

# 电站锅炉弯管成形质量分析及模具改进研究

## 摘 要

弯管技术广泛应用于锅炉及压力容器制造业、汽车工业、航空航天工业、船舶制造业等多种领域，占有十分重要的地位。但由于弯管工艺非常复杂，单纯采用理论解析方法难以准确可靠地解决实际生产问题；运用简化力学模型得到的经验公式往往与实际结果有较大的出入；采用试验手段又会造成时间和人力物力上的很大消耗。

本文运用 MSC.MARC 有限元软件对某锅炉厂有限责任公司的冷弯管加工过程进行计算机数值模拟，建立一套完整的有限元弯管模拟系统，试验表明该系统能够准确预测包括椭圆度、减薄率、回弹量在内的弯管质量参数和设备驱动力，根据分析对现有的大型冷弯管模具进行了改进，并设计出一套具有实用价值的组合可调节式小型弯管模具。主要内容如下：

1. 通过对管件弯曲的受力状态分析，建立了相应的有限元模型，推导了应力应变场与能量公式；利用 MSC.MARC 软件对弯管系统进行了三维有限元非线性模拟分析，为弯管成形质量分析奠定了一定的基础。

2. 采用计算机数值模拟（有限元分析）、理论分析与试验结合的方法，对影响弯管质量的椭圆度、减薄率、回弹量等成形质量因素进行了研究，从仿真角度研究电站锅炉弯管生产工艺过程，预测该工艺的变形，以解决传统弯管工艺成形时弯管凸边管壁受拉减薄、凹边管壁受压增厚而造成的弯管壁厚不均匀现象及模具易损坏等问题。

3. 通过对成形质量的分析，对大型弯管机的滑槽进行了移动式改进，来解决一些厚壁管件无法弯制的问题；对小型弯管机设计了组合可调式模具，可充分解决小管径管材弯曲模具浪费问题。

本文建立的弯管模拟系统对弯管加工流程进行有限元数值模拟，对弯管椭圆度、减薄率、回弹量等质量参数和设备驱动力以及弯管质量影响因素进行了研究。经过试验验证，本文所建立的有限元模拟系统远远优于传统的经验公式方法和试制法，已经在企业的实际应用中取得了良好的效果。

**关键词** 冷弯管；数值模拟；椭圆度；减薄率；回弹

# **Study on Forming Quality Analysis and Improved Die of Bending Tube about Power Plant Boilero**

## **Abstract**

The tube-bending technology has very important status which is widely applied in many fields such as vessel manufacturing industry, automobile industry, aerospace industry, ships manufacturing industry, and so on. The bending process is a greatly complex technology, so we can't reliably solve the actual production problem through the theoretical analysis simply. The empirical formula obtained by simplification mechanical model often has great errors with actual result;and adopting experience way often wastes lots of manpower and material resource.

In this paper, we have finished computer numerical simulation for cold tube-bending process of Harbin Boiler Factory by MSC.MARC finite element analysis software, and have built a set of complete finite element tube-bending simulated system, which can exactly forecast tube-bending quality parameter and device driving force including orality, thinning rate and resilience value. Base on the analysis, we have improved the existing cold tube-bending die ,and have designed and manufactured a set of practicality combined adjustable tube-bending mould through. The primary cotent is as follows:

1. We have finished bending force analysis,built relevant mechanics mould and deduced stress-strain field and energy formula. All of these settle a analysis foundation for tube-bending three-dimensional finite element numerical simulation.

2. Combining computer simulation(finite element analysis),theory analysis with experiment,the paper study on quality forming factors such as orality,thinning rate and springback.On the view of simulation,we have resesrched the production process of tube-bending,and have forecasted transfiguration of the technics.This method can effectively solve the problems of

tube-bending thickness asymmetry, which are caused by the chimb of tube-bending becoming thinning and the concave of tube-bending becomeing incressation when shape up by the tradition tube-bending technics.

3. According to analyzing forming quality, we have improved the slot of the tube-bending machine, solved the problems that equipment cannot bend some thick tube. The combined accommodate die designed for minitype tube-bending machine have well solved the die waste problems.

**Keywords** cold tube-bending, numerical simulation, orality, thinning rate, springback

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《电站锅炉弯管成形质量分析及模具改进研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：于浩楠 日期：2008年3月15日

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《电站锅炉弯管成形质量分析及模具改进研究》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保密  ，在 年解密后适用授权书。

不保密  。

(请在以上相应方框内打√)

作者签名：于浩楠 日期：2008年3月15日

导师签名：魏一楠 日期：2008年3月15日

# 第1章 绪论

## 1.1 引言

弯管作为金属成形制造的一个重要组成部分渐渐引起了越来越多人的关注和研究,在大的领域如航空航天工业、船舶制造业和其它兵工系统都广泛应用;在小领域中各种物料的管道运输系统日益增多,如石油输送管道、天然气输送管道、输水管道以及应用在各种机器中的小型管道管路系统。在这些管道系统中,管道常需要改变方向<sup>[1]</sup>,那么,不可避免地要用到各种弯管,各种直径、各种角度的圆弧弯管大多是用各种手动或机械弯管机加工生产出来的。目前,市场上加工弯管机械设备型号、规格非常多,其工作原理也有所不同。

弯管的工艺过程是一个复杂的弹性、塑性变形过程。材料发生弹性或塑性变形主要取决于材料内部的应力与应变,而材料内部的应力或应变主要由作用在材料上的外载荷引起的。在弯管过程中,管子弯曲部分内部的应力及应变将发生复杂的变化,应力及应变的大小、方向及变化速度将影响到弯管的质量。弯管过程中出现的各种质量缺陷,如外管壁出现裂纹,内管壁起皱,横截面畸变等,一方面与材料本身性质有关;另一方面与弯管机施加在管子上外载荷大小、方向、速度及外载荷间相对位置有关。本文尝试从分析弯管工艺过程的内应力及应变入手,得出影响弯管质量的外在因素,为各种弯管机的设计、弯管上工艺参数的选择提供理论基础上的支持。

本文主要针对电站锅炉的管件弯曲过程进行分析。冷弯管是弯管业现今比较常用的管材弯曲方法,也是一种比较经济简便的传统弯管方法。经实验研究,无论是跟据应变硬化现象还是形变热处理理论及实验,都说明冷加工能提高屈服强度 20%—30%<sup>[2]</sup>;而且,由于近年来数控技术的成熟,使得数控冷弯管方法以其准确、稳定、易于控制的特点在各种中频感应加热弯管机等新产品中脱颖而出,而得到广泛的应用<sup>[3]</sup>。

正因为冷弯管有如此多的优点,冷弯管的工艺参数制定成为当前的行业热点。由于弯管工艺过程非常复杂,单纯采用理论解析方法难以准确可靠地解决生产实际问题;运用简化力学模型得到经验公式又往往与实际结果有较大的出入;采用实验手段又会造成时间和人力物力上的很大消耗<sup>[4]</sup>。计算机技术的发展和有限元软件算法的完善使得运用大型通用有限元软件进行复杂的工艺分析

成为可能<sup>[5]</sup>。本文就是运用大型通用有限元软件 MSC.MARC 对某锅炉厂有限责任公司的主要生产方法—冷弯管加工进行计算机数值模拟，建立一套完整的弯管模拟系统，能够准确预测冷弯管制造中包括椭圆度、减薄率、回弹量在内的弯管质量参数和设备驱动力<sup>[6]</sup>，并进行实验验证。最后对大型弯管模具进行了改进并设计出一套方便简捷的组合可调节模具。

## 1.2 弯管技术简介

弯管技术广泛应用于锅炉及压力容器、空调制造、汽车、航空航天等多种行业。弯管质量的好坏,将直接影响车架以及整车的结构合理性、安全性、可靠性等。为了弯制出高质量的管件,就应该掌握管件弯曲加工技术。在数控弯管机上弯管。合理选择弯曲方式以及掌握数据处理和程序编制方法非常必要<sup>[7]</sup>。

管材弯曲按不同类别分可以分为许多类型，弯管技术在制造业高度发达的今天已经相当成熟，常用弯管方法从管材受力形式上分为：压弯、滚弯、绕弯、挤弯四种，其中绕弯使用最广。绕弯又可分为拉拔式、碾压式和推压式。从管材是否加热可分为：冷弯和热弯。从管材内是否加芯子又可分为：有芯弯管和无芯弯管<sup>[8]</sup>。

本文研究的类型是拉拔式无芯冷弯弯管，其弯曲过程如图 1-1 所示。

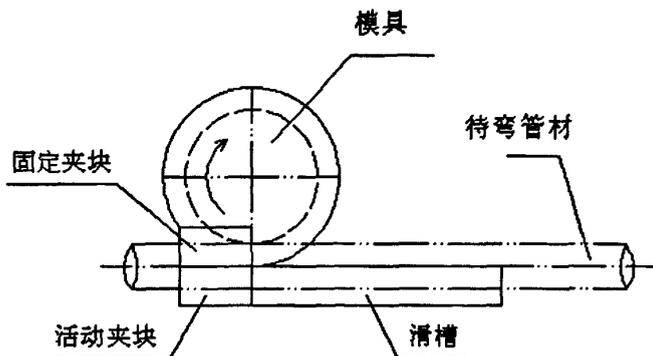


图1-1 弯管过程示意图

Fig.1-1 Diagram of tube-bending process

模具通过十字键固定在机床设备上，由电机带动十字键旋转，从而带动模具旋转；固定夹块用螺钉安装在模具上，形成夹紧管子的直段。管子放入固定夹块型腔中，活动夹块借助油缸的压力或偏心轴的锁紧力夹紧管子，滑槽的型

腔限制管子尾部转动，使之不能随模具转动，然后固定夹块、活动夹块、扇形盘一同旋转，在模具的综合作用下实现管子冷弯成形。其部件结构如 1-2 所示：

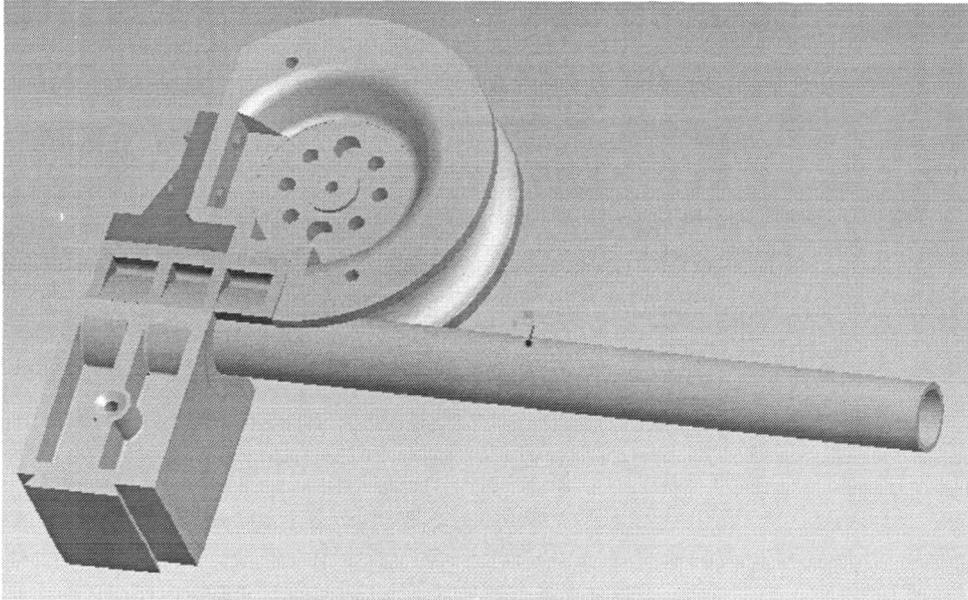


图1-2 管材弯曲部件结构图

Fig.1-2 Structure of bending part

### 1.3 国内外发展现状

#### 1.3.1 有限元在塑性成型中的应用

弯管技术过程本身属于金属塑性成形的范畴。金属塑性成形技术是现代化制造业中金属加工的重要方法之一。它是金属材料在模具和锻压设备作用下发生变形，获得所要求的形状、尺寸和性能的制件的加工过程。金属成形件在汽车、飞机仪表、机械设备等产品的零部件中占有相当大的比例。由于其具有生产效率高，生产费用低的特点，适合于大批量生产。

在 21 世纪，材料塑性成形技术一方面正在从制造工件的毛坯向直接制造工件，即精确成形或称净成形方向发展。另一方面，为控制或确保工件品质，材料塑性成形技术已经从经验走向有理论指导，成形过程的计算机模拟仿真技术已经进入实用化阶段<sup>[9]</sup>，也是现代高速发展的制造业的重要成形工艺。据统计，在发达国家中，金属塑性成形件的产值在国民经济中的比重居行业之首，

在我国也占有相当大的比例<sup>[10]</sup>。

随着现代制造业的高速发展，对塑性成形工艺分析和模具设计方面提出了更高的要求。许多以前可以使用的管件弯曲成品在当今的工厂中已经不能接受，甚至成为不合格产品。若工艺分析不完善、模具设计不合理或材料选择不当，则会造成产品达不到质量要求，造成大量的次品和废品，增加了模具的设计制造时间和费用。为了防止缺陷的产生，以提高产品质量，降低产品成本，国内外许多大公司企业及大专院校和研究机构对塑性成形件的性能、成形过程中的应力应变分布及变化规律进行了大量的理论分析、实验研究与数值计算，力图发现各种制件、产品成形工艺所遵循的共同规律以及力学失效所反映的共同特征。由于塑性成形工艺影响因素甚多，有些因素如摩擦与润滑、变形过程中材料的本构关系等机理尚未被人们完全认识和掌握，因而到目前为止还未能对各种材料各种形状的制件成形过程作出准确的定量判定。正因为大变形机理非常复杂，使得塑性成形研究领域一直成为一个充满挑战和机遇的领域<sup>[11]</sup>。

总体的说，对一种领域或产品的研究与开发的目标之一就是确定生产高质量产品的优化准则，而不同的产品要求不同的优化准则，建立适当的优化准则需要对产品制造过程的全面了解。在传统工艺分析和模具设计中，主要还是依靠工程类比和设计经验，经过反复试模修模，调整工艺参数以期望消除成形过程中的产品缺陷如失稳起皱、充填不满、局部破裂等。仅仅依靠类比和传统的经验工艺分析和模具设计方法已无法满足高速发展的现代金属加工工业的要求。因此，现代金属成形工艺分析过程中，建立适当的“过程模拟”非常重要。随着计算机技术的发展，人们已经认识到数值模拟在金属成形工程中的重要价值，这一领域已成为现代国内外学者的研究热点<sup>[12]</sup>。

尽管塑性加工中的有限元理论及技术都有很大的发展，国内外的学者在一些方面已取得丰硕的成果，但由于塑性成形自身的特点，使得有限元在这个领域中的应用还存在许多具体的难题，如：如何建立一个能真实反映材料在成形过程中变形规律的本构关系、摩擦接触问题的处理、如何在分析过程中自动生成高质量的三维有限元网格及网格重划问题，宏观模拟和微观组织预测等，这些问题都急待解决，都是值得进一步开发研究的重要课题。

### 1.3.2 弯管成形的研究现状

自上世纪七十年代以来，日本等国家为开发弯管技术进行了大量的实验研究，取得了很大进展。经过几十年的发展，国外已经生产出了各种规格型号的

弯管设备,可以制造相对弯曲半径为 $10\sim 15$ 、弯曲角度在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内的任意角度的弯管。

胡福泰针对局部加热无模弯管过程建立了简化的有限元模型,开发了相应的可预报管材弯曲后断面畸变的三维刚塑性有限元程序,但该程序只适用于局部加热无模弯管的稳态变形阶段<sup>[13]</sup>。

Welo T 和 Paulsen F 等采用有限元软件 MSC.MARC5.2 对挤压铝合金单、双室矩形管绕弯和拉弯过程进行了三维弹塑性数值模拟<sup>[14,15]</sup>,研究了材料、工艺及模具参数对成形过程的影响,其中弯曲模的转动是通过嵌入作者自编的程序实现的。结果表明,采用内部芯棒能有效地防止起皱的波纹高度和外侧翼板的塌陷,翼板的等效宽厚比是影响截面局部变形程度的重要因素,采用预拉工艺能减少起皱和回弹,减小应变硬化指数和增大轴向力有助于回弹的减小。模拟过程中,管坯采用的是计算效率较低的八节点六面体单元,并且为提高该单元的弯曲性能,还采用了假设应变公式,这又进一步降低了计算的效率。

而在近几年,弯管的热点问题已经转为弯曲成形后的回弹问题,回弹问题相当复杂,目前关于薄壁件塑性加工中回弹问题的研究已成为材料加工领域中的一个热点。国内外已有许多学者对其进行了研究,并获得了大量的研究成果。

Kin.A.stelson 等人对管绕弯成形中的回弹角的预测与控制作了比较全面的阐述<sup>[16]</sup>。文中提到,在弯曲角大于 $10$ 度时,弯管回弹角与弯曲角呈线性关系;小于 $10$ 度时呈非线性关系。在此基础上,提出实现回弹角预测的三步方案:(1)对特定规格管材,分别作一次小角度弯曲和一次大角度弯曲,通过两次弯曲的回弹数据建立两段直线回弹模型(见图 1-3)<sup>[17]</sup>。(2)在弯管件的实际生产过程中,实时测量更多的回弹角数据。(3)修改、完善历史回弹模型以便更精确地对回弹进行预测。文中还指出,管弯曲中存在复加载效应,即第一次弯曲到某一角度卸载后,再次加载时,须过弯一定角度(过弯角度至少为 $7$ 度),才能达到首次弯曲时的弯管应力状态,由于复加载效应的存在,所以基于实测回弹角数据的回弹补偿可能不完全。

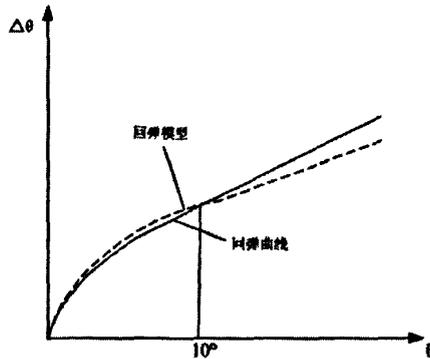


图 1-3 回弹模型图

Fig.1-3 Springback model graph

日本学者田中伸司等采用二维刚塑性 FEM 分析管材绕弯过程。他们将内部有液压负荷的圆管和方管，采用环状模进行模拟，即将圆管和方管绕弯过程简化为二维准轴对称问题进行近似三维分析，通过有限元模拟获得断面形状的变化，研究了液压力对方管和圆管断面形状的影响<sup>[18,19]</sup>。

目前针对管材弯曲成形从理论、实验方面着手研究的较多，基于数值模拟研究的较少；针对加热弯曲成形研究的多，而对冷弯成形研究的少；针对矩形管弯曲研究的多，针对圆管弯曲研究的少；因此，采用有限元法模拟管材弯曲成形过程，并与优化设计相结合构筑基于理论、经验和数值模拟的专用系统是管材弯曲研究发展的趋势<sup>[20]</sup>。

## 1.4 课题来源与研究意义、目的和内容

### 1.4.1 课题来源

本课题来自黑龙江省科技攻关项目—电站锅炉弯管三维 CAD/CAPP/CAE 系统集成及模具改进研究 (GC05A524)

### 1.4.2 主要研究意义

该项目虽然是针对电站锅炉弯管的成形质量进行分析，但留有扩展口，稍加改动可适用于解决石油化工、汽车工业、航空航天工业、船舶制造业等多种行业中的弯管工艺问题，因此有广阔的市场前景。

而管件弯制在各个领域的广泛应用也决定了对弯管成形质量的分析具有重

要的研究意义。

### 1.4.3 主要研究目的

管材的弯曲和板料的弯曲一样。在纯弯曲的情况下，外径为  $D$ ，壁厚为  $t$  的管子受外力矩  $M$  作用发生弯曲时，中性层外侧管壁受拉应力  $\sigma_1$  作用，管壁变薄；中性层内侧管壁受拉应力  $\sigma_2$  作用，管壁变厚(见图 1-5a)<sup>[21]</sup>。而且，横截面的形状由于受合力  $F_1$  和  $F_2$  的作用由圆形变为近似椭圆形(见图 1-5b)，当变形量过大时，外侧管壁会产生裂纹，内侧管壁会出现起皱(见图 1-6)。

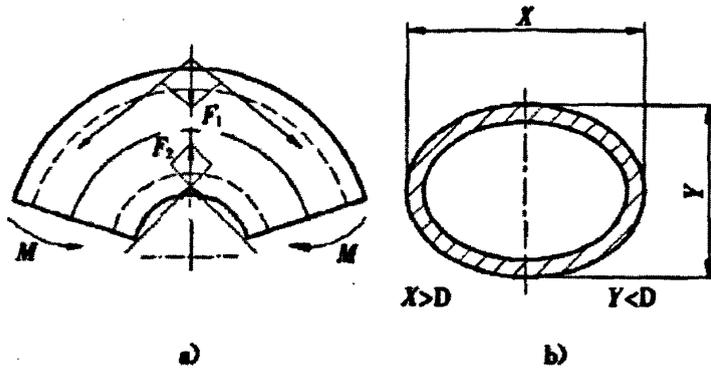


图 1-5 管子弯曲时的受力与变形

Fig.1-5 Force and metamorphose when bending the tube

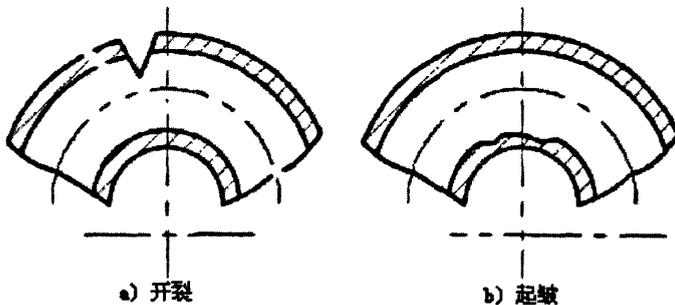


图 1-6 管子弯曲时的缺陷

Fig.1-6 Limitation when bending the tube

研究任何领域都应该先从该技术领域存在的缺陷进行分析，弯管技术也一样，衡量弯管技术好坏的依据就是其产品质量的高低——弯管质量。弯管质量就是管材弯曲成型后与预期弯管的质量，而弯管的质量是衡量弯管模具性能的

关键，换句话说要想提高弯管质量就必须从模具的性能着手进行分析。通常情况下，管子弯曲后都会产生不理想的变形<sup>[22]</sup>，如图1-7所示。

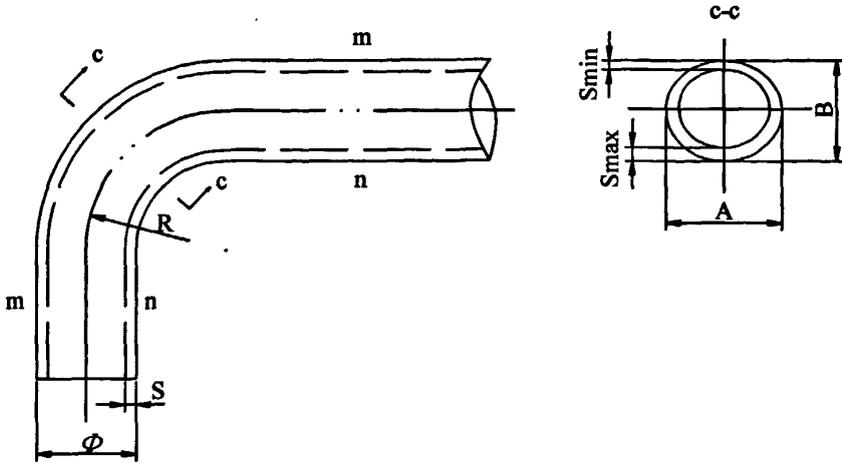


图1-7 弯管形状图

Fig.1-7 Shape of the bending tube

m-m 侧称为管子外侧，在管子弯曲时受拉力而减薄；n-n 侧称为管子内侧，在管子弯曲时受压力而增厚。R 为管子弯曲半径设计尺寸， $\phi$  为管子名义外径。从截面图上可以看到，管子截面由圆形变为椭圆形，椭圆截面的壁厚也不均匀。A 为椭圆截面长轴，B 为椭圆截面短轴；S 为管子名义壁厚， $S_{min}$  为截面最小壁厚， $S_{max}$  为截面最大壁厚。椭圆度  $a=(A-B)/\phi$ ，外壁减薄率  $b=(S-S_{min})/S$ ，内壁增厚率  $c=(S_{max}-S)/S$ 。卸载后由管壁内侧和外侧纤维弹性恢复而引起的弯曲角度变化称为回弹角<sup>[23]</sup>。

弯管质量主要包括椭圆度、外壁减薄率、内壁增厚率、回弹角等几个方面，这些方面又与相对弯曲半径、相对壁厚、材质、弯管方法关系密切。随着锅炉单机容量的增大，锅炉中所需弯管的强度相应提高，管子尺寸规格也逐步加大，这就产生了新问题：弯管的质量能否达到这种更高的要求？原有设备驱动能力对大规格管子是否足够？只有实现了弯管质量的准确预测和弯管过程力的精确计算，才能合理地安排工艺、设备，才能保证弯管质量和设备正常使用，为安全生产、优质生产打下基础，通过制造信息化提高企业经济效益。

本文研究目的就是通过对弯管成形质量的分析，和对一些弯管参数的提前预测，对弯曲后管材质量进行提前评估，以尽量避免不必要的浪费。

#### 1.4.4 主要研究内容

针对企业生产中预测弯管质量和驱动力的需求，本文利用计算机的数值计算优势，结合理论分析对弯管过程进行模拟，主要从以下几个方面开展工作：

1. 建立冷弯管力学理论模型。弯管制造过程是一个非线性、大塑性变形的过程，难以用一般的经典理论公式解析求解，并且不能简化成通常的平面应变、平面应力和轴对称问题。因此，建立三维模型来描述；

2. 建立管件弯曲的数值分析系统，研究冷弯管三维有限元模拟关键技术；随着模型的复杂、数据量的增大，手动建模在速度及精确性上均不能满足要求，使用有限元分析软件 MSC.MARC 来模拟拉拔管成形过程；

3. 通过 MSC.MARC 后处理系统分别对大型弯管和小型弯管成形质量的主要因素进行分析并通过试验验证该模拟系统的可行性；

4. 针对分析结果对大型弯管机的滑槽进行可行性改进及小型弯管模的组合式设计。

## 第2章 弯管有限元建模

### 2.1 前言

冷弯管工艺过程涉及到塑性大变形、大位移、接触非线性等问题，变形非常复杂，难以用一般的经典理论公式解析求解，并且不能简化成通常的平面应变、平面应力和轴对称问题。因此，需要采用三维模型来描述，借助于有限元分析方法和有限元软件，利用其中大位移和接触分析方法解决上述求驱动力和预测弯管质量的问题。

#### 2.1.1 CAE 技术

CAE (Computer Aided Engineering)，即计算机辅助工程，其重要的内容就是利用计算机，对复杂工程和产品的结构强度、刚度、屈曲稳定性动力响应、三维多体接触、弹塑性等力学性能进行辅助分析计算，以及对结构性能进行优化设计。其基本方法是将一个形状复杂的连续体分解为有限个形状简单的子区域，即将一个连续体简化为有限个单元组成的等效组合体，把求解连续体的场变量（应力、位移、压力和温度等）问题简化为求解有限个单元节点上的场变量值问题。此时求解的基本方程将是一个代数方程组，而不是原来描述真实连续体变量的微分方程组，得到近似的数值解。求解的近似程度取决于所采用的单元类型、单元的密度以及单元的插值函数。

经历了 30 多年的发展历史，CAE 技术的理论和算法都日趋成熟，现已成为航空航天、机械、土木结构等工程领域必不可少的数值计算工具。先期出现的 CAD 技术着重解决的是产品的设计质量问题；CAM 着重解决的是产品的加工质量问题；而 CAE 着重解决的是产品的性能质量问题。随着计算机技术的普及和不断提高，CAE 系统的功能和计算精度都有了很大提高，各种基于产品数字建模的 CAE 系统应运而生，并已成为结构分析和结构优化的重要工具。最优化技术引入 CAE 使人们从繁重的凑试工作中解脱出来，极大的提高了企业的设计效率、减轻了技术人员的劳动强度、缩短了设计周期，受到广泛的欢迎。

## 2.1.2 MSC.MARC 软件简介

MSC.MARC 是功能齐全的高级非线性有限元软件, 具有极强的结构分析能力。在我国的航空、航天、核工业、铁路运输业、机械制造、汽车、电子、土木工程、生物医学、水利等领域得到广泛的应用, 为各领域产品设计、科学研究做出了很大贡献。该软件的功能在不断地改进, 应用领域也在不断地扩展。但是由于实际问题的多样性, 以及不同用户要求的特殊性, 利用软件缺省的标准输入/输出有时并非不是最佳选择。另外, 也存在标准程序尚不具备特定用户需要某一方面功能的情况。对于前一种情况, 可通过 MSC.MARC 提供的大量用户子程序接口, 将用户需要的输入/输出以最简便的方式定义, 而无需受缺省输入/输出的限制。对于后者, 在功能强大的通用软件框架下可以耦合用户所需功能, 使通用软件向特定领域的专用软件扩展。

MSC.MARC 有两种二次开发方式: 用户子程序和 MSC.MARC 自带的脚本语言 Python 编程。MSC.MARC 提供了许多对用户开放的子程序, 即用户子程序, 用户可以根据自身需要通过 FORTRAN 语言编制用户子程序, 实现对输入数据的修改、材料本构关系的定义、载荷条件、边界条件、约束条件的变更, 甚至扩展 MSC.MARC 的功能。MSC.MARC 自带的脚本语言 Python 在前处理中能够实现几何模型、有限元网格划分、约束边界条件、载荷及材料性能等的参数化等, 在后处理中能够实现从结果数据中提取用户所关心的信息。

MSC.MARC 软件从 20 世纪 70 年代初诞生至今的 30 年中, 一直紧跟有限元方法的理论和计算机硬、软件发展的最新进展, 已发展成为功能强大、界面友好的有限元软件系统。它拥有丰富和完善的单元库、材料模型库和求解器, 保证了它能够高效的求解各类结构的静力和动力中的线形、高度非线性问题, 稳态和瞬态热分析及热-结构耦合问题。

MARC 被 MSC 收购后, 保留了它的主要产品: MSC.MARC 是高级非线性有限元分析模块, MSC.Mentat 是 MSC.ARC 的前后处理图形对话界面。两者严密整合的 MSC.ARC 和 MSC.Mentat 成为解决复杂工程问题, 完成学术研究的高级通用有限元软件。本文以 MSC.MARC 软件为平台, 借助其自带的脚本语言 Python, 通过对锅炉弯管过程进行实例分析, 仿真管件弯曲过程中各参数变化以指导管件弯曲过程中相关工艺参数的制定。

### 2.1.3 有限元单元法的基本步骤

弯管分析的有限元法步骤包括以下 6 步<sup>[24]</sup>:

1. 定义形函数  $N(x)$  进而通过单元节点变量  $a$  描述单元域内连续的变量  $u(x)$ 。

$$u(x) = N(x)a\sigma^e \quad (2-1)$$

2. 定义单元材料的响应 如应力、应变和热流等。

$$\varepsilon(x) = L[u(x)] = Ba^e \quad (2-2)$$

$$\sigma = \sigma(\varepsilon) = D\varepsilon(x) \quad (2-3)$$

3. 形成单元矩阵 建立单元与外界环境的平衡关系。

$$K^e a^e + f^e = 0 \quad (2-4)$$

其中  $K^e$  为单元刚度矩阵,  $f^e$  为单元节点上的等效外力,  $a^e$  为单元节点位移。刚度矩阵按下式计算:

$$K^e = \int_{\Omega^e} B^T DBdV \quad (2-5)$$

节点等效外力为:

$$-f^e = \int_{\Omega^e} N(x)^T bdV + \int_{\Gamma} N(x)^T tdS + F \quad (2-6)$$

单元刚度矩阵代表了结构单元的刚性或传热单元的传导性, 节点外载荷代表了单元内体力(或内热源)、面力(或热流), 节点集中力的贡献。

4. 集成 将覆盖结构全域的所有单元的刚度矩阵和节点外力对平衡的贡献集成, 建立整体结构的平衡方程:

$$K = \sum_e K^e \quad (2-7)$$

$$f = \sum_e f^e \quad (2-8)$$

$$Ka + f = 0 \quad (2-9)$$

5. 求解平衡方程 指定一些节点位移后, 可将平衡方程按已知节点位移和未知的场变量分解为两部分:

$$\begin{pmatrix} K_{uu} & K_{us} \\ K_{su} & K_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_u \\ a_s \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f_a \\ f_r \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

$$a_u = -K_{uu}^{-1}(f_a + K_{us}a_s) \quad (2-11)$$

$$f_r = -(K_{su}a_u + K_{ss}a_s) \quad (2-12)$$

其中  $a_u$  为未知节点变量,  $a_s$  为已知节点变量,  $f_a$  为外加的节点力,  $f_r$  为节点反作用力。因此, 求解变成获得已知位移的节点反作用力和已知的载荷节点位移。

6. 回代 根据计算出的节点变量, 代入第 2 步的表达式中, 获得单元应变、应力或热流情况。

## 2.2 弯管有限元力学模型建立

### 2.2.1 冷弯管基本力学模型的建立

管材的弯曲过程可以用如图 2-1 所示的力学模型来描述<sup>[25]</sup>:

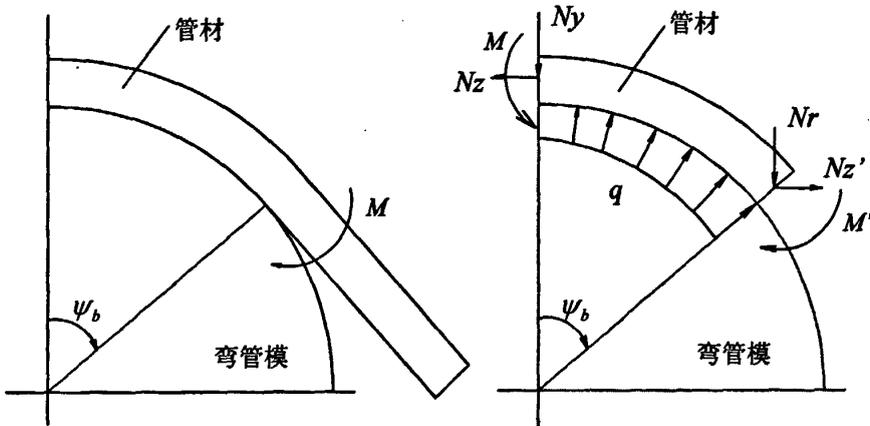


图2-1 管材弯曲的力学模型

Fig.2-1 mechanics model of the tube-bending

管材的引导端被弯管模和夹块约束，同时有一个力矩  $M$  作用于管材尾部，使得管材逐渐弯向弯管模直至接触。在管材的自由变形部分，弯曲力矩  $M$  和集中力  $N_y$ 、 $N_z$  作用在一端，力矩  $M'$  和集中力  $N_r$ 、 $N_z'$  作用在另一端；分布力  $q$  作用在管材的内侧面<sup>[26]</sup>。

### 2.2.2 坐标系和基本假设

上面已经说过，管材弯曲过程是一个相当复杂的过程，所以在进行分析之前需要进行一些令模型简化的假设，这些假设的界定是为了得到更清晰的分析。

假定管材已经弯制了  $180^\circ$ ，取  $90^\circ$  处建立坐标系如图 2-2 所示。管材的横截面是建立在以  $x(s)$ 、 $y(s)$  为坐标轴的右手笛卡儿坐标系上，其中  $s$  是沿着未变形管材中面所测的环向弧长，而中面是位于变形前壁厚中点的柱面。 $t$  轴的原点位于未变形中面上，方向垂直于中面。横截面也可以用原点在  $o$  点的极坐标  $(\rho, \theta)$  来描述，管中性轴通过  $x(s)$ 、 $y(s)$  坐标系的原点  $o$ ，弯曲模的轴通过点  $o_1$  并垂直于  $x-z$  平面。未变形管材横截面的中心点  $o$  和变形后中面上点的距离用  $r$  代表。 $\varphi$  是指由于截面变化而引起的通过  $o'$  点的切线和  $x$  轴之间的角度增量。当没有发生截面变形时这个角度为零。角度  $\psi$  是从弯曲区域的中心所测的弯曲角度。

为了简化分析，做出如下假设<sup>[27,28]</sup>：

1. 垂直于管材轴线的平面在变形后仍保持平面；
2. 管材的材料是不可压缩的，分析中忽略了弹性应变，等效应力和等效应变之间的关系符合刚塑性线性应变强化材料模型；
3. 变形关于  $x-z$  平面对称；
4. 加载过程采用简单加载理论；
5. 忽略工具和管材之间的摩擦力。

基于以上假设，当采用最小势能原理分析时弯管力学模型可以进一步得以简化<sup>[29]</sup>。因为模具是被作为刚性体，在沿着分布接触力  $q$  作用的方向上没有位移，因此  $q$  所作的功为零。轴向力  $N$  所作外功  $W$  为零，因此垂直于管材轴向的平面（如  $x-y$  平面）位移为零。

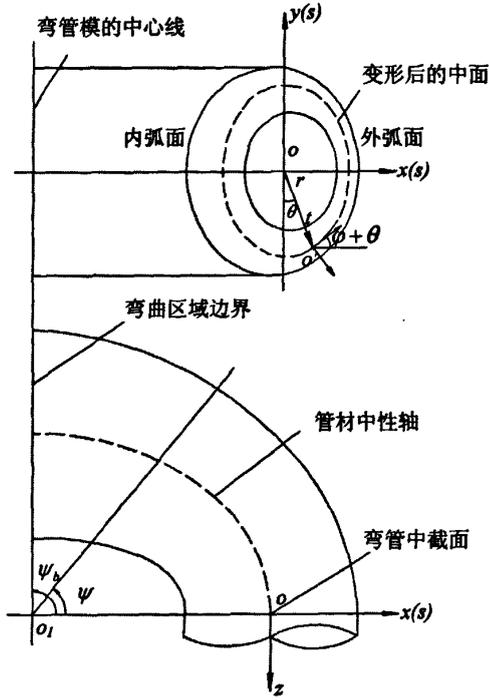


图2-2 弯管力学模型的坐标系图

Fig.2-2 Reference frame of the tube-bending analysis

## 2.3 弯件弯制过程模拟建模

### 2.3.1 前处理建模

采用有限元分析软件 MSC.MARC 模拟拉拔管成形过程的优点是:1)不需建造物理模型,成本低; 2)具有较强的非线性分析能力; 3)能对变形过程中的物理特性真实包容; 4)有较大的灵活性,能用于模拟实现无法提供的虚拟条件下的模型形态,从而为探索性的研究提供了手段<sup>[30]</sup>。但是,随着模型的复杂、数据量的增大,手动建模在速度及精确性上均不能满足要求。针对目前有限元分析软件手动建模存在的问题,本文提出 PRO/E 与 MSC.MARC 联合参数化建模,整合两大软件的长处,将有限元分析前处理的部分数据如几何模型、有限元网格划分等参数化,使用户通过确定参数值实现自动建模,从而减少重复性

工作，较大幅度提高效率。

以大型弯管机为研究模型，选取模拟管件的参数为直径  $D168\text{mm}$ ，壁厚  $30\text{mm}$ ，弯曲半径  $R400\text{mm}$ ，材料选用 20G。

与其它 MSC 软件一样，MSC.MARC 有限元软件具有强大完善的接口功能，它自带的 Mentat 建模功能并不强大，但 MSC.MARC 软件具备和许多著名 CAD 和 CAE 软件交换几何造型和有限元模型的数据文件接口，包括 Autocad、PRO/E、UG 等多种接口功能。本系统采用 PRO/E 几何建模导入和 MSC.MARC 自带建模结合的方法。如图 2-3 所示。

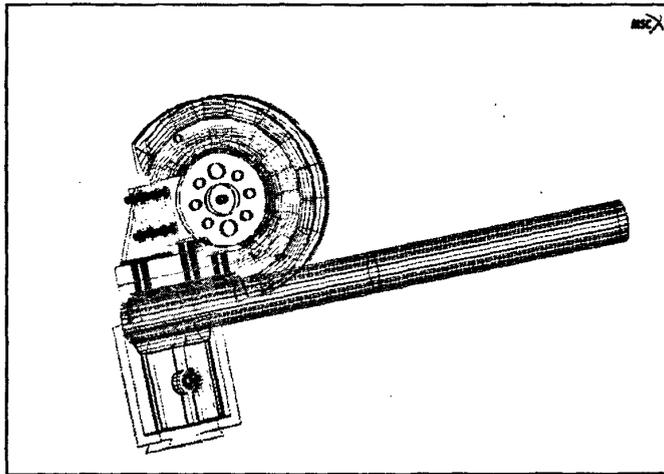


图 2-3 弯管的前处理建模

Fig.2-3 Pro-disposal modeling of the tube-bendin

将 IGES 格式模具导入 MSC.MARC 并进行对称修补及网格划分，其命令流如下：

```

MAIN
  MESH GENERATION
    FILES
      IMPORT
        IGES
          die.igs
        RETURN (twice)
  SWEEP
    POINTS
      ALL: EXIST.
    
```

```
RETURN
AUTOMESH
CURVE DIVISIONS
FIXED AVG LENGTH (on)
AVG LENGTH 6
RESTRICTION FORCE EVEN DIV
APPLY RESTRICTION TO DETECTED LOOPS
APPLY CURVE DIVISIONS
ALL: EXIST.
RETURN
```

因为MSC.MARC软件中只能对曲面和点线进行网格划分，所以经过IGES格式导入的实体要先经过以上步骤转化为曲面，由于所计算的面过多导致计算量大，因此本文对导入模型进行进一步简化，用MATENT自带的SUBTRACT和UINT功能对导入实体进行修改，在不影响分析结果的同时减少数据的计算量。

### 2.3.2 有限元网格的生成 (MESH GENERATION)

划分网格是建立有限元模型的一个重要环节，划分网格的数量和质量直接影响计算精度、计算规模和分析效率。网格划分越细越多则分析精度越高，但是计算规模和所需要的计算时间也会增加，所以在划分网格时应该综合考虑这两个因素。

1. 管材 钢管的几何形状较为规则，为了简化程序，在 MSC.MARC 软件的前处理中直接可生成单元元素所代表的管材。生成时，先生成二维单元，然后用 `expand` 命令扩展为三维实体单元。由于钢管的拉拔弯曲的过程中要形成复杂物理学及化学变化，金属流动情况比较复杂，变形量很大，数据变化梯度大，为了适应计算数据的分布特点，因而需要将靠近内表面的单元划分细一些；靠近外表面的管材部分在拉拔过程中变形量较小，计算数据变化梯度小，可以将单元划分的粗一些。所以在划分管料的平面单元时，在径向将偏斜系数 `BIASFACTORS` 设置为-0.3，使得管料平面划分单元时，靠近管料内壁的单元细而从内径沿着半径方向向外单元逐渐变稀疏。由于在成形过程中管料内壁要形成变形褶皱，所以管料内壁的单元尺寸必需小于外表面。最终管料划分单元的情况如图 2-4 所示。

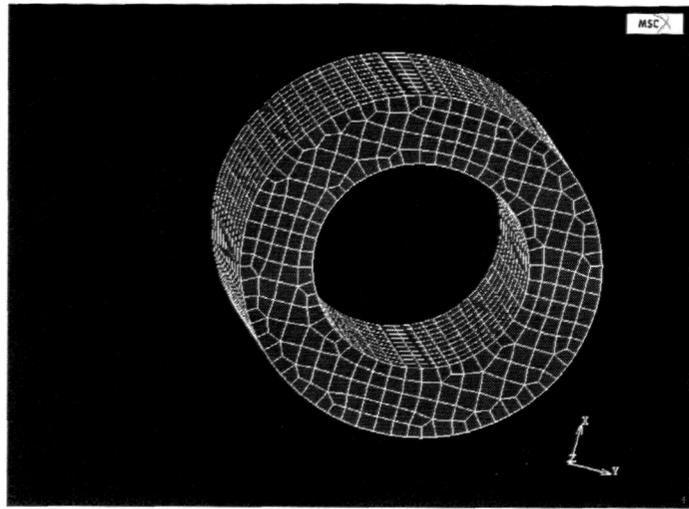


图 2-4 管子的网格划分

Fig.2-4 Gridding plot of the tube

2. 模具 模具采用的是 IGES 实体导入，为了简化模型，在 MSC.MARC 中对导入模型进行了修改，减去多余的表面，体的网格划分是先对待划分实体进行表面网格划分，然后进行在进行网格划分之前，必须进行几何清理和修复，清理掉多余的自由边，消除所有的二维开环；检查所有的曲线和曲面。这里需要特别注意的是，划分面网格成功以后，划分体网格之前必须保证没有多余的节点和几何点；清理掉多余的自由边；所有单元的外法线方向一致；所有单元的外轮廓线总长之和为零等。由于分析表面过多如果用六面体网格划分会存在很大误差，不能很好的逼近原几何实体，因此对芯棒划分选取四面体单元。

划分网格之后必须清除掉多余的有限元元素和重合的几何实体；检查单元的节点编号、单元形状是否奇异；检查三维单元 Jacobian 是否为负，并加以纠正。最终划分的模具单元结果如图 2-5 所示。

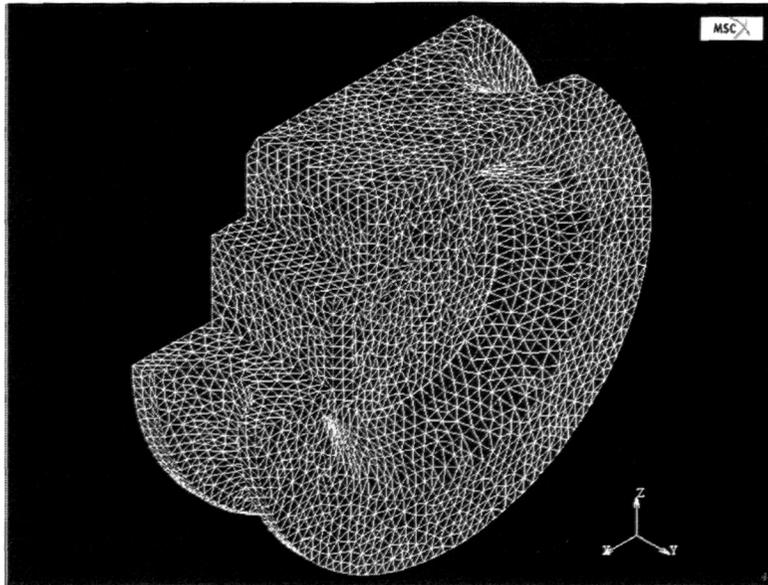


图 2-5 模具的网格划分

Fig.2-5 Gridding plot of the mould

对与管件接触部分进行细划分，命令流如下：

MAIN

MESH GENERATION

AUTOMESH

SURFACE MESHING

triangles (delaunay) SURFACE TRI MESH!

all: EXIST (*for all surfaces*)

PLOT

draw NODES (*off*)

draw SURFACES (*off*)

draw CURVES (*off*)

elements SOLID

REGEN

RETURN

MAIN

MESH GENERATION

AUTOMESH

SOLID MESHING

```
ELEMENT SIZE
      3 5 1
HEXMESH
```

### 2.3.3 边界条件的定义 (BOUNDARY CONDITIONS)

边界条件是用来建立包含施加于模型上的载荷以及约束边界条件等的分析工况。本文涉及到约束边界条件、载荷边界条件两种。针对本课题的研究内容,将载荷边界条件进行了适当的简化,在原模型的基础上取消固定夹块和活功夹块,以固定的边界约束来代替。计算在某些特定位置上的应力、应变大小,以便为设计模具提供一些理论依据。

### 2.3.4 初始温度的定义 (INITIAL TEMPERATURE)

本文研究的是冷弯管技术,因此不需要考虑温度对分析的影响,分析时采用软件默认常温即可。

本次模拟是在常温 20℃下进行的。

Python 程序为:

```
#定义初始温度
DEF INITIAL_TEMPERATURE():
PY_SEND("**NEW_ICOND")
PY_SEND("**ICOND_TYPE NODAL_TEMPERATURE")
PY_SEND("**ICOND_DOF T")
PY_SEND("**ICOND_DOF_VALUE T")
PY_SEND("20")
PY_SEND("**ADD_ICOND_NODES ALL_EXISTING")
```

### 2.3.5 材料特性的定义 (MATERIAL PROPERTIES)

芯棒从 MSC.MARC 自带的材料库中读入 20MnCr5。管料的材质为 20# 钢,变形阻力计算模型如下:

$$0.29 \sigma = 810 \varepsilon$$

式中  $\varepsilon$  ——筋底壁厚压下率 (%);

$\sigma$  ——变形阻力 (Mpa)。

管料的材料应变-硬化曲线如图 2-6 所示。

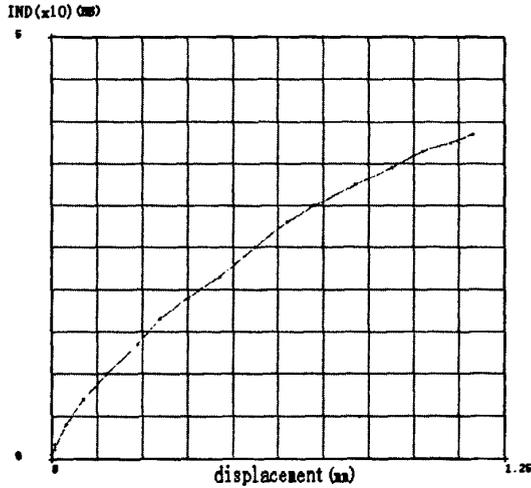


图 2-6 管料的材料应变硬化曲线

Fig.2-6 Stress-strain curve of the tube material

### 2.3.6 接触条件的定义 (CONTACT)

本文涉及的接触条件的定义是接触体的定义 (CONTACT BODY) 和接触表 (CONTACT TABLE) 的定义。接触体 (CONTACT BODY) 的定义。接触体包括可变形接触体、刚性接触体、有热传导的刚性接触体三类。可变形接触体可以计算应力和温度分布；刚性接触体不计算变形和应力，接触过程中温度保持为常数；有热传导的刚性接触体不计算变形和应力，接触中考虑刚体内的热传导。

文中模具视为刚性接触体，管子均被视为可变形接触体。

在 MSC.MARC 中定义接触体的时候必须遵循以下的几个规则：

1. 先定义变形体，后定义刚体；
2. 先定义软的材料，后定义硬的材料；
3. 先定义小的接触体，后定义大的接触体；
4. 两个变形体网格密度不同时，接触体定义当中应该先定义网格密的，然后定义网格疏的；
5. 先定义几何形状凸的，后定义凹的。

### 2.3.7 载荷工况 (LOADCASE) 的定义

在载荷工况 (LOADCASE) 要完成的操作是选择边界条件、载荷条件、接触表的选取和迭代收敛参数的选择。

边界条件、载荷条件、接触表选择上文所定义。迭代收敛参数包括：①每一个增量步中的最大迭代次数 (取 200)；②出现非正定后强制求解的指定 (选定)；③迭代方法的指定 (选 MODIFIED NEWTON-RAPHSON)；④初始应力对刚度的贡献 (选 FULL)；⑤定义分析时的收敛准则和收敛容差 (CONVERGENCE TESTING) 的指定 (选 RELATIVE, RESIDUALS OR DISPLACEMENTS)，迭代收敛准则及收敛容差 0.1；⑥定义历程的总时间 (即定义管料行程时的位移—时间关系中的时间 (load\_time)、载荷增量控制 (选 ADAPTIVE/MULTI-CRITERIA))。

### 2.3.8 作业参数的定义并提交运行 (JOBS)

作业定义参数包：①括选择 LOADCASE；②激活 INITIAL LOAD；③在 ANALYSIS OPTION 中选择大位移 (LARGE DISPLACEMENT)；④ ANALYSISDIMENSION 选择 3D；⑤CONTACT CONTROL 中的摩擦类型选择库仑摩擦，相对滑动速度一般取 0.1，接触检测中接触容限约为实体单元中最小单元边长的 1/20；⑥在 JOBPARAMETER 中定义用于分析的总内存，设为 200000000；⑦在 JOB RESULTS 中选择欲在后处理中输出的量。

Python 程序为：

```
#定义 JOBS
DEF WHOLE_JOBS():
    PY_SEND("**NEW_JOB")
    PY_SEND("**JOB_CLASS MECHANICAL")
    PY_SEND("**ADD_JOB_LOADCASES LCASE1")
    PY_SEND("**JOB_OPTION FRICTYPE:COULOMB")
    PY_SEND("**JOB_OPTION FRICMETH:NSTRESS")
    PY_SEND("**JOB_PARAM VSLIDING 0.1")
    #避免穿透而把偏斜系数改为 0.9
    PY_SEND("**JOB_PARAM DISTTOLBIAS 0.9")
    PY_SEND("**JOB_CONTACT_TABLE CONTACT_TABLE")
```

```
PY_SEND("**JOB_OPTION STYLE:SINGLE")
PY_SEND("**JOB_PARAM SEPFORCE 5")
PY_SEND("**JOB_OPTION ELASTICITY:L_STRN_UPD")
PY_SEND("**JOB_OPTION PLASTICITY:L_STRN_RR_MLT")
PY_SEND("**JOB_OPTION BUCKLE_METHOD:POWER")
PY_SEND("**JOB_OPTION FINITE:ON")
PY_SEND("**JOB_OPTION SOLVER:IT_SPARSE")
PY_SEND("**JOB_PARAM SPARSE_MAXIT-1000")
PY_SEND("**JOB_PARAM SPARSE_TOL 0.0001")
PY_SEND("**JOB_OPTION SPARSE_PREC:INC_CHOL")
PY_SEND("**JOB_OPTION BUCKLE_INC:OFF")
PY_SEND("**ADD_POST_TENSOR STRESS")
PY_SEND("**ADD_POST_TENSOR CAUCHY")
PY_SEND("**ADD_POST_VAR VON_MISES")
PY_SEND("**JOB_PARAM MEMORY 200000000")
PY_SEND("**JOB_PARAM LAYERS 11")
PY_SEND("**JOB_PARAM NBMODES 0")
PY_SEND("**JOB_PARAM NPBMODES 0")
#定义 ELEMENT TYPES
PY_SEND("**ELEMENT_TYPE 7")
PY_SEND("GUANLIAO_ELEMENTS")
PY_SEND("**ELEMENT_TYPE 134")
PY_SEND("XINBANG_ELEMENTS")
#保存模型并递交任务
PY_SEND("**SAVE_MODEL")
PY_SEND("**SUBMIT_JOB 1")
PY_SEND("**MONITOR_JOB")
```

## 2.4 后处理结果提取

后处理工作的任务是提取想要分析的参数，以方便今后在加工中的应用。例如弯矩的提取可以通过 Python 程序<sup>[31]</sup>实现：

```
#a 结果文件名
```

```

a="a_job1.t16"
p=post_open(a)#打开文件 a 的后处理结果 min_force=0#该后处理文件中的
最大拉拔力 for i in range(0,p.increments()):#在每个增量步中提取结果
k=0
p.moveto(i)#调用方法 moveto 跳转到第一增量步
x,y,z=p.cbody_force(0)#调用方法 cbody_force 得到 X、Y、Z 三个方向#拉
拔力值
while k<p.increments():
s=y#把 y 方向上拉拔力赋给 s
if s>min_force:#求得该模型最大拉拔力
min_force=s
j=k
k=k+1
    
```

在后处理中,可以提取弯曲任何角度时的图形及各参数数据,可以方便地分析弯管的成形质量。其弯曲 180 度的放样图和真实的放样图如图 2-7 和图 2-8 所示。

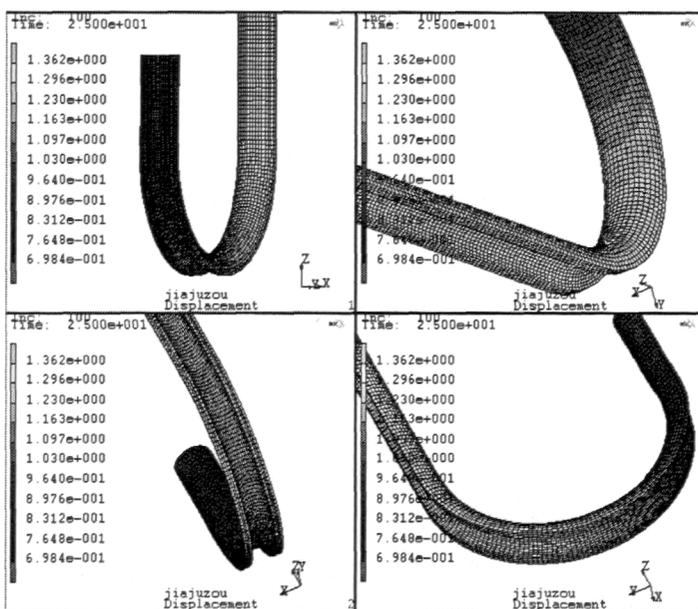


图 2-7 180 度弯管放样图

Fig.2-7 Bending tube of 180 degree

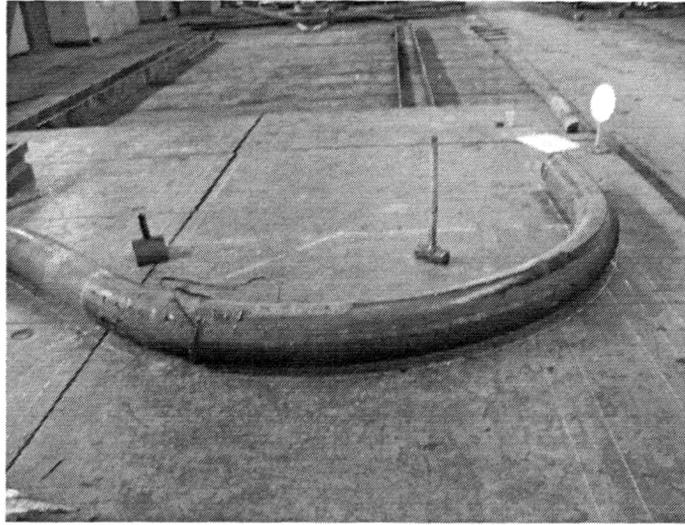


图 2-8 管子放样图

Fig.2-8 Comparing tube bending with its theoretical shape

对求得结果进行数据库保存，进行结果后处理：

1. 动态显示弯管过程 通过 ANIMATE 功能将弯管时间历程动态显示并保存至 avi 文件，可以选择只显示管子、隐去模具部分以便于更好的查看管子的变形情况；

2. 模具力提取 在后处理中通过节点解选项 REACTION FORCE，分别提取模盘弯矩、滑槽推力、活动夹块夹持力，例如弯矩图如图 2-9 所示：

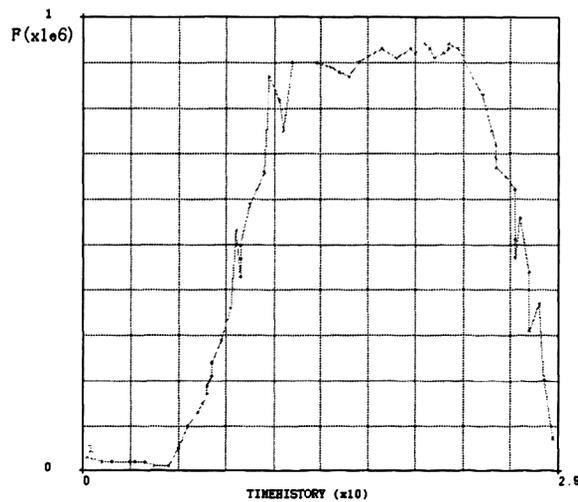


图 2-9 弯矩图

Fig.2-9 Diagram of the bending moment

3. 求取弯管质量 通过等值线图可以直观地显示整个弯头各处变形情况，如图 2-10 所示。

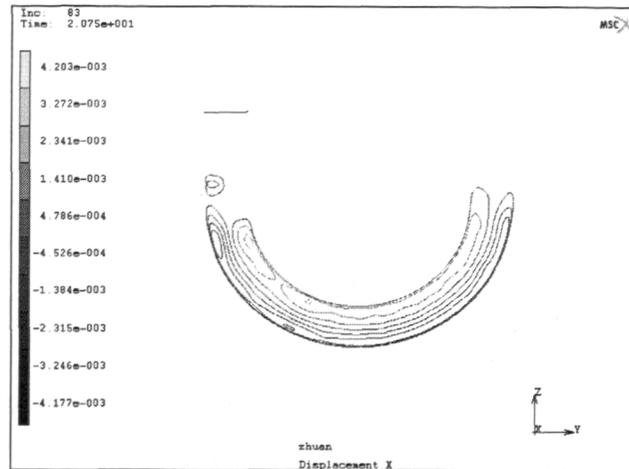


图 2-10 全弯头应变等值线图

Fig.2-10 Contour chart of the whole elbow's strain

通过 make visible 功能可以切片显示弯管任意角度的截面形状或者应力、应变等值线图，如图 2-11 所示。还可以利用 PATH PLOT，准确地逐节点求取弯管各角度位置上的变形参数，如壁厚、椭圆度、外薄率、内厚率等；

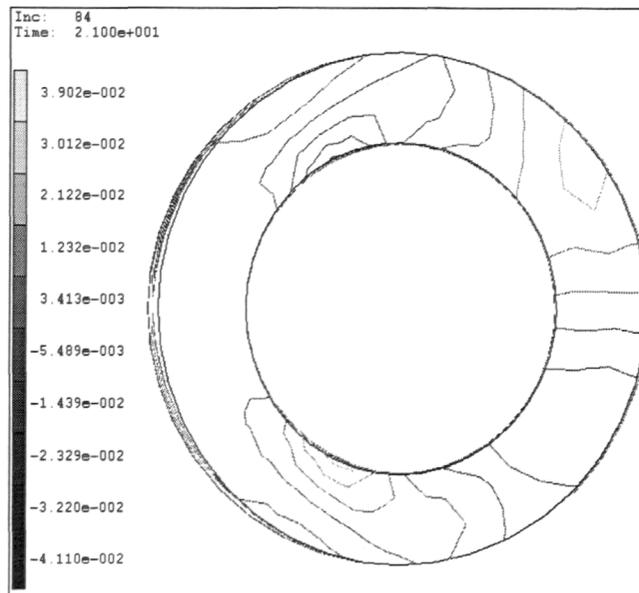


图 2-11 管截面应变切片图

Fig.2-11 Strain slice of the bending tube

4. 求取回弹角 分别读取转动结束和完全卸载两个载荷步的节点数据，计算回弹值。

## 2.5 本章小结

本章简单介绍了 MSC.MARC 有限元软件的发展及基本特性，介绍了一些基本的有限元分析步骤，然后，通过对冷弯管这一具体问题受力情况的分析，建立了冷弯管的基本力学模型和理论假设，推导了应力、应变场与能量公式。这为冷弯管工艺过程的三维有限元数值模拟研究奠定了一定的分析基础。进一步对弯管模拟流程和关键技术进行了简要的介绍，包括该流程的前处理、求解和后处理中具体关键技术的实现。方便地利用 MSC.MARC 软件实现该模拟流程。最后提取弯管过程影响弯管质量的主要参数，为后续工作中该系统的应用做充分准备。

## 第3章 仿真结果分析及实验验证

### 3.1 大型弯管模型试验验证

在上一章中利用 MSC.MARC 模拟弯管过程已经实现，接下来采用该有限元模拟系统对某锅炉厂的大型弯管模进行试验验证。对以下两种规格管子的设备力参数和质量参数进行比较：

管 A：直径  $D168\text{mm}$ ，壁厚  $30\text{mm}$ ，弯曲半径  $R400\text{mm}$ ，材料选用 20G

管 B：直径  $D141\text{mm}$ ，壁厚  $25\text{mm}$ ，弯曲半径  $R350\text{mm}$ ，材料选用 20G

#### 3.1.1 模具受力验证分析

对 A、B 两种规格管子模拟过程提取弯曲 90 度的弯矩数据，如图 3-1 所示。

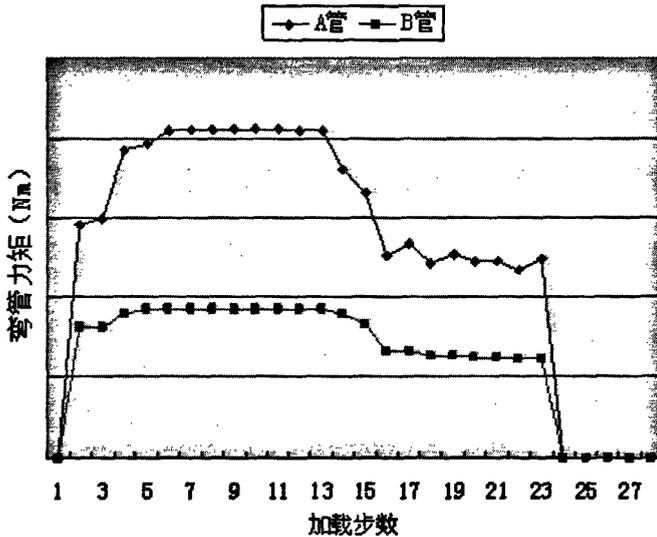


图 3-1 弯管力矩图

Fig.3-1 Diagram of the bending moment

其中，加载从 step2 开始，至 step23 结束。Step24 至 step27 为卸载过程。从单一弯管力矩曲线可见，加载开始后弯矩很快达到较大值，随着进入弯曲的

管段逐渐延长，弯矩逐渐平稳，说明主要受力区集中在起弯部分。A、B 两条弯矩曲线所呈现出的最大值出现在管子变形部分最多的载荷步，与试验中液压系统压力表所显示的最大弯矩基本吻合。

另外由图可以看出在弯制相同角度时管 A 比管 B 所受力矩大，也就是说弯制管 A 比弯制管 B 要困难，即管 A 对设备的驱动力要求更高，因此在选择某一型号管件的弯曲设备时可以参考该参数。

### 3.1.2 弯管质量验证分析

A、B 两种规格管子截面椭圆度模拟结果如图 3-2 所示。

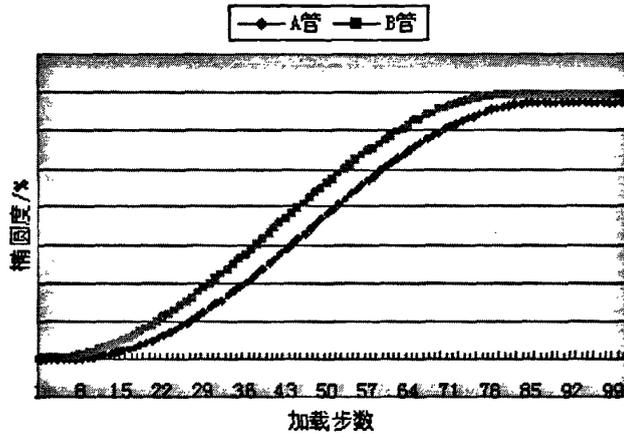


图 3-2 弯管截面椭圆度图

Fig.3-2 Ellipticity of tube-bending section

可见，对于 180 度弯管来说，椭圆度是随着弯曲角度的增大逐渐增大。模拟进一步显示，椭圆度大小与相对弯曲半径有关，相对弯曲半径越大，弯管的椭圆度越小，但结果并不明显。再由椭圆度曲线可以得知，以终截面作为最大椭圆度位置在实际检验中是可以接受的。

因此，取弯曲 180 度时的管截面 X 和 Y 方向应变图，如图 3-3 所示，利用节点距离的测量功能 distance 可以分别测出椭圆形管截面的长短轴距离，既可以得出弯曲 180 度时的最大椭圆度。同理只要测出管子外侧的壁厚值，即为弯管的最大外壁减薄值。表 3-1 显示了弯管截面椭圆度模拟值和最大外壁减薄率与工厂试验值的对照。

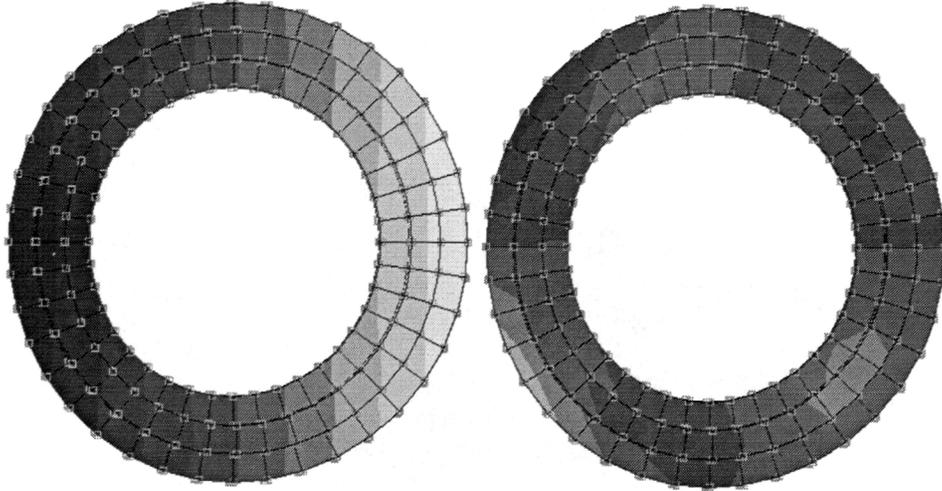


图 3-3 180 度管截面 X 和 Y 方向应变图

Fig.3-3 X and Y strain of 180 degree section

表 3-1 弯管截面质量模拟与实验对照表

Table 3-1 Comparison of sectional quality between simulation and experiments

项目	最大椭圆度			最大外壁减薄率		
	模拟值	实测值	误差	模拟值	实测值	误差
管 A	4.3531	4.57142	-4.776%	8.8142	8.73235	0.937%
管 B	3.2152	3.28269	-2.06%	9.0231	8.91572	1.20439%

外壁减薄是弯管成形后的重大缺陷，对外壁减薄的预测可以很好的掌握出现外壁减薄的程度和位置，确定是否需要施加尾推力以减少减薄率。

这里建立的有限元模型在很大程度上能够模拟出真实的设备力学参数和弯管质量参数，平均误差在 5%以内<sup>[32]</sup>。考虑到试验中数据采集手段的影响和实际生产中的诸多影响因素，此误差在可接受范围之内。并且，以此结果作为设备参数选择的参考，远远优于传统的经验公式方法；以此结果作为新型弯管生产的质量预测，可以避免试制法造成地极大浪费，基本可以满足实际要求。

### 3.1.3 设备力和成形质量的影响分析

有限元数值模拟不但能有效地预测设备能力需求和弯管质量，还可以通过

模拟进行工艺优化，针对影响弯管成形质量的因素提出一些质量改善措施，用以指导生产。下面将从管子材料参数、几何参数、弯管成形工艺参数、模具形状<sup>[33]</sup>等几方面进行分析，然后针对最具有生产实用价值的反变形法模具形状进行优化设计。

以  $D108 \times 12$ ，弯曲半径  $R400$  的管子为基础，无推力弯管，材料分别选用较典型的 20G 和 P91，弯制  $90^\circ$  有如下结果：

1. 主轴弯矩比较 两种规格完全一样，材质不同的管子弯曲，整个工艺过程中主轴所提供的弯矩如图 3-4 所示：

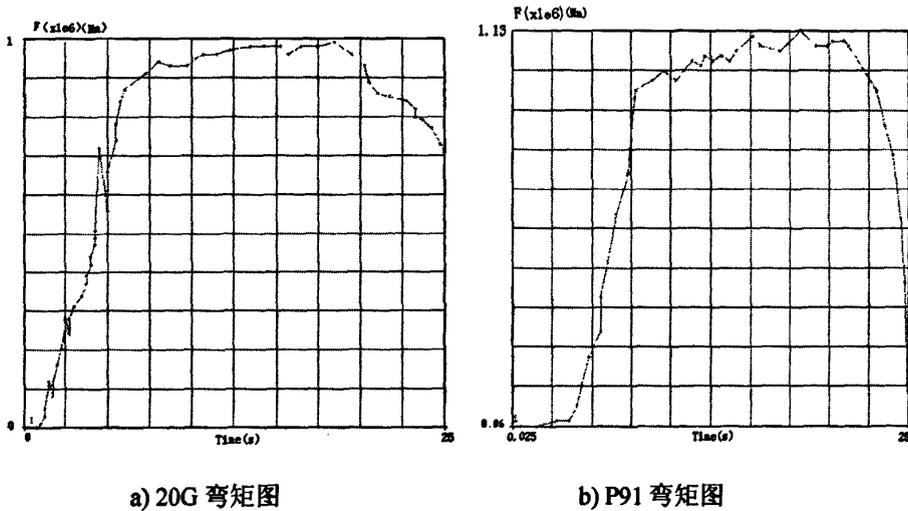
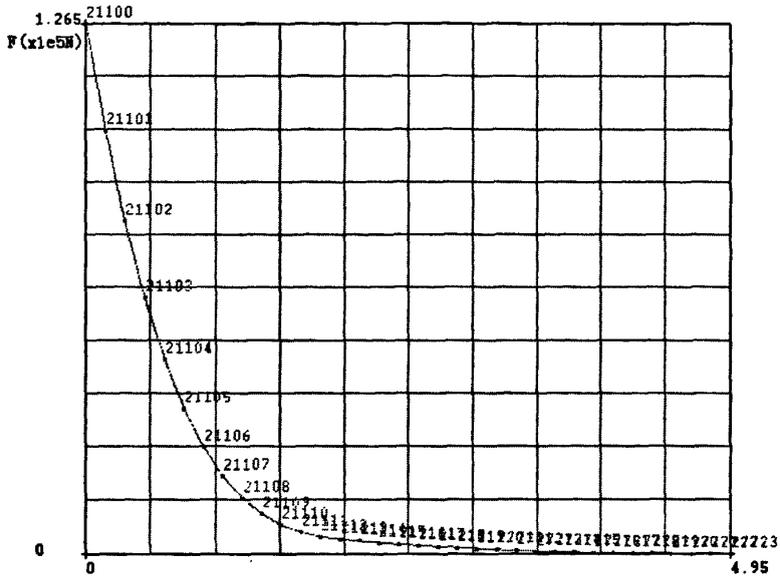


图 3-4 不同材质弯矩比较图

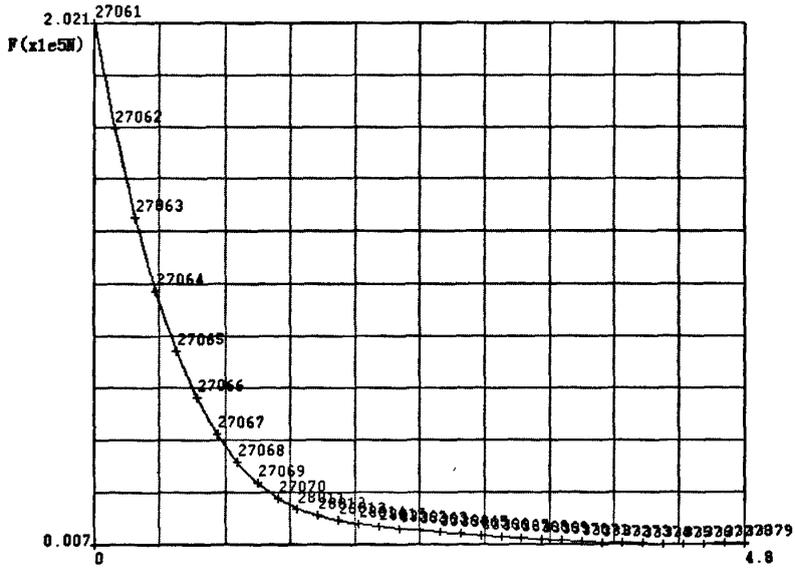
Fig.3-4 Comparison of bending moment between different materials

如图可知，弯制 20G 管件所需的最大弯矩大约为  $0.96 \times 10^6 \text{Nm}$ ，弯制 P91 管件所需最大弯矩力大约为  $1.132 \times 10^6 \text{Nm}$ 。即弯曲材料较软的 20G 管件比 P91 所需的弯矩小，这与生产实际相吻合。这些数据可以为弯管设备选择提供可靠的依据。

2. 滑槽推力比较 两种规格完全一样，材质不同的管子弯曲，整个工艺过程中滑槽所受推力如 3-5 所示。



a) 20G 推力图



b) P91 推力图

图 3-5 不同材质推力比较图

Fig.3-5 Comparison of pushing force between different materials

显然，P91 的管子比 20G 的管子对滑槽的最大尾推力大，也就是说弯制材质较硬的管材对滑槽的破坏也比较严重。在弯曲角度达到 90°和 180°时两种管子推力的具体数值参见表 3-2。

表 3-2 材质推力比较表

Table 3-2 Comparison of pushing force between different materials

D108 x12-R400	推力FX(N)	
材料	90	180
20G	126500	119470
P91	202100	190526

3. 截面质量比较 两种规格参数相同，材质不同的管子弯曲，其椭圆度也有一定的差异，经过提取管截面的应变可以发现，材质较硬的 P91 管子比较软的 20G 管子的椭圆度要好，其最大减薄率和增厚率均优于 20G 的管子。如图 3-6 所示。

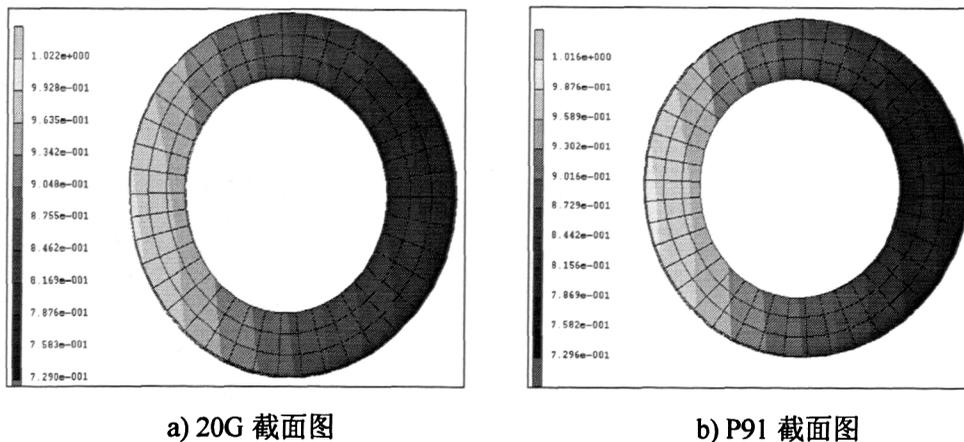


图 3-6 不同材质截面质量比较图

Fig.3-6 Comparison of sectional quality between different materials

经过多次计算，D108x12，弯曲半径 R400 的管子在弯曲角度达到 45°、90°、135°和 180°时两种管子弯曲质量的具体数值见表 3-3。

表 3-3 不同材质截面比较表

Table 3-3 Comparison of sectional quality between different materials

D108 x12-R400		椭圆度A (%)			
材料	45	90	135	180	
20G	2.91	2.94	2.95	2.99	
P91	2.87	2.88	2.92	2.94	
D108R400		外薄率B (%)			
材料	45	90	135	180	
20G	1.79	1.80	1.82	1.83	
P91	1.64	1.65	1.65	1.66	
D108R400		内厚率C (%)			
材料	45	90	135	180	
20G	2.41	2.42	2.42	2.43	
P91	1.92	1.93	1.93	1.93	

由上表可知，弯曲几何尺寸相同材料不同的管件时，材料较硬的管件的各項成形指标均比材料较软的成形指标好。即管件强度越大，其弯曲质量越好。但弯曲 P91 管件则需要比弯曲 20G 管件更高的工艺设计条件及更大弯矩的设备。这也与试验结果完全吻合。因此，在实际的管件运用中，使用条件比较艰苦的弯管应尽量采用强度较好的材料进行弯制，这样可以确保使用更加安全；而对弯管的使用要求不高时，尽量使用易弯曲的材料进行弯制，这样可以降低弯制的工艺难度。

4. 节点回弹计算 以 D108x12，弯曲半径 R400，材料为 20G 的管子为例。弯曲到 180 度时，加载步骤为第 84step，当第 85step 时模具开始卸载，取模具附近几个连续的节点，根据他们在 84 到 85 步的位移变化，即为夹具卸载后的回弹。图 3-7 为节点在卸载前后的位移回弹图<sup>[34,35]</sup>；图 3-8 为各节点卸载前后的回弹位移比较图。

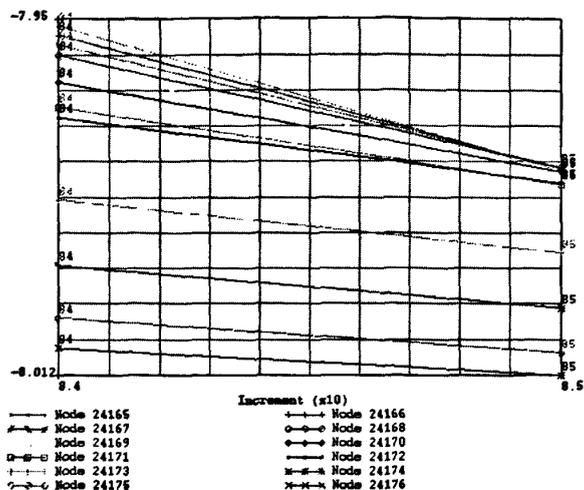


图 3-7 节点卸载前后回弹位移

Fig.3-7 Fore-and-aft springeack displacement of uninstalling node

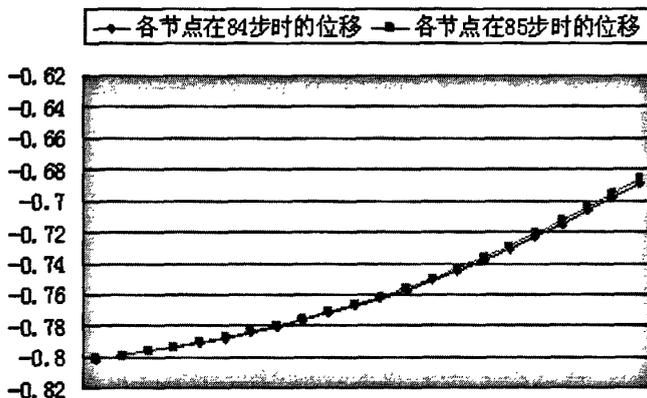


图 3-8 节点卸载前后回弹位移比较图

Fig.3-8 Comparison of fore-and-aft springeack displacement of uninstalling node

通过该图可以直接得到在模具卸载前后两个载步各节点的位移差，即为卸载后的回弹量，由该回弹量的预测可以指导较精确的角度弯曲。

由以上几组对比可知，本文对弯管过程的模拟可以很方便地甄别出适合弯管的材质，很方便地确定工艺设计弯管所需设备参数，对生产有重大的指导意义。

### 3.2 小型弯管模型试验验证

在实际的生产中，小管径管子的弯曲也是非常常见的，小管径多数指管径小于 60mm 的弯管。下面为了验证该模拟系统对小管径管件也能起到预测分析作用，以  $\Phi 38 \times 9$ ，弯曲半径 R50，材料为 15CrMoG 的管件进行 180 度弯曲。根据以上的模拟方法得出了该管件的主要参数见表 3-4，图 3-9 为弯管样图及截面图。

表 3-4 小管径管件参数表

Table 3-4 Parameter table of the little tube

参数	最大椭圆度	最大外壁减薄率	最大尾推力
$\Phi 38 \times 9$	3.8107%	6.4140%	28.47kN

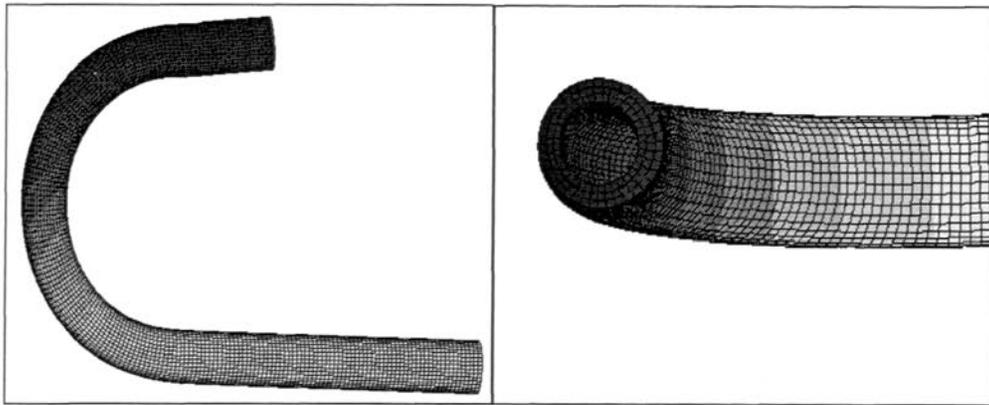


图 3-9  $\Phi 38 \times 9$  管件弯曲 180 度放样图及截面图

Fig.3-9  $\Phi 38 \times 9$  tube benged 180° lofting graph and cross section diagram

在计算机模拟之后采用上海颁新弯管机对该型号管件进行弯曲试验，得出的数据如下：检测照片如图 3-10 所示。

OV（椭圆度）=3.95%

B（减薄率）=6.7%

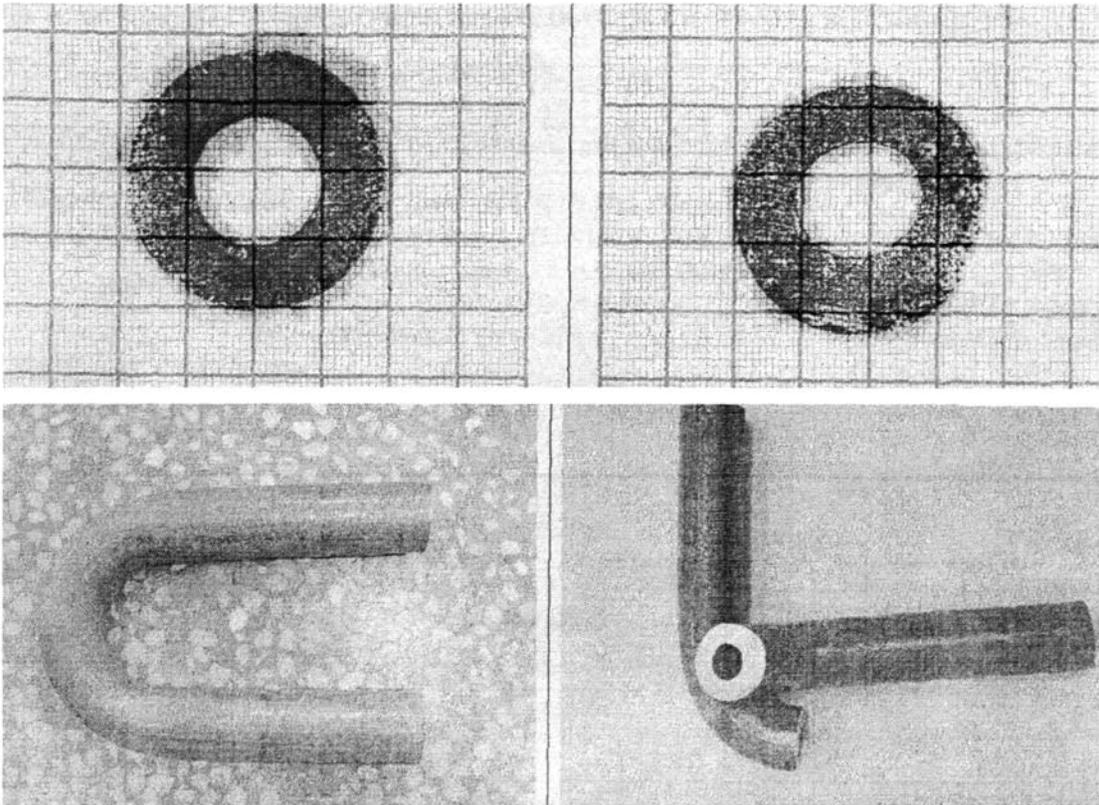


图 3-10 上海颁新弯管机弯管放样及截面照片

Fig.3-10 Tube bender bending lofting graph and cross section graph

由该数据可知，计算机模拟与真实试验的误差分别为：

椭圆度误差：3.266%

减薄率误差：4.2687%

模拟和真实试验结果的误差值小于 5%，因此可以用该模拟方法对小型弯管进行模拟预测。

### 3.3 本章小结

本章介绍了冷弯管仿真实现过程，并对使用不同有限元模型模拟弯管成形的结果进行分析，得到了以下主要结论：

1.对冷弯管成形过程进行了仿真模拟，仿真力矩与实测力矩相吻合，这对于拉拔工艺的合理设计和优化模具设计有着重要的意义。

2.通过对滑槽处节点的反作用力的测量，可以对滑槽的使用条件进行提前预测，也可以适当加载尾推力以减小弯管的椭圆度等参数。

3.利用有限元方法分析了不同材料对弯管成形过程的影响，由分析可知材

料越软,弯曲力矩越小。材料越硬,弯曲的工艺条件要求越高,但弯管的椭圆度、减薄率等重要的弯管质量参数相对很好。

4.根据夹具卸载前后弯管的弯曲处节点的位移变化,得出了弯管在弯曲一定角度后的回弹值。这对精确弯曲有非常重要的指导意义。

5.本文提供的方法可以用于优化冷弯管的模具和工艺参数设计。

## 第4章 模具滑槽的改进及组合弯管模的设计

### 4.1 大型弯管模具滑槽的改进

根据有限元部分的分析，减少滑槽的摩擦力可有效地改善弯管的质量。这里针对  $\phi 114\sim 426$  弯管机进行改进。该设备是某锅炉厂的关键设备，是前苏联产品<sup>[36,37]</sup>，如图 4-1 所示。

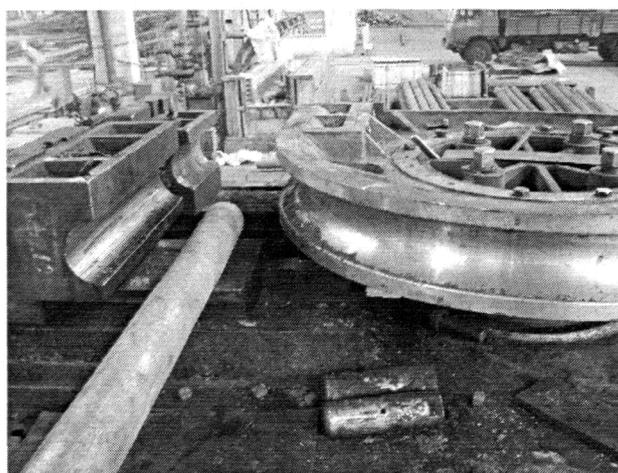


图 4-1 模具安装位置

Fig.4-1 Position of mould fixing

在该设备上配备了很多大弯管模。长期以来，这些弯管模采用固定式滑槽。固定式滑槽与管子摩擦消耗很大一部分弯矩<sup>[38]</sup>，设备能力不能得到充分利用。随着公司产品容量不断增大，高强度、厚壁管使用越来越多，对设备能力要求越来越高，进一步挖掘设备能力，用移动式滑槽替代固定式滑槽成为首选。由于设备没有移动滑槽接口，要想实现滑槽移动，必须在模具上想办法。本项目既是通过模具结构的改进实现了滑槽移动，提高了产品质量、间接地提高了设备能力、节省了模具费用。

固定式滑槽存在三个缺点：

1. 滑槽不能随管子移动，管子与滑槽之间存在很大摩擦力，造成管子表面和滑槽型腔擦伤，影响弯管质量和模具寿命。
2. 由于固定式滑槽与管子之间存在摩擦力，使设备一部分弯距用于克服此

摩擦力，降低了设备的能力。

3. 固定式滑槽有燕尾与设备相连，每次都必须加工燕尾，加工难度大，浪费材料。

针对固定式滑槽的上述缺点，本次模具设计采用移动式滑槽，移动式滑槽的优点表现为：

1. 移动式滑槽采用分体结构，滑槽与滑槽体之间涂有润滑剂，滑槽与滑槽体相对滑动，滑槽与管子之间没有相对摩擦，从而保证弯管表面质量，提高了模具使用寿命。

2. 滑槽与滑槽体之间的摩擦要比固定式滑槽管子与滑槽之间的摩擦小得多。

3. 移动式滑槽的滑槽座通用性好，对于新的弯管规格，一般只需重复制造滑槽即可避免重复加工燕尾，减少了加工难度，节省材料。

改进后的移动式滑槽原理图如图 4-2 所示。

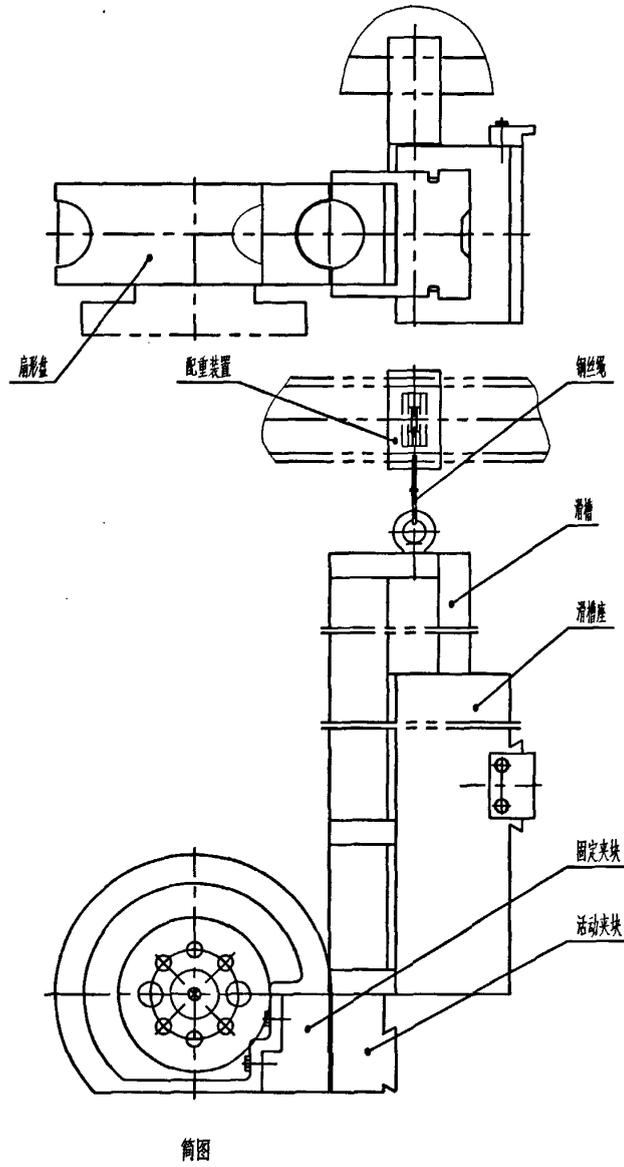


图 4-2 改进后的移动式滑槽原理图

Fig.4-2 Betterment locomotive runner theory

## 4.2 模具改进后的试验验证

在完成弯管模具的改进后，我们进行了弯管质量的实际验证及检测。这里以三个具有代表性的试验进行说明，其他检测结果见检测报告。

### 试验 1

弯管设备： $\phi 114\sim 426$  型弯管机

检测设备：DM3 超声测厚仪(德国制造)

管子令号：1160113 顶部连接管，部件号：22.1636.001

管子规格： $\Phi 168\times 30$ ，弯曲半径 R400，材料：SA335-P12

检测数据： $\Phi_{\max}=167$   $\Phi_{\min}=167$   $S_{\min}=25.2$   $S(\text{实测})=27.7$

计算：

OV (椭圆度) = 2.97%      B (减薄率) = 9%

详细检测结果见检测报告。

### 试验 2

弯管设备： $\phi 114\sim 426$  型弯管机

检测设备：DM3 超声测厚仪(德国制造)

管子令号：1160113 过热器连接管，部件号：1646.001

管子规格： $\Phi 168\times 30$ ，弯曲半径 R650，材料：SA335-P91

检测数据： $\Phi_{\max}=167$   $\Phi_{\min}=160$   $S_{\min}=27.7$   $S(\text{实测})=29.8$

计算：

OV (椭圆度) = 4.2%      B (减薄率) = 7.1%

详细检测结果见检测报告。

表 4-1 模具改进结果比较

Table 4-1 Comparison the results of betterment mould

类别 试验次数	模具结构	检测数据	椭圆度	减薄率
试验 1: 管子规格 Φ168X30, 弯曲半 径 R400, 材料: SA335-P12	改进后的 模具	Φmax=167 Φmin=162 Smin=25.2 S(实测)=27.7	2.97%	9%
	未改进前的 模具	Φmax=167.9 Φmin=146.7 Smin=24.6 S(实测)=27.9	12.6%	12%
试验 2: 管子规格 Φ168X30, 弯曲半 径 R650, 材料: SA335-P91	改进后的 模具	Φmax=167 Φmin=160 Smin=27.7 S(实测)=29.8	4.2%	7.1%
	未改进前的 模具	Φmax=167.8 Φmin=145.8 Smin=26.3 S(实测)=29.6	13.1%	11.1%

### 4.3 组合弯管模设计

传统的冷弯管模具经过不断的改进,已经可以保证得到很好的弯管质量,经过实际使用验证,成型弯管也能经受住不同使用环境的考验。但随着技术的不断进步,尤其在机械行业迅速发展的今天,由于弯管行业的日趋成熟,单纯的追求弯管弯曲质量已经不能满足制造业的需求,弯管作为制造业重要的一个环节,现在的机械制造业所要求的除了质量和成本外的最重要的一点就是生产效率。金属制造的成本是比较高的,以弯管工艺为例,一根中小型管的造价就大约可达到上万元,如果在弯曲过程中出现失误,质量不合格,那么管子就成为废品,所以在实际生产加工中,会把管子的弯曲质量放在第一位,这也引致了在以往的加工中会减慢加工的步骤,尤其在模具的生产、选择甚至在模具的装夹上都会用去大量的时间,再加上现在大多数企业所使用的模具都是一种规格模具对应相应的管子,这种一一对应的生产方法在弯管的质量上虽然可以得到保障,但在模具的加工中却消耗了大量的设计生产时间,无形中降低了弯管生产效率,另外在中小批量生产中每一套模具在使用后,几乎成为废品,这样就给加工过程带来了附加的成本。

前面已经分析了弯管质量的影响因素,那就是模具的制造精度,为了在保证精度和保证弯管质量的同时减少模具成本,本文设计了组合可调节弯管模具。

### 4.3.1 组合弯管模简介

传统的弯管模具是由一个整体构成的，如图 4-3 所示，弯曲时由它带动管子一起旋转，从而使弯管形成，它的优点是弯曲质量高，弯曲出来的管子能适应各种恶劣环境。因此，有些使用环境对弯管产品的质量、安全性要求非常高。但是相对于一些使用条件并不恶劣的弯管来说，它的缺点就体现在模具的设计制造费用偏高，时间偏长，而且在中小批量生产中几乎成了昂贵的“一次性”消费品<sup>[39]</sup>。这是在制造行业蓬勃发展的今天所不允许的，如何在保证其使用安全的同时还能减少生产成本和提高生产效率是本章介绍的重点。

针对这一问题许多学者都在此方面提出了非常行之有效的构想方案。本章设计的组合式弯管模具主要是在传统的弯管模具中进行了组合改进，主要适用于管径较小的管子(30mm~60mm)弯曲，和中小批量生产。它的主要优点是可在一个模具上调节弯管模具的管径及弯曲角度的需求，避免了经常更换模具的烦琐过程和节省了模具生产的大部分资金，简单的说就是通过调节组合模具上面的滑动管槽和更换模具块来起到对不同管径和不同弯曲半径要求的满足，既节省了经常更换模具的烦琐过程又提高了模具的使用率问题，大大节约了成本，在中小批量生产中尤为适用。

组合可调节模具由一个圆盘底座、滑槽、滑槽座和几个模具块组成，图 4-3 和图 4-4 就是本文设计的组合可调节模具，其中的 1 到 9 是活动的模具块，它的数量和大小可根据所要生产的管子情况加以更换和调节，滑槽和传统的滑槽作用一样起到了尾推的作用，不同的是它可以根据管径的大小在滑槽座上左右移动和更换，以适应不同管径的需求。滑槽座是保证滑槽左右滑动以适应各种管径管子的需求。原盘底座是起固定作用，上面有模块滑座使模具块可在上面滑动以确定弯管的弯曲半径。

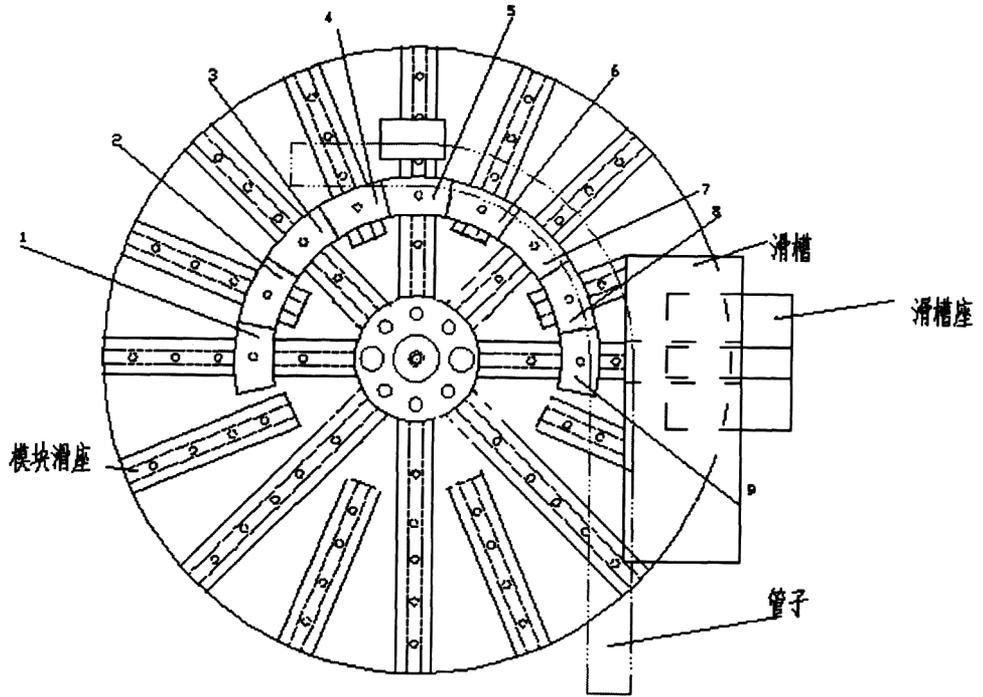


图 4-3 组合可调节模具示意图

Fig.4-3 Combined accommodated mould

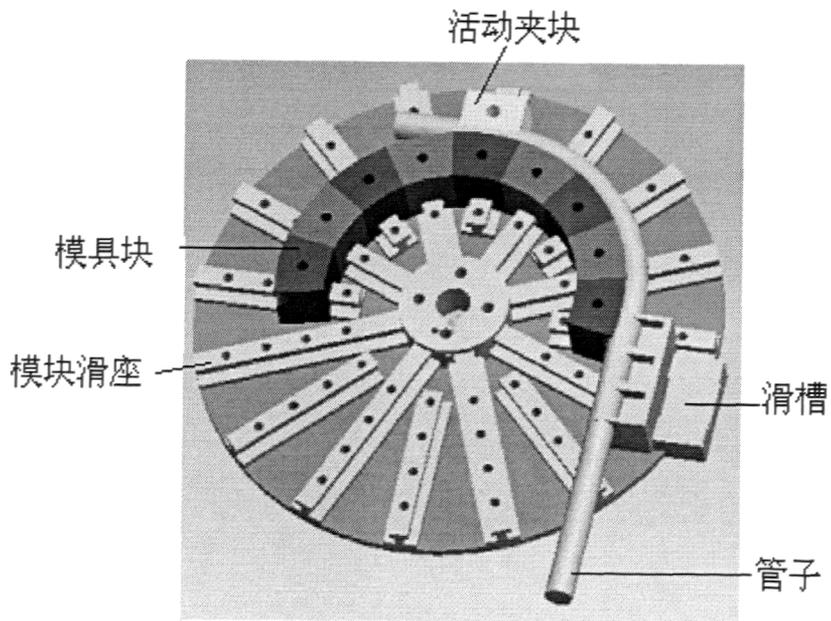


图 4-4 组合弯管模三维图

Fig.4-4 Three-dimensional picture of combined tube-bending

### 4.3.2 组件介绍

组合可调节模具由圆盘底座、滑槽、滑槽座和几个模具块共同构成，下面分别介绍各组件的结构和功能。

1. **模具块** 模具块是整个设计的核心部分，这里介绍的是每一个小的模具块是由类似扇形环状结构组成的模具块，形状如图 4-5 所示，它跟传统扇形盘不同的地方除了它的形状之外又加上了可在圆盘底座滑动的一个滑槽。其工作原理就是当选定一定规格的管子后，就可以根据管径和弯曲半径的大小来选择不同规格的模具，然后用销固定到圆盘底座上，当然这些模具块都是事先制造好的，它的制造标准就根据预弯曲的管子为标准，弯曲半径则根据模具块在模块滑座上调整位置来实现。

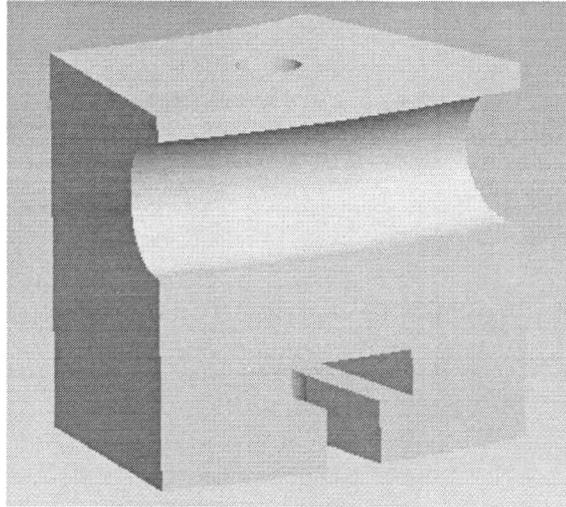


图 4-5 模具块的结构

Fig.4-5 Structure of module

为了保证刚度，制造出来的每一组模具块在装夹上之后都要像图 4-2 中的 1-9 那样紧密连接，不然可能禁受不住弯曲过程的强大弯曲力，当然在圆盘底座的这些孔是可以根据每个厂家的需要自己定做的。也就是说如果某个厂家一般只加工三种规格管子那么就可以只根据这三种管子的数据制造三套小模具块，它的弯曲半径也可以由自己的需求来调节。这样既节约了制造过程中的复杂工序和费用，而且可以在一个模具上加工三种规格的管子，当从一种管子换作加工另一管子时只需要更换上面的小模具块，省事而且方便快捷，中小型的管子由一位工人就能轻松操作。

2. **圆盘底座** 圆盘底座是起支承作用的，它由一些 T 形结构类似铁轨形状

的模块滑座构成,这些滑座以螺丝固定在模具板上,呈 360 度均匀分布,以配合小模具块在它上面自由滑动来确定位置。滑槽上面的孔是为了固定模具块而设计的,模块滑座与每个模具块靠销来固定。

3. 滑槽 滑槽与滑槽座属于一体装备,它改变了传统的固定不变式设计,而由现在的可以左右滑动零件来代替,滑动的作用是为了适应各种管径的管子需求。滑槽的作用是提供尾推力以完成管子的弯曲<sup>[40]</sup>,而滑槽还是根据反变形原理设计,既根据管子弯曲的回弹原理把模具设计成椭圆形槽面<sup>[41]</sup>,这点在传统弯曲中已经有介绍<sup>[42]</sup>,这里就不再多说。

我们设计的组合可调节模具基本构件就有以上 3 个,它是设计合理,用法简单基本可以单人单独操作,既节省了材料设计时间和材料的浪费,又改变了传统的模具笨重的安装过程。

#### 4.4 本章小结

本章通过对弯管成型质量的分析,对大型管件弯曲设备的滑槽进行了可移动式改进,解决了设备驱动力不能有效利用和厚壁管件难弯制的问题。弯管成型质量也大幅度提高。

对小型弯管模进行了组合式设计,缩短了模具设计制造周期,解决了小批量生产中模具浪费问题。

## 结论

本文从冷弯管力学建模出发,利用计算机的数值计算优势对企业生产中管件的冷弯曲过程进行了分析。建立了一套完整的有限元弯管模拟系统,并通过试验验证了系统可靠性。采用该系统对弯管成形质量的主要影响因素进行了分析,得出如下结论:

1. 运用有限元计算基本理论,对冷弯管的具体问题进行受力分析,建立了冷弯管的基本有限元模型,并利用 MSC.MARC 软件对弯管系统进行了三维有限元非线性模拟分析,得出了影响弯管成形质量的主要参数。

2. 运用该计算机数值模拟系统,对弯管的关键技术问题进行了分析。并结合理论分析和试验验证的方法,提取了弯管的力矩、椭圆度、尾推力、减薄率及回弹等几个重要影响质量的参数。最后通过试验验证,得出了计算机数值模拟方法与试验实测结果误差在5%之内,证明了该弯管模拟系统的可行性和可靠性。

3. 根据弯管成形质量的分析结果,对大型弯管设备的滑槽进行了改进,从而解决了一些厚壁管件难以弯制的问题,并且可以大大提高弯管质量。投入生产后,每年可为企业节约大量资金,为厚壁管的弯制开拓了一条新路。

4. 通过对小管径组合弯管模的设计,解决了小管件弯曲的模具浪费问题,在很大程度上提高了生产效率,缩短了小型管的弯制周期。并申请了发明专利一项。

试验结果表明,本文研究的有限元模拟方法得出的结论远远优于传统的经验公式方法和试制法,满足了实际要求,并进一步得到了改进弯管质量的可行性措施;在实际的生产中可以直接指导工作,避免了传统方法的预测失败问题和材料浪费问题。用于解决实际生产可节约大量成本。

由于弯管生产批量大、周期长,弯管模制造成本高,本文所建立的弯管模拟系统只在当前生产中几种型号的管子得到了验证,系统参数有待在今后的生产中进一步研究和完善。

## 参考文献

- [1] 尹霞. 数控弯管机弯管技术及其应用[J]. 新技术新工艺, 2007, (4): 27-29.
- [2] 王先进. 冷弯型钢生产及应用[M]. 冶金工业出版社, 1994: 47-50.
- [3] 赵臻淞. 管材弯曲工艺研究新进展[J]. 金属成形工艺, 2002, 20(2): 7-15.
- [4] 高忠江. 大直径钢管的冷压弯曲成形[J]. 锻压技术, 1991, 42(83): 55-58.
- [5] 闰洪, 鲍乐, 王美艳, 包忠谔. 弹塑性有限元法在金属塑性加工中的应用[J]. 模具技术, 2000, (5): 1-15.
- [6] NIWA S, SUZUKI M AND KIMURA K. Electrical Shock Absorber for Docking System Space[A]. IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control[C], Bogazici University, 1990: 825-830.
- [7] KUN DAIL Z, WANG R. A graphical description of shear stress in the drawing of a thin-wall tube with a conical die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000: 174-178.
- [8] 王同海. 管材塑性加工技术[M]. 机械工业出版社, 1998: 51-58.
- [9] 张士宏, 许沂, 王忠堂. 塑性加工技术的新进展[J]. 锻压技术, 2001, 26(6): 58-61.
- [10] 李晓星. 板材成形模拟的研究和应用[J]. 金属成形工艺, 2003, 21(2): 6-9.
- [11] CHIN-TARN KWAN. A generalized velocity field for axisymmetric tube drawing through an arbitrarily curved die with an arbitrarily curved plug[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002: 213-219.
- [12] 吕雪山, 王先进, 苗延达. 薄板成形与制造[M]. 北京: 中国物资出版社, 1993: 3-10.
- [13] 胡福泰. 异型管材与型材无模弯曲工艺理论及实验研究[D]. 东北重型机械学院(博士论文), 1995.
- [14] WELO T, PAULSEN F, BROBAK T J. The behavior of thin walled aluminum alloy profiles in rotary draw bending-a comparison between numerical and experimental results[J]. Journal of aterials Processing Technology, 1994, 45: 173-180.

- [15] FRODE PAULSEN, TORGE WELO. Application of numerical simulation in the bending of aluminum alloy profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58: 274-285.
- [16] HUAZHOU, LOU, KIM A, STELSON. Three-Dimension Tube geometry Control for Rotary Draw Tube Bending PartI: Bend Angle and Overall Tube Geometry Control[J]. Transactions of the ASME, 2001, 5(123): 258-264.
- [17] 张旭光. 数控弯管回弹的解析数值模拟研究[D]. 西安工业大学(硕士学位论文), 2003.
- [18] 田中伸司. チューブフォーミングの数値シミュレーションの現状[J]. 塑性と加工, 1998, 39: 1029-1033.
- [19] 田中伸司, 岩启昭太, 吉富雄二, 长绳尚, 佐藤登志美. 刚塑性有限要素法による管材の曲げ成形解析[J]. 塑性と加工, 1999, 40(456): 50-54.
- [20] RSENAULT R J, BEELER J R and ESTERLING D M. Computer Simulation in Materials Science[A]. ASM International[C], USA, 1988.
- [21] WOLPAW R, BIRBAUMERN, HEETDERKS W J. Brain-computer interface technology: a review of the first international lmeeting[J]. IEEETrans. Rehabil. Eng, 2000, 8(2): 222-225.
- [22] 王同海. 管材塑性加工技术[M]. 机械工业出版社, 1998年: 51-58.
- [23] 李连诗, 韩观昌, 邢维基. 钢管塑性变形原理[M]. 冶金工业出版社, 1989: 122-130.
- [24] GVANDEN BERGEN. A fast and Robust GJK implementation for collision detection for convex object[J]. Journal of Graphics tools, 1997.
- [25] 赵臻淞. 基于三维 FEM 模拟的数控弯管质量控制[D]. 西北工业大学硕士学位论文, 2002.
- [26] WANG Z T, ZHANG S H, XU Y, LUAN G F. Experiment study on the variation of wall thicknessduring dieless drawing of stainless steel tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002: 90-93.
- [27] 杨祖孝. 薄壁钢管弯曲模具设计[J]. 金属成形工艺, 1999, 17(5): 25-27.
- [28] LIN Y, YANG H. Thin-walled tube precision bending process and FEM simulation[A]. Proceedings of the4th Interna-tional Conference on Frontiers of Design and Manufacturing[C]. Beijing: International Academic Publishers, 2000: 305~308.

- [29] 詹梅, 杨合, 江志强. 管材弯曲成形的国内外研究现状及发展趋势. 机械科学与技术[J], 2004, 23(12): 1509-1514.
- [30] 刘光武, 胡勇, 王呈方. 弯管回弹的理论分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, (02).
- [31] 阎次凡, 王建华. 用有限元法计算电机磁场的网格自动剖分问题[J]. 计算机与现代化, 1996, (1): 33-36.
- [32] 邵鹏飞, 王秀喜. 金属板料冲压成形过程的数值模拟[J]. 机械设计与研究, 2000, (2): 22-24.
- [33] MATSUNO K. Recent researeh and development in metal forming in Japan[J]. Journal of Materials Proeessing Technology, 1997, (66): 1-3.
- [34] 胡平, 刘海鹏, 柳玉起. 厚钣金件压弯翻边与回弹的数值研究[J]. 固体力学学报, 2002, 23(1): 72-80.
- [35] 刁法玺, 张凯锋. 板料 V 形弯曲回弹的动力显式有限元分析[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(2): 171-174.
- [36] 汪晨. 板料成形回弹的数值模拟及考虑回弹反向补偿的模具设计方法研究[M]. 上海交通大学, 1999.
- [37] 吴明, 陆钟武, 蔡九菊. 有限元法计算重油管线工艺参数[J]. 油气田地面工程. 1995, 14(6): 16-18.
- [38] 张士宏. 塑性加工技术的科学化与中国塑性加工技术的发展[J]. 科学前沿与学术评论, 2002, 23(5): 5.
- [39] 杨合, 孙志超, 林艳, 李明奇. 管成形技术发展基础问题研究[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(2): 71-73.
- [40] 余同希, 章亮炽. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 科学出版社, 1992.
- [41] PAN K, STELSON K A. On the plastic deformation of a tube during bending[J]. Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME, 1995, 117: 494-499.
- [42] 武世勇. 缠绕式弯管工艺对管壁厚度影响的数值分析[J]. 锻压技术, 2002, (1): 35-38.

## 攻读学位期间发表的学术论文

1. LAI Y N, ZHANG G Y, YU H N AND LIU G F. Numerical Simulation and Optimal Design of Rotary Draw Bending Pipe. Applied Mechanics and Materials, 2008, 10(12): 172-176.
2. 赖一楠, 于延民, 于浩楠, 戴野. 冷弯管模具有限元优化设计. 电加工与模具, 2007, (2): 43-46.
3. 于浩楠, 赖一楠. 电站锅炉弯管质量控制研究. 林业机械与木工设备. (已录用)
4. 赖一楠, 张元, 于浩楠. 组合可调节弯管模具. 发明专利号: 200710072666.8.

## 致谢

本文的选题、课题研究及论文撰写均是在导师赖一楠老师的亲切关怀和悉心指导下完成的。两年来，导师严谨求实的治学态度，开阔敏捷的学术思路，以及诲人不倦的高尚品德，都是学生永远的楷模。导师昂扬的斗志，终身学习的思想给了我潜移默化的影响，使我受益终身。值此论文完成之际，谨向导师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。

本课题的研究得到了张元老师、任胜乐老师以及本人戴野、于洋涛、刘素艳等人的热心帮助，在此向他们致以最诚挚的谢意。

最后，感谢我的寝室同学，是他们自始至终支持我的学业，关心我的生活，在我遭遇挫折的时候给我鼓励，始终做我坚强的精神后盾。

谢谢！