\frac{\Delta t}{2}} \quad (3-29)$$

这样，在时间段开始时，提供了满足动力学平衡条件的加速度。知道了加

速度，通过对时间的“显式”求解，可以进一步求出速度和位移。

下面是显式动力学方法的运算法则总结

(1) 节点计算 动力平衡方程

$$\ddot{u}|_t = (M)^{-1}(P - F)|_t \quad (3-30)$$

对时间显示积分

$$\dot{u}|_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{u}|_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\Delta t|_{t+\Delta t} + \Delta t|_{\Delta t}}{2} \cdot \ddot{u}|_t \quad (3-31)$$

$$u|_{t+\Delta t} = u|_t + \Delta t|_{t+\Delta t} \cdot \dot{u}|_{t+\frac{\Delta t}{2}} \quad (3-32)$$

(2) 单元计算 根据应变速率 $\dot{\varepsilon}$ ，计算单元应变增量 $d\varepsilon$ ；

根据本构关系计算应力 σ

$$\sigma|_{t+\Delta t} = f(\sigma|_t, d\varepsilon); \quad (3-33)$$

汇集节点内力 $F|_{t+\Delta t}$ 。

(3) 设置 $t + \Delta t$ 为 t ，返回到步骤 1。

3.4.2 显式算法对隐式算法的优越性

隐式算法的显著优点是能够连续地模拟从塑性加载到弹性卸载全过程，并允许使用较大的加载时间步长。但在处理复杂的接触问题时，迭代计算过程缓慢，常常难以收敛，而且求解切线刚度矩阵速度很慢，所需时间很长，因此计算效率不如显式算法。

显式方法特别适用于求解需要分成许多小的时间增量来达到高精度解的高速动力学问题。接触问题和其他一些非线性连续事件在显式方法中很容易表达清楚并且能够一个节点一个节点地进行求解而不必迭代。同时显式方法不须转置刚度矩阵，不用收敛检查。因此计算效率较高。

使用显式方法，机时消耗与单元数量成正比，大致与最小单元的尺寸成反比。网格细划因增加了单元数量和减小了最小单元的尺寸而使机时增加。用隐式方法时，经验表明对于许多问题的计算成本大致与自由度的平方成正比。因此，随着模型尺寸的增长，显式方法比隐式方法节约成本。

3.5 本章小结

本章介绍了有限元数值模拟对旋压中的非线性问题的处理方法。介绍了弹塑性大变形有限元法的方程形式和建立方法，显示动力分析模块 LS-DYNA，以及本课题所用的显示方法和隐式方法的一些比较，为数值模拟提供了理论依据。

第4章 密封圈复合旋压的数值模拟问题的处理

4.1 引言

密封圈的复合旋压过程是一个集材料、几何、接触条件三重非线性因素耦合的复杂变形问题。制定合理的旋压工艺及进行旋压机理方面的研究是旋压成形所需要解决的主要问题之一，由于旋压过程本身的复杂性，用现有的塑性理论可以推导出其理论计算的计算公式，但准确度不高，因此工艺参数的选择等主要依据经验而定。为此，人们寻求用数值模拟的方法来解决这个问题。目前国内外关于普通筒形件强旋的数值模拟方面的成果很多^[39~53]，但是对于曲母线异形件的复合旋压的数值模拟研究则很少。本课题主要对密封圈三维有限元模型的复合旋压成形进行数值模拟，并对数值模拟结果进行分析，进而得出不同工艺参数对密封圈旋压成形的影响。

数值模拟是在应用有限元法基础原理和变分原理的基础上，利用ANSYS 软件，加以适当的技术分析技巧，从而实现研究的目的。但是在数值模拟中可能会出现很多问题和障碍，需要对具体的问题采取具体的解决方案。

在密封圈旋压成形数值模拟研究中需要解决问题的是，寻求实现旋压成形过程的三维数值模拟方法和手段，使其模拟成形过程与实际密封圈成形过程相符合。为实现这一目的，需重点考虑旋压加工过程中的各种条件不断变化的情况，如旋轮运动的实现、旋轮与坯料及坯料与芯模之间的接触、摩擦等。在模拟过程中需要考虑到这些条件对成形的影响，对其进行适当的调整处理，从而使模拟更好的与实验情况相符合，以达到对密封圈复合旋压的变形过程进行数值模拟的目的。

数值模拟的基本技术路线大致包括以下几个步骤：

(1)建立有限元模型，包括数学模型的建立、材料属性的设置、网格的划分。

-
- (2)边界条件的设置，包括对接触、摩擦、对称、约束和初始条件处理。
 - (3)求解计算。
 - (4)对结果进行后处理，得出结论^[54-61]。

本章密封圈的旋压工艺按照以上步骤进行成形过程的数值模拟，得出了变形过程中应力、应变的分布规律，对密封圈的旋压成形时各种因素及工艺参数的影响进行了分析，并对产生缺陷的参数影响范围进行了界定。

4.2 ANSYS/LS-DYNA 的二次开发功能

ANSYS 具有良好的开放性，用户可以根据自身的需要在标准 ANSYS 版本上进行功能扩充和系统集成，生成具有行业分析特点和符合用户需要的 ANSYS 二次开发程序。它的二次开发功能包括以下四个组成部分：参数化程序设计语言(APDL)、用户界面设计语言(UIDL)、用户程序特性(UPFS)、ANSYS 数据接口。ANSYS/LS-DYNA 包含了 ANSYS 的所有二次开发方面的功能。

(1)参数化程序设计语言(APDL) APDL 语言由类似于 FORTRAN77 的程序设计语言部分和 1000 多条 ANSYS 命令组成。和其他编程语言一样，其具有参数、数组表达式、函数、流程控制(循环与分支)、重复执行命令、缩写、宏以及用户程序等。在 ANSYS 界面里定义几何模型、划分单元网格、材料定义、添加载荷和边界条件、控制和执行求解以及后处理计算结果等操作，都与 APDL 语言里的命令一一对应。因此用户可以利用 APDL 语言将 ANSYS 命令组织起来，编写出参数化的用户程序，从而实现有限元分析的全过程。

(2)用户界面设计语言(UIDL) UIDL 语言是用来编写或改造 ANSYS 图形界面的专用设计语言，主要完成以下三种图形界面的设计：主菜单系统、菜单项对话框和拾取对话框、帮助系统。

UIDL 语言可以让用户在扩充 ANSYS 功能的同时建立起对应的图形驱动界面，如在主菜单的某位置增加菜单项，设计对应的对话框、拾取对话框，实现参数的输入和其它程序运行的控制，同时提供相应的联机帮助，使操作者能方便地获取系统帮助。

(3) 用户程序特性(UPFS) UPFS 语言向用户提供丰富的 FORTRAN77 用户程序开发子程序和函数，用户利用它们从开发程序源代码的级别上扩充 ANSYS 的功能。使用这些子程序和函数，编写用户功能的源代码程序，在与 ANSYS 版本要求匹配的 FORTRAN 或 C++ 编译器上重新编译和连接，生成用户版本的 ANSYS 程序。另外，还提供了外部命令功能，允许用户创建 ANSYS 可以利用的共享库。还可以利用 UEROP 创建用户优化程序，将 ANSYS 程序作为子程序在用户程序中调用等。

(4) ANSYS 数据接口 ANSYS 程序在分析过程中生成的很多文件，如：数据库文件、结果文件、模态结果文件、单元矩阵文件、子结构矩阵文件、对角化刚度矩阵文件、缩减位移矩阵文件、缩减频率矩阵文件和完整的刚度—质量矩阵文件等，都是二进制文件，并分别以不同的格式存放在工作目录中。ANSYS 数据接口语言可利用各种子程序或函数处理这些二进制文件，实现对二进制数据的读写和修改功能^[62-76]。

ANSYS 软件拥有当今数值模拟比较先进的处理方法，为金属塑性成形提供了良好的模拟空间。

4.3 有限元模型的建立和边界条件的处理

几何建模过程全部在 ANSYS 软件的前处理模块中完成。由于旋压过程的复杂性，以往的研究大都把筒形件的旋压简化为平面应变模型，这样很难反映出工件整体的变形情况及旋轮作用区域周围的变形以及应力的分布状态。

本课题采用参数化建模，在实现参数的控制上，主要是 ANSYS 的二次开发功能 APDL，通过控制对话框里面输入的数值就可以对模拟过程进行控制。所以，在分析工艺参数对成形过程中成形区应力、应变的影响时，只需将不同的参数值输入，通过计算机进行模拟运算，然后我们对得到的结果进行分析、归纳，就可以得到这些参数对密封圈成形的影响。用户按界面指示输入各参数值后，将调用 ANSYS/LS-DYNA，并根据输入参数建模、划分网格，然后求解运算，进行后处理，输出所需的结果。

模拟结构如图 4-1 所示。

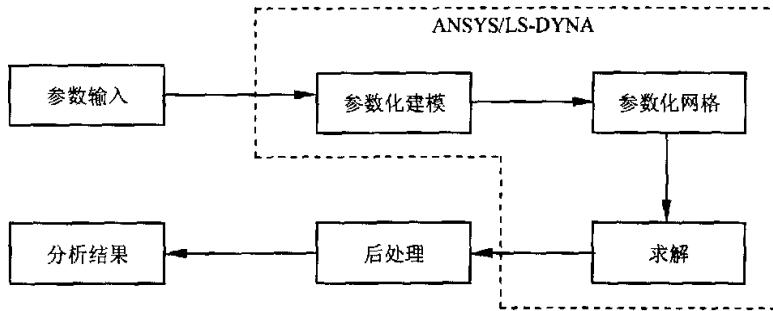


图 4-1 模拟结构图

Fig.4-1 Frame chart of simulation

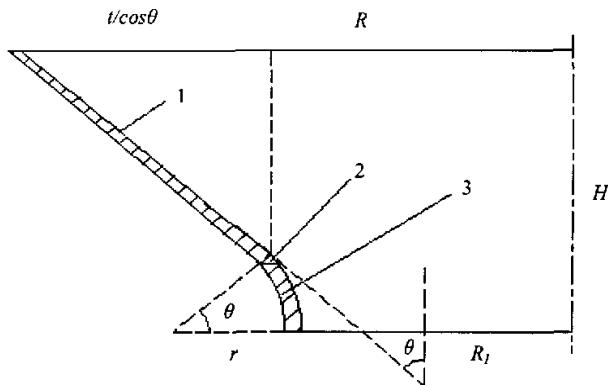
4.3.1 模型的建立

本文中用来模拟密封圈旋压成形的实体模型包括三部分：坯料、旋轮和芯模(外模)。坯料为薄壁筒形坯，成形过程中，普旋扩口占的成分较多，和薄板旋压成形类似。在建立三维模型时是完全参数化建模，通过工件的尺寸确定芯模和坯料变形的减薄率，坯料尺寸的计算也是通过编程计算机自动完成。编写时，首先要计算的是工件的体积，因为旋压加工是少切削无废料的加工，基本上成形工件的体积和坯料体积是相符的，所以坯料的体积计算取决于旋压工件体积的计算。由于工件是对称的，我们取一半来进行分析计算，它的另半部分可以通过对称得到。

在计算坯料尺寸的时候，原则上是应用体积不变原理。由于旋压件一般为薄壁回转体空心零件，所以其体积的计算方法是外形体积减去内形体积。当旋压件形状复杂时，需将外形和内形分别划分为若干简单几何体，将各简单几何体相加，即得总的外形和内形体积。在本课题中所研究的密封圈，它的外形是曲母线，形状复杂，在计算体积的时候，分成几段进行计算。

工件截面由锥形段 1 和圆弧段 3 组成，在计算工件体积的时候锥形段旋转得到的是空心圆台，由公式可以得到，比较好算；但是圆弧段旋转得出的是空心旋转体件的一部分，为了得到比较精确的解，采用积分的方法。

计算工件体积的截面示意图如图 4-2 所示：



1-圆台区 2-不规则区 3-圆角过渡区

图 4-2 用以计算坯料体积时的工件示意图

Fig.4-2 The sketch map of work-piece to calculate the volume of material

图中各个参数的意义如下：

R ——工件外端半径

r ——圆弧段半径

R_l ——工件中部半径

t ——工件厚度

θ ——工件锥段倾角

H ——工件高度

在计算 1 区体积的时候，只要用外部体积减去内部体积就可以了，计算圆台体积公式如下：

$$V_1 = \frac{\pi}{12} H (D^2 + d^2 + Dd) \quad (4-1)$$

计算 2 区体积的时候，可以用公式来进行计算，为了得到更精确的值，在本文中采用积分法来进行计算。

$$V_2 = \iiint_{l_1 \rightarrow l_2} \left(\frac{t}{\cos \alpha} \right)^2 d\alpha \times \pi \left(\frac{t}{\cos \alpha} \right)^2 \times \frac{d\alpha}{2\pi} \times 2\pi \times r \cos \alpha d\alpha \quad (4-2)$$

计算 3 区体积的时候，因为是圆角过渡体，也可以用公式进行计算，

公式如下：

$$V_3 = \frac{\pi}{12} r [3d^2 + 2(10 - 3\pi)r^2 + 3(4 - \pi)dr] \quad (4-3)$$

综上，工件的体积为

$$V = V_1 - V_2 + V_3 \quad (4-4)$$

其次是要设计旋轮的尺寸，这时需要考虑旋轮直径、旋轮圆角半径和旋轮成形角。

密封圈尺寸图如图 4-3 示，建立的数值模拟三维有限元模型如图 4-4 示，可以很好的模拟出曲母线形件的旋压成形过程。在实际加工中，坯料在夹紧装置的固定下随芯模旋转，同时旋轮在坯料内部作轴向和径向进给运动，有限元建模时将按照实际的工艺条件，对一些相关因素进行必要的假设和简化，以利于模拟的顺利进行。

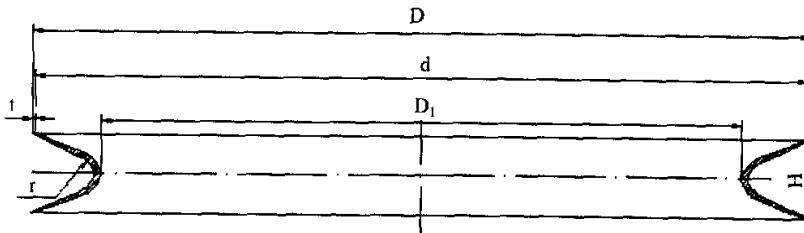


图 4-3 密封圈尺寸图

Fig.4-3 Figure of gland's dimension

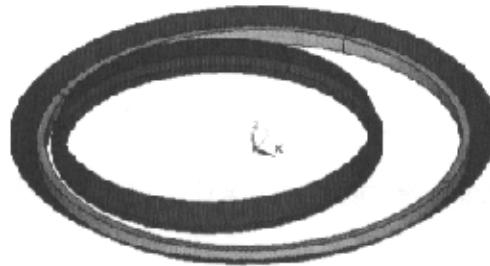


图 4-4 几何模型图

Fig.4-4 Drawing of geometrical model

4.3.2 单元设置

单元类型的选择是影响成形模拟精度的主要因素之一。优良的单元既要有一定的刚性(抗畸变的能力),以避免网格再划分,又必须有一定的柔性(良好的变形特性),以便准确的模拟金属的塑性变形情况,还必须具有较高的求解精度。

模拟过程是在 ANSYS/LS-DYNA 模块中进行的,单元在显式动力单元中选取,在 ANSYS/LS-DYNA 模块中,有显式块单元和显式壳单元两种类型。本文中,坯料采用显式块单元 SOLID164,该单元为 8 节点 6 面体单元。在显示动力分析中,积分点的个数与 CPU 时间成正比,所有的显示动力单元缺省为简化积分,除了节省 CPU 时间,单点积分在大变形分析中更加有效。在 ANSYS 中采用简化积分单元会出现零能模式,即沙漏。沙漏模式导致一种在数学上是稳定的,但在物理上是不可能的状态,它们通常没有刚度,变形呈现锯齿形网格。沙漏的出现可能导致结果无效,应尽量避免和减小,可通过增大弹性刚度来消除沙漏。本章考虑了沙漏,将其控制在了所允许的范围内。旋轮和芯模在模拟成形过程中假设为刚体,忽略其变形,所以可定义为显式壳单元 163,以减少模拟的运算量和模拟时间。

4.3.3 材料属性设置

在有限元模拟分析中,选用 ANSYS/LS-DYNA 中的 PLAW 材料模型,即塑性随动强化模型,此模型的应力应变曲线如图 4-5 所示,毛坯的材料定义为实际所用的 1Cr18Ni9Ti,该材料模型适用于各向材料的大变形问题,可用于筒形坯料的旋压成形。

材料的性能参数见表 4-1。

表 4-1 材料性能参数

Table4-1 Parameter of material characteristic

材料	弹性模量 (GPa)	泊松比	密度 (kg/mm ³)	屈服极限 (GPa)	剪切模量 (Gpa)
1Cr18Ni9Ti	210	0.309	7.85e ⁻⁶	0.288	87

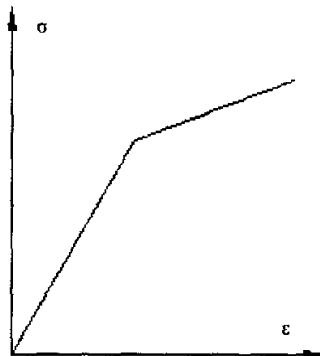


图 4-5 PLAW 材料模型

Fig.4-5 Model of material

4.3.4 网格划分

在有限元分析中，一般来说，增加网格划分的密度可以提高计算结果的精确度，但网格密度的增加，意味着计算量的增大，模拟时间的延长，同时网格密度也不能无限制的上升，一般以保证计算结果的精度在用户控制的范围即可。

本文密封圈的旋压成形模拟为弹塑性有限元三维数值模拟，采用各向同性强化材料，考虑到数值模拟的精确性和模拟的效率问题，对坯料、芯模以及旋轮采用不同的单元进行不同密度的网格划分。

网格划分有自由网格划分和映射网格划分两种，映射网格适用于形状规则的体和面的划分。由于坯料、旋轮和芯模的面和体都有规则的形状，故采用映射网格划分，映射网格具有规则的形状，单元成排规则排列。映射面网格只包含四边形或三角形单元，而映射体网格只包含六面体单元。对平面结构和立体结构而言，若为四边形结构，用映射网格划分时，其对应边的线段分割数目一定相等。对于筒形坯料，可以采用对坯料某一纵截面进行二维四节点四边形网格划分，然后再进而扩展为三维八节点六面体单元的网格划分方法。坯料、旋轮和芯模的单元网格划分如图 4-6、图 4-7 和图 4-8 所示。

坯料在圆周方向上、径向壁厚和高度上进行单元格划分，整个工件共划分为 7200 个单元，9240 个节点。对于芯模和旋轮，由于在旋压成形过程中理想的情况被认为是不发生变形的，所以假设成刚体进行网格划分，网格密度也相应的比坯料要小的多，以便节省模拟时间。其中旋轮包含 720 个单元，780 个节点。芯模共包含 1280 个单元，1360 个节点。

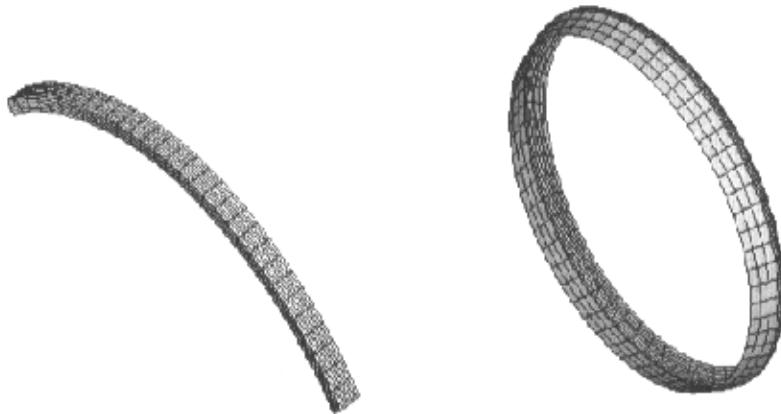


图 4-6 坯料的网格划分

Fig.4-6 Mesh of blank

图 4-7 旋轮的网格划分

Fig.4-7 Mesh of roller



图 4-8 芯模的网格划分

Fig.4-8 Mesh of mandrel

4.3.5 边界条件的处理

4.3.5.1 接触问题的处理 在密封圈的旋压过程中，旋轮与坯料之间产生接触，坯料和芯模也将产生接触，因此对该过程的模拟，必然涉及到接触问题。从力学角度分析，接触是边界条件高度非线性的复杂问题，需要准确追踪接触前多个物体的运动以及接触发生后这些物体之间的相互作用。

对于普通的接触模型而言，必须确定一对接触面，其中一个称为接触面，另一个称为目标面。本模型涉及到两对接触，分别是坯料外表面和芯模内表面之间的接触以及坯料内表面和旋轮外表面之间的接触，在第一对接触中，芯模内表面是目标面，坯料的外表面是接触面；在第二对接触中，坯料内表面是接触面，旋轮的外表面是目标面。由于只考虑坯料的变形，可把芯模和旋轮看作是刚体。坯料和芯模之间的接触为面面接触，理想的状态为坯料和芯模是相对不发生摩擦，考虑实际的影响，把它定义为普通面面接触。坯料和旋轮之间的接触情况比较复杂，是点面接触和面面接触的混合，因此在定义坯料和旋轮的接触时，可同时定义普通面面接触和普通点面接触两种接触，更好的符合了实际情况。

定义了接触以后还有对接触进行控制，主要有：

(1)控制接触搜索方法 在 ANSYS/LS-DYNA 中有两种控制接触搜索方法网格连贯性搜索和块方法。因为许多模型含有不连续的网格，因此本文使用块方法。

(2)控制接触深度 对于普通接触算法，ANSYS/LS-DYNA 假设搜索的接触深度为 10^{10} ，当接触节点穿过目标面时，就会产生一个与接触深度成比例的接触力。如果接触深度很大，伪接触力会呈现无穷大，如果节点出现在目标的后面，它会很快滑到物体外的空间中。

(3)控制接触刚度 理想情况下，在接触过程中两个面之间应该没有穿透，这意味着接触刚度为无穷大，从而导致数值不稳定。在 ANSYS/LS-DYNA 中接触力 F 由下式确定：

$$F = k\delta \quad (4-5)$$

其中 k 为接触面刚度， δ 为界面穿透量。

(4)控制接触面生死时间 在一些应用中,确定面面之间接触发生的时间往往很重要,在指定的有效时间内,定义接触面处于有效状态,直到失效时间。

4.3.5.2 摩擦问题的处理 对密封圈旋压数值模拟的边界条件主要考虑芯模、旋轮、坯料等的初始条件以及它们之间的接触摩擦。

在模拟过程中,假设坯料不动,旋轮是运动起来的,由于摩擦的存在,在坯料内作旋转进给的同时自身也在作旋转运动,实际的接触摩擦情况很复杂,因此模拟时进行了简化处理。

坯料和芯模之间的接触主要产生的是滑动摩擦,坯料和旋轮的接触情况较为复杂,它们之间不仅产生滚动摩擦,而且还有滑动摩擦。而且,这些摩擦实际上都是动摩擦,摩擦系数在加工的各点处都是不同的,但在摩擦系数的选择上,还是要当成定摩擦来分析,因为若考虑动摩擦的话,不作简化,边界条件就会变得很复杂,在分析时增加了难度,而且在模拟的时候更加难以控制。

目前,塑性加工中的摩擦问题还没有很圆满的解决方法,计算中需作一些简化,常采用的方法有以下几种:常摩擦因子法、常摩擦系数法、假设摩擦系数为相对滑动速度的函数、假设摩擦耗功为相对滑动速度的函数、假设摩擦力为相对滑动速度的反正切函数、假设摩擦力为阶梯函数。ANSYS 程序主要提供了两种算法,常摩擦因子法和常摩擦系数法

常摩擦系数法假设摩擦系数是一常数,采用库仑定律来计算摩擦力,即

$$\tau = \mu P \quad (4-6)$$

式中 μ ——摩擦系数

P ——正压力

在实际计算中由于接触边界上的正压力大小及分布都是未知的,摩擦力也是未知的,但库仑摩擦定律建立了正压力与摩擦力之间的正比关系,可通过迭代等方法进行求解。由于该方法适用于接触压力比较大的情况,本次计算采用常摩擦系数法,通过设置参数 FD、FS、DC 来设定摩擦系数。

4.3.6 旋轮轨迹的确定

在实际加工中，芯模、旋轮、坯料三者之间的相对运动是很复杂的。主体运动是在主轴带动下，坯料和芯模的旋转运动，同时旋轮沿着筒形坯料轴向进给，由于摩擦的存在同时做自身的旋转运动。在 LS-DYNA 模块下面旋转运动是很难实现的，进行数值模拟时，坯料是变形体，单元划分密，实现旋转运算量太大，模拟时间长，不易控制。因此，在模拟时，对实际的加工情况做了一定的转化，将坯料和芯模进行约束，假设坯料不动。对坯料所加约束如图 4-9 示。坯料的外表面加了三个约束，限制了三个方向的位移，金属在 X、Y、Z 方向都没有流动，内表面只约束了 Z 方向的位移，这样，金属在其它两个方向是可以流动的，在旋轮进行加工时，金属的壁厚是随着旋轮的位移而不断变化的。

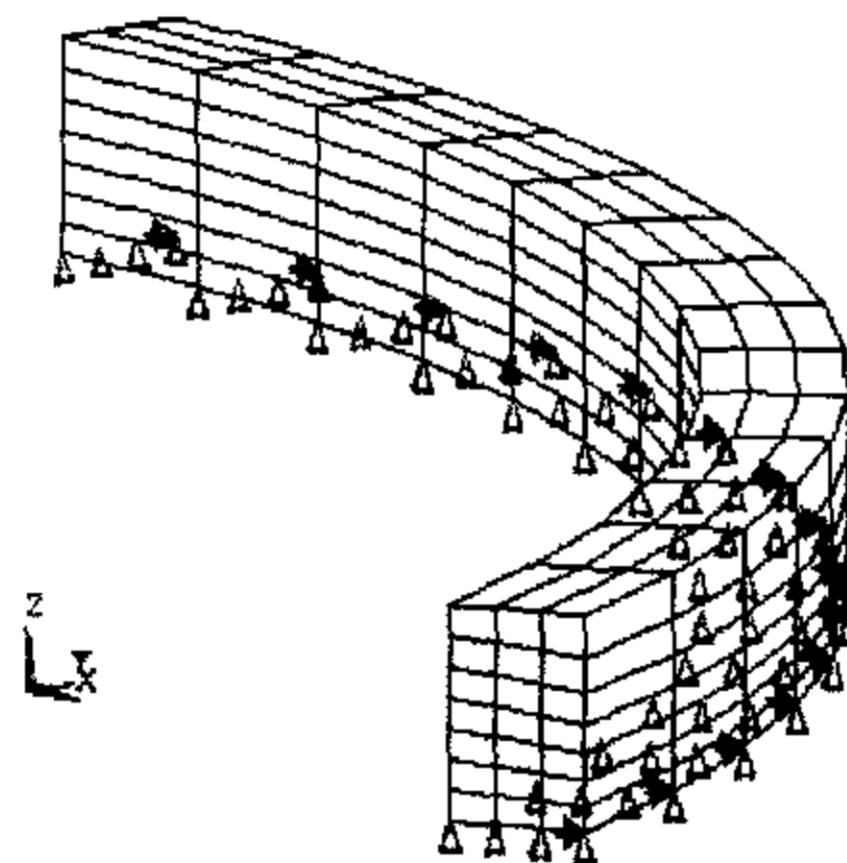


图 4-9 坯料所加约束图

Fig.4-9 Figure of restriction on the material

旋轮沿着坯料作周向运动，同时进行轴向进给，初始阶段还有径向进给，稳定以后旋轮的运动轨迹为半径逐渐变大的螺旋线形。将螺旋线的每一小周分成若干份，具体份数依据所要求的精度而定。分的份数越多，精度越高，旋轮在每一小段走的弧线越短，弧线就越接近于直线，这样，在每一小段都可以看成是旋轮在做直线运动，对任一小段直线进行分析，继而就可以得到旋轮运动的整个轨迹方程。因为旋轮所走的路径无论是在圆

弧段还是在锥形段都是近似螺旋形，所以推导旋轮运动轨迹的参数方程时，示意图基本是一致的，如图 4-10 示。

旋轮加工时所走的路径在圆弧段和锥形段是不同的，所以旋轮轨迹方程应有两组，第一组式(4-7)是旋轮加工密封圈中部的圆弧段时所走的轨迹方程，第二组式(4-8)是旋轮经过圆弧过渡，接下来成形锥形段时所经过的轨迹方程。在式(4-8)里面所用的初始值就是走圆弧段时最后一步的所得值。

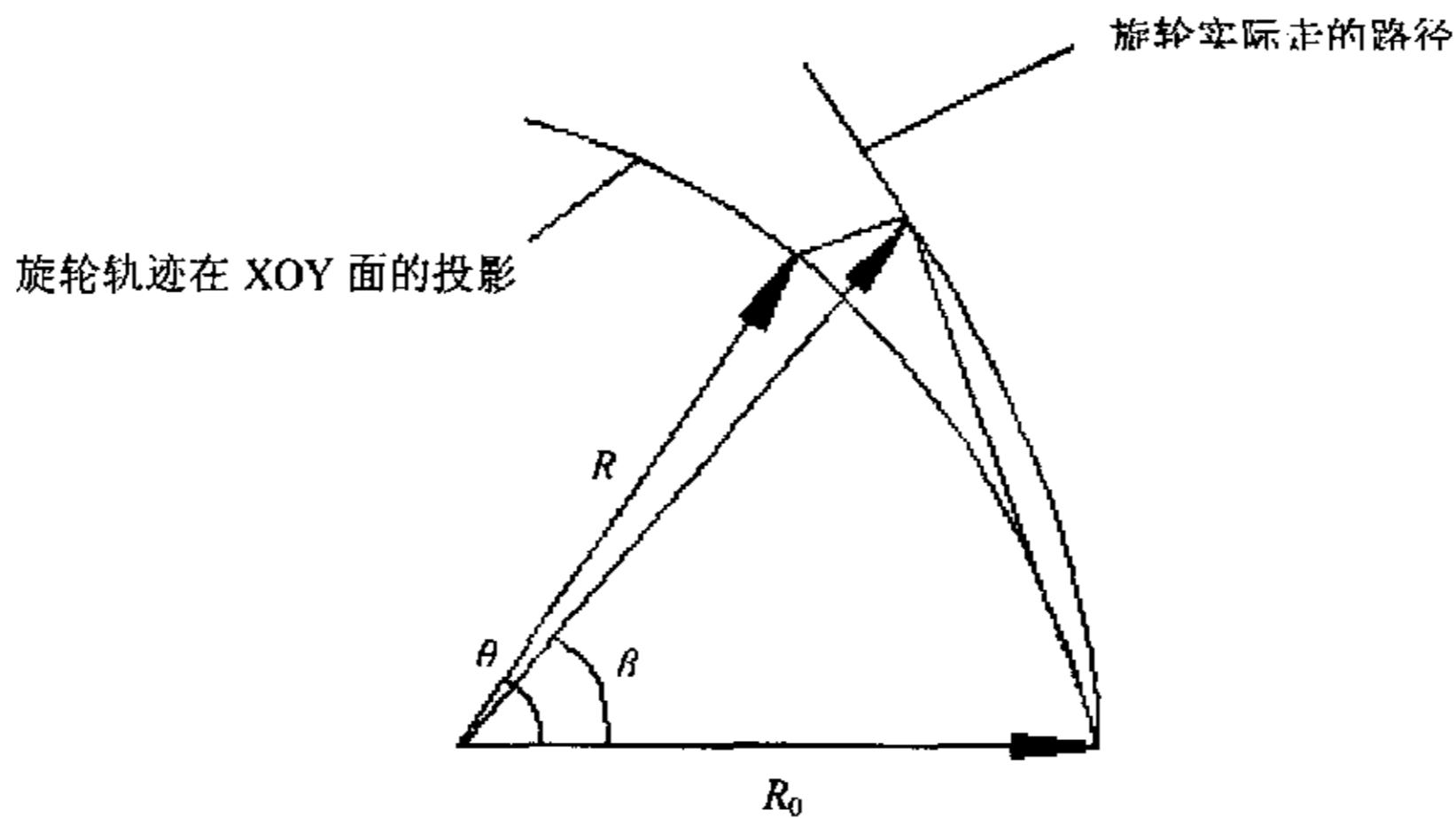


图 4-10 旋轮的轨迹图

Fig.4-10 Figure of roller's track

走圆弧段旋轮运动轨迹的参数方程为

$$\left\{ \begin{array}{l} R(t) = R_0 + t \times \left[(R_1 + R_2) \times \frac{d \sqrt{1 - \left(\frac{bt}{R_1 + R_2} \right)^2}}{dt} \right] \\ x = R(t)(1 - \cos \theta) \\ y = R(t) \sin \theta \\ z = z_0 + bt \end{array} \right. \quad (0 < t < t_1) \quad (4-7)$$

走锥形段旋轮运动轨迹的参数方程为

$$\begin{cases} R(t) = R_0 + b' t \times \tan \alpha \\ x = R(t)(1 - \cos \theta) \\ y = R(t)\sin \theta \\ z = z_0 + b' t \end{cases} \quad (t_1 < t < t_2) \quad (4-8)$$

式中 R_0 ——旋轮运动初始位置的曲线的半径

R ——旋轮运动时任意点的曲线的半径

θ ——连续两点在空间上的夹角

β —— θ 在 xoy 面上的投影

α ——工件锥面的倾角

模拟运算得到的旋轮轨迹图如图 4-11 所示：

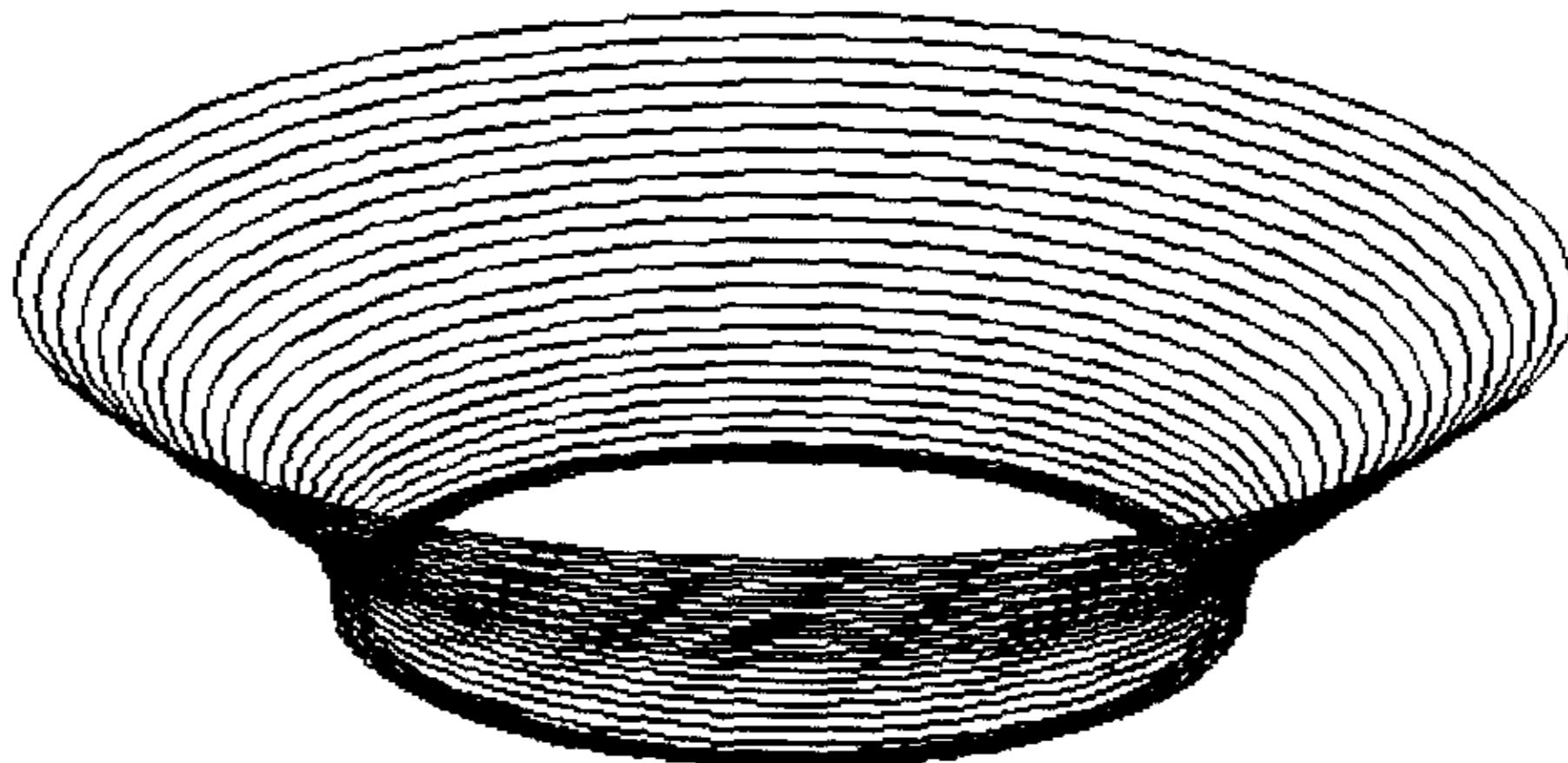


图 4-11 旋轮运动轨迹图

Fig.4-11 Roller's movement track

4.4 本章小结

在本章里，介绍了 LS-DYNA 的二次开发功能，建立了不锈钢 U 密封圈复合旋压成形的三维有限元模型，对于数值模拟过程中接触问题、摩擦问题进行了处理以及确定了旋轮在旋压过程中的轨迹。

第5章 密封圈复合旋压的数值模拟结果分析

5.1 密封圈模拟结果

有了前面的有限元模型的建立和边界条件的确定，经过 LS-DYNA 求解器的计算，实现了密封圈旋压工艺成形过程，并通过 ANSYS 后处理模块 LSPREPOSTED 的分析，得到成形过程中的应力、应变分布，并计算出旋压力。变形结果如图 5-1 所示。

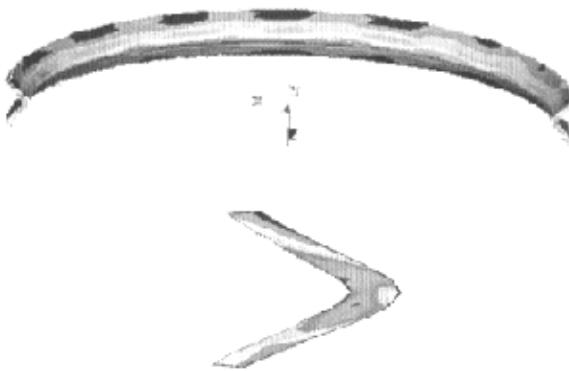


图 5-1 密封圈的模拟结果

Fig.5-1 Simulation result of gland

从图中可以看出，密封圈可以旋压成形，曲母线部分可以形成，工件减薄区域有较大的径向和轴向变形，成形效果随各成形参数的变化而变化。

在圆弧段变形后的形状和实际所要求的总是有一定的出入，圆弧段变形不是很明显，这主要是因为网格的划分不够细。要想完全实现曲线段的成形情况，需要密集的网格划分，这样不但需要耗费更多的软硬件资源，而且使得模拟时间变得无限长，因此，在现有的软件下实现有一定的困难。但从图中，可以反映出曲线段成形的可行性。数值模拟时采用的实际加工

中所用的材料，不锈钢 1Cr18Ni9Ti，模拟的成形结果较好，以下进行具体分析。

5.2 按进给速度变化的模拟结果

壁厚为 1.5 mm, 旋轮直径为 120 mm, 旋轮进给速度分别为 30 mm/min, 60 mm/min, 120 mm/min, 180 mm/min 进行数值模拟，以分析旋轮进给速度的变化对密封圈旋压成形的影响。

5.2.1 进给速度对坯料金属径向变形的影响

图 5-2 是 1Cr18Ni9Ti 的金属径向变形随着进给速度的变化趋势。

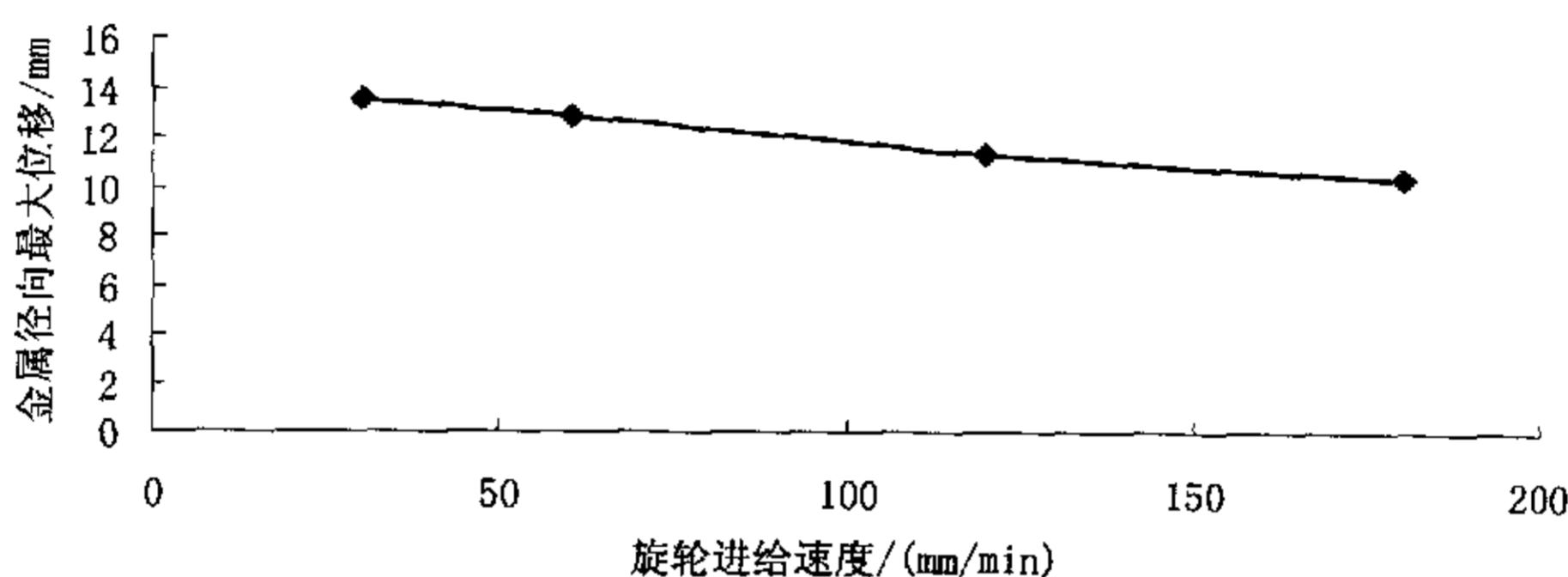


图 5-2 金属径向变形随着进给速度的变化

Fig.5-2 Variation of radial deformation with ratio of feeding

从图中可以看出，1Cr18Ni9Ti 的金属径向变形随着旋轮进给速度的增加而变化不大，总体来说，旋轮进给速度的变化对坯料金属径向变形的影响不大。进给速度越大，旋轮每两转之间的间隔越大，有的金属不能进行加工变形，流动量也越小，金属的径向变形量也越小。

实际的生产中，进给速度是有一定限制的，随着旋轮进给速度的增大，会使得毛坯和芯模贴的紧导致工件取下困难，还可能出现壁部起皱、工件开裂等缺陷，使旋压成形变的困难。旋轮进给速度过小会使工件内径扩大，导致精度变低，考虑到工件生产率的因素，应该在合理的范围内尽可能的选择较大的旋轮进给速度。

5.2.2 进给速度对应力和应变的影响

图 5-3 和 5-4 是密封圈旋压成形过程中等效应力和等效应变随着进给速度的变化情况。

从图中可知，其它条件一定时，在不同的旋轮进给速度下等效应力和等效应变没有明显的变化，即旋轮的进给速度对旋压过程中等效应力和等效应变的变化影响不大。

当进给速度增大时，等效应力和等效应变只是有略微增长。这是因为在有限元数值模拟中，应力是由应变得出的，而单纯的进给速度对应变的影响不大。虽然进给速度的变化会导致应变速率的变化，而应变速率对应力偏张量也有影响，但是 ANSYS 软件将变形看作是准静态的，所以应变速率对应力的影响不大。应力最大值出现在圆角过渡处和坯料外端处，这就说明在密封圈的成形过程中，由于圆弧段的存在而导致了变形的

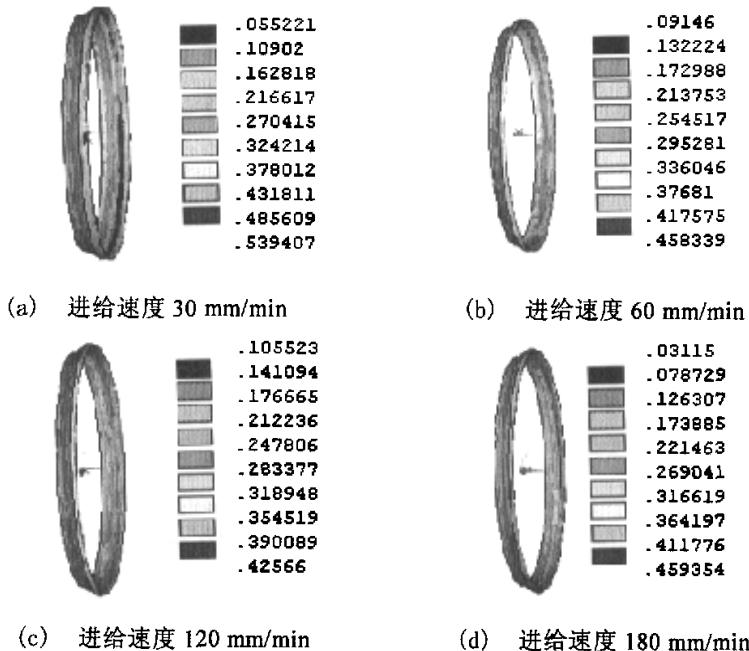


图 5-3 等效应力随进给速度的变化

Fig.5-3 Variation of effective stress with the speed of feeding

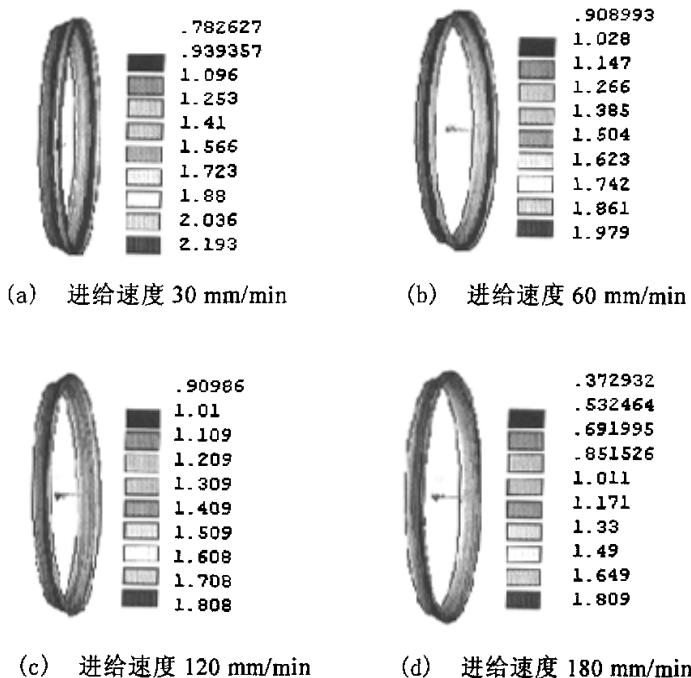


图 5-4 等效应变随进给速度的变化

Fig.5-4 Variation of effective strain with the speed of feeding

不均，在这些地方就容易产生断裂等缺陷，所以在实际加工时，对于圆弧段要准确控制，以免产生废件，造成材料资源的浪费，成本增加。

图 5-5 和图 5-6 分别为其它条件一定时，等效应力、等效应变和旋轮进给速度的关系。

根据模拟的结果，我们可以看出，随着进给速度的增加，坯料的等效应力值先有所下降，在进给速度到 120 mm/min 时，达到最小；而等效应变值在此时，变化趋于稳定，随着进给速度的增加没有多大变化。

要想达到理想的成形效果，需考虑进给速度、坯料厚度、旋轮形状等各种工艺参数的综合影响。

图 5-7 和图 5-8 是 1Cr18Ni9Ti 在成形过程中 X、Y、Z 三个方向的最大应力应变随着进给速度的变化曲线。

从图中可以看出，在进给速度为 120 mm/min 时，Z 方向的应力值到了最小，而 X、Y 方向的应变值为最小。

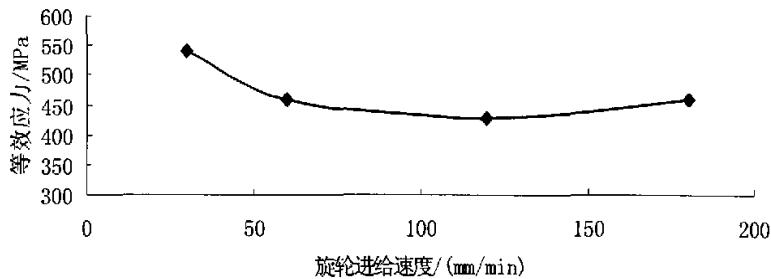


图 5-5 等效应力随着进给速度的变化

Fig.5-5 Variation of effective strain with speed of feeding

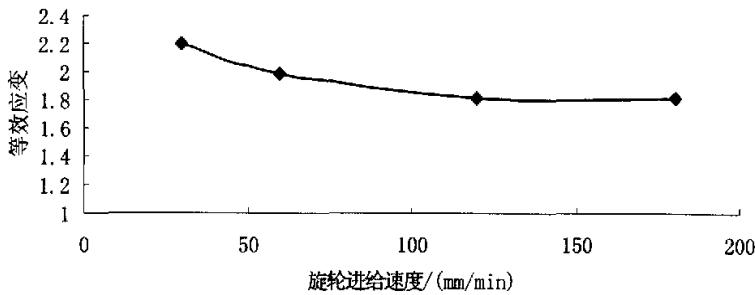


图 5-6 等效应变随着进给速度的变化

Fig.5-6 Variation of effective stress with speed of feeding

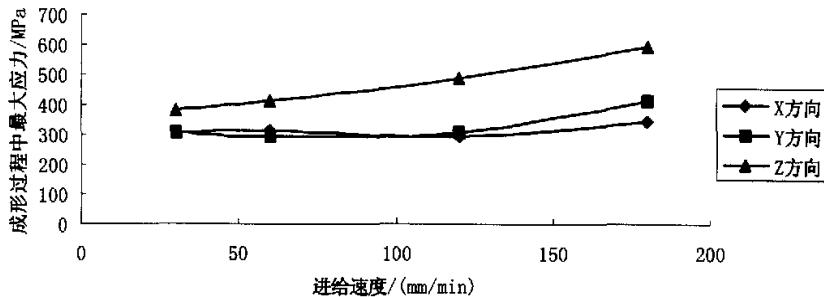


图 5-7 XYZ 三个方向应力随着进给速度的变化

Fig.5-7 Variation of stress at the direction of XYZ with the speed of feeding

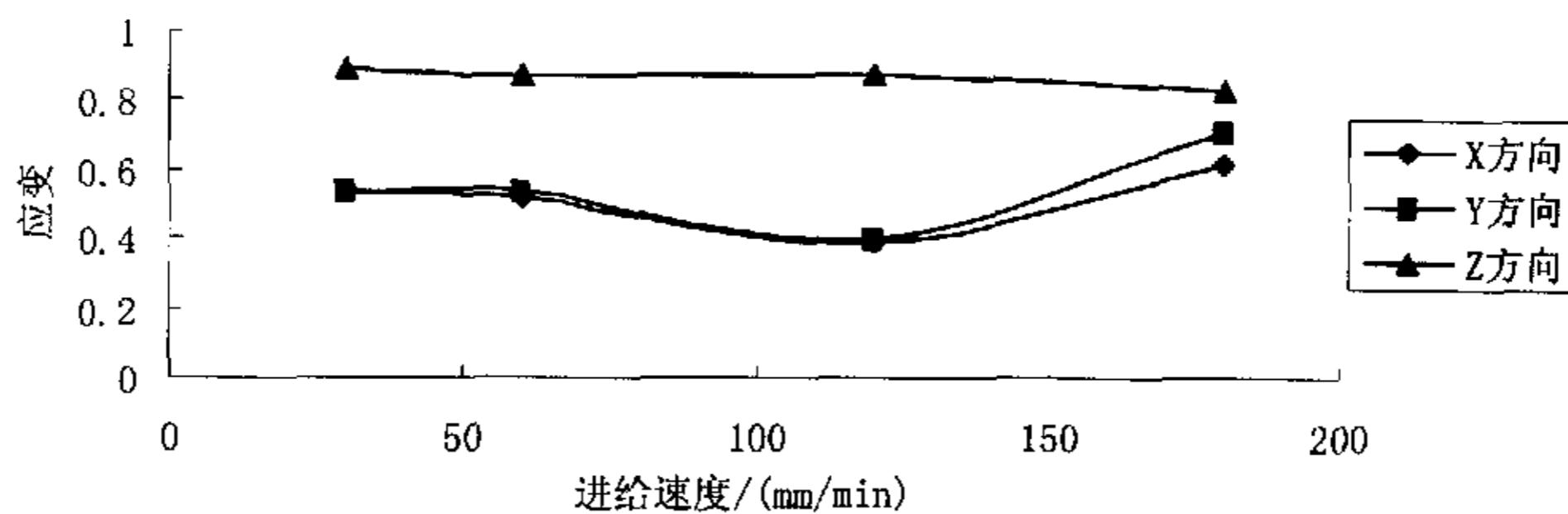


图 5-8 XYZ 三个方向应变随着进给速度的变化

Fig.5-8 Variation of strain at the direction of XYZ with the speed of feeding

5.2.3 进给速度对旋压力的影响

图 5-9 是三个方向旋压力随着进给速度的变化情况。

从图中可以看出，当其它参数一定的时候，进给速度对三个方向旋压力的影响。其中，对轴向力影响较大，对于径向力和轴向力的影响较小。对坯料进行旋压加工时，减小进给速度可以使旋压力显著减小。密封圈的旋压成形数值模拟中，旋压力随着进给速度的变化，主要是由于曲母线的成形而引起的。当旋轮进给速度过大时，毛坯的外缘不能进入拉深，凸缘就会起皱，有时壁部还会起皱。进给速度越小，则毛坯受拉伸而使工件壁厚减薄，就本文密封圈而言，旋轮进给速度小就能使工件变长。但是，进给速度大时，工件贴模紧，对提高工件的精度有利。

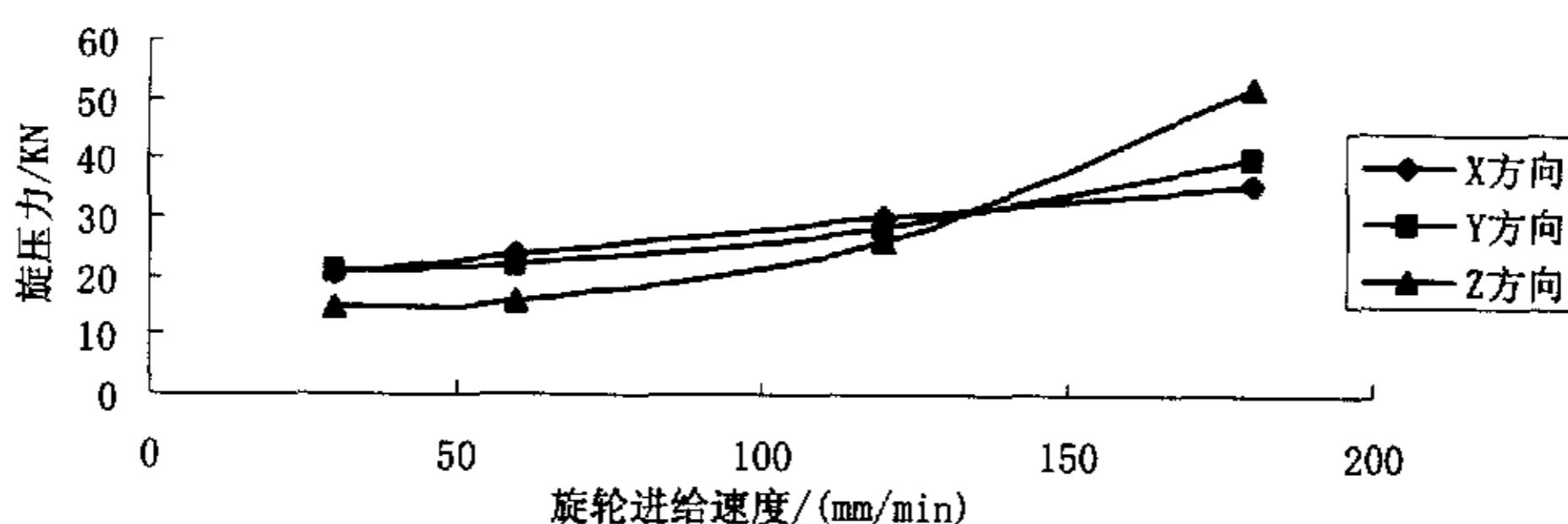


图 5-9 旋压力随着进给速度的变化

Fig.5-9 Variation offorce with the speed of feeding

5.3 按壁厚变化的模拟结果

旋轮进给速度为 30 mm/min 不变，坯料厚度分别为 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm, 1.25 mm 进行有限元数值模拟，以分析旋轮进给率的变化对密封圈旋压成形的影响。

5.3.1 应力应变随壁厚的变化

图 5-10 和 5-11 是密封圈旋压成形过程中等效应力和等效应变随着壁厚不同的变化情况。

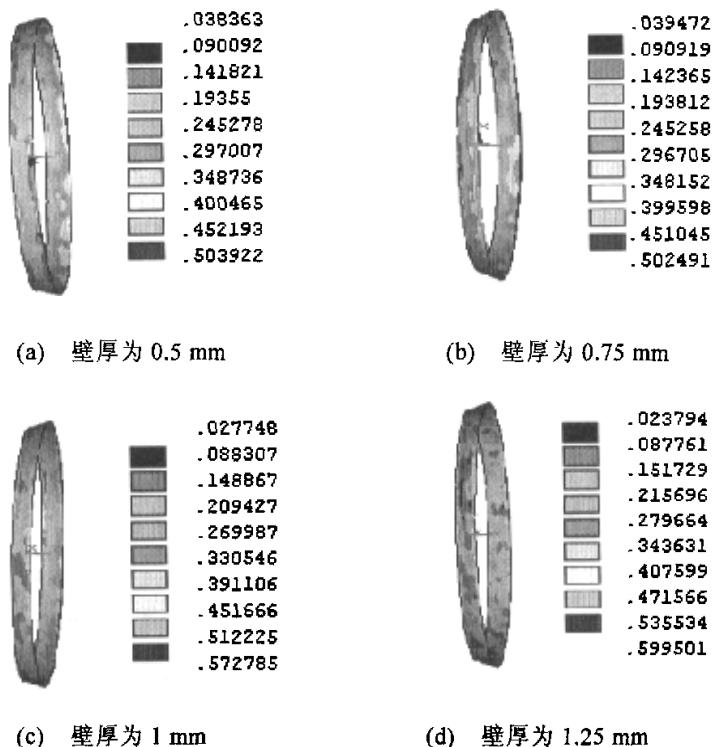


图 5-10 等效应力随壁厚的变化情况

Fig.5-10 Variation of effective stress with the thickness of workpiece

在坯料和旋轮接触区域的不同部位，其应力应变状态是完全不同

的。总的的趋势是，已变形区的等效应力和等效应变是随着壁厚的增加而增加的，这和普通筒形件旋压成形的变化情况相似，但是由于圆弧段的存在，在内侧的等效应力、等效应变明显大于外侧，使得在这些区域的应力应变在成形过程中，最先达到旋压材料的极限应力和应变值，从而出现各种缺陷，如裂纹、龟裂等。减薄率越大，金属沿着轴向流动量越大，应变最大值越靠近坯料外端部，这个部位就容易产生外缘不齐的缺陷，导致工件质量下降。

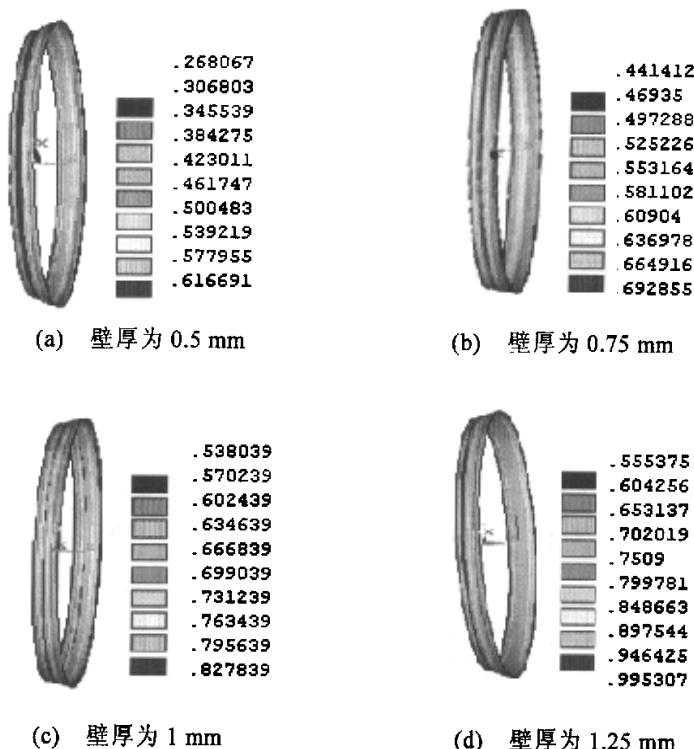


图 5-11 等效应变随壁厚的变化情况

Fig.5-11 Variation of effective strain with the thickness of workpiece

图 5-12 和图 5-13 是等效应力、等效应变和坯料壁厚的关系。

从图 5-12 和图 5-13 中可知，在其它参数不变的情况下，随着坯料壁厚的增加，等效应力值和等效应变值也相应增加，基本上呈线性关系。

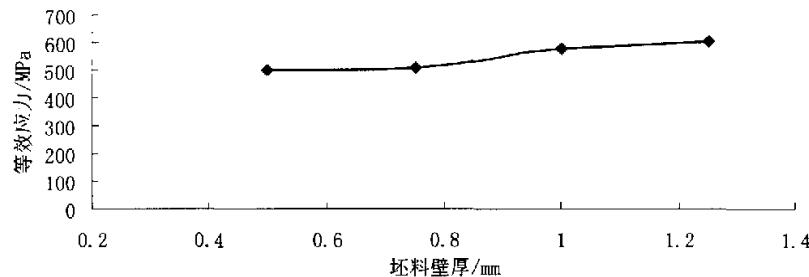


图 5-12 等效应力和壁厚的关系

Fig.5-12 The relation between effective stress and thickness

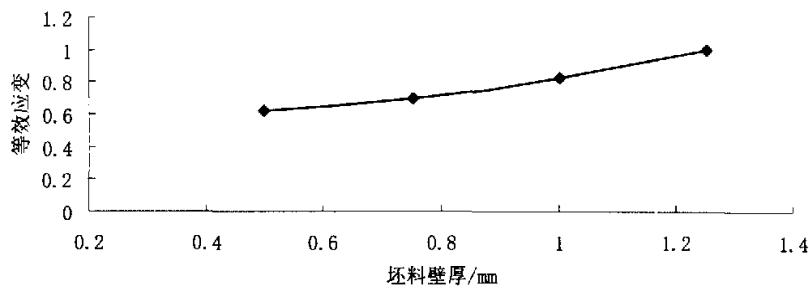


图 5-13 等效应变和壁厚的关系

Fig.5-13 The relation between effective strain and thickness

图 5-14 和图 5-15 是成形过程中 X、Y、Z 三个方向的应力应变和坯料壁厚之间的关系。

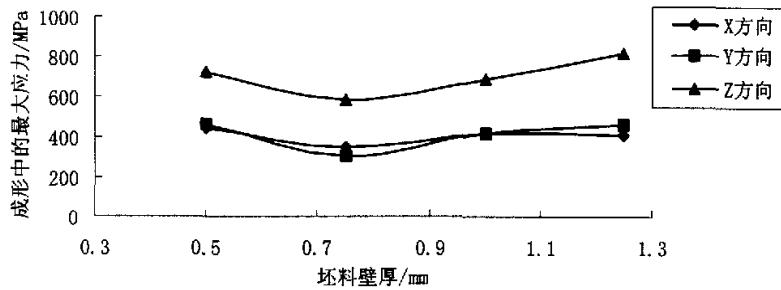


图 5-14 应力和壁厚的关系

Fig.5-14 The relation between stress and thickness

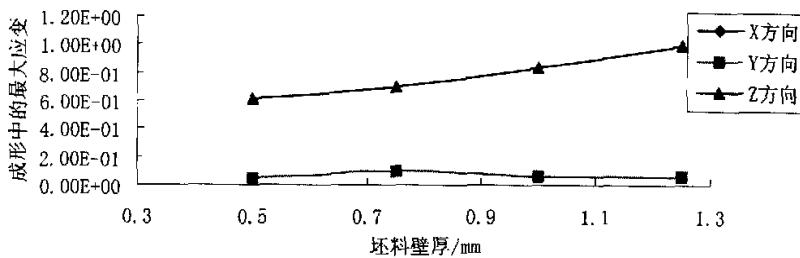


图 5-15 应变和壁厚的关系

Fig.5-15 The relation between strain and thickness

从图中可以看出，X、Y 两个方向的应力值基本上一致，这是因为坯料在 XOY 面上的投影是圆环形，关于原点对称，Z 方向的应力和应变明显要大于其它两个方向的应力和应变，这表明坯料的轴向流动比较容易，而 X、Y 向流动比较困难，这也是曲母线不易形成的原因。变化平缓，说明壁厚变化对于径向的变形影响不大。这是因为当板坯较薄时，旋轮施加的力越大，坯料和芯模之间产生的摩擦力越大，这样就会阻碍金属的流动，变形难度增加。因此，为了保证密封圈曲母线的成形效果，要尽量增加金属的 X、Y 向流动，抑制金属的轴向流动，可以考虑在坯料的自由端施加一定的阻力，模拟结果表明曲母线成形效果好。

5.3.2 旋压力随壁厚的变化

图 5-16 是旋压力随着壁厚的变化。

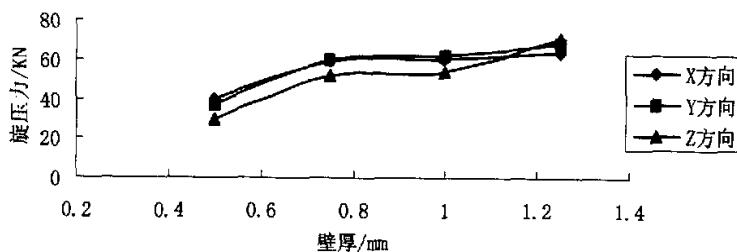


图 5-16 旋压力随着壁厚的变化情况

Fig.5-16 Variation of force rolling with the thickness of workpiece

从图中可以看出，随着壁厚的增加，旋压力也有不同程度的增加。旋压力不能随着壁厚的增加无限制的增加。当坯料壁厚到了一定的程度，旋轮进给时只能使金属内壁的金属发生流动，外壁的金属基本上没有变形。这时，旋压力保持稳定，不再继续增加。

5.4 按旋轮直径变化的模拟结果

保持进给速度为 30 mm/min，坯料厚度为 1.5 mm 不变，取旋轮直径分别为 80 mm, 120 mm, 140 mm, 160 mm 分别进行数值模拟。分析成形过程中由于旋轮直径不同而导致应力应变的变化。

5.4.1 应力应变随旋轮直径的变化

图 5-17 和图 5-18 是坯料应力应变随着旋轮直径的不同的变化情况。

从图 5-17 和图 5-18 中可以看出，随着旋轮直径的增大，密封圈成形时应力、应变值随之增大。

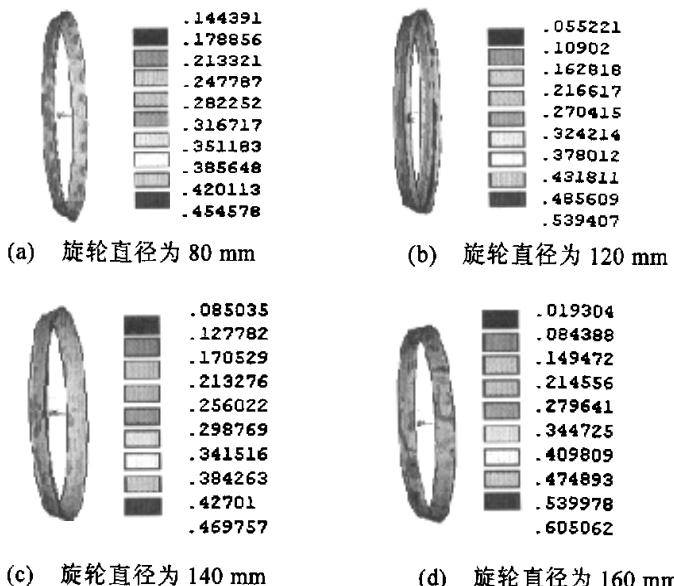


图 5-17 应力随着旋轮直径的变化

Fig.5-17 Variation of effective stress with the diameter of workpiece

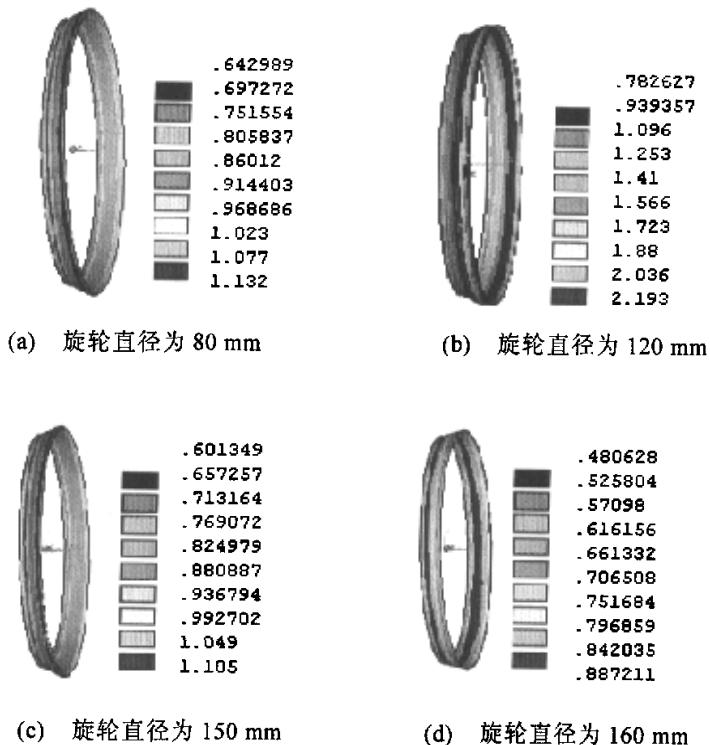


图 5-18 应变随着旋轮直径的变化

Fig.5-18 Variation of effective strain with the diameter of workpiece

图 5-19 和图 5-20 是等效应力和等效应变随着旋轮直径的变化。

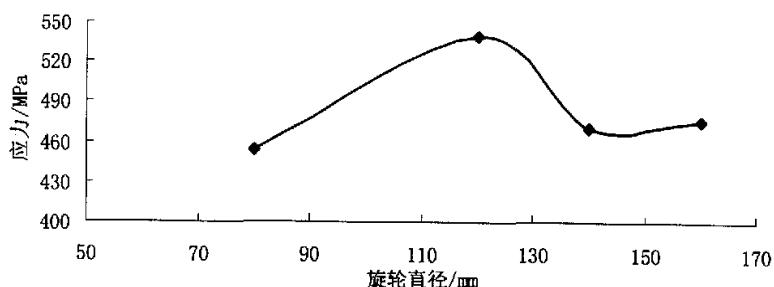


图 5-19 等效应力和旋轮直径的关系

Fig.5-19 The relation between effective stress and the diameter of workpiece

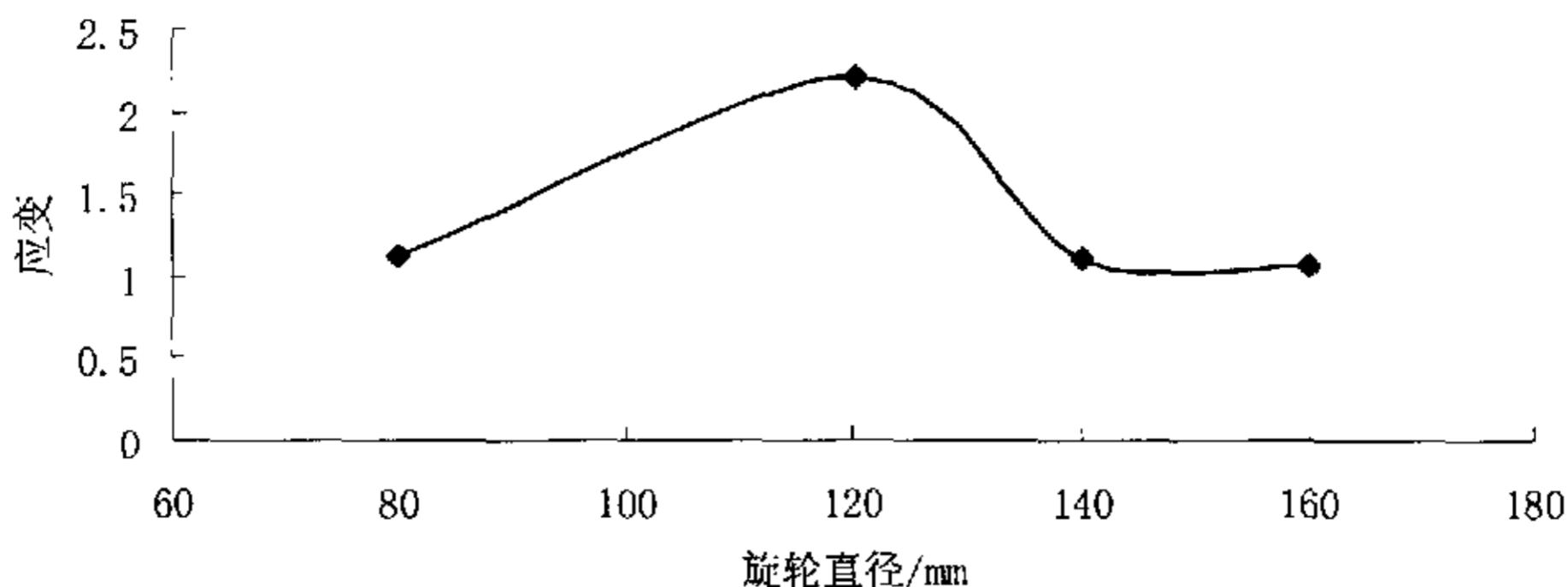


图 5-20 等效应变和旋轮直径的关系

Fig.5-20 The relation between effective strain and the diameter of workpiece

5.4.2 旋压力随旋轮直径的变化

图 5-21 是旋压力随着旋轮直径的变化情况。

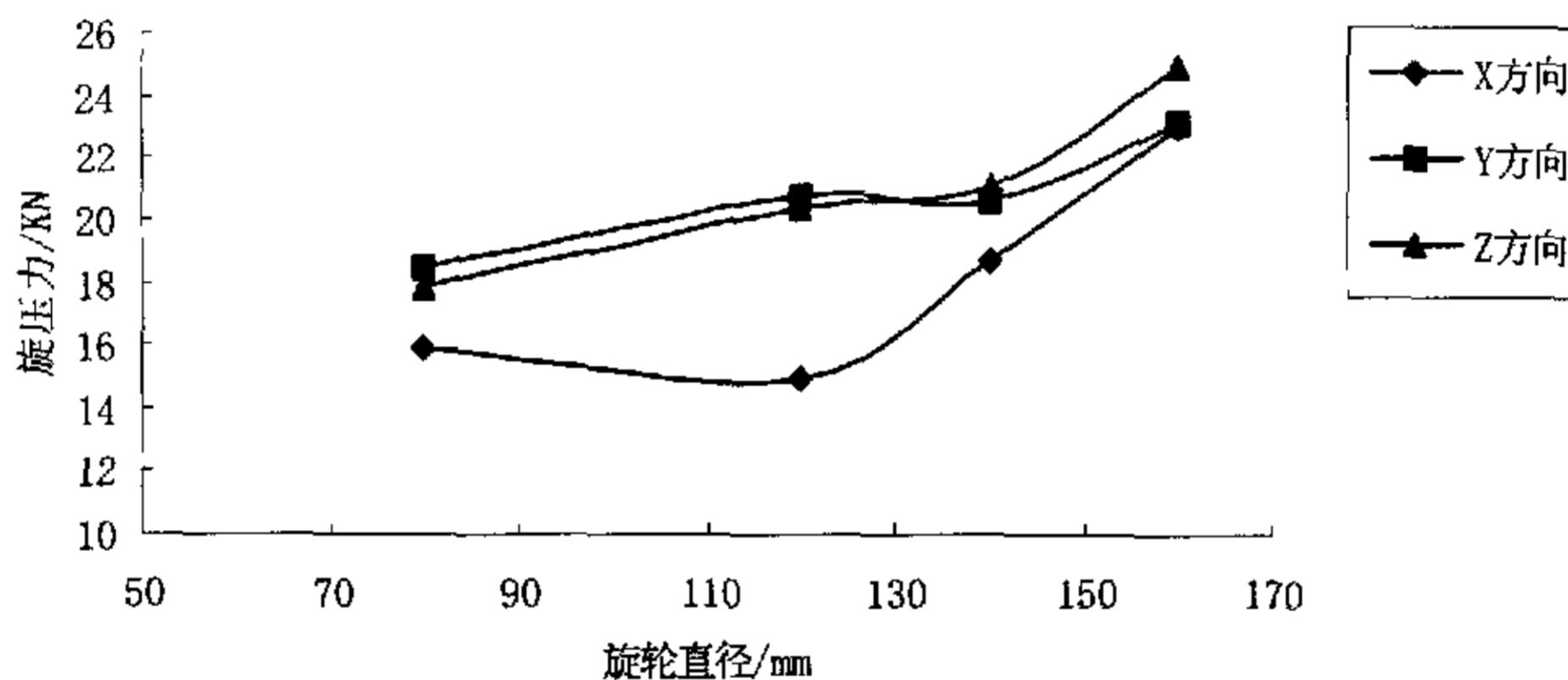


图 5-21 旋压力随着旋轮直径的变化

Fig.5-21 Variation of force rolling with the diameter of workpiece

从图 5-21 中可以看出，在模拟过程中，随着旋轮直径增大，三个方向的旋压力都是增大的趋势。旋轮直径增大，毛坯与旋轮的周向接触长度增大，接触面积增大，Z 方向和 Y 方向的进给力随之增大。但是 X 方向的旋压力随着旋轮直径的增大，有一定程度的减小，这表明虽然接触长度增加了，但是在径向有一定的缓和。一般情况下，旋压力与直径的平方根成正比的增加，由此来大致估计成形力。旋轮直径越大，旋压力越大，加工难度增加，对设备要求较高。旋轮直径越小，金属沿径向流动

越大，容易形成鼓凸，影响工件的表面质量。

5.5 沿母线壁厚变化的模拟结果

坯料在厚度为 3 mm，进给速度为 120 mm/min，旋轮直径为 120 mm 时，成形后的密封圈在沿着母线方向不同节点处壁厚在局部坐标系下的示意图如图 5-22 示。

从图中我们可以看出，成形后的密封圈的壁厚是不断变化的，壁厚沿着母线方向从根部到端部不断减薄。这是因为随着旋轮的不断进给，坯料一面减薄，一面向外扩口和翻边，金属在径向方向和轴向方向不断的流动的结果。

在密封圈的成形过程中，不同节点处的减薄率是不断变化的。图 5-23 是旋压力随着母线上不同节点处的减薄率变化的曲线。

在不同节点，旋轮和坯料接触时，旋压力的值是不同的，总的的趋势是沿着母线向外端旋压力是不断增大的。这是因为旋轮从内向外运动时，不同位置的减薄量是不同的，体现在壁厚的不断变化中，壁厚减薄的越多，旋压力也就越大。

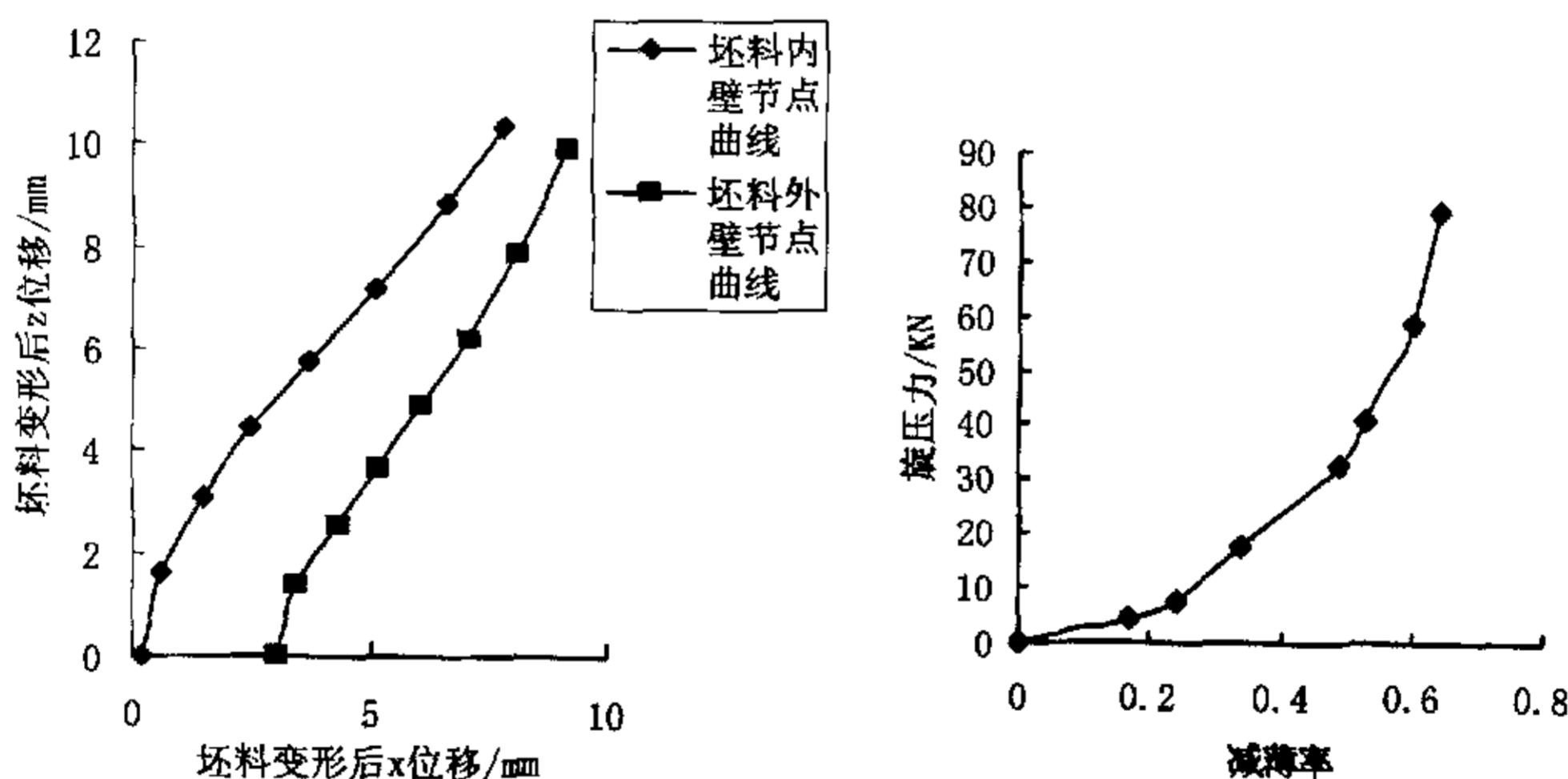


图 5-22 坯料成形后节点的坐标

Fig.5-22 Coordinate of nodes when workpiece shaped

图 5-23 旋压力随着减薄率的变化

Fig.5-23 Variation of force with the ratio of thinning

5.6 缺陷的产生及分析

5.6.1 隆起缺陷的产生及分析

图 5-24 是在不合理工艺参数下的严重隆起现象。

当进给速度取 70 mm/min 到 120 mm/min 之间的时候，坯料开始出现轻微的隆起，在旋轮与坯料的接触面上，坯料开始有较小的波动，但不是很明显，对于工件的成形质量影响不是很大。当进给速度为 180 mm/min 的时候达到最大，应力最大值出现在坯料外壁和料端处，这是由于坯料和芯模在旋轮作用下产生的接触应力值较大的缘故。为了消除隆起缺陷产生，可以控制旋轮的进给速度。另外，减小旋轮的接触角和采用合理的旋轮间隙是减轻隆起缺陷的有力措施。

5.6.2 不贴模缺陷的产生及分析

当工艺参数选择不合理的情况下，模拟产生不贴模缺陷，典型表现为毛坯外表面。不贴模缺陷的表现，与芯模相脱离，随着缺陷的进一步恶化，将导致工件的弯起、失稳。经模拟分析发现，该缺陷主要是由于减薄率太大，或者进给比太小，壁厚过薄所导致。

在本课题中，对不同壁厚的坯料进行了数值模拟。在坯料较薄时，由于单旋轮加工和变形后坯料中弹性应变的存在，会产生回弹，表现为随着旋轮的运动，坯料有不同程度的荡起。坯料越薄，荡起幅度越大。壁厚为 1.2 mm 时成形质量最好，在成形过程中，随着旋轮的进给，坯料荡起轻微，但不是很厉害，这样对于成形后的工件影响不大。然而，在壁厚较薄时，坯料的贴模性较差，成形质量不高，导致在边缘处形状不规则，这时需要加一道整形工序，用成形轮再走一道次，以使得坯料更好的贴模，使其能获得更好的形状精度。减薄率在取得过大时，会造成材料减薄过度，工件已成形部分会产生鼓凸，而且由于旋轮的继续运动，会造成金属的回挤，致使工件形状不规则，精度差^[77-78]。

图 5-25 是壁厚为 0.5 mm 的坯料成形 U 形密封圈时侧壁产生不贴模缺陷的情况示意图。

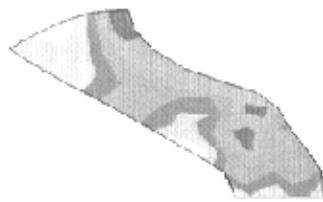


图 5-24 隆起现象缺陷

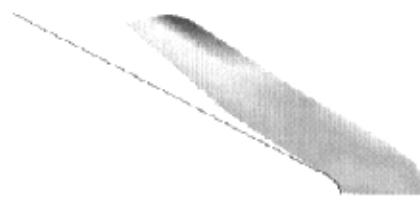


图 5-25 不贴模缺陷

Fig.5-24 The flaw of apophysis

Fig.5-25 The flaw of not suitable of pattern

图 5-26 和表 5-1 是对回弹作定量的分析。

从图 5-26 中可以看出，坯料沿着母线方向偏移的距离越来越大，在最外端处达到最大，坯料和芯模的夹角有 5 度之多。出现这种情况的原因一是因为坯料壁厚较薄，弹性大；二是因为坯料材质本身的特性所决定的，1Cr18Ni9Ti 是冷作硬化钢，当旋轮和坯料接触使之发生塑性的变形同时，坯料因为旋压加工而使得弹性剧增，塑性变差，旋轮从接触点移开后，坯料立刻产生回弹。

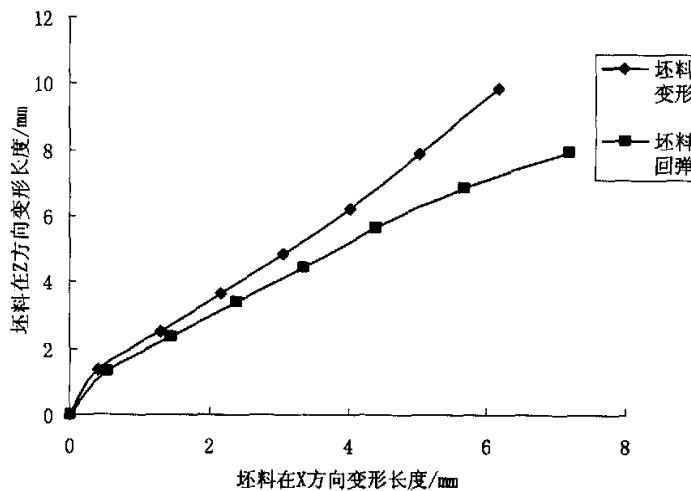


图 5-26 坯料的回弹

Fig.5-26 The rebound of workpiece

在表 5-1 中，节点是 XOZ 面切坯料所得母线上的节点。

表 5-1 坯料的回弹大小

Table 5-1 The value of workpiece rebound

节点标号	回弹前 x/mm	回弹前 z/mm	回弹后 x/mm	回弹后 z/mm
1	0.3132	0	0.22598	0
306	0.73724	0.27319	0.63293	0.22628
305	1.6553	0.35842	1.4813	0.29657
304	2.7857	0.2992	2.4825	0.25268
303	4.1465	0.28202	3.7039	0.16378
302	5.6219	0.32832	5.1152	0.20417
301	7.5361	0.49906	6.5892	0.45806
233	8.021	0.63841	6.8291	0.57036

5.7 本章小结

本章对密封圈的旋压成形进行了有限元数值模拟，得出了不同减薄率、不同进给速度、不同壁厚和不同旋轮直径下坯料的应力、应变分布规律和坯料在沿着母线方向壁厚的变化情况以及在母线不同节点处旋压力的变化，对实际产品的生产过程进行了合理的描述，并对模拟中产生的缺陷进行了分析，探讨了缺陷出现的原因，为进一步深入研究曲母线筒形件旋压成形打下了良好的基础。另外，还得到了不同工艺参数变化情况下旋压力的变化情况，为旋压设备力能参数的选择提供了可靠的依据。

结 论

本文在充分考虑了密封圈旋压成形的特点的基础上对成形工艺进行了分析，重点应用 ANSYS/LS-DYNA 软件对其成形过程进行了三维有限元数值模拟研究，最后分析了实验中出现的一些缺陷及其原因，得到以下结论：

(1)本文建立的密封圈旋压的三维弹塑性有限元模型与工件旋压成形的实际情况相符合。

(2)数值模拟较好的反映了旋压过程中的金属变形规律和成形机理，描述了工件成形时变形区应力、应变的变化情况。

(3)对坯料材质为 1Cr18Ni9Ti 的密封圈的数值模拟结果进行分析，获得了变形区应力、应变的分布规律和旋压力的变化情况，重点分析了不同旋轮进给率、不同减薄率、不同壁厚和不同旋轮直径等工艺参数下的成形特点。

(4)分析了模拟中出现的一些缺陷的原因，给出了一些如何调整工艺参数，使密封圈能够成形，同时又能避免各种缺陷产生的方法。

总之，数值模拟较好的反映了密封圈旋压成形的实际变形情况，整个过程可以通过数值模拟的手段在计算机上进行，为产品的质量控制提供了可靠依据。为进一步深入研究曲母线筒形件旋压的机理和规律打下了良好的基础，为进一步优化工艺参数提供了有效的方法和可靠依据。

本文还没有全面和系统的给出所有工艺参数对旋压件成形的影响，数值模拟在材料模型、接触摩擦及旋压主体运动方面还有待于进一步改进，还将在以后的工作中逐步得到完善。

参考文献

- 1 王仲仁,海锦涛.世纪之交的塑性加工技术.北京:机械工业出版社, 1996: 48-50
- 2 赵宪明,吴迪,吕炎,等.筒形件正强旋压压力分布规律的有限元分析.哈尔滨工业大学学报,2000,32(4):120-122
- 3 周照耀,阮锋,吕炎,等.筒形件反旋的三维刚塑性有限元分析.锻压技术, 1997,(1):29-33
- 4 许沂,单德彬,李萍,等.筒形件强力旋压三维刚塑性有限元模拟中几个关键问题的研究.塑性工程学报,1999,6(4):49-53
- 5 Y.Xu, S.H.Zhang, P.Li, etc. 3D rigid-plastic FEM numerical simulation on tube spinning. Journal of Materials Processing Technology, 2001,113(1-3):710-713
- 6 Xue Kemin, Wang Zhen, Lu Yan, etc. Elastic-plastic FEM analysis and experimental study of diametral growth in tube spinning. Journal of Materials Processing Technology. 1997,69(1-3):172-175
- 7 Xue Kemin, Lu Yan, etc. Elastic-Plastic FEM analysis and experimental study of diametral growth in tube spinning. Journal of Materials Processing Technology, 1997,69(1-3):176-179
- 8 E.Quigley, J.Monaghan. The finite element modeling of conventional spinning using multi-domain models. Materials processing Techology,2002,124(3):360-365
- 9 赵宪明,吕炎,薛克敏..筒形件强旋三维弹塑性有限元分析.塑性工程学报, 1995,2(4):46-54
- 10 李克智,李贺军,吕炎.筒形件强力旋压时金属切向变形分析.西北工业大学学报, 1998,16(4):627-631
- 11 许沂,李萍,单德彬,等.筒形件反旋旋压压力模拟分析.热加工工艺,1999,(3):26-27
- 12 周照耀,王真,赵宪明,等.筒形件强力旋压的刚塑性有限元分析.塑性工程学报, 1994,1(1):37-42
- 13 汪大年.金属塑性成形原理.北京:机械工业出版社,1986:85-132
- 14 胡富泰, 王家勋.封头旋压数值分析.塑性工程学报,1999,(1):65-68

- 15 朱有利,王先进,康永林,等.用有限变形弹塑性有限元法对金属塑性成型工艺的分析和优化.机械工程学报,1996,14(4):35-38
- 16 张涛,李文平,李纬民.对轮旋压金属成形的刚塑性有限元分析.塑性工程学报,1999,6(4):58-61
- 17 张涛,林刚.容器碟形封头球冠部分变形时的三维有限元数值模拟.塑性工程学报,2001,8(3):39-41
- 18 高西成,康达昌.薄壁筒收口旋压过程的数值模拟.塑性工程学报,1999,(4):54-57
- 19 张涛,林刚.旋压缩口过程的三维有限元数值模拟.锻压技术,2001,(5): 26-28
- 20 Masujiro hayama. 普旋过程中旋轮道次的制定对产品的影响. 锻压技术,1989,(5):45-51
- 21 刘兴家.封头旋压成形旋轮运动轨迹确定方法的研究.塑性工程学报, 1997,(4):63-69
- 22 Kang Da-chang,Gao Xi-cheng.Study on the deformation mode of conventional spinning of plates.Journal of Materials Processing Technology, 1999,(91):226-230
- 23 M.EL-Khabeery,M.Fattouh.On the Conventional Simple Spinning of Cylindrical Aluminium Cups International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1991,(2):203-219
- 24 周照耀.筒形件强力旋压刚塑性有限元分析.[哈尔滨工业大学博士学位论文]. 1997:56-79
- 25 Xu.YuZhang.3D rigid-plastic FEM numerical simulation on tube spinning. Journal of Materials Processing Technology,2001,(113):710-713
- 26 Xue Kemin,Lv Yan.Elastic-Plastic FEM analysis and experimental study of diametral growth in tube spinning.JJMPT,1997,(69):172-175
- 27 李克智.筒形件正旋变形机理的研究.华北工学院学报,1997,18(2):95-98
- 28 刘英伟.一种筒形件强旋三维有限元力学模型的提出.塑性工程学报,1998,5(3):51-56
- 29 赵宪明.筒形件强力旋压变形机理的有限元分析.塑性工程学报,1998,3: 46-50
- 30 李克智.筒形件反旋时位移分布的规律.科学通报,1997,42(5):553-556
- 31 马泽恩.筒形件强力旋压与旋压力计算.第一届旋压会议论文集,北京,1980:35-52
- 32 陈适先.筒形件强旋力的一种工程计算法.第一届旋压会议论文集,北京,1980:1-13

参考文献

- 33 陈适先.筒形件强力旋压的塑性流动场及旋压力解析.机械工程学报,1982,18(3):41-50
- 34 王同海.管材塑性加工技术.北京:机械工业出版社,1998:178-187
- 35 刘建生,陈惠琴.金属塑性加工有限元模拟技术及引用.北京:冶金工业出版社,2003:9-12
- 36 刘才.金属成型非线性有限元模拟技术.燕山大学学报,1998,22(1):23-26
- 37 王焕定,焦兆平.有限单元法基础.北京:高等教育出版社,2002:1-26
- 38 赵经文,王宏钰.结构有限元分析.北京:科学出版社,2001:1-35
- 39 吕炎.筒形件反旋旋压力模拟分析.热加工工艺,1999,3:48-53
- 40 许沂,李萍.筒形件正旋旋压力有限元计算分析.锻压机械,1999,3: 11-13
- 41 许沂,李萍.筒形件反旋旋压力模拟分析.热加工工艺,1999,(3): 26-27
- 42 王守信.有限元法教程.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1994:35-47
- 43 朱伯芳.有限单元法原理与应用.北京:中国水利水电出版社,1998:56-59
- 44 王勛成,邵敏.有限元单元法基本原理和数值方法.北京:清华大学出版社,1997:15-59
- 45 李大潜.有限元素法续讲.北京:科学出版社,1979:45-58
- 46 (日)山田嘉昭.非线性有限元基础.北京:清华大学出版社,1988:1-200
- 47 谢贻权,何福保.弹性何塑性力学中的有限元法.北京:机械工业出版社,1991:89-90
- 48 凌复华.有限单元法在应力分析中的应用.北京:国防工业出版社,1995:15-17
- 49 苏岚,王先进,唐荻,等.有限元法处理金属塑性成形过程的接触问题.塑性工程学报,2000,7(4):12-15
- 50 董湘怀.材料成形计算机模拟.北京:机械工业出版社,2002:1-83
- 51 刘建生,陈慧琴,郭晓霞.金属塑性加工有限元模拟技术与应用.北京:冶金工业出版社, 2003:1-24
- 52 Shiro Kobayashi. Metal Forming and the Finite Element Method. Oxford University Press,1989:126-132
- 53 胡忠.塑性有限元模拟技术的最新发展.塑性工程学报,1994,(9):1-11
- 54 J.S. Park. S.M. Hwang. Automatic Remeshing in Finite Element Simulation of Metal Forming Processing by Guide Grate Method. Journal of Materials Processing Technology,1991,27:73-89

- 55 Tang L.Metal Formulation of Quasi-conforming Element and Huwashizu Principle. Comput stract, 1984,19:247-250
- 56 Priit Podra, Soren Andersson. Finite element analysis wear simulation of a conical spinning contact considering surface topography. Wear, 1999,224:13-21
- 57 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 非线性分析指南,1998:53-66
- 58 赵云豪,崔德才,王振生,等.大直径薄壁钢筒变薄旋压成形工艺研究.金属成形工艺, 2002,20(5):23-26
- 59 Li Kezhi, Hao Nanhai, Lu Yan, etc. Research on the distribution of the displacement in backward tube. Journal of Materials Processing Technology, 1998,79(1-3):185-188
- 60 Yao Jianguo, Murata Makoto.An experimental study on paraxial spinning of one tube end. Journal of Materials Processing Technology,2002,128(1-3):324-329
- 61 S.-C.Chang,C.-A.Huang,S.-Y.Yu,etc.Tube spinnability of AA 2024 and 7075 aluminum alloys.Journal of Materials Processing Technology,1998,80-81:676-682
- 62 许沂,单德彬,吕炎.筒形件强力旋压的三维有限元模拟.模具技术,2001,(4):4-7
- 63 翟福宝,储灿东,张质良,等.筒形件错距旋压的三维有限元模拟.模具技术,2001 , (4):4-7
- 64 Ismail Nawi, S. M. Mahdavian. Hydrodynamic lubrication analysis for tube spinning process. Wear, 1998,220(2):145-153
- 65 P.P.Crimmins. Spinning of Refractory Alloys. Metal progress, 1994,(1):36-39
- 66 E.Quigley. J.Monaghan. Enhanced finite element of metal spinning. Journal of materials Processing Technology, 2002,121(1):43-49
- 67 Shan Debin, Lu Yan, Li Ping, etc. Experimental study on process of cold-power spinning of Ti-15-3 alloy. Journal of Materials Processing Technology,2001,115(3):380-383
- 68 王国强.实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践.西安:西北工业大学出版社, 2001:1-151
- 69 龚曙光. ANSYS 基础应用及范例解析.北京:机械工业出版社,2003:29-444
- 70 谭建国.使用 ANSYS6.0 进行有限元分析.北京:北京大学出版社,2002:1-80
- 71 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析.北京:机械工业出版社,2003,3:1-8

参考文献

- 72 胡忠,王志诚.ANSYS 在金属成形数值模拟中的二次开发应用.1995 年中国 ANSYS 用户年会论文集.北京:美国 IMAG 公司驻北京办事处,1995:193-204
- 73 博嘉科技.有限元分析软件—ANSYS 融会与贯通.北京:中国水利水电出版社,2002:11-203
- 74 美国 ANSYS 公司北京办事处.ANSYS/LS-DYNA 用户使用手册,2003, 1-235
- 75 嘉木工作室.ANSYS5.7 有限元实例分析教程.北京:机械工业出版社,2002:1-230
- 76 ANSYS,Inc.ANSYS Structural Analysis Guide Release 5.4 Third Edition.SAP,IP Inc.,1997
- 77 卫原平,王轶为.工艺参数对筒形件强力旋压过程的影响.模具技术,2000,4:12-16
- 78 王振生.变薄旋压产品常见缺陷探讨.金属成形工艺,1999,17(2):31-33

攻读硕士学位期间承担的科研任务与主要成果

致 谢

本论文是在张涛教授和张庆教授的悉心帮助和关怀下完成的。导师以渊博的学识、前瞻的眼光和严谨的态度，为学生开阔了研究视野，丰富了专业知识，使作者在科学研究及工作作风等方面深受教益。在此谨向导师表示崇高的敬意和诚挚的感谢。

在论文撰写过程中，张老师给予我许多良好的指导和意见，使我在不断获得知识的同时，顺利完成了论文和课题工作。我认为更让我受益匪浅的是张老师为人师表、诚实正直的人品和一丝不苟、认真负责的工作的态度，这必将影响到我以后的工作、学习和生活。在此，谨对二位导师表示深深的谢意，感谢您把自己丰富的学识和优秀的品质无私的传给您的学生。在作者完成论文期间，王林、阎洪涛、韩伦、李孟光等同学给予了无私的帮助。

最后，对在读研究生学位期间所有给予我真诚关心与帮助的家人和朋友们表示衷心的感谢。

作者简介



孟艳梅，女，汉族，中国共产党员，1979年9月生于河北省任丘市。2002年6月毕业于河北科技大学材料学院塑性成形工艺及设备专业，获工学学士学位。2002年10月至今，就读于燕山大学机械工程学院材料加工工程专业，攻读硕士学位，研究方向为曲母线形件复合旋压的数值模拟及工艺分析。