

分类号_____

密级_____

UDC_____

学 位 论 文

基于 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH

轧辊磨床的高效磨削工艺研究

作者姓名：叶 彬

指导教师：史家顺 副教授

东北大学机械工程与自动化学院

申请学位级别：硕士

学 科 类 别：专业学位

学科专业名称：机械工程

论文提交日期：2012 年 6 月

论文答辩日期：2012 年 6 月

学位授予日期：2012 年 月

答辩委员会席：唐之奎

评 阅 人：梁志伟 张世东

东 北 大 学

2012 年 6 月

A Dissertation in Mechanical Engineering



**Based on WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH Roll
Grinder of Efficient Grinding Process Research**

By Ye Bin

Supervisor: Associate Professor Shi Jiashun

Northeastern University

June 2012

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。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作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：叶彬

日期：2012.6.24

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年☐ 一年☐ 一年半☐ 两年☒

学位论文作者签名：叶彬

导师签名：史学明

签字日期：2012.6.24

签字日期：2012.6.24

基于 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH

轧辊磨床的高效磨削工艺研究

摘 要

高质量的金属板、带、箔的生产，特别是首钢迁钢公司冷连轧机组的板带生产，在极大程度上依赖于高质量的轧辊。由于轧辊在轧制过程中因高温氧化和机械磨损等原因，导致轧辊表面几何精度损坏并产生一定厚度的疲劳层，而需要周期性的对轧辊进行磨削修复，轧辊的这些精度质量是通过精密的轧辊磨床和优良的磨削工艺技术实现的。

近来，随着首钢迁钢公司冷连轧机组的投产和达产，对轧辊磨床的磨削效率和磨削工艺技术的要求亦愈来愈高，目前首钢迁钢公司冷轧作业部最大轧辊磨削直径可达1300mm，最大重量可达26t，轧辊所需的几何精度均为微米级，轧辊的形位公差（偏心、圆度、圆跳动、锥度）更严，辊形公差更小，对轧辊检测技术要求更高、更全面（尺寸、硬度、粗糙度、探伤）。面对竞争日趋激烈的冷轧板市场，如何提高轧辊磨床的磨削质量就成为首钢迁钢公司提升产品质量、提高生产率、降低成本的关键因素。

本课题从研究磨床性能特点入手，分析影响轧辊磨削质量的各种因素，并以首钢迁钢公司冷轧磨辊间使用的德国产 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型高精度工作辊磨床为具体研究对象，针对首钢迁钢公司冷连轧机组的用辊条件，提出合理、简便的高质量轧辊磨削加工方法，以使今后的轧辊磨削加工过程中，能在更短的时间内得到更高轧辊磨削加工质量，具体研究内容如下：

（1）以 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床为研究对象，分析磨床的主要结构和功能，为磨削质量的实现提供硬件基础；

（2）以 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床为研究对象，分析磨床的曲线编程和工艺编程，为磨削质量的实现提供软件基础；

（3）根据工作辊/中间辊设计要求与磨削工艺要求，对磨削辊形精度和表面质量及其影响因素进行分析；

（4）在磨削辊形精度和表面质量分析的基础上，提出工作辊/中间辊磨削方案优化措施，对改进效果进行评价。

关键词：轧辊磨床；磨削工艺；加工质量；连轧机组

Based on WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH Roll Grinder of Efficient Grinding Process Research

Abstract

High quality metal plate, belt, foil production, especially the Shougang Corporation cold rolling tandem mill strip production, to a large extent dependent on the quality of the roll. As a result of roll in rolling process by high temperature oxidation and mechanical wear and other reasons, led to roll the geometric accuracy of the surface damage and has certain thickness fatigue layer, and require periodic on roll grinding roll repair, these precision quality through precision roll grinder and fine grinding technology.

Recently, with the company of Shougang cold rolling mill production and production of roll grinder, grinding efficiency and technology requirements are also more and more high, the Shougang cold rolling work roll grinding company Deparent of the largest diameter up to 1300mm, the maximum weight of up to 26t, the desired geometric accuracy of micron order, roll the form and position tolerances (eccentric, roundness, runout, taper) more stringent, roller type tolerance is smaller, on roll detection technology requirement taller, more comprehensive (size, hardness, roughness, testing). Faced with increasingly fierce competition in the cold rolled sheet market, how to improve the roll grinder grinding quality becomes the Shougang Corporation to improve product quality, increase productivity, reduce the cost of key factors.

This topic from the study of grinding performance characteristic proceed with, analysis of the impact of roller grinding quality of a variety of factors, and Shougang cold rolling mill company used between the German WS450-6x5000 CNC MONOLITH type high precision roll grinder as a specific object of study, aiming at Shougang Corporation cold strip mill roll condition, put forward reasonable convenient, high quality roller grinding processing method, in order to make future roll grinding process, can in a shorter period of time to get more high roller grinding quality, the specific research contents are as follows:

(1) WS450-6x5000 CNC MONOLITH roll grinder grinding machine as the research object, analysis of main structure and function, for grinding quality can provide basic hardware;

(2) WS450-6x5000 CNC MONOLITH roll grinding machine as the research object, analysis of grinder curve programming and programming technology, to provide software based implementation of grinding quality;

(3) according to the work roll / intermediate roll design requirements and technical requirements of grinding, grinding roller shape precision and surface quality and its influencing factors analysis;

(4) in the grinding of roll shape precision and surface quality on the basis of the analysis, put forward the work roll / intermediate roll grinding optimization measures for improvement, effectiveness evaluation.

Keywords: Roll grinder; Grinding technology; The processing quality; Tandem continuous mill

目 录

独创性声明I

摘 要 II

Abstract..... III

第 1 章 绪论..... 1

1.1 课题背景及意义 1

1.2 磨削技术的发展趋势 1

1.2.1 数控机 2

1.2.2 精密化 2

1.2.3 高效化 2

1.2.4 自动化与柔性化 3

1.3 轧辊磨床发展现状与趋势 3

1.3.1 国外轧辊磨床的发展概况 3

1.3.2 国内轧辊磨床的发展概况 6

1.4 本文的主要工作 7

1.4.1 课题主要研究内容 8

1.4.2 课题意义 8

第 2 章 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 磨床结构、主要功能分析 9

2.1 磨床简介 9

2.2 磨床主要结构 9

2.2.1 机械部分 9

2.2.2 电气部分 11

2.3 磨床功能 12

2.3.1 主菜单 12

2.3.2 轧辊模型设计功能 13

2.3.3 磨削程序编辑功能 14

2.3.4 轧辊辊形编辑功能..... 15

2.3.5 自动模式功能..... 16

2.3.6 手动模式功能..... 17

2.3.7 辅助服务功能..... 19

第 3 章 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 磨床编程原理与方法研究..... 20

3.1 曲线编程原理..... 20

 3.1.1 曲线编程原理与方法..... 20

 3.1.2 非圆曲线插补节点坐标计算..... 21

3.2 曲线编程方法..... 23

 3.2.1 基础数据定义..... 23

 3.2.2 曲线编程实例..... 25

3.3 工艺编程原理..... 27

 3.3.1 工艺编程的概念..... 27

 3.3.2 工艺编程原理..... 27

3.4 工艺编程方法..... 27

 3.4.1 基本参数设置..... 27

 3.4.2 工艺编程实例..... 28

第 4 章 工作辊/中间辊磨削质量分析..... 34

4.1 工作辊/中间辊设计要求与磨削工艺要求分析..... 34

 4.1.1 工作辊/中间辊设计要求..... 34

 4.1.2 磨削工艺要求..... 35

4.2 磨削机理..... 35

 4.2.1 磨削过程的接触弧长..... 35

 4.2.2 磨削过程的磨削力模型..... 36

4.3 磨削辊形精度分析..... 37

 4.3.1 圆度..... 37

 4.3.2 圆柱度..... 38

 4.3.3 辊形曲线..... 39

4.4 磨削表面质量分析..... 39

4.4.1 粗糙度.....

4.4.2 螺旋纹.....

4.4.3 振纹.....

4.4.4 磨削烧伤.....

4.4.5 辊面划伤.....

第 5 章 工作辊/中间辊磨削方案优化.....

5.1 工作辊辊形精度和表面质量方案优化.....

5.1.1 工作辊辊形曲线偏差优化.....

5.1.2 工作辊 155mm 辊形位置走刀纹缺陷.....

5.2 中间辊组合辊形磨削方法优化.....

第 6 章 结论和建议.....

6.1 结论.....

6.2 建议.....

参考文献.....

致 谢.....

39

41

42

43

43

45

45

45

47

49

51

51

51

53

55

第 1 章 绪论

1.1 课题背景及意义

高质量的金属板、带、箔的生产，特别是首钢迁钢公司冷连轧机组的板带生产，在极大程度上依赖于高质量的轧辊。由于轧辊在轧制过程中因高温氧化和机械磨损等原因，导致轧辊表面几何精度损坏并产生一定厚度的疲劳层，需要周期性的对轧辊进行磨削修复，轧辊的这些精度质量是通过精密的轧辊磨床和优良的磨削工艺技术实现的。

WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床是首钢迁钢公司冷轧作业部酸洗连轧生产线的重要配套设备，具有外圆磨床的特点。由于轧辊磨床的运动除要求砂轮与轧辊作回转运动外，还要求二者在作纵向相对运动的同时，作一定的径向相对运动。为了实现这样的复合运动，磨床需要具备一套复杂的传动系统，从而导致磨床的机械结构也较为复杂。除了磨削简单的平直圆柱体轧辊外，为了满足连轧生产线对板形控制的工艺要求，轧辊辊面母线需按照不同的轧制工艺要求，加工成所需的粗糙度表面和各种特殊经验曲线，这就需要更精密的传动系统、进给控制系统以及高分辨能力。同时，配合使用的轧辊辊面母线、直径相互还要按微米级的要求实现耦合匹配，所以加工的综合难度较高。

近来，随着首钢迁钢公司冷连轧机组的投产和达产，对轧辊磨床的磨削效率和磨削质量要求亦愈来愈高，目前首钢迁钢公司冷轧作业部最大轧辊磨削直径可达 1300mm，最大重量可达 26t，轧辊所需的几何精度均为微米级，轧辊的形位公差（偏心、圆度、圆跳动、锥度）更严，辊形公差更小，对轧辊检测技术要求更高、更全面（尺寸、硬度、粗糙度、探伤）。面对竞争日趋激烈的冷轧板市场，如何提高轧辊磨床的磨削质量成为首钢迁钢公司提升产品质量、提高生产率、降低成本的关键因素。

1.2 磨削技术的发展趋势

优质、高效、节能，一直是轧辊磨削技术追求的目标，也是轧辊磨床产品参与市场竞争取得成败的关键。近年来，随着模块化设计技术、计算机辅助设计，以及柔性制造技术等高科技在轧辊磨削领域中的应用和普及，促使其向高精度、高效率和高柔性方向迅速发展。轧辊磨削技术的发展趋势主要表现在以下几个方面：

1.2.1 数控机

数控技术与传统加工工艺结合（机电一体化），不仅能够缩短生产准备时间，提高磨削精度和效率，完成辊面形状较为复杂的轧辊加工，同时也是实现轧辊磨削自动化的基础。因此，数控化是当代轧辊磨削技术发展的主流。80 年代以来，一些先进的轧辊磨床制造厂，都相继在其产品中引进了数控技术，目前均已实现数控化，且形成完整的系列。

1.2.2 精密化

精密化是发展高科技的需要，也是提高轧辊磨削性能、质量和可靠性的需要。随着冶金、造纸、印染行业的迅速发展，对轧辊磨削的技术要求亦愈来愈高，目前轧辊最大磨削直径已达 2400mm，最大重量达 150t，轧辊的几何精度均 μm 级。因此，各轧辊磨床制造厂相继对其产品进行了系列更新：采用高新技术（静动压技术、数字定位技术、以及砂轮磨损监控和补偿技术等）改善机床的结构性能，增添自动测量装置、开发高性能的轧辊磨削数控系统，以满足不同用户的各种加工需求。轧辊磨床的工作精度：

- （1）磨削圆柱形辊面：圆度 0.002mm（特殊要求可达 0.001mm）；圆柱度：0.002mm/m；表面粗糙度 $Ra0.05\mu\text{m}$ ；
- （2）磨削中凸（凹）正弦曲线辊面：实际磨削曲线对理论给定值的误差为 0.002mm；
- （3）磨削 CVC 曲线辊面：实际磨削曲线对理论给定值的误差为 0.005mm。

1.2.3 高效化

轧辊磨削大致可分为两类：用于冷、热轧钢板的轧辊和用于造纸、印染行业的烘缸。前者在轧制过程中磨损较为严重，故在重磨时，要求有较高的加工效率，后者则侧重于磨削的几何形状精度和表面粗糙度。因此，为提高轧辊磨削效率，各轧辊磨床制造厂在开发系列产品的同时，还研制出多种特殊轧辊磨床：

- （1）带轴承座轧辊磨床：可在不拆卸轴承座的状态下，直接磨削热轧机的轧辊。由于工作辊轴承座和支承辊轴承座尺寸不同，通常使用两台专用磨床，以提高磨削效率。
- （2）工件移动式轧辊磨床：特点是头架、尾架和中心架均可作较大范围的横向移动，以使超大或超小直径的造纸机烘缸均可磨削。
- （3）超重型轧辊磨床：砂轮电机功率为 400kw，适用于重磨加工余量较大的轧辊或在轧辊制造厂使用，能省略作为预加工的车削工序。

1.2.4 自动化与柔性化

轧辊磨床均可实现全自动数控控制磨削，从轧辊自动吊装至磨削结束自动卸辊，所有磨削工序均为自动进行，无需人为干预。在磨削过程中，测量装置自动对轧辊进行测量，并根据测量结果，自动进入补偿磨削，直至达到精度要求。由于配置有专为轧辊磨削特殊功能而研制的数控系统，且诸多功能已被模块化，故无需进行一般数控功能所需的复杂而繁琐的编程作业，操作者只需根据显示屏上图形显示的轧辊加工形状，以人机对话方式调出所需的加工形状，再键入所需的尺寸参数，即可决定砂轮的动作。此外，由于采用适应控制方式，在磨削过程中，砂轮的进给速度除能自动进行磨损补偿和弹性补偿外，还可按各磨削部位自动决定其最佳值，以确保最佳的磨削条件。

近年来，随着磨加工中心的诞生，用户对轧辊磨削技术柔性化的要求亦日趋增高。因此，在 80 年代出现数控轧辊磨床向柔性制造系统（FMS）发展的趋势。目前 RCH 系列轧辊磨床已实现自动更换砂轮和自动更换工件，且适合于柔性加工线上使用。

1.3 轧辊磨床发展现状与趋势

1.3.1 国外轧辊磨床的发展概况

十八世纪 30 年代，为了适应钟表、自行车、缝纫机和枪械等淬硬后工件的加工，英国、德国和美国分别研制出使用天然磨料砂轮的磨床。这些磨床是在当时现成的机床如车床、刨床等上面加装磨头改制而成的，它们结构简单，刚度低，磨削时易产生振动，要求操作工人有很高的技艺才能磨出精密的工件。

1876 年在巴黎博览会展出的美国布朗-夏普公司制造的万能外圆磨床，是首次具有现代磨床基本特征的机械。它的工件头架和尾座安装在往复移动的工作台上，箱形床身提高了机床刚度，并带有内圆磨削附件。

1900 年前后，人造磨料的发展和液压传动的应用，对磨床的发展有很大的推动作用。1910 年德国 WALDRICH · SIEGEN 公司制造出第一台轧辊磨床，随着近代工业特别是轧钢工业的发展，各种不同类型的轧辊磨床相继问世（如图 1.1 所示）。

二十世纪 50-60 年代，美国 FARREL 公司推出的轧辊磨床，其磨架为三层结构，即磨架横向导轨安装垫板，砂轮架安装在垫板上的回转轴上，在大滑架纵向往复运动的同时，砂轮架绕回转轴做一定角度的相对回转，实现中凸（凹）曲线磨削，也就是俗称“磕头机构”；砂轮主轴为动压轴承；纵向往复运动导轨和横向进给导轨均为滑动导轨。随后原东德、前苏联等国也相继生产上述结构的轧辊磨床。

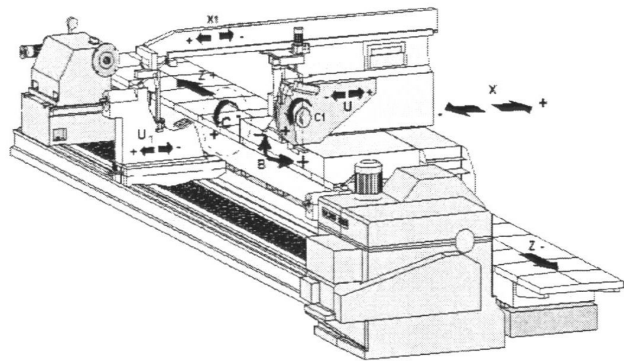


图 1.1 WALDRICH-SIEGEN ProfiGrind 机型
Fig. 1.1 WALDRICH-SIEGEN ProfiGrind Type

70 年代-80 年代，70 年代初由美国 FARREL 公司首先推出两层结构磨架，即取消垫板，砂轮架直接安装在拖板的横向导轨上；采用偏心套筒静压主轴承技术的中凸（凹）机构。随后，德国的 WALDRICH • SIEGEN 公司进一步发展完善，广泛应用于该公司生产的轧辊磨床上。

80 年代中期-90 年代初，随着动静压磨头技术的出现和发展以及数控技术的发展和应用，世界上工业发达国家如德国、日本、意大利等国把数控技术应用在轧辊磨床上，出现了数控轧辊磨床、全自动数控轧辊磨床。

90 年代末，美国 VOITH SULZER 公司提出了双站台轧辊磨床新概念，即在一台轧辊磨床上设置两个尾座、一个床头，可以省去轧辊装卸循环过程，大大提高生产效率，降低了投资成本。2000 年初 VOITH SULZER 公司被德国 HERKULES 公司收购，之后推出 MONOLITH 整体底座（如图 1.2 所示）新技术，可省去基础安装过程，缩短磨床安装周期。

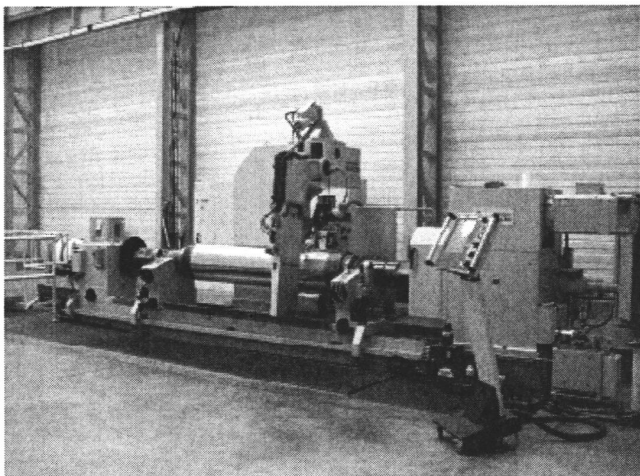


图 1.2 HERKULES MONOLITH 床身
Fig. 1.2 HERKULES MONOLITH bed

目前欧洲的轧辊磨床技术较为成熟，主要以德国的 HERKULES、WALDRICH • SIEGEN 和意大利 POMINI 为代表。2004 年，WALDRICH • SIEGEN 公司被 HERKULES 公司收购，随后 WALDRICH • SIEGEN 磨床的电气和软件系统与 HERKULES 进行整合，但是磨床的机械和测量系统仍保留各自的特点。下面简单介绍以上 3 家公司数控轧辊磨床所具有的典型功能和结构：

砂轮主轴机构：HERKULES 公司是靠大拖板纵向进给和磨架横向进给的复合运动来磨削曲线轧辊，磨架横向进给配以 C 轴（楔形块倾动轴）实现精度控制。WALDRICH • SIEGEN 公司和 POMINI 公司是采用静压偏心套筒回转实现曲线磨削，WALDRICH • SIEGEN 公司砂轮主轴增加 B 轴，可实现砂轮 $\pm 5^{\circ}$ 摆动，主轴刚度高，运动灵敏，磨削精度高。

涡流探伤、闭环监视磨削：HERKULES、WALDRICH • SIEGEN 在测头处增设涡流探头，随时检测轧辊表面的质量，探测表面伤痕的深度，砂轮自适应磨削到伤痕完全消除，即自动停止，退出磨削程序，涡流探伤集成于 HCC KPM10 操作系统，无需单独显示终端。POMINI 涡流探伤装置为外嵌式，需要单独的控制和显示终端，操作较为繁琐。

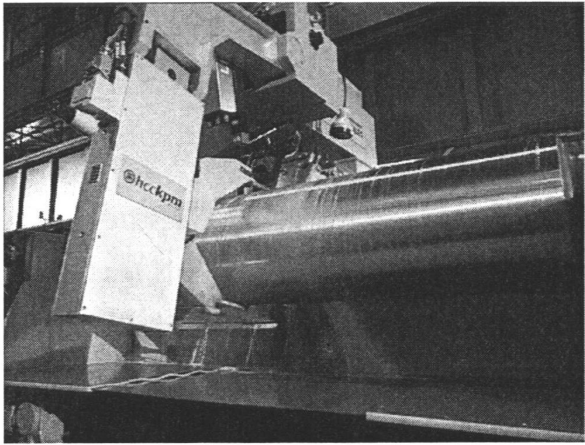


图 1.3 HERKULES 测量系统

Fig. 1.3 HERKULES measuring system

数控测量系统：HERKULES 磨床采用卡规式 A/B/C 三测头（如图 1.3 所示），可实现轧辊安装误差的精确找正，测量全面，精度高。WALDRICH • SIEGEN 磨床采用 CP 型 A/B 测量臂，内外测量臂垂直于轧辊母线，可通过测量结果自动调整轧辊水平安装误差，但轧辊垂直安装误差的测量不够准确。POMINI 磨床测量系统独立于 Z 轴，采用两点式测量，测量装置占用空间较大，且在线测量过程中容易与 Z 轴产生不同步误差。

1.3.2 国内轧辊磨床的发展概况

国内的轧辊磨床发展经历了引进国外设备、吸收消化国外技术和自主生产的过程。轧辊磨床的引进可分为两个阶段：

第一阶段，60年代初期，随着前苏联援建我国的一大批项目的上马，我国也随之引进了大量的轧辊磨床。这一时期引进的轧辊磨床，绝大部分是前苏联、原东德等东欧国家设计制造。据统计，仅直径在1000mm-1600mm的大型轧辊磨床就有60多台。由于当初是轧辊磨床的发展初期，从设计到制造都不尽完善，自动化程度较低，基本为手动操作，因而磨床的精度及效率都比较低。

第二阶段，为80年代中期至九十年代末，随着宝钢等一大批钢铁企业的建立，以及国有冶金、造纸、机械等行业大中型企业的技术改造，又形成新一轮设备引进高峰，同时，一大批新的轧辊磨床投入使用。这一时期引进的轧辊磨床，主要有德国的WALDRICH·SIEGEN、HERKULES，意大利的POMINI和日本TOSHIBA的产品，磨床的自动化水平较高，精度及效率都有了很大的提高。

当然，与此同时，随着大量二手设备的引进，随主体设备也带来了一大批陈旧的轧辊磨床。这批轧辊磨床的水平参差不齐，但是绝大多数都是六、七十年代普通型轧辊磨床。

险峰机床厂是我国轧辊磨床专业生产厂。自1969年第一台M84100普通型轧辊磨床问世以来，已生产了多台各种类型的轧辊磨床，广泛地应用于我国的钢铁工业、有色金属工业及造纸橡胶等工业。1985-1990年与WALDRICH·SIEGEN公司合作，引进该公司设计、生产制造数控轧辊磨床的全套技术资料，开始生产WSWH25x5000型数控轧辊磨床。随后，在引进消化吸收国外先进技术的基础上，于1992年自行设计研制MK8463、MK8480、MK84100、MK84125、MK84160、MK84200型轧辊磨床。1995年为宝钢冷轧厂设计研制的MKZD84125全自动数控轧辊磨床，达到90年代初世界先进水平。

汇峰轧辊磨床公司成立于1996年，专业从事大型全自动数控轧辊磨床的设计生产，研制的MK8480-III系列、MK84125-III系列、MK84160-III系列、MK84200-III、MK84250-III系列全自动重型数控轧辊磨床，先后被首钢、鞍钢、太钢、武钢、唐钢等全国多家大型钢铁企业采用。

国内轧辊磨床的结构和技术特点如下：

床身采用砂轮床身与工件床身分离的结构，轧辊的吊装不会影响磨削精度。床身调整垫铁间距短，刚性强，床身精度不易变化。砂轮床身为宽体床身，配备的伸缩式不锈

钢防护罩保证永不生锈，安装在砂轮床身内的精密滚珠丝杆，用于驱动大拖板（Z 轴）。

砂轮主轴前后径向轴承均采用高精度动静压轴承，主轴轴向采用高精度推力轴承。另外，在后轴承设计中增强了工作腔动静压轴承的静态压力效果，以克服较大皮带拉力对轴瓦造成的损伤。主轴动静压轴承具有回转精度高，稳定性好，动态刚性强，不易振动等特点。

磨架采用单层整体结构，具有很高的刚性，磨架导轨为贴塑静压导轨，磨架进给机构由带减速装置的西门子交流伺服电机和经过精确预拉伸的精密滚珠丝杆副组成，具有很高的进给精度和灵敏度。

U1 轴传动系统是由带直角减速装置的西门子交流伺服电机驱动一套偏心轮传动机构，通过连杆驱动中心架上层滑板。尾架端中心架被设置为二层，下层底座可沿床身导轨纵向移动，上层滑板在 U1 轴驱动下可横向水平微量调整（调整量 $\pm 1.5\text{mm}$ ），以实现轧辊安装精度的校正。中心架滑板的特殊结构设计，可以很方便的调换安装在滑板上的中心架瓦座，大大缩短更换瓦座的辅助时间，适用于多规格轧辊的支承。

数控主机采用西门子新一代全数字控制系统 840D，一体化 S7-300 可编程控制器，机床外部的 I/O 接点通 PROFIBUS 工业现场总线传输到中央控制系统，人机接口功能由新型高性能 SINUMERIK PCU50 模块完成。与国外同类磨床所采用的磨床厂自行开发的工控机专用系统比较，840D 系统功能更加强大、更加可靠、维护更加简单。

测量臂导轨采用德车 STAR 的进口直线导轨，传动系统由带减速装置的西门子交流伺服电机通过无键连接方式驱动经过精确预拉伸的精密滚珠丝杆，由数控系统通过交流伺服电机和直线光栅实现测量架的闭环位置控制。测量架采用直线导轨和滚珠丝杆传动，具有运动平稳、传动精度高、灵敏性好、定位准确等优点，从而大大提高了测量系统的测量精度。

险峰、汇峰是国内轧辊磨床的优秀代表企业，与进口磨床相比，在设计和技术能力方面仍有差距，但随着国内机床设计研发能力的不断提高，进口和国产轧辊磨床的差距将越来越小。

1.4 本文的主要工作

本课题从研究磨床结构、功能和编程原理入手，分析影响轧辊磨削质量的各种因素，并以首钢迁钢公司冷轧磨辊间使用的德国产 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型高精度工作辊磨床为具体研究对象，针对首钢迁钢公司冷连轧机组的用辊条件，提出合理、简便的高质量轧辊磨削加工方法，以使今后的轧辊磨削加工过程中，能在更短的时间内

得到更高轧辊磨削加工质量，为本企业赢得更强的市场竞争力、取得更好的经济效益。

1.4.1 课题主要研究内容

(1) 以 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床为研究对象，分析磨床的主要结构和功能，为磨削质量的实现提供硬件基础；

(2) 以 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床为研究对象，分析磨床的曲线编程和工艺编程，为磨削质量的实现提供软件基础；

(3) 根据工作辊/中间辊设计要求与磨削工艺要求，对磨削辊形精度和表面质量及其影响因素进行分析；

(4) 在磨削辊形精度和表面质量分析的基础上，提出工作辊/中间辊磨削方案优化措施，对改进效果进行评价。

1.4.2 课题意义

本研究为提高轧辊磨削质量和精度、提升轧辊磨削智能制造过程奠定了理论基础和知识支撑，对现有的国内外轧辊磨削提供了新的思维。磨削是精加工的主要方法，往往是机械加工产品的终极加工工序，其加工效果直接影响到产品的最终质量和性能。但磨削过程非常复杂，影响因素繁多，影响因素之间又相互交叉，相互制约，很难建立数学模型，因而确定最佳磨削参数较为困难。另外，在实际磨削过程中，许多方面仍依赖于操作者的实际经验和技術熟练程度，对加工过程的实际调整是靠试凑法。所以，磨削加工的现状已成为制约现代先进制造技术发展的关键技术之一，急待解决。

现代加工已在向智能化、精密化方向发展，对操作者的技术要求相对较低，这就要求机床控制系统具有智能，即磨削加工应具有智能决策和预测的能力。要实现对磨削过程的智能控制，需对磨削的过程变量和输出变量进行检测，并反馈给工业控制机，以调整控制变量使加工过程达到最优。本文在分析磨床结构、功能和曲线、工艺编程的基础上，根据工作辊/中间辊设计要求及工艺要求，提出合理、简便的高质量轧辊磨削加工方法，使得磨削加工的轧辊质量得以保证，产生的直接效益就是提升冷轧板带的板型和表面质量，为迁钢冷轧产品更快进入并占领市场赢得先机。

第 2 章 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 磨床结构、主要功能分析

2.1 磨床简介

赫克力斯 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床（如图 2.1 所示），采用整体式床身设计，磨头移动和支撑辊颈加工方式，用于工作辊和中间辊磨削，具备全自动辊形控制加工和自修正功能，还包括在高标准连续操作条件下，实现辊形自动测量和轧辊表面涡流检测系统。磨床能提供自动测量的辊形磨削结果，同时，利用两点集成测量装置实现闭环控制系统，整个磨削过程都是全数控控制。

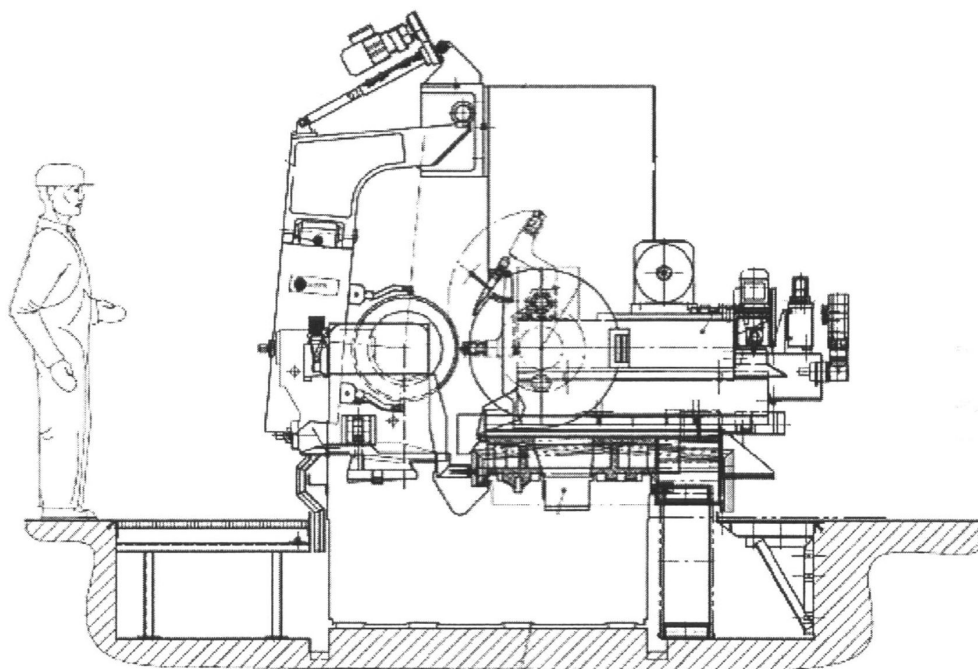


图 2.1 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床
Fig .2.1 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH roll grinder

2.2 磨床主要结构

2.2.1 机械部分

（1）床身

使用高等级铸铁材料，采用厚肋板吸收设备振动设计，导轨坚固耐磨、精度高，相

同热膨胀系数的材料对称布置，热稳定性能较好。床身底座采用整体式床身底座设计，使用高级复合材料（Hydropol），超硬钢和花岗岩加固，铸铁导轨用于支撑尾架。

整体式床身（如图 2.2 所示）底座设计优点：相比铸铁底座，其减振性能要高出 10 倍，强度高出 2 倍，且对瞬时温度变化不敏感；取代磨床基础，降低安装成本，磨床可直接安装在磨辊车间水平面上，仅需简单的机械和电气连接，安装时间可提前数周；占用空间更少，由于不需要额外的基础，该设备可以放置于车间任何位置，所有电缆和配套设施均可在地面布置，省去了地面改造施工的任务；更高的性能，通过使用高级复合材料（Hydropol）整体基础和底床设计，具有无可比拟的稳定性；永久性校准基础，其校准精度在若干年之后都能得到保证。

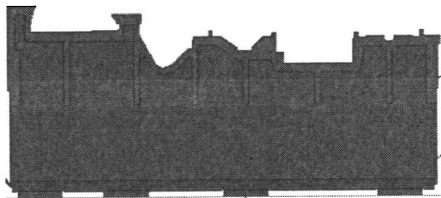


图 2.2 整体式床身
Fig .2.2 whole bed

（2）头架主轴

头架主轴可在 10-100rpm 转速范围内进行无级调速，同时能够实现某一转速区间的周期性变速，变速周期 0-60 秒，变速范围 0-15%，该功能可有效避免磨削过程中砂轮与轧辊因周期振动频率叠加产生的有害共振。

（3）砂轮主轴

砂轮主轴（如图 2.3 所示）的设计遵循强大的输出功率，更省的砂轮消耗，高质量的几何精度控制三个原则，采用主进给为 X 轴，微量进给为 C 轴（倾动轴）的设计理念。很明显，仅依靠 X 轴进给，工作时间长后会由于粘滑运动、磨损和控制误差问题而不能保证磨削精度，为使轧辊的几何磨削精度控制在 0.001mm 范围内，需要配合 C 轴（倾动轴）的微进给运动，最大程度保证磨削时的精确控制和降低有害振动。

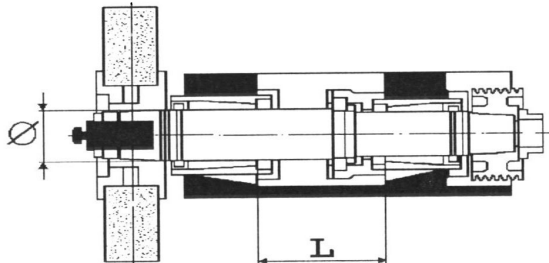


图 2.3 砂轮主轴
Fig .2.3 wheel principal axis

2.2.2 电气部分

(1) 主机部分

- 英特尔奔腾四处理器，2.8GHz
- ATX 标准主板，478 FC-PGA 接口，英特尔奔腾四处理器
- 6 PCI 和 1 AGP 接口
- 1 GB DDR-RAM 内存，可扩展至 2 GB
- 集成显卡，32 MB，LCD TFT 15 英寸屏幕显示器
- IDE 硬盘，120 GB
- 4 个 RS232 串口端口，4 USB 端口
- 键盘 PS/2 和鼠标 PS/2
- 230/115 V，50/60 Hz 电源
- DVD 读写光驱
- 集成网卡
- 总线接口 FC 2001
- 现场操作终端（如图 2.4 所示）和第二操作终端（如图 2.5 所示）

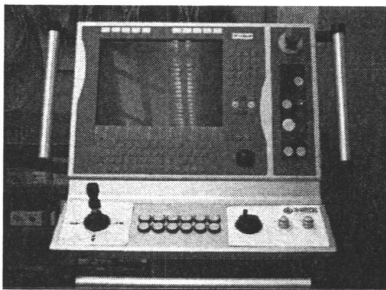


图 2.4 现场操作终端

Fig .2.4 operator panel on site

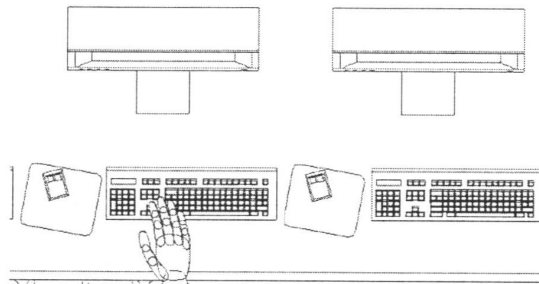


图 2.5 第二操作终端

Fig .2.5 Second operator panel

(2) 控制系统部分

采用 HCC KPM 10 控制系统，其优点包括：

- 能够实时进行计算
- 根据实时测量数据更新每次砂轮进给量
- 非常灵活的实现编程
- 高分辨率绘图仪
- 在线辊形测量结果和涡流探伤结果高度集成显示
- 编程以会话方式进行，由操作者控制，包含几何数据和磨削参数

- 编程采用选择拾取方法，没有预先设定的程序和规则需要遵循
- 具有强大的帮助功能
- 全薄膜晶体管显示，高分辨率，使操作人员操作舒适
- 在线自动辊形测量，实时数据反馈，实现进给修正和自适应控制
- 全自动磨削偏差纠正，直接测量实际辊形曲线，将设计辊形曲线与实测曲线相比较。两条曲线都将在显示屏上自动绘制显示，磨削纠正偏差由两条曲线的差值确定
- 高水平故障诊断，有多大 200 余种故障类型的诊断功能和方法，对应特定的代码，并清楚地显示在显示屏上

(3) 测量探伤系统（如图 2.6 所示）

采用卡规式（两点）和 C 探头测量装置，实现轧辊水平和垂直方向的安差及在线磨削测量，测量方式更加合理，测量精度更加可靠。涡流探头集成于卡规式测量装置，随在线测量过程对轧辊进行涡流探伤检测，缩短了操作工的检测时间，同时方便地为操作工确定磨削方案提供探伤决策。

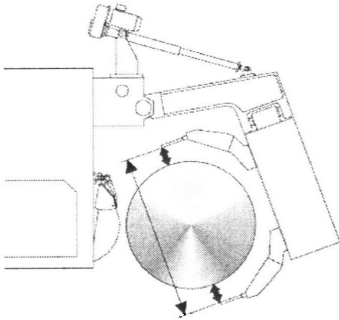


图 2.6 测量系统
Fig. 2.6 measuring system

2.3 磨床功能

WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床主要功能包括：主菜单、轧辊模型设计功能、磨削程序编辑功能、轧辊辊形编辑功能、自动模式功能、手动模式功能、辅助服务功能。

2.3.1 主菜单

所有磨床操作功能是由主菜单（如图 2.7 所示）实现的，它通过包括其他辅助设备组成的 CNC 对话进行控制处理，主要功能包括轧辊 ID 编辑器、磨削程序编辑器、轧辊辊形编辑器、自动模式、手动模式、用户登录、维护、历史记录等（如表 2.1 所示）。

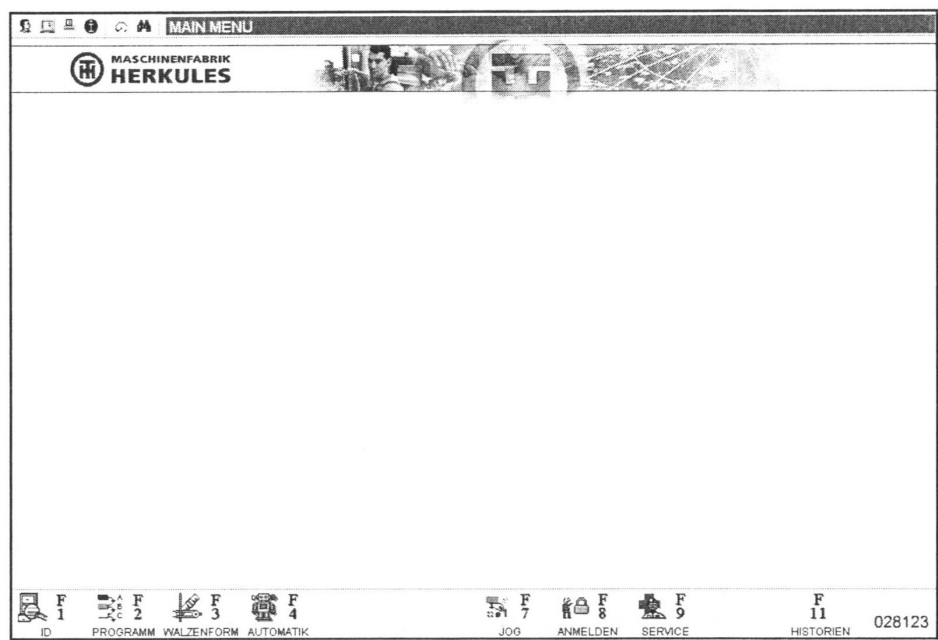


图 2.7 主菜单

Fig .2.7 MAIN MENU

表 2.1 主菜单功能介绍

Table2.1 MAIN MENU function introduce

功能键	图标	名称	内容
F1		轧辊 ID 编辑器	轧辊 ID 编辑器可以建立和管理自动磨削程序，自动磨削程序由轧辊 ID、轧辊类型、轧辊磨削程序和轧辊辊形组成。
F2		磨削程序编辑器	磨削程序编辑器包括创建、测量修改、程序编辑和通讯参数功能。
F3		轧辊辊形编辑器	轧辊辊形编辑器包括创建、辊形编辑、通讯参数等功能，辊形曲线可以表格和曲线形式显示。
F4		自动模式	自动模式包括磨削程序启动、监控程序顺序和程序优化功能。
F7		手动模式	手动模式包括磨床各轴、转动机构、测量系统、冷却系统及液压润滑系统的点/连动功能。
F8		用户登录	允许不同权限的用户登录使用磨床。
F9		维护	维护包括信息反馈和设备运行状态查询功能。
F11		历史记录	历史记录包括是信息存储、测量结果显示、轧辊磨削数据查询等功能，均可调出和打印。

2.3.2 轧辊模型设计功能

轧辊模型设计功能（如图 2.8 所示）可以建立和管理自动磨削程序，自动磨削程序由轧辊 ID、轧辊类型、轧辊磨削程序和轧辊辊形组成，主要功能包括创建轧辊 ID、删

除轧辊 ID、更改轧辊 ID、编辑程序 ID、编辑曲线 ID、退出程序、帮助等（如表 2.2 所示）。

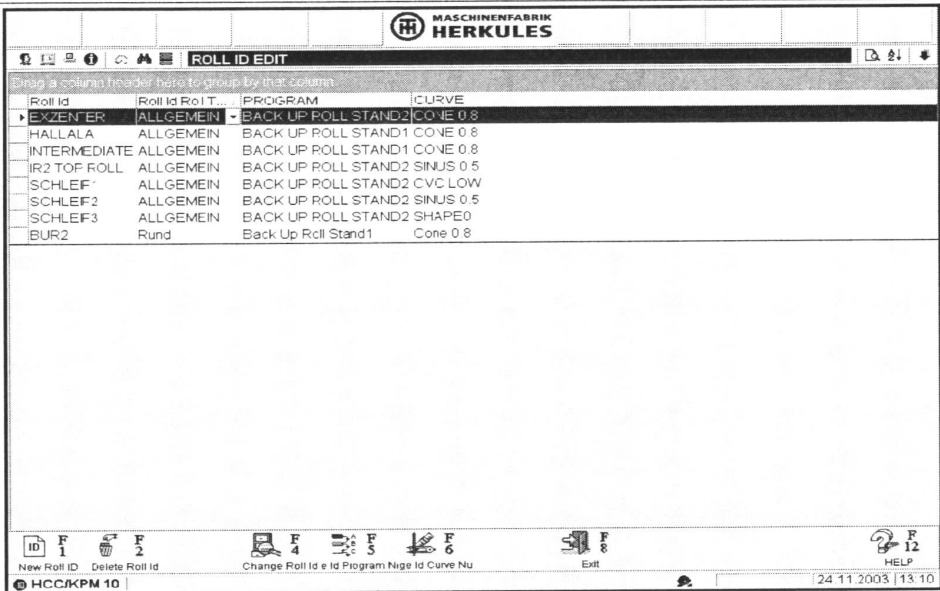


图 2.8 轧辊模型设计功能
Fig.2.8 ROLL ID EDIT

表 2.2 轧辊模型设计功能介绍

Table 2.2 ROLL ID EDIT function introduce

功能键	图标	名称	内容
F1		创建轧辊 ID	创建一个新的轧辊模型 ID，新的 ID 必需由一个程序 ID 和一个曲线 ID 组成，轧辊模型 ID 名称不能重复。
F2		删除轧辊 ID	删除轧辊模型 ID，轧辊模型 ID 删除后，不影响程序 ID 和曲线 ID。
F4		更改轧辊 ID	对已有的模型 ID 进行更改，可重新选择程序 ID 和曲线 ID，并可对原有轧辊模型 ID 重命名。
F5		编辑程序 ID	编写和更改程序及其 ID，如果该程序 ID 被轧辊模型 ID 使用，则不允许重命名。
F6		编辑曲线 ID	编写和更改曲线及其 ID，如果该曲线 ID 被轧辊模型 ID 使用，则不允许重命名。
F8		退出程序	退出 ROLL ID EDIT 界面。
F12		帮助	提供 ROLL ID EDIT 界面下的帮助信息。

2.3.3 磨削程序编辑功能

磨削程序编辑（如图 2.9 所示）可以创建、修改、编辑程序参数，根据加工工艺要求选择相应的磨削工序，最终组合成完整的磨削程序，主要功能包括载入、保存、插入、

删除、数据、设置、退出、打印等（如表 2.3 所示）。

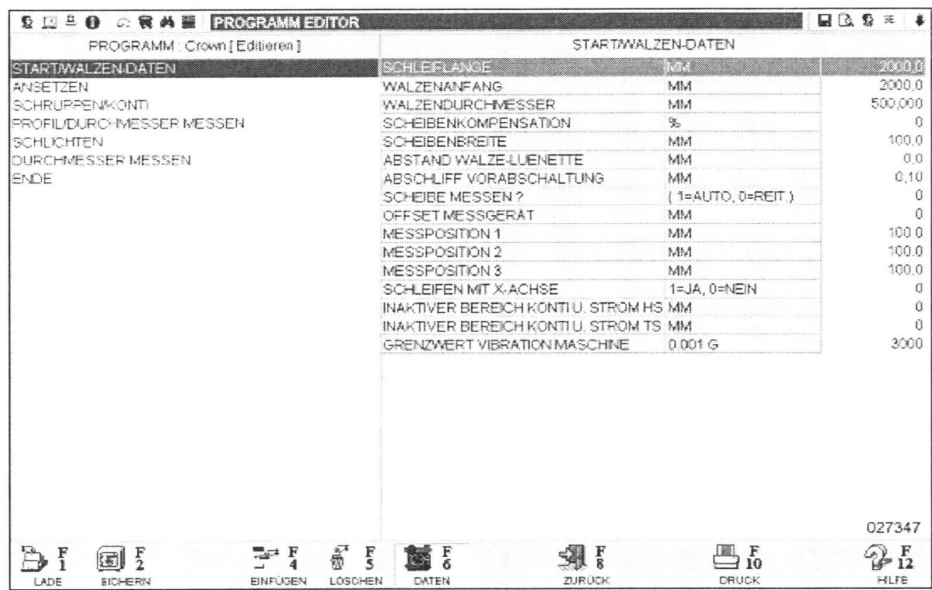


图 2.9 磨削程序编辑功能

Fig. 2.9 PROGRAM EDIT

表 2.3 磨削程序编辑功能介绍

Table2.3 PROGRAM EDIT function introduce

功能键	图标	名称	内容
F1		载入	可通过该功能把已有的磨削程序载入到相应编辑器。
F2		保存	保存现有磨削程序。
F4		插入	插入选择的磨削工序。
F5		删除	删除选择的磨削工序。
F6		数据 设置	打开数据输入窗口，对磨削程序参数进行设置。
F8		退出	退出 PROGRAM EDIT 界面。
F10		打印	打印编写好的磨削程序。

2.3.4 轧辊辊形编辑功能

轧辊辊形编辑（如图 2.10 所示）可以创建、修改、编辑轧辊辊形参数，根据加工工艺要求选择相应的轧辊辊形，最终组合成完整的轧辊辊形程序，主要功能包括载入、保存、插入、删除、数据、设置、辊形、显示、退出、打印等（如表 2.4 所示）。

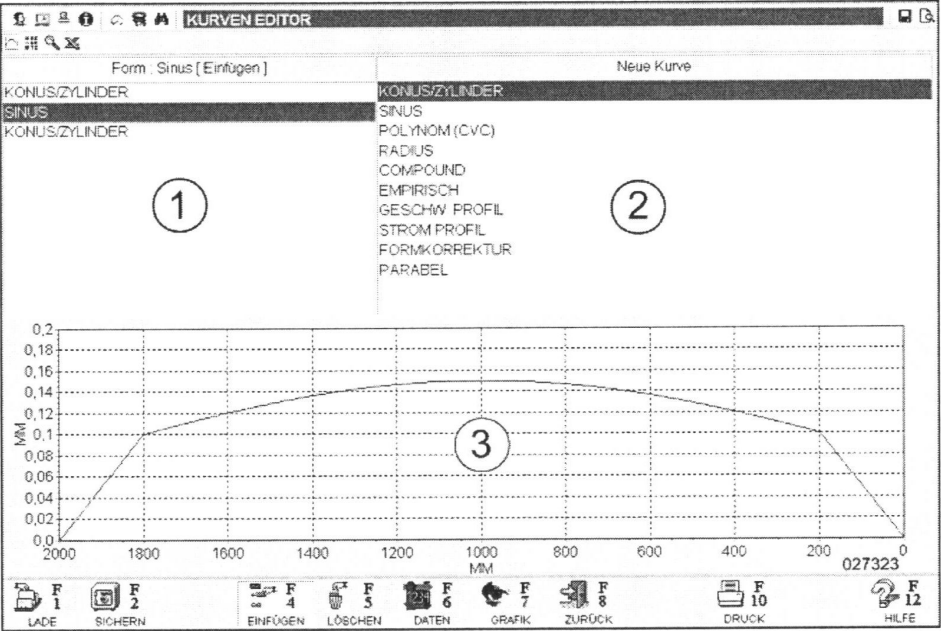


图 2.10 轧辊辊形编辑功能
Fig .2.10 CURVE EDIT

表 2.4 轧辊辊形编辑功能介绍
Table2.4 CURVE EDIT function introduce

功能键	图标	名称	内容
F1		载入	可通过该功能把已有的轧辊辊形载入到相应编辑器。
F2		保存	保存现有辊形程序。
F4		插入	插入选择的辊形。
F5		删除	删除选择的辊形。
F6		数据 设置	打开数据输入窗口，对辊形参数进行设置。
F7		辊形 显示	显示当前编写的辊形曲线。
F8		退出	退出 CURVE EDIT 界面。
F10		打印	打印编写好的辊形程序。

2.3.5 自动模式功能

自动模式功能下（如图 2.11 所示），通过载入预先设置好的辊形模型程序，实现磨削加工的自动化，同时，该状态下可以对加工过程进行监控，对加工参数进行修改和调

整，主要功能如表 2.5 所示。

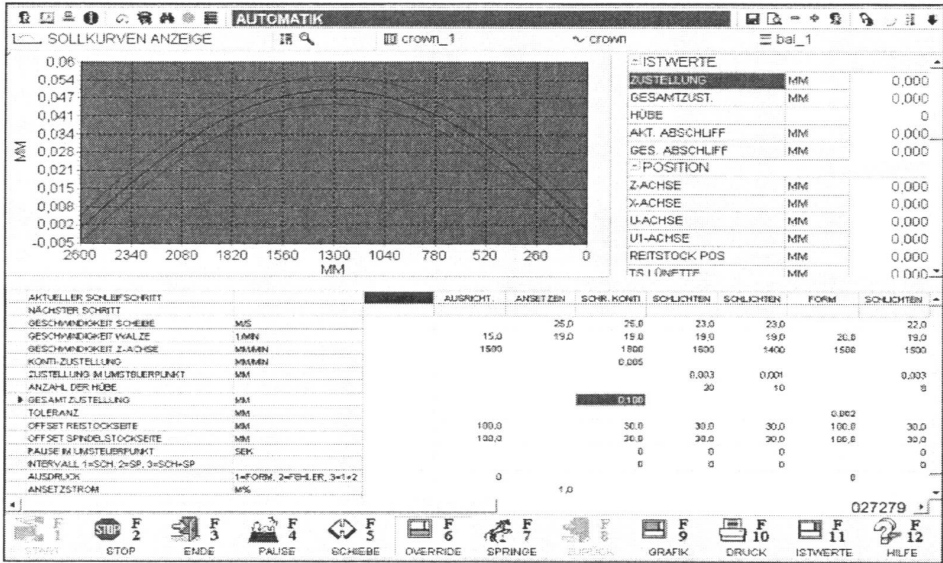


图 2.11 自动模式功能
 Fig .2.11 AUTO MODE

表 2.5 自动模式功能介绍
 Table2.5 AUTO MODE function introduce

功能键	图标	名称	内容
F1		启动	启动自动磨削。
F2		停止	停止当前工序，进入下一步工序（当前工序结束后执行）。
F3		结束	结束自动磨削。
F4		暂停	暂停当前工序，等待下一步命令（当前工序结束后执行）。
F7		跳步	跳转至下一步磨削工序（当前工序结束后执行）。
F10		打印	打印编写好的磨削程序。

2.3.6 手动模式功能

手动模式功能下（如图 2.12 所示），可以使用操作界面相应的控制键点/连动设备的各轴、转动机构、测量系统、冷却系统及液压润滑系统，主要功能如表 2.6 所示。

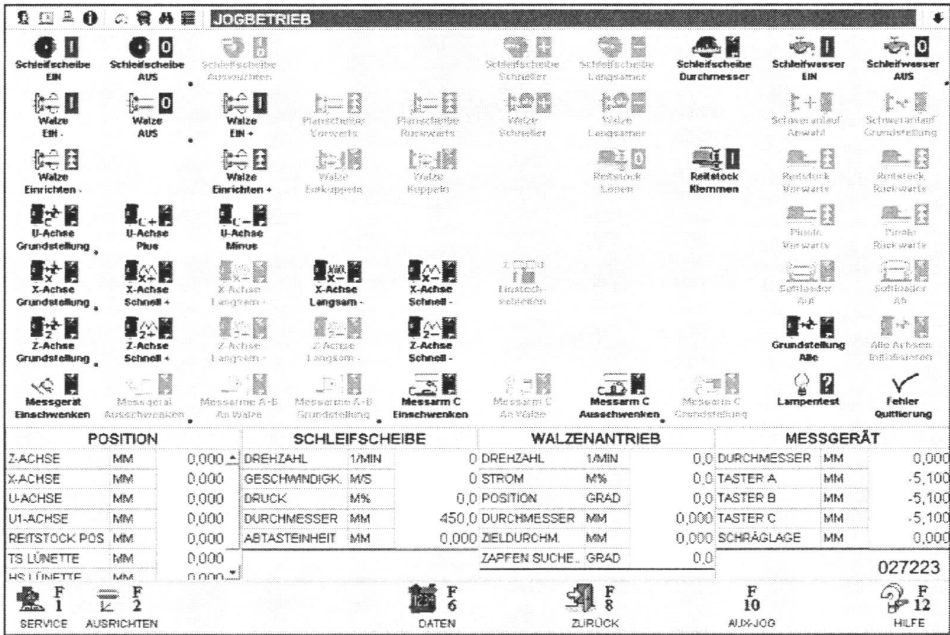


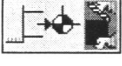
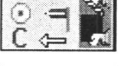
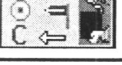
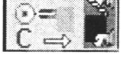
图 2.12 手动模式功能

Fig. 2.12 JOG MODE

表 2.6 手动模式功能介绍

Table 2.6 JOG MODE function introduce

功能键	图标	名称	内容
砂轮系统		砂轮启动/停止	砂轮驱动的开和关。
		砂轮平衡	砂轮速度从空转开始变化到平衡速度。
		砂轮的快/慢	砂轮速度调节。
		砂轮测量	测量砂轮当前直径。
冷却系统		冷却水开/关	冷却系统开或关。
		头架启动（连动）/停止	头架驱动正向/负向启动（连动）。
头架系统		头架停止	头架驱动装置关闭。
		头架点动	头架驱动正向/负向启动（点动）。
		头架转速快/慢	头架转速快/慢调节。
		花盘前/后	花盘前/后点动。
轴系统		轴移动快/慢	轴驱动快速或慢速。

测量系统		返回参考点	返回磨床零点。
		取消 X 轴润滑	X 轴润滑关闭。
		测量臂抬起/落下	测量臂抬起/落下。
		测量头松开/加紧	测量头松开/加紧。
		校准测量装置	校准测量装置。
		C 探头靠紧/退回	C 探头靠紧/退回。
		C 探头抬起/落下	C 探头抬起/落下。
		C 探头靠紧/退回	C 探头靠紧/退回。

2.3.7 辅助服务功能

辅助服务功能包括用户登录、维护和历史记录三个部分，主要用来建立磨床用户账号，查询磨床运行及报警信息，查询轧辊磨削记录等，在此不进行赘述。

第3章 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 磨床编程原理与方法研究

3.1 曲线编程原理

3.1.1 曲线编程原理与方法

数控系统（CNC）的主要任务之一是控制执行机构按预定的轨迹运动。一般情况是已知工件轮廓的坐标点，如直线的起点、终点，圆弧的起点、终点和圆心等，由数控系统按进给速度、刀具参数和进给方向的要求等实时地计算出各个中间点的位置坐标值，即需要“插上、补上”运动轨迹各个中间点的坐标，这一过程称为“插补”，插补技术是数控系统的核心技术。由于直线和圆弧是构成工件轮廓的基本线条，因此大多数系统都具有直线和圆弧插补功能，有些场合也可以用抛物线、椭圆、双曲线和其它高次曲线去逼近拟合，从而自动地完成整个线段的轨迹运行，以满足加工精度的要求。目前，普遍应用的插补算法有两类，即脉冲增量插补算法和数字增量插补算法。

脉冲增量插补算法，每次插补产生一个行程增量，以脉冲的方式输出。在插补计算过程中不断向各坐标轴发出互相协调的进给脉冲，驱动进给电动机运动。一个脉冲所产生的坐标移动量叫脉冲当量，它是脉冲分配的基本单位，按机床设计的加工精度而定。脉冲增量插补有逐点比较法、数字积分法、矢量判别法、最小偏差法等。

数字增量插补也称为数据采样插补，其特点是将插补运算分两步进行。第一步为粗插补，采用时间分割思想，把加工一段直线或圆弧的整段时间细分为许多相等的时间间隔，称为插补周期。在给定起点和终点的曲线之间插入若干个点，即用若干微小直线段来逼近给定曲线，每一微小直线段的长度相等，且与给定进给速度有关。粗插补在每个插补运算周期中计算一次，因此每一微小直线段的长度与进给速度指令和插补周期有关，即 $\text{长度} = \text{进给速度} \times \text{插补周期}$ 。第二步为精插补，它是在粗插补算出的每一微小直线段上再做“数据点的密化”工作，这一步是对直线进行脉冲增量插补。

数字增量插补法的数控系统，其位置伺服通过计算机及检测装置构成闭环，插补结果输出的不是脉冲而是数据。计算机定时地反馈回路采样，得到的采样数据与插补程序所产生的指令数据相比较后，用误差信号去驱动伺服电动机。

常用的数字增量插补方法有：直线函数法、扩展数字积分法、双数字积分插补法、角度逼近圆弧插补法。

伴随着批量小但越来越复杂这类零件的日益增长的加工需求，工业生产把更多的注意力转向复杂曲线轮廓的加工。前面所述的这些用直线来近似曲线的方法容易引起以下的问题：

- (1) 线性化的分割引起沿刀具路径加工的不连续，影响加工表面的质量；
- (2) 增加了计算的时间和编程的难度。

因此，一些高效的插补算法也在不断的涌现，基于中心角分割的插补算法就是其中的一种适用于对二次曲线（椭圆、抛物线、双曲线）进行插补的算法，它比一般的圆弧插补有更高的插补精度。

由于轧辊磨床在磨削曲线时进给速度不高，所以通常采用脉冲增量插补算法，它把每次插补运算产生的指令脉冲输出到伺服系统，以驱动中高机构运动。每发出一个脉冲，中高机构移动一个基本长度单位，即脉冲当量。

3.1.2 非圆曲线插补节点坐标计算

数控加工中把除直线和圆弧之外可以用数学方程式 $y = f(x)$ 表达的平面轮廓曲线称为非圆曲线。虽然非圆曲线轮廓零件的种类很多，但不管是哪一种类型的非圆曲线零件，编程时所做的数学处理是大体相同的。一是选择插补方法，二是插补节点坐标计算，节点是用直线或圆弧逼近非圆曲线时逼近的直线段或圆弧段与轮廓曲线的交点或切点。

计算非圆曲线的节点坐标，首先要考虑的是选择插补方式，即采用直线段还是圆弧段逼近非圆曲线。采用直线段逼近非圆曲线，一般数学处理较为简单，但计算的坐标数据较多，且由于各节点连接处存在尖角，砂轮在尖角处不能连续对零件进行切削，导致零件表面出现砂轮印，从而降低加工的表面质量。采用圆弧段逼近非圆曲线，不仅可以大大减少程序段的数目，而且采用彼此相切的圆弧来逼近非圆曲线，使工件表面整体光滑，从而有利于加工表面质量的提高，但是数学处理过程要复杂一些。

(1) 用直线逼近法计算节点

用直线逼近零件轮廓曲线的节点计算，常用的方法有：等间距法、等弦长法、等误差法等。

(a) 等间距法（如图 3.1 所示）：是使某一个坐标的增量相等，然后求出曲线上相应的节点，将相邻节点连成直线，用这些直线段组成的折线代替原来的轮廓曲线进行直线插补编程。其特点是计算简单，坐标增量的选取可大可小，选得越小加工精度越高，同时节点也会增多，相应的程序也将增加，但等间距法计算较简单。

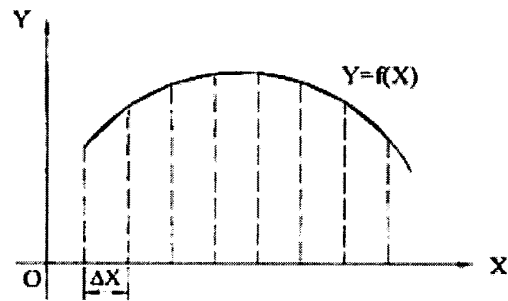


图 3.1 等间距法
Fig. 3.1 etc.span way

(b) 等弦长法 (如图 3.2 所示): 是使所有逼近直线段长度相等, 由于零件轮廓曲线各处的曲率不同, 因此各段的逼近误差不相等, 必须使最大误差小于 $\Delta允$ 。一般来说, 零件轮廓曲线的曲率半径晟小的地方, 逼近误差最大, 因而要先确定曲率半径最小的地方, 然后在该处按照逼近误差小于或等于 $\Delta允$ 的条件求出逼近直线段的弦长, 用此弦长逼近分割零件的轮廓曲线, 即可求出各节点的坐标。它比等间距法的程序段少一些, 但是当曲线的曲率半径变化较大时, 所求节点将增多, 所以这种方法适用于曲率半径变化不很大的情况。

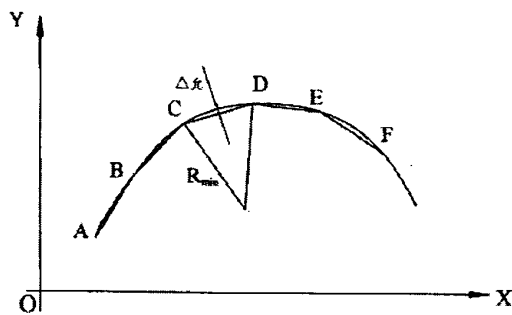


图 3.2 等弦长法
Fig. 3.2 etc.string way

(c) 等误差法 (如图 3.3 所示): 是使每个直线段的逼近误差相等, 并使逼近误差小于或等于 $\Delta允$, 所以这种方法较前两种方法更合理, 特别适合曲率变化较大复杂曲线轮廓。

设零件的轮廓方程为 $y = f(x)$, 以起点 a 为圆心, 以允许误差为 $\Delta允$ 半径画圆, 然后作该圆与曲线的公切线 MN, 可求得公切线的斜率 K, 过定点 a 做斜率为 K 的直线与曲线交于 b 点, b 点即为第一个插补节点, 用相同的方法可求得其它节点的坐标。

用等误差法虽然计算比较复杂, 但可在保证 $\Delta允$ 的条件下得到最少的程序段数目, 此种方法的不足之处是直线段插补的联结处不光滑, 使用圆弧段插补逼近可以避免这一点。

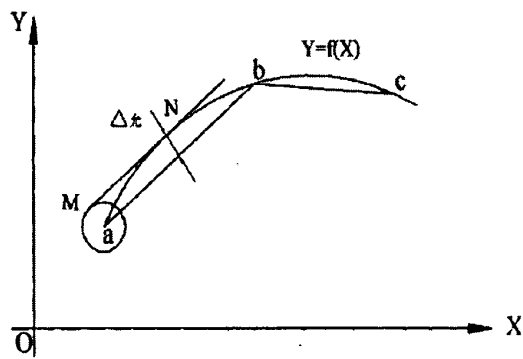


图 3.3 等误差法
Fig .3.3 etc.error way

(2) 用圆弧逼近法计算节点

用圆弧逼近法计算节点常采用彼此相交圆弧法和相切圆弧法。彼此相交圆弧法有圆弧分割法、三点圆法等。圆弧分割法，也称曲率圆法，用该法求节点时，需求出每段逼近圆弧的圆心、起点、终点的坐标值以及圆弧段的半径，作出的圆弧段与曲线的逼近误差应小于或等于允许的逼近误差 $\Delta允$ ；三点圆法是先用直线逼近方法计算出曲线轮廓节点的坐标，然后再通过连续的三个节点作逼近圆弧，并通过解析法求出该逼近圆弧的圆心坐标和半径。相切圆弧法是相邻各圆弧段彼此相切，逼近误差小于或等于 $\Delta允$ 。

比较以上计算非圆曲线节点的方法并根据轧辊曲线的特点（轧辊辊身跨度长达几米，而拱高只有几十微米），该曲线几乎近于直线，因此可选用等间距法直线逼近计算节点。

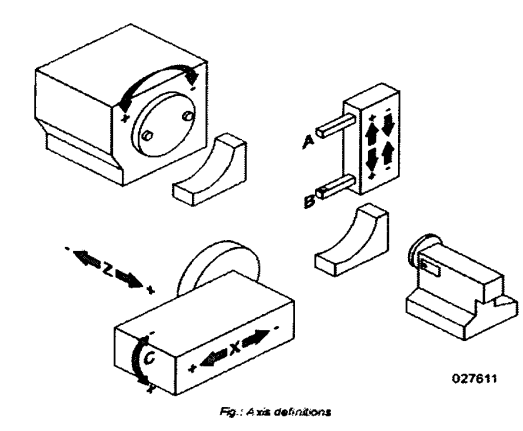
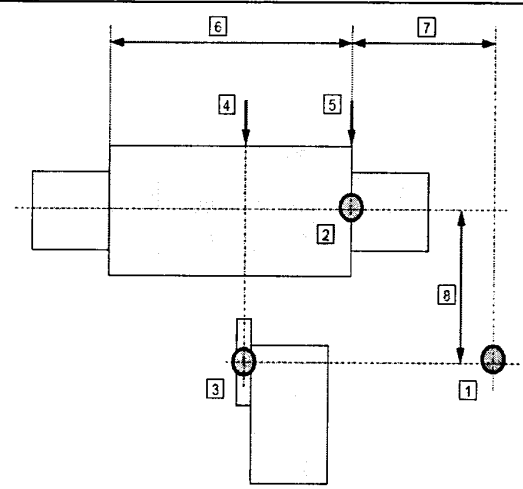
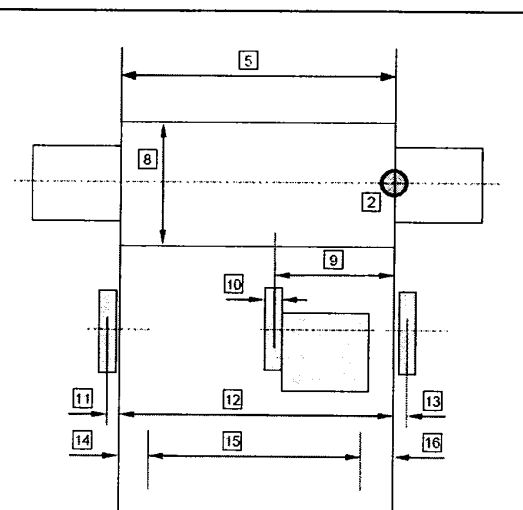
3.2 曲线编程方法

在介绍 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床编程方法之前，有必要先了解该磨床基础数据的设置。

3.2.1 基础数据定义

基础数据定义（如表 3.1 所示）主要介绍 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床各轴及参考点的设置原则和特点，作为曲线编程前的基础知识，可以概括为方向和参考点。在此基础上编程人员可根据实际曲线编程需要，选择对应的曲线程序进行参数设置。

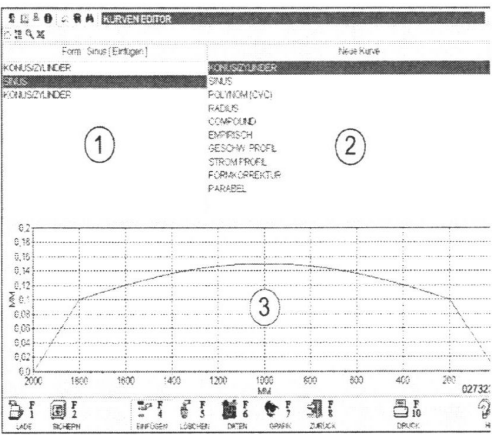
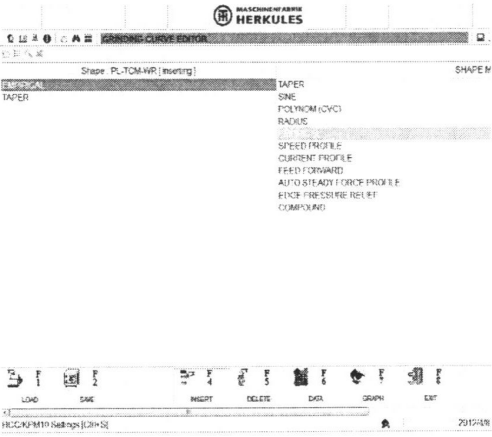
表 3.1 基础数据定义
Table 3.1 basic data

磨床各轴定义		A 探头/B 探头: 靠近轧辊为负方向，远离轧辊为正方向； C 轴: 靠近轧辊为负方向，远离轧辊为正方向； X 轴: 靠近轧辊为负方向（进刀），远离轧辊为正方向（退刀）； Z 轴: 靠近轧辊为负方向（向头架），远离轧辊为正方向（向尾架）； 头架主轴: 顺时针旋转为负，逆时针旋转为正。
参考点定义		1-磨床绝对零参考点 2-磨床相对零参考点 3-砂轮零参考点 4-A 测量臂的位置 5-Z 轴起始位置范围 6-磨削宽度范围 7-中心架范围 8-X 轴距磨床参考点的范围
相对 Z 轴参考点定义		2-磨床相对零参考点 5-磨削宽度范围 8-轧辊直径范围 9-砂轮对刀范围 10-砂轮宽度范围 11-磨削偏置范围 12-轧辊辊身长度范围 13-磨削偏置范围 14-头架补偿范围 15-Z 轴补偿范围

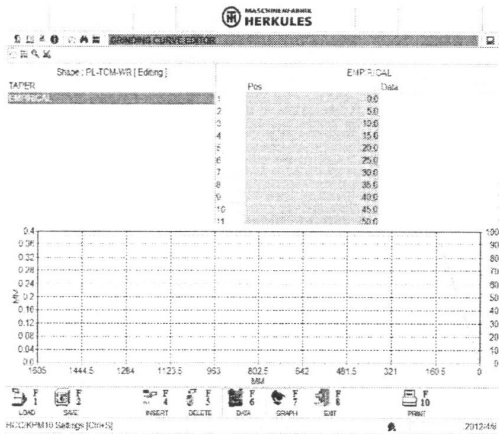
3.2.2 曲线编程实例

WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床提供锥度 (Taper)、正弦 (Sine)、CVC、圆弧 (Radius)、组合 (Empirical)、速度 (Speed)、电流 (Current) 和修正 (Correction) 八种常规曲线编程方法。其中锥度 (Taper)、正弦 (Sine)、CVC、圆弧 (Radius)、组合 (Empirical) 等五种曲线编程方法可单独使用，也可组合使用，速度 (Speed)、电流 (Current) 和修正 (Correction) 三种编程方法只能和前五种编程方法组合使用。下面以工作辊曲线编程 (如表 3.2 所示) 为例进行介绍。

表 3.2 工作辊曲线编程步骤
Table 3.2 work roll curve edit step

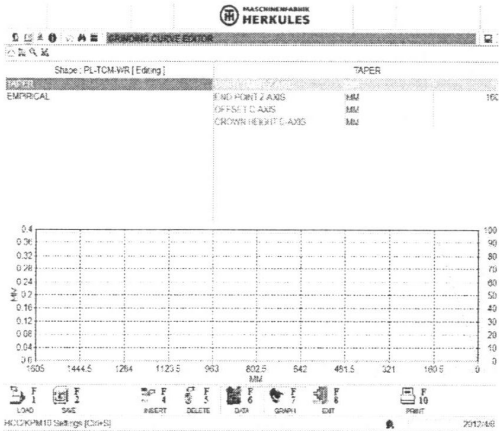
1 STEP		进入主菜单 MAIN MENU 界面，选择辊形编辑功能 CURVE EDIT，进入曲线编程界面。如左图所示，①区域为已选则曲线类型，②区域为可选择的八种曲线类型，③区域显示当前编辑的曲线图形。已选择曲线类型可进行多选，并且遵循由下向上覆盖的原则。下面以迁钢工作辊辊形为例进行介绍。
2 STEP		点击 F1 LOAD 创建新的曲线文件名 PL-TCM-WR，选择 Empirical 和 Taper 两个曲线类型，迁钢冷轧工作辊辊形是由平辊和经验曲线组合而成，Taper 用于编写平辊，Empirical 用于编写经验曲线，其中 Taper 范围由 155mm-1605mm，Empirical 范围由 0mm-155mm，且包含 31 个坐标点。

3
STEP



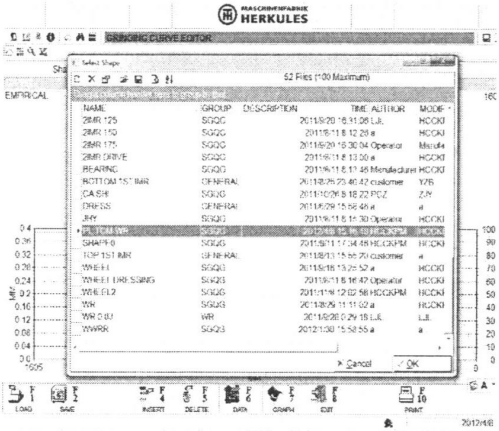
单击 Empirical 曲线，再点击 F6 DATA，区域转换为 Empirical 参数输入界面，将 31 个准备好的坐标值依次输入，其中第一列数值代表横轴，单位为 mm，输入过程中不允许重复，第二列数值代表纵轴，单位为 μm ，数值可以重复。单击 F7 GRAPH，可实时显示当前编辑的辊形曲线。

4
STEP



单击 Taper 曲线，再点击 F6 DATA，区域转换为 Taper 参数输入界面。按照 155mm-1605mm，分别输入起始点 155mm，结束点 1605mm。设置 C 轴偏置量为 0.388mm，C 轴曲线高度为 0.388mm。（注：0.388mm 为经验曲线 155mm 位置的高度）最终曲线如 F7 GRAPH 显示形状。

5
STEP



确认曲线图形和参数无误后，单击 F2 SAVE 进行保存，在已编写辊形曲线列表中，将出现曲线文件名为 PL-TCM-WR 的程序。至此，一个完整的工作辊辊形曲线编程编写完毕。

WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床提供多种曲线编写方法，在实际加工过程中，可根据工件曲线要求灵活选择，同一种曲线也可采用不同的曲线编写方法，其最终目的是要依据工件加工要求，既包括精度要求，也包括表面质量要求，选择最佳的曲线编写方法。在本文第五章中，将详细阐述曲线编写方法不同造成表面加工质量的差别。

3.3 工艺编程原理

3.3.1 工艺编程的概念

数控磨床之所以能加工出不同形状、不同尺寸和精度的轧辊，是因为有编程人员为它编制不同的工艺程序，所以说工艺编程工作是数控机床使用中最重要的一环。工艺编程是从零件图纸到获得数控加工程序的全过程，它的主要任务是根据轧辊工艺要求，合理编制工艺工序，设置加工过程的工艺参数，计算加工走刀中的刀位点等等。

工艺编程的主要内容包括：分析加工要求并进行工艺设计，以确定加工方案，选择合适的磨床、砂轮、夹具，确定合理的走刀路线及切削用量等；建立工件的几何模型，计算加工过程中刀具相对工件的运动轨迹或磨床运动轨迹；按照数控系统可接受的程序格式，生成轧辊加工程序，然后对其进行验证和修改，直到合格的工艺程序。

3.3.2 工艺编程原理

工艺编程是用变量作为数据进行编程，变量在编程中充当替代物的角色，已经在程序中赋值的变量，在后续程序中可被重新赋值，原来的内容被新的内容代替，利用控制系统对变量值进行计算和变量可以重新赋值的特性，使变量随程序的循环自动增加并计算，实现加工过程的自动循环，使得在进行复杂非圆曲线的加工中，系统可以自动算出整个非圆曲线坐标值，从而用很短的直线或圆弧线段逼近理想轮廓曲线，满足零件设计精度。

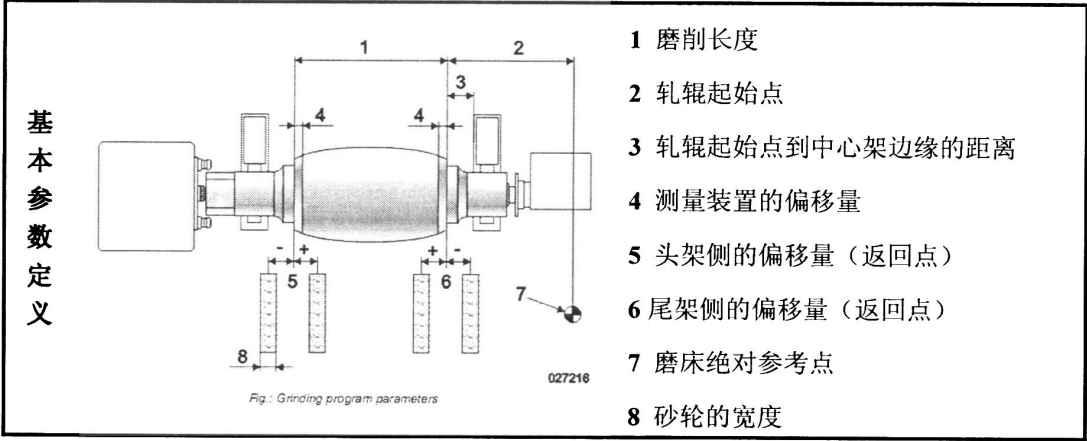
3.4 工艺编程方法

在介绍 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床工艺编程方法之前，有必要先了解该磨床的基本参数设置。

3.4.1 基本参数设置

基本参数设置（如表 3.3 所示）主要介绍 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床各轴及参考点的设置原则和特点，作为工艺编程前的基础知识，可以概括为方向和参考点。在此基础上编程人员可根据实际工艺编程需要，选择对应的工艺程序进行参数设置。

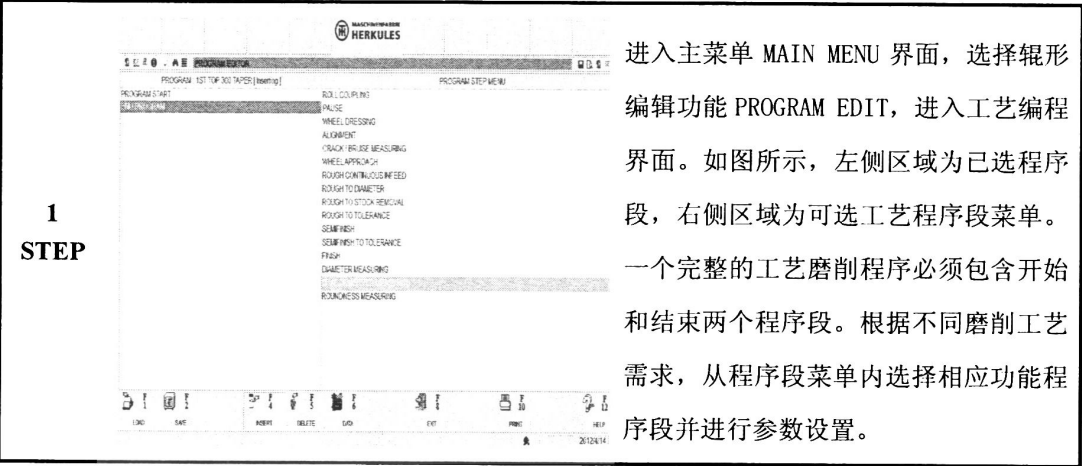
表 3.3 基本参数设置
Table 3.3 basic data set



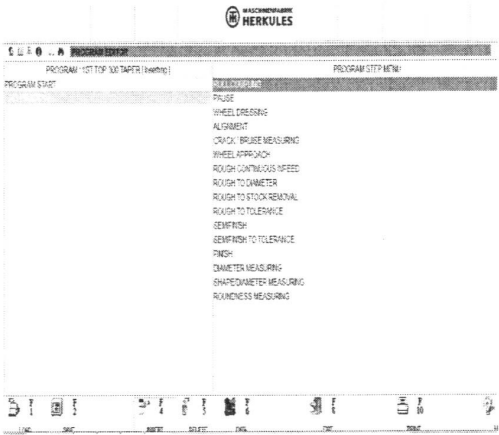
3.4.2 工艺编程实例

一个基本的工艺程序必须有开始和结束两个工序，根据轧辊的加工需要，可以在开始和结束之间添加砂轮修整、对中、对刀、粗磨、半精磨、精磨、辊形测量、圆度测量等工序，磨削过程中工序将按顺序方式执行。下面将以迁钢冷轧工作辊为实例（如表 3.4 所示）介绍工艺编程的步骤和要点：

表 3.4 工作辊工艺编程步骤
Table 3.4 work roll program edit

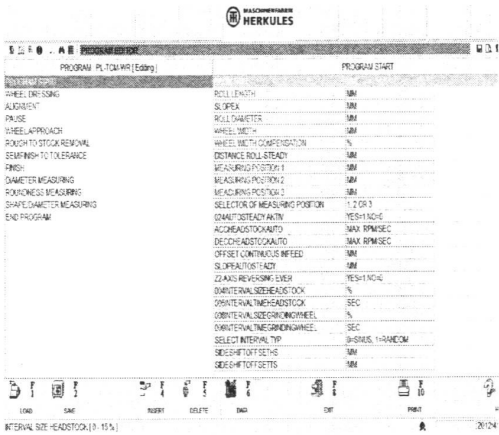


2
STEP



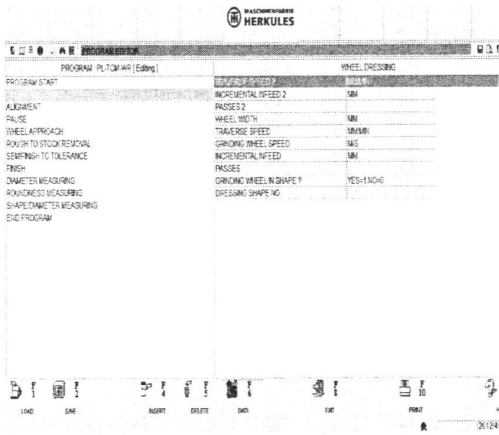
点击 F1 LOAD 创建新的工艺程序文件名 PL-TCM-WR（酸连轧机组工作辊），在工艺程序段菜单中分别选择砂轮修整、对中、暂停、对刀、粗磨、半精磨、精磨、辊形测量、圆度测量、探伤等 10 个工艺程序段，注意工序的上下顺序即为磨削加工过程中执行的先后顺序。

3
STEP



选择 PROGRAM START 程序段，点击 F6 DATA，右侧区域转换为工艺参数输入界面，这个程序段是整个工艺程序的基础，它包含了具有加工对象特征的数据和坐标位置参数，根据需求，在各个项目栏输入参数。当编辑某项参数时，选中该项目后项目的参数设置范围会显示在界面右下角。

4
STEP



选择 WHEEL DRESSING 程序段，在右侧区域设置砂轮修整工艺参数，这个程序段的主要目的在于：使用金刚石笔将磨损或新砂轮表面磨粒修磨到锋利状态，以便于下一步更好切削。

5 STEP

使用 ALIGNMENT 程序段的原理是使用磨床测量系统,检测当前轧辊的装夹位置,以便磨削时保证轧辊辊形和圆度精度。

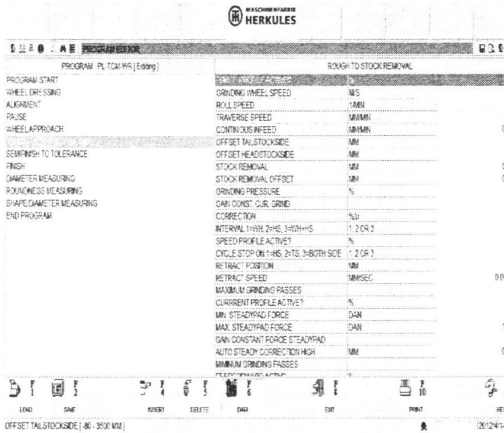
6 STEP

程序执行到 PAUSE 程序段后会自动停止, 主要目的在于查看轧辊调平程度和下一步程序段参数的合理性。

7
STEP

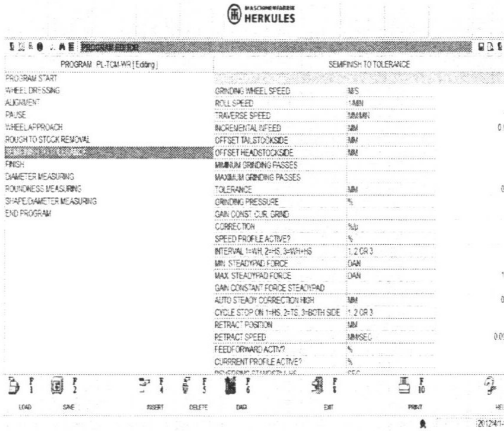
WHEEL APPROACH 为砂轮对刀, 此程序段参数影响砂轮与轧辊接触是否平稳, 一般选择自动模式。

8
STEP



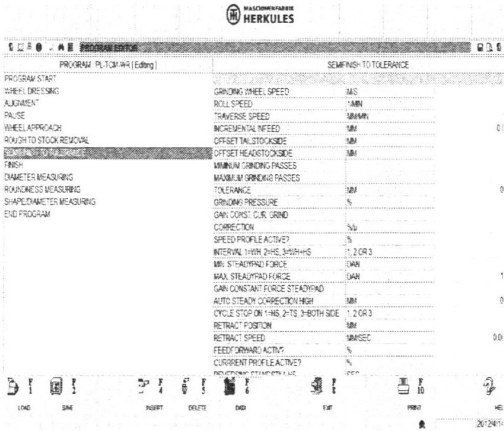
ROUGH TO STOCK REMOVE 程序段为粗磨，此程序磨削速度快、磨削量大，目的在于尽快将轧辊磨削至接近目标尺寸，因此程序段内的轧辊转速、托板横移速度和磨削压力值等参数应适当大一些。

9
STEP



SEMIFINISH TO TOLERANCE 程序段为半精磨，此程序段的主要目的在于修整辊形及表面质量，使被磨削轧辊尺寸达到公差范围内。

10
STEP



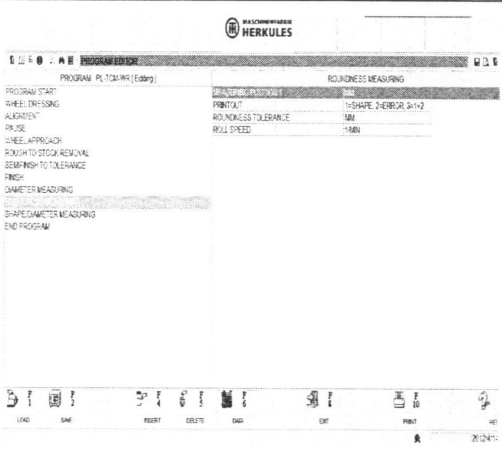
FINISH 程序段为精磨，主要目的在于进一步修整辊形和表面质量，除提高被磨削轧辊尺寸精度外，同时达到需求的表面粗糙度、消除粗磨和半精磨产生的走刀纹。

11
STEP



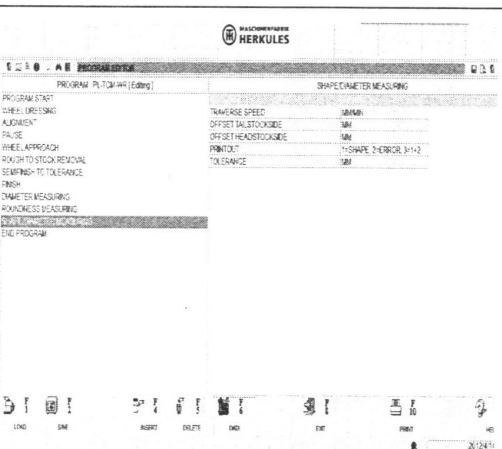
SHAPE/DIAMETER MEASURING 程序段为辊形和直径测量，既使用测量装置，根据 PROGRAM START 程序段中设置的检测位置对磨削完毕的轧辊进行辊形和直径测量。

12
STEP



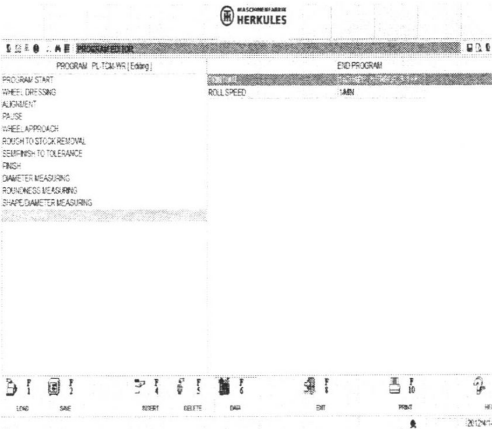
ROUNDNESS MEASURING 程序段为圆度测量，既使用测量装置，对设定位置圆度进行测量。

13
STEP



CRACK/BRUISE MEASURING 程序段为裂纹/软点检测，既使用涡流探伤装置，对轧辊表面的损伤情况进行检测。

14
STEP



END PROGRAM 程序段为整个工艺程序的最后一步，程序执行至此步时，将自动结束，并退出。

15
STEP



确认磨削工艺参数无误后，单击 F2 SAVE 进行保存，在已编写工艺编程列表中，将出现文件名为 PL-TCM-WR 的磨削工艺程序。至此，一个完整的工作辊磨削工艺程序编写完毕。

第 4 章 工作辊/中间辊磨削质量分析

迁钢冷连轧机组采用三菱日立 UCMW 型 1450 轧机，共五个机架，每个机架分别装配两支工作辊、两支中间辊和两支支承辊，辊系如图 4.1 所示：

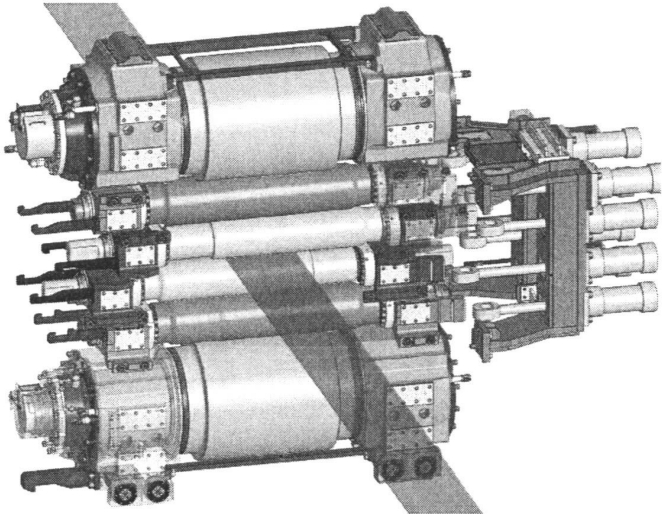


图 4.1 UCMW 型 1450 轧机辊系

Fig. 4.1 UCMW Type 1450 mill roll

随着冷轧带钢产品的竞争日趋激烈，对板型质量和表面质量的要求越来越高，而轧钢的过程又是轧辊与带钢原料接触产生物力变化的过程，这就对轧辊的辊形精度和表面质量提出了更高的要求。本章将对迁钢冷轧工作辊/中间辊设计要求、磨削工艺要求、辊形精度和表面质量进行分析，找到影响磨削质量的关键因素，以便提出相应的解决对策。

4.1 工作辊/中间辊设计要求与磨削工艺要求分析

4.1.1 工作辊/中间辊设计要求

冷轧辊的使用工况条件非常苛刻，承受极高的轧制力、辊间接触压力、热应力和驱动扭矩，同时还承受剧烈的辊缝摩擦以及乳化液循环冷却等复杂因素作用。工作辊/中间辊参数如表 4.1 所示。

表 4.1 工作辊/中间辊参数
Table 4.1 work roll/intermedia roll data

轧辊名称	规格/mm	材质	硬度/HSD	重量/kg	淬硬层/mm
工作辊	425/385x1605x4350	Cr5 锻钢	93-95	3060	>20
中间辊	490/440x1500x3910	Cr5 锻钢	80-82	4110	>25

冷连轧机的轧制速度最高可达 1200m/min，轧制力可达 30000kN。由于辊面与带钢

间反复接触和摩擦，辊面容易磨损和萌生疲劳裂纹，同时，生产中不可避免的轧制事故，如：跑偏、断带、粘钢、打滑等可能产生高于相变点温度的热冲击。因此对冷轧辊的组织稳定性、耐磨性、硬度均匀性、抗辊印性能和抗事故性能提出了更加苛刻的设计要求。

4.1.2 磨削工艺要求

轧辊磨削工艺是通过数控磨床的加工使下机轧辊的尺寸精度、表面质量恢复至轧机能够重新使用状态的过程，其核心目标一是去除轧制过程中轧辊表面形成的疲劳层、裂纹、软点及轧制事故缺陷，二是按照配辊要求加工轧辊至允许的尺寸精度和表面质量。通过迁钢冷轧工作辊/中间辊工艺参数要求（如表 4.2 所示）和配辊工艺（如表 4.3 所示）要求，不难看出对磨削辊形精度和磨削表面质量的苛刻要求。

表 4.2 轧辊工艺参数
Table 4.2 roll technology data

轧辊名称	冷却时间/h	曲线误/mm	圆度/mm	粗糙/Ra/ μm	磨削量/mm	辊形
工作辊	24	$<\pm 0.003$	$<\pm 0.003$	0.35-0.50	0.2-0.3	平辊+倒角
中间辊	48	$<\pm 0.003$	$<\pm 0.003$	0.40-0.60	0.4-0.5	平辊+倒角

表 4.3 轧辊配辊要求
Table 4.3 roll mate requirement

轧辊名称	材质要求	辊径差/mm	硬度差/HSD	尺寸上下要求	硬度上下要求
工作辊	同厂家同材质	<0.03	<2	上大下小	上小下大
中间辊	同厂家同材质	<0.10	<2	上小下大	上小下大

4.2 磨削机理

为了分析轧辊磨削过程中磨削质量的影响因素，在磨削过程中对磨削质量进行有效控制，就必须对轧辊磨削机理进行研究。轧辊磨削运动是由数控轧辊磨床、磨削砂轮、以及轧辊之间形成的一种特殊磨削工艺。由于磨削过程的影响因素很多，使得对轧辊磨削过程的研究更加复杂和困难，但本质上是由支承在弹性粘合剂上的砂轮磨粒进行的切削过程。

4.2.1 磨削过程的接触弧长

砂轮与轧辊磨削时的接触弧长（如图 4.2 所示），是轧辊磨削过程中的极其重要的基本参数之一。它对磨削区的磨削温度、磨削力、接触区域的弹性变形以及轧辊表面完整性均具有重要影响。

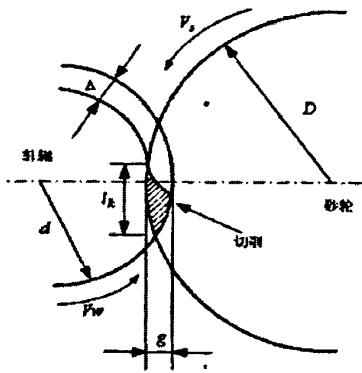


图 4.2 接触弧长

Fig. 4.2 engage radian

有不少研究学者对砂轮与工件接触弧长作了研究,典型的如 K.V.Kumar 和 M.C.Shaw 在忽略磨削热作用的影响下,利用磨粒团快过切飞磨法和快速脱离装置,从理论上得到了磨削时具有局部变形的砂轮与工件间接触弧长的数学模型:

$$l_c = \left[1 + \frac{0.095(1 + \nu)F_N d_s}{\sqrt{d_s a b E_s a}} \right]^{1/2} [d_s a]^{1/2} \tag{4.1}$$

其中: l_c 一砂轮具有局部弹性变形的理论接触弧长度 (mm);

d_s 一刚性砂轮直径 (mm);

a 一测量得到的砂轮切削深度 (mm);

b 一砂轮宽度 (mm);

E_s 一砂轮的弹性模量 (Kg/mm²);

ν 一砂轮的泊松比;

F_N 一砂轮所受到的法向磨削力 (Kg)。

4.2.2 磨削过程的磨削力模型

磨削力是轧辊磨削过程的一个重要参数,有时还作为控制磨削过程进行的信号(如恒电流磨削)。磨削力是砂轮的切削刃和轧辊材料的接触而产生的。它由切向磨削分力 F_t 和法向磨削分力 F_n 所合成(如图 4.3 所示)。切向磨削分力主要影响磨削时的动力消耗和磨粒的磨损,而法向磨削力与砂轮和轧辊之间的接触变形以及加工质量有关。

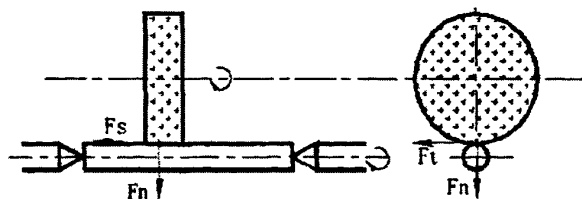


图 4.3 切向/法向磨削力

Fig .4.3 Ft/Fn grinding force

目前，关于磨削力的数学模型已有不少，其中比较有代表性的为 H.Opitz 等推导出的计算比法向磨削力（界面强度）的公式：

$$F'_N = KA_1(n) \left(\frac{C_1^2}{\tan k} \right)^{(1-n)/3} \cdot \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{(2n+1)/3} \cdot a^{(n+2)/3} \cdot D_e^{(n-1)/3} \quad (4.2)$$

式中：K—单个切削刃的切削力和未变形切屑横断面积间的比例关系，其量纲为 Kg/mm²，它与轧辊材质有关，并可用角度表示；

C_1 —为砂轮静态切削刃密度系数；

V_w —工件线速度（m/s）；

V_s —砂轮速度（m/s）；

a —切屑厚度（mm）；

D_e —砂轮当量直径（mm）；

$n, A_1(n)$ — $0.6 > n > 0.45, 1.03 < A_1(n) < 0.15$ 。

4.3 磨削辊形精度分析

磨削辊形精度主要包括圆度、圆柱度和辊形曲线三个方面，使用具有优良性能磨头的轧辊磨床是高精度轧辊磨削的基本条件。

4.3.1 圆度

圆度是指回转体的同一正截面上实际轮廓对其理想圆的变动量，按 ISO / R1101 对圆度下的定义，是指圆的形状偏离几何圆的程度。将实际圆夹在两个同心几何圆之间，当两个几何圆的间隔为最小时，则这两个几何圆的半径之差就是实际圆的圆度误差。圆度误差属于宏观几何形状误差，直接影响着轧辊的配合精度、旋转精度、振动等，迁钢冷轧工作辊/中间辊的辊身圆度误差要求 $< \pm 0.003\text{mm}$ 。影响圆度精度的原因包括：

(1) 采用中心架托瓦支承磨削时，轧辊辊颈的圆度直接复印到辊面磨削后的圆度，

采用多支点的中心架虽然能起到部分修圆能力，但提高轧辊辊颈的圆度依然是控制辊面圆度精度的最有效途径。迁钢冷轧工作辊/中间辊设计规范中，对于轧辊辊颈的圆度要求为 $<0.005\text{mm}$ ，较为宽松，为保证最终的磨削圆度精度，修改轧辊辊颈的圆度要求为 $<0.003\text{mm}$ ，至今未发现轧辊磨削圆度超差的现象。

(2) 砂轮修整质量差、没有修圆或者砂轮钝化未及时修整也将影响辊面磨削圆度。砂轮磨损和钝化后要及时修整，对于高精度轧辊磨削，砂轮修整分粗修、半精修和精修三个阶段，保证砂轮修整效果。

4.3.2 圆柱度

任一垂直截面最大尺寸与最小尺寸差为圆柱度。圆柱度误差包含了轴剖面和横剖面两个方面的误差。圆柱度的公差带是两同轴圆柱面间的区域，该两同轴圆柱面间的径向距离即为公差值（如图 4.4 所示）：

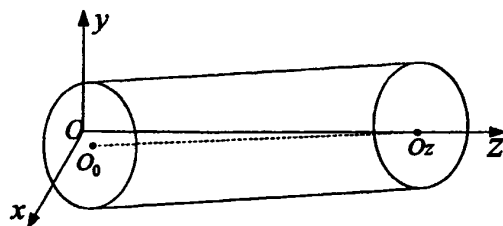


图 4.4 圆柱度

Fig .4.4 cylinder

由于存在中心架托瓦间隙、床身导轨浮起量误差等原因，转动过程中轧辊的中心线将在一定范围内变动，形成轧辊的圆柱度误差。此误差既属于周期性误差又属于随机性误差，但在一个测量周期内，可认为该误差为周期性误差。圆柱度误差对轧辊的影响主要表现在三个方面：一是直接影响轧辊的工作性能；二是影响轧辊的传动精度；三是产生辊系振动。影响圆柱度精度的原因包括：

(1) 轧辊磨床几何精度超差，尤其是轧辊回转轴心线与拖板纵向运动方向不平行、砂轮床身导轨在水平平面内直线度误差超差将影响辊面的圆柱度。其中砂轮床身导轨在水平平面内的直线度要直接复印为磨削辊面的母线直线度。及时修复磨床精度，定期调整轧辊磨床砂轮床身精度，有助于提高磨削辊面的圆柱度。

(2) 拖板静压油压过高，浮升量增大产生拖板运动时漂浮，床身导轨失去导向作用；拖板换向停留的时间太长或太短；拖板行程使砂轮超越轧辊辊面太多或太少；拖板低速时产生爬行；拖板滚珠丝杠啮合间隙太小，干涉拖板在床身导轨上的运行，上述因素都会造成磨削辊面圆柱度超差。正确维护保养机床；拖板行程保证砂轮超越辊面约为

砂轮宽度的 $1/3-1/2$ ；调整拖板滚珠丝杠的啮合间隙至合理范围，这些措施的实施将提高辊面磨削的圆柱度。

(3) 砂轮磨损、钝化造成磨削辊面母线直线度超差。自动轧辊磨床都具有砂轮磨损补偿功能，但砂轮的钝化需要操作者及时修整。

4.3.3 辊形曲线

辊形曲线指的是在实际轮廓线上两条相互平行包容的曲线的距离 D ，所有偏差都应包容在这曲线内，如图 4.5 所示：

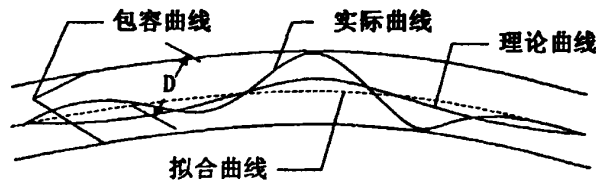


图 4.5 辊形曲线

Fig. 4.5 roll curve

轧辊辊形曲线精度对于提高板材加工质量有决定性的意义，轧机轧钢过程中的板型控制是以轧辊辊形曲线的精度为前提的。当代数控轧辊磨床都具备有误差补偿功能，它能满足辊形曲线误差的控制要求。造成辊形曲线超差主要是由于理论中高（凹）量与实际中高（凹）磨除量之间的差值。这个差值使理论曲线和实际曲线增加了一个坐标增量，增量过大辊形曲线误差就超差。迁钢冷轧工作辊/中间辊在调试初期，就曾出现过辊形曲线超差的问题，后经调整磨削工艺参数中的砂轮宽度补偿量及恒电流控制失效位置，很好的解决了辊形曲线超差的现象，具体措施将在第五章的辊形精度方案优化中说明。

4.4 磨削表面质量分析

磨削表面质量包括轧辊辊身表面任意点的粗糙度相对于目标值的偏差，轧辊表面不允许有振纹、横波、辊花、螺旋痕以及其它可视的表面缺陷。

4.4.1 粗糙度

磨削加工一般作为终工序，其任务就是保证产品零件能达到图样上所要求的精度和表面质量。任何机械加工方法都不能获得理想表面，它总会存在一定程度的微观不平度、加工中冷作硬化及表面残留应力和金相组织变化。实现轧辊高精度、低粗糙度、低残余应力、低硬化层的表面高质量要求，这是现代磨削技术的重要发展趋势。从加工质量观

点来看,磨削表面质量是指表面粗糙度、精度和表面层的物理力学性能。从表面完整性观点来看,磨削表面质量是指表面粗糙度、精度、表面层的硬度、组织和残余应力。

磨削表面粗糙度参数值不仅对轧辊表面性能有很大的影响,而且磨削表面粗糙度的不同形式对表面负荷性能也有很大影响,通常可用阿波特负荷曲线表示。

轧辊磨削表面的粗糙度参数值一般在 $2.0\mu\text{m}$ 以下,近年来,由于数控技术的应用以及机床轴承、砂轮等磨削工艺条件的改善,磨削技术得到很大的提高,因此磨削表面粗糙度参数值进一步减小,迁钢冷轧工作辊/中间辊的表面粗糙度分别达到了 $0.35\mu\text{m}$ 和 $0.40\mu\text{m}$ 。

(1) 表面粗糙度的影响因素

影响磨削表面粗糙度的因素很多,有砂轮特性、修整状况、磨损程度、砂轮直径、工件材料的化学成分、金相组织、工件直径、砂轮与工件速度、进给速度、无火花磨削次数、磨削深度与磨削液等,其中切削深度、进给量和切削速度等参数对表面粗糙度的大小具有决定性的影响。

(a) 磨削深度

表面粗糙度虽然理论上取决于磨粒的形状和切削刀的个数,与磨削时的其它因素无关。但实际磨削过程中当磨削深度加大时,容易引起振动,对磨削表面的粗糙度有很大的影响。

(b) 修整时纵向进给速度对粗糙度的影响

粗糙度是随着纵向进给速度的降低而降低。这是因为纵向进给速度降低会使砂轮工作表面上的微刃等高性和微刃性更好。实践证明,纵向进给速度应根据相应的粗糙度来选择,同时对不同粒度的砂轮也有所不同。

(c) 修整时横向进给速度对粗糙度的影响

横向进给速度对轧辊粗糙度有一定影响,当横向进给速度减小时,轧辊表面质量就提高。因为横向进给速度减小时,金刚石在砂轮表面的切痕深度减小,修整力也减少,磨粒产生微细脱落,从而使砂轮工作面上的微刃等高性好。在轧辊精密磨削选择横向进给速度时,应考虑轧辊粗糙度及砂轮的切削性能。因为横向进给速度减小时,砂轮的切削性能差,磨削时容易使轧辊烧伤,砂轮寿命降低。

(d) 磨削横向进给量与进给次数对粗糙度的影响

磨削横向进给量与进给次数反映砂轮与轧辊之间的接触压力,要使轧辊得到理想的粗糙度,合理选择磨削横向进给量与进给次数非常重要。在精密磨削时,为了避免由于切深过大而使轧辊烧伤和产生螺纹线,且使砂轮微刃也受到破坏,所以横向进给量不能

过大，特别是在第一次进刀时，应严格控制，切入量应尽量小，否则轧辊要产生烧伤和螺纹线，破坏砂轮的微刃，最终影响磨削质量。进给次数的选择，要根据轧辊尺寸精度及余量的多少来定。

(e) 轧辊速度对轧辊粗糙度的影响

在精密磨削时，轧辊速度在一定范围内，对轧辊粗糙度无显著影响。但轧辊速度对轧辊表面的多角形和烧伤有影响。速度增加，多角形深度减小，速度过低，轧辊表面容易烧伤，并且出现螺纹线等缺陷。因此应合理选择轧辊速度。

(f) 砂轮速度对粗糙度的影响

砂轮速度在一定范围内对轧辊表面粗糙度无显著影响。但由于精密磨削时，通过砂轮的精细修整，在砂轮工作面上形成了等高性的微刃，使单位时间内参加切削的微刃数大大增加，这与普通磨削有明显的区别。砂轮速度增加，砂轮切削能力提高，对提高生产效率有利。但是砂轮速度太高时，磨削热量大，易产生烧伤。此外，机床振动也较大，在轧辊表面产生振纹和多角形缺陷。因此为了保证轧辊质量，在精密磨削时，以采用较低的砂轮速度为宜。

(g) 去火花磨削次数对粗糙度的影响

对粗粒度砂轮来说，因为以微刃切削作用为主，精磨能起的作用较小。对细粒度砂轮来说，精磨时能够降低粗糙度，特别是轧辊磨削时，精磨是一个重要的因素。

4.4.2 螺旋纹

螺旋纹是纵向磨削中轧辊辊面出现的螺旋形痕迹。螺旋纹分为与拖板纵向进给相关的走刀纹和与拖板纵向进给无关的斜纹、网纹。

(1) 走刀纹

走刀纹的螺旋形痕迹间距直接与拖板纵向进给相关。走刀纹产生的原因可能是：

(a) 砂轮选择过硬，或者砂轮太钝；

(b) 砂轮边缘过于锋利；

(c) 砂轮修整质量差；

(d) 砂轮修磨行程不足；

(e) 砂轮主轴轴心线与工件轴心线由于工件弯曲引起的不平行。

选择砂轮的硬度；对砂轮变钝微刃性差要及时修整；高精度磨削时砂轮要进行粗修、半精修和精修；砂轮修整时金刚笔的超越量约为砂轮宽度的 $1/4-1/3$ ；砂轮修圆后用圆弧修整器将两端锐角倒圆，或用废砂轮块将砂轮两端锐边倒钝；磨削长轧辊采用辅助支承，

以上措施能有效消除走刀纹。

(2) 斜纹、网纹

斜纹或网纹的螺旋形痕迹与拖板纵向进给无关。它们常常出现在几个不同螺距丝杆螺纹的组合传动链上。这种花纹有时候仅仅在某个固定角度的灯光下才看得见，但它们影响高精度板带的表面质量。其原因可能是砂轮修磨刀具在砂轮表面上留下了间歇的花纹，当砂轮磨削轧辊时复印到磨削表面上。预防措施如下：

(a) 单方向上修整砂轮；

(b) 砂轮单次修整进给量，精修时不大于 0.01mm；

(c) 改变砂轮转速与工件转速的比值，当然不是所有的比值都凑效。其次产生斜纹或网纹的原因可能是砂轮修整器固有频率引起的，所以砂轮修整器应有足够的刚性满足砂轮修整的需要。

4.4.3 振纹

产生磨削辊面振纹的因素很多，现选其主要的几项：

(1) 砂轮平衡差、或停车时砂轮未甩干造成砂轮的不平衡，产生强迫振动，这是产生磨削振纹的主要原因。轧辊磨削砂轮要进行良好的静平衡（新砂轮还应进行二次静平衡），在数控轧辊磨床上磨削过程中应进行砂轮的动平衡；工作结束时必须先关冷却泵再停车，让砂轮空隙中的水甩干。

(2) 砂轮主轴电气控制系统参数优化不到位，砂轮电机特性差。进一步优化电气参数，改善电机特性，可以提高磨削辊面微观表面质量。

(3) 液压油（尤其是静压轴承、静压导轨油）中有水、气污染引起系统振动。改进密封，排净油中空气，污染后的油要更换新油。特别提醒：磨头润滑用抗磨液压油中绝对不允许受水污染。

(4) 传动皮带长短不均匀，选择或更换长短一致的皮带。

(5) 砂轮法兰盘与砂轮主轴配合锥面不清洁、接触不良。磨削工作前应检查砂轮法兰盘是否装配到位，配合面仔细做好清洗擦净，锥面接触面积要大于 85%，接触靠大端，避免夹盘接触不良引起砂轮跳动。

(7) 砂轮磨损、不圆、钝化要及时修整。

(8) 周围环境振源引起激振。

4.4.4 磨削烧伤

磨削过程中工件轧辊辊面局部过热，磨削温度超过辊子材料的相变临界温度，产生金属组织的相变——辊面形成回火层或在冷却水的激冷下产生二次淬火，即发生磨削烧伤，局部变色为黄褐色。磨削烧伤产生的原因及对策措施：

(1) 砂轮选择不当，硬度过硬、粒度太细。必须根据磨削工序要求选择硬度稍软的粗粒度的砂轮：

(2) 砂轮钝化，砂粒不易脱落、堵塞，微刃性能差。磨削过程中要根据砂轮磨损情况及时修整砂轮，砂轮修磨后要使用清洁的冷却水冲洗砂轮：

(3) 磨削过程中冷却液不充分或者冷却效果差，磨削区域内的磨削热不能有效被冷却液带走。高精度轧辊磨削要求冷却液表面张力低、流动性好、渗透性强，并具有良好的冷却作用，在整个磨削过程中始终供给大流量的冷却液，将磨削区域已经产生的磨削热迅速带走，降低磨削区域的温度。一般轧辊磨削可采用透明切削液或无机盐水溶液：低粗糙度磨削时采用半透明乳化液。

(4) 砂轮修得太细。砂轮太细微刃性差，砂粒的耕犁作用强，增大了磨削区域的温度。砂轮修整时（特别在粗磨、半精磨过程中），提高砂轮单次修整量，把砂轮修粗些。

(5) 磨削工艺参数选择不当。如砂轮线速度过高、或工件转速太低、或横进给量（磨削深度）过大。

4.4.5 辊面划伤

干净的磨削辊面出现逗号状不规则分布的划痕称磨削划伤。磨削划伤是由于砂轮磨损脱落的砂粒或自由悬浮在冷却液中的砂粒在磨削过程中划伤轧辊辊面造成的。

(1) 砂轮选择太软，脱粒太快。可采用如下措施改善：(a) 提高砂轮线速度；(b) 提高拖板纵向进给速度；(c) 降低轧辊转速。如果无明显好转，说明砂轮选择实在太软，应改用硬度稍硬的砂轮。

(2) 砂轮不干净。砂轮修磨后要使用清洁的冷却液仔细冲洗砂轮和砂轮罩壳，保持磨削区域的清洁度。

(3) 冷却液不充分、不干净。采用蜗旋分离、纸质分离等多级过滤，提高冷却液的过滤精度；经常更换冷却水，保证磨削过程中使用没有气泡干净的大流量冷却水。

(4) 对于高精度低粗糙度的轧辊磨削，要求工作环境无粉尘，建议在有空调的独

立的磨辊间进行，提高轧辊表面磨削质量。

第 5 章 工作辊/中间辊磨削方案优化

针对迁钢冷轧工作辊/中间辊调试期间遇到的辊形精度和表面质量缺陷,经过优化轧辊曲线编程、改变磨削工艺参数、调整砂轮材质和砂轮倒角、磨削液浓度等,观察磨削过程中曲线误差的变化、砂轮的磨损和轧辊表面质量,研究磨削精度、表面质量与辊形曲线编程、磨削工艺参数、砂轮及磨削液的关系和变化,提出如下方案:

5.1 工作辊辊形精度和表面质量方案优化

在上一章中提到辊形曲线超差和表面质量不良在迁钢冷轧工作辊调试初期成为轧辊磨削的难题,问题主要表现在两个方面:

- (1) 工作辊 155mm 辊形位置出现偏差
- (2) 工作辊 155mm 辊形位置走刀纹缺陷

5.1.1 工作辊辊形曲线偏差优化

迁钢冷轧工作辊在调试初期的磨削过程中一直被 155mm 经验曲线超差的问题困扰,工艺要求的曲线误差为 $\leq \pm 0.003\text{mm}$,但实际加工的曲线误差往往在 $\pm 0.008\text{mm}$ 。由于 155mm 经验曲线直接影响到轧机边降的调整,因此该问题的出现对轧机板型的控制造成极大的不便。

(1) 问题的产生及原因分析

影响辊形误差的因素主要由设备运行的稳定性、测量系统的准确性以及加工程序的合理性三方面构成。由于 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床为新安装设备,设备运行的各项参数在功能指标考核的过程中均进行过严格测试,包括测量系统的校准,因此设备稳定性和测量准确性的因素基本可以被排除,在之后的平辊磨削测试中也验证了上述判断。那么造成辊形超差的原因则被限定在加工程序的合理性方面,加工程序包括曲线编程和工艺编程两个方面,这在第三章的编程原理和方法中进行过详细介绍。

经过分析,辊形误差的产生主要是由曲线编程和工艺编程的不合理造成,其中曲线编程是由固定的参数设置转化为磨床可识别的插补点,然后控制磨床各轴按照该位置坐标进行磨削加工,相当于辊形的目标曲线。经比对,曲线编程结果与目标曲线完全相符,未出现任何偏差。那么可以判断出,辊形误差应该是因工艺编程中的某些参数设置不合理,造成实际加工过程与目标曲线产生了偏差。由之前的工艺编程方法介绍可知,工艺

编程由开始、砂轮修整、对中、对刀、粗磨、半精磨、精磨、辊形测量、圆度测量、探伤和结束等工序构成，经检查发现，在 PROGRAM START 初始化设置中，砂轮宽度补偿量（WHEEL WIDTH COMPENSATION）的设置是影响辊形误差的最直接因素。

在此，有必要重点介绍一下 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床砂轮宽度补偿量（WHEEL WIDTH COMPENSATION）的设置原则（如图 5.1 所示）。一般而言，砂轮作为磨床加工的执行刀具，是按照曲线编程所提供的插补点进行 X 轴和 Z 轴坐标点的移动，由于砂轮本身具有宽度（80mm），而目标曲线是由质点组成，砂轮 80mm 的宽度上需要定义一个执行目标曲线的质点，WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型轧辊磨床设置砂轮宽度的中心为质点，该点按照目标曲线的轨迹移动。由此不难发现，辊形出现偏差的是由于工艺编程中未考虑砂轮宽度对磨削加工精度的影响，从而造成实际辊形的误差。

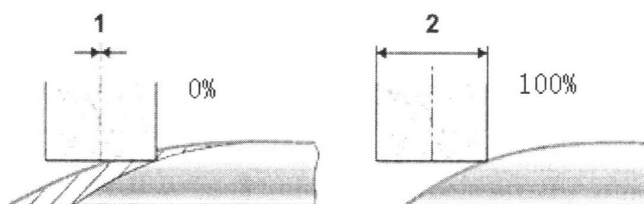


图 5.1 砂轮宽度补偿

Fig. 5.1 wheel width compensate

（2）解决问题的主要方法及措施

确定辊形偏差是由砂轮宽度补偿量影响后，开始着手对该参数进行调整。砂轮宽度补偿量（WHEEL WIDTH COMPENSATION）的设置范围是 0%~100%，初始化的设置状态为 0%，辊形曲线误差为 $\pm 0.008\text{mm}$ ，考虑到砂轮与轧辊的接触面积及砂轮本身的损耗，如果将砂轮宽度补偿量设置为 100%，仍极有可能出现偏差，于是以 20%为递增值进行试验磨削，每组试验磨削 6 次，每两次磨削记录一次砂轮的直径，具体的试验数据如表 5.1 所示。

由表 5.1 的数据可以看出，当砂轮宽度补偿量设置为 60%时，曲线误差控制的最好，基本能够达到 $\pm 0.002\text{mm}$ ，且并未随着砂轮直径变小而发生明显变化。砂轮宽度补偿量继续增大到 80%时，曲线误差有继续增大的趋势，能够达到 $\pm 0.005\text{mm}$ ，后来试验的 100%也进一步验证了之前的判断，曲线误差最大可以达到 $\pm 0.009\text{mm}$ 。由此确定了工作辊砂轮的宽度补偿量为 60%，彻底解决了工作辊 155mm 辊形位置超差的问题。

表 5.1 宽度补偿试验数据
Table 5.1 wheel width compensate test data

宽度补偿量%	砂轮直径	磨削压力	曲线误差	平均值
20%	680.5	25A	±0.007mm	±0.007
	680.5	25A	±0.008mm	
	675.4	25A	±0.007mm	
	675.4	25A	±0.007mm	
	670.2	25A	±0.008mm	
	670.2	25A	±0.007mm	
40%	665.1	25A	±0.005mm	±0.005
	665.1	25A	±0.005mm	
	662.3	25A	±0.004mm	
	662.3	25A	±0.005mm	
	659.7	25A	±0.005mm	
	659.7	25A	±0.004mm	
60%	655.1	25A	±0.003mm	±0.002
	655.1	25A	±0.003mm	
	652.4	25A	±0.002mm	
	652.4	25A	±0.002mm	
	649.2	25A	±0.002mm	
	649.2	25A	±0.002mm	
80%	645.3	25A	±0.005mm	±0.005
	645.3	25A	±0.005mm	
	642.6	25A	±0.006mm	
	642.6	25A	±0.005mm	
	639.3	25A	±0.006mm	
	639.3	25A	±0.005mm	

5.1.2 工作辊 155mm 辊形位置走刀纹缺陷

工作辊 155mm 辊形位置偏差问题得以解决，但 155mm 处的表面质量（走刀纹）问题却并未随之消失（如图 5.2 所示），由于该位置直接参与带钢轧制，其表面质量缺陷极

易反映到带钢表面，继而造成带钢产品的质量缺陷，因此，找到解决产生走刀纹的根本原因，成为工作辊磨削的又一重要攻关项目。

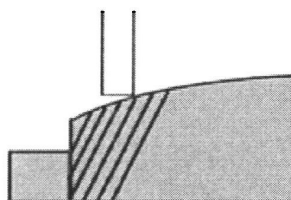


图 5.2 走刀纹
Fig. 5.2 feed lines

(1) 问题的产生及原因分析

走刀纹的产生原因在第四章中曾做过详细介绍，主要受砂轮硬度、修整状况等因素影响，起初的问题分析方向也是从砂轮方面做工作。更换不同硬度的砂轮后，发现走刀纹现象并未得到改善，并且每种硬度的砂轮均按照要求进行倒角修整。经过观察发现，走刀纹的缺陷只是出现在 155mm 位置，工作辊辊身的平辊部分却丝毫没有问题，这在一定程度上排除了砂轮硬度和修整状况等硬件因素。后续的分析过程，主要从工艺编程和曲线编程两方面入手查找问题。

首先保证曲线编程参数不变的前提下，对工艺编程参数中的轧辊转速、砂轮转速、Z 轴移动速度进行调整，发现走刀纹只是沿圆周方向发生了宽窄变化，程度并未减轻。随后，试验使用同一工艺编程参数，分别磨削带 155mm 曲线和平辊曲线，发现平辊曲线对应部位没有出现走刀纹，这在一定程度上证明工艺编程参数不是造成走刀纹的原因。最后把目标定位于曲线编程，经过比对发现，155mm 经验曲线是由 31 个插补点设置的曲线，插补点水平间隔为 5mm，磨头在磨削的过程中按照 31 个插补点的坐标进行移动，初步怀疑是由于插补点数量过少，造成磨削过程中产生走刀纹。

(2) 解决问题的主要方法及措施

确认了走刀纹产生的原因，下一步是如何增加 155mm 处插补点的数量，使经验曲线过度更加平滑。由于 31 个插补点数值属于 know how，在调试过程中轧机供应商并未提供更多的信息，如果想增加插补点的数量，前提是要知道 155mm 处经验曲线的方程。经过与轧机工艺人员的探讨，从 31 个插补点（如图 5.3 所示）的数值规律进行反推，最终得到了 155mm 处的经验方程。随后，将 155mm 曲线分为 155 个输入值，计算出 155 个插补点（如图 5.4 所示）坐标。经过比对，155 个插补点的经验曲线比 31 个插补点的经验曲线过度更加平滑，在实际的磨削加工过程中，155mm 处的走刀纹也得到了有效改善，表面磨削质量达到了带钢轧制的要求。

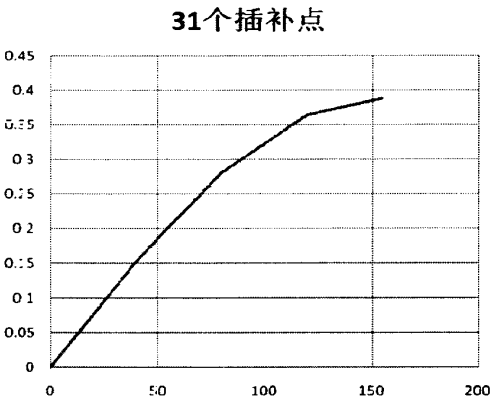


图 5.3 31 个插补点曲线
Fig.5.3 31 points curve

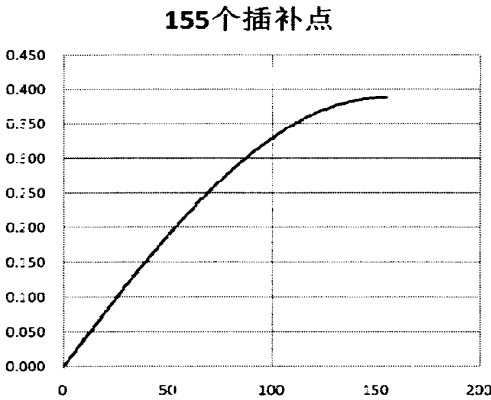


图 5.4 155 个插补点曲线
Fig .5.4 155 points curve

5.2 中间辊组合辊形磨削方法优化

随着迁钢酸轧机组顺产稳产，轧制工艺所需的中间辊 D-8mm 部位伴随着几次辊身磨削后，已不满足使用需求。与磨床 SV 讨论加工方案，试图采取连续磨削方式加工此位置，但经磨床加工后的轧辊效果与图纸要求相比有较大出入，为保证迁钢酸轧机组正常生产，临时采取车削方式加工此部位，但车削加工一段时间后发现加工质量统一性差、加工周期长、加工成本高。因此，研究出一种即适合现有磨床结构，又不增加成本的中间辊组合辊形磨削方法具有重要的意义。

（1）问题的产生及原因分析

由于 SV 调试期间实验的磨削方案为连续性磨削至磨削量，极易产生轧辊欠磨削和过磨削现象（闷刀），需要操作人员看守，以防止轧辊辊身刮伤测量臂，对轧辊加工部位长度上存在较大误差（需外委加工保证其长度）。为解决以上问题，预想先采取手动方式找准轧辊基准点手动磨削开槽，然后执行自动磨削程序。

（2）解决问题的主要方法及措施

第一步：手动将砂轮一侧修磨成小于 R10 的圆弧倒角，并将磨床移动至 D-8mm 与辊身接触部位（长度方向上控制精度可达 0.001mm），此时手动进给 X 轴待砂轮与轧辊接触时开始记录 X 轴坐标，慢速进给 X 轴进行开槽磨削，待 X 轴进给量达到 10mm 后退出 X 轴（开槽磨削过程中砂轮消耗 4-5mm，实际磨削轧辊深度 5-6mm，加上此部位剩余 2-3mm 的深度，完全可满足 D-8mm 的图纸要求）。由于手动将砂轮一侧修磨成 R10 的圆弧倒角，加工后 D-8mm 与辊身接触部位为 R10 的圆弧过渡。

第二步：开槽磨削结束后，执行自动磨削程序，执行自动磨削程序有两种方案可行，

一是采取粗磨连续进给磨削，此磨削需人工对刀，通过调整砂轮连续进给量控制磨削速度，可以不放下测量臂。二是采取粗磨至磨削量磨削，此磨削不需人工对刀，只需要设置好磨削量和压力即可，放下测量臂，实时检测轧辊直径。就目前的两种加工方案来看，第一种方案比较合理，可有效的防止测量臂刮伤、磨损，减少磨床运行时间，延长易损件使用寿命。

（3）成本分析

通过磨削方法的改进，大大降低了中间辊 D-8mm 部位的外委加工费用，磨削质量和精度也大幅度得以改善。每自主加工一次中间辊 D-8mm 部位，可节约外委加工费用 0.98 万元，加工一支中间辊 D-8mm 部位，可节约外委加工费用约为 7.8 万元，如果现场 90 支中间辊全部使用至报废直径，自主磨削 D-8mm 部位将节约外委加工费用 703 万元，按照酸轧年产 100 万吨计算，吨钢外委加工费用就可降低 7.03 元/吨。目前已实际磨削合计 96mm，实际节约费用 15.67 万元。

（4）持续优化目标

（a）中间辊 D-8mm 处轧辊硬度为 40-45HSD，目前所采购的砂轮材质和硬度适合磨削轧辊辊身，硬度在 80HSD 以上，需调换或采购一批硬度较高，适宜磨削低硬度轧辊的砂轮，还可以进一步降低砂轮消耗。

（b）在不影响磨削效率的前提下，实验一批国产砂轮（价格为进口砂轮一半左右），如能够满足现场需求，在目前的基础上还能够节约 27 万余元。

（c）优化磨削参数，减少磨削时间，还可以进一步控制消耗成本。

第 6 章 结论和建议

6.1 结论

轧辊磨削是一种影响因素非常复杂的加工过程，磨削质量的优劣很大程度上与磨床性能和长期积累的磨削实践经验有关。同时由于板材轧制过程非常复杂而严格，为保证钢板质量，需要对轧辊辊形及其磨削精度进行严格的控制，需要用到轧辊磨削工艺知识。为了获得理想的板形质量，必须控制轧辊辊形及磨削质量，达到轧辊磨削加工低成本、高效率、高精度和智能化的生产要求。针对首钢迁钢公司冷连轧机组的用辊条件，从研究磨床结构、功能和编程原理入手，分析影响轧辊磨削质量的各种因素，并以首钢迁钢公司冷轧磨辊间使用的德国产 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 型高精度工作辊磨床为具体研究对象，提出合理、简便的高质量轧辊磨削加工方法。本文主要研究成果如下：

（1）分析 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床的主要结构和功能，为磨削质量的实现提供硬件基础；研究 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床的编程原理和方法，为磨削质量的实现提供软件基础，结合生产现场的使用情况，提出 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床的功能特点。

（2）结合迁钢冷轧工作辊和中间辊设计要求以及磨削工艺要求，研究轧辊磨削的机理，建立了磨削砂轮和轧辊的接触弧长，轧辊磨削力的理论和经验模型，为进行轧辊磨削质量分析研究提供理论根据。详细分析了轧辊磨削过程中辊形精度和表面质量的主要影响因素，最后提出了控制轧辊磨削质量的一些具体策略、措施何方法；

（3）在磨削辊形精度和表面质量分析的基础上，针对迁钢冷轧工作辊/中间辊调试期间遇到的辊形精度和表面质量缺陷，特别是工作辊 155mm 辊形位置出现偏差以及工作辊 155mm 辊形位置走刀纹缺陷，经过观察磨削过程中曲线误差的变化、砂轮的磨损，研究表面质量与辊形曲线编程的关系，确定了砂轮宽度补偿量（WHEEL WIDTH COMPENSATION）的优化值为 60%，155mm 曲线编程的插补点优化值为 155 个。

6.2 建议

磨削加工，尤其轧辊磨削的精度与质量控制是加工领域中公认的难题。国内外可参考的文献很少，本文基于 WS 450-6 x 5000 CNC MONOLITH 轧辊磨床及迁钢冷轧工作辊/中间辊的高效磨削工艺方面做了一定的理论结合实践的技术研究工作，进行了有益尝试。但把这些理论和技术完美地应用到生产实际并再进行升华提炼，还需从以下几方面

进行大量细致的研究和完善工作：

（1）为了达到轧辊磨削过程的辊形精度自适应控制与补偿，应该继续对高精度的在线检测装置进行研究；

（2）由于轧辊磨床微进给机构的运动性能直接影响轧辊磨削质量的控制，准确测量轧辊磨床的动态性能可进一步提高轧辊的磨削质量，目前国内还没有轧辊磨床的动态性能检测技术，因此有必要研究轧辊磨床的动态性能测量技术；

（3）将理论目标与生产实际加工成本相结合，通过进一步优化改善磨削工艺，拓展磨削技术和方法，更加经济的进行轧辊磨削。

参考文献

1. 胡学雄.WS600P450 轧辊磨床性能失效分析和维修.设备管理与维修, 2005 — 9.
2. 刘利.当前 NC 的热点——开放化与 CP 化机电一体化, 1998.
3. 朱均, 邓圭玲.轧辊磨床磨头动静压轴承的性能分析.动静压支撑技术的研究报告.西安交大轴承研究所, 1988.
4. 卜炎, 李文录.加载角对四油垫向心静压轴承静态性能的影响.天津大学, 1984.
5. 丁振乾, 蒋涌岩.动静压轴承轴承结构对其性能的影响.上海机床厂磨床研究所, 1984.
6. 钟洪, 黄汝光.大负载动静压轴承试验.研究成果总结报告.广州机床研究所, 1984.
7. 谢明志.KWA74O 轧辊磨床运动控制模型及其研究.毕业设计论文, 2002.2.
8. 杨晓京, 张仲彦.开放式微机数控系统实现技术研究.昆明理工大学学报, 2002—1.
9. 罗学科.椭圆型空型轧辊的数控加工程序编制.北方工业大学学报, 1998—1.
10. 吴小洪, 吴乃优等.现代机电一体化设备的网络结构.制造业自动化, 1999 年 8 月第 21 卷第 4 期.
11. 苟琪.可编程控制器(PLC)在 CNC 机床中的应用, 机械工业自动化 1998.8 第 20 卷第 4 期.
12. 钟约先, 林亨.机械系统计算机控制.北京:清华大学出版社, 2000.
13. 丁丽娟.数值计算方法.北京理工大学出版社, 2001.
14. 白恩远, 王俊元.现代数控机床伺服及检测技术.国防工业出版社, 2002 — 7.
15. 毕承恩等.现代数控机床上、下册.机械工业出版社.
16. 张伯鹏.机电智能控制工程.机械工业出版社.
17. 张明达.电力拖动自动控制系统.冶金工业出版社.
18. 徐濒等.机械设计手册.第 1 册.第 4 册.机械工业出版社, 1991.9.
19. 陈燕生等.液体静压支承原理和设计.国防工业出版社, 1980.12.
20. 杨更更, 叶佩青.基于 PMAC 的数控 PDI 参数自适应调节.机械工程师, 2002 — 4.
21. 朱祖根, 杭根新.磨工与磨削.机械工业出版社, 1988.
22. 杨荣福, 董申.金属切削原理.机械工业出版社, 1988.
23. 郑善良.磨削基础.上海科技出版社, 1988.
24. 蔡在宜.金属切削原理二.同济大学出版社, 1994.
25. 胡学雄, HERKULES 轧辊磨床机械性能失效分析和维修.中国设备工程, 2005.1.

26. 蔡光起, 冯宝富, 赵恒华, 磨削磨料加工技术的最新发展, 航空制造技术, 2003.4.
27. Malkin S. 莫学技术理论与应用[M].蔡光起等译。沈阳: 东北大学出版社.
28. Yin-Tien Wang,Yann-Jyi Jan, Grinding force models in finishing processes. Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings 2001 IEEE/ASME International Conference on Vol.2,2001:822-827.
29. 谢红梅, 黄伟. 基于人工神经网络的磨削表面粗糙度预测研究, 精密制造与自动化, 2001, (4): 30-31.
30. 周志雄, 邓朝辉, 陈根余等. 磨削技术的发展及关键技术. 中国机械工程 2000.11.
31. 黄伟, 黄大明, 韦志康等. 人工神经网络技术在 CBN 砂轮磨削表面粗糙度研究中的应用, 现在制造工程, 2003 (4): 40-42.
32. HwangCL,YOoK5,Multipleattributrdeedisionmaking.Berlin:Springer.riag,fishbumpC.utilit ytheo fordeedisionmaking.Newyork:Wiley,1970.
33. James J. Govindhasamy,Sean F. McLoone, George W.Irwin.Neural modeling,control and Optimization of an industrial gringing process Control Engineering practice,2005,13:44~59.
34. Inasaki Sensor Fision for Monitoring and Controlling Grinding Processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Tehnology, Volume 15, Number 10/September,1999.
35. Zanchetta.P.Sumner,M.Clare J.C etal Control of matrix converters for AC power supplies uing genetic algorithms. Idustrial Electronics 2004 IEEE Internationa Symposium on Volume2,4-7 May2004 Paige(s):1429-1433.
36. Wen, X. M.Tay.A.A.O.Nee .A.Y.C.Micro-Computer-Based Optimization of the Surface Grinding Process.J.Mater.Process.Technol,1992,29:75~90.
37. 彭燕.基于 HD400-425-20 型轧辊磨床提高轧辊磨削质量的方法.[D].兰州理工大学硕士学位论文, 2006.6.
38. 陈劲枰, 基于 BP 网络的切削力预报及 B-1 磨削性能研究[D], 大连理工大学硕士学位论文。2004.3.
39. 楼少敏.磨削加工实时检测及工艺参数智能选择的研究[J]。机械加工与自动化, 2001 (11): 2-5.
40. 臼井英治著切削磨削加工[日]。机械工业出版社.

致 谢

作者能够顺利的完成本篇论文首先要感谢我的导师史家顺，在过去的三年中，导师严谨的治学态度、丰富的理论知识、敏捷的思维和严于律己、宽以待人的品格都给我留下了深刻的印象。他们不但传授给我知识，还教会我做人的道理，将使我受益终生！

感谢我的家人和父母对我的关心和支持！

最后感谢所有帮助过和关心过的老师、同学和朋友们！

由于作者水平有限，加上时间仓促，文章中错误和不妥之处，请各位读者批评指正。