

## 摘 要

为满足市场需求，在中型轧机上轧制大规格型材，可以取得良好的经济效益。但同时也带来了一些问题，就是轧机负荷过高。如果设计或调整不当，容易出现事故。一般按经验方法设计的孔型，轧机负荷很难做到均衡。虽然设计者尽量合理分配压下量，也会使各道次的轧制负荷出现不均衡。尤其是在临界状态下轧制就极易出现事故，甚至出现断辊现象。为中型生产提供一套负荷均衡的计算机辅助孔型优化设计软件显得尤为重要。

通过 16Mn 钢的变形阻力试验，得出了变形温度  $t$  在 950~1150℃、变形程度  $\varepsilon$  在 0.2~0.5 和变形速率  $\dot{\varepsilon}$  在 1~20s<sup>-1</sup> 条件下的变形阻力模型：

$$\sigma = 140 \exp \left( - 2.7166 \times \frac{T}{1000} + 3.4609 \right) \times \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{\left( 0.2351 \times \frac{T}{1000} - 0.216 \right)}$$

$$\times \left[ 2.6261 \left( \frac{\varepsilon}{0.4} \right)^{0.7179} - 1.6261 \left( \frac{\varepsilon}{0.4} \right) \right]$$

建立适合中型生产过程温降模型  $\Delta t = \alpha \Delta t_p - k_\phi \Delta t_\phi - \beta \Delta t_d$ 。

根据轧制角钢时的孔型特点，首次采用分割法计算蝶式孔的接触面积，从而为准确计算轧制力提供了依据。首次将动态规划法用于中型孔型优化设计，得到了轧制负荷均衡的孔型尺寸。采用 Visual Basic 6.0 语言编制了“中型轧机轧制 No20 角钢孔型优化设计”软件，取代了传统的靠经验进行轧制规程制定及孔型参数计算，这不仅省时省力，误差小，计算精确，而且通用性和适应性强，为中型生产提供了一套轧制负荷均衡的计算机优化系统。VB 语言与 AutoCAD 的结合极大地增强了软件的绘图功能，可按孔型参数绘制出符合工程图要求的孔型图。

关键词：均衡负荷；优化设计；动态规划法；参数化绘图

## Abstract

Rolling big angle iron through medium section mill may acquire finer economic benefit for satisfying needs of market. At the same time, there are some questions, loads of medium mill are higher than before. If design and adjustment is not the best, accidents are took place easily. Load of mill which is designed according to experienced method in higher, load of mill can't attain balance. Although designers do their best to distribute reduction by any possibility, load of mill every pass appears unbalanced. Rolling especially on the conditions of critical states appear accidents easily, so much as roller breaks off. It is import to provide a computer system about optimal design for balance the rolling load in medium section rolling.

This paper did deformational resistance experiments with 16Mn, made the mathematical calculating model of deformational resistance of 16Mn in the conditions of deformation temperature  $t=950^{\circ}\text{C}-1150^{\circ}\text{C}$ , degree of reduction  $\varepsilon =0.2\sim 0.5$  and deformation rate  $\dot{\varepsilon}=1\sim 20\text{s}^{-1}$ . This model was as follows:

$$\sigma = 140 \exp \left( - 2.7166 \times \frac{T}{1000} + 3.4609 \right) \times \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{\left( 0.2351 \times \frac{T}{1000} - 0.216 \right)}$$

$$\times \left[ 2.6261 \left( \frac{\varepsilon}{0.4} \right)^{0.7179} - 1.6261 \left( \frac{\varepsilon}{0.4} \right) \right]$$

This paper made mathematical calculating model of temperature variation in medium section rolling process. This model was  $\Delta t = \alpha \Delta t_p - k_{\varphi} \Delta t_{\varphi} - \beta \Delta t_d$ .

This paper accorded pass specialty of rolling angle iron, contact area of butterfly style were computed by method of division for the first time, thereby, provided gist for computing the rolling force. The dynamic programming method is used in medium section mill rolling process for the first time in this paper and received size of pass of balance load. Adopting VB, established optimal design software, which was "Optimum Design Roll Passes of Rolling No20 Angle Iron Through Medium Section Mill", aimed at balanced the rolling load in medium section mill rolling process, replacing the experimental design, this not only can save time and manpower, increase data precision and less error, but also has commonality and wide scope of application, which provides a computer system for medium section mill rolling. The perfect combination between VB and AutoCAD

enhanced the drawing function of this software, so that you get a optimal roll-pass drawing agree with engineering drawing request.

**Key Words :** balance load; optimal design; dynamic programming method; parameterization drawing

## 独创性说明

本人郑重声明：所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得河北理工学院或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

签名： 张雪莲 日期： 2004年3月25日

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解河北理工学院有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵循此规定)

签名： \_\_\_\_\_ 导师签名： 刘改英 日期： 2004年3月25日

## 引 言

为满足市场需求，在中型轧机上轧制大规格型材，可以取得良好的经济效益。唐山钢铁集团(股份)有限公司中型厂利用中型轧机轧制 No.20 角钢，在带来经济效益的同时也带来一些问题，按经验方法确定角钢的压下量，使得负荷分配不尽合理，出现负荷不均衡现象。在变形量较大的道次，轧制力大，轧制大号角钢轧槽也较深，这样就容易断辊，出现生产事故。轧制力大，也使得轧制力矩、轧制功率增加，造成轧机主电机负荷增大。为保证设备正常运行、提高产品质量、降低轧制能耗，采用优化方法设计轧机负荷相对均衡的孔型是非常必要的。

## 第一章 文献综述

### 1.1 轧制变形规程的优化设计

在轧钢生产中，坯料经过数道次的轧制，产生塑性变形，最终轧制出符合产品标准的成品钢材，这一系列的轧制过程，是按着设计者根据生产条件所设计的轧制变形规程进行的。因此，为使轧钢生产能够达到优质、高产、低消耗，则需要合理的设计轧制变形规程。

轧制变形规程，对于不同类型的轧机所包括的内容也不完全相同。对于初轧机主要是指压下规程和速度制度；对于板带钢轧机主要指压下规程、速度制度、温度制度、张力制度和辊型制度；对于型线材轧机主要指孔型设计和张力制度；对于管材轧机则主要指变形制度。轧制变形规程的制定是轧钢工艺设计中基本的问题之一。在制定轧制变形规程时，我们总是希望所制定的轧制变形规程是最好的。一般说来，最好的轧制变形规程，在单位时间内轧制产品的产量最高，产品的质量最好，各种消耗（包括电耗、燃料消耗、金属消耗、轧辊消耗等等）最少，因此该产品的经济效益最好。反之，如果轧制变形规程不合理或不完全合理，则会使生产过程不顺利，影响到产量、质量，甚至无法正常生产。轧制变形规程是轧制工艺的核心，对轧钢生产至关重要。合理的制定轧制变形规程，使轧制过程达到最佳状态，是工艺设计人员所追求的目标。

目前，在生产中制定轧制变形规程，如型钢的孔型设计，板带钢的压下规程等，一般情况下还是以经验法为主。孔型设计时展宽系数的确定、板带钢轧制时压下量的确定等还都是根据设计者的生产经验来确定。虽然采用经验法所确定的变形规程能够满足生产要求，但不一定是最好的。我们不能以生产出产品为最终目的，而是要以最好的生产工艺，优质、高产、低消耗的进行生产，这样才能使产品有更强的竞争能力。

要确定最优的轧制变形规程，按通常的经验法来制定要达到该目的是比较困难的。这是由于用经验法确定某参数时，是在该参数的可行域内凭经验而确定的，很难做到确定的该参数是最佳参数。在制定轧制变形规程时，有时我们可能制定出几个方案加以比较，择优选取。这个比较、选择的过程，也可以说是最原始的优化过程。择优选取，首先必须有多个方案，然后在这些方案中选择较好的方案。在一定

的生产条件下，生产某个产品，在确定轧制变形规程时，所涉及到的方案很多，单凭设计者的计算和经验是难以完成的。随着计算机应用技术的提高和普及，使用计算机来完成这样的任务才使之成为可能。确定最优的轧制变形规程，称为轧制变形规程的优化设计。优化设计（Optimal design）是指在一切可能的设计方案中寻求最优方案。这种寻优过程需要大量的计算工作，繁重的计算工作若由人工来完成不仅工作量大，而且是难以实现和完成的。

优化设计是随着计算机技术进入工程设计领域后，采用数学规划的方法而发展起来的设计方法。由于计算机的运算速度和能力是人工计算所无法比拟的，这就可将大量繁重的计算工作由计算机来完成，而建立数学模型、选择优化方法等智能型工作由设计者来完成。这样才能在众多的设计方案中选择最优方案，以达到优化设计之目的。

在轧制变形规程优化设计时，首先必须要明确优化的目标，也就是说最优指的是什么最优。我们所说的最优，都有一定的相对性，并且与我们所确定的寻优目标密切相关。这个目标是设计者对轧制过程提出来的具体要求，若用数学形式描述出来就称之为目标函数。最优目标的选择，关系到所得结果是否合理可行。一般选择最优目标是按照生产过程的特点由设计者确定，以使生产工艺过程达到最佳，轧制产品达到优质、高产、低消耗<sup>[1]</sup>。

## 1.2 轧制变形规程优化设计的进展

最优化技术在二次大战前主要是古典的微分法和变分法。在第二次世界大战中，由于军事上的需要，提出了大量不能用上述古典方法解决的最优化问题。因而产生了运筹学，如线性规划、非线性规划、动态规划、图论等方法。此后，随着科学技术的发展，最优化理论和方法逐渐得到丰富和发展。

计算机的应用是当前科学技术的重大突破。计算机技术在各个领域中的应用促进了科技和经济的发展。随着计算机的应用和普及，为最优化技术提供了有利的计算工具。由于最优化技术是在一切可能的方案中选择最优方案，需要大量的计算以便进行优化。而计算机为这种繁重的计算创造了条件，使得最优化技术快速的发展起来。也可以说，最优化技术发展是以计算机技术发展为基础的。

在轧钢生产中，最优化技术用于轧制变形规程的设计较为广泛。例如，型钢生产中的孔型设计，板带钢轧制过程中的压下规程设计以及高速线材轧机精轧机的微恒张力设计等，采用优化方法进行设计已较为普遍。最优化技术在轧制变形规程中的应用，不但能够使轧制过程趋于最优，而且使轧制规程的制定，由技艺向工程科学迈进。

型钢孔型设计、板带钢压下规程设计等传统的设计方法是按照经验所确定的变形系数和变形率来设计孔型和压下制度。这种设计方法已不适应现代化的生产方式。因为随着科学技术的发展，生产技术水平在不断提高，产品的技术要求也在不断提高，并且要求轧制过程达最优状态。所以用最优化方法确定轧制变形规程是必然的趋势。

最优化技术虽然发展较早，但是应用于轧制变形规程的设计始于 70 年代，发展于 80 年代，是在计算机应用技术的发展基础上而发展的。计算机辅助设计 (Computer Aided Design) 早在 50 年代就开始应用于工程设计。随着计算机的广泛应用和计算机应用技术的发展、提高，计算机辅助功能越来越广泛。计算机辅助功能应用于轧钢孔型设计，即 CARD (Computer Aided Roll pass Design)。计算机辅助孔型设计(CARD)是在传统孔型设计方法的基础上，利用计算机强大的计算能力和图形显示能力，计算孔型设计所必须的参数，检验必要的限制条件，适时地在屏幕或其它输出设备上显示设计结果。CARD 技术可减少人工设计时繁琐计算、画图等重复性工作，还能进行模拟和优化，取得优化孔型设计结果。由于 CARD 技术具有计算速度快、精度高、结果可靠等优点，近年来得到迅速发展<sup>[2]</sup>。

CARD 在 80 年代得到迅速发展，并且在生产中得到广泛应用。计算机辅助孔型设计，可以缩短设计周期，计算精确，并可选择设计方案，通过绘图仪可直接得到符合工程要求的孔型图。将最优化技术应用于计算机辅助孔型设计，是计算机辅助功能的开发和发展，也是计算机辅助设计的必然发展趋势。

最优化技术在轧制变形规程设计中的应用，对轧钢生产向最佳化迈进是重要的一步，而且对于现代化轧钢生产也是非常必要的。型钢的孔型设计凭经验难以完成最优的孔型设计。而通过建立数学模型、确定目标函数和约束条件、选用合适的优化方法而得到的结果是所有可能方案中的最佳方案。这种建立在科学分析基础上的工艺制度，才能适应于现代化的轧钢生产。



随着轧制理论体系的完善和最优化技术的发展,最优化技术在轧制领域的应用也会不断提高和扩大,并且将使轧制技术水平向更高层次发展。

### 1.3 最优化技术在轧钢生产中的应用

轧钢生产过程是一个系统工程,由原料到成品需要多个生产工序,这些工序存在最优组合问题。轧制产品的生产过程不是唯一的,各机组间的衔接、匹配也存在最优化问题。轧钢生产过程优化对降低轧制产品的成本,提高轧制产品的质量有显著作用。

要达到上述问题的最优化,需要将生产中的有关目标用数学模型表示出来,然后采用适当的方法求得最优解。数学模型的建立是关键的一步,并且与优化结果有关。所以在建立数学模型时,既要考虑到能够真实全面反映实际轧制过程,又要使数学模型尽量简化,以便于求解。优化方法的选择,是依据目标函数的性质和约束条件而确定的。

用于塑性加工方面的优化方法,可以分成以下几类:

#### (1) 试验与模拟 (Test and Simulation) 方法

对某生产过程通过安排试验,回归出统计模型。这种方法广泛应用于评价各工艺参数对研究问题的影响程度,以便合理确定工艺参数。例如,钢材的化学成分与性能的关系,可以通过正交试验而得出屈服强度与化学成分的回归统计式。为提高钢材的屈服强度,可以通过适当调整化学成分来达到。这也是一种寻优的过程。

模拟可以分为物理模拟和数学模拟。物理模拟是通过相似原理进行模拟试验,经过系统评价,确定最优方案。例如通过轧制铅、塑性蜡泥等轧件来模拟热轧钢,以确定生产中的最佳工艺参数。数学模拟是将所研究的对象设计成与该对象或其变化过程相似的数学模型,然后通过数学模型来间接研究这个对象或其变化过程。数学模拟是广泛采用的一种模拟研究方法。

#### (2) 数学规划 (Mathematical Programming) 方法

对所研究的对象建立数学模型,通过数学规划的方法,得出研究对象的最优解。数学规划属于运筹学内容,是确定型的研究方法。数学规划可以分为线性规

划、非线性规划、动态规划和多目标规划等。例如，采用动态规划法确定板带钢轧制能耗最小的压下规程，可实现节省轧制能耗。

动态规划法是解多阶段决策过程最优化的一种方法。这种最优化方法产生在 50 年代，1951 年美国数学家 R·Bellman 等人，根据一类多阶段决策问题的特点，把多阶段决策问题表示成一系列的单阶段问题，提出了解决这一类问题的“最优化原理”。并将其应用于很多实际问题，从而形成了数学规划中的一个重要分支—动态规划。经大量查阅资料<sup>[3][4][5][6][7][8]</sup>在轧制变形规程优化设计中，动态规划法采用的最为广泛。

动态规划法就是按过程的几个阶段分为几步，计算的方向与所走的方向相反，即从最后一段开始计算到第一段。每一步都要做出决策，即每一步都要决定从哪条路走。计算下一步时都要利用上一步的计算结果，故为迭代法。

动态规划法与穷举法相比较，其优点如下：

i) 可减少计算工作量 当段数很多时，各段的不同选择很多时，动态规划法这一优点更为突出。且动态规划法实质上是采用迭代法进行计算的，这便于利用计算机计算。

ii) 丰富了计算结果 用动态规划法计算，不仅得到从起点出发到终点的最优路径及其相应的函数值，而且得到从各阶段各点出发到终点的最优路径及其函数值。这对许多实际问题来说是很有用的，在那些问题中，希望知道的不仅是从某一段的某一状态出发的最优决策，而是从许多段的许多状态出发的最优决策，也就是说，要求的是一族而不是一个最优决策。动态规划法使我们能求出整族的最优决策。

所以动态规划法是解决多阶段决策问题的有效方法。

### (3) 决策分析 (Decision Analysis) 和专家系统 (Expert System)

决策分析是运筹学中的内容之一，包括排队论、存贮论、价值论和决策论等。轧钢生产的物流优化，各机组的衔接和匹配等则可通过排队论进行优化。专家系统是指具有专家水平解决复杂专业问题的计算机软件系统，在确定求解问题之后专家系统可通过推理、判断而得出最优结果。但是专家系统不能代替人工智能，它是将

专家的知识 and 经验通过整理存入知识库, 然后根据具体问题利用知识库来求解专门问题。

优化技术在轧钢生产中的应用, 已经引起了轧钢工作者的关注, 在国内外有关资料中有许多报道。在轧钢生产中, 采用优化技术已取得了明显的经济效益和社会效益。随着计算机技术的普及和推广, 最优化技术在轧钢生产中的应用前景会更加广阔, 掌握优化技术对于实现轧制过程优质、高产、低消耗有着十分重要的意义。

#### 1.4 课题问题的提出和研究内容

唐钢中型厂通常轧制 No.12、No.14 角钢, 为了开发新产品, 而在原有设备基础上轧制 No.18、No.20 角钢。No.18、No.20 角钢是大型轧机的下限产品。中型轧机轧制大型下限产品, 这样带来一系列问题, 因为产品规格的增大, 轧制角钢的孔型系统的槽深必然加大, 轧辊的工作直径减小, 轧辊强度减弱, 从另一方面来说, 轧件与轧辊的接触面积增大, 轧制力增大, 而通常设计某一道次压下量大, 就容易断辊。从总体来看, 有的轧机负荷大, 有的轧机负荷小, 且轧机负荷分布不均匀, 而轧机负荷大的轧机处于一种临界状态运行, 极易带来生产事故。为了解决这个问题, 使轧机压力, 轧机负荷分配(轧件的压下量)更为合理, 所以对轧机负荷进行均衡优化非常必要。

本文介绍的是在开轧温度一定的条件下, 通过调整粗、精轧机组的压下量来实现粗、精轧机组轧制负荷的相对均衡。通过选择压下量达到负荷均衡优化的目的, 对于粗、精轧机组来说是可以实现的。

角钢属常用型钢, 其孔型系统为延伸孔型和蝶式孔型构成。蝶式孔的设计, 常采用分配压下系数和压下量的方法来构成孔型。虽然这样构成的蝶式孔能满足工艺要求, 但没有考虑到轧制能耗及较准确的轧制负荷, 因此在进行蝶式孔设计时, 轧机负荷均衡, 可按优化方法来确定蝶式孔压下量或压下系数。进行轧制角钢的孔型设计中, 使轧制负荷均衡, 能够充分发挥轧机的生产能力, 并且能够防止事故。轧制负荷不均衡, 是造成断辊的原因之一。

均衡负荷、一般有两种方法: 改变孔型尺寸和调整辊缝。在现场的实际生产中, 目前主要是依靠调整辊缝来均衡负荷。这一过程完全靠现场工人凭经验手工操作完

成。这不但增加了操作难度，而且给准确控制轧件精度带来了困难，并且调整后又出现了新的不均衡现象。因此，现场希望通过改变孔型尺寸来实现轧制负荷的均衡。这就要求用优化方法确定轧机负荷均衡的孔型尺寸。

中型轧机轧制大号角钢处于临界状态轧制，凭经验难以完成最优的孔型设计。而通过建立数学模型、确定负荷均衡为目标函数，在一定的约束条件下选用合适的优化方法而得到的结果是所有可能方案中的最佳方案。这种建立在科学分析基础上的工艺制度，才能适应于现代化的轧钢生产。

针对以上情况，本文的研究包括以下几方面的内容：

1. 建立轧机负荷的数学模型：

包括变形抗力计算，接触面积计算，轧件断面面积计算和力能参数计算等几部分内容。考虑现场中实际影响因素，对传统公式进行修正，并根据实验数据，建立一套适合唐钢中型生产的轧机负荷计算式。

2. 以负荷均衡为目标函数，采用动态规划法为优化方法进行优化。

3. 编制轧制负荷计算和优化软件，并给出轧制负荷均衡的孔型图。

4. 对优化结果进行分析。

研究中型轧制过程中的负荷分布并对其进行均衡优化具有十分重要的意义：

目前，尽管中国已成为一个世界钢铁大国，但从世界工业技术蓬勃发展的新形势看，中国还处在技术落后的地位，在产品的品种、质量及经济指标上与先进产钢国存在着不小的差距。这种现状对处于经济和钢铁工业发展、改革关键时期的中国来说，既是难得的机遇，也面临着严峻的挑战。

在型钢生产过程中，为正确确定各架轧机的轧制规程（设定各机架的辊缝和速度等），首先必须确定合理的负荷分配，即在一定的轧制条件下（轧件的钢种、厚度、宽度、温度等）的压下量分配。从本质上讲，负荷分配决定了轧制过程的状态特性。其合理与否，对产品质量、轧制设备调整和事故的多少均有重要的影响<sup>[9]</sup>。

我国型线材产品已处于国内外市场竞争浪潮之中，为适应这一形势，当务之急是降低生产成本，提高产品质量，这样才能使型线材生产厂在市场竞争中得以生存和发展。降低生产成本主要措施是降低能耗——燃料与电能消耗、金属消耗、轧辊消耗、水的消耗。采用以能耗最少为目标函数的计算机优化孔型辅助设计，可节约

轧制能耗，同时可取得使孔型磨损较均匀和产品质量较好的效果；使用合理的孔型设计和导卫装置，并对其进行调整，使轧制过程稳定，可提高产品合格率，减少或消除产品缺陷或中间因轧卡等造成的废品，从而降低金属消耗；负荷均衡可保证轧制过程稳定，轧辊磨损较为均匀，最终达到节约轧辊消耗的目的<sup>[10]</sup>。

经大量查阅资料可知，在冷轧、热轧板带、棒材、高速线材领域，有关于轧制负荷分布优化研究的报道，但在型材生产领域未见报道。No.20 角钢利用优化方法进行负荷分配研究是一个创新。总之，进行轧制过程的负荷均衡优化对保证设备正常运行、提高产品质量、降低轧制能耗等具有十分重要的意义。

## 第二章 数学模型的建立

### 2.1 变形阻力模型的建立

#### 2.1.1 实验研究

##### 2.1.1.1 实验条件

变形阻力试验在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室完成。唐钢中型厂所用钢种为 16Mn，故本试验所用钢种为 16Mn，加工成  $\phi 8 \times 10\text{mm}$  的圆柱试件。16Mn 钢的化学成分如下所示：

表 2.1 16Mn 化学成分表 (%)  
Table 2.1 table of chemic component of 16Mn (%)

名称	C	Mn	Si	S	P
16Mn	0.15	1.33	0.32	0.027	0.023

##### 2.1.1.2 实验设备的结构及功能

试验所用的设备为热模拟试验机，型号为 Model Gleeble—1500，生产厂家为美国的 Duffers<sup>[11]</sup>。整个试验在计算机控制下进行。该机可同时实现力学系统及加热系统的精确控制，是一台理想的动态材料试验机。

热模拟试验机由三个主要控制系统和五部分设备单元构成。另外有许多辅助设备，增强了设备的功能和试验能力。三个主要的控制系统是计算机控制系统，热学控制系统和力学控制系统。设备的五个单元是由计算机终端、主控单元、试验单元、液压动力单元、真空单元构成。其它辅助设备有淬火系统、绘图仪和气压机等。采用语言为 GPL (Gleeble Programing Language)。

Gleeble—1500 加热系统主要由加热变压器、温度测量与控制系统以及冷却系统三部分组成<sup>[12]</sup>。当低频（电源频率）电流通过试件时，试件靠自身的电阻被加热，因金属与合金体的电阻相当均匀，所以热量均匀通过试件，集肤效应可忽略不计。在均温区，试件表面与芯部的温度梯度可近似的看作零，用焊在试件表面的一对热电偶测量温度。加热系统为伺服闭环控制回路，可实现温度的精确测量。力学系统也是一个伺服系统，可实现载荷控制、位移控制或应变控制。该设备的重要辅件包

括载荷传感器、轴向传感器和径向传感器等。为了保证降温及保温过程中试件与压头的良好接触（不致因体积变化而脱落），设备上的空气弹簧起着重要的作用。

Gleeble-1500 的数据采集系统功能较强，采样时间短至零点几秒，长至 38 小时。采样速率可根据需要设定，从每两秒一个试样至每秒 50kHz。

该设备可以完成金属力学性能的测试工作。试验内容有形变过程中变形抗力的测定及制定变形抗力图。测定塑性指标和制定塑性图。应力-应变曲线的制定，变形过程中的连续控制，变形过程对材料性能的影响，形变诱导相变。形变诱导析出、形变热处理<sup>[13]</sup>。

该设备可以模拟熔炼及连续铸造工艺、常规轧制、控制轧制工艺、锻造工艺、挤压工艺、焊接工艺以及粉末冶金工艺、烧结工艺、及双金属复合加工工艺、控制冷却加工工艺等。

### 2.1.1.3 试验方法

试验在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室进行，利用 Gleeble-1500 热模拟试验机，试样为  $\phi 8 \times 10\text{mm}$ ，在真空条件下加热试样到设定温度，保温 1 分钟后进行压缩。试验时，采用低频电流加热试样，并充入氩气来防止试样氧化。利用焊接在试样表面的热电偶来测量温度，通过温度反馈调节系统，可使试样温度精确地达到预期温度，误差不超过  $\pm 2^\circ\text{C}$ 。在变形速率的控制方面，采用电液伺服阀，用无级调速来实现变形速率的恒定。运行时，计算机根据输入的要求，控制热模拟实验机的变形工艺，并将试验中的压力、位移、时间、应力和温度等信号瞬时采集储存，并同时以曲线的形式输出。变形条件为：变形温度  $t=950^\circ\text{C}\sim 1150^\circ\text{C}$ ，变形程度  $\varepsilon = 0.2\sim 0.5$ ，变形速率  $\dot{\varepsilon} = 1\sim 20\text{s}^{-1}$ 。

### 2.1.2 变形阻力模型的建立

金属材料的变形阻力是指金属在一定的变形条件下进行塑性变形时于单位横截面积上抵抗此变形的能力<sup>[14]</sup>。变形阻力的大小与变形时刻的工艺条件有密切的关系。建立正确反映金属材料力能参数与热变形工艺参数的数学模型，可实现轧制过程的计算机模拟，从而达到优化热轧工艺过程，进一步提高钢材的力学性能和组织性能水平之目的。

本文通过试验测定 16Mn 在热变形过程中的数据, 研究变形抗力与变形温度、变形程度及应变速率之间的关系, 以期得到一个能比较精确描述 16Mn 钢变形阻力的模型。

2.1.2.1 试验结果及分析

1. 变形温度对变形阻力的影响

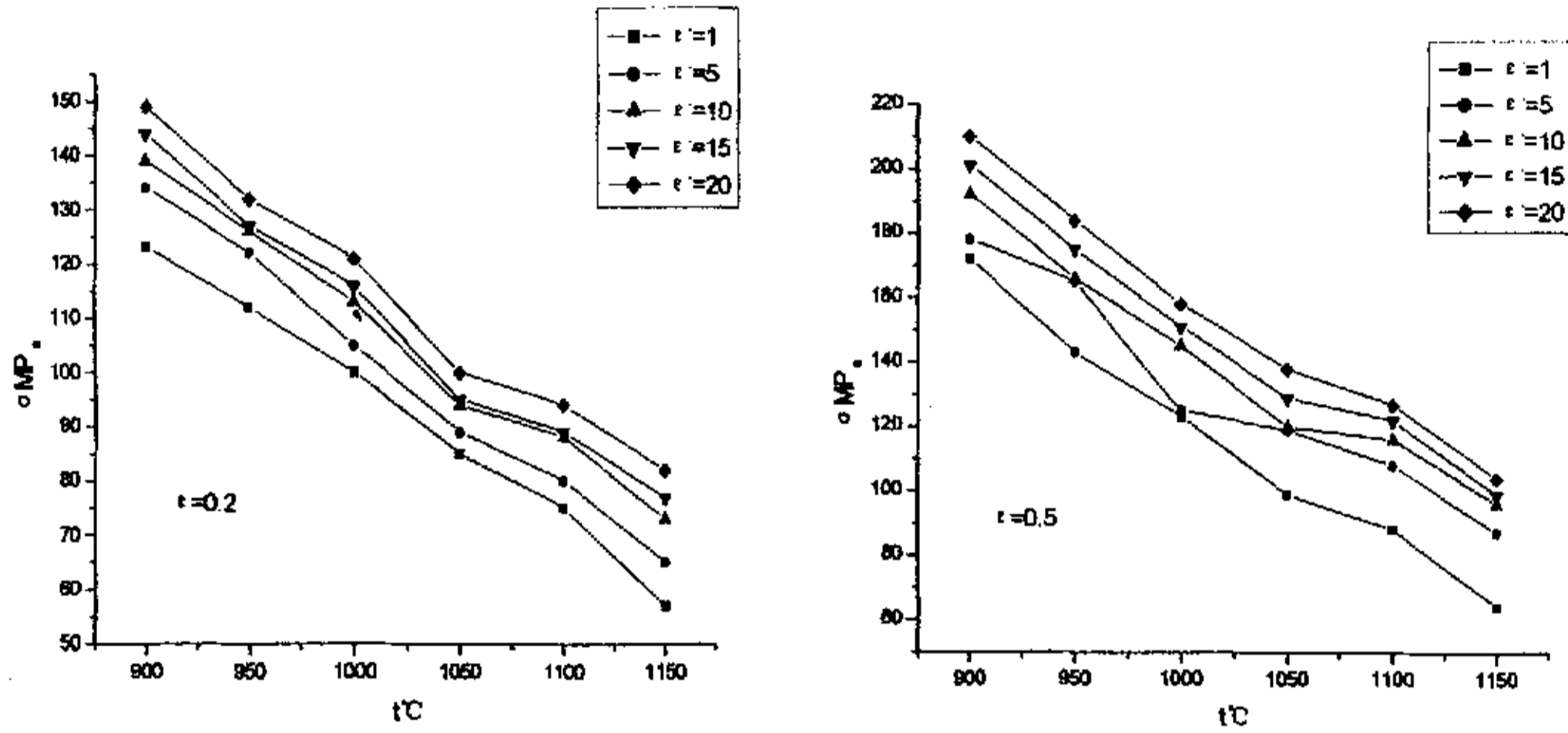
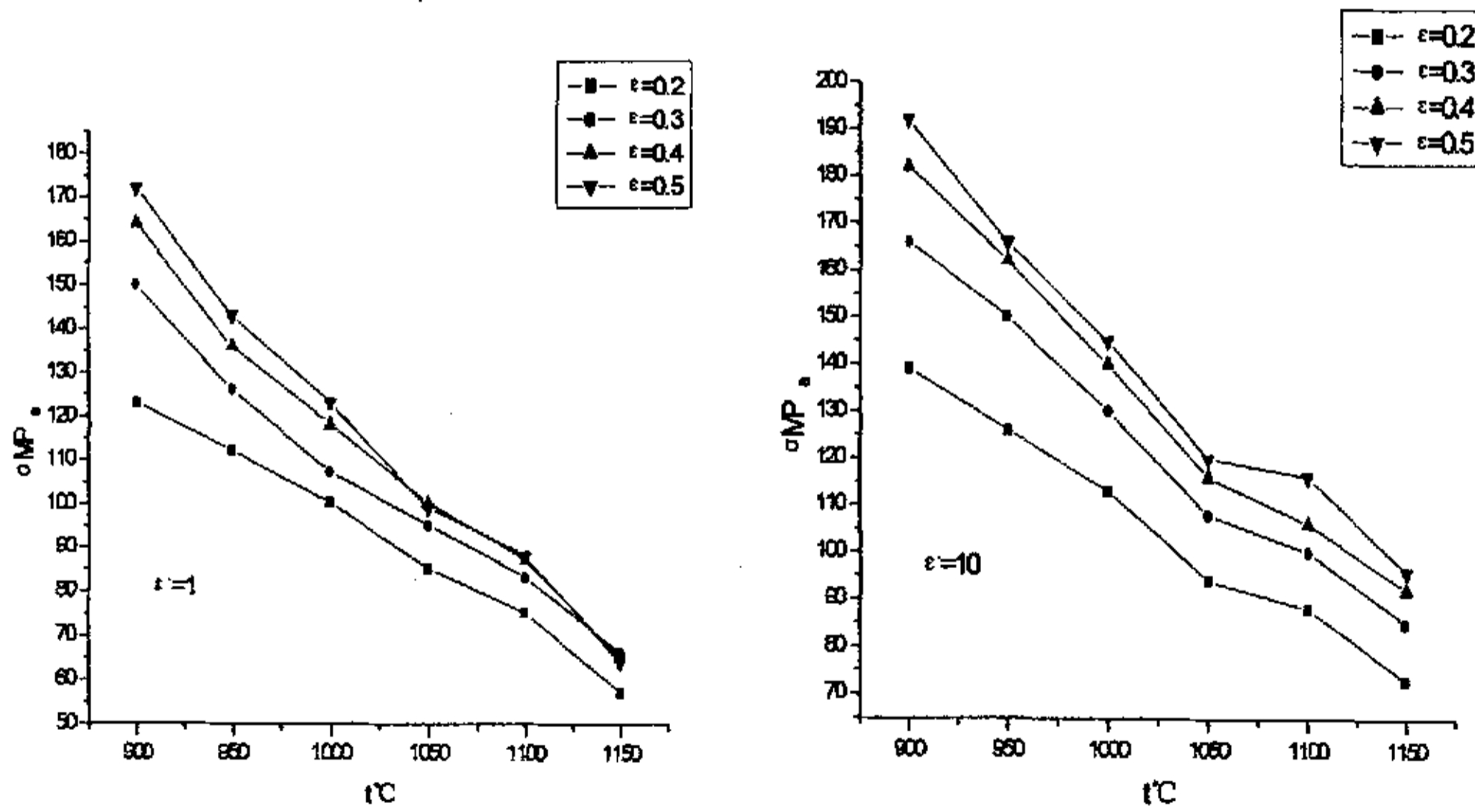


图 2.1 不同  $\dot{\epsilon}$  时, 16Mn 钢的  $\sigma$ - $t$  曲线

Fig.2.1  $\sigma$ - $t$  curve of 16Mn at different  $\dot{\epsilon}$





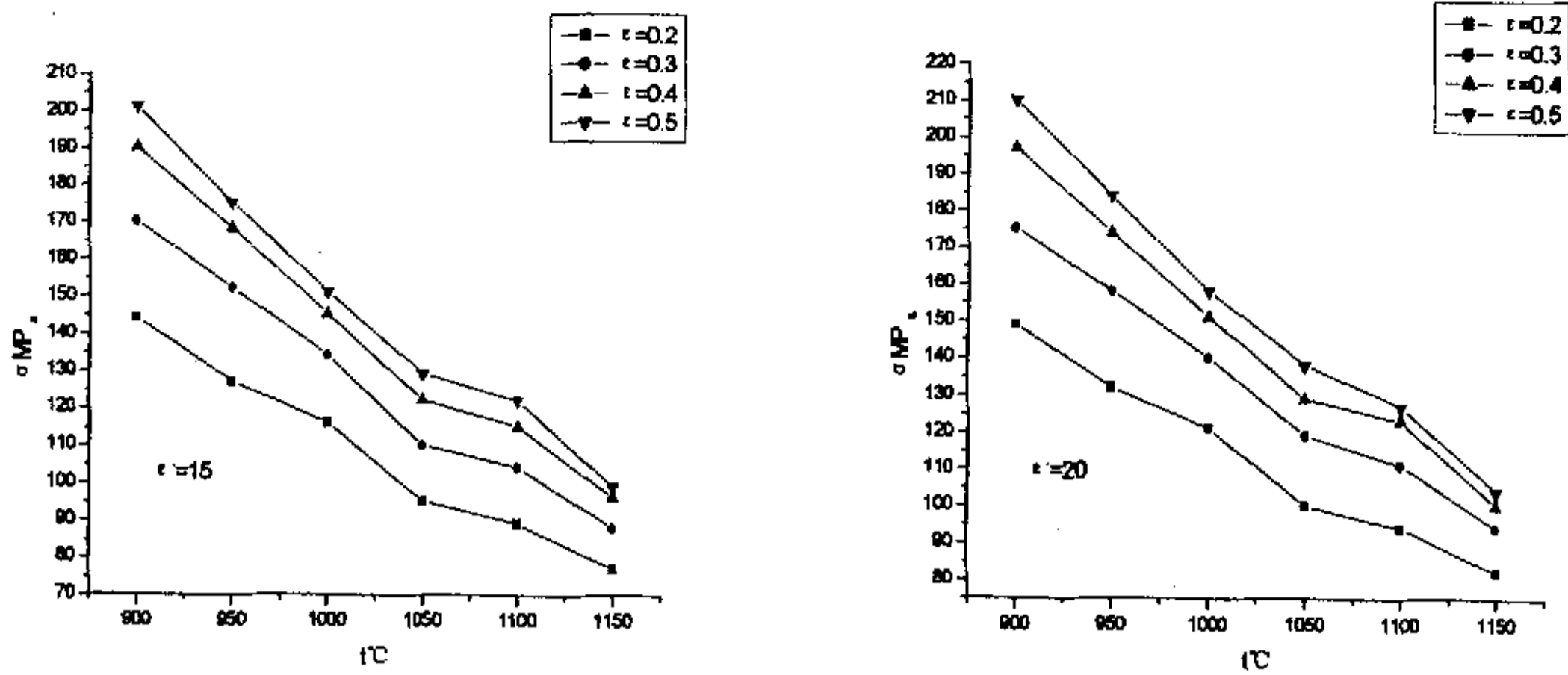


图 2.2 不同  $\varepsilon$  条件下  $\sigma$ - $t$  关系曲线

Fig 2.2  $\sigma$ - $t$  curve of 16Mn at different  $\varepsilon$

按试验数据，得到如图 2.1、图 2.2 变形阻力与变形温度、变形程度和变形速率的关系曲线。由图 2.1、图 2.2 可知，变形阻力随变形温度的升高而下降。在变形程度一定的情况下，变形速率大，变形阻力大；在变形速率一定的情况下，随变形程度增加，变形阻力增大。

## 2. 变形速率对变形阻力的影响

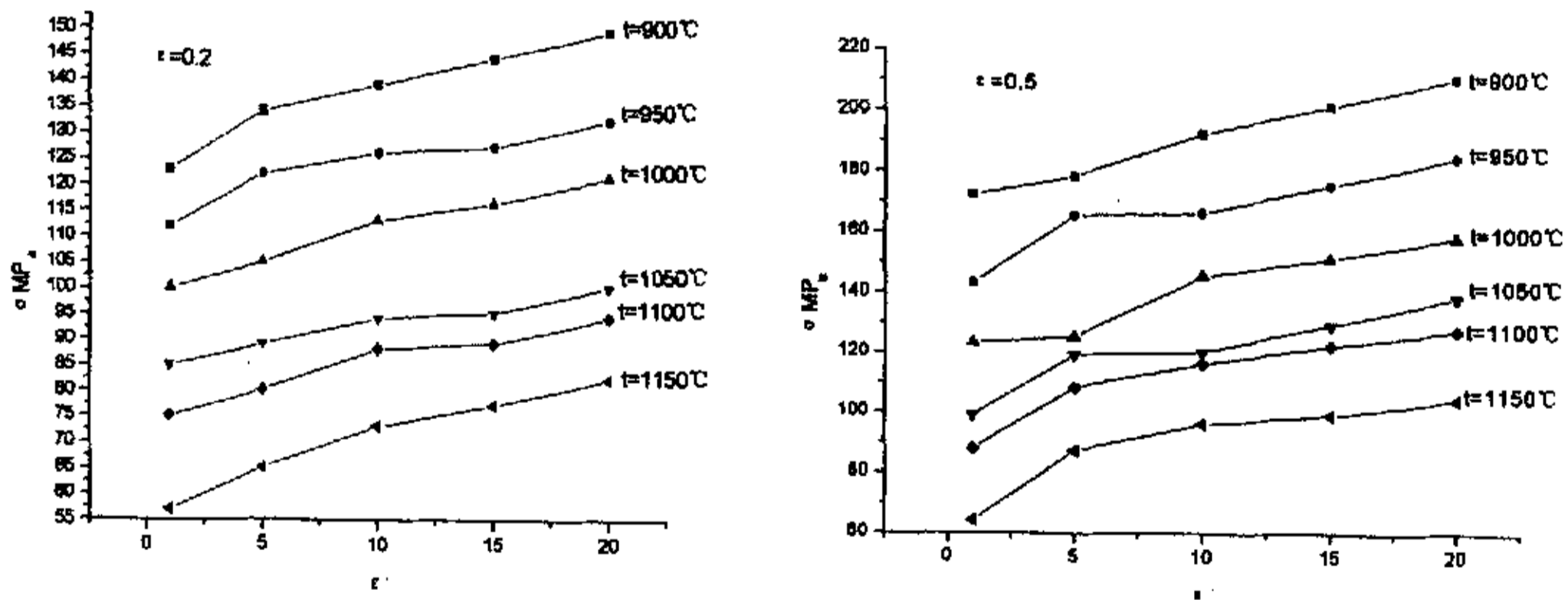


图 2.3. 变形阻力  $\sigma$  与变形速率  $\dot{\varepsilon}$  的关系曲线

Fig 2.3 relation curve of distortion resistance  $\sigma$  and distortion speed  $\dot{\varepsilon}$

按试验数据得到图 2.3，变形阻力与变形速率的关系曲线。由图 2.3 可知，随变形速率增大，变形阻力在不同的变形温度下都要上升。在变形程度较大时，变形阻力的上升趋势更为明显。

### 3.变形程度对变形阻力的影响

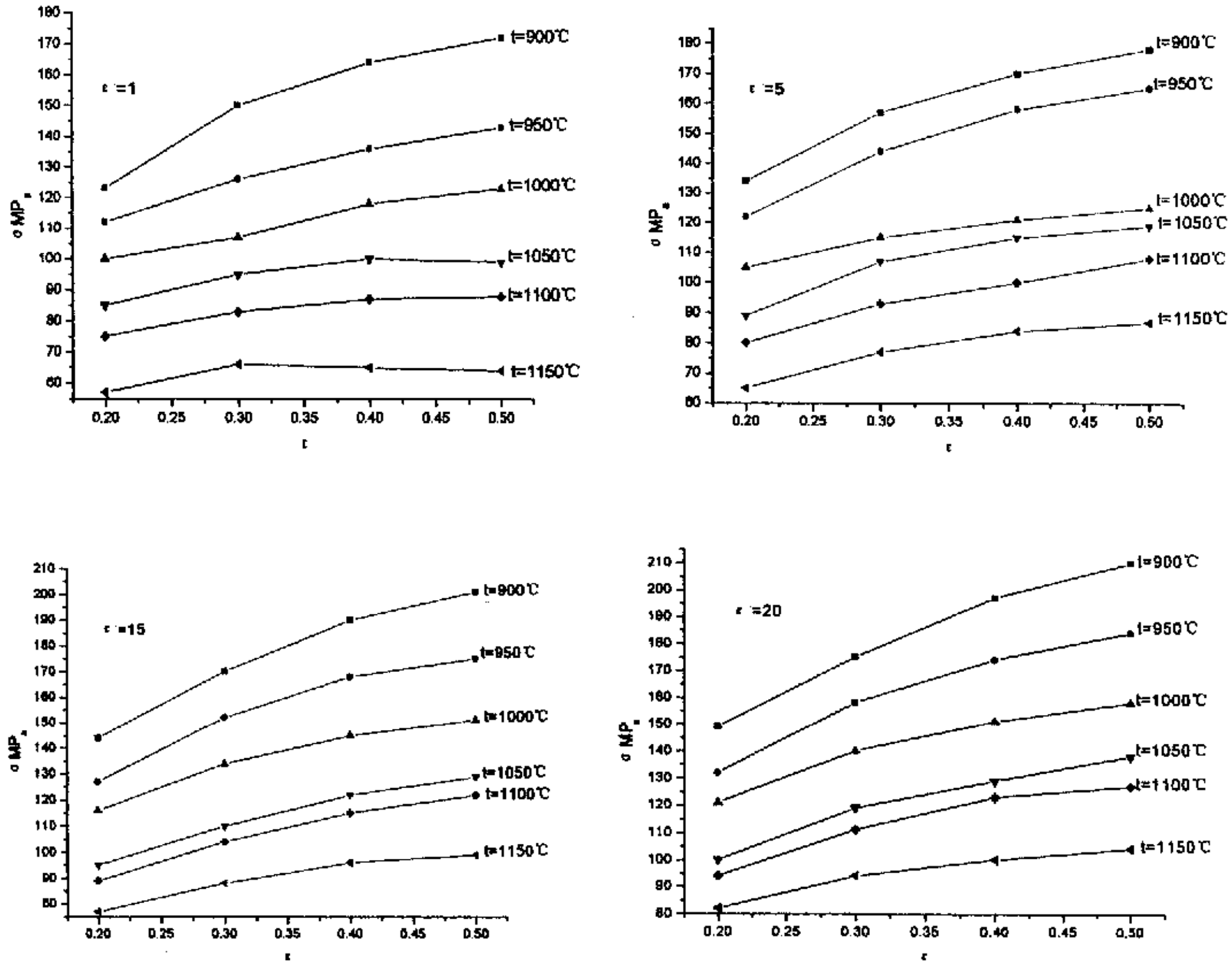


图 2.4 不同变形速度条件下  $\sigma - \epsilon$  关系曲线

Fig 2.4 relation curve of  $\sigma - \epsilon$  at distortion speed

按试验数据，得到图 2.4 所示的变形阻力与变形程度的关系曲线。由图可以看出，变形阻力在较低变形速率下 ( $\dot{\epsilon} = 1$ ) 和在较高的温度下随变形程度增加逐渐升高然后有下降的趋势。在其他的变形速率下 ( $\dot{\epsilon} = 5, 15, 20$ )，变形阻力随变形程度增大而增大<sup>[15]</sup>。

## 2.1.2.2 变形阻力数学模型的建立

金属塑性变形阻力的大小，决定于金属的化学成分、金属的组织、加工温度、变形速度以及与这些有关的各个过程，如加工硬化、再结晶、动态恢复、静态恢复等。这些因素通过金属的内部影响变形阻力的大小。可以用下述关系表述：

$$\sigma = f(\chi\%, t, u, \gamma, \iota) \quad (2.1)$$

式中：  $\chi\%$ —金属的化学成分和组织；

$t$  —变形温度；

$u$  —变形速度；

$\gamma$  —变形程度；

$\iota$  —相邻加工道次间时间间隔，或称变形历史的影响。

经过大量的研究表明，合金元素对钢变形阻力影响的复杂性，企图用一个数学模型，把诸合金包罗万象的放到变形阻力数学模型之中，表述合金元素对变形阻力的影响，不仅是相当复杂、数学模型相当冗长，而且也难以实现。即使得到了其变形阻力数学模型，也不便计算机在线控制轧钢生产采用，而且其计算精度势必不高。为此，周纪华、管克智采用各钢种为单元，按钢种建立变形阻力数学模型。这不仅可以简化变形阻力数学模型的结构，便于计算机在线控制轧钢生产使用，而且其变形阻力计算精度也较高。

周纪华、管克智采用凸轮式高速形变试验机，在广泛的变形温度、变形速度和变形程度范围内，测定了各种碳钢、低合金钢和合金钢等的变形阻力，在详细地分析了变形温度、变形速度和变形程度对变形阻力的影响关系的基础上，以钢种为单元，拟订以下几个变形阻力数学模型，并采用非线性回归分析，得到各回归系数的值和回归方差<sup>[16]</sup>。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(a_1 T + a_2) \left(\frac{u}{10}\right)^{a_3 T + a_4} \left[ a_6 \left(\frac{\gamma}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \frac{\gamma}{0.4} \right] \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{a_1}{T} + a_2\right) \left(\frac{u}{10}\right)^{a_3 T + a_4} \left[ a_6 \left(\frac{\gamma}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \frac{\gamma}{0.4} \right] \quad (2.3)$$

$$\sigma = \exp(a_1 T + a_2) \left( \frac{u}{10} \right)^{a_3 T + a_4 \gamma^n} \quad (2.4)$$

$$\sigma = \exp\left(\frac{a_1}{T} + a_2\right) \left( \frac{u}{10} \right)^{a_3 T + a_4 \gamma^n} \quad (2.5)$$

$$\sigma = \exp(a_1 T + a_2) \left( \frac{u}{10} \right)^{a_3 T + a_4} K_\gamma \quad (2.6)$$

$$\sigma = \exp\left(\frac{a_1}{T} + a_2\right) \left( \frac{u}{10} \right)^{a_3 T + a_4} K_\gamma \quad (2.7)$$

$$K_\gamma = b_0 + b_1 \gamma + b_2 \gamma^2 + b_3 \gamma^3$$

式中  $\sigma_0$ 、 $a_1 \sim a_6$ 、 $b_0 \sim b_3$ 、 $n$ —回归系数，其值取决于钢种。

周纪华、管克智等人详细地分析了部分钢和合金采用式(2.2)至式(2.7)的结构型式，做非线性回归分析，得到各回归系数值和回归方差（拟和精度）。分析回归方差表明，采用式(2.2)结构型式的变形阻力数学模型，不仅其回归方差普遍小于式(2.3)至式(2.7)结构的数学模型，而且其数学模型的结构也较简单，便于计算机在线控制轧钢生产和设计计算使用。

所以 16Mn 的变形阻力数学模型采用(2.2)式的结构型式，见式(2.8)。

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(a_1 \frac{T}{1000} + a_2\right) \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^{\left(a_3 \times \frac{T}{1000} + a_4\right)} \times \left[ a_6 \left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \frac{\varepsilon}{0.4} \right] \quad (2.8)$$

式中： $T=t+273$ ；

$\sigma_0$ —基准变形阻力，即  $t=1000^\circ\text{C}$ 、 $\varepsilon=0.4$  和  $\dot{\varepsilon}=10\text{s}^{-1}$  时的变形阻力(MPa)；

$t$ —变形温度；

$\dot{\varepsilon}$ —变形速度；

$\varepsilon$ —变形程度（对数应变）；

$\sigma_0$ 、 $a_1 \sim a_6$ —回归系数，其值取决于钢种。

按照式(2.8)结构的变形阻力数学模型，根据试验中测得的应力-应变曲线规律，对 16Mn 钢高温变形曲线数据进行 levenberg-Marquardt 多元非线性回归<sup>[17][18]</sup>，得出(2.8)式模型系数和变形阻力基值如下：

表 2.2 变形阻力模型系数表  
Table 2.2 Modulus table of distortion resistance

$\sigma_0$ (MPa)	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
140	-2.7166	3.4609	0.2351	-0.216	0.7179	2.6261

由此得出变形抗力的数学模型为

$$\sigma = 140 \exp\left(-2.7166 \times \frac{T}{1000} + 3.4609\right) \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^{\left(0.2351 \times \frac{T}{1000} - 0.216\right)} \times \left[2.6261 \left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)^{0.7179} - 1.6261 \frac{\varepsilon}{0.4}\right] \quad (2.9)$$

错误类型：

EE<0.5%	13	EE<1%	17	EE<2%	30	EE<5%	27
EE<10%	10	EE<20%	3	EE>20%	0		

$$\text{总平方和 } I_{yy} = \sum (\sigma_{\text{实}} - \sigma_{\text{平}})^2 = 135613.2$$

$$\text{残差平方和 } Q = \sum (\sigma_{\text{实}} - \sigma_{\text{计}})^2 = 2223.32$$

$$\text{回归平方和 } U = I_{yy} - Q = 133389.88$$

显著性检验：因变量的离差平方和（总平方和）可以分解成回归平方和 U 与残差平方和 Q。其自由度  $f_{I_{yy}} = n, f_u = m, f_Q = n - m$ ，其中 n 为实测数据组数，m 为自变量个数。

$$F = \frac{u/m}{Q/(n-m)} = 2340.1732$$

取信度  $\alpha = 0.01$ ，查表  $F_{0.01}^{3,117} = 3.94$ 。  $F > F_{0.01}^{3,117}$ ，故回归方程高度显著。

$$\text{复相关系数: } R = \sqrt{\frac{u}{I_{yy}}} = 0.9918$$

$$\text{剩余标准差: } S_y = \sqrt{\frac{Q}{n-m}} = 4.3592 \text{MPa}$$

取信度  $\alpha = 0.1$ ,  $f=117$ , 查表得  $t_{0.01}^{117} = 2.617$ , 故有 90% 的把握认为计算值的精度范围在  $\pm t_{0.01}^{117} \times S_y = \pm 7.2276 \text{MPa}$  之内<sup>[19]</sup>。

### 2.1.3 计算值与实测值比较

16Mn 钢的变形阻力的由式(2.9)计算得出的计算值和实测值及误差见附录 A。

16Mn 钢在温度为  $900^\circ\text{C} \sim 1150^\circ\text{C}$ , 变形速率为  $1 \sim 20 \text{s}^{-1}$ , 变形程度为  $0.2 \sim 0.5$  变形条件下的比较见图 2.5。

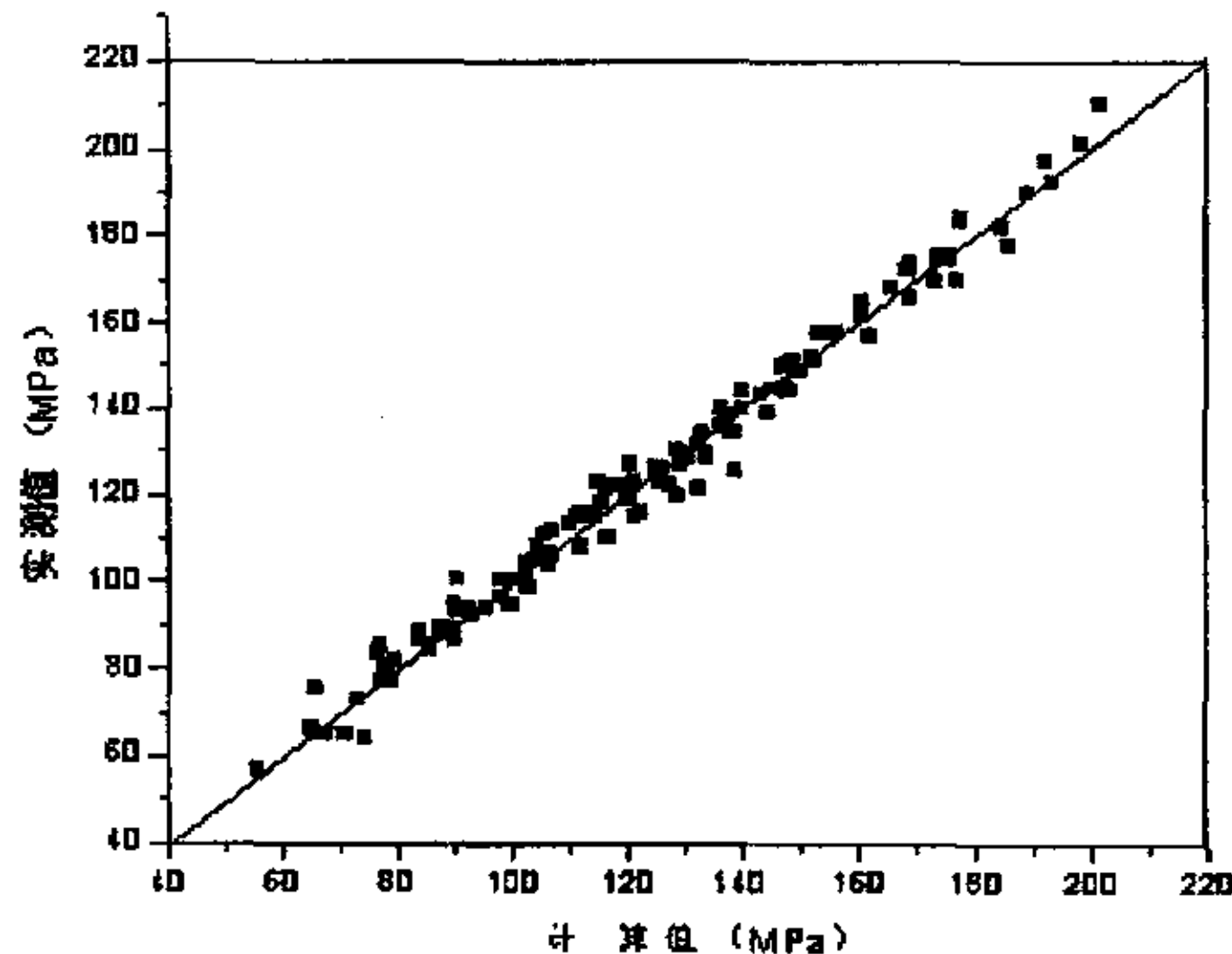


图 2.5 16Mn 变形阻力的计算值和实测值的比较

Fig2.5 Comparison of  $\sigma$  between numerical value of calculating and measuring in fact

由上图可以看出, 点在直线段周围的分布比较均匀, 说明计算值和实测值比较接近。

## 2.2 温降模型的建立

轧制过程中, 轧件的温降对变形制度、加热制度及轧后冷却方式等有重要影响。在轧制过程中, 由于轧件的断面不断发生变化, 轧件周围的换热条件复杂, 变形热对温降也有很大影响, 给分析轧件温度变化增加了巨大困难。随着计算机的普

及, 数值计算方法得到了很大发展<sup>[20]</sup>。目前, 已有人用数值方法分析了某些轧制工艺下轧件温降规律, 获得了一些有用结果<sup>[21]</sup>。本文通过对典型工艺条件下轧件的温度进行实测, 回归出了轧件轧制过程中温降模型, 为进一步了解轧件温度变化规律, 合理制定加热制度、轧制制度及冷却制度, 提供了理论依据。

在金属压力加工过程中, 温度对轧制力的影响是非常显著的。

轧制过程中每一道次上轧件的温度变化为 $\Delta t$ , 它可以分解成几个部分即<sup>[22]</sup>:

$$\Delta t = \Delta t_p + \Delta t_f (\Delta t_o + \Delta t_u + \Delta t_s + \Delta t_d)$$

式中:  $\Delta t$ -----道次轧件温度变化;

$\Delta t_p$ -----由塑性变形功转变的温升;

$\Delta t_f$ -----轧件与轧辊间相互摩擦产生的温升;

$\Delta t_o$ -----轧件向周围辐射产生的温降;

$\Delta t_d$ -----轧辊热传导引起的轧件温降;

$\Delta t_u$ -----轧件在机架间运行时空气对流引起的温降;

$\Delta t_s$ -----冷却水引起的轧件温降。

为了便于计算对以上模型进行下列简化: 轧件与轧辊相互摩擦产生的温升很小, 因此 $\Delta t_f$ 可以忽略, 对 $\Delta t_o$ ,  $\Delta t_u$ ,  $\Delta t_s$ 做如下处理: 令

$$k_o \Delta t_o = \Delta t_o + \Delta t_u + \Delta t_s$$

式中:  $k_o$ -----轧机形式系数, 取  $k_o = 1.15$

简化后的变形温度模型为:

$$\Delta t = \Delta t_p - k_o \Delta t_o - \Delta t_d \quad (2.10)$$

### 2.2.1 温度变化的计算

#### 1. 变形功所引起的温度上升计算

$$\Delta t_p = \frac{0.095W}{GC \times 427} \quad * \quad (2.11)$$

W—变形功, KN.m;

G—变形区所包含的轧件重量, kg;

C—高温状态下钢平均比热,  $C = 0.695 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

427—热功当量。

变形区所包含的金属重量可用下式计算:

$$G = L b_p h_p \times 7.8 \times 10^{-6}$$

$L$ —变形区长度, mm,  $L = \sqrt{R_g \Delta h_p}$ ;

$b_p$ —变形区内轧件平均宽度, mm,  $b_p = (B+b)/2$ ;

$h_p$ —变形区内轧件平均高度, mm,  $h_p = F/b$

$B$ —入口宽度;  $b$ —孔型出口宽度;  $F$ —变形区内轧件断面面积  $\text{mm}^2$

变形功与轧制力矩有关, 其计算公式如下:

$$W = 2 \times 9.8 P \alpha \frac{L_{dm}^2}{R_m} \times 10^{-3} = M \theta$$

式中:  $W$ —变形功, kN.m;

$M$ —轧制力矩;

$\theta$ —一个变形区长度的转角, 弧度;

$R_k$ —轧辊工作半径, mm;

$\alpha$ —力臂系数,  $\alpha = 0.5$ ;

$P$ —道次轧制压力, kN。

整理后得:

$$\Delta t_p \approx \frac{0.4 \times P L_{dm}}{R_m F_p} \quad (2.12)$$

$F_p$ —变形区内轧件平均断面面积,  $\text{mm}^2$ ;

## 2. 辐射温降计算

据辐射定律, 因辐射所引起的轧件温降为:

$$\Delta t_\phi = \frac{\xi \gamma \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \times \tau_1 \times F_s}{GC} \quad (2.13)$$

式中:  $\xi$ —辐射体黑度,  $\xi = 0.8$ ;

$\gamma$ —完全黑体的辐射系数,  $\gamma = 5.815 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$T_1$ —轧件绝对温度,  $T_1 = t_1 + 273$ , K;

$T_2$ —空气绝对温度,  $T_2 = t_2 + 273 = 300$ , K;



$F_s$ —单位长度轧件表面积，其绝对值等于轧件断面周长，mm；

$C$ —比热容， $C=0.695 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{k})$ ；

$\tau_1$ —相邻两机架间轧件运行的时间，秒；

$G$ —单位长度轧件质量，Kg。

上式经整理后得：

$$\Delta t_\varphi = 8.57 \times 10^{-4} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - 81 \right] \times \tau_1 \times \left( \frac{F_s}{F_p} \right) \quad (2.14)$$

### 3. 轧辊热传导引起温度降的计算

$$\Delta t_d = 2L_{dm} \bar{b}(t_1 - t_2)\omega\tau_2 / (GC) \quad (2.15)$$

式中  $L_{dm}$ —变形区长度，mm；

$t_1$ —轧件温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_2$ —轧辊正常工作温度， $^{\circ}\text{C}$ ， $t_2=80^{\circ}\text{C}$ ；

$\omega$ —传热系数， $\omega=11 \times 10^{-6} \text{ 卡}/\text{mm}^2\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$ ；

$\tau_2$ —一个变形区长度的轧制时间，s；

$G$ —变形区内轧件的质量，Kg；

经整理后得：

$$\Delta t_d \approx 1.7 \times 10^{-2} (t_1 - 80) \frac{\tau_2}{h_p} \quad (2.16)$$

$h_p$ —变形区内轧件平均厚度。

#### 2.2.2 计算结果

在计算温降时，通过编制温降计算程序来计算各道次轧制温度。温度计算程序框图如图 2.5。

利用公式 (2.10) 进行各道次温度计算时，为使计算温度与现场实测温度相吻合，可对公式 (2.10) 进行修正，修正后的计算式如下：

$$\Delta t = \alpha \Delta t_p - k_\varphi \Delta t_\varphi - \beta \Delta t_d \quad (2.17)$$

其中  $\alpha$ 、 $\beta$  为修正系数，可根据现场实际情况进行调整， $k_\varphi$  取 1.15。

现场实测温度与计算所得各道次温度的比较见图 2.6。由图 2.6 可以看出，计算值与现场实测值较为吻合，可根据此温度计算公式计算现场各道次温度。图 2.7 为改变初轧温度后，根据此计算式得出的几组温度值。当生产条件改变后，可测出几个关键温度点，确定出公式 (2.17) 中的修正系数，从而求出其余各点温度。

利用模型 (2.17) 进行各道次温度计算，可根据现场实际情况选择修正系数，使计算值与实测值相符。从而得到相同生产条件下改变开轧温度后的各道次温度。经与现场实测值相比较，该模型精度较高。

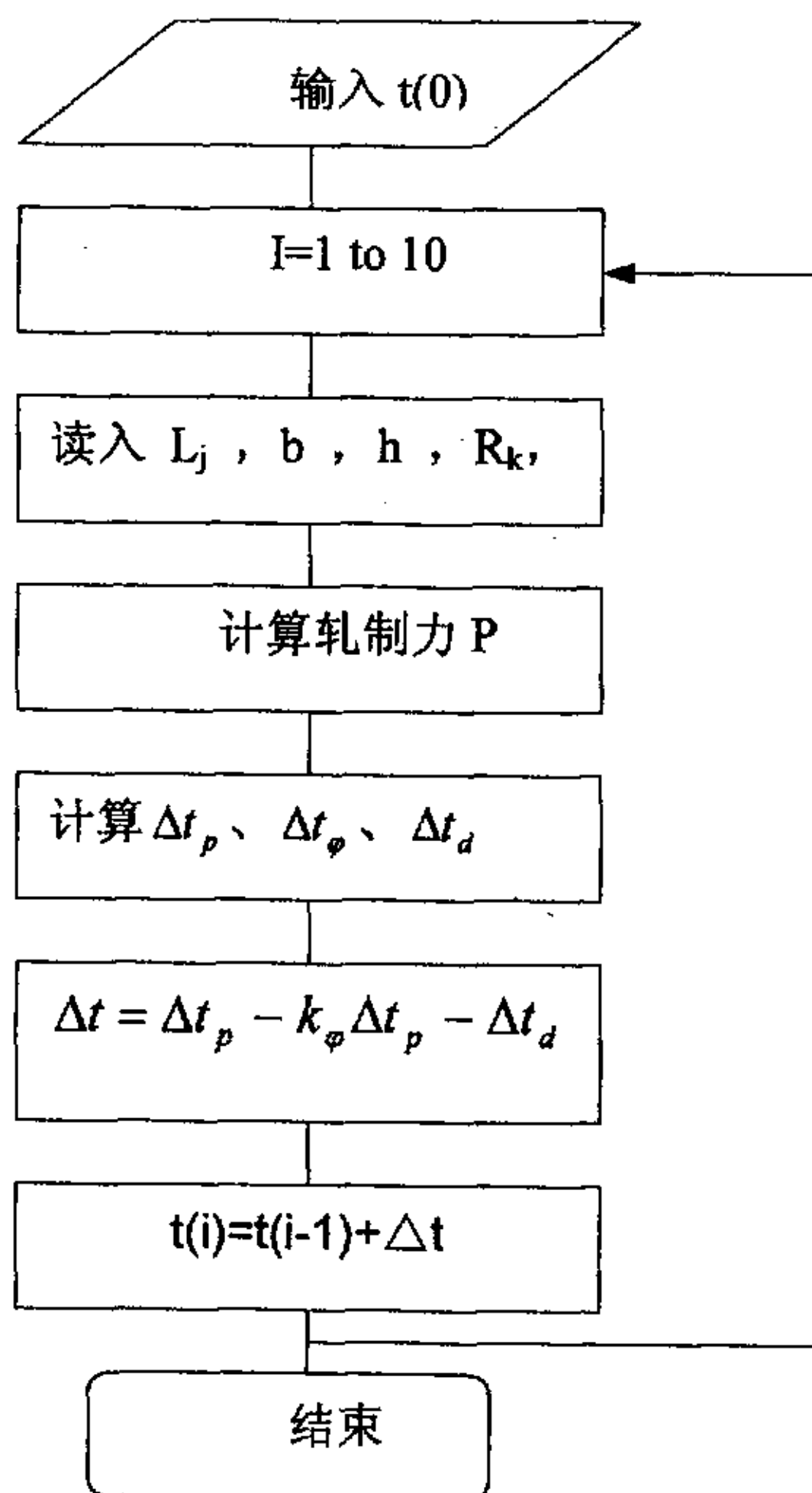


图 2.5 温度计算程序框图

Fig 2.5 flow diagram of calculating temperature

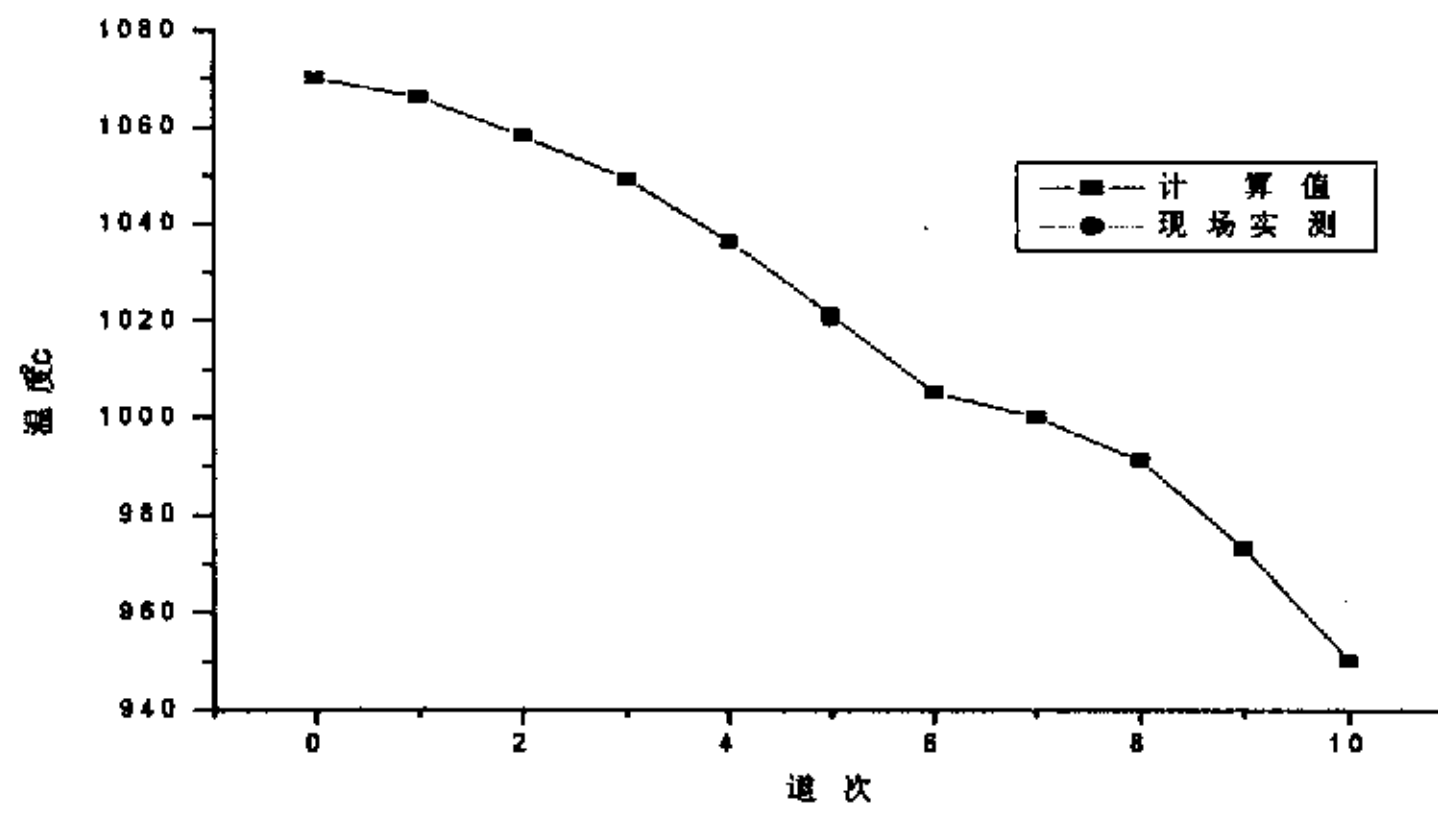


图 2.6 计算温度与现场实测温度的比较

Fig 2.6 Comparison between calculative and metrical temperature

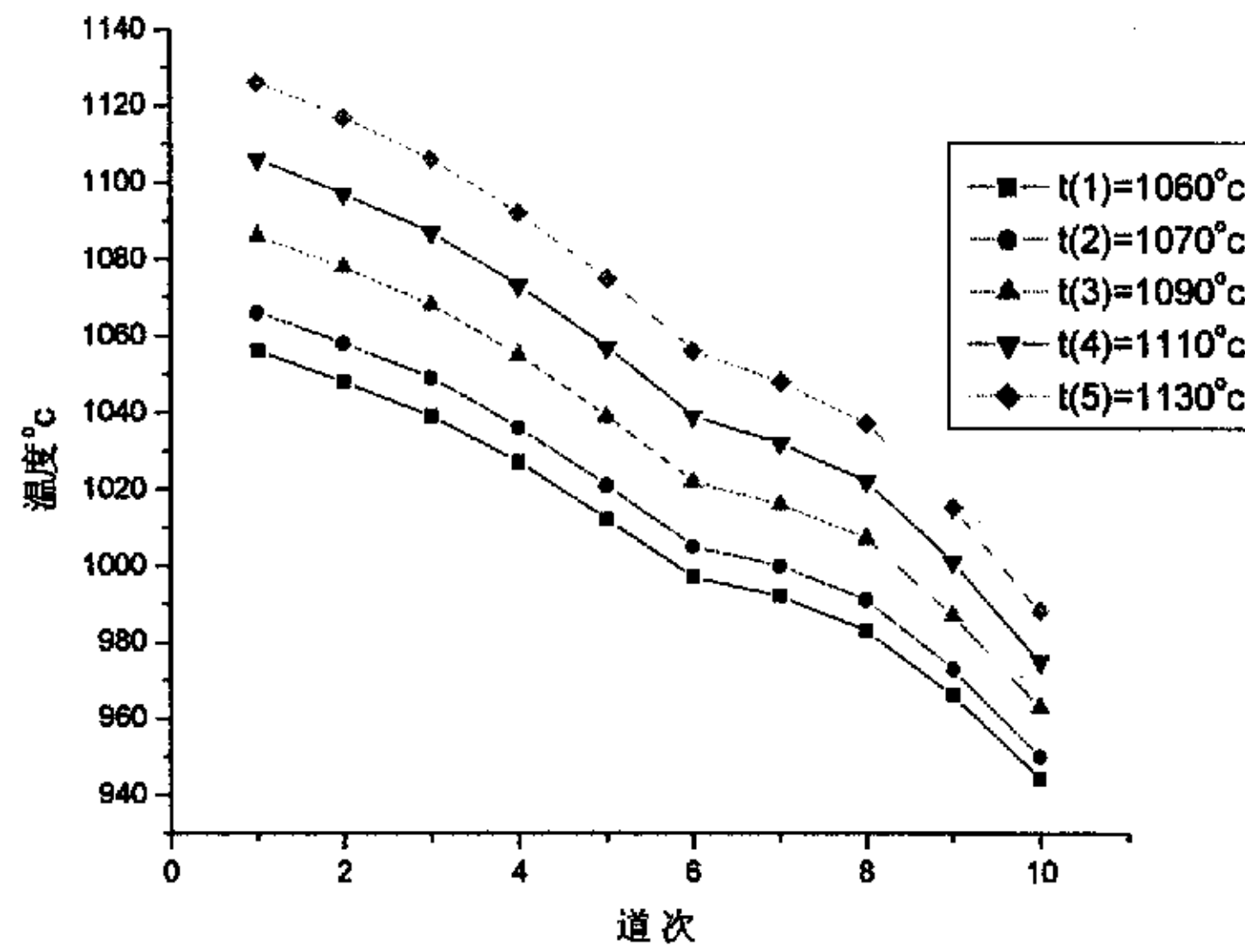


图 2.7 不同开轧温度下各道次温度值

Fig 2.7 gate temperature at different beginning rolling temperature

### 第三章 力能参数计算与负荷优化

#### 3.1 力能参数计算

##### 3.1.1 平均单位压力计算模型

接触压力公式<sup>[23]</sup>:

$$p = n_{\beta} n_{\sigma} n_{\alpha} \sigma \quad (3.1)$$

式中:  $n_{\beta}$  — 考虑平均主应力的影响, 即轧件宽度的影响系数 ( $1.0 \leq n_{\beta} \leq 1.15$ ), 在初轧机上轧制时, 可取  $n_{\beta} \approx 1.15$ ;

$n_{\sigma}$  — 考虑外摩擦对接触压力影响的应力状态系数;

$n_{\alpha}$  — 考虑外区对几何变形区的影响系数;

$\sigma$  — 采用回归式 (2.9) 式;

B. C. 斯米尔诺夫在按公式 (3.1) 计算接触压力时按下面公式确定  $n_{\beta}$ ,  $n_{\sigma}$  和  $n_{\alpha}$ :

$$n_{\beta} = 1 + \mu / 3 \quad (3.2)$$

$$n_{\sigma} = 1 + (\delta / \varepsilon) (1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2})^2 \quad (3.3)$$

$$n_{\alpha} = 2 - \sqrt{l / H_{cp}} \quad (3.4)$$

$$\delta = 2u l_c / \Delta H$$

$$\mu = 0.55 - 0.00024t$$

$$\varepsilon = \Delta H / H_0$$

其中:  $\mu$  — 摩擦系数;  $t$  — 轧件温度;  $\varepsilon$  — 轧件压下率

按这些公式计算时, 等效断面尺寸按折算宽度法确定。

##### 3.1.2 接触面积的计算

接触面积计算准确与否, 对轧制压力计算的准确程度影响很大, 角钢孔型系统是由箱形孔和蝶式孔组成的。

###### 1. 箱形孔接触面积计算

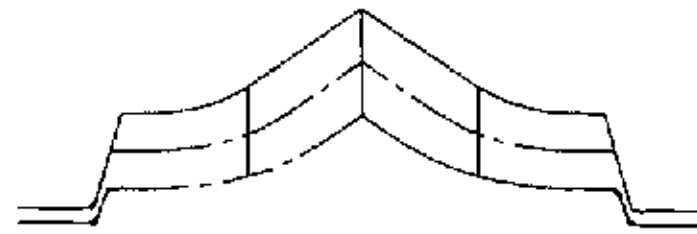
箱形孔变形较为均匀, 其接触面积可按简单轧制条件下的接触面积计算<sup>[24]</sup>, 即:

$$F = \frac{B+b}{2} \sqrt{R \Delta h} \quad (3.5)$$

式中:  $F$ —接触面积,  $\text{mm}^2$ ;  
 $B$ —轧前轧件宽度,  $\text{mm}$ ;  
 $b$ —轧后轧件的宽度,  $\text{mm}$ ;  
 $R$ —轧辊半径,  $\text{mm}$ ;  
 $\Delta h$ —压下量,  $\text{mm}$ ;

## 2. 蝶式孔接触面积的计算

蝶式孔其接触面积形状不规则, 为了保证角部的充满, 其中间变形量大于边部变形量, 不均匀变形严重。一般常规处理方法为利用平均高度法将其折算为箱形孔作处理, 但这种方法误差较大, 在做孔型优化过程中, 要求各方面的计算尽可能接近实际, 为此在计算蝶式孔接触面积时, 将孔型分成若干份数, 如下图所示:



其中对每一份做矩形孔处理即  $F_i = \frac{B_i + B_1}{2} \sqrt{R_i \Delta h_i}$ , 而蝶式孔的接触面积为

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \quad n \text{ 为孔型分成的份数}$$

蝶式孔在轧制过程中, 轧制力在宽度方向上变形不均匀, 这种方法中分割的份数越多, 其精确度越高, 越接近实际。

在计算蝶式孔接触面积时, 通过编制接触面积计算程序来计算各道次接触面积。接触面积程序框图如图 3.1 所示。

### 3.1.3 轧制压力 $P$

轧件对轧辊的总压力  $P$  为轧制平均单位压力  $p$  与轧件和轧辊接触面积  $F$  之乘积, 即

$$P = pF \quad (3.6)$$

式中:  $P$ —轧制总压力;

$p$ —轧制平均单位压力;

$F$ —轧辊接触面积  $F$ ;

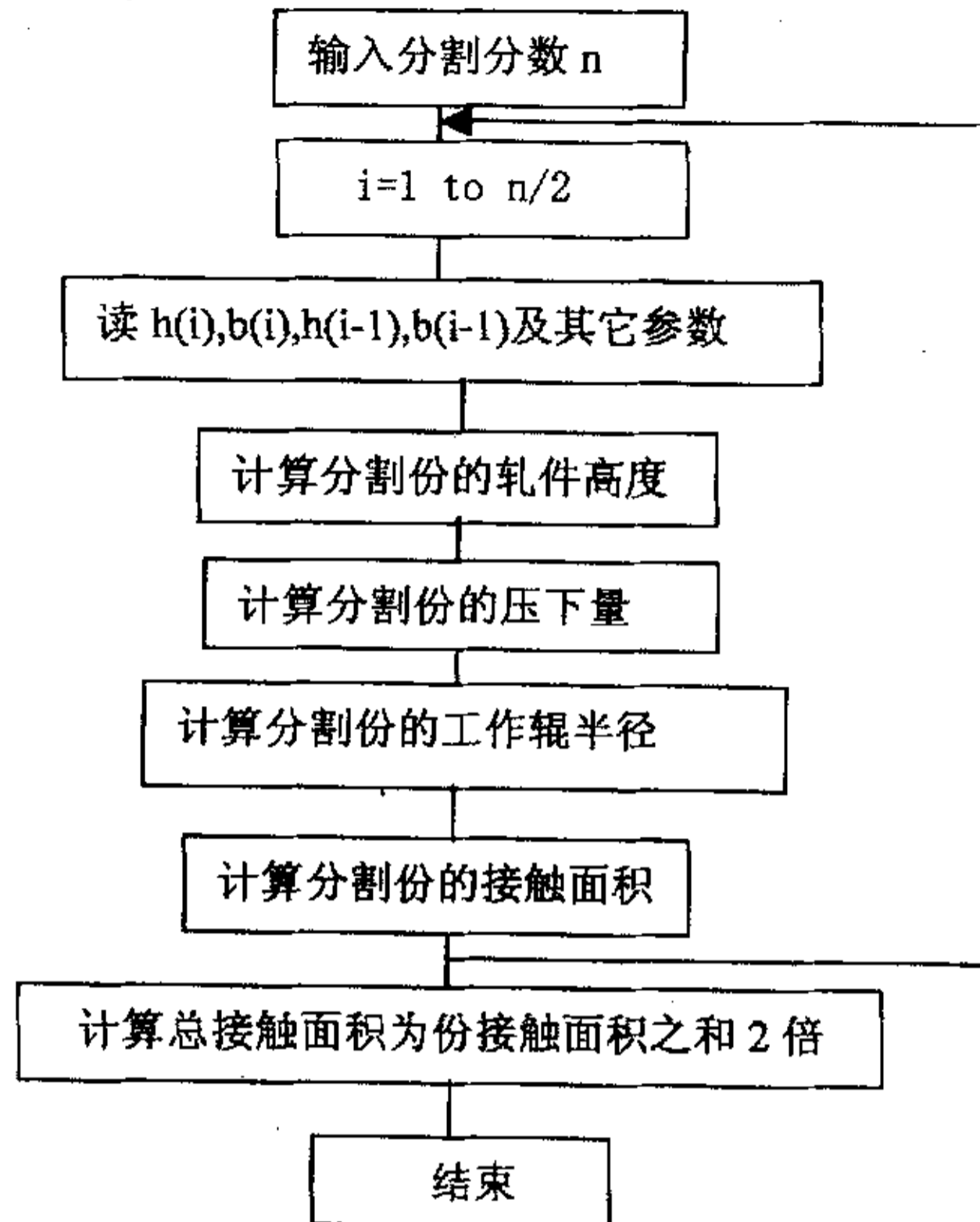


图 3.1 接触面积计算程序框图

Fig 3.1 Flow diagram of accounting for touching area

轧制平均单位压力  $p$  按式 (3.1) 计算, 轧辊接触面积粗轧孔型按平均高度法计算, 蝶式孔按分割法计算。

#### 3.1.4 平均高度法和分割法计算轧制力的比较分析

轧制力的计算是求接触面积和平均单位压力两个问题。由于角钢轧制是在异型孔内轧制, 为了找到更接近现场的轧制力, 故选择平均高度法和分割法按现场实际孔型参数进行计算, 并将计算的各道次的轧制负荷与现场数据进行比较, 从中选择一个符合现场生产实际的轧制力计算公式并根据现场数据进行修正, 以保证计算的可靠性。

生产条件: 原料尺寸  $165 \times 280 \times 3200\text{mm}$  连铸坯, 钢种 16Mn, 成品规格为 No20 角钢。开轧温度为  $1150^\circ\text{C}$ , 辊缝值为下表 3.1 所示, 计算结果数据如表 3.2:

表 3.1 辊缝值

Table 3.1 numerical value of roller gap of rolling units: mm

道次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
辊缝 (mm)	15	15	15	15	15	10	10	10	10	12

表 3.2 平均高度法和分割法负荷比较值

Table 3.2 Comparison of value between of average high and dividing method

机架 \ 负荷值 (%)	平均高度法	分割法
1	43.9	43.9
2	128.6	128.6
3	80.3	80.3
4	114.5	114.5
5	68.5	68.5
6	41.1	52.3
7	38.3	42.9
8	33.2	40.5
9	25.2	30.1
10	21.9	23.4

### 3.1.5 轧制功率的计算

在计算轧制负荷电耗时，需要对中间力矩、各种影响因素进行计算。由轧制力，可解出其它各参量。

#### 1. 轧制力矩模型

$$M = 2p\Psi_n\sqrt{R\Delta h} \quad (3.7)$$

式中： p—轧制力；

$\Delta h$ —压下量；

R—轧辊半径；

$\Psi_n$ —力臂系数；

力臂系数  $\Psi_n$  在前三道次时按 (3.8) [25] 式计算：

$$\Psi_n = 0.997 - 1.414(l_c/H_{cp}) + 0.83(l_c/H_{cp})^2 \quad (3.8)$$

式中  $l_c$ —变形区长度， $H_{cp}$ —平均高度

$$H_{cp} = 0.5 \times (H_0 + H_1)$$

$$l_c = \sqrt{\Delta H D_p / 2}$$

力臂系数 $\Psi$ 在其他道次时按 M. A. 扎伊科夫—H. A. 费奥多罗夫 (Ф е д о р о в) 公式确定:

$$\Psi_n = A_0 - A_1(l_c / H_{cp}) + A_2(l_c / H_{cp})^2 - A_3(l_c / H_{cp})^3 \quad (3.9)$$

式中  $l_c / H_{cp}$ —按等效断面计算的变形区形状系数;

$A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ —系数,按断面形状取以下值

表 4.3 系数表

Table 4.3 Table of modulus

系数	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
角钢	7.0	13.4	8.9	1.9

## 2. 电机轴上的力矩

由于电机额定功率已知,为了便于与现场实测负荷进行比较,应将轧制功率由电机轴上换算到电机上。

轧制时的能量消耗一般是以电机负荷大小测量的。计算电机功率时,仅确定驱动轧辊所需的力矩是不够的,因为电动机轴上所需力矩,除轧制力矩外,还有附加摩擦力矩、空转力矩等,这些都应当予以考虑。

一般来说,传动轧辊电机轴上所需力矩,由以下四部分组成<sup>[26]</sup>:

$$M_{\Sigma} = M_r + M_f + M_0 + M_d \quad (3.10)$$

式中:  $M$ —轧制力矩,此即为使轧件产生塑性变形所需的力矩;

$M_f$ —克服轧制时发生在轧辊轴承、传动机构中的附加摩擦力矩;

$M_0$ —空转力矩,即克服空转时的摩擦力矩;

$M_d$ —动力矩,此力矩是为了克服速度变化时的惯性力所必需的。而在此处,现场轧机、轧辊速度是恒定的,为匀速轧制,故可取  $M_d=0$ 。

$$\text{由此可知: } \therefore M_{\Sigma} = \frac{M}{i} + M_f + M_0 \quad (3.11)$$

各部分计算方法如下:

### (1) 附加摩擦力矩



组成附加摩擦力矩有两项，一为轧辊轴承中的摩擦力矩，另一项为传动机构中的摩擦力矩。

i. 附加摩擦力矩

对两轧辊而言，此力矩值为：

$$M_{f1} = Pd_1f_1 \quad (3.12)$$

式中：P—作用在四个轴承上的总负荷，它等于轧制力；

$d_1$ —轧辊辊径直径；

$f_1$ —轧辊轴承中摩擦系数，它决定于轴承构造及其工作条件，结合唐钢中型厂实际，取  $f_1=0.03$ ；

ii. 传动机构中的摩擦力矩  $M_{f2}$

这部分力矩即齿轮机座、减速机座和连接轴等机构中的附加摩擦力矩，一般它们由传动效率决定：

$$M_{f2} = \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \frac{M + M_{f1}}{i} \quad (3.13)$$

则总的附加摩擦力矩<sup>[27]</sup>：

$$M_f = \frac{M_{f1}}{i} + M_{f2} \quad (3.14)$$

(2). 空转力矩

空转力矩就是不轧钢时传动轧机主机列所需的力矩，一般是根据旋转零件的重量在轴承中引起的摩擦力来计算。

在轧机主机列中有许多机构，如轧辊、连接轴、人字齿轮及飞轮等，各有不同的重量及不同的轴径直径和摩擦系数。因此必须分别计算。显然空载转矩应等于所有转动机件空转力矩之和，当换算至主电机轴上时，则转动每一部件所需力矩之

$$M_0 = \sum M_{0n}$$

式中： $M_{0n}$ —换算到主电机轴上的转动每一个零件所需的力矩。

按上式计算甚为复杂，通常可按经验办法来确定：

$$M_0 = (0.03 \sim 0.06) M_H \quad (3.15)$$

式中： $M_H$ —电动机的额定转矩。

对新式轧机可取下限，对旧式轧机可取上限，在此取  $M_0=0.06M_H$

故总力矩可按下式计算：

$$\therefore M_{\Sigma} = \frac{M}{i} + M_f + M_0 \quad (3.16)$$

$i$ —电动机与轧机之间的传动比；

$\eta$ —从主电机到轧机的传动效率，一级齿轮传动的效率一般取 0.96~0.98，皮带传动效率取 0.85~0.90，在此取  $\eta=0.97$ 。

### 3. 电动机功率

由上述力矩可计算电动机功率值，即

$$N = 1.03Mn \quad \text{KW} \quad (3.17)$$

$n$ —电动机的转速，r/min。

## 3.2 负荷均衡优化

### 3.2.1 相对等负荷

相对等负荷是指当中型轧机各机架的主电机功率不相等时，若按等负荷分配，则会造成小容量主电机，能力不足；而大容量主电机，不能充分发挥其能力。这种情况，可按各机架主电机的相对等负荷来制定轧制规程，即主电机容量大的轧机，让其多消耗一部分轧制功率；容量小的轧机，让其少消耗一部分轧制功率。采用上述方法可按设备所能，分配各机架轧制功率，不仅充分发挥设备能力，而且可避免由于相对负荷分配不均，而造成个别轧机损坏的现象发生。

利用相对等负荷技术对中型轧制规程进行优化设计，可以从两方面入手：一是调整轧辊辊缝，来改变轧制负荷，使负荷趋于相对相等。但是，辊缝的调整量受轧件质量的限制，当调整量大时，孔型充不满或出耳子，影响型材产品质量；调整量小时，起不到均衡负荷的作用。二是利用优化方法，修改孔型尺寸，从而达到均衡轧件负荷的目的。

### 3.2.2 目标函数和约束条件

#### 1. 轧机负荷均衡优化的目标函数

$$\text{目标函数负荷均衡: } \min S = \sum_{i=1}^n (N_i - \Psi N_{ei})^2 \quad (3.18)$$

$$\text{轧机负荷系数: } \Psi = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\sum_{i=1}^n N_{ei}} \quad (3.19)$$

$$N_i = 1.03 M_i n_i \quad (3.20)$$

式中:  $n$ —轧制道次;

$N_{ei}$ —第  $i$  机架主电机额定功率;

$N_i$ —第  $i$  机架主电机实际轧制功率;

$M_i$ —第  $i$  机架电机力矩;

$n_i$ —电机转速;

该目标函数表明各道次轧制功率与负荷系数和额定功率之积的差平方之后的总和达最小, 即为轧机的负荷达到相对均衡。

## 2. 约束条件

在求目标函数的过程中, 是受许多约束条件影响和制约的。在进行角钢的轧制过程中, 约束条件可以归纳为以下几个方面

### 1. 最大压下量

按轧辊对金属的咬入条件确定的最大压下量可由已知公式求出:

$$\Delta H_{\max \alpha} = 2D_p \sin^2([\alpha]/2) \quad (3.21)$$

式中  $\Delta H_{\max \alpha}$ —最大压下量

$D_p$ —轧辊平均工作直径

$\alpha$ —允许最大咬入角, 钢辊取  $24^\circ$ , 铁辊取  $22^\circ$ 。

要满足轧件进入孔型的咬入角要求, 保证轧件顺利咬入

### 2. 轧辊强度条件

型钢轧机的轧辊沿辊身长度布置有许多孔型轧槽, 此时轧辊的外力(轧制压力)可以近似地看成是集中力。轧件在不同的轧槽中轧制时, 外力的作用点是变动的。所以要分别判断不同轧槽过钢时轧辊各断面的应力, 进行比较, 找出危险断面。

通常对辊身强度只计算弯曲应力, 对辊径强度则计算弯扭合成应力计算, 对传动端轴头强度只计算扭转应力。

危险断面的辊身的弯曲应力必须小于许用应力，辊径的弯扭合成应力必须小于许用应力，传动端轴头的扭转应力必须小于许用扭转应力。

由于在计算轧辊强度时未考虑疲劳因素，故轧辊的安全系数一般取  $n=5$ ，轧辊材料的许用应力，可参考以下数据：

对于铸钢轧辊，当  $\sigma_b = 500 - 600 \text{ MPa}$ ， $R_b = 100 - 120 \text{ MPa}$ ；

对于铸铁轧辊，当  $\sigma_b = 350 - 400 \text{ MPa}$ ， $R_b = 70 - 80 \text{ MPa}$ ；

3. 电机能力：要求轧机主电机在轧制过程中不过热，不过载

$$M_{\max} \leq \lambda M_0; \quad (3.22)$$

式中  $M_{\max}$ ——轧制周期内主电机最大静力矩

$\lambda$ ——过载系数

在以上三个约束条件同时满足的条件下，离散后的孔型尺寸才可以成立，才可形成轧辊上的孔型。

对于验证后不符合约束条件的，可令其轧制压力等于一个足够大的数，例如  $10^{10}$ ，则进行优化计算时，可不选此数值。

### 3.2.3 优化方法

#### 1. 优化方法的选取

在中型轧制角钢的生产中，由连铸坯轧制角钢的孔型系统为蝶式孔型系统。角钢在蝶式孔中轧制时，其过程和扁钢轧制类似。边厚逐渐减薄，而宽度逐渐增加。在确定轧件尺寸的时候，当每道次的压下量不同时，宽展量也会不同，即每道压下量不同，轧件的尺寸也就不同。而压下量变化，则导致轧制压力、轧制力矩和轧制功率的变化。中型轧制角钢的过程中，除第一道次的宽度成为下一道次的高度，剩下的道次都是前一道次的高度是下一道次的高度，若前一道次的有几个压下量  $\Delta h$  时，后一道次的来料将会有几个相应的高度。这样就使角钢各道次轧制具有多阶段决策过程的特点，因此可采用动态规划法对孔型进行优化设计。

因为本孔型的设计基础是将现场孔型离散，即取现场孔型在中间，向两头离散，其平均厚度和宽度基本等于现场孔型。变形量的离散根据离散范围和轧机调整精度来确定。离散间隔在  $0.2 - 0.5 \text{ mm}$ 。为与现场采用的孔型做比较并且使计算结果与

实际相符合，以现场孔型为基础，各道次轧件压下量以现场采用的压下量向大小两个方向以等间隔进行离散，便得到一系列不同尺寸的轧件。由于不同尺寸的轧件使轧机所承受的负荷不同，因此可以在这些不同尺寸的轧件中通过优化方法来选择轧机负荷相对均衡的轧件尺寸，再根据轧件尺寸构成孔型。

## 2. 动态规划法的简介、应用及框图

### (一) 动态规划法简介与应用

动态规划法是基于“最优化原理”的一种方法<sup>[28]</sup>。它把 N 阶段决策过程化为一系列 N 个单阶段决策过程，即化为逐一作出决策的 N 个子问题。

最优化原理用数学式表示即为迭代公式：

$$f_k(x_k) = \text{opti}_{\mu_k} \{ g_k(x_k, \mu_k) + f_{k+1}(x_{k+1}) \} \quad (3.23)$$

式中： $x_k$ ——表示第 k 段的状态变量

$\mu_k$ ——第 k 段的决策变量

$f_k(x_k)$ ——表示第 k 段状态为  $x_k$  时的最优值

$f_{k+1}(x_{k+1})$ ——表示第 k+1 段状态为  $x_{k+1}$  时的最优值

$g_k(x_k, \mu_k)$ ——表示第 k 段，当状态为  $x_k$ ，决策变量为  $\mu_k$  时的函数值。

以最优路径问题为例，如图 3.2 所示，要找到一条从 A 点经过 B、C、D 到 E 的最短路线。这和孔型设计中最优负荷分配问题极为相似。

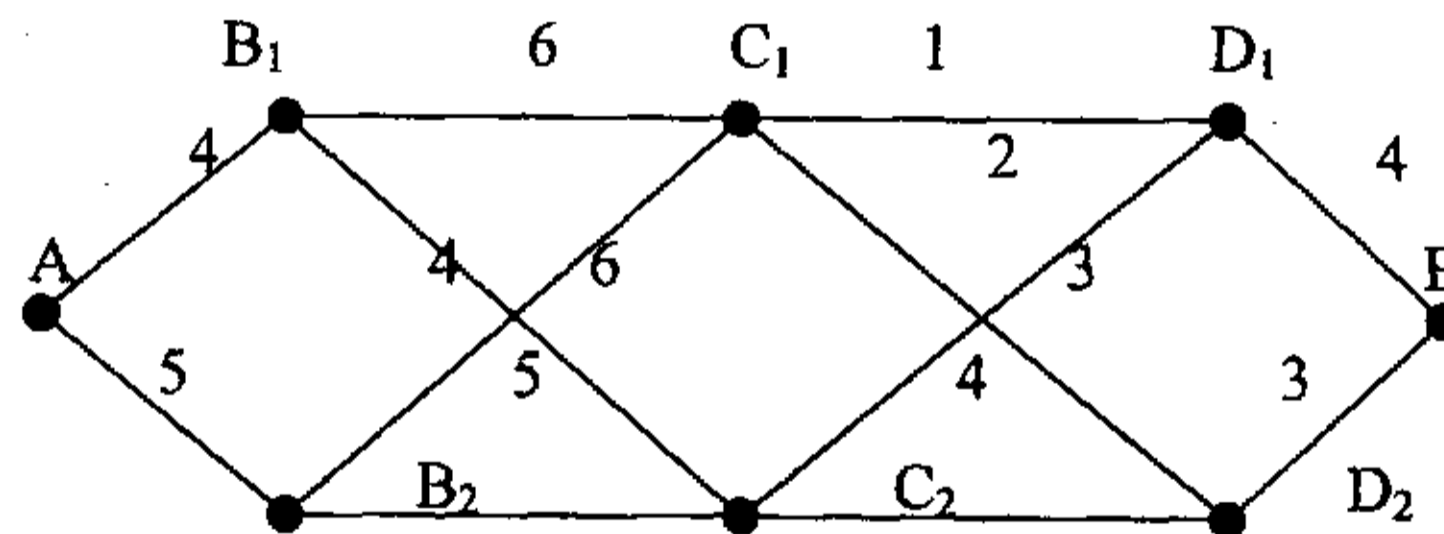


图 3.2 最优路线问题

Fig 3.2 Question of the best route

如应用动态规划法，我们可以把最短路线问题中所考虑的过程分为若干个阶段。从 A→B，B→C，C→D，D→E。因此上述问题可以看成是一个四阶段的过程。

每一阶段开始，我们都面临作出决策，在几条不同的路线中选择一条最优的路线。决策不同，所走的路线也不同。这可以看成是一个多阶段的决策过程。

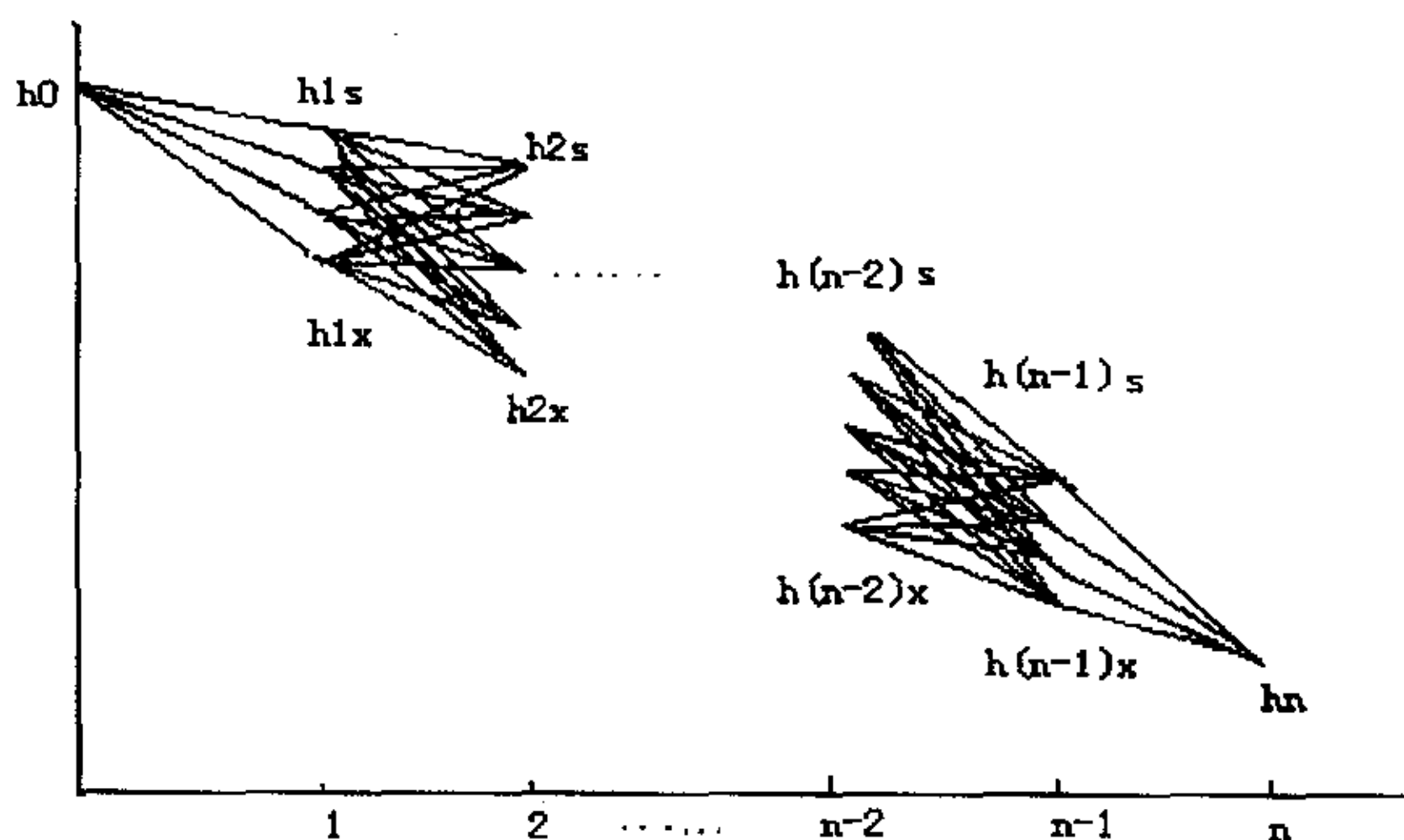


图 3.3 压下规程决策

Picture 3.3 Decision-making of reduction schedule

在孔型设计中，一般轧制道次数都在 10 以上，在进行负荷均衡优化计算时，我们可以把  $N$  道次负荷的计算过程分为  $N$  个阶段，在每一阶段对压下量的取值作出决策，在确定了各道次压下量的取值范围后，就可以根据动态规划法进行计算。此时状态变量就是各道次压下量的变化范围，阶段变量就是各道次负荷的取值。根据 (3.24) 式进行迭代计算即可找出最优解。根据最优的压下量求出负荷均衡的轧件尺寸，然后再根据轧件尺寸构成孔型。

在用动态规划法对孔型进行优化时，对每道次的压下量进行等间隔离散，间隔大小将影响计算精度和优化结果。在离散孔型尺寸时，采用状态变量为压下量，但必须保持来料尺寸和成品孔型尺寸为一定值<sup>[29]</sup>。由于中型轧机组为 10 道次，用离散孔型尺寸求轧制能耗时，必然会使函数成级数倍增长，给计算造成困难，除第二道次采用前一道次实际轧后的宽度外，其余道次都是采用前一道次实际轧后的高度，来分别进入下一道次离散后的每一孔型，简化计算。

(三) 动态规划法解题思路与程序框图。

### 1. 动态规划法解题思路

对于最优路径问题可抽象成设路径有  $N$  段状态。在第  $I$  段，有  $M(I)$  个状态， $I=1, 2, \dots, N$  即每道次压下量的离散个数。也就是说，节点状态有  $N$  段，决策系列有  $N-1$  个。

求解方法就是分段寻优。首先对最后一段进行初始寻优计算，即从状态  $x_{n-1}$  到  $x_n$ ，得到初始最优值。即  $f_{n-1}(x_{n-1})$ ，并确认从倒数第二段的各个节点状态到最后一段的最优决策（即从第九道次到第十道次的相对负荷最小）。其具体步骤为：

第一步：令  $J=1$ 。

第二步：令  $F(N-1, J) = C(N-1, J, 1)$

$$D(N-1, J) = S(N, 1)$$

这里， $F(I, J)$  为从第  $I$  段第  $J$  个状态  $S(I, J)$  到第  $N$  段的最后一个状态的最优决策值。 $I=1, 2, \dots, N-1, J=1, 2, \dots, M(I)$ ； $F(I, J)$  就是我们的目标函数值。

$C(I, J, K)$  为从状态  $S(I, J)$  到状态  $S(I+1, K)$  的决策值。 $I=1, 2, \dots, N-1, J=1, 2, \dots, M(I)$ ； $K=1, 2, \dots, M(I+1)$ ， $C(I, J, K) = (\text{功率} - \text{轧机负荷系数} \times \text{电机额定功率})^2$ 。

$S(I, J)$  为从第  $I$  段第  $J$  个状态。 $I=1, 2, \dots, N, J=1, 2, \dots, M(I)$ ；

$D(I, J)$  为从第  $I$  段第  $J$  个状态  $S(I, J)$  过渡到第  $I+1$  段，在  $I+1$  段上应有的最优状态，或是在  $S(I, J)$  上的最优决策。 $I=1, 2, \dots, N-1, J=1, 2, \dots, M(I)$ ；

在下面的程序中，同名数组的定义与此相同。

注意：第 2 步中的  $S(N, 1)$  是最后一个状态， $C(N-1, J, 1)$  是从  $N-1$  段的第  $J$  个状态到第  $N$  段的第 1 个状态的决策值，而  $N$  段只有一个状态。

第 3 步：如果  $J=M(N-1)$ ，转到第 4 步；否则，令  $J=J+1$ ，转到第 2 步。

第 4 步到第 8 步计算从任一状态到最后状态的最优决策值。并计算从所通过各段的每个状态指向下一段的最优状态。

第 4 步：令  $I=N-2$ 。

第 5 步：令  $J=1$

第 6 步：计算

$$F(I, J) = \min [C(I, J, K) + F(I+1, K)]$$

$$K=1, 2, \dots, M(I+1)$$

如设  $KSTAR$  为产生  $F(I, J)$  的值, 则  $D(I, J) = S(I+1, KSTAR)$

第 7 步: 如果  $J = M(I)$ , 转到第 8 步; 否则, 令  $J = J+1$ , 转到第 6 步。

第 8 步: 如果  $I = 1$ , 转到第 9 步; 否则, 令  $I = I-1$ , 转到第 5 步。

第 9 步到第 16 步用于计算从起始状态  $S(1, 1)$  到最后状态  $S(N, 1)$  的最优决策值, 并计算通过整个网络的最优路线。

第 9 步: 令  $XSTAR(1) = S(1, 1)$

$$XSTAR(2) = D(1, 1)$$

$XSTAR(I)$  为利用整体最优决策所得到的第  $I$  段的最优状态。  $I = 1, 2, \dots, N$ 。

第 10 步: 令  $KK = 1$ 。

第 11 步: 令  $I = 2$ 。

第 12 步: 令  $J = 1$ 。

第 13 步: 若  $S(I, J) \neq D(I-1, KK)$ , 转到第 16 步; 否则, 转到第 14 步。

第 14 步: 令  $XSTAR(I+1) = D(I, J)$ ,  $KK = J$ , 转到第 15 步。

第 15 步: 若  $I = N-1$ , 转到第 17 步; 否则, 令  $I = I+1$ , 转到第 12 步。

第 16 步: 令  $J = J+1$ , 转到第 13 步。

第 17 步: 输出计算结果。

2. 动态规划法的程序框图见图 3.4<sup>[28]</sup>



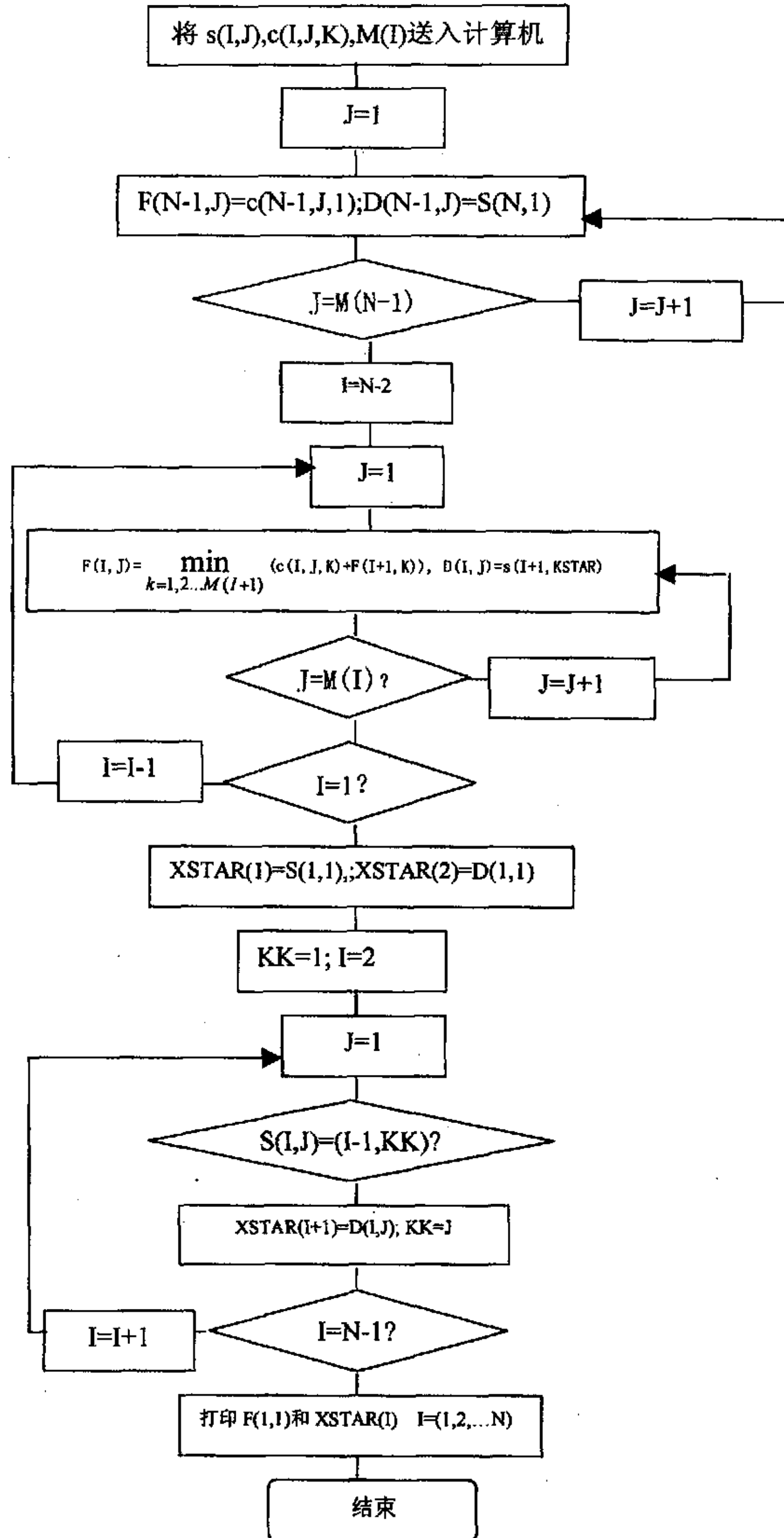


图 3.4. 动态规划法解题程序

Fig 3.4 flow diagram of accounting for question by dynamic programming method

## 第四章 角钢孔型优化设计软件的编制

### 4.1 软件的编制

二十世纪七十年代以后,在轧钢领域开始应用计算机辅助设计(CAD)方面进行了许多开发性研究,并已取得显著的成绩。在型钢生产中,计算机辅助孔型设计(Computer Aided Roll Pass Design)作为重要的辅助设计手段,也已受到人们的重视。型钢品种规格繁多,孔型系统的共用性差,按照传统的设计步骤:选坯料;选孔型系统;计算并分配变形系数和轧制道次;计算轧件及孔型尺寸;画孔型图;以及较核等,计算量大且对设计者的专业知识和实践经验要求较高<sup>[30]</sup>。采用计算机辅助孔型设计,利用计算机技术和图形显示能力,在孔型设计中可以使用考虑了各种影响因素的精确计算模型,并验证一切必要的限制条件,达到高生产率低消耗的要求。采用优化技术,得到最优化设计方案,利用绘图软件包绘制孔型图,并根据程序计算结果随时改变图形尺寸,提高了设计的可靠性,缩短了设计周期<sup>[31]</sup>。角钢辅助孔型设计 CAD 系统的基本思想是针对角钢孔型变形过程中无中间方变形,矩形坯料经切分后腿部中心线位置保持不变的特点建立数学模型,结合实践经验参数生成孔型图,可以根据需要进行分析、判断、修改,最后高效和准确地获得孔型图。本软件以 VB 语言编程调用 AutoCAD2002 进行参数化绘图<sup>[32][33][34]</sup>,实现了孔型几何参数与图形的交换<sup>[35]</sup>,赋予了 AutoCAD“参数制图”(PARAMETRICDESIGN)的能力<sup>[36]</sup>。Visual Basic 为事件驱动程序设计语言,它继承了 Basic 语言简单易用的优点,吸取了 C 语言丰富的长处,能开发出同 Windows 界面效果一致的软件,Visual Basic 的问世开辟了程序设计的新天地<sup>[37][38][39][40][41][42][43][44]</sup>。与传统手工设计相比,本软件设计的最大优点是:速度快,大大缩短设计时间,从准备工作到计算机画出图纸,整个过程仅需 5Min;可靠性高,CARD 软件可对孔型参数进行优化,设计出最佳孔型,提高轧件的尺寸精度,达到节能、节材、提高产品质量的目的。

### 4.2 软件的简介

本软件是采用 VB 语言及 AutoCAD 绘图软件开发,采用模块化设计思路<sup>[45]</sup>,将各个功能模块作为独立单元进行设计,既可单独使用,又可通过模块间的参数传递

进行集合使用。设计者只需输入坯料尺寸、开轧温度等数据并对现场参数中的原始数据予以适当修改，即可进行各道次力能参数的计算和负荷均衡的优化计算，并能根据设计结果生成孔型图。

本系统采用 Visual Basic 6.0。程序设计语言，软件的图形用户界面开发窗体和模块两个部分内容，窗体直接为界面服务，包括：主窗体(MDIForm1.frm)、原始数据窗体(frmsuju.frm)、参数窗体(frmcanshu.frm)、数据结果窗体(frmdocument.frm)、孔型参数窗体(frpkxs.frm)以及 9 个输出窗体；模块包括两个模块：计算和优化模块和画图模块。本软件主要程序流程图见图 4.1。

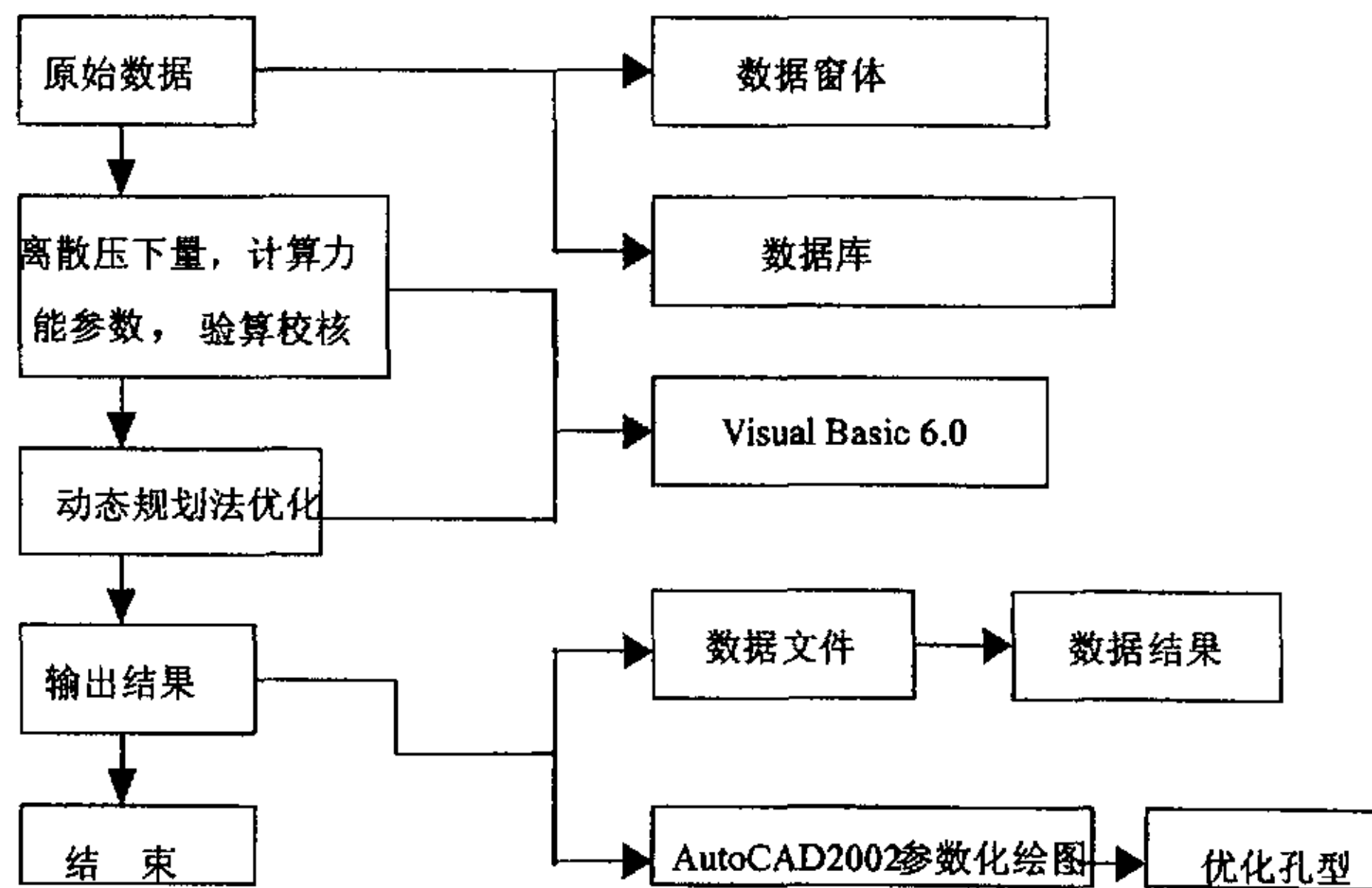


图 4.1 程序设计框图

Fig 4.1 Diagram of programmer

### 4.3 模块设计

本软件为模块化设计，主要有两大模块：计算模块和绘图模块。模块执行顺序框图见图(4.2)。

#### 4.3.1 计算模块

计算模块进行压下量的离散、离散后轧件尺寸计算、轧制力能参数计算、温度计算、设备能力较核、轧辊强度较核和进行负荷均衡优化以及计算优化后的孔型几何尺寸。运算部分程序框图见图 4.3。

### 4.3.2 绘图模块

该模块的作用是利用计算的各孔型尺寸，自动生成各孔的孔型图<sup>[46]</sup>，绘图程序框图见图 4.4。

#### 1. 设计思路

要使计算机辅助孔型设计能真正起作用，就必须让其具有参数绘图能力，但是，对于高级语言（Visual Basic 6.0）来说，其计算能力较强而绘图能力却相对较差。对于绘图软件（AutoCAD2002）来说恰好相反，计算能力差而绘图能力强，这样设计者自然而然地想到用高级语言计算，用 AutoCAD 软件绘图。这就要求高级语言和绘图软件之间要有接口，设计者给出参数，经高级语言处理后能够调用 AutoCAD 绘出所需的图形<sup>[47]</sup>。

#### 2. Visual Basic 6.0 与 AutoCAD2002 的连接

VBA 是 AutoCAD2002 的内嵌式语言，它的全称是 Visual Basic for Application。它是基于 Visual Basic 6.0 版本，完全面向对象体系结构的一种编程语言，所以它有着与 VB 几乎相同开发环境和语法；它的功能强大，可以说是一个万能开发工具。由于 VBA 是依附于 AutoCAD 的，所以其与 AutoCAD 共享内存空间，数据环境。VBA 语言结构简单，即可利用 AutoCAD 主界面操作环境，也可创造自己所需的主界面操作环境<sup>[48]</sup>。但是它也存在一定的缺点。为了克服这些缺点，使用 Visual Basic 6.0 开发 AutoCAD。

转化 VBA 代码为 VB 代码，首先要引用 AutoCAD type library。在 VB6.0 中，选择工程—“引用”，然后在“引用”对话框选择 AutoCAD2000 type library。下一步，将 VBA 代码中所有的 Thisdrawing 替换成一个用户定义的代表当前活动文档的变量：为 AutoCAD 应用程序（acadApp）和当前文档（acadDoc）定义一个变量，然后设置应用程序变量为当前 AutoCAD 应用程序。

如果 AutoCAD 正在运行，则 GetObject 方法取得 AutoCAD 应用程序对象。如果 AutoCAD 没有运行，则返回一个错误。捕捉这个错误并清除它，然后用 Creat Object 方法尝试建立一个 AutoCAD 应用程序对象。如果成功，则 AutoCAD 启动；如果失败，则显示一个消息框说明错误原因<sup>[49]</sup>。

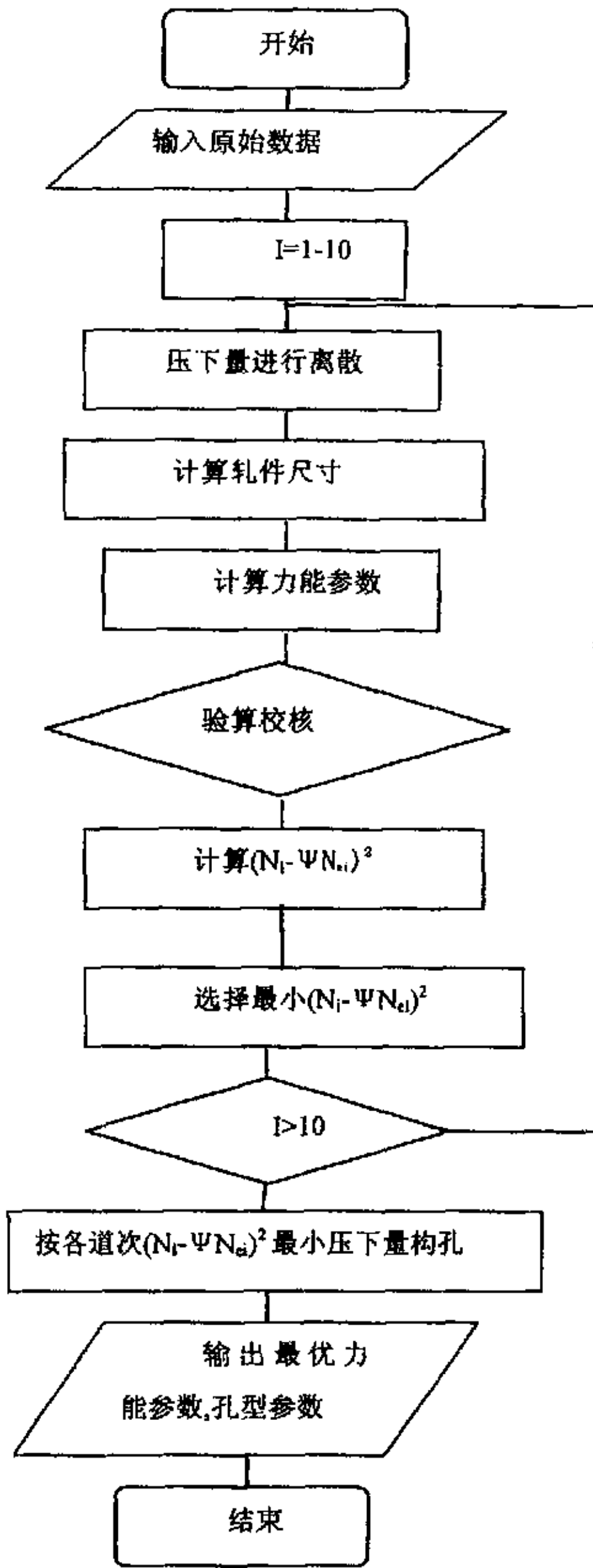


图 4.3. 计算模块框图

Fig 4.3 Diagram of calculating module

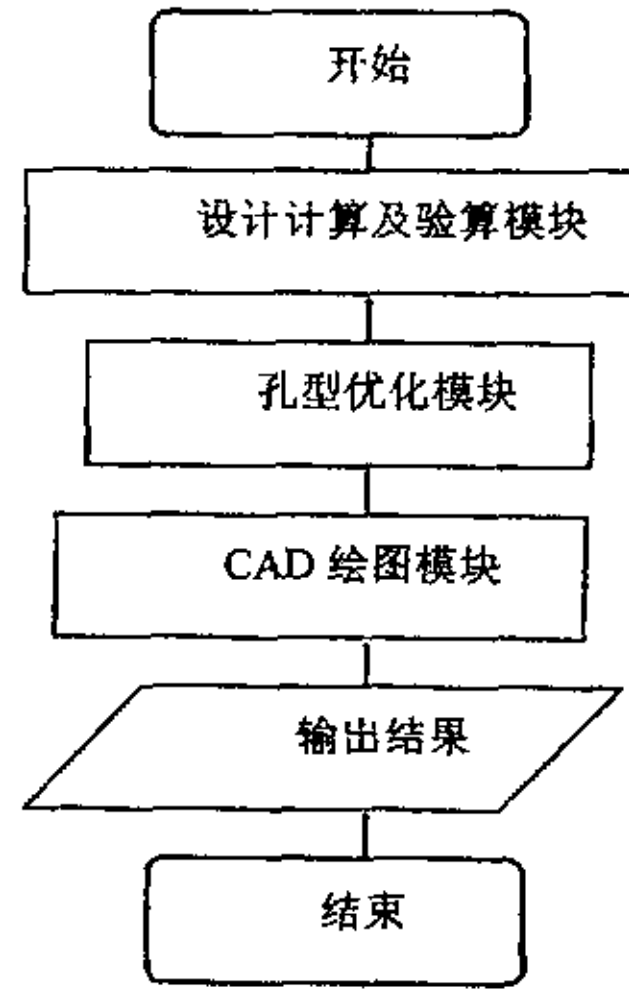


图 4.2. 模块顺序框图

Fig4.2 Diagram of implementing order module

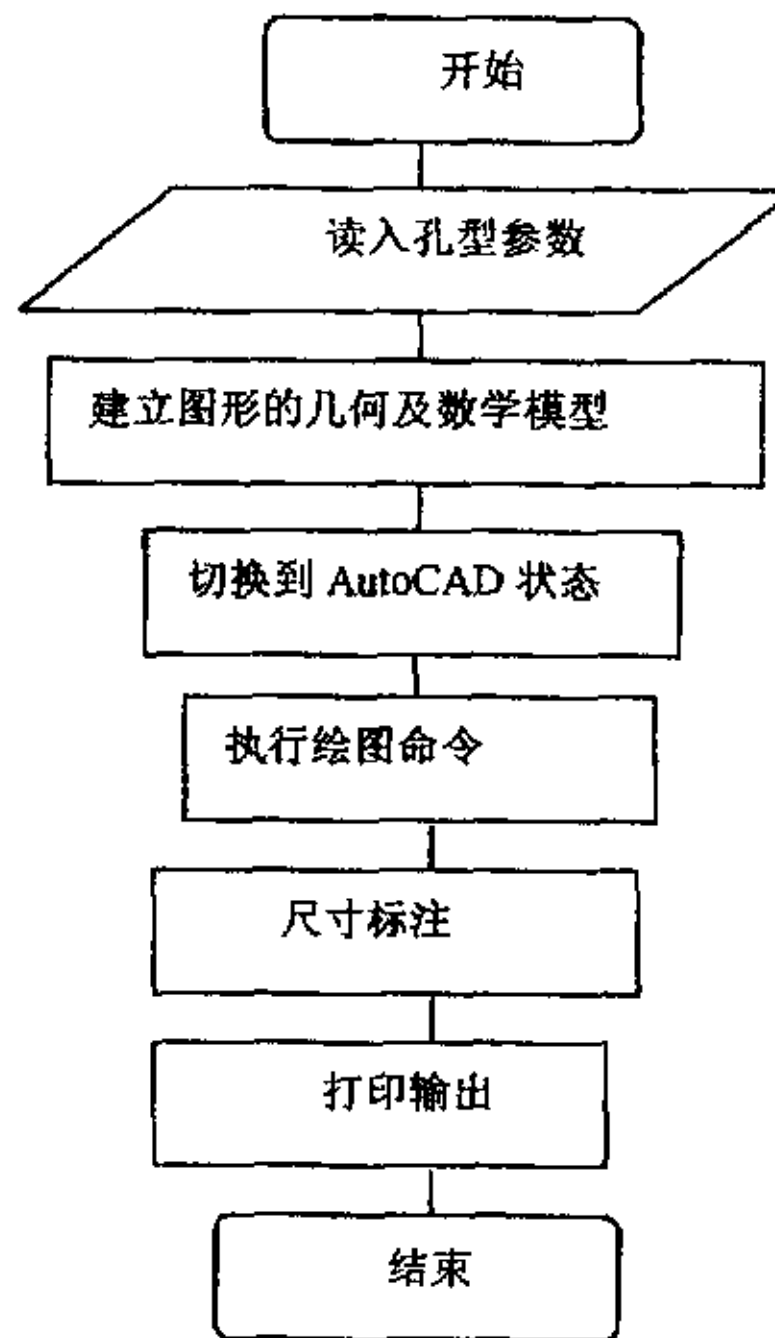


图 4.4 绘图模块框图

Fig4.4 Diagram of plotting module

### 3.建立图形的几何及数学模型

利用 AutoCAD 软件进行绘图时，首先确定一些特征点的坐标，根据特征点计算绘图点，然后利用 AutoCAD 的直线、圆弧绘图命令，把这些绘图点连接起来，即可绘出完整的孔型图。绘图点由特征点两边夹角和圆角半径来确定。

### 4.尺寸标注

标注是绘制 AutoCAD 图形的一个重要工作。标注对象在图形中属于图形对象，用于标识对象的几何尺寸、对象之间的距离或者角度，或者是特征点的 X 和 Y 坐标值<sup>[50]</sup>。

#### 4.3.3 计算模块和绘图模块的数据传递

计算模块和绘图模块的数据传递靠绘图窗体 (frmkxt.frm) 来实现。通过输出菜单中的绘制孔型图命令调用 AutoCAD 可进行优化前后孔型图参数化自动绘制。优化后孔型图见附录 C。

## 4.4 软件主窗体各部分介绍

程序开始运行，首先进入主界面窗体，如图 4.5 所示。主界面窗体为 MDI 多文档界面窗体，其他都为子窗体。该窗体包括文件、数据输入、现场参数、输出、运算、窗口、帮助等菜单项，并通过菜单管理各子窗体。

### 1.文件菜单

文件菜单主要有以下功能：

- ◇ 打开：提供打开对话框，允许用户选择打开数据文件；
- ◇ 关闭：关闭当前活动窗体；
- ◇ 保存：保存程序运行所得各轧件尺寸、力能参数、孔型参数等数据结果；
- ◇ 另存为：将结果数据存入其它位置；
- ◇ 打印设置：提供打印设置对话框，允许用户选择打印机、打印纸大小和打印方向
- ◇ 打印：提供打印对话框，用户可选择打印的范围、打印份数，然后打印所选的窗口或运行结果；
- ◇ 退出：退出应用程序。

离散序号	压下量	轧件高	轧件宽	断面积	轧速	取高	取宽
1 1 1	30	250	185.01	48252.5	1707.	185.01	250
2 1 1	58	127.01	262.76	33373.1476	2231.86	127.01	262.76
2 1 2	58.2	126.81	262.804	33326.17524	2232.71	126.81	262.8
2 1 3	58.4	126.61	262.848	33279.18528	2233.57	126.61	262.85
2 1 4	58.6	126.41	262.892	33232.17772	2234.42	126.41	262.99
2 1 5	58.8	126.21	262.936	33185.15256	2235.27	126.21	262.94
2 1 6	59	126.01	262.98	33138.1098	2236.13	126.01	262.98
2 1 7	59.2	125.81	263.024	33091.04944	2236.98	125.81	263.02
2 1 8	59.4	125.61	263.068	33043.97148	2237.83	125.61	263.07
2 1 9	59.6	125.41	263.112	32996.87592	2238.69	125.41	263.11
2 1 10	59.8	125.21	263.156	32949.76276	2239.54	125.21	263.16
2 1 11	60	125.01	263.2	32902.632	2240.39	125.01	263.2
3 1 1	29.6	97.41	272.617	26595.62197	2358.18	96.41	272.84
3 1 2	29.8	97.21	272.663	26507.51443	2359.03	96.21	272.9
3 1 3	30	97.01	272.75	26459.4775	2359.88	96.01	272.97
3 1 4	30.2	96.81	272.817	26411.41377	2360.74	95.81	273.04
3 1 5	30.4	96.61	272.883	26363.22663	2361.59	95.61	273.1
3 2 1	29.6	97.21	272.661	26506.37581	2359.03	96.41	272.84
3 2 2	29.8	97.01	272.727	26457.24627	2359.88	96.21	272.9
3 2 3	30	96.81	272.794	26409.18714	2360.74	96.01	272.97
3 2 4	30.2	96.61	272.861	26361.10121	2361.59	95.81	273.04
3 2 5	30.4	96.41	272.927	26312.89207	2362.45	95.61	273.1
3 3 1	29.6	97.01	272.705	26435.11205	2359.88	96.41	272.84

图 4.5 主界面窗体

Fig4.5 Primary interface window

## 2. 数据输入

通过数据输入菜单命令加载数据输入子窗体 `frmshuju` 以及 `frmlisan` 窗体。通过使用可视化数据库管理器建立一个离散数据库（Microsoft Access 数据库），并在这个数据库中建立三个（成品厚为 14、16、18）离散数据表。`frmlisan` 窗体通过 `data` 控件连接到 Microsoft Access 数据库，再由数据绑定控件 `DBGrid` 控件与 `data` 控件绑定，从而实现读取数据库中的数据并以电子表格的形式动态显示在 `frmlisan` 子窗体中。数据库中存放的是进行离散计算时所需要的离散数据，其中包括各道次的现场压下量、离散个数和离散间隔。使用者可根据现场实际情况，对数据库及数据窗体中的原始数据进行修改，修改结果可动态显示并存入数据库<sup>[51]</sup>。

## 3. 计算

运算模块为整个程序计算的核心部分，包括离散压下量后轧件尺寸计算、轧件断面积计算、咬入条件和强度条件的校核、轧制压力轧制功率计算、接触面积计算、电机功率计算等，并利用动态规划法进行轧制负荷的均衡优化计算，得出负荷

相对均衡的优化孔型尺寸。通过运算命令的执行，可最终完成轧制负荷的均衡优化。

计算所得力能参数、孔型参数以及优化结果以数据文件（图 4.6、图 4.7）的形式存盘，通过文件菜单中的打开命令显示在屏幕上或通过打印机打印输出。

#### 4.输出

包括表格输出与图形输出两种形式。表格输出又分为优化前后轧机负荷表（图 4.8）和优化前后孔型参数表（图 4.9），分别对优化前后的压下量、轧制压力、电机负荷以及孔型尺寸予以比较。图形输出包括优化前后轧机负荷比较的直方图（图 4.10）和曲线图（图 4.11），还有优化前后压下量、轧制力、轧制力矩、轧制功率、电机功率比较图对优化效果给予直观显示。绘图命令通过调用 AutoCAD 完成优化前后孔型图的绘制。优化后的精轧部分的孔型图界面见图 4.12。

#### 5.现场参数

以表格的形式详细列出计算中所用到的一些现场参数，如孔型尺寸、电机参数、宽展系数等。见图 4.13。

#### 6.窗口

因为本程序为多窗口操作程序，通过窗口命令可将打开的多个窗体进行水平平铺、垂直排列、纵向排列、排列图标等多种操作。

### 4.5 软件操作指南

运行中型轧机轧制 No20 角钢孔型优化设计软件后，首先进入登录窗体，操作者需输入正确的密码后方可使用本软件。输入正确密码后进入主界面窗体，点击输入数据菜单调出数据窗体，在该窗体中输入初始条件并对现场参数予以合理修改或保持默认值，确认后点击计算菜单进行负荷均衡优化计算。点击文件菜单中的打开命令可查看优化结果数据，点击输出菜单命令可查看以图形或表格形式输出的优化结果。点击输出菜单中的绘制孔型图命令可根据优化结果绘制出孔型图。所有窗体均可实现最大化、最小化及关闭等命令并可同时打开多个窗体进行操作。



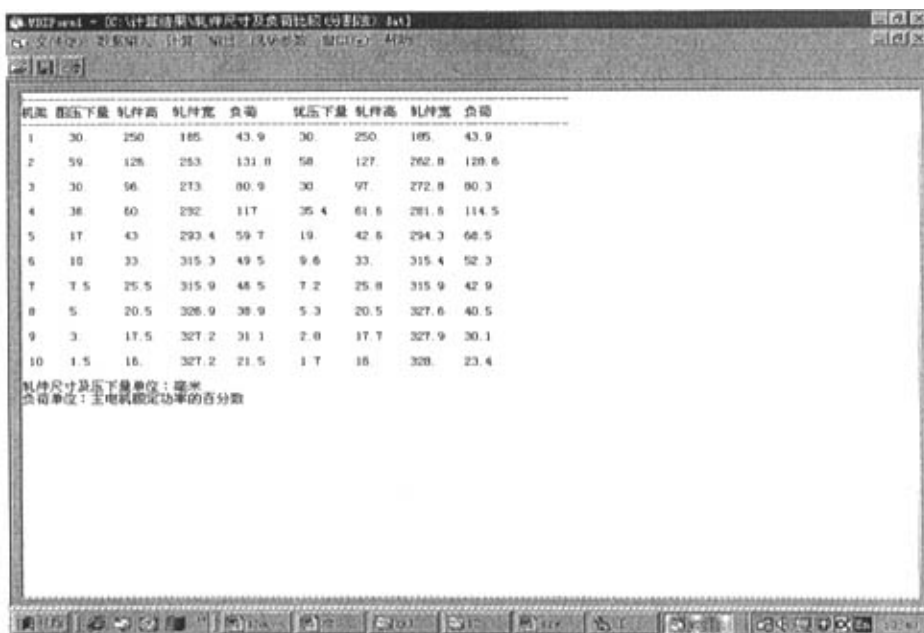


图 4.6 轧件尺寸及负荷比较

Fig 4.6 Compare with the size of mill bar and load

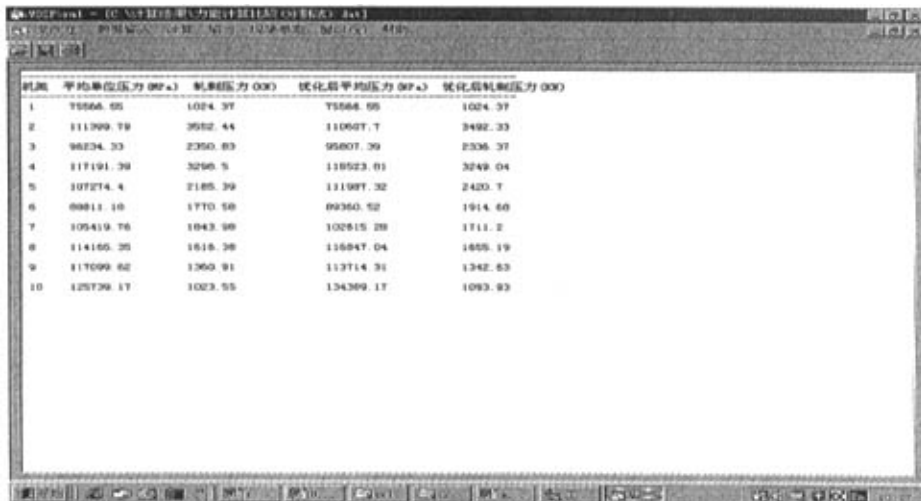


图 4.7 优化前后轧制压力比较

Fig 4.7 Compare between rolling press of optimal front and behind

压下量%	轧制速度	吨时产量	生产量%	轧制速度	吨时产量
30	1024.37	43.80	30	1024.37	43.80
59	2052.44	131.82	59	2492.33	128.94
30	1250.83	80.06	30	2338.37	80.34
38	3298.5	117.03	38.4	3249.04	114.47
17	2185.38	59.75	19	2420.7	88.54
10	1770.58	49.47	9.6	1914.68	52.29
7.5	1843.98	46.5	7.2	1711.2	42.94
5	1616.38	38.88	5.3	1555.19	40.46
3	1360.91	31.1	2.8	1342.63	30.12
1.5	1022.55	21.53	1.7	1093.93	23.38

图 4.8 优化前后轧机负荷表

Fig 4.8 Table of rolling mill load of optimal in front and behind

压下量%	压下率	压下率	压下率	压下率	压下率	压下率	压下率	压下率	压下率	压下率	压下率
250	186			15		250	186.01			15	
126	263		40	15	144.22	127	262.76		40	15	144.22
98	273		50	15	118.08	97	272.75		50	15	118.08
60	282		60	15	100	81.6	281.6		80	15	100
43	293.4		40	15	94.5	42.6	294.33		40	15	94.5
33	315.3	388.56	60	10	93.28	33	315.35	388.67	60	10	93.28
25.5	315.9	387.5	50	10	93.02	25.9	315.93	387.5	50	10	93.02
20.5	328.9	390.22	35	10	90	20.5	327.59	390.92	35	10	90
17.5	327.2	381.76	25	10	90	17.1	327.87	382.46	25	10	90
16	330	382.7	18	12	90	16	330	382.7	18	12	90

图 4.9 优化前后孔型参数表

Fig 4.9 Table of pass programmer of optimal in front and behind

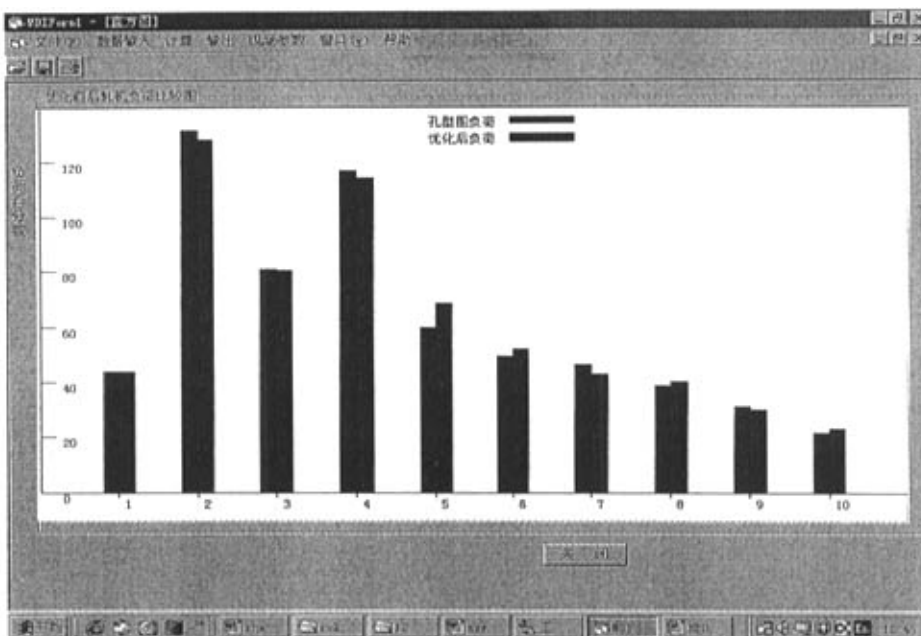


图 4.10 优化前后负荷比较直方图

Fig 4.10 quadrate graph of load of optimal in front and behind

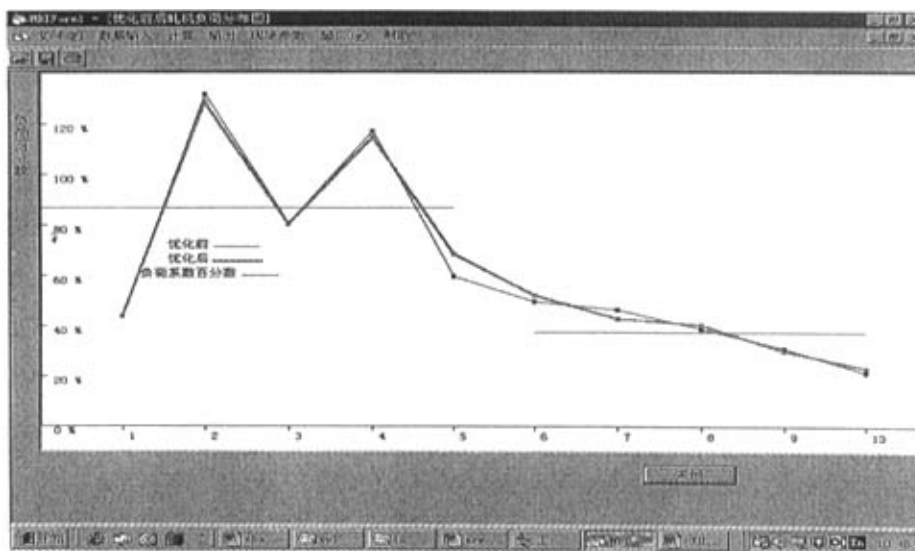


图 4.11 优化前后负荷比较曲线图

Fig 4.11 Curve of load of optimal in front and behind

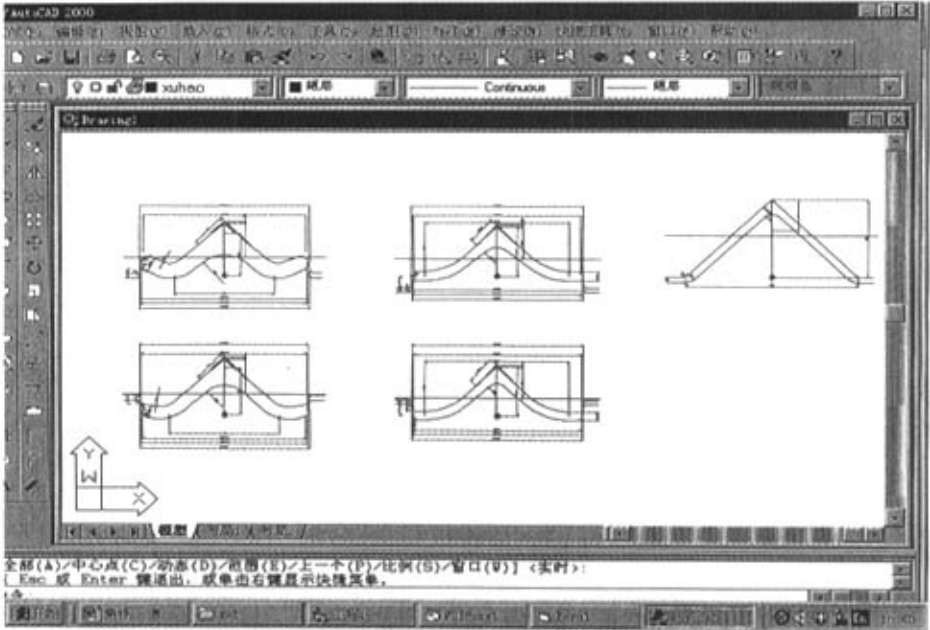


图 4.12 精轧部分优化后的孔型界面图

Fig 4.12 Finish rolling interface diagram of pass behind optimizing

孔型	孔型宽度	孔型高度	水平段长度	圆弧形半径	圆弧形半径	圆弧形半径	电机转速/r·min	电机功率/kw	速度
1	195	250				0.17	495	2000	6.07
2	263	128			40	0.3	495	2000	6.07
3	273	96	123		50	0.333	495	2000	6.07
4	282	60	128		50	0.25	495	2000	6.07
5	293.4	43	133.4		40	0.27	495	2000	6.07
6	315.3	33	125.3		80	0.247	495	3200	4.5
7	315.9	25.5	105.9		50	0.12	495	3000	4.5
8	326.9	20.5	65.4	117	25	0.544	495	3000	4.5
9	327.2	17.5	65.4	117	25	0.51	495	3200	4.5
10	330	18			18	0.05	495	3000	4.5

图 4.13 现场参数表

Fig 4.13 Table of parameter in locale

## 第五章 优化前后结果比较

## 5.1 现场参数

采用动态规划法，我们按照唐钢中型厂的生产条件进行了负荷均衡优化设计。唐钢中型厂粗轧机组为  $\phi 650 \times 1$  中型轧机，精轧机组为  $\phi 630 \times 3$  横列式轧机。使用  $165\text{mm} \times 280\text{mm} \times 3200\text{mm}$  连铸坯（16Mn）轧制 No20 角钢，开轧温度  $1150^\circ\text{C}$ 。现场生产条件如下：

表 5-1 现场参数表

Table 5.1 Table of parameter in locale

机架	孔型图轧件尺寸 mm		展宽系数	电机转速 r/min	电机功率 Kw	速比
	轧件宽	轧件高				
1	185	250	0.17	495	2800	6.07
2	263	126	0.3	495	2800	6.07
3	273	96	0.333	495	2800	6.07
4	282	60	0.25	495	2800	6.07
5	293.4	43	0.67	495	2800	6.07
6	315.3	33	0.697	495	3200	4.5
7	315.9	25.5	0.12	495	3200	4.5
8	326.9	20.5	0.544	495	3200	4.5
9	327.2	17.5	0.51	495	3200	4.5
10	330	16	0.05	495	3200	4.5

表 5.2 现场用孔型图参数表

Table 5.2 Table of pass parameter in locale

道次	孔型	孔型参数					压下量 (mm)
		H(mm)	B(mm)	R(mm)	S(mm)	$\alpha$ (度)	
1	箱型孔	250	185		15		30
2	过渡孔	126	263	40	15	144.22	59
3	过渡孔	96	273	50	15	118.08	30
4	W型孔	60	282	60	15	100	36
5	W型孔	43	293.4	40	15	94.5	17
6	弯碟孔	33	315.3	60	10	93.28	10
7	弯碟孔	25.5	315.9	50	10	93.02	7.5
8	蝶式孔	20.5	326.9	35	10	90	5
9	蝶式孔	17.5	327.2	25	10	90	3
10	成品孔	16	330	18	12	90	1.5

## 5.2 优化结果

对各道次离散后的压下量分别进行轧制负荷计算,对计算结果利用动态规划法以负荷相对均衡为目标进行寻优计算,可得到优化后的轧制力能参数以及孔型尺寸、轧件尺寸。将优化前后的孔型尺寸、轧件尺寸、力能参数、负荷分配分别列表予以对比,可以发现我们取得了负荷相对均衡的优化效果。如以下各表所示。通过优化设计,中型轧机的粗、精轧机组实现了轧机负荷相对均衡。尤其是负荷较高的第2道次,与原设计相比轧制负荷下降了约2.41%,使轧制过程轧机负荷分配趋于合理。

表 5.3 No20 角钢优化力能参数表

Table 5.3 Table of optimal press and energy parameter of No20 angle steel

道次	轧制速度 (m/s)	轧制力(KN)	轧制力矩(t.m)	电机负荷(%)
1	1.71	1024.37	10.36	44
2	2.23	3492.33	33.35	129
3	2.36	2336.37	19.98	80
4	2.44	3249.04	29.33	114
5	2.53	2420.7	16.3	69
6	3.41	1914.68	9.79	52
7	3.44	1711.2	7.61	43
8	3.48	1655.19	7.03	40
9	3.51	1342.63	4.72	30
10	3.52	1093.93	3.26	23

表 5.4 优化前后轧件尺寸表 单位: mm

Table 5.4 Table of the size of mill bar of optimal in front and behind units: mm

道次	现用孔型的轧件尺寸		轧机负荷 (%)	优化后的轧件尺寸		轧机负荷 (%)
	H	B		H	B	
1	250	185	43.9	250	185	43.9
2	126	263	131.8	127	262.8	128.6
3	96	273	80.9	97	272.8	80.3
4	60	282	117	61.6	281.6	114.5
5	43	293.4	59.7	42.6	294.3	68.5
6	33	315.3	49.5	33	315.4	52.3
7	25.5	315.9	46.5	25.8	315.9	42.9
8	20.5	326.9	38.9	20.5	327.6	40.5
9	17.5	327.2	31.1	17.7	327.9	30.1
10	16	327.2	21.5	16	328	23.4

表 5.5 优化后孔型尺寸表 单位: mm

Table 5.5 Table of the size of pass of optimal in front and behind units: mm

道次	孔型	优化后孔型图尺寸(mm)				
		H	B	R	S	$\alpha$ 度
1	箱型	250	185.01		15	
2	过渡	127	262.76	40	15	144.22
3	过渡	97	272.75	50	15	118.08
4	W 型	61.6	281.6	60	15	100
5	W 型	42.6	294.33	40	15	94.5
6	弯蝶	33	315.35	60	10	93.28
7	弯蝶	25.8	315.93	50	10	93.02
8	蝶式	20.5	327.93	35	10	90
9	蝶式	17.7	327.87	25	10	90
10	成品	16	330	18	12	90

表 5.6 负荷分配比较表

Table 5.6 Comparative table of distribution of load

道次	优化前后负荷比较(%)		负荷优化效果(%)	轧制力优化效果(%)
	优化前	优化后		
1	44	44		
2	131.8	129	-2.41	-1.69
3	80.9	80	-0.64	-0.62
4	117	114	-2.18	-1.5
5	59.8	69	14.71	10.77
6	49.5	52	5.7	8.14
7	46.5	43	-7.64	-7.2
8	38.9	40	4.05	2.4
9	31.1	30	-3.15	-1.34
10	21.6	23	8.54	6.87

## 结 论

本文以中型轧机负荷相对均衡为目标,用动态规划法进行了负荷均衡的优化设计,得到的结论如下:

### 变形阻力模型

本文在变形温度  $t=950^{\circ}\text{C}\sim 1150^{\circ}\text{C}$ , 变形程度  $\varepsilon=0.2\sim 0.5$ , 变形速率  $\dot{\varepsilon}=1\sim 20\text{s}^{-1}$  的变形条件下,根据利用 Gleeble-1500 热模拟实验机测得的应力-应变曲线规律,对 16Mn 钢高温变形曲线数据进行 Levenberg-Marquardt 多元非线性回归,得出变形阻力模型如下:

$$\sigma = 140 \exp\left(-2.7166 \times \frac{T}{1000} + 3.4609\right) \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^{\left(0.2351 \times \frac{T}{1000} - 0.216\right)} \\ \times \left[2.6261 \left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)^{0.7179} - 1.6261 \frac{\varepsilon}{0.4}\right]$$

该模型相关系数高,显著性比较高,回归方差小,可用于 16Mn 轧制过程变形阻力的计算。

### 2. 温降模型

通过与现场实测温度值的比较,可利用公式  $\Delta t = \alpha \Delta t_p - k_{\varphi} \Delta t_{\varphi} - \beta \Delta t_d$  进行温降计算,且经修正后与实测数据符合较好。

### 3. 轧制负荷模型的选取

根据角钢孔型特点,首次采用了分割法进行蝶式孔接触面积的计算。进而计算轧制力、轧制力矩、轧制功率、电机功率和相对等负荷。

### 4. 用动态规划法进行负荷均衡优化

本文介绍的是在开轧温度一定的条件下,通过动态规划法选择压下量来改变孔型尺寸从而达到负荷均衡优化的目的。

经大量查阅资料可知,在棒材和高速线材领域,有关于轧制负荷分布优化研究的报道<sup>[29][52][53]</sup>,但在中型生产领域未见报道。



采用动态规划法，我们进行了中型轧机粗、精轧机组负荷均衡的优化孔型设计。原料为  $165\text{mm} \times 280\text{mm} \times 3200\text{mm}$ ，产品为 No20 角钢，开轧温度  $1150^{\circ}\text{C}$ 。并将优化计算结果及原孔型图所提供孔型系统进行了比较。结果表明，各道次的压下量不同，轧制力矩和轧制功率将是不同的。采用动态规划法得出的优化后的负荷均衡程度明显优于未优化时的负荷分配。

## 5. 角钢孔型优化设计软件

角钢孔型优化设计软件是该软件采用 Visual Basic 6.0 语言进行压下量的计算、离散后轧件尺寸计算以及轧制力能参数计算和优化计算程序的编写。以 VB 语言编程调用 AutoCAD2002 进行参数化绘图。本软件具有如下几方面的特点：a. 操作简便、界面直观 b. 计算迅速、准确。本文通过计算机系统来实现负荷均衡优化计算，取代了传统的凭经验估计调整进行压下规程设计，这不仅省时省力，而且计算数据精确可靠。通过优化计算得出的负荷均衡的轧件尺寸，可直接用于孔型设计。c. 打印输出方便、快捷。软件具有强大的打印输出功能。力能参数计算结果，优化前后孔型参数、轧件尺寸等数据均可在计算机屏幕或打印机上打印输出，而且可以按照标准工程图的要求输出孔型图，从开始计算到画图结束不超过 5 分钟。d. 绘图模块功能齐全。在参数化绘图模块中，以 AutoCAD 为图形支撑软件，采用 VB 作为编译器，开发了参数化自动绘图程序，可随参数的变化画出相应的孔型图。采用基于变量设计的参数化尺寸驱动方法，实现孔型图尺寸标注及图形序号标注，从而直接沟通了图形尺寸与设计参数的联系。对已生成的孔型图可进行编辑、修改等完善工作，结果可保存到计算机硬盘或软盘上。

从以上的理论分析以及成功的应用结果看，动态规划法是进行孔型设计的一种极有潜力的方法。采用这种方法可以大大减少计算工作量，提高运算速度。利用动态规划法计算优化规程使轧机系统负荷均衡，可显著减少压力、功率等负荷波动，保证设备安全高效运行，改善设备运行环境。

计算机辅助孔型设计是型钢生产中值得推广应用的技术，它对于提高产品质量、节材节能、提高经济效益具有十分重要的作用。对于型钢产品新规格的开发以及对已有孔型的分析诊断都具有良好的实用价值，是优化轧制过程的重要手段。

不足之处就是由于中型轧机设备比较落后，没有测力装置，计算出的轧制力不能和现场实际生产时的轧制力进行比较。

## 参 考 文 献

- [1] 刘战英. 轧制变形规程优化[M]. 北京: 冶金工业出版社.1996 :. 2-6. 243
- [2] 赵俊萍, 鹿守理, 曲扬. 计算机辅助孔型设计(CARD)技术的应用及发展[J]. 轧钢. 1998, 1: 59.
- [3] 赵鸿金, 张迎晖, 胡海涛, 姚若浩. 铜板带轧制规程计算机辅助设计系统的研制[J]. 南方冶金学院学报. 2001,3: 189-192.
- [4] 赵鸿金, 张迎晖, 胡海涛, 姚若浩. 动态规划法优化设计铜板带轧制规程[J]. 南方冶金学院学报. 2001,4: 243-246.
- [5] 刘战英, 秦国庆. 复二重线材轧机速比优化[J]. 河北理工学院学报. 1999,2: 17-21.
- [6] 刘战英, 李克敏. 高速线材轧机节能轧制的速度优化[J]. 钢铁. 1998,7: 22-24.
- [7] 刘战英. 冷轧窄带钢节能压下规程的优化设计[J]. 钢铁研究. 1997,1: 15-18.
- [8] 刘德宝, 韩建新. 动态规划法在延伸系数分配中的应用. 天津理工学院学报. 2000,1: 39-41.
- [9] 孙晓光, 常春, 刘相华等. 精轧机组负荷分配的人工神经网络识别[J]. 钢铁, 1995,11.
- [10] 白光润, 栾瑰馥. 我国型线材生产的展望[J]. 轧钢, 1999,2: 6.
- [11] 贺毓辛, 党紫九, 唐俊武. 实验工程学. 北京科技大学. 1998.
- [12] 牛济泰, 编著. 材料和热加工领域的物理模拟技术[M]. 国防工业出版社. 1999: 20.
- [13] 宋玉楼. 金属压力加工专业实验指导. 东北工学院, 1988.
- [14] 赵志业, 主编. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京. 第二版. 冶金工业出版社. 1994.
- [15] 邵志芳, 戴铁军, 那顺桑, 刘战英, 刘相华, 王国栋. 30MnSiV 钢变形阻力的试验研究[J]. 河北理工学院学报. 2002,2: 13.
- [16] 周纪华, 管克智, 著. 金属塑性变形阻力[J]. 北京. 第一版. 机械工业出版社. 1989: 223.
- [17] 李燕琛编著. 社会科学统计软件包 SPSS[M]. 中国人民大学出版社 1999.5.
- [18] 盛骤, 谢式千, 潘承毅编. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社. 1997.5.
- [19] 杨节主编. 轧制过程数学模型(修订版)[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1992.10: 137-146
- [20] Kemp IP. Model of Deformation and Heat Transfer in Hot Rolling of Bars and Sections. Ironmaking and Steelmaking. 1990.17(2):139
- [21] 麻永林. 棒材连轧过程中温降的计算机模拟[J]. 钢铁. 1996,2: 25-29
- [22] 董德元, 鹿守理, 赵以相. 编著. 轧制计算机辅助工程[J]. 冶金工业出版社. 1991:325.
- [23] B.K 斯米尔诺夫等著. 鹿守理 等译. 轧辊孔型设计[J]. 北京. 冶金工业出版社. 1991: 19.
- [24] 赵志业. 主编. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京. 冶金工业出版社. 1980:327.

- [25] 贺辛. 编著. 现代轧制理论[M]. 北京. 冶金工业出版社. 1993: 129.
- [26] 陆济民. 主编. 轧制原理[M]. 北京. 冶金工业出版社. 1993: 130.
- [27] 邹家祥. 主编. 轧钢机械[M]. 北京. 冶金工业出版社. 1989: 75.
- [28] 范鸣玉编著. 最优化技术基础[M]. 清华大学出版社. 1982.11: 244.
- [29] 戴铁军, 刘战英, 梁敬斌. 棒材孔型的相对等负荷优化设计[J]. 河北理工学院学报. 2000.5: 157.
- [30] 康继军, 胡彬, 游晓锋. 角钢孔型设计 CAD 模拟[J]. 重庆工业高等专科学校学报. 2000,7: 28.
- [31] 阎军. 热轧带肋钢筋孔型的计算机辅助设计[J]. 天津冶金. 2002 ,4: 26.
- [32] 张国宝 编著. AutoCAD Visual Basic 开发技术[M]. 2000.1.第一版.
- [33] 张晋西. Visual Basic 与 AutoCAD 二次开发[M]. 2002.2.第二版.
- [34] 梁雪春, 宋德明 编著. AutoCAD 2002 二次开发技术指南[M]. 2001.4.第一版.
- [35] 乔志明 . 孔型几何参数与图形的转换[J]. 唐钢科技. 1991,3: 9.
- [36] 姜玉文, 黄丹戈. 参数制图-用 AutoLisp 实现图形的自动绘制[J]. 鞍钢技术. 1999,11: 39.
- [37] 李天启. Visual Basic 6.0 学习捷径[M]. 清华大学出版社. 1999.3.
- [38] Microsoft Corporation . Visual Basic 6.0 Programmer's Guide[M]. 1999.4.
- [39] 东箭工作室编著. Visual Basic 中文版程序设计[M]. 清华大学出版社. 1998 .4.
- [40] 李霞, 沈精虎编著. Visual Basic 数据库应用程序开发指南[M]. 电子工业出版社. 1997.9 第一版.
- [41] 莫卫东, 白鹏, 张晓敏, 张福萍. 编著. Visual Basic 6.0 高级编程技巧—窗口菜单篇[M]. 西安交通大学出版社. 1999.12.
- [42] George Omura 著, AUTOCAD2000 从入门到精通[M], 1999.9
- [43] 张跃峰, 陈通 编著. AutoCAD 2000 入门与提高[M]. 清华大学出版社. 2000.
- [44] 李凤华. 编著. AutoCAD 2000 入门与提高[M]. 清华大学出版社. 2001.
- [45] 刘德宝, 韩建新. 计算机辅助螺纹钢孔型设计[J]. 天津理工学院学报. 2000,12: 54-57.
- [46] 庄蕾, 耿申初. 工字钢计算机辅助孔型设计[J]. 鞍钢技术. 2001,2: 41-43.
- [47] 李激光, 耿申初. 重轨孔型设计软件的编制[J]. 鞍钢技术. 1999,4: 10.
- [48] 孔晓玲 AutoCAD 2000 的二次开发-通用件压板的计算机辅助设计[J]. 机械设计与制造. 2002,10: 16.
- [49] Wizard 创作室 策划, 余承飞, 王冬松 编著. AutoCAD 数据库应用与连接技术[M]. 北京. 北京大学出版社. 2000.6. 第 1 版.
- [50] 李凤华 编著. AutoCAD 2002/2000 VBA 开发指南[M]. 北京. 清华大学出版社.2001.4.

- [51] 刘圣才, 李春葆编著. Visual Basic 6 程序设计导学[M]. 北京. 清华大学出版社.2002.1: 234-237.
- [52] 刘战英, 戴铁军, 邵志芳, 等. 高速线材轧机负荷均衡优化孔型设计[J]. 河北理工学院学报. 2003,1: 39 .
- [53] 刘战英.复二重线材轧机节能孔型的优化设计[J].上海金属.1997,5: 18-22.

附录A 16Mn 变形阻力试验原始数据与计算数据比较

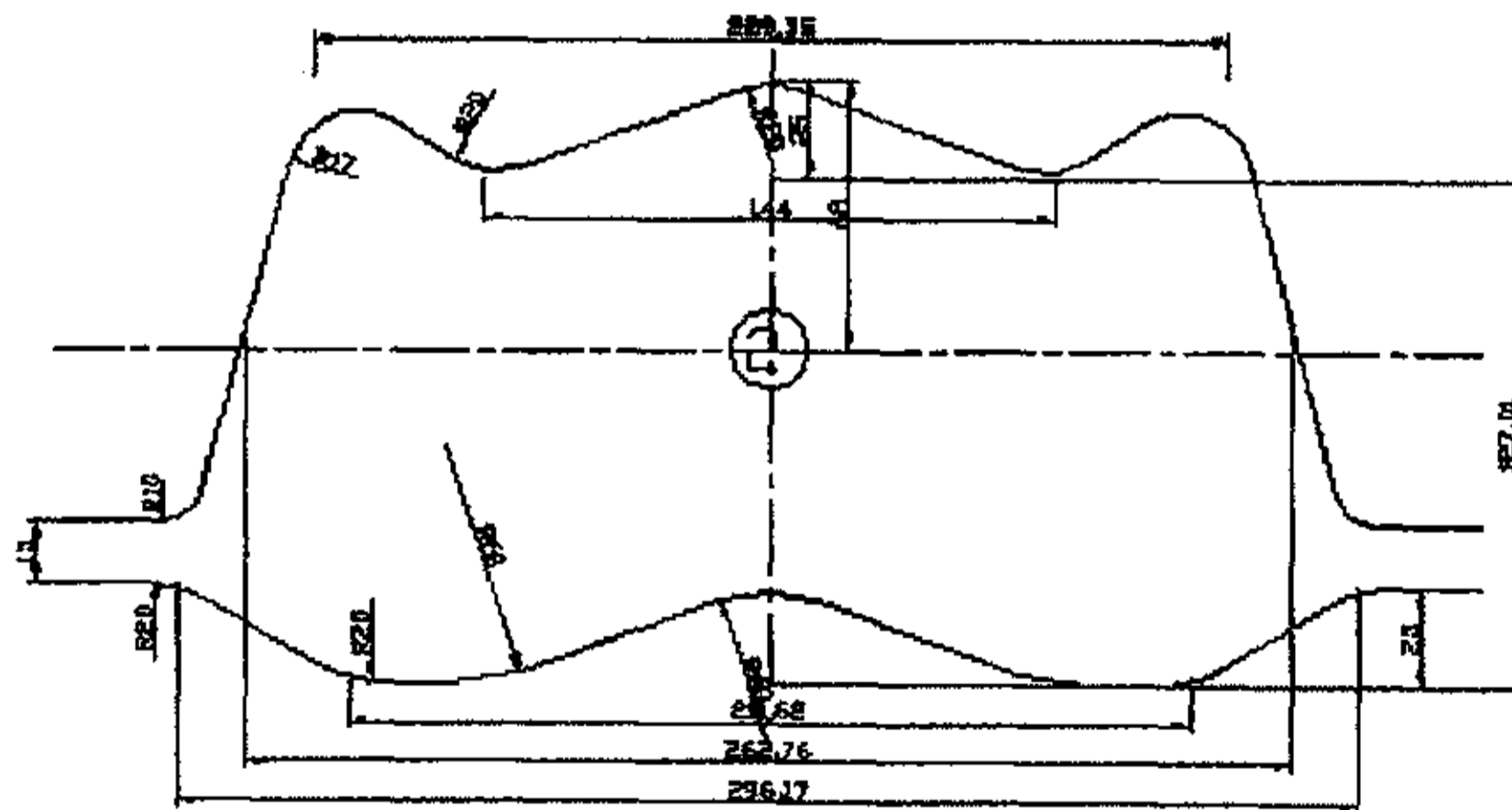
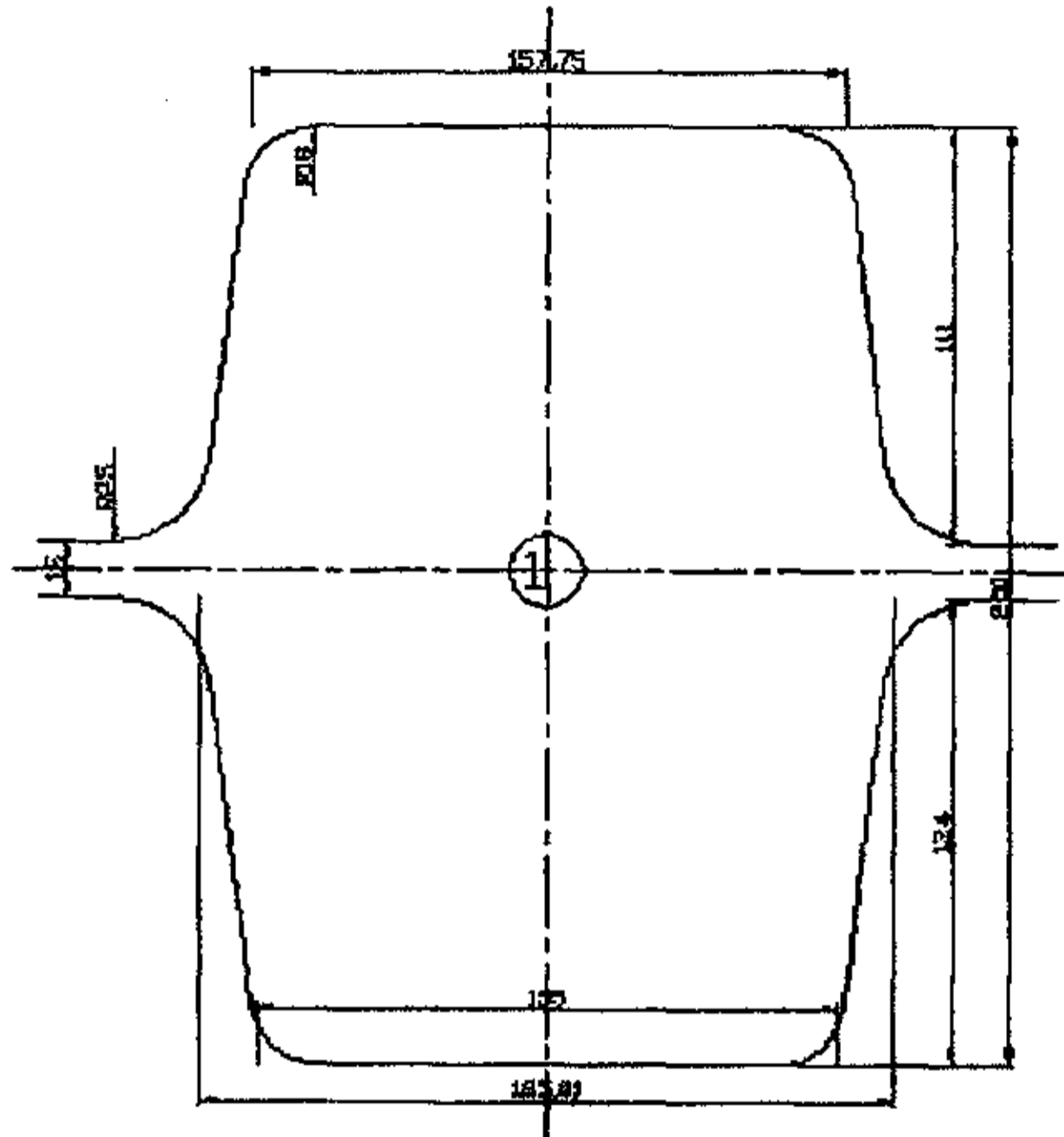
$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	t(°C)	$\epsilon$	$\sigma$ 实测 (MPa)	$\sigma$ 计算 (MPa)	误差 %
1	1150	0.2	57	55.7	-2.33
		0.3	66	65.16	1.27
		0.4	65	71.09	8.57
		0.5	64	74.64	14.26
	1100	0.2	75	65.57	-14.38
		0.3	83	76.69	-8.23
		0.4	87	83.68	-3.97
		0.5	88	87.84	-0.18
	1050	0.2	85	77.17	-10.15
		0.3	95	90.26	-5.25
		0.4	100	98.48	-1.54
		0.5	99	103.38	4.24
	1000	0.2	100	90.82	-10.11
		0.3	107	106.23	-0.72
		0.4	118	115.91	-1.8
		0.5	123	121.67	-1.09
	950	0.2	112	106.89	-4.78
		0.3	126	125.02	-0.78
		0.4	136	136.41	0.3
		0.5	143	143.2	0.14
900	0.2	123	125.8	2.23	
	0.3	150	147.1	-1.97	
	0.4	164	160.5	-2.18	
	0.5	172	168.5	-2.08	
5	1150	0.2	65	67.4	3.56
		0.3	77	78.8	2.28
		0.4	84	86	2.33
		0.5	87	90.3	3.65
	1100	0.2	80	77.9	-2.7
		0.3	93	91.1	-2.09
		0.4	100	99.4	-0.6
		0.5	108	104.3	-3.55
	1050	0.2	89	89.9	1
		0.3	107	105.2	-1.71
		0.4	115	114.2	-0.26
		0.5	119	120.4	1.16
	1000	0.2	105	103.8	1.16
		0.3	115	121.4	5.27
		0.4	121	132.5	8.68
		0.5	125	139.1	10.14
	950	0.2	122	119.9	-1.92
		0.3	144	140.3	-2.64
		0.4	158	153	-3.27
		0.5	165	160.6	-2.74

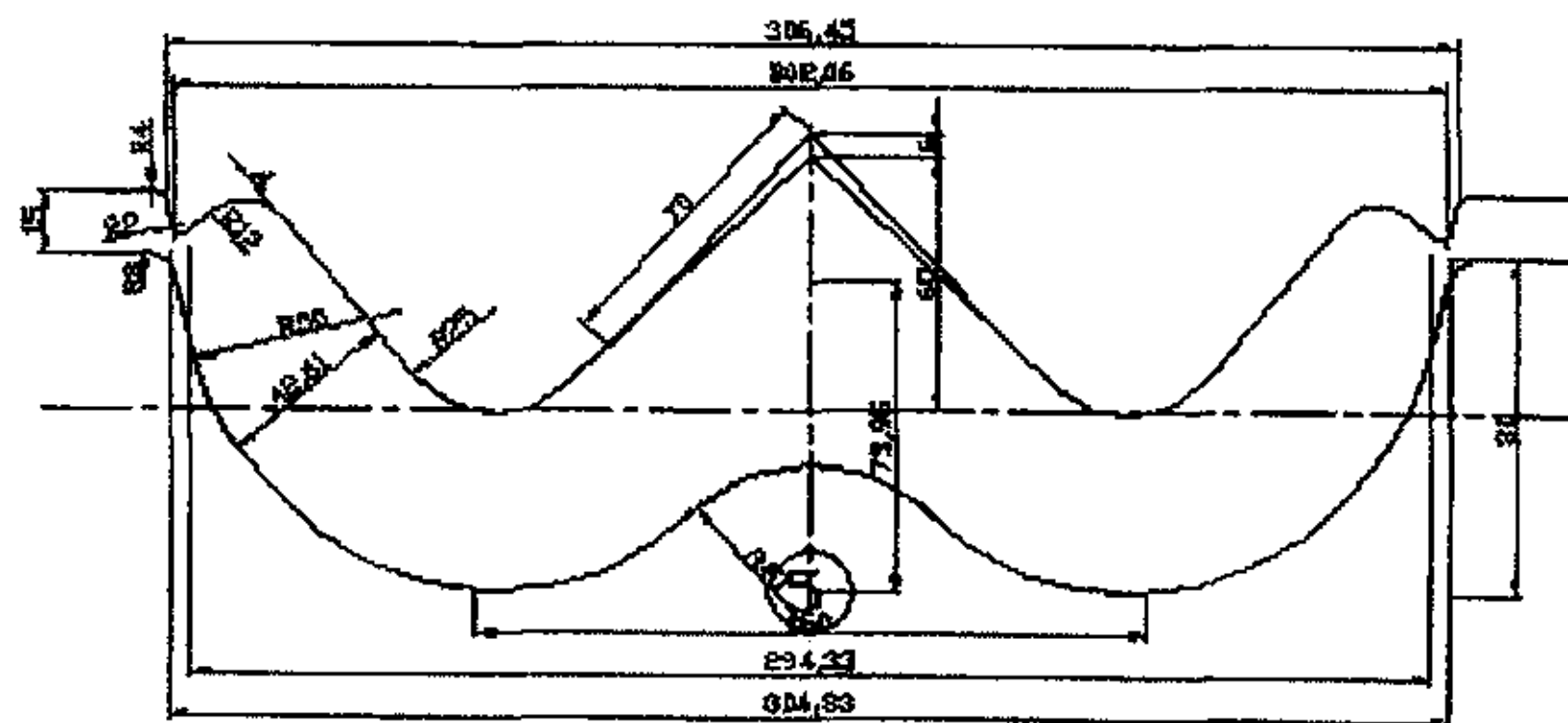
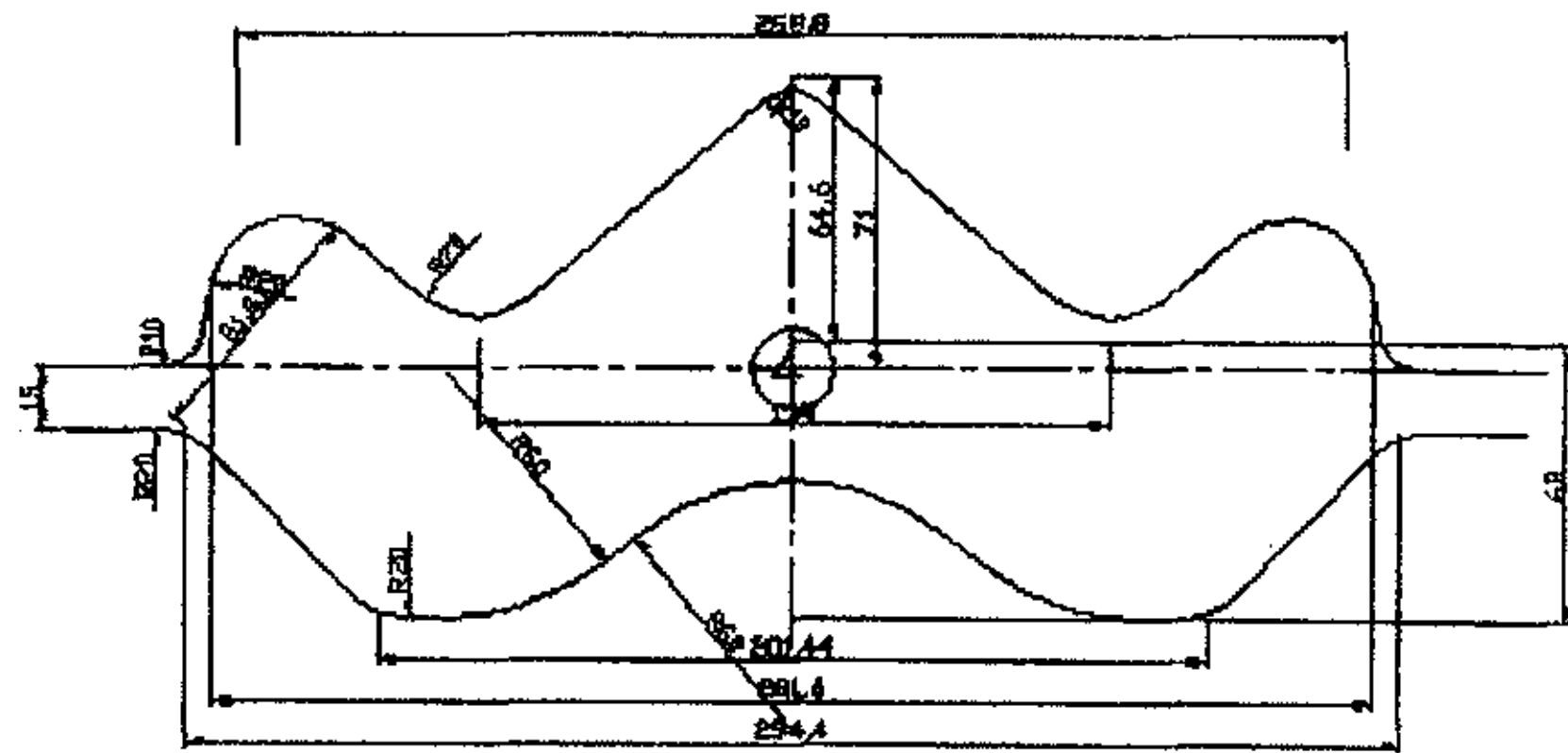
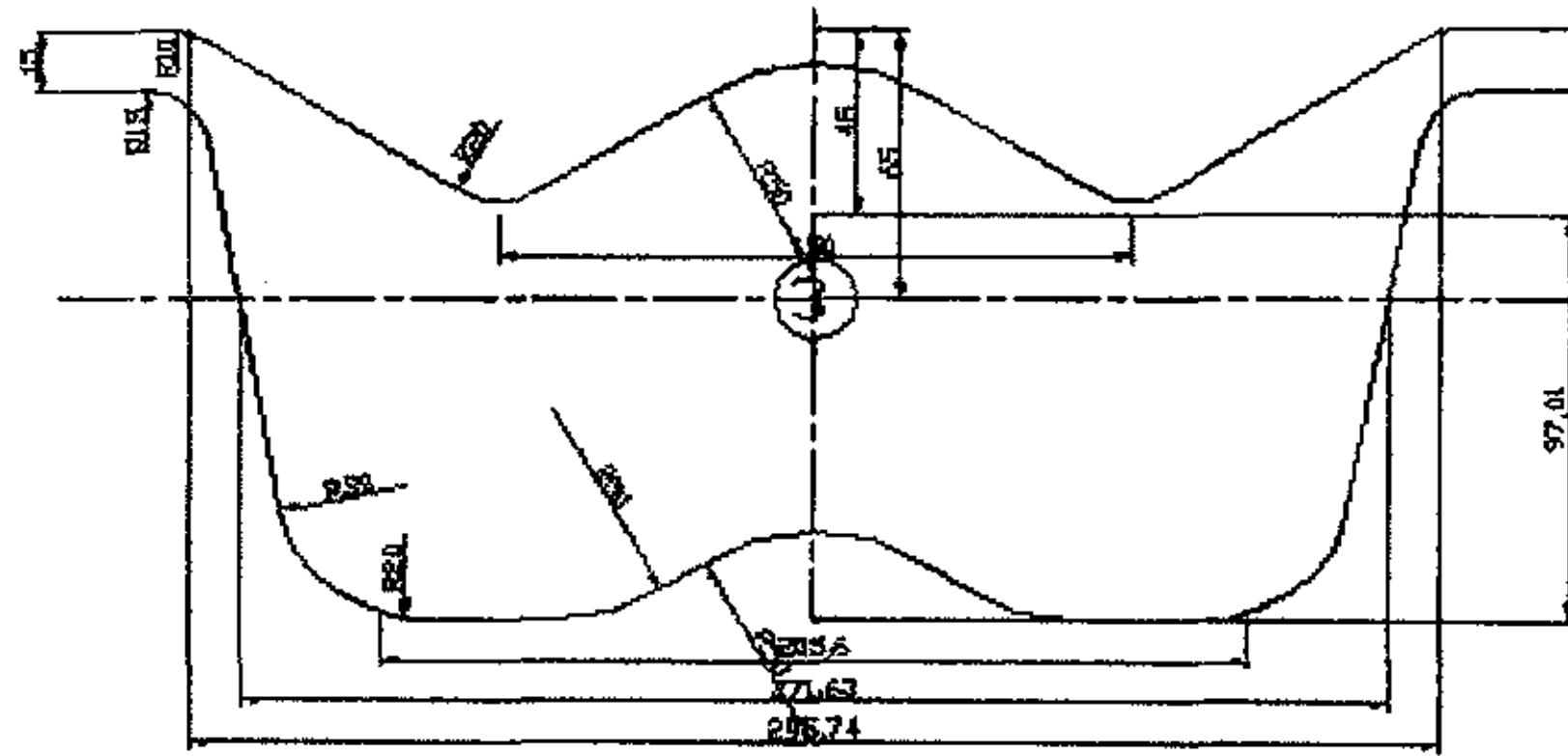
$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	t (°C)	$\epsilon$	$\sigma$ 实测 (MPa)	$\sigma$ 计算 (MPa)	误差 %
5	900	0.2	134	138.5	3.25
		0.3	157	162	3.09
		0.4	170	176.7	3.79
		0.5	178	185.5	4.04
10	1150	0.2	73	73.2	0.27
		0.3	85	85.6	0.7
		0.4	92	93.4	1.5
		0.5	96	98	2.04
	1100	0.2	88	83.8	-5.01
		0.3	100	98.05	-1.99
		0.4	106	107	0.93
		0.5	116	112.3	-3.29
	1050	0.2	94	96	2.08
		0.3	108	112.3	3.83
		0.4	116	122.5	5.31
		0.5	120	128.6	6.69
	1000	0.2	113	110	-2.73
		0.3	130	128.7	-1.01
		0.4	140	140.4	0.28
		0.5	145	147.4	1.63
	950	0.2	126	126	0
		0.3	150	147.4	1.73
		0.4	162	160.8	-4.48
		0.5	166	168.8	1.66
900	0.2	139	144.3	3.67	
	0.3	166	168.8	1.66	
	0.4	182	184.2	1.19	
	0.5	192	193.4	0.21	
15	1150	0.2	77	76.8	-0.26
		0.3	88	89.8	2
		0.4	96	98	2.04
		0.5	99	102.9	3.79
	1100	0.2	89	87.5	-1.71
		0.3	104	102.4	-1.56
		0.4	115	111.7	-2.95
		0.5	122	117.3	-4.01
	1050	0.2	95	99.8	4.81
		0.3	110	116.7	5.74
		0.4	122	127.4	4.24
		0.5	129	133.7	3.52
	1000	0.2	116	113.8	-1.93
		0.3	134	133.1	-0.68
		0.4	145	145.2	0.14
		0.5	151	152.4	0.92
	950	0.2	127	129.7	2.08
		0.3	152	151.7	-0.2
		0.4	168	165.5	-1.51
		0.5	175	173.8	-0.69

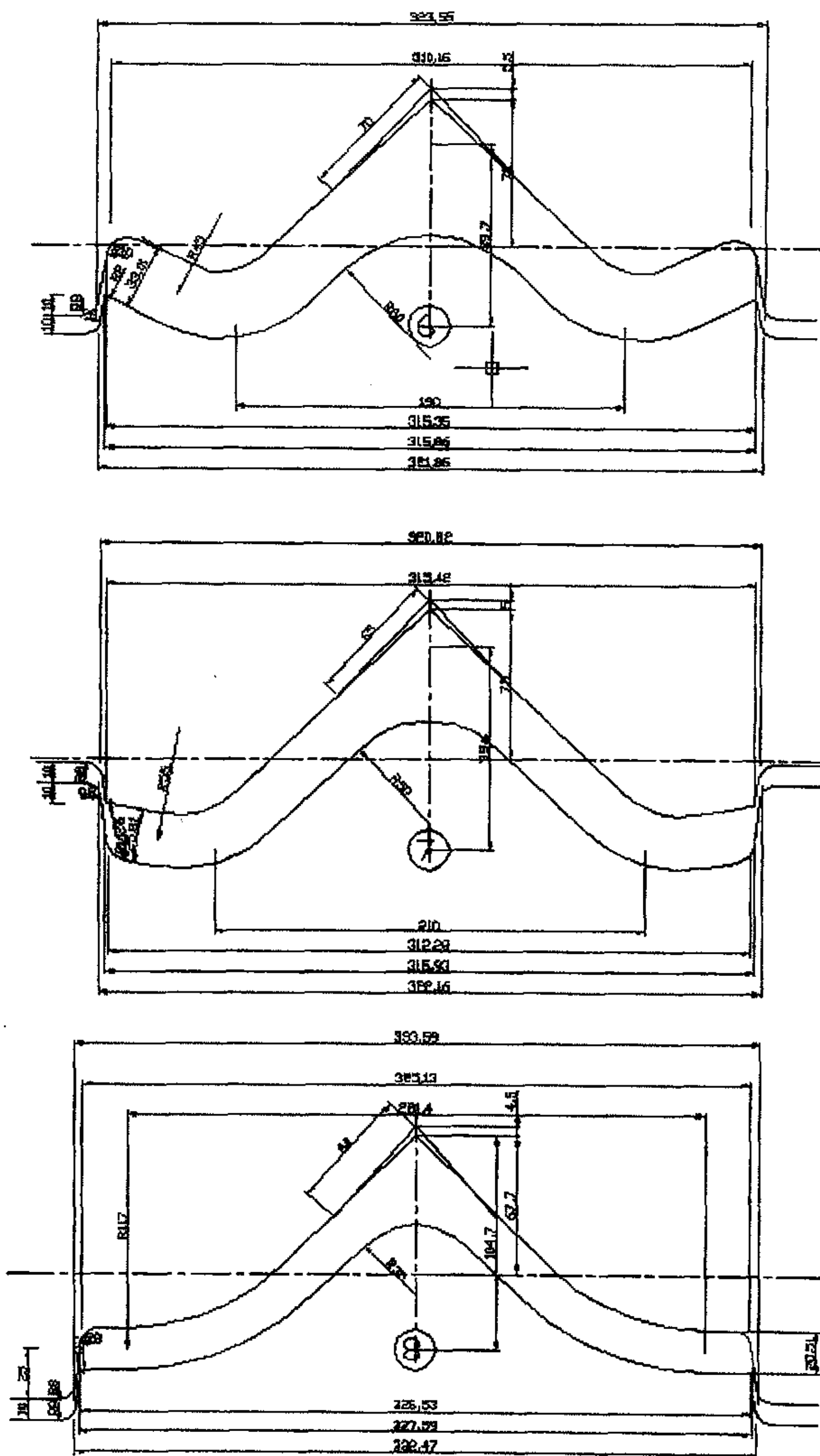
$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	t (°C)	$\epsilon$	$\sigma$ 实测 (MPa)	$\sigma$ 计算 (MPa)	误差 %
15	900	0.2	144	147.9	2.64
		0.3	170	172.9	1.68
		0.4	190	188.7	-0.58
		0.5	201	198.1	-1.46
20	1150	0.2	82	79.4	-3.27
		0.3	94	92.9	-1.18
		0.4	100	101.4	1.38
		0.5	104	106.4	2.26
	1100	0.2	94	90.3	-4.1
		0.3	111	105.6	-5.11
		0.4	123	115.2	-6.77
		0.5	127	120.9	-5.05
	1050	0.2	100	102.6	2.53
		0.3	119	119.95	0.79
		0.4	129	130.9	1.45
		0.5	138	137.4	-0.44
	1000	0.2	121	116.5	-3.86
		0.3	140	136.3	-2.71
		0.4	151	148.7	-1.55
		0.5	158	156.1	-1.22
	950	0.2	132	132.4	0.3
		0.3	158	154.9	-2
		0.4	174	169	-2.96
		0.5	184	177.4	-3.72
900	0.2	149	150.4	0.93	
	0.3	175	175.94	0.53	
	0.4	197	192	-2.6	
	0.5	210	201.5	-4.22	



附录B No20 角钢优化后孔型图









## 在学研究成果

### 一、 在学期间发表的论文

张雪莲.刘战英.李一栋. 中型轧机轧制 20 号角钢孔型优化设计.河北省中青年冶金工作者研究会会议交流论文.

## 致 谢

本论文的研究及撰写工作是在我的导师刘战英教授的悉心指导下完成的，可以说论文的每一部分都凝聚着导师的心血和汗水。两年半以来，我的导师在学习、工作等方面给予了我悉心的关怀和孜孜不倦的教诲，这些都使我受益非浅，永难忘怀。导师严谨的治学态度，深远、敏锐的洞察力极大的帮助了我的成长，并将永远激励我奋发向上。值此成文之际，特向我的导师刘战英教授表示衷心的感谢，并致以最崇高的敬意。

在现场实习、数据的采集整理过程中，我的现场导师唐钢中型厂的李一栋副厂长给予了我大力的支持和帮助，在此表示诚挚的谢意。

感谢王涛在变形阻力模型建立的实验中提供的帮助。

在编制软件的过程中高源、张鹏程和张翠梅等同学的鼓励和帮助,在此表示感谢。

在读研究生期间，金属材料工程教研室各位老师尤其是解振林老师以及研究生处的各位老师都曾给予过大力的帮助。与同班的研究生一起生活的两年半中，他们给予了我莫大的鼓励与支持。在此，也向所有关心、支持、鼓励和帮助过我的老师、同学们表示衷心的感谢！

此外，也向百忙之中抽出时间为本文进行评阅的老师表示感谢！