

## 摘 要

螺旋孔型斜轧技术是一种连续、局部加载的回转体成形工艺，具有生产率高、产品质量好、材料利用率高、生产成本低等优点，在实际生产中得到了日益广泛的应用。随着斜轧新产品的不断开发，扩大斜轧运用范围也成为斜轧技术发展的需要，并具有重要的实际意义。

本文从生产实际出发，进行斜轧回转体零件的轧机研发及实验研究。主要工作包括：微型斜温轧机主体的结构设计，轧辊的孔型设计、斜轧轧件成形过程有限元模拟及轧制回转体零件实验。

重点研究了微型斜温轧机的结构组成。首先从总体结构上论述了斜温轧机的整体设计。然后针对斜轧成形工艺对设备的要求，设计轧机各个机构，包括轧辊的径向调整、轴向调整、倾角调整等机构。最后针对斜轧机轧辊同向、同速旋转的要求，完成传动系统的设计，包括电机、减速器的选择，同步机构的设计及校核，并对轧机进行了调试工作。

对斜轧回转体零件的轧辊孔型进行设计，并以此为基础，利用 Proe/E 软件建模，利用 DEFORM—3D 软件对轧件的成形过程进行有限元模拟，通过分析获得优化的轧件成形参数，为轧制实验提供理论基础。

对回转体零件斜轧成形过程进行了轧制实验研究，分析了轧制实验所出现的问题，修改了部分设计方案，轧制出符合产品尺寸要求的零件。

关键词：回转体斜轧；轧机研发；孔型设计；有限元模拟；轧制实验

## Abstract

The technology of screw groove diagonal rolling is a sort of continual and rotary forming technology with partial loading. It possesses the qualities of efficient productivity, high utilization of material, and low product cost, etc., with widely extensive application in the practical production. With the gradual exploration of skew rolling new product, broadening the application range of skew rolling technology has become one of the necessities in its development, with the important actual meaning.

This thesis centers on the rolling mill exploration of skew rolling revolving parts, as well as its experiment research, which can be divided into the following parts: the structure design of mini-body of skew rolling mill, the roller type design, the finite element of simulation in the forming process of diagonal rolling, as well as the physics experiment of rolling.

This thesis puts its emphasis in the structure constitution of mini skew rolling mill. At first, it demonstrates the general design of skew rolling mill, and then it presents the structure design of rolling mill, including the structure of radial adjustment, axis adjustment and obliquity adjustment, etc. At last, with the roller requirements in direction and speed, it finishes the driving system design, as well as the electric machine, the deceleration selection, the simultaneous machine design and checkup, and the debugging work of rolling mill.

On the basis of roller design of revolving parts, this thesis operates the finite element of simulation with the help of Proe/E and DEFORM-3D software, which provides the theoretical basis for simulative physics experiments.

And this thesis will completely analyze the forming process of revolving parts with its rolling experiments, and analyzes the problems coming up in the rolling experiment, modifying parts of design scheme, producing the parts meeting the demands of rolling products.

Key words: skew rolling of revolving parts; rolling mill exploration; pass design; the simulation of finite element; rolling experiment

# 沈阳理工大学

## 硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明:本论文的所有工作,是在导师的指导下,由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献的引用已在文中指出,并与参考文献相对应。除文中已注明引用的内容外,本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体,均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者(签字):  
日期: 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解沈阳理工大学有关保留、使用学位论文的规定,即:沈阳理工大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和磁盘,允许论文被查阅和借阅。本人授权沈阳理工大学可以将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、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名:  
日期:

指导教师签名:  
日期:

# 第 1 章 绪论

## 1.1 课题的提出

随着我国工业生产的发展，回转体零件的需求量在日益增加，这就要求零部件制造工艺和技术水平不断发展和提高。对于现代化成形工艺，高速、高质、省料和自动化是发展方向。传统回转体零件的成形方法主要有切削、铸造和锻压等，这几种工艺方法需要多道次工序才能完成，生产效率低，材料利用率低。为了提高经济效益和节约材料，人们近几十年来一直在探索这类产品生产的新方法、新工艺<sup>[1-2]</sup>。

国内某企业以生产回转体零件产品为主，企业要求生产的产品尺寸小，精度高，重量控制要求严格。产品零件图如图 1.1 所示。原有加工工艺采用冷挤压成形的方法，需多次热处理工序，尽管产品精度高，但工人工作时需要高度集中注意力，经常出现误操作，成品率低；同时该生产方式生产效率相当低，远远不能满足生产任务的需求，从质量和数量上都满足不了企业的需求，故企业寻求新的加工方法进行生产。

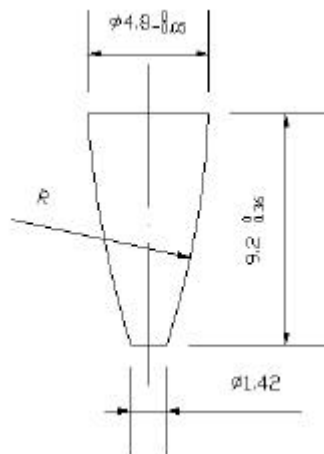


图 1.1 产品零件图

对于此类弧形回转体零件，采用斜轧工艺进行加工生产效果更为显著。与传统工艺相比，斜轧技术有着诸多优点，它不但可以发挥轧制技术的生产效率高、材料利用率好、生产过程连续性强等优点，还可使产品质量得到提高，实现少切

削、无切削的目的<sup>[3]</sup>。同时，设备还易于实现机械化、自动化<sup>[4]</sup>，人员、设备和投资都大幅度的减少，经济技术效益十分显著。但由于该企业产品尺寸小，精度高，生产批量特别大，现有国内外斜轧机都无法满足其产品的生产需求。所以企业需求一款符合轧制产品要求的斜轧机，并对斜轧成形提出以下要求：

- 1、保证产品的尺寸。
- 2、保证产品的重量，偏差不能超过 0.05g。

基于以上几点要求，提出利用斜轧技术生产回转体零件课题研究，并研发微型螺旋孔型斜温轧机以满足企业的生产需求。

## 1.2 螺旋孔型斜轧的特点及运用

机械制造中有许多量大面广的零件，如回转体零件，其中实心的如球类、柱状类、锥状类；环形件如一般环状件、异形环类件等。这些回转体零件大部分可以用螺旋孔型斜轧工艺生产。

螺旋孔型斜轧，简称斜轧（skew rolling），工作原理如图 1.2 所示，两个带螺旋孔型模具的轧辊相互交叉配置，以相同方向旋转，带动圆形轧件反向旋转并前进，轧件在螺旋孔型作用下，直径压缩轴向延伸，轧制成所需回转体零件<sup>[5~7]</sup>。

图 1.3 为轧制实心回转体零件轧辊的展开图，从图 1.3 可以看出螺旋孔型轧辊的特点：轧辊的凸棱从入口到出口是由低到高的，宽度是由窄变宽的。所以轧辊孔型的特点是变高度、变导程的轧辊。

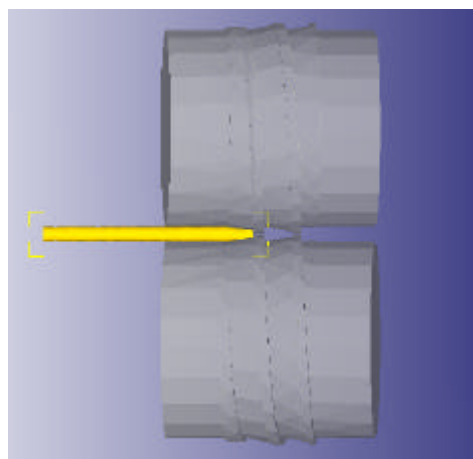


图 1.2 斜轧原理图

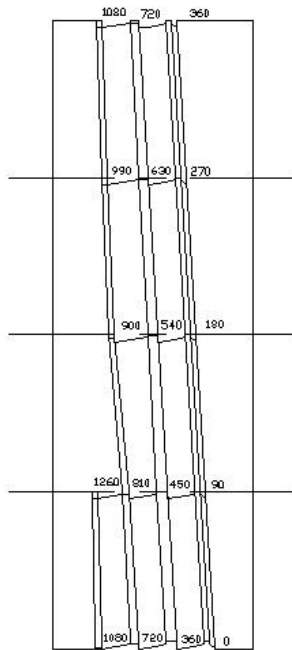
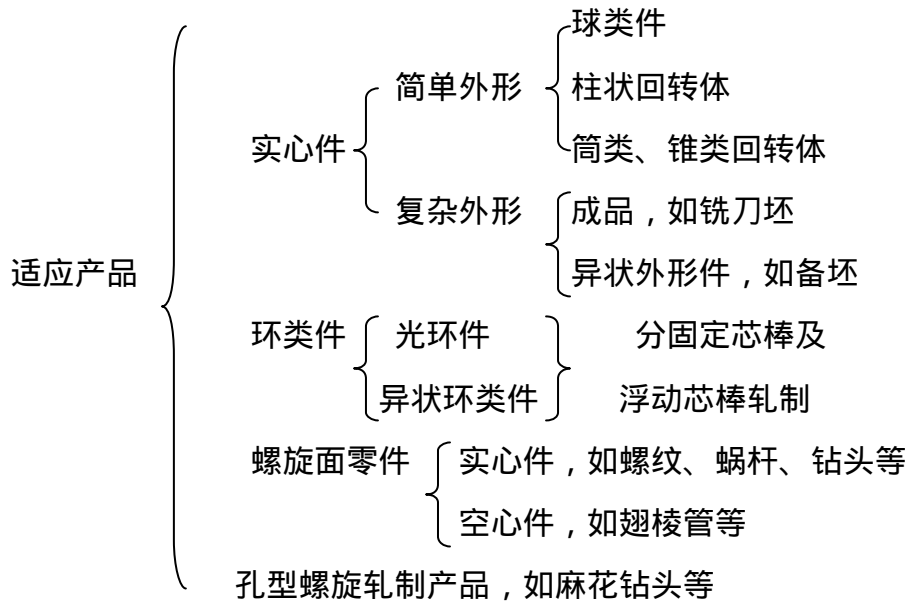
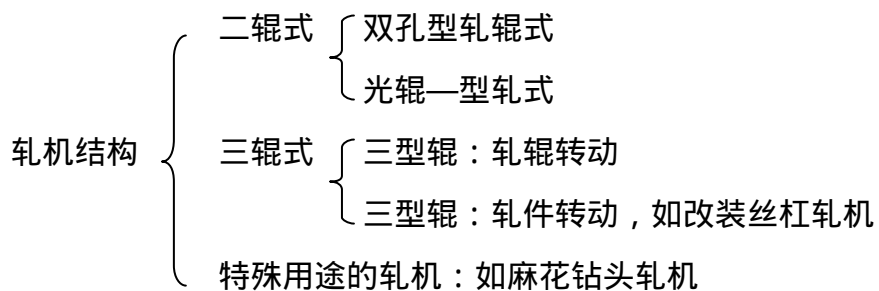


图 1.3 轧辊展开图

螺旋孔型斜轧工艺的适应产品，从产品形式上看，大致如下：



从轧机结构上看，大致可分类如下：



圆形棒料在这样的轧辊孔型中边旋转边前进，经成形、精整、切断轧制成形，图 1.4 所示为斜轧钢球成形过程，不同的回转体零件可以通过改变轧辊孔型轧制得到。

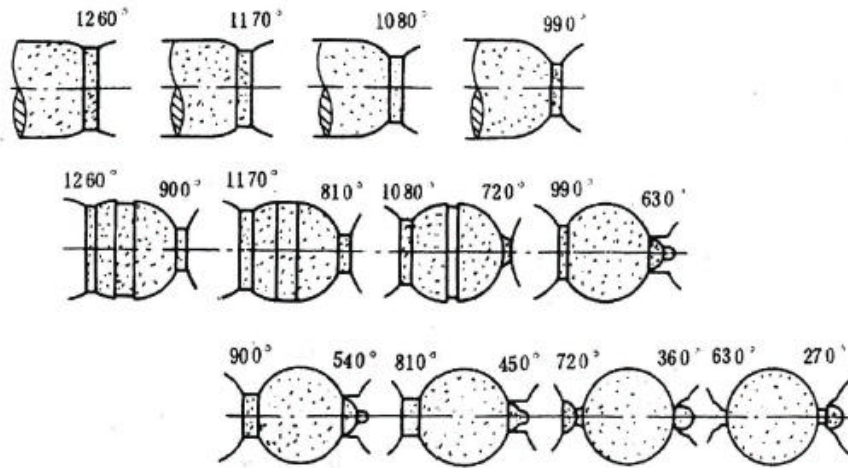


图 1.4 斜轧钢球成形过程图

斜轧与传统成形工艺——铸造、锻压及切削相比，有以下优点：

(1) 单机的生产效率大幅度提高。与铸造、切削、锻压相比生产效率平均提高 5~20 倍。它的生产效率取决于轧辊的转速  $n$ (r/min) 与螺旋孔型的头数  $Z$ 。计算生产率  $Q$  的公式为<sup>[8]</sup>：

$$Q = z \times n \quad \text{个/min} \quad (1-1)$$

冷轧一般为  $n = 100 \sim 600 \text{ r/min}$        $Z = 1 \sim 5$

$$Q = 100 \sim 3000 \quad \text{个/min}$$

热轧一般为  $n = 40 \sim 300 \text{ r/min}$        $Z = 1 \sim 4$

$$Q = 40 \sim 1200 \quad \text{个/min}$$

(2) 材料利用率显著提高。在锻造之后进行机加的成型产品，材料的利用率一般只有 60% 左右，斜轧成型产品的材料利用率一般不低于 80%<sup>[3]</sup>，平均利用率一般为 94%<sup>[9]</sup>，目前最好水平达到 98~99.5%，对于几何外形精度没有特殊要求的产品，可以达到无切削的程度<sup>[10-11]</sup>。

(3) 产品质量提高。螺旋孔型斜轧时，一般变形速度较高、变形比较大，提高了轧制零件的机械性能<sup>[12]</sup>，使得斜轧产品晶粒细化，金属纤维流线沿着产品轴线保持连续，共轴性好，因而机械性能大大提高，某些斜轧产品的静载轻度较之

切削产品提高了 30~50%<sup>[13]</sup>，疲劳极限提高 5~6%以上<sup>[14]</sup>，产品要经过在孔型中成型和精整两个阶段，故尺寸精度、同心度和表面光洁度都能较好的满足要求，精密斜轧甚至能达到精车的水平。

(4) 改善劳动条件。斜轧与锻造相比，无冲击、少噪音，劳动条件得到明显的改善，此外，产品的成型、精整与切断工序均在轧辊孔型中连续自动完成，加上进出料容易实现自动操作，因而减少了操作工人的劳动强度。

(5) 降低产品成本。与铸锻、切削相比，生产效率提高，斜轧轧辊的寿命比锻模长 5~20 倍<sup>[15]</sup>，同时，由于生产过程容易实现机械化、自动化<sup>[16-17]</sup>，生产人员、辅助人员、设备台数及厂房面积等都可大幅度下降，因此也带来产品成本的大幅度下降，具有良好的机械效益。

斜轧产品大多为长度上变断面的轴类零件，以此类零件作为产品的加工方法还有楔横轧和仿形斜轧。它们与切削或者锻造加工相比同样具有效率高、节约材料和无冲击、少噪音等优点。但是，这三者之间又有差异，这些差异决定了它们各自的运用范围。表 1.1 为孔型斜轧、楔横轧与仿形斜轧的比较，表中数据均为热轧时的数据<sup>[3]</sup>。

表 1.1 孔型斜轧、楔横轧、仿形斜轧的比较

	孔型斜轧	楔横轧	仿形斜轧
单机生产率, n/min	40 ~ 1200	6 ~ 50	0.5 ~ 6
坯料直径, mm	6 ~ 150	6 ~ 150	6 ~ 200
产品长度, mm	6 ~ 200	40 ~ 1200	200 ~ 3000
$f_{30}$ 毫米产品尺寸精度, mm	$\pm 0.06$	$\pm 0.10$	$\pm 0.30$
表面粗糙度	Ra4 ~ Ra6	Ra3 ~ Ra5	有轻微螺旋纹
材料利用率, %	> 96	> 85	> 75
轧辊形状	复杂	较复杂	简单
轧辊直径	较大	大	很小
轧辊长度	最长	较长	很短
进出料	自动进出料	需要进出料装置	需要进出料装置



## 1.3 斜轧在国内外的发展与运用

### 1.3.1 国外斜轧技术的发展与运用

斜轧工艺作为一项生产技术，早在 1862 年就已得到了应用，使用该技术的范围主要是圆钢棒矫直、精整，到 1881 年有 5 项关于斜轧原理、装置的专利。1886 年，德国曼内斯曼发明了斜轧穿孔机，后来经过百年的发展，斜轧在无缝钢管生产的各个重要环节都得到了广泛的应用<sup>[18~21]</sup>。第一次世界大战以后，德国在斜轧钢球的原理方面已经有了发展，由于技术条件的限制，在二十世纪中叶以前一直未能投入生产。

十九世纪后期出现辊式斜轧机生产无缝钢管工艺。因此人们设想能否利用斜轧运动原理，把轧辊做成螺旋孔型，用它轧制各种回转体零件。这个想法到二十世纪四十年代末五十年代初在苏联、日本、美国等国家得到实现和发展，用它高效率地生产钢球、丝杠等产品（包括冷轧与热轧、实心的与空心的），并收到显著的技术经济效果。

苏联在完善斜轧成形方法上取得了突破性进展。1939 年~1941 年，在苏联中央重型机械制造局组织下，N.C. 格尔罗什、Jl.H. 克留依柯夫、N.A. 耶格罗夫等人进行了第一次轧钢球的工业性实验。其后，苏联机械制造与工业部门进行了一系列的理论研究和实验工作。1949~1950 年期间，苏联中央机械制造厂与工艺科学研究院制造了第一台工业性轧机，并成功地轧制出钢球毛坯。到 1957 年，苏联已能够轧制出  $f40 \sim f50\text{mm}$  球磨钢球<sup>[22]</sup>。至此，前苏联的斜轧球磨工艺已趋于成熟，并向英国、保加利亚、意大利、捷克和中国出口钢球轧机。此外，前苏联还研究和实验了球面滚柱毛坯、图缘管坯、轴承环、连杆毛坯等产品，有的还进入了工业性生产阶段。这说明前苏联在斜轧的发展和运用上起到了开创性的作用。

美国在完善斜轧成形方法方面做了大量工作，对孔型方案的研究尤为深入，形成了美国孔型成型设计方案。其主要特点是：孔型型腔无平直段，对孔型而言为一条变导程螺旋线，对凸棱而言为二条变导程螺旋线，孔型型腔底部的螺旋线为圆柱面上的变导程螺旋线，从进料口到出料口，孔型凸棱由宽变窄又变宽。凸棱宽度的最窄处靠近切断区，轧辊采用凸轮或液压等仿形法加工，轧辊的制造精度取决与加工工艺的过程。

同一时期，日本也开始了斜轧技术的研究和实际运用工作。日本名古屋工业技术实验所的栗野泰吉等人在轧制钢球的孔型设计、轧制力与轧制力矩的测定与计算、轧制时的金属塑性流动、成球的机械性能质与尺寸精度等方面做了深入分析与研究<sup>[23-24]</sup>。

进入六十年代，斜轧技术的研究和应用有了很大的发展，其主要标志之一就是突破了对称的辊配结构而产生了单孔轧制短圆柱产品，同时产品的类型和尺寸范围也不断的扩大，已能轧制出  $f20$  毫米的球类产品及齿轮滚刀坯等产品。然而在随后十年间，斜轧成形工艺技术发展相对缓慢，产品的类型基本没有增加，仍然以形状比较简单的产品为主，但在提高产品生产效率及控制加工精度方面有了一定的进展，2~8 头螺旋孔型的轧辊相继进入工业生产，使单机生产率成倍增长，轧辊的加工由专用的数控车床取代了普通车床，使精度得以提高。

### 1.3.2 国内斜轧技术的发展与运用

我国斜轧技术的研究开始于 1958 年，一机部机械科学院、北京钢铁学院（现北京科技大学）等单位与工厂合作开展了斜轧成型的研究工作，首先将斜轧钢球工艺运用于轴承球的生产，标志着我国斜轧技术与运用的起步。四十多年以来，我国在斜轧产品特别是复杂形状产品轧制理论、设备和工艺等方面取得了许多成果，形成了自己的特色。

自七十年代以来我国斜轧技术的应用取得了迅速的发展。早在 1960 年，北京钢铁学院设计了一台倾角不能连续调整的  $f50$  毫米的球磨钢球轧机，用它轧制出合格的球磨钢球<sup>[25]</sup>。1972 年北京钢铁学院与北京轴承厂共同研究成功单孔型热斜轧工艺，使斜轧轴承滚子有了新的进展。1973 年，天津自行车钢珠厂研究成功冷斜轧小钢球工艺，把单机的生产效率提高到 400~800 粒/分，上海自行车钢珠厂采用钳式斜轧机生产小钢球，同样收到相当好的技术经济效果。同年，北京钢铁学院与包头钢铁公司联合设计了一种新形式的  $f75$  毫米球磨钢球斜轧机<sup>[26]</sup>。这台轧机与苏联设计的同类型轧机相比，重量减轻 30% 以上，并且具有调整方便，容易更换轧辊等优点。目前，斜轧产品在我国已取得较广泛的运用，斜轧的磨球、滚子等产品已广泛应用于冶金、建筑、电力、机械、军工等部门<sup>[27]</sup>，除鞍山钢铁公司、本溪钢铁公司等钢铁企业安装了大型斜轧机外，还在有色金属、电力、水

泥等部门建立了中小型的斜轧机，生产基地主要分布于京、沪、津、苏等地。

经多年的实践，我国斜轧技术在以下方面取得了较大进展：

### (1) 产品的尺寸与种类范围扩大

国外产品直径大都在  $f16 \sim f20$  mm 以上，而我国经过多年的实践，在产品尺寸上，不但能轧制直径为  $f20 \sim f125$  mm 的大直径球磨钢球，而且能生产  $f3 \sim f6$  mm 的小钢球。在产品材料范围上，我国斜轧产品的材质已由黑色金属，扩大到有色金属。到目前为止，已能采用斜轧工艺生产的产品有：球磨钢球、钢珠、滚针、圆柱及锥面滚子、防滑钉、尾杆、柱塞、汽车转向球销、伞齿轮坯、油泵芯套、轴承内座套、自行车闸身毛坯、经纬仪大小轴套、丝杠、钢心、球头吊环、环形散热器、滚齿刀毛坯以及铝球等数十个种类<sup>[28]</sup>。如图 1.5 和图 1.6。



图 1.5 防滑钉

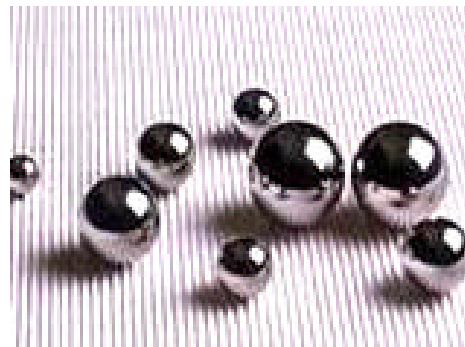


图 1.6 轴承钢球

### (2) 斜轧复杂形状的产品

斜轧技术推广应用的关键问题之一是复杂形状产品的生产，为了扩大斜轧的运用范围，研究复杂形状产品的斜轧成形技术有很大意义。我国科研人员在这方面做了大量的工作，并已达到了世界先进水平。目前，能轧制由 3~6 个回转体组成的复杂产品。1972 年，北京钢铁学院与 3603 厂协作，在实验轧机上研究成功由三个回转体组成的防滑钉的轧制，采用一个深型腔轧辊、一个浅型腔轧辊进行轧制，用斜轧一次成形代替原来的下料、冲压、去飞边等工序，效率提高五倍，节约金属 15%。此外，北京钢铁学院与江阳化工厂合作在实验轧机上轧出由五个回转体组成的 H 形回转体。该产品的轧辊孔型由五条变螺距、变高度的线组成。这种产品的轧制，不论孔型设计、轧辊的制造及工艺调整都是相当复杂的。

### (3) 精密热斜轧成形技术

我国斜轧成型技术不但在尺寸大小上、形状复杂程度上有较大的发展，而且在精密产品的轧制上也有较大的突破<sup>[29]</sup>。尺寸和表面精度都达到或者接近精车水平<sup>[30]</sup>，即实现少切削、无切削一次成型。

#### (4) 理论研究与应用

与斜轧技术的发展、产品范围的扩大及新的斜轧形式的出现相适应，我国也进行了斜轧的基础理论的研究<sup>[31-32]</sup>。在孔型设计方面，我国学者综合苏联与美国孔型设计的特点，提出双侧变导程的孔型设计方案<sup>[3]</sup>，使凸棱高度是在锥形面上自然形成的，孔型设计与加工建立在锥形面上，且凸棱两侧导程均为变化的。同时，伴随国外对计算机在轧制技术决策方面的开发及应用<sup>[33-37]</sup>，我国也开展了计算机在孔型设计方面的应用<sup>[38]</sup>，并制作了包含优化功能的软件包，不仅可以运用于模具的 CAD/CAM，而且可以用于塑性变形的研究，对轧制过程进行模拟与仿真<sup>[39-43]</sup>，进一步推动斜轧技术的发展与运用。

在辊形方面，运用微分几何理论对孔型包络轧件作了描述<sup>[44-47]</sup>，并对高精度轧辊孔型的加工理论进行了系统的分析<sup>[48-50]</sup>。公式(1-2)为以 $q$ 为参数的接触线空间坐标方程<sup>[3]</sup>。

$$\begin{cases} x = R_0 + r_0(1 - \cos q) \\ y = (R_0 + r_0)tgq \cos \alpha_0 - r_0 \sin q \sin \alpha_0 \\ z = (R_0 + r_0)tgqtg\alpha_0 \cos \alpha_0 + r_0 \sin q \sin \alpha_0 \end{cases} \quad (1-2)$$

在斜轧的机械设备方面，对斜轧机传动的几何参数进行综合，系统研究了单孔型斜轧的力能参数，全面进行了球磨钢球轧机力能参数的测试与分析工作，有效地指导了现有斜轧机的改造和潜力的发挥。

如上所述，我国在斜轧成型技术的研究及运用方面取得了明显的成果，为斜轧成型的发展与运用范围的扩大起了很大的作用。但要发挥斜轧技术的巨大潜能，仍需进一步的解决许多问题，如斜轧变形基础的深入研究、斜轧产品的再扩大开发、计算机在生产研究中的应用等。如能在以上几个方面有所突破，斜轧技术在我国的应用将会有更广阔的前景。

### 1.4 课题的主要工作

本课题主要是针对满足某企业对回转体零件的生产需求而提出的，由于企业生产产品尺寸小，重量控制要求严格，传统加工工艺无法满足其生产需求，现有

轧机无法实现产品加工生产，所以研发微型螺旋孔型斜温轧机，并利用该斜轧机采用斜轧技术轧制出企业需求的回转体零件，主要工作包括以下几个方面：

1、微型螺旋孔型斜温轧机的设计。设计中参考相关斜轧机的设计理念，进行结构设计、运动设计等，为今后斜轧同类零件轧机的设计提供依据。

2、轧辊孔型的设计。通过对螺旋孔型斜轧原理、运动条件的分析，在满足孔型设计两个基本原则的前提下，确定满足回转体零件斜轧成形要求的孔型参数。

3、轧件成形有限元模拟。利用特征建模技术，在 Proe/E 环境下，对轧辊及上下导板进行三维实体建模。利用有限元分析软件 DEFORM—3D，对轧件成形过程进行有限元模拟。

4、轧制实验。利用研发生产的微型螺旋孔型斜温轧机进行轧制实验，调整轧机，对轧件缺陷进行分析，最终获得要求尺寸的轧件。

## 1.5 小结

本章阐述了课题建立的工业背景、研究内容及课题研究的实际意义，提出了轧制回转体零件的质量要求。本文还介绍了斜轧技术的特点及应用范围，总结了斜轧工艺在单机生产率、材料利用率、产品质量、劳动条件的改善等方面的优点，对比分析了螺旋孔型斜轧、楔横轧、仿形斜轧之间的差异，阐述了国内外斜轧技术的发展和现状，介绍了我国斜轧技术在产品的尺寸和范围、精密热斜轧成形技术、理论研究与应用等方面所做的工作和成果。

## 第 2 章 斜轧基本原理

### 2.1 轧件成形过程

螺旋孔型斜轧时金属的成形过程是将加热的坯料沿轧辊轴向送入螺旋辊间，坯料被咬入到一对同向旋转的轧辊内，用导板使坯料限制在轧制位置上，由于两个轧辊螺旋孔型的压缩作用，坯料沿轧制中心线呈螺旋式前进，同时被压缩成所要求的形状和尺寸的轧件。

从金属塑性变形的角度看，螺旋孔型斜轧回转体类零件时，其金属的变形可分为三个阶段：

1. 用螺旋孔型轧辊的咬入锥部，咬入坯料；
2. 在成形孔型内，在轧辊和导板的作用下，使坯料成形；
3. 在孔型精整段，精整轧件的形状和尺寸，并消除轧件在成形段孔型内成形的椭圆度以及压缩零件之间的连皮，使之达到设计要求的尺寸。

轧件在被轧辊锥部咬入时，只是其径向受到压缩，使其沿轴向延伸并且因切向变形而引起椭圆变形。坯料被轧辊的成形孔型段咬入之后，金属在轧辊孔型凸棱的复杂作用下，处于复杂的应力应变状态中，产生剧烈而复杂的变形。斜轧轧辊孔型凸棱由低逐渐升高，由窄逐渐变宽。因此，轧件的直径被凸棱由粗逐渐压细，产生径向压缩变形。由于凸棱逐渐展宽，轧件在压细的同时，逐渐被拉长，产生轴向延伸变形。轴向延伸变形是由轧辊凸棱宽度变化决定的。当金属受到轴向拉力时，金属将优先向轴向延伸。当金属受到轴向压力时，将阻止轧件的轴向延伸变形，迫使金属产生横向扩展变形。圆柱形的棒料在径向压缩时，根据金属的最小阻力定律，一方面产生轴向延伸变形，另一方面也产生横向扩展变形。由于轧辊凸棱径向压缩金属，且孔型壁限制金属轴向的自由流动，所以很大的切向变形使轧件变成椭圆形。随着轧辊的旋转，压下量逐步减小，轧件又呈圆形。到精整段孔型内，压下量已经很小，孔型只对轧件起到精整的作用。所以，经精整段孔型后，轧件终于变成所需形状轧出。

## 2.2 斜轧运动原理

斜轧成形时，两个带螺旋孔型模具的轧辊相互交叉配置，以相同方向旋转，带动圆形轧件反向旋转并前进，轧件在螺旋孔型作用下，直径压缩轴向延伸，轧制成所需回转体零件。图 2.1 为斜轧运动示意图， $O_1O_1$  为轧件轴心线， $O_2O_2$  为上轧辊轴心线， $O_3O_3$  为下轧辊轴心线。

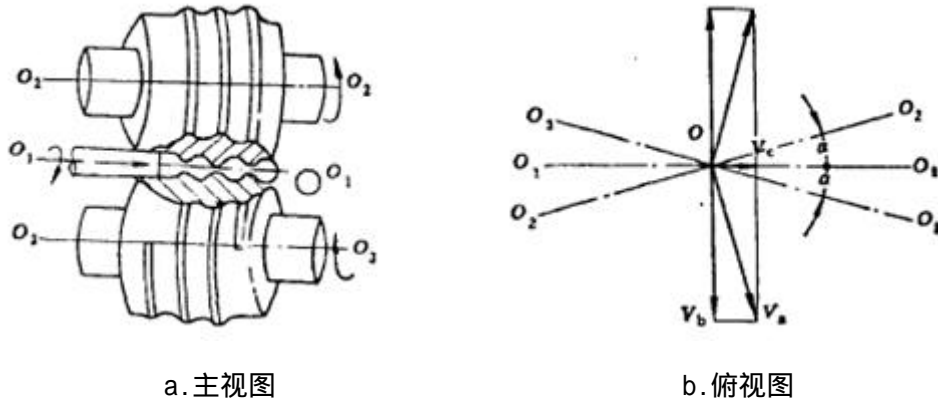


图 2.1 斜轧运动示意图

螺旋轧辊在交叉点  $O$  的圆周速度  $V_a$  为

$$V_a = \omega_1 R_a = \frac{p D a n_1}{60} \quad (2-1)$$

式中： $R_a$  —— 轧辊孔型  $O$  点半径；

$D_a$  —— 轧辊孔型  $O$  点直径；

$n_1$  —— 轧辊的转速。

再将  $V_a$  分解成垂直速度  $V_b$  与水平速度  $V_c$ ，得

$$V_b = V_a \cos \alpha = \omega_1 R_a \cos \alpha = \frac{p D a n_1}{60} \cos \alpha \quad (2-2)$$

$$V_c = V_a \sin \alpha = \omega_1 R_a \sin \alpha = \frac{p D a n_1}{60} \sin \alpha \quad (2-3)$$

式中： $\alpha$  —— 轧辊轴线与轧件轴线的交叉角。

垂直速度  $V_b$  使轧件得到旋转运动，水平速度  $V_c$  使轧件得到前进运动。轧件之所以能够向前运动，不仅是轧辊圆周速度在水平方向有一个分速度  $V_c$  带动轧件的结果，还由于轧辊旋转时，螺旋孔型的推动，这个推动速度  $U_c$  为

$$U_c = \frac{n_1 S}{60} \cos \alpha \quad (2-4)$$

式中： $S$  —— 轧辊螺旋孔型的导程。

由此可知，轧件轴向运动受  $V_c$ 、 $U_c$  两个速度的影响。如何运动才能够使轧辊轴向运动最为合理，我们可以分以下三种情况来进行讨论。

(1)  $V_c > U_c$ 。即当倾角  $\alpha$  角的轧辊旋转时，轧辊摩擦带动轧件向前运动的速度大于轧辊螺旋孔型推动轧件向前运动的速度。由于螺旋孔型凸棱的限制， $V_c$  的速度是无法实现的，会出现轧件往前挤压孔型凸棱的情况。由于轧辊与轧件呈对滚运动，这样就容易发生凸棱切轧件前端的现象，这是不利于轧制的。

(2)  $V_c < U_c$ 。即出现与上面相反的情况。同样由于螺旋孔型凸棱的限制， $V_c$  的速度也是无法实现的，会出现轧辊孔型凸棱推着轧件后端面向前运动的情况。由于轧辊与轧件呈对滚运动，这样就容易发生凸棱切轧件后端面的现象，这也是不利于轧制的。

(3)  $V_c = U_c$ 。即轧辊摩擦带动轧件向前运动的速度等于轧辊螺旋孔型推动轧件向前运动的速度，故轧制平稳，并且不会发生孔型凸棱切轧件前后端面的现象，实现理想轧制关系。

实现  $V_c = U_c$  的条件是

$$V_c = \frac{pDa n l}{60} \sin \alpha = U_c = \frac{n l S}{60} \cos \alpha$$

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{S}{pDa}$$

$$\tan \alpha = \tan b$$

得  $\alpha = b$  (2-5)

由此我们可知，如实现平稳而无前后孔型凸棱挤压轧件的轧制，需满足轧辊倾斜角  $\alpha$  等于轧辊螺旋孔型的螺旋升角  $b$ 。由于轧辊螺旋孔型的导程与凸棱高度是变化的，所以轧辊孔型的螺旋升角  $b$  也是变化的，轧辊倾斜角  $\alpha$  的调整需根据不同轧制特点作适当的调整。

### 2.3 斜轧的旋转条件

斜轧成形的显著特点之一，是被变形的金属坯料与变形工具之间必须有相对运动。斜轧的旋转条件是建立在简单横轧旋转条件基础上的，所以先讨论简单横轧的旋转条件，在横轧的基础上，导出斜轧的旋转条件。

所谓简单横轧是指忽略导板、导管等作用在轧件上的外力，忽略轧件自重与



惯性力，且轧制线与轧机中心线一致。其简单受力图如图 2.2 所示。

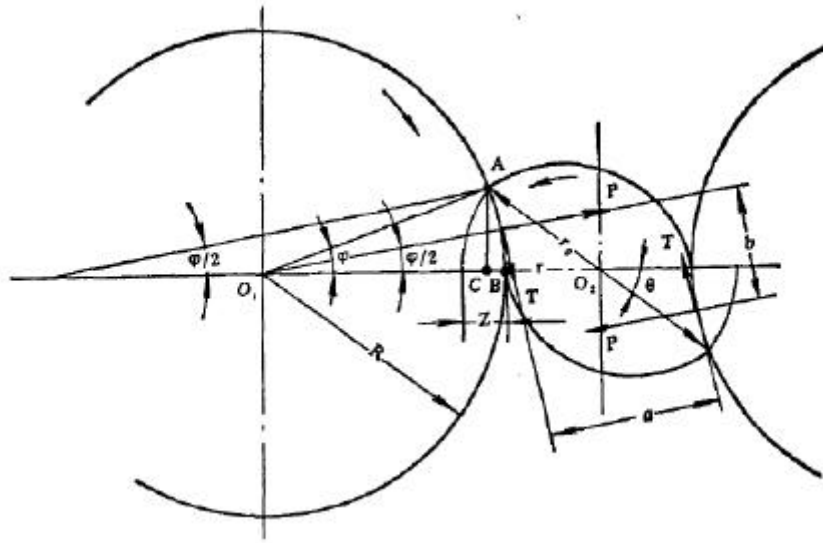


图 2.2 简单横轧的受力图

图 2.2 为垂直于轧制轴向剖开时轧制情况。由图可知，轧辊给轧件四个外力：两个  $P$  力与两个  $T$  力。它们对称作用于轧件， $P$  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  $AB$  的中间位置，即  $P$  力的方向与  $\overline{O_1O_2}$  夹角为旋转角  $j$  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

$$T = mP \quad (2-6)$$

式中： $m$ ——轧辊与轧件间的摩擦系数。

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

$$M_T \geq M_P \quad (2-7)$$

或 
$$Ta \geq Pb \quad (2-8)$$

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。

将式 (2-8) 代入式 (2-6) 化简后得

$$m \geq \frac{b}{a} \quad (2-9)$$

$$\text{而} \quad b = 2(R+r) \sin \frac{j}{2} \quad (2-10)$$

$$a = 2(r-c) \cos \frac{j}{2} \quad (2-11)$$

式中： $r$ ——轧件出口半径；

$c$ —— $B$ 点至 $T$ 力与 $\overline{O_1O_2}$ 线交点的距离。

将式(2-10)、(2-11)代入式(2-9)后得

$$m \geq \frac{2(R+r) \sin \frac{j}{2}}{2(r-c) \cos \frac{j}{2}} = \frac{R+r}{r-c} \operatorname{tg} \frac{j}{2} \quad (2-12)$$

$$\text{式中：} \quad c = \frac{R}{\cos \frac{j}{2}} - R = R \left( \frac{1 - \cos \frac{j}{2}}{\cos \frac{j}{2}} \right)$$

将上式代入(2-12)后得

$$m = \frac{R+r}{r - R \left( \frac{1 - \cos \frac{j}{2}}{\cos \frac{j}{2}} \right)} \operatorname{tg} \frac{j}{2} \quad (2-13)$$

横轧由于 $j$ 角很小， $c$ 值可以省略，旋转条件的公式简化为

$$m \geq \frac{R+r}{r} \operatorname{tg} \frac{j}{2} = \left( 1 + \frac{R}{r} \right) \operatorname{tg} \frac{j}{2} \quad (2-14)$$

从图 2.2 可以看出，当 $j$ 角较小时，可以近似认为

$$\operatorname{tg} \frac{j}{2} = \sin \frac{j}{2} \quad (2-15)$$

$$\text{而} \quad \sin \frac{j}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos j}{2}} \quad (2-16)$$

从图 2.2 中 $\Delta O_1AC$ 与 $\Delta O_2AC$ 可以得到

$$\overline{AC} = R \sin j = r_0 \sin q$$

式中： $r_0$ ——轧件入口的半径。

$$\sin \mathbf{q} = \frac{R}{r} \sin \mathbf{j} \quad (2-17)$$

而  $\overline{O_1O_2} = R + r_0 - Z = R \cos \mathbf{j} + r_0 \cos \mathbf{q} \quad (2-18)$

式中：Z——压缩量。

$$Z = r_0 - r$$

因为  $\cos \mathbf{q} = \sqrt{1 - \sin^2 \mathbf{q}}$

将式 (2-17) 代入上式后得

$$\cos \mathbf{q} = \sqrt{1 - \frac{R^2}{r_0^2} \sin^2 \mathbf{j}}$$

再将上式代入式 (2-18) 得

$$R + r_0 - Z = R \cos \mathbf{j} + r_0 \sqrt{1 - \frac{R^2}{r_0^2} \sin^2 \mathbf{j}}$$

或  $R(1 - \cos \mathbf{j}) + (r_0 - Z) = r_0 \sqrt{1 - \frac{R^2}{r_0^2} \sin^2 \mathbf{j}}$

将上式两边平方经整理后得

$$R^2[(1 - \cos \mathbf{j})^2 + \sin^2 \mathbf{j}] + 2(1 - \cos \mathbf{j})(Rr_0 - RZ) + Z^2 - 2r_0Z = 0$$

因为  $(1 - \cos \mathbf{j})^2 + \sin^2 \mathbf{j} = 2(1 - \cos \mathbf{j})$

所以  $2R^2(1 - \cos \mathbf{j}) + 2(1 - \cos \mathbf{j})(Rr_0 - RZ) + Z^2 - 2r_0Z = 0$

$$\begin{aligned} \cos \mathbf{j} &= 1 - \frac{Z(2r_0 - Z)}{2R^2 + 2R(r_0 - Z)} = 1 - \frac{2(d_0Z - Z^2)}{D(D + d_0 - 2Z)} \\ &= 1 - \frac{2(dZ + Z^2)}{D(D + d)} \end{aligned} \quad (2-19)$$

将式 (2-19) 代入式 (2-15) 及 (2-16) 得

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\mathbf{j}}{2} &= \sqrt{\frac{1 - [1 - \frac{2(dZ + Z^2)}{D(D + d)}]}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{dZ + Z^2}{D(D + d)}} \end{aligned} \quad (2-20)$$

将式(2-20)代入式(2-14)得

$$m \geq \frac{R+r}{r} \sqrt{\frac{dZ+Z^2}{D(D+d)}} = \frac{D+d}{d} \sqrt{\frac{dZ+Z^2}{D(D+d)}}$$

两边平方再经整理后得

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

$Z/d$ 称为相对压缩量。 $Z/d$ 值较小, $(Z/d)^2$ 值更小的可以忽略不计,这样可得到更为明确的旋转条件按关系式,即

$$m^2 \geq \left(1 + \frac{d}{D}\right) \frac{Z}{d} \quad (2-21)$$

或

$$\frac{Z}{d} \leq \frac{m^2}{1 + \frac{d}{D}} \quad (2-22)$$

在简单横轧旋转条件的基础上,可知斜轧获得自然旋转的条件是 $f$ 小于极值

$[f]$ :

$$\tan \frac{f}{2} \leq \tan \frac{[f]}{2} = \frac{m}{\frac{D}{d} + 1} \quad (2-23)$$

式中： $f$ ——为旋转角；

$m$ ——为轧辊和轧件的摩擦系数；

$\frac{D}{d}$ ——为轧辊直径与轧件直径比。

## 2.4 小结

本章针对螺旋孔型斜轧的成形过程及运动原理进行分析,获得了保证轧制过程的正常进行的咬入条件和旋转条件解析解,为以后的轧辊调整及轧辊磨损原因分析提供了理论依据。

## 第3章 微型斜温轧机主体的结构与设计

任何一种制造技术，都由设备和工艺两个主要方面组成，新产品的出现需要新工艺来实现，新工艺向设备提出新的要求，迫使设备变革，新设备的问世又支持工艺发展，制造技术因此得以进步，斜轧技术的发展也是如此。根据产品生产工艺的发展要求，现有一些传统的工艺及设备已经不能满足实际生产的需求，因此，研发螺旋孔型斜温轧机，采用斜轧技术替代落后的加工工艺很有必要性。

本课题所设计的微型螺旋孔型斜温轧机，主要是针对满足某企业对回转体零件的生产需求，该企业所需回转体零件，尺寸小、批量大、精度高，重量控制严格。其原生产工艺工序多，生产效率低，从质量和数量上都满足不了企业的需求，由于产品尺寸小，现有国内外轧机都无法满足其生产要求，所以研发微型螺旋孔型斜温轧机，以此来提高轧件的生产效率，降低生产成本，提高生产效益。

本章主要论述轧机的主体机械部分，通过分析机体的结构特点，提出了设备的研发方案，确定轧机的结构组成，并对轧机部分零部件组成进行选择 and 校核。

### 3.1 斜轧机的整体设计方案

本型号微型螺旋孔型斜轧机的设计是在查阅国内外大量文献的基础上，借鉴和吸收国内外该方面的最新成果，并根据产品尺寸要求通过进一步的分析和研究设计而完成的。轧机命名为学校的名称和轧辊的尺寸综合，故将此轧机命名为SG70螺旋孔型斜温轧机。

SG70螺旋孔型斜温轧机由主机、传动系统和电器控制系统三大部分组成，由于轧机处于初步研发阶段，现主要设计轧机的主机及传动部分。根据初步的设计方案，斜轧机主体及传动装置固定在机座上，电动机独立安装在地基上，轧机整体配置如图3.1所示。

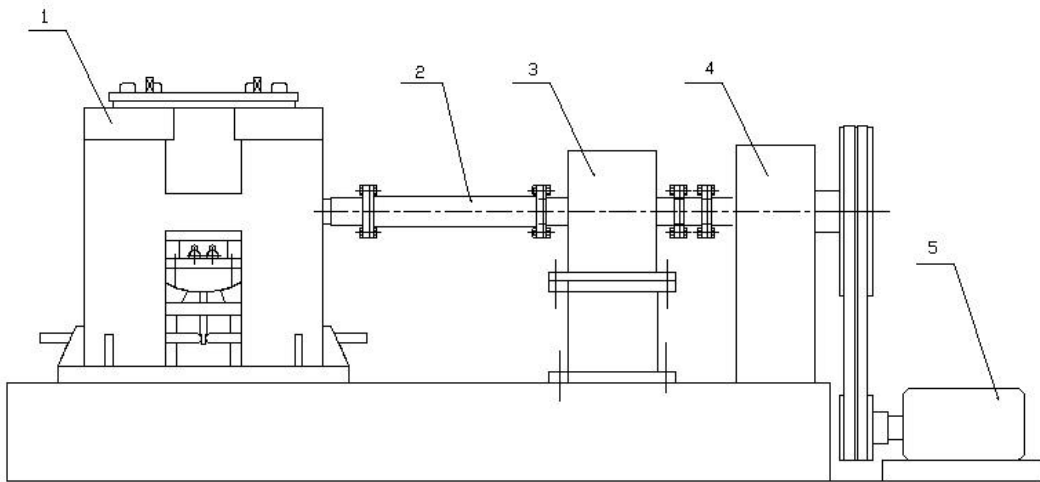


图 3.1 斜温轧机整体配置简略示意图

1 - 轧机主机；2 - 万向联轴器；3 - 同步机构；4 - 减速器；5 - 电机

轧机主机主要由轧辊辊系、机架、压下装置、导板机构、径向调节机构、轴向调节机构、角度调节机构组成，如图 3.2 所示。

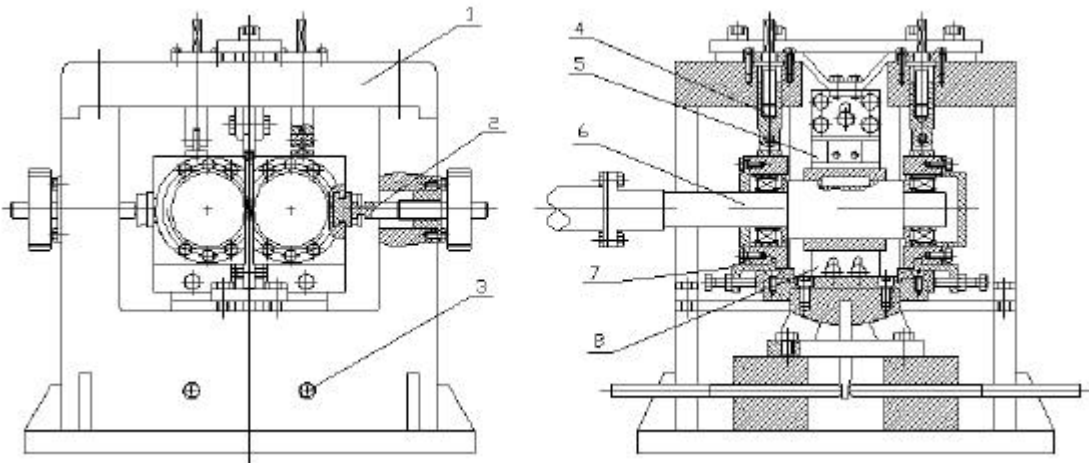


图 3.2 SG70 螺旋孔型斜温轧机主机

1 - 机架部分；2 - 轧辊径向调整机构；3 - 轧辊角度调整机构；4 - 上端压下机构；

5 - 上导板装置；6 - 轧辊辊系；7 - 轴向调整机构；8 - 下导板装置

机架采用焊接结构，由左右两个机身，两个侧挡板，两个机架盖及一个底板组成；轧辊采用可分离结构，辊套和辊轴可分离拆卸更换，两个轧辊分别支撑在左右轴承座内；在轴承座及机架盖之间设置锁紧机构，用于锁定轧辊纵向位置；轴承座外侧分别开有 T 型槽，径向调整机构通过 T 型槽与其连接，通过齿轮装置同步或单独调整左右轧辊间距；轴承座下方装有轴向调整机构，用于调整轧辊轴

向对齐；角度调整机构通过位于轴向调整机构下方的旋转丝杠驱动转鼓实现轧辊轧制倾角的调整。轧机主机实物图如图 3.3 所示。



图 3.3 轧机主体实物图

传动系统采用三级传动，主电机经皮带轮带动减速器，减速器输出端装有同步机构，经同步转换后，通过万向联轴器带动左右轧辊做同向、同速旋转运动。轧机传动简图见图 3.4。

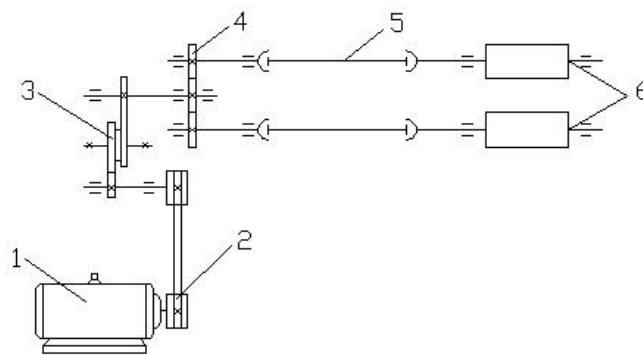


图 3.4 SG70 斜温轧机传动简图

- 1 - 电动机；2 - 皮带减速传动；3 - 圆柱齿轮减速装置；4 - 同步机构；  
5 - 万向联轴器；6 - 轧辊

## 3.2 斜轧机主要部件的设计

### 3.2.1 机架

机架是螺旋孔型斜轧机最基础的零部件之一。为了承受使金属变形的轧制力作用，工作机架一般采用框架式结构，可分为开式机架和闭式机架两大类。开式

机架的优点是换辊系方便，但缺点是刚性差。闭式机架是一个整体框架，能够承受较大的轧制力，具有较高的强度和刚度，容易满足工作对尺寸精度的要求。

通常机架设计是根据结构要求和实际经验，参照同类型产品的机架及有关力能参数，决定其主要尺寸和机构，然后设计加工生产的。

机架的基本形状和尺寸是根据机器的用途、安装在机器内部及外部零部件的位置与尺寸、相互运动关系，以及它们的安装和拆卸条件确定的，也取决于运动状况和所承受的载荷情况。为了满足更换辊系的方便性要求，本设备采用开式机架，机架结构图如图 3.5 所示。

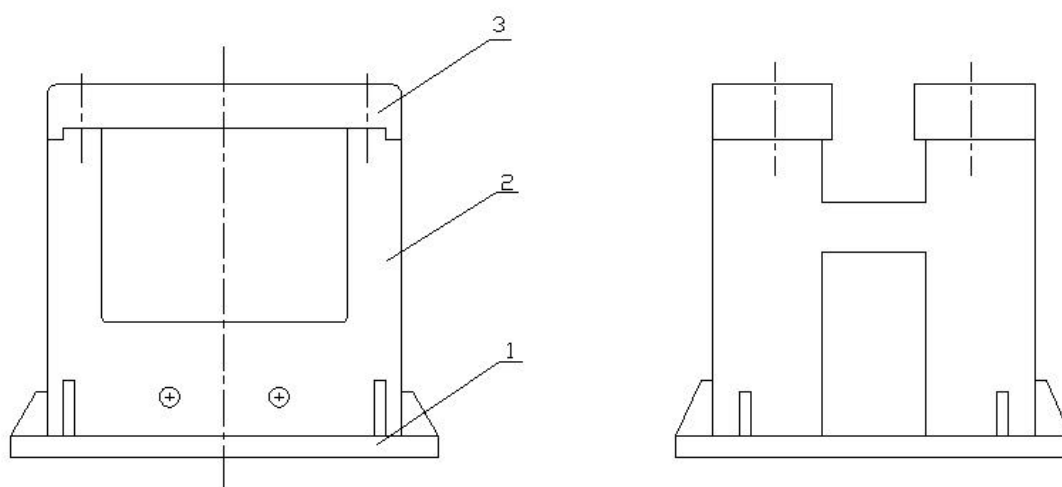


图 3.5 SG70 螺旋孔型斜温轧机工作机架

1 - 固定底板；2 - 下机身；3 - 上机身

### 3.2.1.1 轧制力的计算

轧制力的计算可按如下公式计算

$$F = s_s \times A \quad (3-1)$$

式中： $F$ ——轧制力；

$s_s$ ——材料正挤压状态下的屈服强度；

$A$ ——轧制力受力面积。

由于轧辊采用均匀变化压下量，传递给轧件的最终压下量不大，且材料选用 T12 钢，查表可知<sup>[51]</sup>： $s_s = 121.5 \text{ MPa}$ 。

由公式 (3-1) 可知，确定轧制力  $F$  的关键一方面是确定材料的屈服强度，另一方面是确定轧制的接触面积。轧件在底面上的投影如图 3.6 所示。



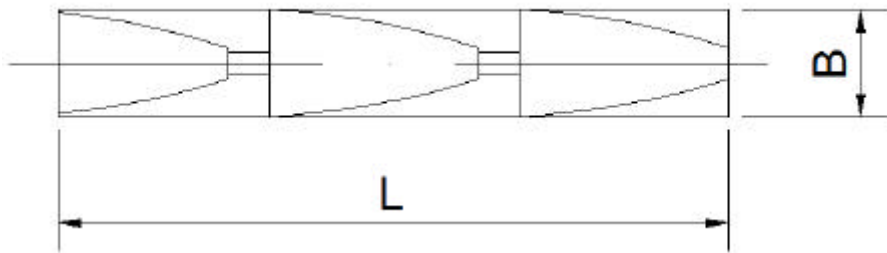


图 3.6 轧制受力面投影图

根据预算，轧制空间长度为 30mm，轧件的最大直径为 4.8mm，利用 CAD 软件计算，可得轧件在底面上的投影面积为  $94\text{mm}^2$ 。由此我们可知，微型斜轧机的最大轧制力为，

$$F = 121.5 \times 94 = 11.4 \text{ kN}$$

### 3.2.1.2 机架尺寸设计及强度校核

设计时采用了类比设计的方法，确定了机架的主要尺寸。机架的基本尺寸和安装尺寸为：机架的高度 280mm，机架的宽度 295mm，机架的厚度 50mm，固定座的高度 20mm，上机身长度 324mm，宽度 110mm，厚度最薄处 40mm，下机身与上机架身连接螺栓孔直径 13mm，螺旋间距 179mm，压下机构安装孔直径 30mm。实物图如图 3.7 所示。



图 3.7 轧机机架实物图

机架的强度和刚度不仅直接决定着整机的使用寿命，而且是影响产品精度的关键因素，由于机架强度校核比较复杂，为了使问题简单化，决定采用简支梁校核的方法对机架的强度进行校核，如此种方法校核强度符合要求，则设计的机架强度一定符合设计要求。由于上机身是工作机架承力能力最薄弱的部位，故对上

机身进行强度校核。设计要求上机身 A、B 处转角  $[q]$  不超过  $\frac{1}{10^3}$  rad，许用挠度  $[f]$  为 0.1mm。下面将上机身校核简化，利用简支梁校核方法进行校核，受力分析如图 3.8 所示。

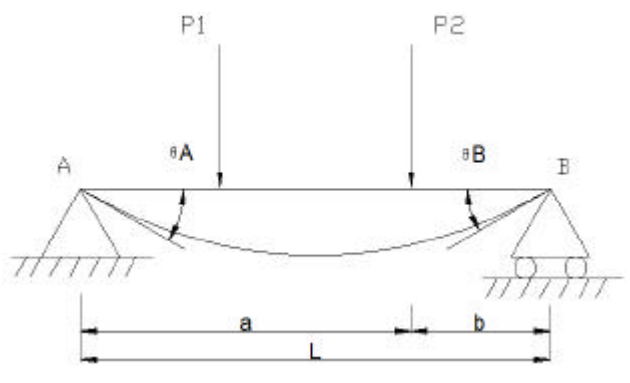


图 3.8 上机身受力分析简化图

由于上机身受力的两个力相等，故计算其中  $P_2$  力即可。总承受力为其两倍。

根据公式<sup>[52]</sup>：

$$q_A = -\frac{Pab(l+b)}{6EI} \quad (3-2)$$

式中： $q_A$ ——A 端截面转角；

$P$  ——轧制力；

$E$  ——弹性模量；

$I$  ——形心轴惯性矩。

根据设计可知：

$$P = 11.4 \text{ kN} ; a = 207.5 \text{ mm} ; b = 116.5 \text{ mm} ; l = 324 \text{ mm} ; E = 200 \text{ GPa} ;$$

$$I = 0.59 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

代入公式 (3-2)，可得

$$q_A = -0.53 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$|q_A| < [q]$$

符合设计要求。

$$q_B = -\frac{Pab(l+a)}{6EI} \quad (3-3)$$

式中： $q_B$ ——B 端截面转角。

设计数据同上，代入公式 (3-3) 得

$$q_B = -0.63 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$|q_B| < [q]$$

符合设计要求。

$$f_{\max} = \frac{Pb(l^2 - b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}EI} \quad (3-4)$$

式中： $f_{\max}$ ——最大许可挠度。

设计数据同上，代入公式 (3-4)，可得

$$f_{\max} = 0.06 \text{mm}$$

$$f_{\max} < [f]$$

经过校核，机架设计符合强度要求。

### 3.2.2 轧辊径向调整机构的设计

在轧制多品种零件或对正轧制位置的情况下，需要经常对轧辊作径向调整，同时在装卸轧辊时也要退出轧辊箱，检修、装卸导板、轧机调整等情况时，也需要将轧辊作径向退出。当轧制过程中出现了轧制故障时，为了保护轧辊，也需要将轧辊快速退出。所以，斜轧机设计径向调整机构是十分必要的。

斜轧轧辊的径向调整机构与纵轧轧辊的调整机构类似。根据孔型设计的要求，通过侧压螺丝机构，使轧辊移动，达到合理的辊缝尺寸。为了满足轧制不同规格轧件的需要，以及方便模具的安装和调整，机构设有平衡机构，使轧机的左右轧辊间距离能够自由调整。除此以外，轧机还必须保证在工作时两轧辊间距不变，所以，设计时不仅要考虑机构结构调整方便，还必须位置准确可靠。

根据以上要求，SG70 螺旋孔型斜温轧机径向调整机构决定采用旋转压下丝杠调节左右轧辊间距的方法实现轧辊径向的调整，机构包括同步齿轮及压下调整杆两部分，共由四个压下螺栓及六个齿轮装置组成，分别布置于轧机的左右两侧，如图 3.2 所示。两个同侧调整装置调整杆的中心距是有设计要求的，结合 SG70 螺旋孔型斜轧机的实际尺寸，两个同侧装置的间距取 130mm。

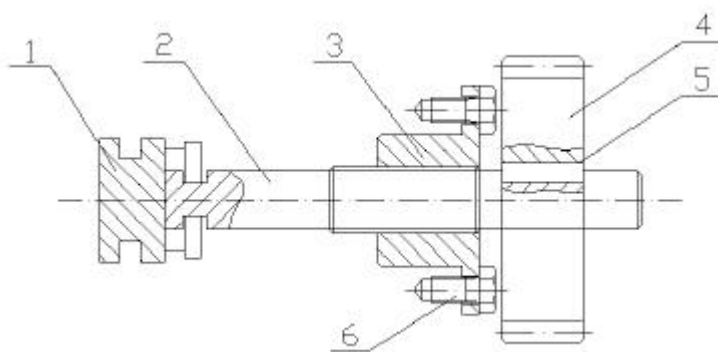


图 3.9 轧辊径向调整机构

1—压下滑块；2—压下轴；3—固定轴套；4—齿轮；5—键；6—固定螺栓

考虑到轧机的体积及制造工艺，轧机径向机构决定采用双 T 型槽压头装置，以满足平衡需求，如图 3.9 所示。机构压下装置由双 T 形槽 1、压下轴 2、压下齿轮 4 组成，通过固定轴套 3 固定于机架上。由于轧辊放置时有一定的倾角，故压下轴在机架中放置时就需要有一定的活动空间，根据斜轧倾角的调节范围及机架尺寸，压下轴直径  $d$  取 16mm，机架侧壁内孔直径  $D$  取 32mm。

调节机构采用三个齿轮咬合的方式，集同步调节和单独调解于一体，实现轧辊的间距调节，并保证轧辊处于平行状态。当轧辊出现不平行状态时，可拆卸中间齿轮，独立调整轧辊两端压下机构，使其达到平行状态，保证轧制线与导板的轴线平行，如图 3.10 所示。径向机构实物图如图 3.11 所示。

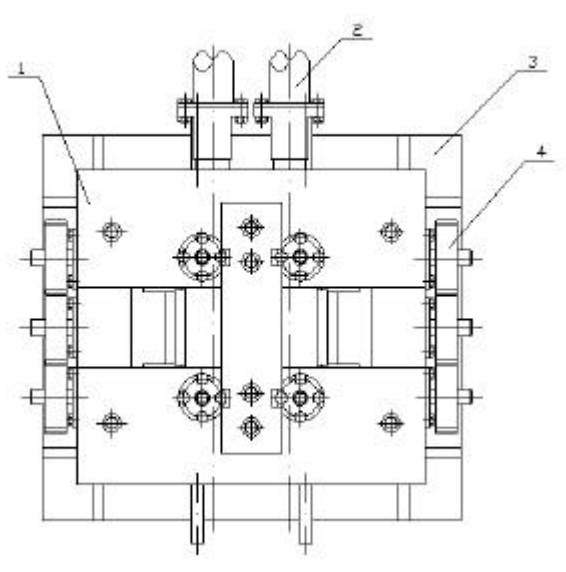


图 3.10 径向机构位置俯视布置图

1—机架盖；2—轧辊轴；3—机架底板；4—径向调整机构



图 3.11 径向机构实物图

### 3.2.3 轧辊轴向调整机构的设计

轴向调整机构是斜轧机中不可缺少的机构，为了保证两个带型腔的轧辊轴向对齐，必须设置轴向调整机构。即使为单孔型轧制，一般也要设立轴向调整机构。因为当两个轧辊出口端面没有对齐时，轧件轧到出口处容易被压偏，将已成型的轧件压出痕迹，造成废品。此外，对于精轧曲面轧辊，两轧辊的交叉点，即喉径位置，在轴向也要对齐。

斜轧机常用的轴向调整机构有以下五种：

(1)双螺母轴向调整机构。它是靠固定在轧辊轴上两个螺母的松与紧来进行轴向调整的。这种结构相当简单，适用于小型斜轧机。

(2)钩子式轴向调整机构。该结构比较简单，调整比较方便。缺点是当轴向调整受力大时，钩子受到力偶作用，容易翘起，所以一般多用于小型斜轧机上。

(3)顶丝式轴向调整机构。该机构稍为复杂一些，但调整比较方便，能够解决翘的问题。缺点是装卸轧辊箱比较麻烦。这种结构也多用在小型轧机上。

(4)C形压板式轴向调整机构。该结构比较简单，调整比较方便，比较好的解决了翘的问题，但是这种结构型式要求下面的转鼓托板有足够的厚度。

(5)滑块式轴向调整机构。该结构多用于较大型的穿孔式斜轧机。它的结构虽然复杂一些，但调整方便、可靠。

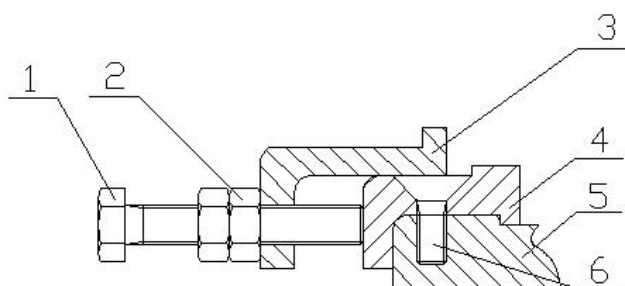


图 3.12 轧辊轴向调整机构

1 压下螺栓；2 锁紧螺母；3 滑板；4 固定板；5 角度调节固定板；6 固定螺栓

SG70 螺旋孔型斜温轧机轴向调整机构，根据轧机的空间尺寸及调整方便性，最终采用顶丝式调整机构，机构结构如图 3.12 所示。机构对称分布于轧辊轴向两端，固定板 4 通过螺栓 6 固定于角度调整机构上方，滑板 3 与其上方轴承座相连。调整时采用单向调节的方式，松开一端机构螺母，依靠另一端机构压下螺栓旋转压下，推动固定板上方的滑板，以实现调节轧辊轴向位置的目的。机构实物图如图 3.13 所示。



图 3.13 轴向调整机构实物图

### 3.2.4 倾角调整机构的设计

螺旋孔型斜轧时，轧辊中心线与轧件向前运动方向之间要求有一定的倾角，因此设计角度调整机构调整其倾角。倾角调整机构多设为丝杠传动调整，也有链轮带动转鼓调整的，但此种方法比较复杂，结构也比较大。考虑 SG70 螺旋孔型斜温轧机为微型斜轧机，机器体积小，重量低，故采用 M10 丝杠带动转鼓调整轧辊倾角的方法进行设计。图 3.14 为倾角机构示意图。

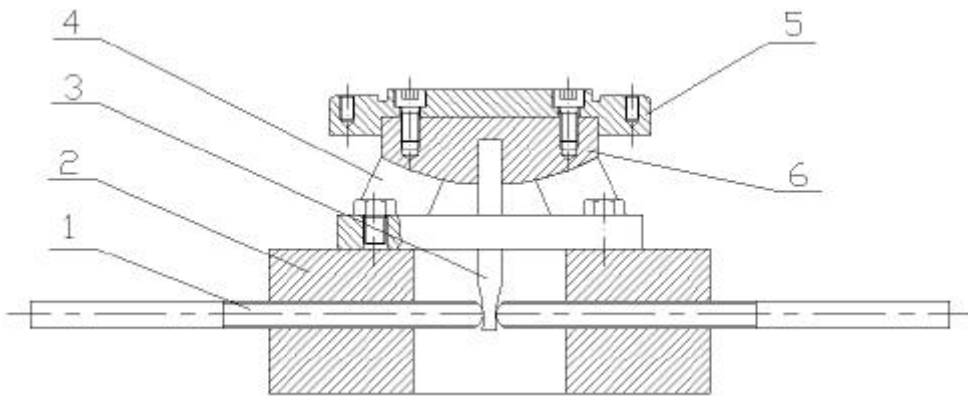


图 3.14 倾角调整机构主视图

1—调整丝杠；2—固定底座；3—摇杆；4—转鼓座；5—固定板；6—转鼓

由图可知，调整机构由调整丝杠 1、固定底座 2、摇杆 3、转鼓座 4、固定板 5、及转鼓 6 组成。角度调节通过转鼓 6 实现，轧辊固定在转鼓上方，转鼓的摆动通过丝杠 1 驱动，由转鼓托动上端机构摆动来实现轧辊倾角的改变。为实现调整角度的精度控制，在转鼓外侧装有角度刻度盘及摆针，摆动转鼓，指针也跟随摆动，摆动角度可精确控制。倾角实物示意图如图 3.15 所示。



图 3.15 倾角机构实物图

根据第二章所述我们可知，轧辊倾角  $\alpha$  是影响轧件成形的重要因素之一。通过实践发现，轧辊倾角  $\alpha$  从很多方面影响着轧制过程和轧件质量，其主要原因是当轧辊倾角变化之后，轧辊的轴向分速度发生变化，从而影响轧件的轴向进给速度，同时，轧辊与金属接触面的变化影响轧制过程和轧件质量。

由公式 (2-3) 可求得轧辊的轴向分速度。假设参数轧辊直径、轧辊转速不变，则轴向分速度随轧辊倾角  $\alpha$  的变化而变化。轧辊轴向分速度的变化，将引起轧件轴向速度的变化。同时，当坯料尺寸一定时，轧辊倾角的变形能直接改变轧件变形区的长度。所以，不同轧辊倾角就具有不同的变形区长度，当变形区接触面积

加长时，则轴向的摩擦力增大，根据金属变形时流动的最小阻力定律，金属此时的轴向流动相对困难，则径向流动相对比较容易。

其次，轧辊的倾角还会对轧制产品的轴向长度有影响。当轧辊倾角  $\alpha$  调得小于孔型螺旋升角  $\beta$  时，轧件的前进速度小于轧辊螺旋孔型在轧制线上的前进速度，这时轧件相对轧辊要产生向后滑动。由于轧件的后滑，轧件在孔型未封闭前会渐渐脱离与孔型的轴向侧面接触，造成孔型前部充不满。当轧辊孔型封闭后，轧件继续变形。由于孔型前部空隙，还会在轧件本身变形力的推动下向前滑动，造成孔型凸棱两侧均不与轧件接触，形成产品短幅现象。

不同轧辊倾角时，金属与轧辊接触面的长度变化，如图 3.16 所示。

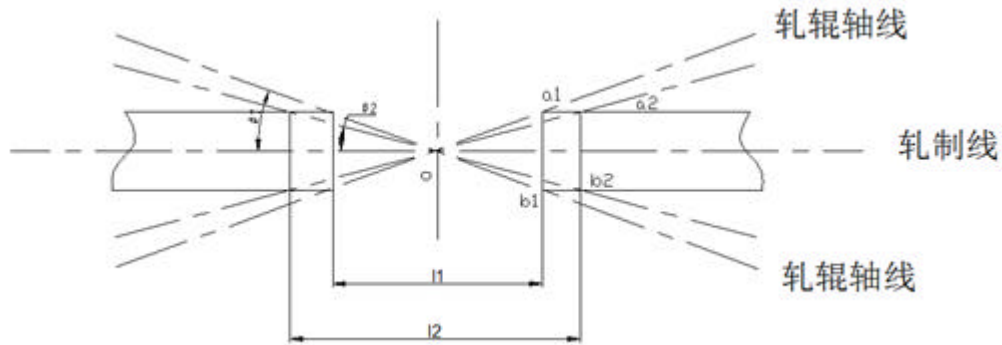


图 3.16 不同轧辊倾角时变形区长度的水平投影

图 3.13 所示的  $\Delta a_1ob$  中

$$ob_1 = \frac{a_1 b_1}{\text{tg} \beta_1}$$

$$a_1 b_1 = \frac{1}{2} f \quad (f \text{ 为坯料直径})$$

$$ob_1 = \frac{1}{2} f \frac{1}{\text{tg} \beta_1}$$

$$l_1 \approx 2ob_1 \approx \frac{f}{\text{tg} \beta_1}$$

同理

$$l_2 \approx \frac{f}{\text{tg} \beta_2}$$

因为  $\beta_1 > \beta_2$ ，所以  $\text{tg} \beta_1 > \text{tg} \beta_2$



则  $l_2 > l_1$

从上述可知，当轧辊倾角由大变小时，变形区的长度则由短变长。

由此可见，轧辊倾角的调整是能否轧制出高质量产品的一个重要因素。这就需要我们对轧辊的倾角有一个明确的认识。

由前章论述可知，轧辊所要求的倾角  $a$  取决于孔型的螺旋升角  $b$  的大小。通过经验公式公式 (3-5) 可大致求得  $a$ 。

$$a = \frac{1.05b - 1}{0.145b} \quad (3-5)$$

式中： $a$ ——轧辊的倾角；

$b$ ——轧辊孔型的螺旋升角。

根据设计，螺旋升角为  $2.6^\circ$ ，代入公式 (3-5) 计算可知， $a = 4.6^\circ$ 。

倾角调整机构设计时，倾角可调范围应在  $0^\circ \sim 10^\circ$  之间即可，考虑到 SG70 螺旋孔型斜温轧机轧辊倾角摆动幅度不大，机构设计最大可调倾角为  $8^\circ$ 。

### 3.2.5 导板机构的设计

导板是斜轧成型工艺的重要工具之一。它与轧辊孔型一起构成轧件变形的空间。导板的设计、制造、调整对产品的成型起着重要的作用。尤其是轧制尺寸精度比较高的产品时，导板的材质、制造、调整要求更高，因此，合理设计导板是很重要的。

导板在轧制过程中的作用在于限制坯料金属在合理的轧制位置上。通过导板上下、左右位置的变动，可使轧件处于合理的塑性变形状态。导板的入口和出口端还具有导向的作用。因轧制不同的零件和轧制工艺的要求，上下导板要求能够很方便的上下调节。

根据以上原则设计了导板机构。上、下导板机构分别见图 3.17、3.18。由图 3.17 可知，上导板机构主要由导板 5、滑板 4、压板 3、连接板 2 及固定板 1 组成。导板 5 通过螺栓固定在滑板 4 上，滑板 4 通过螺栓、螺母与两侧压板固定，通过调节螺栓可以调整导板的上下高度，导板调整完成后通过螺栓和压板将导板压紧。

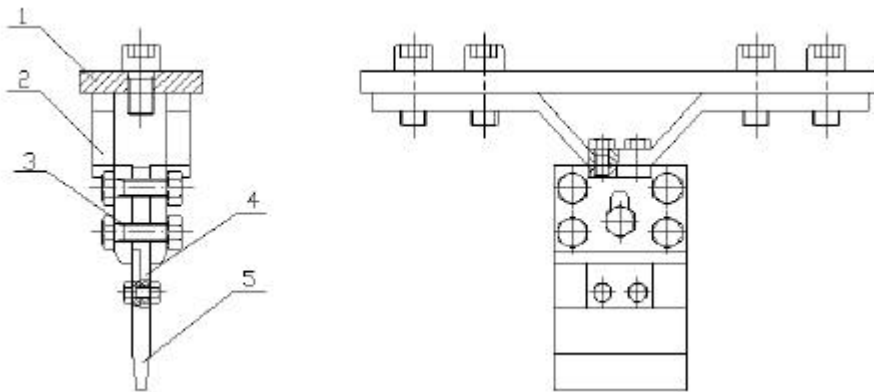


图 3.17 上导板机构

1 - 固定板；2 - 连接板；3 - 压板；4 - 滑板；5 - 导板；

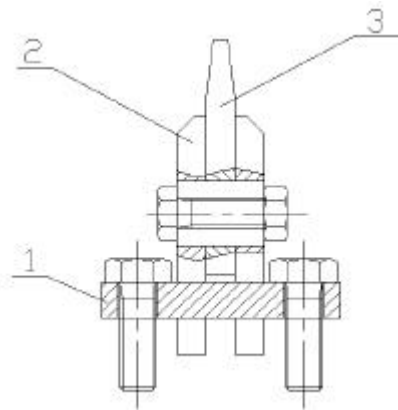


图 3.18 轧机下导板机构

1—下导板固定板；2—压板；3 导板

下导板机构组成与上导板基本相同，主要由导板、压板、及固定板组成。机构通过固定板 1 固定于机架上，调整导板 4 的高度，需要靠松放压紧螺栓来完成。上下导板实物图分别如图 3.19、3.20 所示。

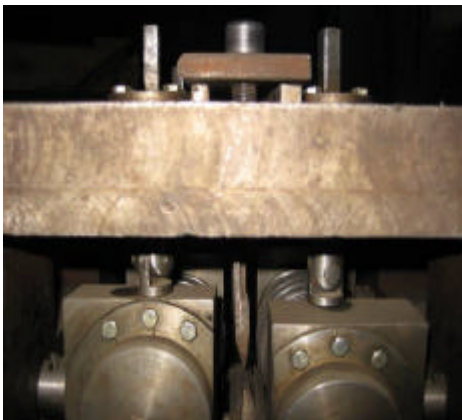


图 3.19 上导板机构



图 3.20 下导板机构

### 3.3 传动系统设计与校核

微型斜温轧机的传动系统，是斜轧机的又一重要组成部分。它由电机、减速器、同步机构等装置组成，结构简单，工作可靠。系统由电动机输出功率，经皮带及减速器减速后传递给同步机构，通过同步机构的转化，将电动机的转速和扭矩，有效地传递到斜轧机的两个轧辊上去，以便使轧辊能够同速、同向的旋转。

#### 3.3.1 电机和减速器的选择

电机和减速器的选取主要是由轧机所需要的动力条件所决定的。微型斜温轧机的轧制要求是轧辊转速为 80 转/分，轧制力为 11.4kN。

根据公式 (3-6) 可以求得单个轧辊的扭矩

$$\begin{aligned} T &= F_{\text{摩擦}} \times R \\ &= F \times m \times R \end{aligned} \quad (3-6)$$

式中： $T$  —— 轧辊的扭矩；

$F_{\text{摩擦}}$  —— 轧辊与轧件之间的摩擦力；

$F$  —— 轧制力；

$m$  —— 轧辊与轧件间的摩擦系数；

$R$  —— 轧辊有效半径。

轧辊与轧件之间为干摩擦状态，轧制过程为温轧，轧辊与轧件之间咬合度较大，故摩擦系数取 0.4，则

$$T = 11.4 \times 10^3 \times 0.4 \times 34 \times 10^{-3} = 155 \text{ N} \cdot \text{m}$$

由此可知，单个轧辊所需扭矩为 155 N·m，则轧机所需输入扭矩为 310 N·m。同步机构只起到平均分配扭矩及功率的作用，并不降低传递的转速，所以同步机构的输入端扭矩为 310 N·m。

轧辊转速设定为 80 转/分，为了采购方便，电动机选用转速为 960 r/min，所以皮带及减速器总的传动比为：

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{960}{80} = 12$$

$$\text{即} \quad i = i_1 \times i_2 = 12$$

式中： $i_1$ ——皮带传动比；

$i_2$ ——减速器传动比。

皮带设计传动比为3，则减速器的传动比为4。

所以，电机转矩为：

$$T_D = \frac{T_{\text{轧机}}}{i} = \frac{310}{12} = 25.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

根据公式<sup>[53]</sup>：

$$P = \frac{T_D n_D}{9550} \quad (3-7)$$

式中： $T_D$ ——电动机的扭矩；

$P$ ——电动机所需的功率；

$n_D$ ——电动机的转速。

代入数据可得

$$P = \frac{25.8 \times 960}{9550} = 2.6 \text{ kW}$$

由此选定，电机型号为Y2-132S-6三相异步电动机，减速器型号为ZDY-80-4-I。电动机详细参数见表3.1。

表 3.1 电机参数

电机型号	额定功率	额定电流	转速	效率	功率因数
	kW	A	r/min	%	$\cos \phi$
Y2-132S-6	3	7.4	960	81.0	0.76

### 3.3.2 同步机构的设计及校核

为了将电动机或减速器的扭矩分配给每个轧辊，除电机单独传动每个轧辊的情况外，大多数轧机的主传动系统中都设有同步机构即齿轮机座。

同样，SG70螺旋孔型斜温轧机为了满足轧辊同向、同速旋转的要求，机器设有双轴输出的同步机构。机构框架由箱体及箱盖组成，内部安置齿轮、连接轴、

轴承等部件，制造简单，安装方便。为保证转速不变，机构中的三个齿轮设计采用相同规格，故三个齿轮面都可以浸在油池中润滑。输入端连接减速器，两个输出端连接万向联轴器。输出口与轧辊位置同高，这样可以缩短联轴器的长度，利于传递的稳定性，使轧辊能够平稳的轧制。其结构图如图 3.21 所示。

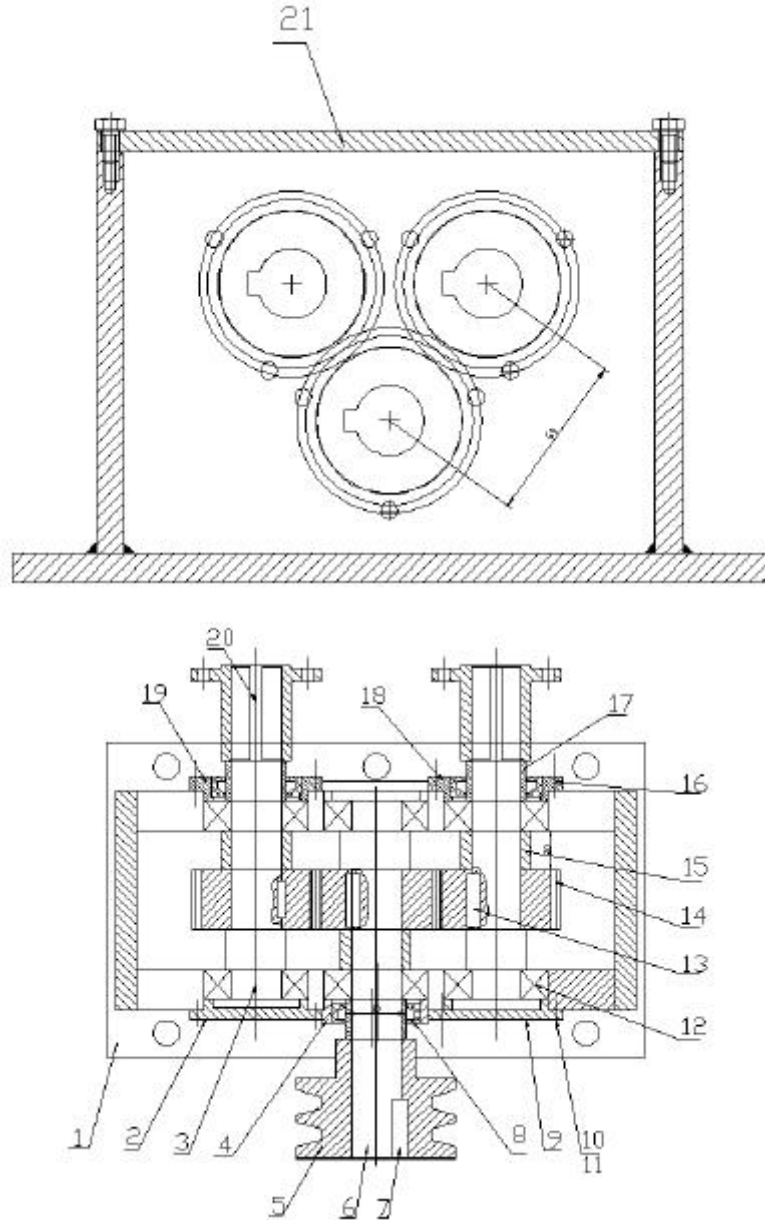


图 3.21 同步机构结构图

- 1 - 箱体；2 - 轴承盖 1；3 - 传动轴；4 - 轴承盖 6；5 - 皮带轮；6 - 传动轴 2；7 - 键 1；  
 8 - 油封；8 - 轴承盖 2；9 - 轴承盖 2；10 - 螺栓；11 - 垫圈；12 - 轴承；13 - 键 2；  
 14 - 齿轮；15 - 隔套；16 - 轴承盖 3；17 - 油封套；18 - 轴承盖 4；19 - 轴承盖 5；20 - 键 3；  
 21 - 箱盖

根据电动机的功率及同步机构的结构设计，轴承选用单列圆锥滚子轴承，轴承代号为 33007（GB/T297 - 1994）采用油润滑的方式。

### 3.3.2.1 齿轮的设计及校核

齿轮传动是机械传动中最重要的传动之一，齿轮传动具有传动效率高，结构紧凑，工作可靠稳定，寿命长，传动比稳定等诸多优点。

同步机构的输入功率为 3kW，齿轮的转速为 80r/min，由减速机驱动，工作寿命为 10 年（每天工作 8 小时），工作平稳，转向可变。

根据轧机的负荷特性，齿轮应该具有较高的承载能力和精度，并希望外形小，重量轻。一般多采用渐开线齿形的，经过精加工的硬齿面圆柱齿轮。齿轮机座的轮齿形式有：中间有退刀槽的人字齿，人字齿和拼合式双斜齿三种。

轧机同步机构的齿轮形式为渐开线圆柱齿轮，齿数为 24，模数为 3mm。齿轮的形式设计成渐开线圆柱齿轮，齿轮箱为一般的工作机器，转速不高，故可以选择精度等级为 8-7-7 级。齿轮的材料为 20CrMnTi，齿轮设计如图 3.22 所示。

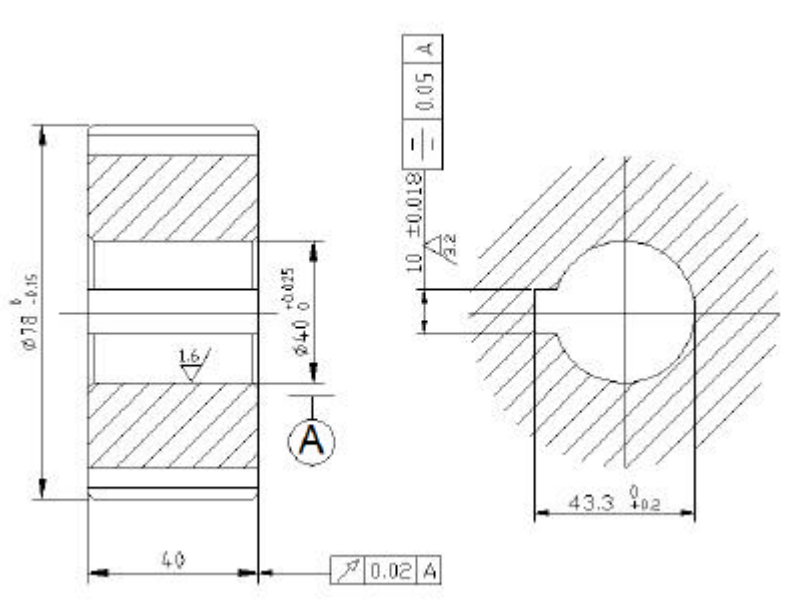


图 3.22 齿轮的设计

下面对齿轮的接触疲劳强度和弯曲疲劳强度进行校核。

#### 1. 扭矩与功率<sup>[54]</sup>

$$T = 9549P/n \quad (3-8)$$

式中： $P$ ——齿轮传递的功率（kW）；

$T$ ——传递的扭矩（N·m）；

$n$ ——齿轮的转速 ( r/min )

根据前面推导可知，忽略减速器对功率的损耗，同步机构的最大输入功率为 3 kW，则

$$T = 9549 \times \frac{3}{80} = 358.09 \text{ ( N } \cdot \text{ m )}$$

2. 传动比  $i$  的计算

$$\begin{aligned} i &= n_1 / n_2 \\ &= \frac{80}{80} \\ &= 1 \end{aligned}$$

式中： $n_1$ ——输入端齿轮转速 ( r/min )；

$n_2$ ——输出端齿轮转速 ( r/min )

3. 分度圆上的圆周力  $F_t$

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{2000T}{d} \\ &= \frac{2000 \times 358.09}{72} \\ &= 9946.94 \text{ ( N )} \end{aligned}$$

式中： $T$ ——传递的转矩 ( N · m )；

$d$ ——分度圆直径 ( mm )

4. 分度圆上的径向力  $F_r$

$$\begin{aligned} F_r &= F_t \tan \alpha \\ &= 9946.94 \times \tan 20^\circ \\ &= 3620.39 \text{ ( N )} \end{aligned}$$

式中： $\alpha$ ——齿轮咬合角 ( ° )

5. 分度圆上的法向力  $F_n$

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha} = \frac{9946.94}{\cos 20^\circ} = 10585.31 \text{ ( N )}$$

## 6. 齿面接触疲劳强度的校核

$$s_H = Z_H Z_E Z_{eb} \sqrt{\frac{F_t}{bd_1} \frac{u+1}{u} K_A K_v K_{Hb} K_{Ha}} \quad (3-9)$$

式中： $s_H$ ——计算接触应力；

$Z_H$ ——节点区域系数；

$Z_E$ ——材料弹性系数；

$Z_{eb}$ ——计算的重合度与螺旋角系数；

$b$ ——齿轮宽度 (mm)；

$d_1$ ——齿轮分度圆直径 (mm)；

$u$ ——齿数比；

$K_A$ ——使用系数；

$K_v$ ——动载系数；

$K_{Hb}$ ——齿向载荷分布系数；

$K_{Ha}$ ——齿间载荷分布系数。

查表可知：

$$Z_H = 2.495 ; Z_E = 189.80 ; Z_{eb} = 0.894 ; b = 40 ; d_1 = 72 ; u = \frac{Z_1}{Z_2} = 1 ;$$

$$K_A = 1.1 ; K_v = 1.006 ; K_{Hb} = 1 ; K_{Ha} = 1$$

带入公式 (3-9) 可得

$$s_H = 2.495 \times 189.80 \times 0.894 \times \sqrt{\frac{9946.94}{40 \times 72} \times \frac{1+1}{1} \times 1.1 \times 1.006 \times 1 \times 1} = 1170.48 \text{ (MPa)}$$

$$[s_H] = s_{H\lim} Z_{NT} Z_{LVR} Z_W Z_X / S_{H\lim} \quad (3-10)$$

式中： $[s_H]$ ——许用接触应力；

$s_{H\lim}$ ——齿轮的接触疲劳极限应力；



$Z_{NT}$  ——接触计算的寿命系数；

$Z_{LVR}$  ——润滑油膜影响系数；

$Z_W$  ——工作硬化系数；

$Z_X$  ——接触强度计算的尺寸系数；

$S_{Hlim}$  ——接触强度最小安全系数。

查表可知：

$$s_{Hlim} = 1110 ; Z_{NT} = 1.3 ; Z_{LVR} = 0.97 ; Z_W = 1 ; Z_X = 1 ; S_{Hlim} = 1。$$

$$\text{代入得} \quad [s_H] = 1110 \times 1.3 \times 0.97 \times 1 \times 1 / 1 = 1399.71 \text{ (MPa)}$$

$$s_H < [s_H]$$

所以齿轮的接触疲劳强度符合要求。

#### 7. 齿根弯曲疲劳强度的校核

$$s_F = \frac{F_t}{bm_n} K_A K_v K_{Fb} K_{Fa} Y_{FS} Y_{eb} \quad (3-11)$$

式中： $s_F$  ——计算弯曲应力；

$F_t$  ——分度圆上的圆周力；

$b$  ——齿轮宽度；

$m_n$  ——法面模数；

$K_A$  ——使用系数；

$K_v$  ——动载系数；

$K_{Fb}$  ——齿向载荷分布系数；

$K_{Fa}$  ——齿间载荷分配系数；

$Y_{FS}$  ——复合齿形系数；

$Y_{eb}$  ——抗弯强度计算的重合度与螺旋角系数。

查表可知：

$$K_A = 1 ; K_v = 1.006 ; K_{Fb} = 1 ; K_{Fa} = 1 ; Y_{FS} = 4.2454 ; Y_{eb} = 0.718$$

代入可得 
$$s_F = \frac{9946.94}{40 \times 3} \times 1 \times 1.006 \times 1 \times 1 \times 4.2454 \times 0.718 = 254.18 \text{ (MPa)}$$

$$[s_F] = s_{FE} Y_{NT} Y_{erelt} Y_{Rrelt} Y_X / S_{Flim} \quad (3-12)$$

式中： $[s_F]$ ——许用弯曲应力；

$s_{FE}$ ——齿轮材料得弯曲疲劳强度基本值；

$Y_{NT}$ ——抗弯强度计算的寿命系数；

$Y_{erelt}$ ——相对齿根圆角敏感系数；

$Y_{Rrelt}$ ——相对齿根表面状况系数；

$Y_X$ ——抗弯强度计算的尺寸系数；

$S_{Flim}$ ——弯曲强度最小安全系数。

查表可知：

$$s_{FE} = 520 ; Y_{NT} = 1.37747 ; Y_{erelt} = 1 ; Y_{Rrelt} = 1 ; Y_X = 1 ; S_{Flim} = 1.4$$

代入得 
$$[s_F] = \frac{520 \times 1.37747 \times 1 \times 1 \times 1}{1.4} = 511.63 \text{ (MPa)}$$

$$s_F < [s_F]$$

所以齿轮的弯曲疲劳强度符合要求。

齿轮加工后，需对其进行热处理，以增加齿轮的硬度。常用的热处理方法有以下几种：

(1) 表面淬火：一般用于中碳钢和中碳合金钢。表面淬火后轮齿变形不大，可不磨齿，齿面硬度可达 HRC52~56。由于接触强度高，耐磨性好，而齿芯部未淬硬仍有较高的韧性，故能承载一定量的冲击载荷。表面淬火的方法有高频淬火和火焰淬火等。

(2) 渗碳淬火：渗碳钢为含碳量 0.15~0.25% 的低碳钢和低合金钢，例如 20 号钢，20Cr 等。渗碳淬火后齿面硬度可达 HRC56~62，齿面接触强度高，耐磨性好，而齿芯部仍保持较高的韧性，常用于受冲击载荷的重要齿轮传动。通常渗

碳淬火后要磨齿。

(3) 调质：调质一般用于中碳钢和中碳合金钢，例如 45 钢，40Cr35SiMn 等。调质处理后齿面硬度一般为 HB220~260。因为硬度不高，故可以在热处理后精切齿形，但在使用中易于跑合。

(4) 正火：正火能消除内应力、细化晶粒、改善机械性能和切削性能。机械强度不高的齿轮可用中碳钢正火处理。大直径的齿轮可用铸钢正火处理。

(5) 渗氮：渗氮是一种化学热处理。渗氮后不再进行其他热处理，齿面硬度可达 HRC60~62，因氮化处理温度低，齿的变形小，故适用于难以磨齿的场合。

经过分析，最终采用渗碳淬火热处理工艺，淬火后齿面硬度为 HRC58~63。

### 3.3.2.2 轴的设计及校核

轴是组成机器的主要零件之一。一切作回转运动的传动零件（例如齿轮、涡轮等），都是必须安装在轴上才能进行运动和动力的传递。因此，轴的主要作用就是支撑回转零件及传递运动和动力。

按照承受载荷的不同，轴可以分为转轴、心轴和传动轴。工作中既承受弯矩又承受扭矩的轴称为转轴；只承受弯矩而不承受扭矩的轴称为心轴，只承受扭矩而不承受弯矩的轴称为传动轴。齿轮箱中的轴属于传动轴。

设计时要考虑轴上安装零件的类型、尺寸及位置、零件的固定方式、载荷的性质、方向、大小及分布情况。一般设计时应遵循以下原则：

- (1) 节约材料，减轻重量，尽量采用等强度外形尺寸或大的截面系数的截面形状；
- (2) 易于轴上零件的精确定位、稳固、装配、拆卸和调整；
- (3) 采用各种减少应力集中和提高强度的结构措施；
- (4) 便于加工制造和保证精度。

轴常用的材料是优质碳素结构钢，如 35、45、和 50，其中以 45 号钢最为常用。不太重要及受载较小的轴可用 Q235、Q275 等普通碳素结构钢；对于受力较大，轴的尺寸受限制，以及某些有特殊要求的轴可用合金结构钢。对于结构复杂的轴（如花键轴、空心轴等），为保持尺寸稳定性和减少热处理变形可选用铬钢；对于大截面非常重要的轴可选用铬镍钢；对于高温或腐蚀条件下工作的轴可选用耐热钢或不锈钢。

根据轴的材料的选择原则，齿轮箱中的齿轮产生的力矩不大，并且齿轮箱的制造要求尺寸小，质量轻，因此，齿轮箱中的轴的材料应该为碳素结构钢，所以选择 45 钢为轴的材料。

齿轮箱中的轴上安装的主要零件为：齿轮，轴承，联轴器。根据轴上零件的种类，可以确定轴上的次要零件为套筒、轴承端盖，另外还应该有轴肩，倒角，圆角等。输入轴、输出轴结构图如图 3.23、3.24 所示。

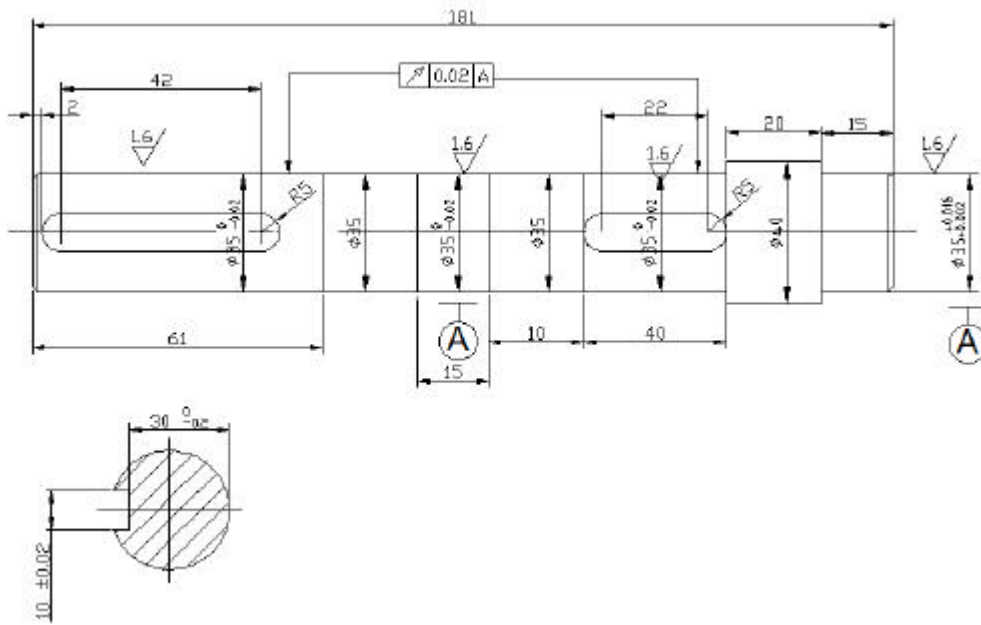


图 3.23 传动输入轴的设计

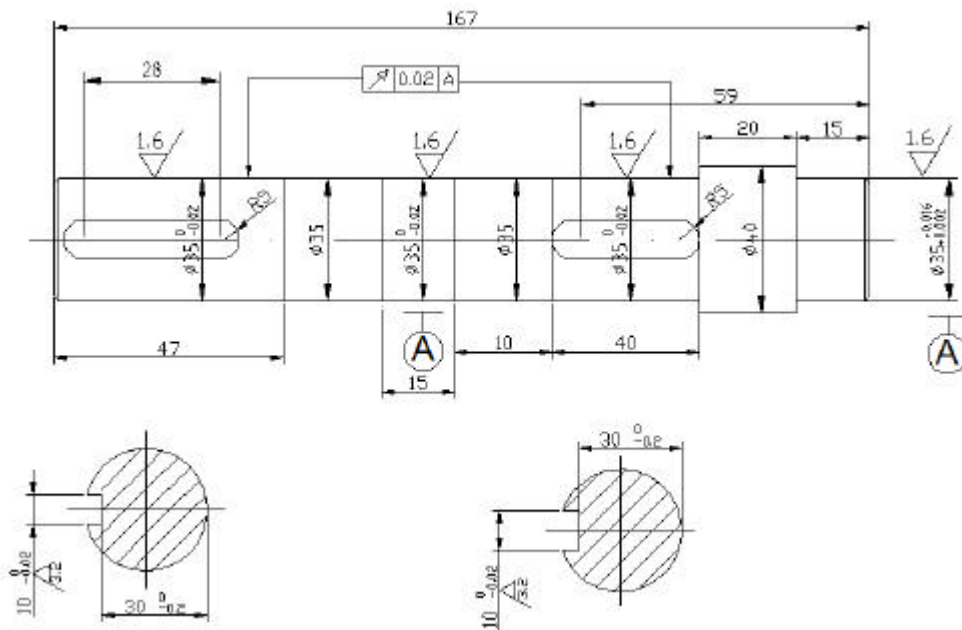


图 3.24 传动输出轴的设计

根据轴的校核要求，对于仅仅承受扭矩的轴（传动轴），应该按扭转强度条件计算校核，因此对齿轮箱中的传动轴只进行扭转强度校核即可。

输入轴的强度校核：

强度条件为：

$$t_p = \frac{T}{\left(\frac{d}{17.2}\right)^3} = \frac{9549P}{\left(\frac{d}{17.2}\right)^3} \leq [t_p] \quad (3-13)$$

式中： $t_p$ ——扭转应力（MPa）；

$T$ ——轴所受的扭矩（N·m）；

$n$ ——轴的转速（r/min）；

$P$ ——轴传递的功率（kW）；

$d$ ——轴的端面直径（mm）；

$[t_p]$ ——许用扭转切应力（MPa）。

计算可得：

$$t_p = \frac{358.09}{\left(\frac{35}{17.2}\right)^3} = 42.5 \text{ (MPa)}$$

查表得 45 的许用扭转切应力为  $[t_p]=45 \text{ MPa}$ 。

$$t_p < [t_p]$$

所以，轴的强度符合要求。

输出轴扭矩为输入轴扭矩一半，直径与输入轴相同，故不需校核。

### 3.4 小结

本章主要完成了 SG70 螺旋孔型斜温轧机主机的设计，传动系统中电机、减速器的选择、同步机构的设计及校核。为轧制回转体零件试验提供了实验设备。

## 第4章 轧辊的孔型设计

### 4.1 孔型设计基本原则

螺旋孔型斜轧属于特种轧制的范畴，它是通过轧辊表面的孔型来实现将毛坯轧制成变断面回转体零件的。其特殊性主要表现为：孔型为螺旋形，用于保证轧件在旋转的同时沿着轧制的中心线前进；孔型由凸棱、凸台、型槽等构成，各部分的宽度及高度随成型角度的不同而变化，因而导致孔型的纵向、横向导程发生变化，且轧件形状越复杂，导程变化越复杂。

此外，设计时既要考虑轧件成形是否容易，保证金属的合理流动，又要考虑轧辊加工的难易程度。

斜轧成型是棒料在孔型作用下发生径向压缩和轴向延伸，或者轴向压缩和径向扩展，以达到零件成形的要求。为控制金属在发生塑性变形时的流向以及型腔内体积平衡，必须遵循金属变形的两条基本定律：体积不变定律和最小阻力定律。

1) 体积不变定律：在金属压力加工时，金属变形前后的体积保持不变。

2) 最小阻力定律：如果物体在变形过程中其质点有各种方向的可能性，物体各质点将向着阻力最小的方向移动。

前者为斜轧孔型设计提供了依据，后者可用来分析轧制过程中金属流动情况。

在体积不变定律的基础上，产生了孔型设计的两个基本原则，它们是：

1) 第一原则：在任意孔型位置，型腔内包含的金属体积  $V_a$  为常数，此常数等于轧制零件及连接颈体积之和，即： $V_a = V_0$ ；

若  $V_a \neq V_0$ ，将出现以下两种情况： $V_a > V_0$  或  $V_a < V_0$ 。

$V_a > V_0$  表明，型腔内金属体积大于轧件总体积，即存在多余金属。当孔型封闭以后，只要导板方向处于半开启状态，多余的金属将向该方向流动，使轧件形成较大的椭圆。轧件处于不断的运动中，椭圆长短轴随时发生变化，使轧件心部承受交变的拉、压应力，导致轧件心部发生破坏，形成疏松或中空。较大的椭圆

还会恶化轧件的旋转条件，造成轧件不转的情况。

$V_a < V_0$  表明，型腔内金属体积小于轧件总体积，将使得金属充不满型腔，轧件“缺肉”而报废。

2) 第二原则：在任意孔型位置，凸棱宽度  $a_a$  应与连接颈  $b_a$  相等，即  $a_a = b_a$ 。像第一原则那样，若  $a_a \neq b_a$ ，也存在两种情况  $a_a > b_a$  或  $a_a < b_a$ 。

当  $a_a > b_a$  时，即连接颈长度小于凸棱宽度，说明连接颈金属体积不够。在此情况下连接颈承受轴向拉力。当轴向拉力过大时，连接颈过早地被拉断，造成轧件端部缺肉等缺陷。

若  $a_a < b_a$ ，表明连接颈长度大于凸棱宽度，连接颈存有多余金属。对此将可能出现以下几种情况：

- 1) 连接颈形成较大椭圆，导致中心疏松或中空，并扩展轧件本身；
- 2) 连接颈将轧件本体推向后滑，轧件端面与孔型凸棱脱离接触而出现间隙，当孔型封闭时，金属充不满孔型，结果使轧件轴线方向短幅。

以上说明，按第一原则设计孔型，确保了  $V_a = V_0$ ；然而，由于连接颈不适应，即  $a_a \neq b_a$ ，也可能破坏上述平衡条件。由此可知，局部的不适应将导致总体的失调，说明孔型设计的第一原则和第二原则是相互依存、相互补充的，设计中必须同时满足。

## 4.2 孔型设计步骤及参数计算

### 4.2.1 温轧件的结构尺寸

本课题研究的回转体零件为毛坯温轧件，轧制温度为 850，因此在确定温轧件的尺寸时，应考虑热膨胀系数。

(1) 回转体零件各部分直径  $d_n$  应按下列公式求得：

$$d_n = k_1 d_0 \quad (4-1)$$

式中： $d_n$ ——回转体零件各部分的直径；

$k_1$ ——热膨胀系数。

(2) 回转体零件总长度  $l_n$  应按下列公式求得：

$$l_n = k_2 l_0 \quad (4-2)$$

式中： $l_n$ ——回转体零件各部分的长度；

$k_2$ ——热膨胀系数。

#### 4.2.2 轧辊基本参数的确定

轧辊直径  $D$  及孔型螺旋长度  $a_b$ ，是轧辊孔型设计的两个基本参数。两个参数确定的是否适当，将直接影响成形工艺的稳定性，并且对轧件质量、轧辊寿命乃至机体大小等，均产生显著的影响。

##### 1. 螺旋孔型总长度 $a_b$ 的确定

孔型分成形和精整两个区段，两段长度之和构成孔型螺旋总长度  $a_b$ 。在确定孔型长度时应考虑以下几点：(1) 满足轧件成形及精整的要求；(2) 确保轧件质量；(3) 简化轧辊加工；(4) 提高轧辊寿命。

斜轧成形能够采取一圈成形或基本成形的，应尽量采用一圈成形的方案。通过对回转体零件结构的分析，决定采用一圈成形的方案。因此，取成形区长度为  $a_1 = 360^\circ$ ；因精整区的孔型既有精整的作用，又有切断轧件前后连接颈的作用，故精整区长度为  $a_2 = 360^\circ$ 。综上所述，孔型螺旋总长度  $a_b$  应为  $720^\circ$ 。

##### 2. 轧辊直径 $D$ 及初始压下量 $Z$ 的确定

通过第二章轧制旋转条件的推导得，

$$\frac{Z}{d} \leq \frac{m^2}{1 + \frac{d}{D}}$$

从上式我们可知，轧件直径与轧辊直径的比值  $\frac{d}{D}$  对旋转条件有一定的影响。在摩擦系数  $m$  不变的条件下，轧件同轧辊直径之比  $\frac{d}{D}$  越小，旋转条件越好。当  $\frac{d}{D}$  在  $\frac{1}{5} \sim 1$  时，影响比较显著；当  $\frac{d}{D}$  值小于  $\frac{1}{5}$  时，其影响不是很明显。这可从图 4.1 的曲线可以看出。对钢球孔型而言，斜轧成形的轧辊直径一般取轧件直径的 4~6



倍。因此，按旋转条件的要求，通常以下列经验公式确定轧辊直径

$$D = n_d d \quad (4-3)$$

式中： $n_d$ ——比例常数，一般情况下取 $n_d = 5 \sim 6$ 。

考虑到轧件尺寸，轧辊强度，轧机机体结构尺寸，以及轧制旋转条件和成形条件等问题，最终选取 $n_d = 10$ 左右，确定轧辊直径为70mm。

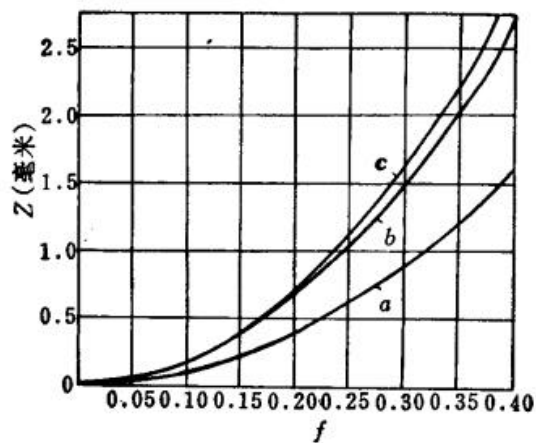


图 4.1  $\frac{d}{D}$  对旋转条件的影响

$$(a) \frac{d}{D} = 1; (b) \frac{d}{D} = \frac{1}{5}; (c) \frac{d}{D} = \frac{1}{10}$$

由旋转条件公式 (2-23) 我们可知，轧制的初始压下量与摩擦系数  $m$  及轧件直径与轧辊直径比值  $\frac{d}{D}$  有关。 $\frac{d}{D}$  的比值我们在前面已经做了定义，那么确定初始压下量的关键就是摩擦系数  $m$  的确定。

影响轧辊与轧件之间摩擦系数的因素很多，有轧辊与轧件的材质，轧辊表面加工与热处理状况，轧辊与轧件的温度，轧制时使用的冷却润滑剂，轧制速度等。轧制温度对摩擦系数  $m$  影响很大。相关数据表明<sup>[55]</sup>，当温度为 700 时，摩擦系数最大；低于或高于 700 时，摩擦系数都逐渐减小；在高于 700 进行轧制时，摩擦系数随着温度的升高而直线下降，如图 4.2 所示。

冷轧比热轧的摩擦系数要小得多，因此为满足旋转条件，冷轧用的轧辊孔型其压下量，要比热轧用的轧辊孔型其压下量小得多。

轧制速度对摩擦系数也有影响，当轧制速度超过 2m/s 时，摩擦系数将迅速降低，如图 4.3 所示。当轧制速度为 2~5m/s 时，速度每增加 1m/s，将使摩擦系数降

低约 0.056。

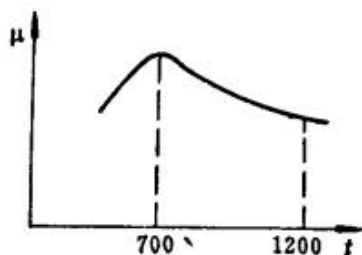


图 4.2 温度对摩擦系数的影响

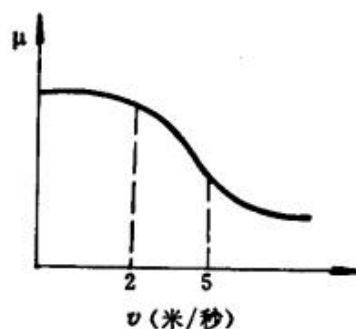


图 4.3 速度对摩擦系数的影响

冷轧比热轧的摩擦系数要小得多，因此为满足旋转条件，冷轧用的轧辊孔型压下量要比热轧用的轧辊孔型压下量小得多。

磨光的轧辊摩擦系数一般可用下面的经验公式计算：

$$m = 0.82 - 0.0005t - 0.056v \quad (4-4)$$

式中： $t$ ——轧制温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）

$v$ ——轧辊圆周速度（m/s）

带入可得： $m = 0.82 - 0.0005 \times 850 - 0.056 \times 0.293 = 0.379$

代入公式（2-23）可得

$$Z \leq 0.649 \text{ mm}$$

实际加工时，为了增大初始压下量  $Z$ ，可以通过增大摩擦系数来实现，目前，常采用撒沙、打麻点等方法来增加轧辊与轧件间的摩擦系数。

### 3. 轧辊长度 $L$ 的确定

孔型螺旋长度确定之后，轧辊长度可按下列近似公式确定

$$L = \frac{a_b}{360^{\circ}} S_0 + \Delta l \quad (4-5)$$

式中： $\Delta l$ ——轧辊咬入长度，视轧件长度而定，一般  $\Delta l = 20 \sim 30 \text{ mm}$ 。根据轧件尺寸要求及实际加工条件，选取  $S_0 = 12.7 \text{ mm}$ ，得

$$L = \frac{720^{\circ}}{360^{\circ}} \times 12.7 + 30 = 55.4 \text{ mm}$$

为了给坯料增加进料空间，设定轧辊长度为 70mm。

### 4.2.3 相关经验数据的选择

#### 1. 成形終了处连接颈直径 $d_0$ 和凸棱高度 $h_0$

轧好的轧件带尾巴对后序加工不利，而且精轧件不允许有尾巴。对此，应采取单腔或深浅型腔组合轧制。回转体零件采取一圈成形，孔型开始封闭的瞬间即为成形終了，瞬时连接颈直径即为成形終了连接颈直径。成形終了的连接颈决定了轧制损耗， $d_0$  越小则损失的金属越少。然而， $d_0$  小对第二原则的要求不利，将导致成形区接近封闭处的凸棱太薄，严重地影响轧辊的寿命。成形終了连接颈直径由下式决定

$$d_0 = (0.18 \sim 0.22)d$$

可得 
$$d_0 = 0.18 \times 4.8 = 0.864 \text{ mm}$$

成形終了处凸棱高度  $h_0$  为

$$h_0 = \frac{1}{2}(d - d_0) = \frac{1}{2}(4.8 - 0.864) = 1.968 \text{ mm}$$

式中： $d$ ——轧件最大直径。

#### 2. 凸棱起始高度 $h_b$

确定凸棱的起始高度应考虑以下两个因素：确保良好的轧制旋转条件和有利于第二原则的要求。 $h_b$  取小值，对旋转条件有利； $h_b$  取大值，对第二原则的要求容易满足。因此，在满足第二原则的前提下， $h_b$  应尽量取较大的值。

当  $h_0$ 、 $h_b$  确定之后，就可确定任意位置凸棱高度值  $h_a$  和高度加工横进刀量  $T_x$ ，分别如下：

$$T_x = \frac{h_0 - h_b}{a_b - a_0} \times 360^\circ \quad (4-6)$$

式中： $a_0$ ——成形終了凸棱标注的角度。

$$h_a = h_b + \frac{T_x}{360^\circ} (a_b - a) \quad (4-7)$$

$h_{720}$  的计算：

$$T_x = \frac{1.968 - 0.649}{720 - 360} \times 360 = 1.319 \text{ mm}$$

$$h_{720} = 0.649 + \frac{1.319}{360} \times (720 - 720) = 0.649 \text{ mm}$$

其它凸棱高度同理可推。

### 3. 精整区凸棱宽度 $a_0$

精整区凸棱宽度应满足强度的要求，同时应有利于第二原则。这两个要求都希望  $a_0$  取较大值。根据公式：

$$S_0 = l + a_0 \quad (4-8)$$

式中： $l$ ——轧件热膨胀后的长度。

可知， $a_0$  为 3.38mm，考虑出料槽的尺寸，最后确定  $a_0 = 1.88 \text{ mm}$ 。

### 4. 棒料直径 $f_0$

棒料直径的选择取决于轧件结构及成形方案。本课题中回转体零件，棒料直径等于冷却后轧件最大直径，即  $f_0 = d_{\max}$ 。故选取棒料直径为 5mm。

#### 4.2.4. 成形区孔型设计计算

孔型封闭之前回转体成形，凸棱高度由 0.649mm 升高到 1.968mm，连接颈被逐渐轧细，回转体不断地从连接颈获得补充金属而逐渐成形。参看图 4.4 可建立下列等式

$$V_{aa} = V_{a0} + V_{ca} \quad (4-9)$$

又

$$V_{ca} = V_{c0} - V_{cx}$$

$$V_{aa} = \frac{pd_a^2}{4} a_a$$

将以上二式代入式 (4-9) 整理得

$$a_a = \frac{V_{a0} + (V_{c0} - V_{cx})}{\frac{pd_a^2}{4}} \quad (4-10)$$

式中： $V_{c_0}$ ——成形终了回转体体积；

$V_{cx}$ ——任意位置回转体体积；

$V_{ca}$ ——任意位置至成形终了回转体所要补充的体积。

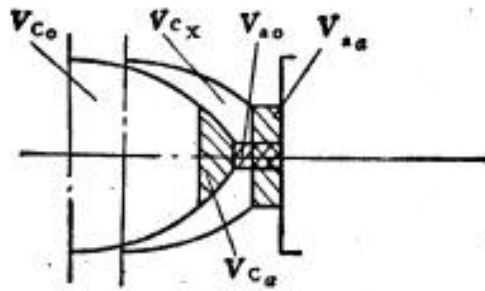


图 4.4 回转体连接颈金属平衡图

回转体体积计算，参看图 4.5 可建立下列积分式

$$V_{cx} = \int_0^{c_0} \pi y^2 dx$$

又 
$$y = \sqrt{R^2 - x^2} - (R - r)$$

将上式代入积分式积分，得回转体锥台体积一般公式

$$V_{cx} = \pi \left\{ [(R - r^2) + R^2]x - \frac{x^3}{3} - (R - r) \left( x\sqrt{R^2 - x^2} + R^2 \sin^{-1} \frac{x}{R} \right) \right\} \quad (4-11)$$

式中： $R$ ——回转体的圆弧半径，mm；

$r$ ——回转体大底半径，mm；

$C_0$ ——积分限，成形终了时回转体圆弧水平投影长度，mm；

$x$ ——任意位置已成形部分回转体圆弧水平投影长度， $x = \sqrt{h_a(2R - h_a)}$ 。

公式 (4-11) 为任意位置回转体体积公式。当  $x = c_0$  时，即得成形终了回转体体积  $V_{c_0}$ 。

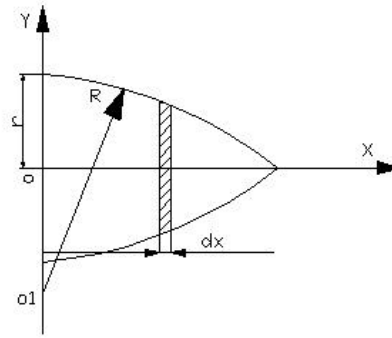


图 4.5 回转体体积分图

回转体零件孔型结构简单，与轴承滚子孔型相似，只有一条变导程的螺旋面。其导程计算公式可借鉴钢球及轴承滚子的相关公式。

螺旋导程变化是凸棱宽度发生变化引起的，当凸棱由高度  $h_0$  变为  $h_a$  时，按照体积不变原则，相应的凸棱宽度也由  $a_0$  变为  $a_a$ ，可知，切削量  $s_a = a_a - a_0$ 。精整区时，凸棱高度不变，宽度不变，其导程  $S_0$  为不变的基本导程。当导程  $S$  随凸棱高度变化时，可按下式计算求得：

$$S = S_0 - \frac{360^\circ}{\Delta a} S_a \quad (4-12)$$

以上运用第二原则，可导出弧形回转体零件孔型任意位置凸棱宽度的计算公式。在孔型封闭之前回转体成形，不再进行总体积计算。在成形终了时， $d_0$  继续被轧细的情况下，凸棱宽度基本上不变，连接颈金属除部分补充回转体头部之外，尚有多余金属。对此，在凸棱顶侧开弧形储料槽。储料槽半径  $r_0$  可由下列近似公式求得。

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3}{8} d_0^2 a_0} \quad (4-13)$$

由前面计算可知： $d_0 = 0.864 \text{ mm}$ ， $a_0 = 3.38 \text{ mm}$ 。

代入得  $r_0 = 0.81 \text{ mm}$

根据实际加工条件及孔型的综合设计，最后选取  $r_0 = 1.5 \text{ mm}$ 。

### 4.3 参数计算结果及分析

根据轧辊的理论计算、轧件的尺寸分析及轧机的空间尺寸，设定轧辊孔型基本参数如下：

表 4.1 轧辊孔型基本参数

孔型基本参数	数据
螺旋孔型总长度 $a_b$	720°
轧辊直径 $D$	70mm
轧辊长度 $L$	70mm
凸棱起始高度 $h_b$	0.649mm
成形终了凸棱高度 $h_0$	1.968mm
成形终了连接颈直径 $d_0$	0.864mm
精整区凸棱宽度 $a_0$	1.88mm

按照理论公式计算，参数计算结果见表 4.2。

表 4.2 主要参数计算结果

角度 $\alpha$ (°)	凸棱高度 $h_a$ (mm)	凸棱宽度 $a_a$ (mm)	导程 $S$ (mm)
720	0.649	0.15	11.26
630	0.979	0.51	10.70
540	1.309	1.01	10.66
450	1.638	1.52	11.26
360	1.968	1.88	12.70
270	1.968	1.88	12.70
180	1.968	1.88	12.70
90	1.968	1.88	12.70
0	1.968	1.88	12.70

轧辊孔型设计时，不仅要考虑其理论设计，也要考虑它的加工工艺。设计时

既要考虑到加工的方便和所能达到的精度,又要注意加工时必须满足设计的要求。由于加工条件有限,必须根据实际条件及理论依据进行孔型参数的调整。在轧件开始咬入时,由于计算结果 $h_{720}$ 和 $a_{720}$ 数值较小,不利于加工控制,因此对其进行修正,建议取 $h_{720} = 0 \text{ mm}$ ,  $a_{720} = 0 \text{ mm}$ 。成形区凸棱高度变化采取均匀变高的方法,同时凸棱宽度也为均匀变化,成形区导程不变,根据实际加工条件,孔型参数修改结果见表 4.3。

表 4.3 修正后的孔型参数

角度 $\alpha$ ( $^{\circ}$ )	凸棱高度 $h_a$ (mm)	凸棱宽度 $a_a$ (mm)	导程 $S$ (mm)
720	0	0	9.32
630	0.605	0.47	9.32
540	1.21	0.94	9.32
450	1.815	1.41	9.32
360	2.42	1.88	12.7
270	2.42	1.88	12.7
180	2.42	1.88	12.7
90	2.42	1.88	12.7
0	2.42	1.88	12.7

凸棱高度变化图见图 4.6。

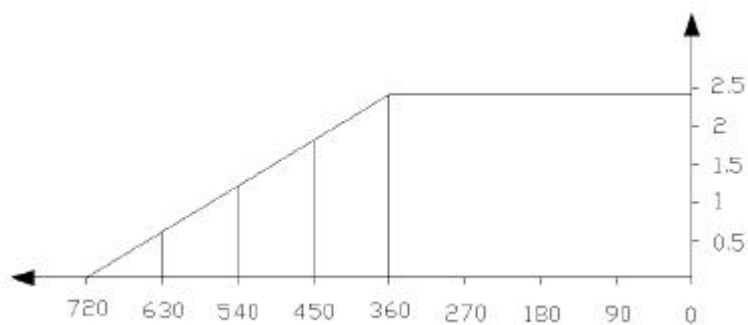


图 4.6 凸棱高度变化图



孔型展开图见图 4.7。

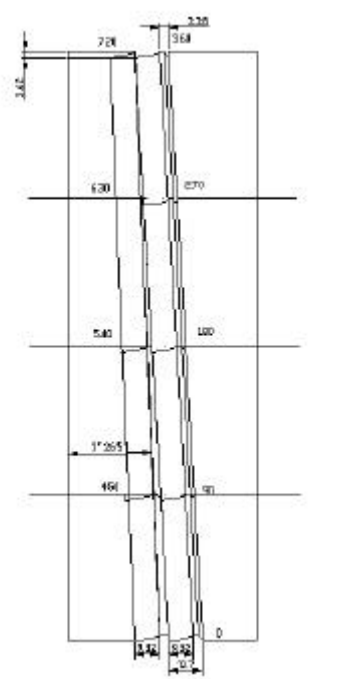


图 4.7 轧辊孔型展开图

轧辊实物图见图 4.8。



图 4.8 轧辊实物图

#### 4.4 小结

本章结合零件的尺寸要求及斜轧工艺的特点，参考相关零件轧辊孔型设计，选定了轧辊孔型的基本参数，并根据实际加工条件进行了参数的优化，完成了斜轧回转体零件的轧辊孔型设计，为斜轧成形过程数值模拟的几何建模提供了理论依据。

## 第 5 章 回转体成形过程的数值模拟

### 5.1 几何模型的建立

根据上一章轧辊孔型参数的设定，在 Proe/E 环境下，利用基于特征零件实体建模方法对轧制的各个组成零件进行实体建模。利用草绘特征中的旋转功能，用一个二维草绘围绕该平面内的一个轴旋转形成轧辊圆柱基体，利用螺旋特征中的伸出项功能，在圆柱体上按照孔型设计参数切削螺旋面。由于轧辊的凸棱是有高度变化的，所以还需再次利用螺旋切削功能修改凸棱结构，最后建立轧辊三维模型，如图 5.1 所示。

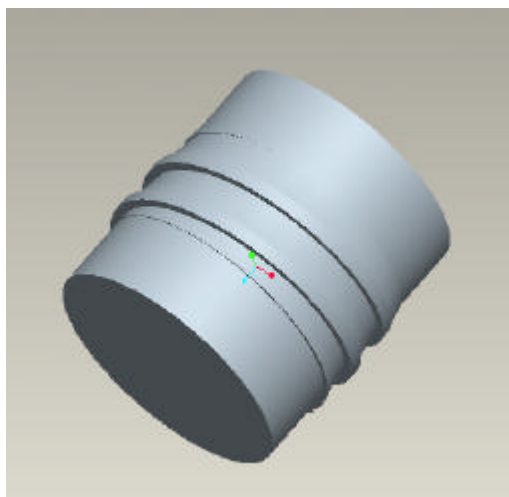


图 5.1 轧辊实体模型

### 5.2 有限元模型的建立及参数的设定

斜轧运动原理是轧辊轴线与轧件轴线交叉一个不大的角度，轧辊旋转方向相同，轧件在两个轧辊交叉中心线上作旋转前进运动。模拟参数参照表 5.1。

图 5.1 DEFORM-3D 有限元模拟参数

坯料直径	坯料长度	坯料温度	轧辊直径	轧辊转速	轧辊中心距
5 mm	70 mm	850	70 mm	80 r/min	70 mm

考虑到轧件的定位，采用导板和导料板定位，将 Proe/E 中建立的轧辊、轧件等有限元三维几何模型以 STL 格式保存，然后导入 DEFORM-3D 软件中，按照

模型的几何参数关系设置轧辊、轧件、导板、导料板的相互位置，如图 5.2 所示。

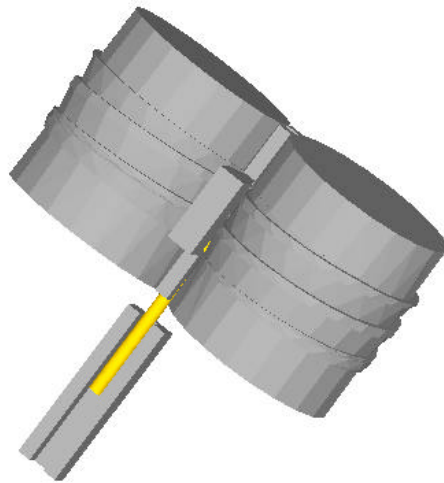


图 5.2 斜轧回转体模型示意图

由于回转体零件在成形过程中，弹性变形很小，可以忽略，因此本文中对轧件成形过程采用“刚 - （粘）塑”塑性本构关系有限元模型。由于轧辊、轧件、导板、导料板刚度较大，所以均可采用刚体单元。为了缩短计算时间和确保计算结果的精确度，轧件采用相对网格划分方式，成形区网格单元尺寸为 0.6mm，非成形区网格单元尺寸为 1.2mm。回转体零件的实际轧制在 850 温度下进行，由于轧件较小，轧制速度相对很快，为了简化有限元模型，在模拟时采用 850 恒温轧制。

### 5.3 模拟结果分析

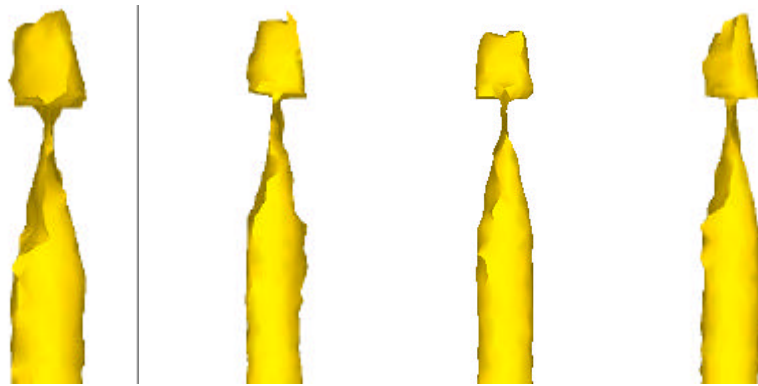
由第二章斜轧运动原理及轧件旋转条件我们可知，轧件在成形过程中的旋转受轧辊倾角及轧件之间的摩擦系数影响巨大，为了找出合理的轧件成形条件，对这两个影响因素设定不同参数，就轧件成形状况进行分析。

#### 5.3.1 轧辊倾角对轧件成形过程的影响

倾角的调整在轧件成形中十分重要，轧件之所以能被咬入是因为轧辊锥部对金属产生一个压下轴向分力，也产生旋转分力，这样才能推动轧件前进和使轧件旋转。轧辊倾角调整正确，轧制出来的产品表面十分光滑，轧辊倾角调整不当，则会造成轧件的前端面或后端面被孔型凸棱所切，产品的端面不光滑，出现麻痕。有时产品端面被凸棱切下的金属屑，在轧件继续变形的过程中，又被轧辊孔型压在产品表面上，造成产品上有贴疤。

### (1) 轧件成形质量分析

通过斜轧运动原理的分析我们知道，轧件能够向前运动，一方面是由于轧辊圆周速度在水平方向上的分速度带动轧件的结果；另一方面是轧辊旋转时，螺旋孔型推动轧件的结果。只有在两个推动力均衡的条件下，轧件才能平稳的向前运动。这就需要我们调节轧辊的倾角来满足这个要求。按照轧辊倾角的理论计算，倾角的范围应该在  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$  之间。为了考察轧辊倾角对轧件成形过程的影响，分别选用倾角为  $2^{\circ}$ 、 $3^{\circ}$ 、 $4^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$  的轧辊对轧件进行成形模拟，模拟成形结果对比如图 5.3 所示。



(a) 倾角为  $2^{\circ}$  (b) 倾角为  $3^{\circ}$  (c) 倾角为  $4^{\circ}$  (d) 倾角为  $5^{\circ}$

图 5.3 轧件成形图

从图 5.3 可以看出，轧辊倾角过大或过小，轧件的成形质量都不好，当轧辊倾角为  $2^{\circ}$  时，轧件基本成形，但轧件表面起皮非常严重，轧件的旋转条件不好，轧件被拉着向前运动。当倾角为  $5^{\circ}$  时，轧件前端充不满，被轧辊切削并拉拽前进。造成上述的现象的原因，就是倾角  $a$  大于或小于孔型螺旋升角  $b$ 。当轧辊倾角调得过大时，轧件的前端面顶着轧件孔型凸棱前进，这时前端面被凸棱所切。当轧辊倾角调得过小时，轧件的后端面被轧辊孔型凸棱推着前进，这时后端面被凸棱所切。在倾角为  $3^{\circ}$  轧制时，轧件前端表面有少量起皮现象，基本能够平稳轧制前进。

### (2) 轧件等效应力应变分析

斜轧轧件塑性变形是在旋转过程中成形的，轧件受到一个切向分力的作用，在这个力的作用下，金属纤维将沿切向流动。轧辊倾角的不同，直接影响轧件与轧辊的接触面积，对轧件的金属流动造成很大的影响。下面分别在轧件成形的起

始阶段、中期阶段、终了阶段对不同倾角下的轧件等效应力、应变进行分析对比。

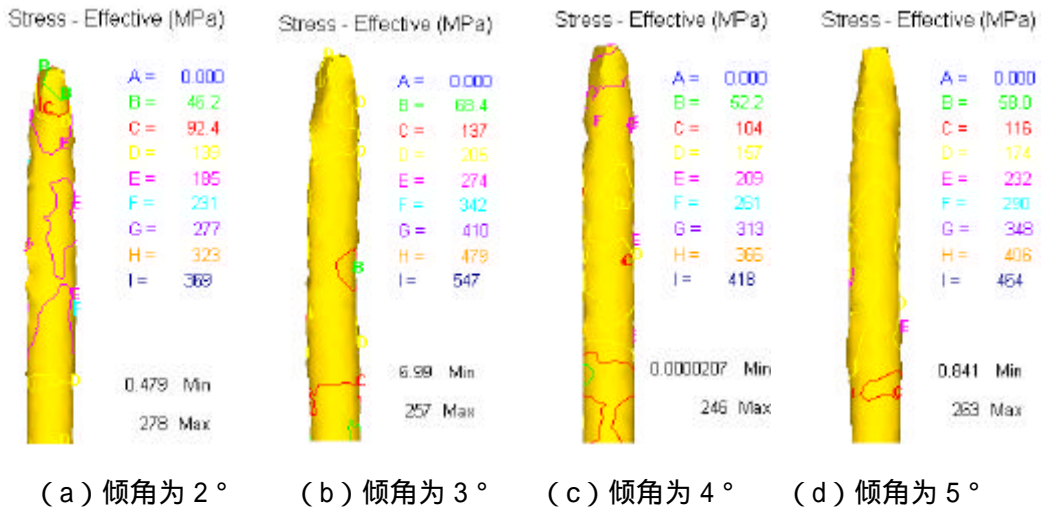


图 5.4 轧制初期轧件等效应力线图

从图 5.4 可以看出，在轧制初期，等效应力随着倾角的逐渐增大而变小，产生这种现象的原因是因为，当倾角为  $2^\circ$  时，轧件与轧辊凸棱接触面积相对其它倾角时大，这使得应力主要集中在轧件与轧辊凸棱接触点上。当轧辊倾角为  $3^\circ$  时，轧件与轧辊凸棱的接触面积相对减小，使得等效应力较为均匀，且轧件与导料板之间配合较好，没有产生过大的切向分应力。当倾角为  $4^\circ$  时，轧件与轧辊凸棱间等效应力分布较均匀，但是坯料与导料板之间产生的切向分应力区域面积较大。倾角为  $5^\circ$  时，坯料尾部的等效应力较大。由此可知，在轧制初期，倾角过大，坯料尾部容易产生摆动，使得导料板会承受一定切向分应力，从而影响轧件的成形。

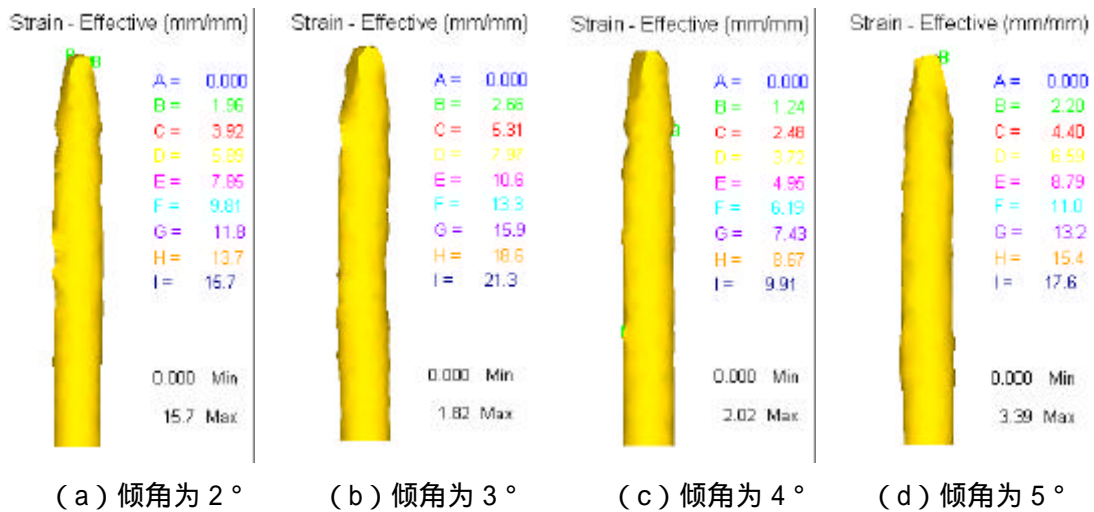


图 5.5 轧制初期轧件等效应变线图

图 5.5 为轧制初期的等效应变线图。由图可知，倾角为  $2^\circ$  时，由于轧件与轧辊凸棱接触面积相对较大，使得轧件前端区域产生较大变形，变形较快较早导致整个轧件变形不均匀。在倾角为  $3^\circ$  时，等效应变较小，轧件基本没有发生过大的变形现象；倾角为  $4^\circ$  时，轧件的尾端有一定的变形；倾角为  $5^\circ$  时，由于坯料尾端有切向应力，使得整个坯料有一定的摆动，导致轧件前端有一定的不均匀形变。

由此可知，在轧制实验过程中要采用适当的倾角，倾角过大或过小都会影响轧件初期的成形质量。

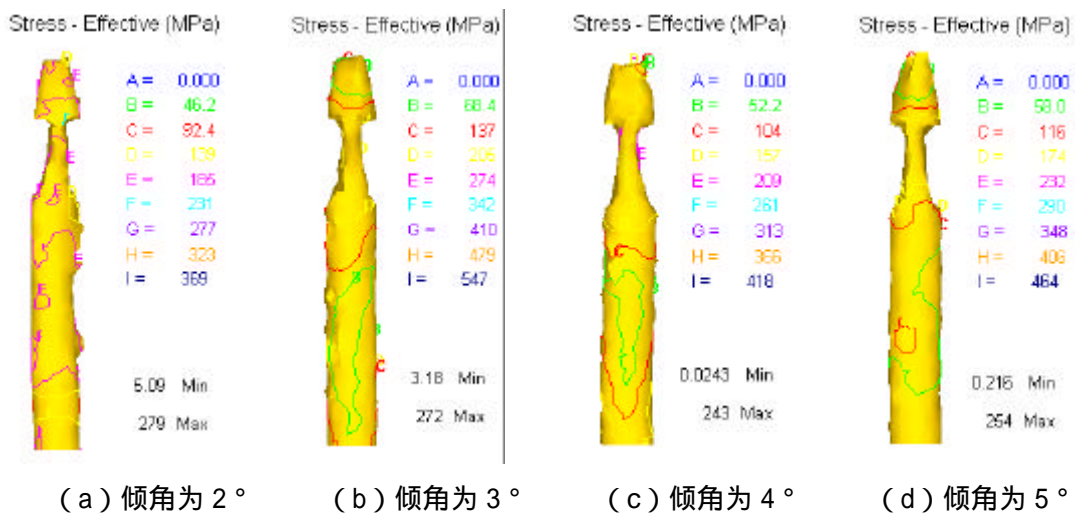


图 5.6 轧制中期轧件等效应力线图

图 5.6 为轧制中期的等效应力图，在轧辊倾角为  $2^\circ$  时，轧件整体受到的应力较大，轧件切断区末端等效应力最大，因此，此处很容易在轧制过程中发生过早的切断。在轧辊倾角为  $3^\circ$  时，等效应力主要分布在轧件尾部，轧件整体受力较为均匀；在轧辊倾角为  $4^\circ$  时，在轧件头部区域发现了不规则的应力点，因为倾角过大，导致轧件成形时，前端受力不均匀，容易在轧件成形过程中发生头部缺陷。在轧辊倾角为  $5^\circ$  时，轧件整体受力比较均匀，但受力较小，因为倾角过大，使得轧件与轧辊凸棱接触点较少，容易发生成形终了时轧件尾端切不断的现象。

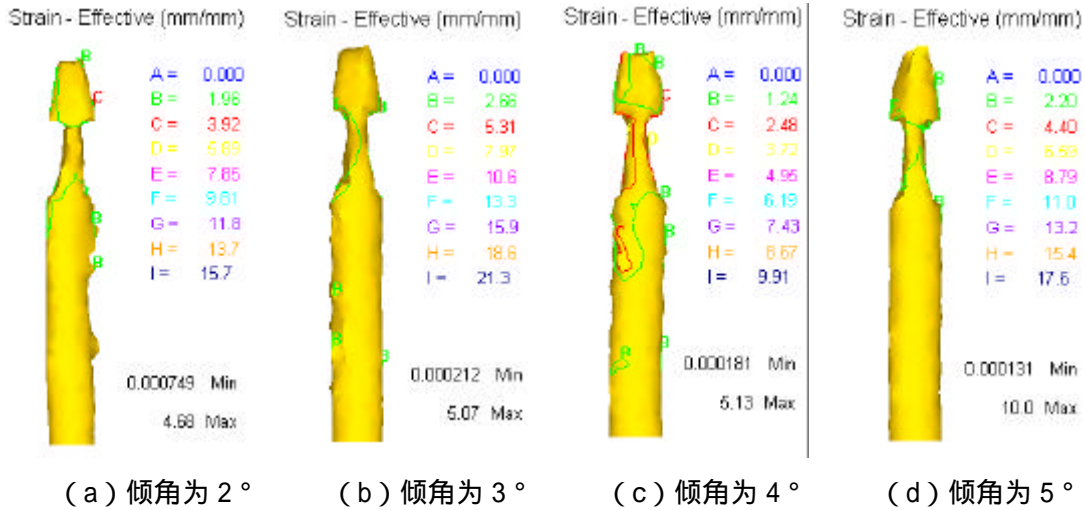


图 5.7 轧制中期轧件等效应变线图

图 5.7 为轧制中期的等效应变线图，倾角为  $2^\circ$  时，轧件整体变形较其他倾角大些，整体尺寸明显变小；倾角为  $3^\circ$  时，头部基本成形，变形区域主要集中在切断区尾部，轧件整体变形较为均匀。倾角为  $4^\circ$  时，轧件头部区域有一定的不均匀变形，切断区尾部成形较小，使得金属流动产生了一定的堆积；在轧辊倾角为  $5^\circ$  时，轧件前端变形剧烈，导致该区域产生了一定的弯曲。

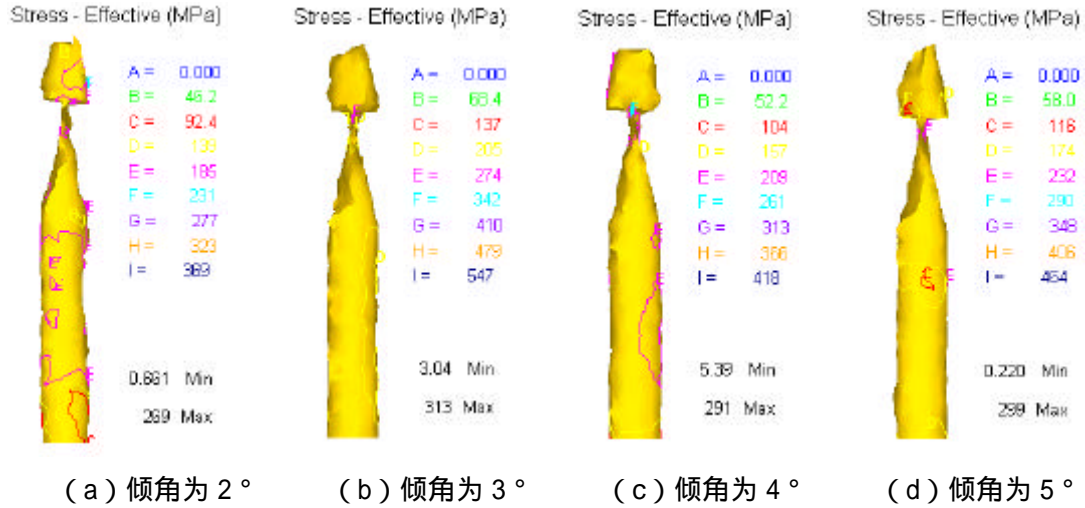


图 5.8 轧制末期轧件等效应力线图

图 5.8 为轧制末期轧件切断前的等效应力线图。在倾角为  $2^\circ$  时，轧件中还有着大量未消除的等效应力，导致轧件过快变形从而破坏轧件成形的质量。倾角为  $3^\circ$  时，应力主要产生在切断区尾部，且应力值相对较大，从而有利于轧件的切断。倾角为  $4^\circ$  时，轧件前端仍然存在着一一定的等效应力。倾角为  $5^\circ$  时，坯料表面应力分布不均匀，从而影响轧件连续变形。

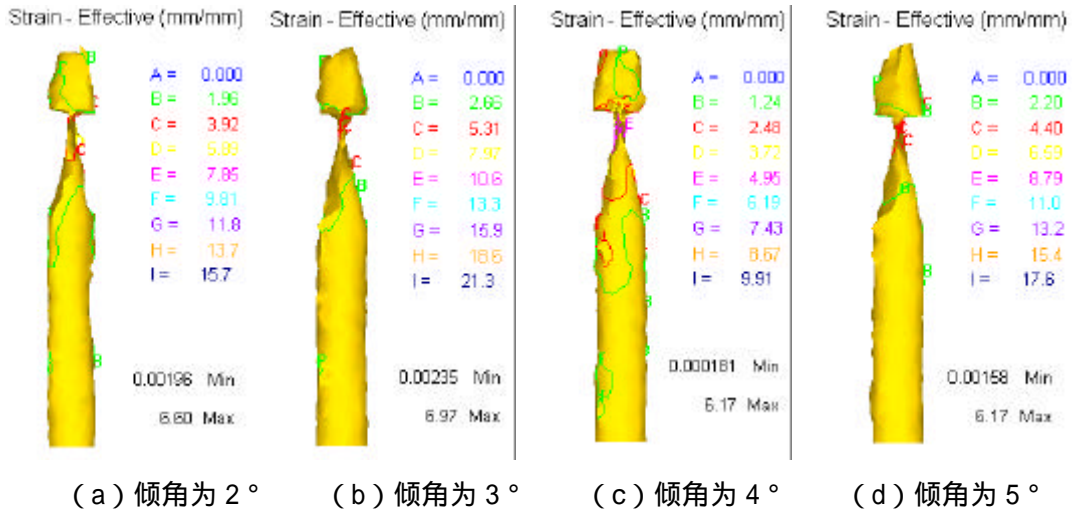


图 5.9 轧制末期轧件等效应变线图

图 5.9 为轧制末期轧件切断前的等效应变线图。轧辊倾角为  $2^\circ$  时，有较大的变形量产生在切断区尾部下方较小一块区域；倾角为  $3^\circ$  时，变形量主要集中在轧件切断区尾部，整体变形较好；倾角为  $4^\circ$  时，轧件整体仍有变形，金属流动不是很好，集中在切断区尾部的变形量较少；倾角为  $5^\circ$  时，头部区域有一定的弯曲变形，轧件整体金属流动不是很好，变形不均匀。

通过以上分析可知，轧辊倾角为  $3^\circ$  时，对轧件成形最为有利，轧件成形质量最好，成形过程中不易产生金属堆积，不会出现过早切断或切不断的现象。

### 5.3.2 摩擦系数对轧件成形过程的影响

影响轧件成形工艺的因素有很多，其中轧辊与轧件之间的摩擦系数是比较重要的参数。选取轧辊倾角为  $3^\circ$  摩擦系数对比如图 5.10。

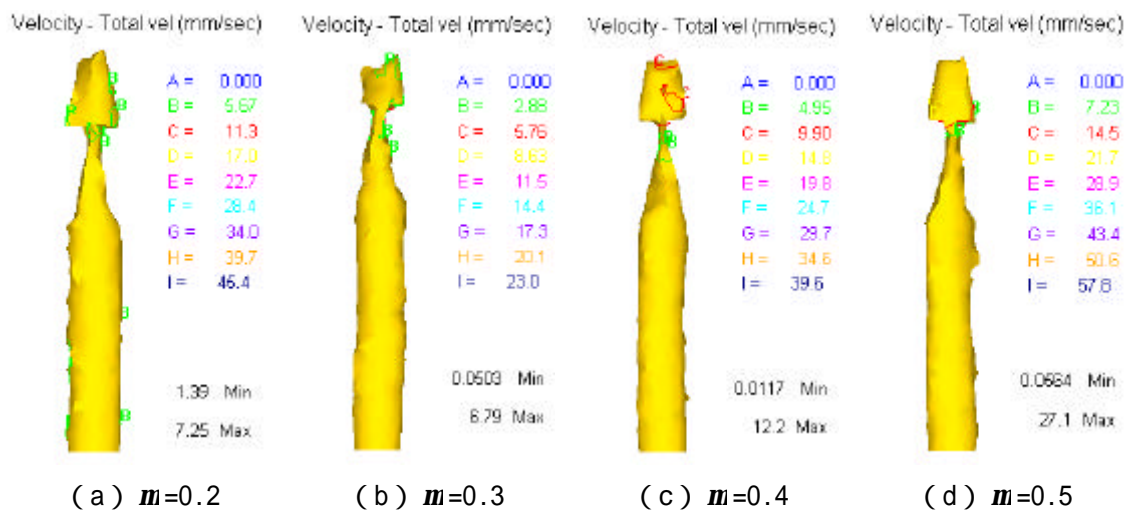


图 5.10 轧件在不同摩擦系数下轧件的速率分析



由图 5.10 可以看出, 摩擦系数为 0.2 时, 最大转速是 6.79mm/s, 轧制成形过程中容易造成坯料不旋转, 使得轧件变形较小; 摩擦系数为 0.3 时, 最大转速为 7.25mm/s, 从变形图可以看出, 轧件前端变形较好, 但是轧件切断区尾部有金属堆积, 底部成形不明显; 当摩擦系数为 0.4 时, 最大转速是 12.2mm/s, 轧件整体变形较好, 但是仍存在着不均匀的转速点, 从而影响金属流动; 当摩擦系数为 0.5 时, 最大转速为 27.1mm/s, 坯料整体成形较好, 转速也较为均匀, 但是轧制实验中很难设定如此大的摩擦系数。

由此可知, 随着摩擦系数的增大, 轧件的旋转速率越大, 轧件的旋转条件越好。但考虑到轧制实际条件, 摩擦系数为 0.4 时为最佳参数。

#### 5.4 小结

利用 DEFORM—3D 软件对轧件成形过程进行有限元模拟。通过不同轧辊倾角、不同摩擦系数条件下轧件的成形状况, 分析、总结出针对此轧件的成形过程受轧辊倾角及轧件与轧辊间摩擦系数的影响规律, 为轧件成形实验参数的优化设计提供了理论依据。

## 第 6 章 轧制实验

### 6.1 实验设备

轧制实验采用本课题设计研发的 SG70 螺旋孔型斜温轧机。轧机实物如图 6.1 所示。

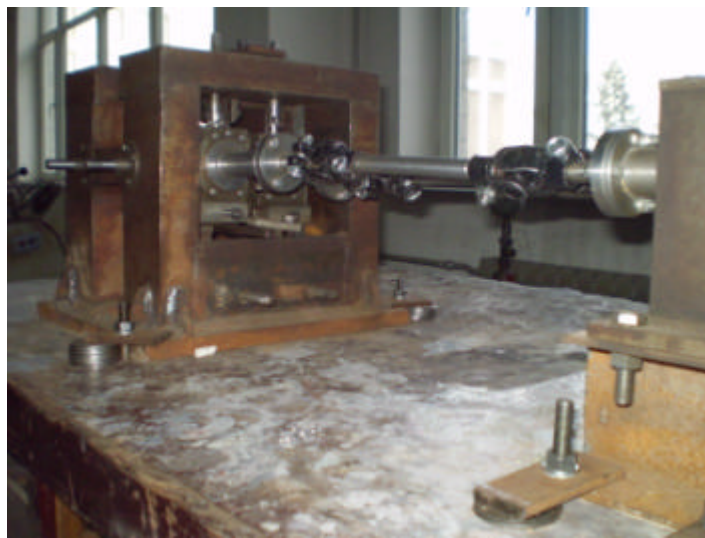


图 6.1 SG70 螺旋孔型斜温轧机

### 6.2 实验材料

实验中所用棒料的材质为铅，棒料直径  $f5\text{ mm}$ ，长度  $L\ 15\text{ mm}$ 。

### 6.3 轧机的调整

轧机的调整是斜轧成形的关键问题之一，它直接影响产品的形状、尺寸及质量，是进行轧制实验或实际生产的必要步骤。轧机调整的实质就是使轧辊和导板处于正确的位置，以便轧件顺利地实现塑性变形，轧出合格的产品。调整内容主要包括：轧辊的径向调节、相位调节、倾角调节、轴向调节、导板相对位置的调节及喇叭口调节。

#### 6.3.1 轧辊的径向调整

轧辊的径向调整是斜轧机最基本的调整之一。在轧制多品种零件，检修、装

卸导板时或轧制过程中出现轧制故障时，我们都需要对轧辊进行径向调节。轧辊的径向调节比较简单，首先，根据孔型设计的要求，通过螺栓压下机构，使轧辊移动，达到合理的辊缝尺寸，然后用卡钳检验，或直接用坯料检验。

当轧辊径向尺寸调节过紧时，轧件无法旋转或根本无法进入两辊之间的缝隙。当轧辊径向尺寸调节过松时，就会出现轧辊孔型入口的平直段夹不住棒料，只有凸棱接触轧件的现象。所以，在进行轧辊径向调整时，应力求轧件与轧辊孔型底部接触。

### 6.3.2 轧辊的相位调整

轧辊相位的调整主要用于双型腔的斜轧上。所谓相位对正，是指两个轧辊作用于轧件的型腔圆周方向上的角度一致。在斜轧中，保证相位对正的方法是：在加工轧辊与安装轧辊时应严格要求，保证安装相位准确。

### 6.3.3 轧辊的倾角调整

轧辊倾角的调整，是斜轧中十分重要的调整。因为轧辊倾角调整，对产品质量、设备负荷、轧辊的使用寿命等方面都有很大的影响。

轧辊倾角调整的内容主要有两方面：一方面是确定轧辊倾角的方向，另一方面是确定轧辊倾角大小。轧辊倾角的方向，就是轧辊轴线的倾斜方向。它与轧辊螺旋孔型左右旋有关。若轧辊孔型为右旋时，从轧辊入口端看，右轧辊入口端应向上，左轧辊入口端应向下。如果轧辊螺旋孔型为左旋时，则与右旋孔型的轧辊倾角方向相反。倾角的大小可以根据斜轧倾角的理论计算来确定。

### 6.3.4 轧辊的轴向调整

轧辊轴向调整也是基本调整之一。它的基本要求是两个轧辊型腔凸棱轴向要对正。目前在生产中检验孔型轴向位错的方法，一般多用于卡钳测量孔型的两个对角线，以此来判断轧辊轴向是否位错。

### 6.3.5 导板的调整

导板是斜轧成型工艺的重要工艺之一。它与轧辊孔型一起构成轧件变形的空间。导板的设计、制造、调整对产品的成型起着重要的作用。

导板的调整主要是上导板与下导板之间位置的确定，导板与轧机中心线相互位置的确定，导板与轧辊孔型之间的相互位置的确定。总之，通过导板上下、左

右位置的变动，可以使轧件处于合理的塑性变形状态。

当两个轧辊按逆时针方向旋转时，轧件则按顺时针方向旋转。轧制过程中，若出现上导板刮轧件现象，必然是上导板的左下角造成的；若出现下导板刮轧件现象，必然是下导板的右上角造成的。若轧辊旋转方向为顺时针，出现导板刮轧件现象恰好与上述情况相反。

### 6.3.6 轧辊的喇叭口调整

在斜轧中，当出现金属充不满孔型时，可以通过调成正喇叭口解决。相反，当孔型金属过满时，又可通过调成反喇叭口解决，但调整量是有限的。轧辊入口处的轧辊中心距大于轧辊出口处的轧辊中心距称为正喇叭口，反之称为反喇叭口。

轧辊喇叭口的调整是有条件的。有些轧辊孔型在入口处有一段较长平直段，若调成反喇叭口，则金属被轧辊夹得过紧，多余金属不易后滑，这样不但没有减少孔型封闭金属的体积，反而会增加封闭金属的体积，为此应根据具体情况运用喇叭口的调整。

## 6.4 轧制实验及分析

### 6.4.1 轧制实验

SG70 螺旋孔型斜温轧机为首次设计研发轧制小回转体零件的斜轧机。由于该轧辊孔型设计为首次设计，仍有很多参数需要修正，所以给轧制过程带来了一定的困难。

首次轧制时，轧辊倾角调定为  $3^\circ$ ，上下导板间距为 10mm，棒料直径为 5mm，长度为 15mm。轧制结果如图 6.2 所示。



图 6.2 被轧扁的轧件

如上图所示，轧件表面有明显的切削痕迹，轧制过程中轧件在轧辊间不旋转、被轧扁、拉着向前运动，导板侧壁出现刮擦现象。为解决此问题，对上下导板机构进行修磨，主要是修整导板刃口部分的厚度，使轧辊与导板的间隙缩短，调整上下导板的间距，提高下导板的高度，使轧制线升高 1mm，并调节轧辊倾角，将倾角角度限定为  $2.5^\circ$ 。调整后，轧件成形状况如图 6.3 所示。



图 6.3 没有被轧断的轧件

由上图可知，经过轧机调整后，轧件旋转前进，但坯料没有被轧断。所以对上下导板做进一步的修磨，减小导板侧面厚度，避免与凸棱刮擦，进一步缩短上下导板间距，使轧件处于一个较为封闭的空间，调整轧辊径向间距，使两辊精整区凸棱基本相切，调整后，轧件成形状况如图 6.4 所示。



图 6.4 过早被切断的轧件

通过对实验过程的分析发现，轧件已经平直的向前做旋转运动，但轧件被切断过早，并且切断后不再旋转前进。轧件无法顺利成形的最大原因是导板机构的

设计无法满足轧件成形的需求，所以重新设计了导板机构，以此来限定轧制中心线的位置，上下导板距离设定为 5mm，机构通过轧辊凸棱的带动，随着轧件一起向前运动。重新设计后的导板机构实物图如图 6.5 所示。



图 6.5 修改后的导板机构

导板修改后轧件成形状况得到明显的改善，但是轧件成形质量不好，表面局部有明显的切削痕迹，导致轧件前端被轧过细，成形不完全。轧件成形状况如图 6.6 所示。



图 6.6 有缺陷的轧件

针对轧件成形不完全问题进行分析，发现主要是由于轧辊设计时成形区长度偏短，导致凸棱高度变化太快而造成的。而且由于加工条件的限制，轧辊精整区尾部退刀处余料没有完全清除，轧件运动到此处仍被轧辊退刀处余料轧制，破坏轧件成形尺寸。所以，修磨孔型，将轧辊的成型区长度延长，精整区长度缩短，对轧辊后端（轧件成形出口处）进行修磨，消除加工余料。经过调整后，最终轧

制出比较理想的轧件，如图 6.7 所示。



图 6.7 斜轧成形件

#### 6.4.2 实验分析

在本次实验中，存在的问题主要有以下两点：

- 1、轧件在轧辊间不旋转，被拉着向前运动。
- 2、轧制结束后轧件仍带有连皮或者轧件过早被切断并不再旋转向前运动。

问题分析及解决方案：

(1) 轧件不旋转，被拉着向前运动，一方面是由于入口处轧辊间距调整偏小、上下导板间距也调整偏小。坯料被勉强咬入，其垂直方向的横向变形特别激烈，坯料径向变成椭圆形趋势特别强烈，变椭圆部分的坯料不容易旋转，被轧辊轧扁拉着前进。另一方面是由于下导板型面半径选择偏小、导板两边侧棱太尖锐，或下导板磨损太厉害，使其形状和型面尺寸失去了对金属的正确控制作用。除此之外，实际轧制位置低于轧辊中心线位置过大，而导板工作面又过窄也是一个重要影响因素。当轧制线低于轧机中心线时，两个轧辊作用于轧件上的正压力及摩擦力会向下相应地旋转一个角度，结果轧件受到一个向下的力的作用，由于导板工作面过窄，无法实现封闭空间，轧件就会顺着导板侧面向下运动，被轧辊切削，不再向前旋转运动。如上问题可以通过调整喇叭口及轧辊径向位置，修磨导板，调整上下导板间距提高轧制中心线的位置的方法，使轧制线略低于轧机中心线位置，减小轧件受到的向下作用力的方法得以初步的解决。最终重新设计了一个新的导板机构，彻底的解决了轧制线定位的问题，而且满足轧件在轧制过程中处于一个封闭的空间，使其得以很好的成形。

(2) 轧制结束后轧件仍带有连皮，其主要原因是轧辊径向间距过大，两辊精整区凸棱无法相切，从而导致轧件无法被切断。实验中，两辊凸棱无法相切的主要原因是导板厚度偏大，阻碍轧辊径向移动，发现其结构设计无法满足轧辊孔型的轧制，最终通过重新设计导板结构给予解决。轧件过早被切断不再旋转向前运动，一方面是由于轧辊的喇叭口调整不当，入口端轧辊间距太小，导致轧件过早被切断。另一方面是由于轧辊成型区设计太短，凸棱高度增加太快，轧件过早被凸棱切断，表面容易被凸棱切削破坏，被切断后进入精整区孔型型腔，由于上下导板间距过大，无法形成封闭空间，导致轧件与轧辊间摩擦力不够，使得轧件无法继续旋转。通过增长轧辊成形区长度，减缓轧件受到的压下量，修改导板机构，使问题得到了很好的解决。

## 6.5 小结

在 SG70 螺旋孔型斜温轧机上进行了回转体零件的试验研究，通过对轧制过程中轧件出现的成形缺陷等问题的分析，提出了轧机的调整方案，并对轧机的部分结构进行了修正，最终轧制出符合企业要求的产品零件，为今后斜轧回转体零件提供了实验基础。



## 结 论

本文根据企业对回转体零件的加工需求，依据相关斜轧机设计理念，对微型螺旋孔型斜温轧机进行研发，设计并制造出了微型螺旋孔型斜温轧机和较为合理的轧辊孔型，利用 DEFORM—3D 有限元软件对轧件的成形过程进行数值模拟，并通过认真的现场调试，利用物理模拟方法轧制出符合企业尺寸要求的轧件。概括起来，论文主要的研究成果如下：

- 1、根据产品的特殊要求，设计了微型螺旋孔型斜温轧机主机。
- 2、完成了轧机传动系统的设计，包括电机、减速器的选取及同步机构的设计。
- 3、在孔型设计上，给出了较为合理的孔型设计参数，设计出符合轧制需求的轧辊孔型。
- 4、利用三维造型软件 Proe/E 对轧辊进行建模，并利用 DEFORM—3D 有限元分析软件对轧件的成形过程进行数值模拟，获得了优化的轧辊倾角及轧辊与轧件间摩擦系数的参数。
- 5、通过对回转体零件轧制试验研究，找出轧件产生缺陷的原因，提出了轧机相关调整及部分结构修改方案，并对轧辊孔型设计进行了修正，获得了符合产品尺寸要求的轧件。

由于时间有限及缺乏经验，课题中仍存有一些不足之处，尤其是轧辊的孔型设计，导板机构的设计，还有待于进行更深入的理论研究，而且在该机器的实际制造过程中，还会出现很多实际的问题，这些都需要在以后的学习和工作中进行进一步的改进和完善。

## 参考文献

- [1] 周存龙, 秦建平. 钢管冷斜轧成型研究. 山西机械. 2000. (2): 1-2
- [2] 周存龙, 秦建平. 钢管冷斜轧试验及结果分析. 太原重型机械学院学报. 2000. 21(3): 218-220
- [3] 胡正寰, 许协和, 沙德元. 斜轧与楔横轧原理、工艺及设备. 北京: 冶金工业出版社, 1985
- [4] 胡正寰等. 斜轧与楔横轧在我国的发展和应用. 北京: 锻压技术. 1979. (5): 36-45
- [5] 胡正寰, 王宝雨, 颜世公, 刘晋平. 斜轧铜球技术及其应用. 中国铜加工技术与应用论坛文集. 2007. 33-41
- [6] 曾谊晖. 棒类坯体斜轧精密下料机设计. 机械工程师. 2007. (8): 119-120
- [7] 谢懿主编. 实用锻压技术手册. 北京: 机械工业出版社, 2003. 1179-1184
- [8] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 束学道, 杨翠苹. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真. 北京: 冶金工业出版社, 2004. 12-14
- [9] 王仲仁主编. 特种塑性成形. 北京: 机械工业出版社, 1995. 89
- [10] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册(第二版)机械制造工艺与设备卷. 北京: 机械工业出版社, 1996. 3-188
- [11] 胡正寰. 楔横轧机与斜轧机. 锻压手册第三卷. 北京: 机械工业出版社, 2002. 498-506
- [12] 张猛, 胡亚民. 回转塑性成形工艺及模具. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1994. 108-138
- [13] Kenneth Charles Skinner. Method and apparatus for producing rolled metal balls from bars or rods. United States Patent. 3,878,801
- [14] 张庆生. 螺旋孔型斜轧工艺. 北京: 机械工业出版社, 1958. 2-7
- [15] C. Vaughan. Transverse rolling for the production for finished and semi finished components, IRON AND STEEL, June 1969

- [16] 秦建平,周存龙,於方.双金属复合管冷斜轧工艺的成形过程分析.塑性工程学报.2004.11(1):71-75
- [17] 刘云霞,薛隆泉,董洪智.螺旋孔型斜轧贴皮现象的研究.西北轻工业学院学报.2000.(1):51-54
- [18] 金如崧.探索·发明·发展——纪念曼内斯曼兄弟发明斜轧穿孔工艺120周年.钢管.2004.33(6):51-53
- [19] 金如崧.论斜轧延伸轧管工艺的发展.宝钢技术.2004.(4):59-63
- [20] Dr. Ing. Rolf Kummerling. Comparison of Various Cross-rolling Process for Elongation Stages in the Production of Seamless Tubes. MPT international,1992.50-57
- [21] Pehle. Position and Future Prospects of the Seamless Tube.SMS\_Meer Report, 2002.38-43
- [22] A.N.采里柯夫,B.C.斯米尔诺夫主编.机械制造中的横轧.北京:中国工业出版社,1964
- [23] 栗野泰吉.ボールの转造.日本机械学会志.1959,62(489)
- [24] 栗野泰吉.クロスロール加工.塑性と加工.1969,10(105)
- [25] 张巍,胡正寰.轴类零件轧制技术的应用与发展.机械工人(热加工).2001.(1):5-7
- [26] 颜世公.F7.5mm铝球的冷轧制.北京:锻压技术.1998.(3):42-45
- [27] 史晓敏,王宝雨.双头斜轧钢球的实验研究.机械工程师.2005.(4):81-83
- [28] 梁义维.斜轧 F21.6 铝球及孔型设计和变形规律的研究.北京:北京科技大学机械工程学院硕士学位论文.1998
- [29] 王宝雨.楔横轧模具设计理论及 CAD 研究.北京:北京科技大学博士学位论文.1990
- [30] 董湘怀,黄树槐,李志刚等.塑性加工技术的发展趋势.中国机械工程.2000.11(9):1074-1079
- [31] 高改梨,胡正寰.斜轧钢球孔型设计新方法.钢铁.1998.33(10):44-46
- [32] 刘洪彬,赵俊杰,梁义维,胡正寰.螺旋孔型斜轧钢球的塑性分析.轧钢.2000.17(2):14-16

- [33] Berkovskii. V.S. Computer-aided roll pass design. Grinding in translation.1996.26(2):32-35
- [34] Kouono. H. CAD/CAM system for roll pass design. 19. Int Machine Tool Design a. Res conference Manchester, 1978.22-25
- [35] Nillson, R. Computerized roll pass design of grinding angle. Arch Eisenhiitten wesen.1981.63-65
- [36] K. F. Kenndy. T. Altan. Computer-Aided Analysis of metal flow stress and Roll pass Design in Rod Rolling. Iron and Grinding Engineer. 1983.62(6):144- 148
- [37] B.K 斯米尔诺夫.轧辊孔型设计.冶金工业出版社, 1991.11-13
- [38] 吴迪.微型计算机辅助孔型设计.辽宁:东北大学出版社, 1993.61-65
- [39] 王宝雨, 王少臣, 胡正寰, 周永平.冷斜轧磷铜球温度场的数值模拟.锻压技术.2008.33(4): 47-50
- [40] 李胜祇, 李连诗, 孙中建.二辊斜轧实心圆坯三维有限元分析及中心孔腔形成机制.金属学报.1999.35(12): 1274-1279
- [41] 周朝辉.DEFORM 有限元分析系统软件及其应用.热加工工艺.2003.32(4): 51-52
- [42] 周永平, 王宝雨, 胡正寰.斜轧磷铜球成形过程的数值模拟.北京科技大学学报.2008.30(2): 161-164
- [43] 赵俊杰, 马振海, 胡正寰.斜轧螺纹过程的数值模拟.钢铁研究学报.2002.14(1): 22-25
- [44] 马香峰.确定斜轧辊形曲面的包络法.北京:金属学报.1980.16(3): 318-324
- [45] 翁迅, 程国全, 翁海珊.斜轧辊型曲面的数学模型研究.塑性工程学报.2007.14(6): 16-19
- [46] 董洪智, 林忠钦, 薛隆泉.螺旋孔型斜轧孔型容积的包络法计算.锻压技术.1999.(4): 33-36
- [47] 董洪智, 薛隆泉, 陈关龙, 林忠钦, 张家泓, 甘雨. 30mm 球墨铸铁磨球螺旋孔型斜轧孔型的优化设计.锻压技术.1999.(1): 38-42
- [48] 乔沙林.斜轧球类轧辊的孔型优化设计.金属成形工艺.1996.14(3): 36-38
- [49] 姚南珣, 张辉, 王殿龙.异型螺旋曲面数控加工运动学研究与应用.机械工

程学报.2004.40(6) : 113-117

- [50] 薛隆泉. 铸铁螺旋斜轧的包络法孔型设计. 机械设计. 1998. 15(8) : 24-26
- [51] 周纪华, 管克智. 金属塑性变形阻力. 北京: 机械工业出版社, 1989. 193-200
- [52] 欧贵宝, 朱加铭. 材料力学. 哈尔滨工程大学出版社, 1997. 121-123
- [53] 成大先. 机械设计手册 (减变速器·电机与电器). 北京: 化学工业出版社, 2004. 16-12
- [54] 成大先. 机械设计手册 (机械传动). 北京: 化学工业出版社, 2004. 13-146
- [55] 《钢心斜轧成形》编写组. 钢心斜轧成形. 国防工业出版社, 1982. 22-29

## 攻读硕士学位期间发表的论文和获得的科研成果

- [1] 张雪飞, 邓子玉. 挤压态镁合金 ZK60 高温变形研究. 科技风. 2008.(101): 36

## 致 谢

在本论文完成之际，我由衷地感谢指导老师邓子玉教授两年多来对我的指导，正是在他的精心指导、热情扶植和无微不至的关怀下，我才能顺利的完成本论文的研究工作。邓教授的关注，以及工作中充满快乐的科学研究精神，我有幸耳濡目染，深受感动。论文进展期间，邓老师在选题、研究内容、实验等方面都给予了总体上的把握和具体的指导。在治学、工作和为人处世等方面言传身教，严格要求。导师博大的胸怀，渊博的知识、严谨而朴实的治学态度，勇于创新的精神和与人为善的处世作风始终是学生学习的典范，在此谨向老师表示诚挚的敬意和由衷的感谢！

感谢刘劲松老师的指导，以及商琳琳、竺晓华、万晶晶、檀雯同学的帮助。在论文的审阅、修改期间，得到了各位材料学院老师们提出的宝贵意见和建议，在此表示感谢！

感谢沈阳理工大学材料院所给我提供的良好的学习环境！