

中文摘要

随着科学技术的进步,硬脆材料的应用也随之日益广泛。为实现硬脆材料的精密、超精密磨削,本文对超精密磨削用微进给工作台及 ELID 超精密磨削用金刚石砂轮的电火花整形技术进行了研究。

高精度微进给系统是超精密加工的关键部件,具有微量控制磨削厚度的功能。本文密切结合 ELID 磨削中的实际问题,研究精密磨床辅助进给工作台,以进一步提高磨床的进给精度。文中阐述了以压电陶瓷作驱动器为驱动源,弹性铰链为弹性变形元件的微进给工作台的结构特性和工作原理,利用有限元软件 ANSYS 对弹性铰链的结构尺寸进行了优化设计,得到了合适的结构参数。并对微进给工作台进行实验测试,测试结果表明微进给工作台的位移输出特性满足设计要求。

砂轮的形状精度直接影响着工件磨削表面质量。铸铁结合剂金刚石砂轮具有高的刚度、强度,适合工程陶瓷、硬质合金等硬脆材料的超精密磨削。但由于铸铁结合剂金刚石砂轮的结合剂硬度高,所以砂轮难以修整。本文根据电火花加工原理,通过一系列实验,借助于数据采集系统采集整形过程中的电压和电流,总结了铸铁结合剂金刚石砂轮的电火花整形规律。通过电火花整形,使铸铁结合剂砂轮初步达到了精密磨削的要求。

关键词: 微进给工作台; 压电陶瓷驱动器; 弹性铰链; 超精密磨削; 硬脆材料; 金刚石砂轮; 电火花整形

Abstract

With the development of science and technology, the hard and brittle materials, such as ceramics are meeting a wider adoption. In order to realize the ultra precision grinding of hard and brittle materials, the author studies micrometer feed table used in ultra-precision grinding and the spark truing of cast iron bonded diamond grinding-wheels technique.

High precision micrometer feed system is a critical part of ultra precision machining system. It has the function of controlling the cut depth. So closely connecting the problems occurring during micro grinding, a micrometer feed table is studied and made in order to improve the feeding precision of the grinding machine further. In this thesis, the structure characteristics and working principle of a micrometer feed table is presented in detail. The micrometer feed table is driven by piezoelectric translator. With the aid of the finite element method, the structural parameter of the flexure hinges have been optimized. And the experiment of the table has been carried out. The results show that the displacement output feature meets the design requirements.

The shape precision of grinding wheel affects the surface finish of work piece directly. But the precise truing of a cast iron bonded grinding wheel is considerably difficult. So the author carries out a series of experiments for spark truing on the base of sparkling processing principles, and at the same time a data collecting system is used to collect the current and voltage. With the help of it, the surface quality can be estimated real time. And at the same time roundness and taper of the grinding wheel are measured. By means of spark truing, the cast iron bonded diamond grinding wheel can meet the requirements of ultra precision machining.

Key words: micrometer feed table, piezoelectric translator, flexure hinge, ultra-precision machining, cast iron bonded diamond grinding wheel, spark truing.

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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了谢意。

学位论文作者签名：赵淑文 签字日期：2004 年 1 月 8 日

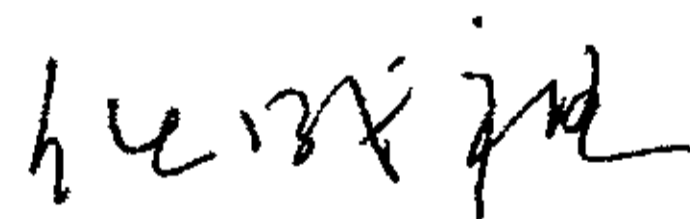
学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 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，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：赵淑文

导师签名：



签字日期：2004 年 1 月 8 日

签字日期：2004 年 1 月 8 日

第一章 绪论

1.1 国内外超精密加工技术的发展概况

精密、超精密加工技术在提高机电产品的性能、质量和发展高新技术中起着至关重要的作用。目前，国内外文献中涉及的精密、超精密加工，一般是指微米级（形状尺寸误差为 $3\sim 0.3\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $Ra0.3\sim 0.03\mu\text{m}$ ）、和亚微米级（形状尺寸误差为 $0.3\sim 0.03\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $Ra0.03\sim 0.005\mu\text{m}$ ）和纳米级（形状尺寸误差小于 $0.03\mu\text{m}$ 、表面粗糙度小于 $Ra0.005\mu\text{m}$ ）精度的加工^[1]。为了实现这些加工所采取的工艺方法和技术措施，则称为精密、超精密加工技术。

超精密加工的历史可以追溯到 50 年代末期。美国、英国、日本、荷兰、瑞士等工业发达国家在宇航、计算机、原子能、宇宙探测，特别是在军事工业的推动下，积极开展了超精密加工技术的研究工作。其中，美国起着先导作用，经过几十年的努力，在超精密加工各项关键技术领域取得了大量突破性成果，例如：研制成功高性能的超精密机床（以 DTM-3 为典型代表），纳米级（约几十纳米）刃口半径的单晶金刚石刀具，纳米级粒度的金刚石砂轮等^[2]。这些成果应用后，使得超精密加工的精度和质量提高到很高的水平，产生了巨大的经济效益和社会效益。表 1-1 给出了几种常见的加工方法和加工精度^{[3][4][5]}。

超精密加工主要包括以下三个领域：

1. 超精密切削

又称单点金刚石车削（SPDT）。金刚石超精密切削主要用于对有色金属（包括铜、铝及其合金、银、金、非电解镍等）和塑料等材料的表面质量要求非常高的超精密零件进行“镜面加工”，如计算机磁盘、光学系统的反射镜（平面、球面及非球面）和多面棱镜；也可进行大型零件和复杂形状零件的超精密加工^{[6][7]}。

2. 超精密磨削与研磨

作为传统超精密加工工艺的磨削，在超精密加工研究的初期，曾一度被国内外研究者所忽视。主要原因在于：砂轮切削刃高度沿径向分布的随机性和磨损的不规律性。随着砂轮精密修整技术的解决及超微细粒度砂轮的使用，超精密镜面磨削逐渐受到了人们的重视^{[8][9][10]}。精密和超精密磨削具有广泛的应用范围，可用于超精密金刚石车削无法实现的黑色金属、硬质合金、工程陶瓷、光学玻璃、蓝宝石、光学晶体、单晶硅、砷化镓等材料的超精密加工。现在，超

精密磨削可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 以下的加工精度和 $Ra0.003\mu\text{m}$ 左右的表面粗糙度。

表 1-1 几种常见精密零件的加工方法和加工精度

加工零件	工件材料	加工方法	平均加工精度
磁盘	有色金属	超精密金刚石切削	粗糙度 $Ra\ 0.01\sim 0.04\mu\text{m}$ 波纹度 $0.02\sim 0.01\mu\text{m}$
多面镜	有色金属	超精密金刚石切削	粗糙度 $Ra\ 0.01\sim 0.04\mu\text{m}$ 波纹度 $0.02\sim 0.01\mu\text{m}$
激光陀螺的平面反射镜	有色金属	超精密金刚石切削	粗糙度 $Ra\ 0.01\sim 0.04\mu\text{m}$ 波纹度 $0.02\sim 0.01\mu\text{m}$
塑料透镜用非球面模具	有色金属	超精密金刚石切削	粗糙度 $Ra\ 0.01\sim 0.04\mu\text{m}$ 波纹度 $0.02\sim 0.01\mu\text{m}$
VCR 磁头	Mn-Zn 单晶	超精密研磨	粗糙度 $R_{\text{max}}\ 0.02\mu\text{m}$ 平面度 $0.04\mu\text{m}$
集成电路基片	单晶硅 砷化镓	超精密磨削 超精密研磨	粗糙度 $Ra\ 0.05\mu\text{m}$ 平面度 $0.03\mu\text{m}$
光学平晶	微晶玻璃	超精密研磨	粗糙度 $Ra\ 0.01\mu\text{m}$ 平面度 $0.03\mu\text{m}$
短波段光学器件	陶瓷玻璃 CVD-SiC	超精密磨削 超精密研磨	粗糙度 $Ra\ 0.001\sim 0.0005\mu\text{m}$ 形状精度 $0.01\sim 0.005\mu\text{m}$
精密量块	轴承钢	超精密研磨	粗糙度 $Ra\ 0.01\sim 0.025\mu\text{m}$ 平行度 $0.05\sim 0.07\mu\text{m}$
集成电路	硅片 砷化镓	电子束加工 离子束加工	最小线宽（稳定实现） $\leq 0.1\mu\text{m}$

超精密研磨取得了巨大的发展，并在实际生产中得到了应用，解决了集成电路基片（硅、砷化镓）、高精度磁盘、VCR 磁头、光学平晶及超精密光学镜面等的加工问题，并且是一种能实现无加工变质层、无表面损伤（不破坏晶体的原子排列）的超精密加工方法。超精密研磨已经形成了一个规模宏大的技术群，达到最好的形状精度和最小的表面损伤。典型的代表有：化学机械研磨、弹性发射加工（EEM）、悬浮抛光、磁性流体研磨和磁性磨料研磨等。

3. 超精密特种加工

超精密特殊加工工艺涉及范围广，包括：电子束加工、激光束加工、电化学喷射加工、电火花加工、电化学加工、LIGA 技术（Lithographic Galvanofarming

Abformung) 和扫描隧道显微加工技术等^{[11][12]}。其中, 电子束和离子束加工实现了集成电路线宽小于 $0.1\mu\text{m}$; 电火花加工得到了尺寸为几十微米的零件; LIGA 技术可批量生产各种金属及其合金、陶瓷、玻璃等材料制成的高度达数百微米, 加工精度为 $0.1\mu\text{m}$ 的三维立体微结构; 扫描隧道显微加工可以用来进行单个原子的去除、添加和移动, 是目前所谓的最极限的加工技术的代表。

我国在精密和超精密加工方面的研究也取得了一些可喜的成绩。如国内已经能够制造高精度车床、磨床和铣床, 并对超精密磨削的一些相关技术, 如金刚石砂轮的设计与制造^[13]、超精密切削机理、超精密加工的测量技术和环境条件的控制^[14]、超精密机床的设计和制造等方面作了深入系统的研究^[15]。但从整体水平看, 与国外相比还有相当大的差距, 许多领域尚属空白, 大量设备和仪器需要进口, 同时, 超精密加工的尖端部分与宇航、军事、核能等国防工业密切相关。基于这些原因, 我国十分重视超精密加工技术的研究。在“八五”和“九五”规划中, 都将超精密加工的研究放在重要的地位。

1.2 硬脆材料精密超精密磨削技术的现状^[16]

目前, 超光滑表面超精密研抛加工技术、硬脆材料的塑性磨削技术、超光滑表面超精密磨削技术、纳米加工技术已成为超精密加工技术开发研究的热点。对于结构陶瓷、光学材料、硬质合金等硬脆材料来说, 精密超精密磨削技术是实现超精密加工的最佳有效手段, 世界上许多工业发达国家率先进行了这方面的研究工作。

1.2.1 超精密磨削机床

精密和超精密磨床是保证精密、超精密磨削精度的关键, 为此, 工业发达的国家首先将重点放在开发研制高精度的加工设备。英国 CUPE (Cranfield Unit Precision Engineering) 精密研究中心 1992 年开发的 Nanocenter600 超精密车床带有磨头和可延性磨削装置, 具有控制实际磨削深度达亚微米级的能力, 从而可进行光学和电光学元件的超精密磨削, 达到最好的形状精度和最小的表面损伤。1994 年 CUPE 设计制造了 OAGM2500 超精密磨床, 主要用于大型超精密镜面元件的加工与玻璃、陶瓷及其他硬脆材料光滑表面的磨削加工。1992 年, 在美国芝加哥国际制造技术展览会上, 日本日立精机公司展示了所开发的 VKC45 型陶瓷磨削中心, 不仅磨削精度和磨削效率很高, 而且自动化程度也很高, 该项技术的应用是对陶瓷加工的一个突破。日本的 Nippon Steel 研制的

DMUGE (Ductile Mode Ultraprecision Grinding Equipment) 超精密磨床, 实现了硅片等材料的超精密磨削。美国 North Carolina State University 的精密工程中心研制的 PEGASUS (Precision Engineering Grinding Apparatus for Superfinishing Ultrahard Surface) 小型超硬材料加工专用磨床, 接触刚度达 $53 \times 10^6 \text{ N}/\mu\text{m}$, 具有微进给系统及误差补偿装置, 不仅能用于基础试验研究, 也能实现结构陶瓷等硬脆材料磨削表面粗糙度达到纳米级的水平。

1.2.2 超精密磨削工具

美国 LLNL 国家实验室, 日本宫下研究室、难波研究室和理化研究所, 英国 CUPE 研究中心等先后开发出用于硬脆材料纳米级表面超精密磨削的陶瓷、树脂、青铜、铸铁基超微细粒度金刚石砂轮, 实现了表面粗糙度在 10nm 以下的超光滑表面磨削加工。日本微细粒度及超微细粒度金刚石砂轮的研究成果处于世界领先地位, 已研制出 #5, 000 ($1.5 \sim 3 \mu\text{m}$)、#8, 000 ($1 \sim 2 \mu\text{m}$)、#15, 000 ($0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$), 甚至 #300, 000 ($0.015 \mu\text{m}$) 等粒度号的树脂、金属结合剂金刚石砂轮。目前, 最具有代表性的新磨具是: 日本东京大学的庄司克雄研制的陶瓷结合剂微粉金刚石和立方氮化硼砂轮、日本宇都大学市田良夫研制的铜-锡、铜-钴-锡混合金属结合剂微粉金刚石和立方氮化硼砂轮、日本池野顺一用电泳沉积法制得 $10 \sim 20 \text{ nm}$ 超微细磨粒的钮状小砂片, 将其贴于基体上做成高浓度低结合剂超微细磨粒磨具、日本物理化学研究所研制的铸铁结合剂微粉金刚石和立方氮化硼砂轮等, 已对硬脆材料成功地加工出表面粗糙度 Ra 小于 10 nm 的光滑表面。

目前, 国外在磨削硬脆材料超光滑表面时使用微细金刚石砂轮已经非常普遍, 其磨料粒度尺寸为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 。日本的大森整博士也曾进行过 3000, 000#, 即 5nm 粒度金刚石砂轮超精密磨削结构陶瓷、光学玻璃的试验研究, 取得了比较理想的磨削效果, 磨削表面粗糙度 Ra 达 0.971 nm。美、英、德、法、韩、瑞士等国也已经采用了该项技术。

国内最近几年也展开了微细粒度金刚石工具开发的研究工作, 清华大学研制了树脂结合剂微粉金刚石砂轮并进行了相关的磨削研究工作, 河南荣阳金刚石砂轮厂, 苏州砂轮厂等单位先后开发出铸铁基超硬磨料微粉砂轮, 都已得到实际应用。

日本理化学研究所的大森整、东京大学的中川威雄于 1987 年开发了对铸铁纤维、铸铁结合剂超硬磨料砂轮进行在线电解修整 (ELID) 磨削的技术, 不

但成功地解决了铸铁基砂轮整形、修锐的难题，而且使得超微细金刚石、CBN磨料能够制成砂轮用于超精密镜面磨削。

1.3 在线电解修整（ELID）磨削技术的研究现状及特点

在线电解修整(ELID)精密镜面磨削技术具有效率高，精度高，表面质量好，加工装置简单及加工材料适应性广等特点。目前，ELID磨削技术在日本获得了广泛的应用。数十家大公司将它用于实际生产，加工材料包括各种黑色金属材料和非金属硬脆材料。应用行业涉及电子、机械、光学、仪表、汽车等许多领域。

1.3.1 ELID 磨削技术的原理

ELID (Electrolytic In-process Dressing) 磨削技术是一种新型的在线连续修整磨削的方法^[17,18,19]。ELID磨削系统的工作原理如图1-1所示，该系统包括：金属结合剂超硬磨料砂轮、电解修整电源、电解修整电极，电解液（兼作磨削液），接电电刷和机床设备。磨削过程中，砂轮通过接电电刷与电源正极相接，安装在机床上的修整电极与电源的负极相接，砂轮与电极之间浇注电解液^[20]。在ELID磨削过程中，由于砂轮为阳极，根据阳极反应，砂轮表面的铁离子电离，在砂轮表面形成绝缘氧化膜。该膜的厚度对电解过程中的导电率有直接的影响，由于在磨削中不断地对砂轮进行电解修整，使得绝缘氧化膜厚度不断地变薄又变厚，最终使得砂轮结合剂的表面基体不断地被电解，磨料不断露出，以保证金属结合剂超硬磨料砂轮在磨削过程中的锐利性^[21]。

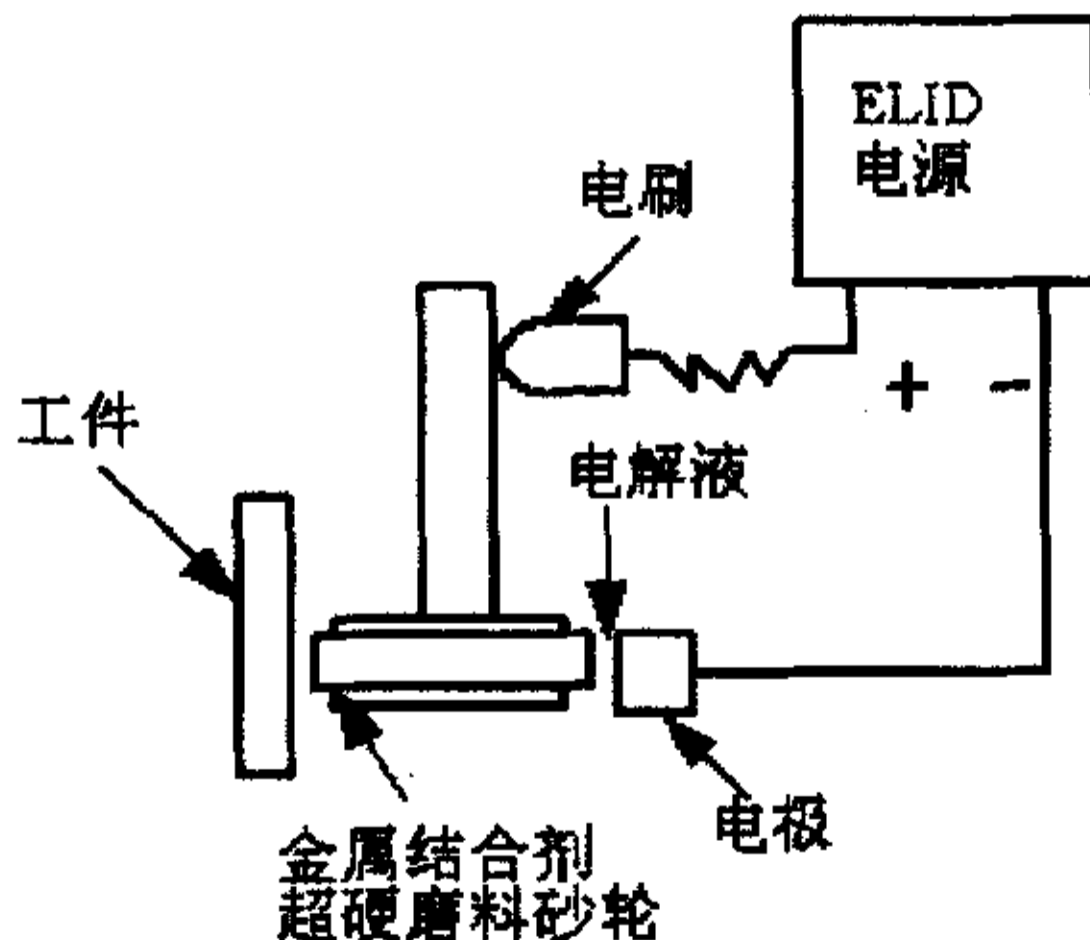
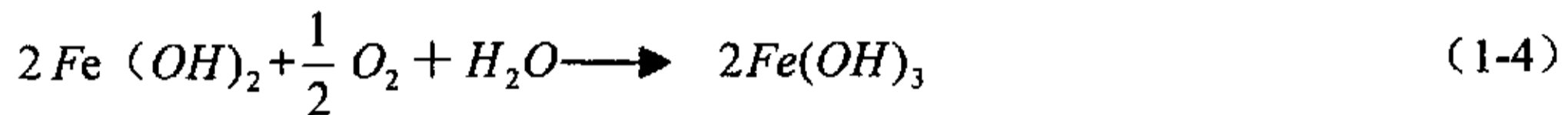


图 1-1 ELID 磨削系统的工作原理

电解时，在砂轮表面发生阳极反应，主要的化学反应方式如下：



再由上式产生的铁离子与氢氧根离子结合在阳极发生下列反应:



从(1-3)和(1-4)反应式中得知,铸铁基砂轮表面氧化膜的主要成分是氢氧化铁和氢氧化亚铁。ELID磨削的这些效应,创造了超微细粒度砂轮的稳定使用条件。目前,据资料介绍,ELID磨削使用的砂轮从2000[#]到3000000[#](磨粒粒径大约5nm)。这样微细的砂轮,可以实现超微量的去除,对于韧性金属材料和非金属硬脆材料都可以达到极低的表面粗糙度和极高的加工精度^[22]。

ELID磨削技术的电解修整系统决定磨削过程的特性和磨削质量。ELID磨削对所使用的电源、砂轮(确切地说,是砂轮结合剂),电解液提出了一些特殊的要求。

1. 砂轮^[23,24]

ELID磨削技术对砂轮的结合剂提出了两个限制条件,即:结合剂具有良好的导电性和电解性能;结合剂元素的氢氧化物或氧化物不导电,且不溶于水。ELID磨削技术发展初期,ELID磨削所采用的金属结合剂砂轮主要有铸铁纤维结合剂(CIFB)、铸铁结合剂(CIB)、铁结合剂(IB)、钴基结合剂(CB)、镍基(NB)及青铜结合剂(BB)等。结合剂的种类不同,在ELID磨削中的适应性、氧化膜的性质、磨削效率、磨削比及磨削表面的加工质量也不同。试验结果表明,CIFB/CIB金刚石、CBN(立方氮化硼)砂轮对ELID超精密镜面磨削的效果及稳定性较BB、CB、NB要好得多,而且砂轮的强度、硬度、稳定性、耐磨性、润滑性都要好,磨料的利用率、砂轮的使用寿命也提高了。

2. 电源^[25,26]

ELID磨削使用的电源,可以像普通电解加工一样,采用直流电源、各种波形的脉冲电源,或使用直流的脉冲电源。直流一脉冲电源最能充分发挥砂轮切削性能的控制效果。

3. 电解液^[27 28]

在 ELID 磨削过程中, 电解液将同时作为磨削液, 起到降低磨削区的温度、减小摩擦、冲刷磨屑的作用。另外, 为了防止机床的锈蚀, 还必须具备防锈功能。在 ELID 磨削过程中, 电解液一般采用水溶性磨削液, 而且其电解特性要求呈现钝化性。

1.3.2 ELID 磨削的研究现状及特点

在 ELID 磨削技术出现的短短几年里, 以其显著的特点在机械、电子、光学、核能、宇航、生物工程等领域中越来越被重视。ELID 磨削技术的发展在国外成功地带动了一批新产品、新设备的开发, 例如, 日本 Fuji Die Co.Ltd 生产的 ELID 磨削用的 CIFB/CIB—金刚石/CNB 等各种粒度砂轮供应市场, 新东工业株式会社生产的 ELID 专用直流、脉冲电源, 可以改变不同的输出功率、电流、电压, 为了推广 ELID 磨削技术, 日本 KURODA 公司、不二越株式会社还推出了系列 ELID 专用磨床。由于 ELID 磨削技术在日本的推广应用, 已经给几十家企业带来了一定的经济效益。目前主要用于磨具制造, 光学元件加工等行业, 富士公司采用 ELID 超精密镜面磨削的镜头, 镀膜后直接用在望远镜、幻灯机等产品上, 真正实现了光学镜头加工的以磨代研、代抛的工业革命。

除了日本外, 美国、英国、德国等发达国家已经在这方面开始着手研究。每年在日本举行的 ELID 磨削研讨会期间, 都会有新的 ELID 产品、新装置、新应用及新的研究报告和论文推出, 使 ELID 磨削技术应用的范围越来越广泛。

ELID 磨削电解修整装置结构简单, 不但可以在普通磨床上安装使用, 还可以在加工中心、车削中心、磨削中心上进行磨削或超精密镜面磨削。ELID 磨削具有以下特点^[29]:

1. 装置简单, 适合推广

ELID 磨削所用电解装置体积小, 结构简单, 适合安装于卧、立式主轴平面磨床上, 也适合安装于内、外圆万能磨床及切割、成型磨削设备上, 所采用的电源装置可以是直流、脉冲或直流脉冲电源。电解磨削液采用弱电解水质溶液, 对稀释水无特殊要求。电解液的组分、浓度可以根据砂轮结合剂的成分、工件材料及加工精度要求进行调整。电解磨削液对机床、工件无腐蚀作用, 适合在各类机床上推广使用。

2. 适应性强

由于铸铁结合剂砂轮在烧结时成功地解决了 900℃ 以上高温时金刚石的碳

化问题,目前已成功烧结了 $120^{\#}\sim 30,000,000^{\#}$ (粒径5nm)的铸铁纤维、铸铁结合剂金刚石砂轮,使得ELID磨削可以适应高效磨削、粗磨以及超精密镜面磨削(见表1-2)。粗磨和高效磨削多采用粒度 $80^{\#}\sim 3000^{\#}$ 的砂轮,采用 $4000^{\#}$ 以上的砂轮磨削可以得到超精密镜面加工表面。由于ELID超精密镜面磨削技术的出现,不但可以取代部分材料的传统磨削、抛光工艺,(如图表1-2所示),而且还可以克服传统研磨、抛光表面形状精度低的缺点。

表 1-2 ELID 磨削的适用范围

	高效率磨削	粗磨削	半精磨	镜面磨削
传统技术	← 普通磨削: 树脂、陶瓷、青铜结合剂			→ 研磨、抛光
ELID 磨削	← $120^{\#}\sim 325^{\#}$		→	
		←	$400^{\#}\sim 1200^{\#}$	→
			← $2000^{\#}$ $4000^{\#}$ 以上	→

3. 适应材料广泛

由于机械、电子、光学、核能、宇航、生物工程等领域中新材料的不断出现,特别是难加工、硬脆材料,要求加工精度高、粗糙度低,使得加工更为困难。由于ELID磨削采用CIFB/CIB结合剂金刚石砂轮、CBN砂轮,特别适合陶瓷材料、硬质合金、锆、铁氧体、砷化钾、单晶硅、蓝宝石、光学玻璃等硬脆材料的镜面磨削,CIFB/CIB结合剂CBN砂轮则适合不锈钢、磨具钢、轴承钢、弹簧钢及普通钢等金属的镜面磨削。

4. 磨削效率高、磨削力低

由于ELID磨削技术采用在线电解修整砂轮的方法,使得砂轮在磨削中始终保持锐利的状态,磨削效率高于同粒度的其他砂轮,同时法向磨削力只是普通磨削的 $\frac{1}{2}\sim\frac{1}{3}$,而且磨削力稳定,充分显示了其高效率磨削的特点。

1.4 本文的研究背景及主要研究内容

现行的球轴承套圈沟道的后加工工艺为:前期的沟道磨削与后期的沟道超精研。这种工艺的特点是工艺复杂、占用设备多。沟道超精研的工作原理决定了现行工艺不能适应非圆轴剖面沟道截形的套圈沟道的加工,进而决定了球轴承套圈沟道轴剖面截形设计不能超越圆形的限制,制约了轴承设计的发展和轴承性能的提高。因此有必要寻找一种能克服上述缺点的球轴承套圈沟道超精密加工的新工艺。经过查阅大量的资料与分析论证,拟采用ELID与微进给技术对现有精密卧轴平面磨床进行改装研制,探讨研究ELID技术用于轴承套圈沟道等

复杂表面的高效率超精密成形磨削的可行性。

本课题将研究工程陶瓷等硬脆材料的精密和超精密加工技术，研究成果不仅可用于轴承套圈沟道等复杂表面的高效率超精密成形磨削中，而且还可以被推广应用到许多民品的生产中，具有广阔的应用前景。本文拟解决的主要问题有：

1. 微进给工作平台是超精密磨削中的关键部分，然而国内对于微进给装置的研究大多集中在用于精密车削方面微进给伺服刀架，对于应用于精密磨削加工的微进给平台的研究很少。本文将密切结合 ELID 磨削的实际需要，设计一台微进给工作台。其中：

- (1) 比较目前常用的微进给机构实现方案，研究压电陶瓷作动器基本特征和弹性铰链的设计方法；
- (2) 利用有限元软件对弹性铰链的结构尺寸进行优化设计；
- (3) 进行微进给工作台的设计；
- (4) 对微进给工作台进行试验测试。

2. 铸铁结合剂金刚石砂轮在陶瓷等硬脆材料的加工中得到了越来越广泛的应用，但是其使用前的整形却比较困难。用常规的机械方法对铸铁结合剂金刚石砂轮进行整形时的效率很低，而整形工具的消耗却很快，整形效果不理想。为此，本文作者采用铸铁结合剂金刚石砂轮的电火花整形技术，利用工具电极和砂轮之间的电火花放电蚀除作用，对铸铁结合剂金刚石砂轮进行整形。其中：

- (1) 分析 ELID 磨削原理，建立电火花砂轮整形系统；
- (2) 选择电火花整形参数；
- (3) 进行电火花试验研究。

第二章 微进给工作台的设计及有限元分析

2.1 引言

在超精密磨削加工中,为实现砂轮或工件的精密、微小位移,进一步提高工件的进给分辨率,必须采用微进给系统。高精度的微进给系统是超精密加工中的关键部件,除了具有微量控制切削厚度功能,还可以用来进行机床导轨直线度和主轴回转误差的补偿及非对称表面的加工等。本章将着重在以下几个方面进行研究:

1. 比较微进给机构的实现方案;分析压电陶瓷微位移作动器的基本特性及弹性变形元件—弹性铰链的设计方法;并使用有限元的方法对其结构进行计算和验证;从而为弹性铰链的设计提供理论依据。
2. 设计一台以压电陶瓷作动器为驱动元件,弹性铰链为弹性变形元件,压电陶瓷微位移作动器推动弹性铰链产生弹性形变从而使动平台产生微量位移的磨削微进给工作台。利用有限单元法确定弹性铰链刚度和尺寸参数,使其既能产生足够的变形量,又能保证具有足够的弹性恢复力,达到设计行程要求。在设计过程中还将考虑预紧力的加载问题,以保证微进给工作台具有足够的刚度。
3. 通过试验方法对微进给工作台进行进一步的研究,进而验证微进给工作台的实际位移输出特性。

2.2 微进给机构实现方案比较

目前常见的微进给机构一般是利用弹性变形、直线电机、机械传动、电磁力和智能材料(压电陶瓷、电致伸缩、磁致伸缩)等实现微量进给。^[30]

1) 弹性式微进给机构

弹性式微进给机构由平行板弹簧、传动弹簧及外径千分尺组成,具有定位精度高,稳定性好的性能,可用于扫描隧道显微技术(STM),及需达到原子级分辨率的高精度测量技术。

2) 机械传动

利用机械传动方式实现直线微进给,常用的传动方式为“丝杠+螺母”。

该种传动具有直线位移量小，定位精度高，可产生较大轴向力等特点。丝杠和螺母相对运动有多种组合，可实现微进给的差动传动方式。

国内在数控机床和高精度、自动化的进给系统中，以及汽车、航空、轻工、食品等各种生产线中都广泛应用了丝杠螺母微进给机构，它也用于仪器和设备中的微量调节和精密测量装置。

3) 直线电机

直线电机的作用原理是以磁场与通电导体之间的相互作用为基础。直线电机具有任意调节行程，无限位移分辨率的特点。采用直线电机的进给驱动系统，快速进给可以达到 $76\text{m}/\text{min}$ ，进给加速度可达到 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 以上。

直线电机传动最突出的优点是响应快，可得到较高的瞬时加、减速度。其驱动的进给系统不需要用机械辅助的方法把旋转运动变为直线运动，因而简化了系统的结构，从而避免了由于中间环节的弹性变形、间隙、磨损和发热等因素带来的运动误差。直线电机存在的主要问题是成本较高；发热比较严重，控制系统比较复杂和隔磁防磁问题。

4) 电磁力

电磁驱动式微进给机构是以电磁力作驱动源，即将电磁能转换为机构能。电磁力驱动的微进给机构具有动作响应快的特点，但其结构较为复杂。电磁式微进给机构已应用于微小夹持器、微小机器人等。

5) 智能性材料

某些材料在外加电信号(电压或功率)的作用下会产生一定的变形，在变形的过程中对材料或结构施加作用。目前，用于实现微进给的材料主要有压电材料、电致伸缩材料、磁致伸缩材料和记忆合金。

a. 压电材料

压电材料是目前应用最广的智能材料，其最大的应变量可达 0.1% ，而且对温度不敏感。压电陶瓷可在电压控制下，获得较高的位移分辨率；同时由于其频率响应高，动态反应快、承载大、良好的机械静压力特性；结构简单及受外力干扰小；能够提供推动工件台微位移的力并保证足够的动刚度。

目前，压电材料技术以及电子技术的迅速发展，为实现超精密磨削开辟了新的途径。与传统的进给方法相比，基于压电陶瓷作动器的进给系统，利用压电陶瓷作动器作驱动元件，驱动弹性元件产生变形，从而产生微量进给。由于压电作动器的材料特性，具有非常高的步距分辨率，运动和定位精度，动态响

应速度，且体积小，控制灵活，性能稳定，无发热问题。通过闭环反馈控制误差补偿技术，很容易实现 $0.01\mu\text{m}$ 的分辨率。

b. 形状记忆合金 (SMA) 微进给机构

所谓形状记忆合金效应是指材料记忆它在高温相状态下的形状。即它在低温相状态下不管如何变形，只要加热到一定温度就会立刻恢复到原来的高温状态下的形状。具有这种效应的合金叫做形状记忆合金 (SMA)。SMA 的最大优点是其应变灵敏度很高 (高达 2%)，可导致原结构变形达 0.8%。其主要缺点是响应速度慢，难以用于动态控制。

c. 电致伸缩材料微进给机构

电致伸缩材料在电场作用下产生变形。用其实现微位移时，电致伸缩微位移器性能突出，具有施加电压低，位移量大，滞后小，重复性好，无老化等特点，引起人们的高度重视。电致伸缩材料微进给机构已广泛应用于光导纤维的定位、微型机械手、振动传输装置、计量设备和机构制造等领域。

d. 磁致电伸缩材料微进给机构

磁致电伸缩材料微进给机构具有结构简单，工作稳定的优点，但其磁场强度与磁致伸缩量之间不严格成线性，磁场作用下还伴有发热，故微动精度不高。

通过上面的讨论了解到，压电陶瓷微动机构与其他类型的微动机构相比，具有体积小、刚度大、位移分辨率及定位精度高、频率效应高、不发热、无噪声、易于控制等优点。综合所要设计微进给工作台的设计要求 (工作行程为 $10\mu\text{m}$ ，分辨率为 $0.1\mu\text{m}$)、经济性及工艺性等方面考虑，本文选用压电陶瓷作为驱动元件。

2.3 压电陶瓷的特性^[34,35]

压电陶瓷 (PZT) 是具有压电效应的陶瓷材料。也就是说在经过极化处理的陶瓷体上沿其极化方向施加一个机械力 (或释放压力) 时，陶瓷体就会产生充 (放) 电现象，这就是正压电效应，反之，若在陶瓷体上施加一个与极化方向相同 (或相反) 的电场，则会引起陶瓷片产生伸长 (或缩短) 的形变，被称为逆压电效应。

压电陶瓷在外电场作用下，应变与电场的关系可简化为：

$$S = d \cdot E + m \cdot E^2 \quad (2-1)$$

式中， S 为电场方向的应变值， d 为压电常数， m 为电致伸缩系数， E 为作用电场强度。

图 2-1 为中国电子科技集团公司第二十六研究所公司生产的 WTYD 型压电陶瓷作动器的结构示意图，该器件采用流延法独石电容工艺制作，在陶瓷片间涂敷高温金属电极浆料，并以此为结合剂和陶瓷片烧成一体，然后由每一层金属膜形成外电极，并联连接。具有该类结构陶瓷作动器的特点是陶瓷片可以做得极薄，从而降低驱动电压。此外，由于不使用粘结剂，可靠性高。其特性如下：

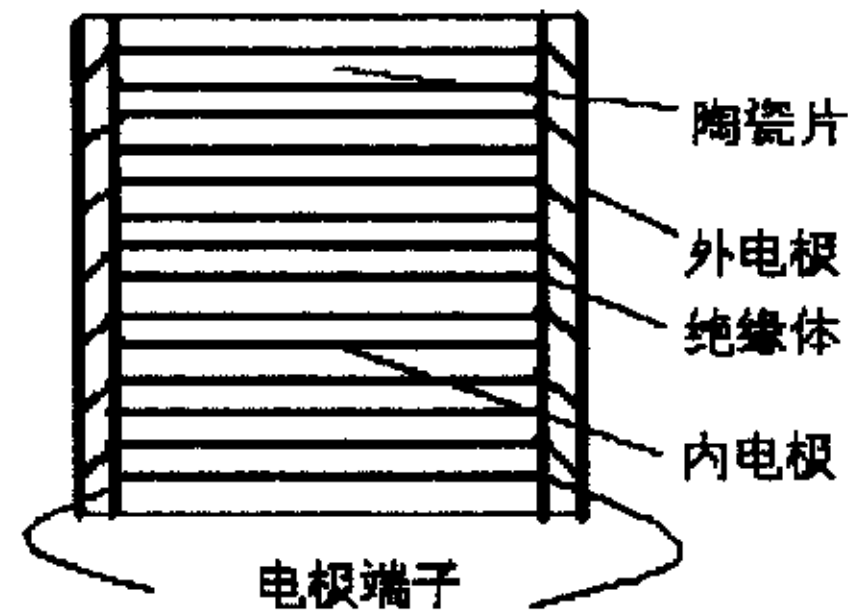


图 2-1 陶瓷作动器结构示意图

1) 迟滞现象

图 2-2 为压电陶瓷作动器的电压一位移曲线。由图可以看出：陶瓷作动器有迟滞 ΔS ，其升压曲线 1 和降压曲线 2 并不重合，而是存在一个滞后量，称之为迟滞现象。迟滞现象产生的原因是由于晶体在极化的过程中，电介质内部的晶粒间存在着内摩擦力，在施加电场后极化不能立即完成而存在一定的滞后。这给实际应用带来了不便。但是，该器件在确定的条件下又具有循迹特性，即在特定的条件下，单向升压或单向降压，子位移滞回曲线的方向总是转向母位

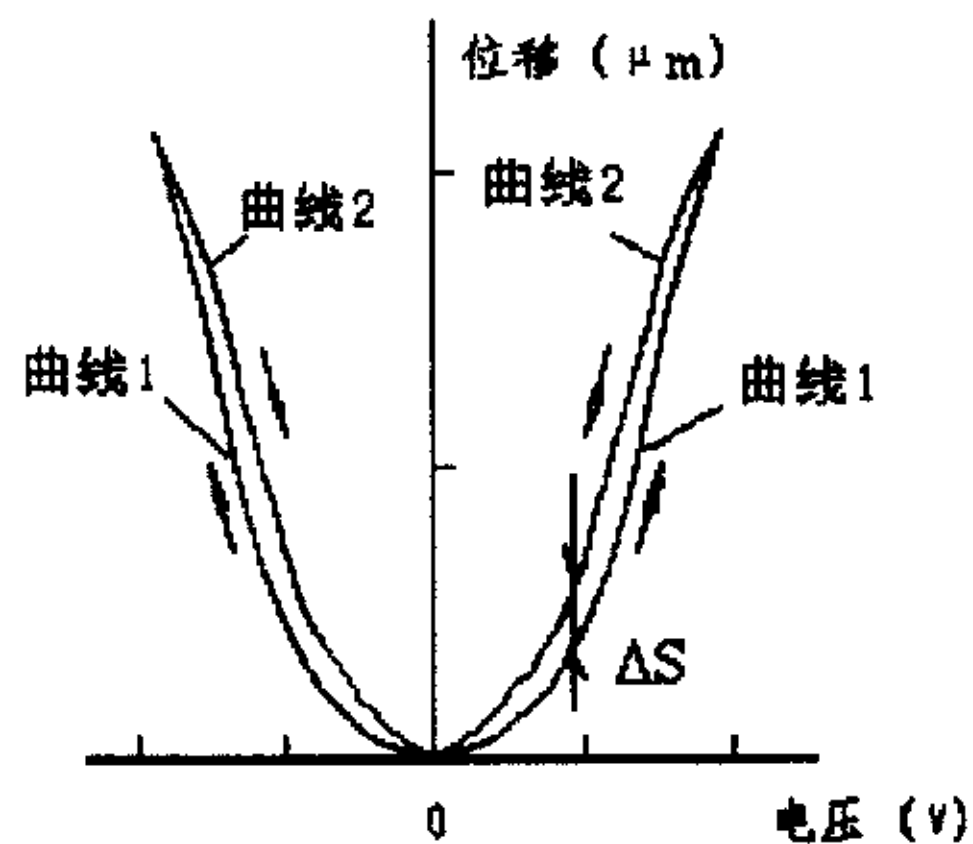


图 2-2 电压一位移特性曲线

移的滞回曲线。利用该特性，可以始终采用单向升压的方法实现双向位移精度的要求。

2) 蠕变（漂移）现象

蠕变是指在一定的电压下，位移达到稳定值后并不保持在这一固定值不变，而是随着时间的推迟产生漂移，如图 2-3 所示。

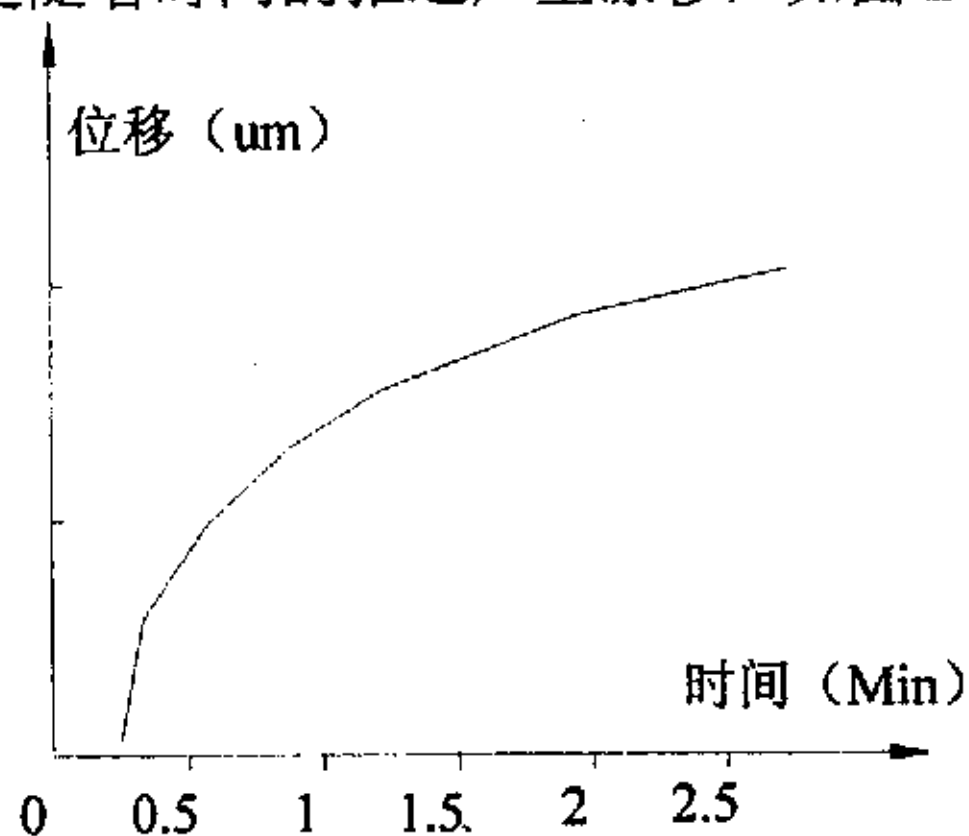


图 2-3 蠕变现象

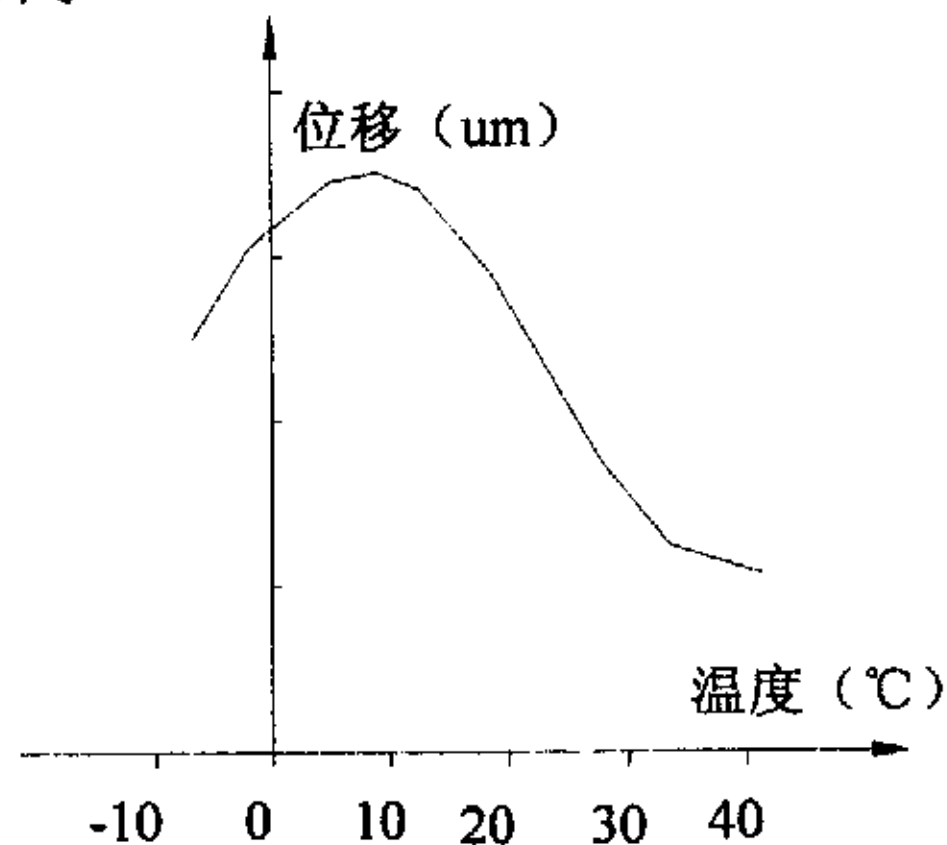


图 2-4 温度特性

3) 温度特性

在一定的电压下，压电陶瓷作动器伸长量随温度变化的关系曲线如图 2-4 所示。当温度低于 0 °C 或高于 20°C 时微位移作动器的伸长量明显减小。由于压电陶瓷作动器一般在 10°C ~ 20°C 之间使用，所以温度对其位移特性影响不大。

4) 压力特性

图 2-5 是压电陶瓷作动器的压力特性曲线。 ΔS 表示微位移器在一定压力作

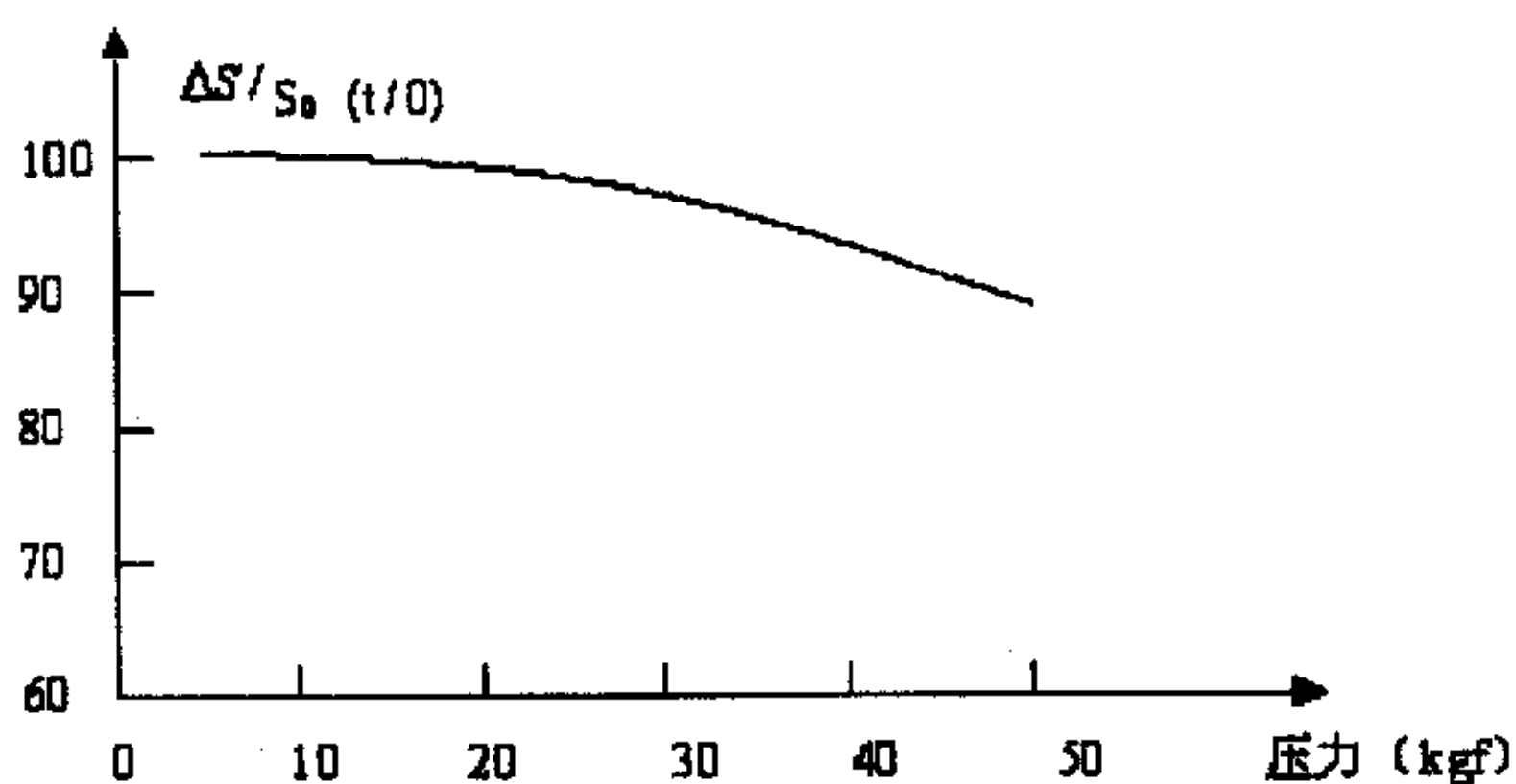


图 2-5 压力特性曲线

用下的伸长量, S_0 表示压电陶瓷作动器在空载时的伸长量。从图中可以看出, 压力小于 40Kgf 时, 对位移几乎没有影响。压力大于 40Kgf 时, 压力对位移的影响开始增大。因此, 实际应用时必须施加适合的预紧力。

5) 输出力特性

利用压电陶瓷作动器产生位移, 当其伸长受到限制时, 它就可以输出驱动力。输出驱动力的同时就会伴随着位移量的减少。以本文所采用的 WTYD 型压电陶瓷作动器为例, 图 2-6 为其位移与阻挡力的关系图, 直线 AB 以下是压电陶瓷作动器的工作范围。OA 轴为压电陶瓷作动器空载时的位移, A 点为达到输出位移的最大值 $40\mu\text{m}$, 但此时所输出的力为零。OB 轴为压电陶瓷作动器输出位移为零时的输出力, B 点为最大的输出力 3000N。

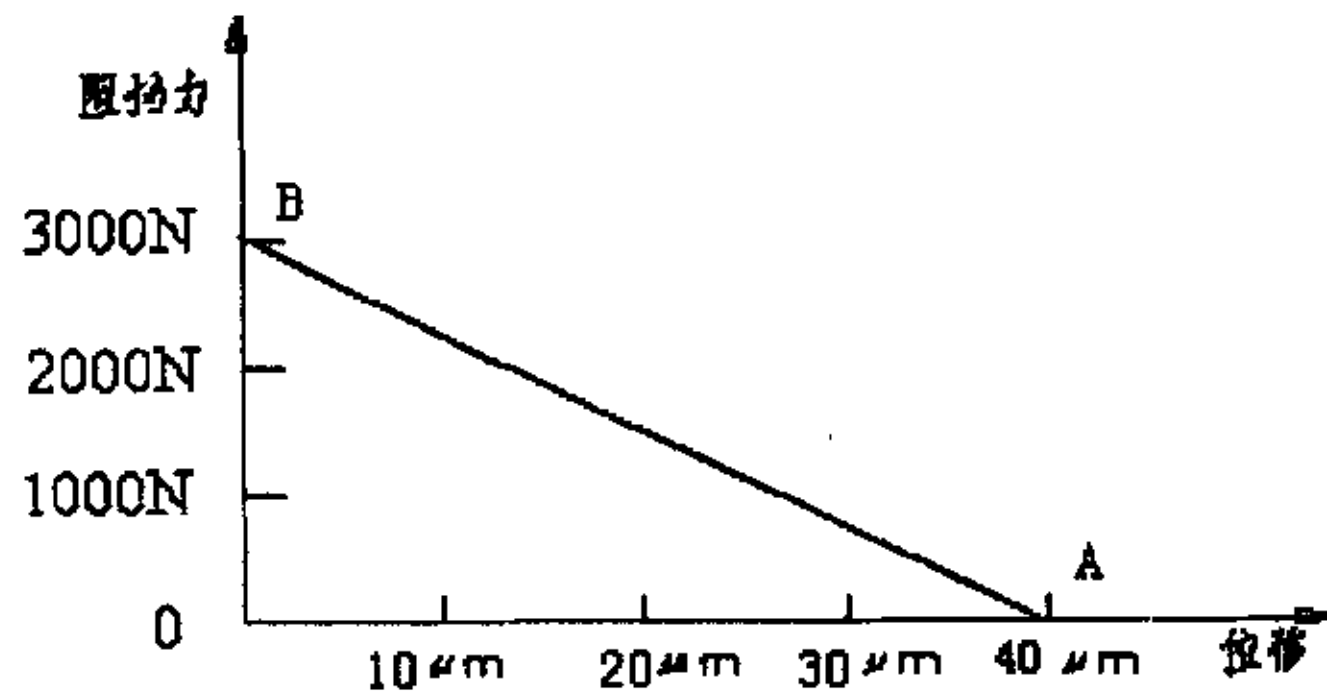


图 2-6 阻挡力—位移曲线图

6) 位移分辨率

压电陶瓷的输出位移分辨率是指其能够产生微量移动的最小值。理论上压电陶瓷作动器具有无限分辨率, 但是实际使用过程中, 压电陶瓷作动器的分辨率受到控制系统的噪声、环境的噪声以及控制系统精度等的影响。

压电陶瓷作动器的以上非线性特性给微进给机构的使用带来很多不利的影响, 必须采用一定的控制方法加以改善或消除。常用的方法有电压控制方法和电荷控制方法。电压控制方法可以分为开环软件补偿型和闭环反馈控制型。

2.4 弹性铰链的设计

实现磨削微进给平台机构的方案很多, 传统的设计大都采用平行弹簧导轨式结构。由于导轨间的摩擦, 采用弹簧导轨结构容易产生爬行现象, 因而产生失稳现象。弹性铰链是一种精密的既能支撑又能导向的微位移铰链。这种铰链采用一体的金属切割而成, 具有较高的位移分辨率和导向精度, 没有机械摩擦

和间隙、不需要润滑、不存在爬行现象，且结构紧凑，体积小，重量轻，易于加工装配。因此，弹性导轨在超精密定位中得到广泛应用。

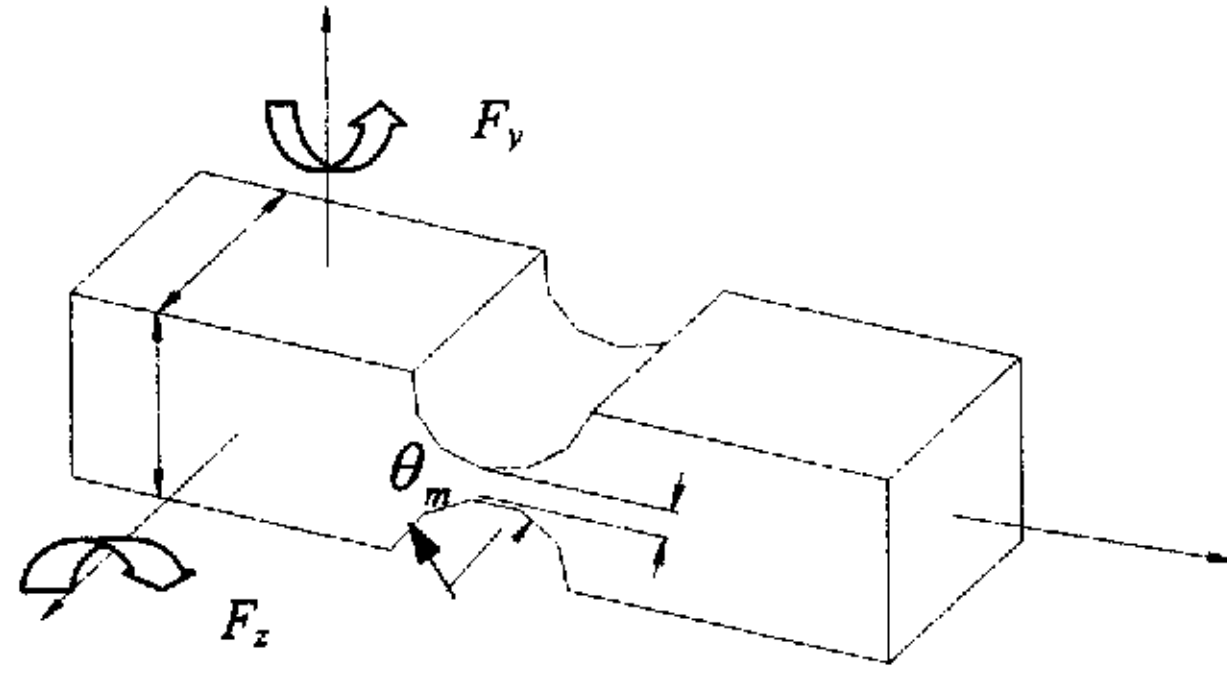


图 2-7 弹性铰链结构示意图

弹性铰链的设计需要参考以下的性能指标来确定尺寸参数：弯曲刚度、最大应力和应力分布等。由于弹性铰链的形状复杂，很难直接确定铰链的刚度和应力的计算公式。因此，本文提出两个基本模型假设：

1) 弹性铰链只在薄壁处发生弯曲变形，铰链的其他部份看作为刚体不产生变形。

2) 当施加 Y 向载荷时，只产生弯曲变形，无伸缩及其他变形。

弹性铰链结构参数如图 2-7 所示，受力后铰链的转角变形实际上是薄壁处弯曲变形累积的结果。

2.4.1. 弹性铰链结构设计方法^[36]

由图 2-7，根据材料力学的原理推出了铰链在力矩 M_z 作用下弹性铰链的角变形 a_z ，其柔度为

$$\frac{a_z}{M_z} = \frac{3}{2EbR^2} \left(\frac{1}{2\beta + \beta^2} \right) \left\{ \left[\frac{1+\beta}{\gamma^2} + \frac{3+2\beta+\beta^2}{\gamma(2\beta+\beta^2)} \right] \left[\sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2} \right] + \left[\frac{6(1+\beta)}{(2\beta+\beta^2)^{3/2}} \right] \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \times \frac{\gamma-\beta}{\sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2}} \right) \right] \right\} \quad (2-2)$$

式中, $\beta = \frac{t}{2R}$, $\gamma = \frac{h}{2R}$ 。

由于绝大多数弹性铰链, 铰链的最小厚度 t 远小于铰链的高度 h 和铰链半径

R , 即 $\beta = \left(\frac{t}{2R}\right) \ll 1$, $\beta = \left(\frac{t}{2R}\right) \ll \gamma = \left(\frac{h}{2R}\right)$, 这样可以简化上式为

$$\frac{a_z}{M_z} \approx \frac{9\pi}{2EbR^2(2\beta)^{5/2}} = \frac{9\pi R^{1/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (2-3)$$

从上式简化模型可以看出, 弹性铰链在弯矩作用下的柔度与铰链的高度 h 和参数 γ 无关, 主要原因是铰链的弯曲部分发生在铰链的中央薄壁处, 因此铰链半径的中心位置及铰链的高度就显得不重要了。

弹性铰链实际使用时, 一端固定在基座上, 另一端承受载荷发生弹性变形。当弹性铰链一端承受 Y 向载荷时, 铰链的角位移柔度可表示为:

$$\frac{a_z}{F_y} = R \sin \theta_m \left(\frac{a_z}{M_z} \right) = R \sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2} \left(\frac{a_z}{M_z} \right) \quad (2-4)$$

该式同样可以简化为:

$$\frac{a_z}{F_y} \approx \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \frac{9\pi R^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (2-5)$$

如果弹性铰链设计满足铰链的直径与铰链的最小厚度之和等于铰链的高度时 (满足 $h = 2R + t$ 即 $\gamma = 1 + \beta$, Right Circular Hinge), 在这种情况下, 由于

$\beta \ll 1, \gamma \approx 1$, (2-5) 式简化为:

$$\frac{a_z}{F_y} \approx \frac{9\pi R^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (2-6)$$

由以上分析可得铰链在弯矩 M_z 或载荷力 F_y 作用下半径端处产生的变形

Δy , 其变形柔度可表示为:

$$\frac{\Delta y}{M_z} = R \sin \theta \left(\frac{a_z}{M_z} \right) \quad (2-7)$$

式中, a_z/M_z 由式 (2-3) 给出, 由上式与式 (2-4) 可以看出弹性铰链在 F_y 作

用下的角变形是相同的。对于满足 $h = 2R + t$ 即 $\gamma = 1 + \beta$ 条件的弹性铰链，上式可简化为：

$$\frac{\Delta y}{M_z} \approx \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \left(\frac{9\pi R^{3/2}}{2Eb t^{5/2}} \right) \quad (2-8)$$

由于施加载荷力 F_y 不是对称作用在铰链上的，所以弹性铰链在载荷力作用下的微变形 Δy 的表达式可以用下式表示：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y}{F_y} = R^2 \sin^2 \left(\frac{\alpha_z}{M_z} \right) - \frac{3}{zEb} & \left\{ \left[\frac{1+\beta}{(1+\beta - \cos \theta_m)} - \frac{2+(1+\beta)^2}{(1+\beta - \cos \theta_m)} \right] \sin \theta_m \right. \\ & \left. + \left[\frac{4(1+\beta)}{\sqrt{2\beta + \beta^2}} \frac{2(1+\beta)}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \right] \times \tan^{-1} \sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \tan \frac{\theta_m}{2} - 2\theta_m \right\} \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中， α_z/M_z 由式 (2-3) 给出， θ_m 由下式得到

$$\theta_m = 2 \tan^{-1} \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \quad (2-10)$$

通过简化假设模型 $\left(\frac{\beta}{\gamma} \ll 1 \right)$ ，式 (2-9) 可以简化为以下形式

$$\frac{\Delta y}{F_y} \approx \frac{9\pi}{2Eb} \left(\frac{R}{t} \right)^{5/2} \quad (2-11)$$

上式为满足 $h = 2R + t$ ，即 $\gamma = 1 + \beta$ 条件下弹性铰链变形柔度公式，其刚度表达式为

$$K = \frac{1}{\frac{\Delta y}{F_y}} \approx \frac{2Eb}{9\pi} \left(\frac{t}{R} \right)^{5/2} \quad (2-12)$$

由式 (2-12) 可以看出弹性铰链的刚度受到 b 、 t 及 R 的影响，弹性铰链的刚度和弹性铰链的宽度 b 成正比，即随着铰链的宽度的增加而增加；与 $\left(\frac{t}{R} \right)^{5/2}$ 成

正比, 即随着 t 的增加而增加, 随着 R 的增加而减小。

2.4.2. 弹性铰链静力特性有限元分析

上面讨论了利用高等材料力学原理推导出的弹性铰链变形刚度计算公式, 由于推导过程中采用了简化模型, 并且理论模型中运用了两个假设, 所以必须利用有限元法进行刚度校核及应力分析以验证上述推导公式的正确性, 并确定弹性铰链是否具有足够的强度承受压电陶瓷作动器的驱动力及磨削力的作用, 是否具有足够的弹性以产生变形, 到达设计应用的目的。

有限元法是随着计算机的发展而发展起来的一种以结构矩阵分析为理论基础、使用有效的数值分析方法, 但有限元自身亦有运算量大、时效性低等缺陷, 高速计算机的出现使有限元方法得到了广泛的应用。有限元法作为一种离散化的数值解法, 已经成为应用数学的一个新分支, 并广泛应用于结构应力分析、热传导、电磁场、流体力学等连续问题。与之相对应, 国际市场上推出了多种有限元分析软件, ANSYS 为其中一个出色的产品。

ANSYS 作为一个功能强大、灵活的设计分析及优化软件包, 可对多种物理场进行分析计算, 并具有多物理场耦合的功能, 即允许在同一模型上进行多种耦合计算。利用 ANSYS 软件, 可以构造结构、产品、零部件或系统的计算机模型, 通过对其施加载荷或其它设计条件研究其性能。在设计过程初期, 可利用该程序进行优化设计, 以降低生产成本, 缩短多样机制造—测试—再制造的研究周期, 同时也避免了使用昂贵的产品余量设计。因此, 在概念设计阶段使用有限元分析最为有效。

现对具有以下不同结构参数的弹性铰链进行有限元分析, 并与由式 (2-12) 所获得的结果进行分析, 以确定它们的正确性。取弹性铰链的结构参数如下:

铰链总长: 30 mm

铰链半径 R : $5\sim 6\text{ mm}$

铰链宽度 b : 10 mm

铰链中心最小厚度 t : $0.5\sim 1.5\text{ mm}$

铰链弹性模量 E : 200 GPa

铰链承载 F_y : 10 N

在分析中采用 SOLID73 单元进行弹性铰链的单元划分, SOLID73 单元是一

个具有 6 个自由度的三角形单元结构(三个平动自由度: D_x , D_y , D_z , 和三个转动自由度: ROT_x , ROT_y , ROT_z), 为适应应力分析的需要, 在铰链中心薄壁处细化单元, 增加计算节点, 以精确得到薄壁处的应力结果。图 2-8 为铰链的单元划分结果示意图。

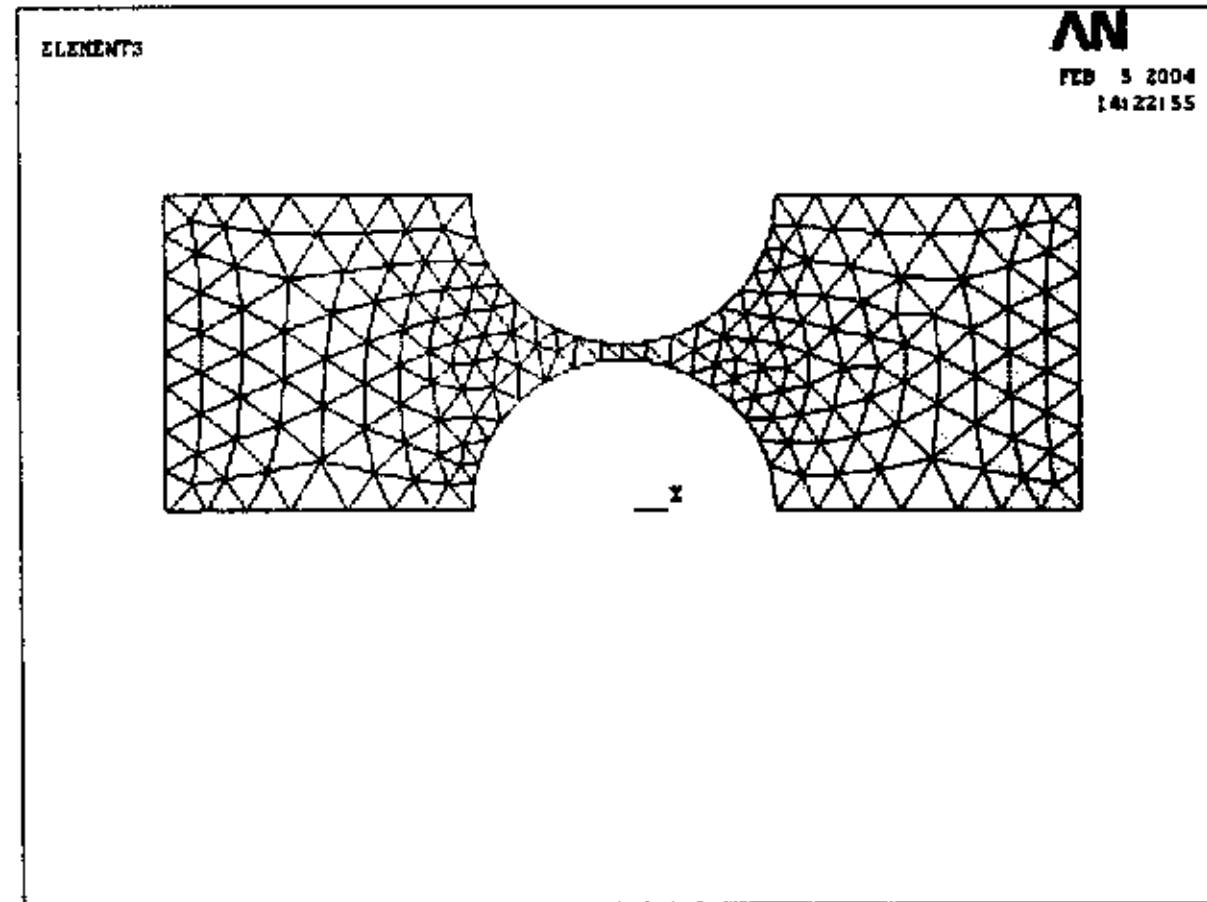


图 2-8 铰链的单元划分结果示意图

计算中, 弹性铰链的约束条件为一端固定的结构, 在弹性铰链的另一端上表面中心处施加大小为 10N 的 Y 向力 F_y , 图 2-9 给出弹性铰链加载及约束示意图。

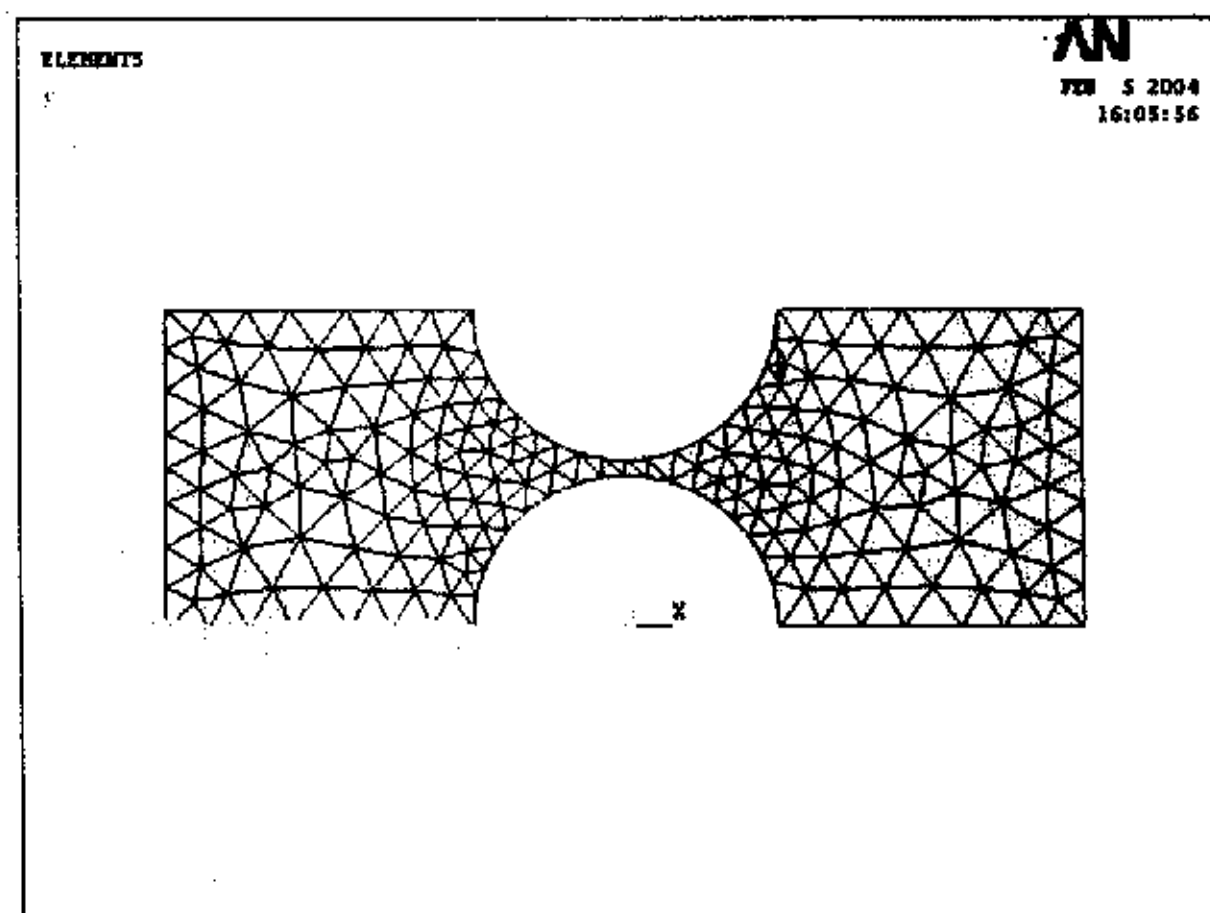


图 2-9 弹性铰链加载及约束示意图

针对上面设计, 采用 ANSYS 软件中的静力学分析功能模块研究其静态刚度, 该模块可用来解决外载荷引起的变形和应力, 通过把数值问题用到相同的

传统工程概念上来解决静力分析问题。其中，静力分析控制方程如下

$$\{K\}\{U\}=\{F\} \quad (2-13)$$

式中， $\{F\}$ ——为结构刚度矩阵，

$\{U\}$ ——为节点位移向量，

$\{K\}$ ——为作用于模型的力向量。

ANSYS 有限元处理包括三个阶段：前处理、求解及后处理。

前处理用于定义求解所需的数据，选择坐标系统和单元类型、定义实常数和材料特性、建立实体模型并对其进行网格划分、控制结点和单元、以及约束方程等。

利用 ANSYS 软件分析上述铰链在加载状况下的刚度及利用公式 (2-12) 计算所得的刚度比较如图 2-10 所示。

图 2-10 (1) $R=5$, t 分别为 0.5, 1, 1.5mm 时的结果比较

图 2-10 (2) $R=6$, t 分别为 0.5, 1, 1.5mm 时的结果比较

曲线 1: ANSYS 计算结果

曲线 2: 公式计算结果

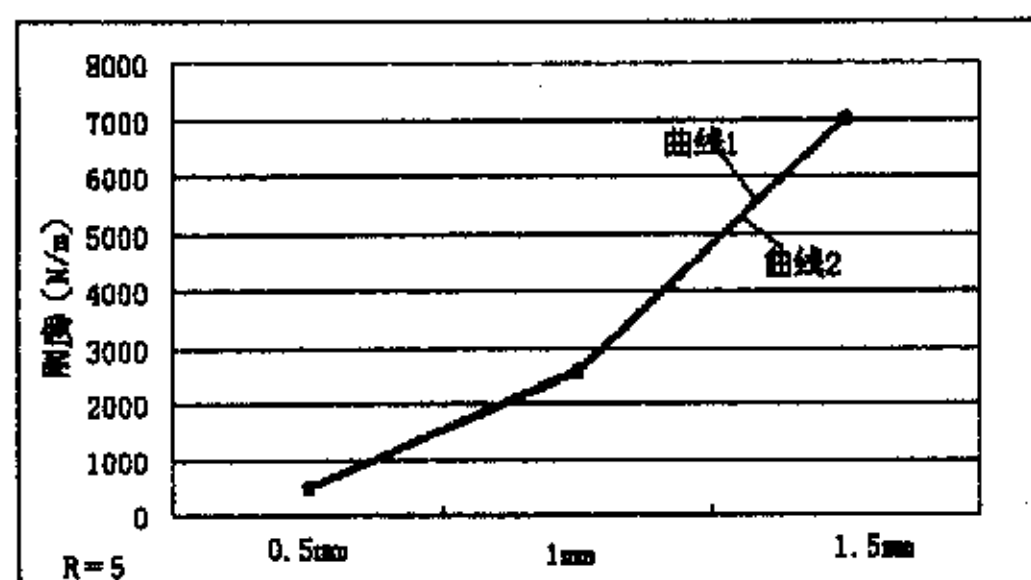


图 2-10 (1)

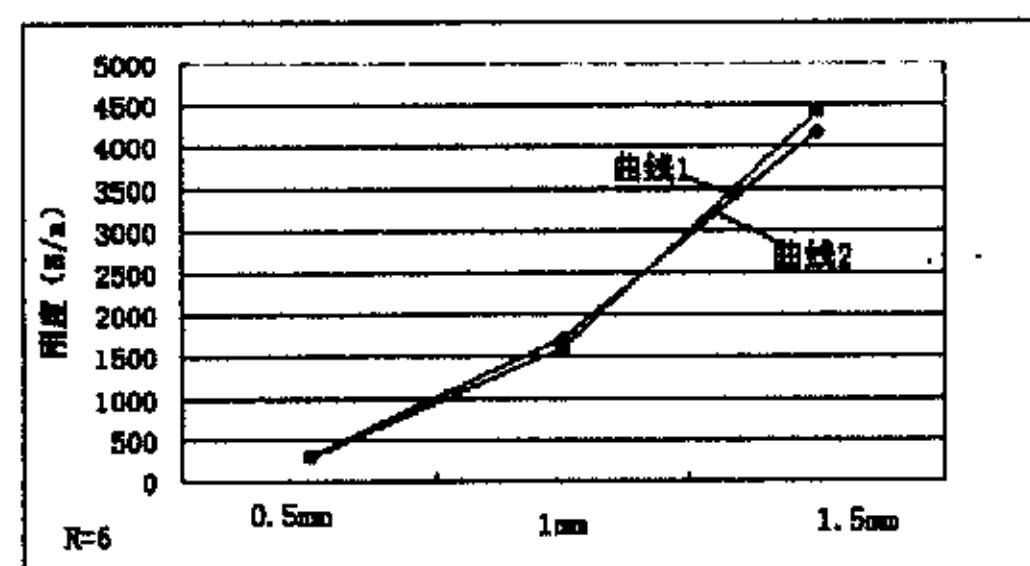


图 2-10 (2)

图 2-10 弹性铰链刚度的 ANSYS 软件及公式 (2-12) 计算结果比较图

图中可以看出，ANSYS 软件和公式的刚度计算结果大致吻合，由此可以证明推导公式的正确性，同时也证明了有限元计算弹性铰链的可行性和正确性。从而为微进给平台设计中作动器件和弹性变形元件的选择和设计提供了理论依据。

2.5 微进给工作台的设计及有限元分析

本节在上一节所介绍内容的基础上，利用有限元方法确定弹性铰链的刚度和尺寸参数，并对微进给工作台的整体进行应力和变形分析。

设计微进给平台时需要考虑工作台的位移输出精度、位移行程范围、结构刚度及结构工艺性等几方面因素。考虑到压电陶瓷的特性和微进给工作台的使用条件，在设计时，还要考虑预紧力的大小和加载方法、弯曲应力的限制和密封等因素。

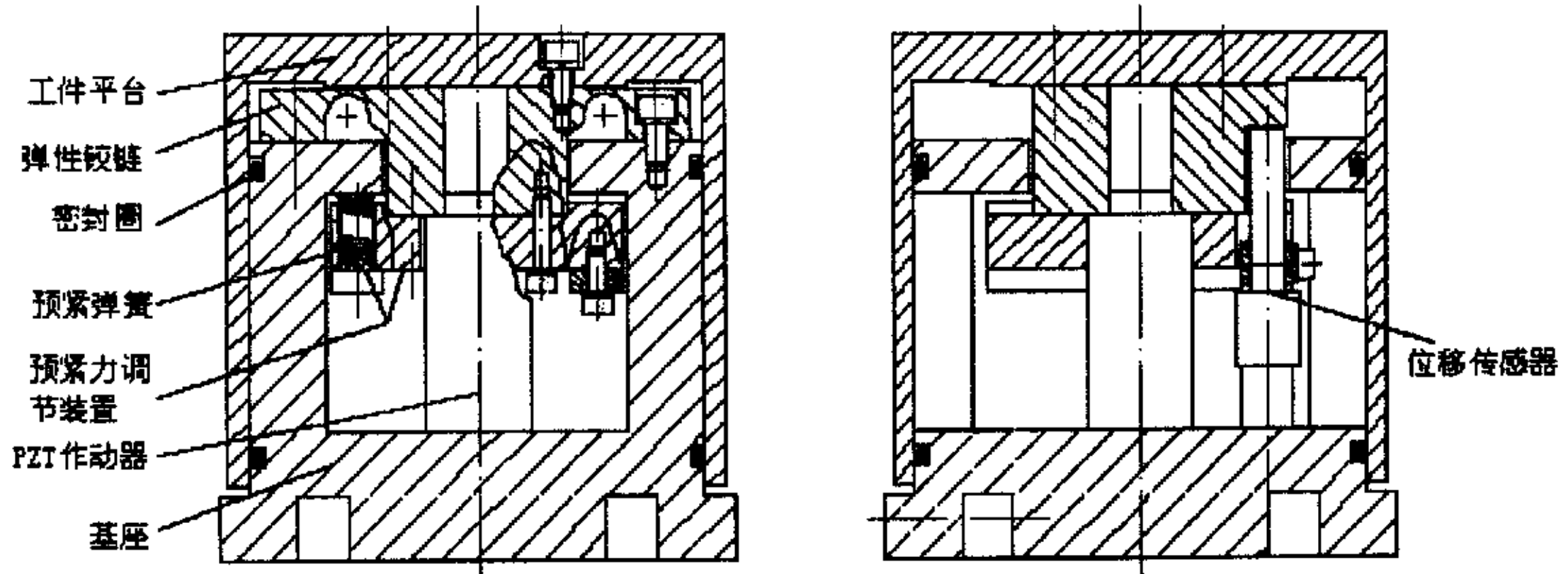


图 2-11 微进给工作台结构示意图

微进给工作台的结构如图 2-11 所示，该工作台由压电陶瓷作动器、弹性铰链、位移传感器、底座、预紧弹簧等部件组成。动平台和弹性铰链采用整体弹簧钢（65Mn）线切割而成，以保证平台结构的对称性，避免由于装配而产生误差，进而提高微进给平台的精度。预紧机构是由四个特制的弹簧组成，通过预紧力的调节装置调节施加于压电陶瓷作动器上预紧力的大小。适当的预紧力可以消除动平台与作动器之间的间隙，提高接触刚度和响应速度，进而提高微进给平台的分辨率，一定程度上改善输出位移的非线性。为了保证微进给平台的接触刚度，使作动器与弹性铰链通过柱面连接，从而保证了作动器与弹性铰链之间的连接刚度。动力源由装在微进给平台中心下侧的压电陶瓷作动器提供。压电陶瓷作动器采用中国电子科技集团公司第二十六研究所的 WTYD 型压电陶瓷微位移器，其基本参数见表 2-1。检测动平台实际输出位移的精密电容传感器安装在弹性铰链的下侧，用于测量弹性铰链的位移，其基本参数参见表 2-2。

表 2-1 所选用 WTYD 型压电微陶瓷作动器的技术参数

型号	驱动电压 (V _{DC})	最大位移 量 (μm)	回零位 移 (μm)	最大推力 (N)	拉力 (N)	尺寸 (mm)
WTYD 型	-250~ +250	≥40	≤0.05	3000	50	15×13×45 φ 25×45

表 2-2 电容传感器的技术参数

型号	JDC-2000
测量范围 (μm)	± 50
线性度	0.8%
分辨率	0.01
测头有效直径	$\Phi 3$

该工作台主体采用圆形结构, 以便于密封, 从而可以保护微进给平台的内部器件。

微进给工作台为精密辅助工作台, 实际应用时, 将被固定在磨床工作台上。其主要工作原理为: 由微机控制 D/A 数模转换器输出 $-5\sim 5V$, 分辨率 2.44mV 的控制直流电压, 经电压放大器产生 $-250\sim 250V$ 驱动电压, 直接作用于压电陶瓷作动器。根据压电效应, 压电陶瓷作动器将随着驱动电压的变化, 产生相应的伸缩运动和推力, 进而推动弹性铰链, 从而推动工件平台沿垂直方向上下运动。高精度电容位移传感器被安装于工作平台的底部, 用于在线测量动平台的绝对位移。

2.5.1 对弹性铰链所施加预紧力分析

微进给平台的每一组成元件的制造精度有限, 装配后各接触面之间会产生接触不紧密的现象。若不对其进行预紧, 压电伸缩陶瓷作动器的最大位移也不能够补偿其间隙, 同时陶瓷作动器本身为叠堆结构, 预紧力对其本身特性具有改善作用。

(1) 预紧力对机构刚度和频响的影响

组成压电微位移机构的各元件间的接触面之间存在着表面粗糙度和形状误差。因此必须经过精磨加工以减小表面粗糙度和形状误差。假设加工后, 接触面间只有表面粗糙度误差, 其物理模型如图 2-12 所示。

$$\text{其表面接触变形 } \delta \text{ 与压强 } q \text{ 的关系为: } \delta = \frac{q^n}{k^n n^n} \quad (2-14)$$

式中: K ——单位面积上的接触刚度
 n ——常数

因为 q 与压力 P 及接触面积 S 之间满足

$$q = \frac{P}{S}$$

$$\text{则} \quad K \cdot S = \frac{P}{n} \sqrt{\delta} \quad (2-15)$$

式中， $K \cdot S$ 为接触刚度，可见刚度与压力 P 成正比关系。

压电陶瓷微位移机构，理论上可以将其抽象为单自由度的弹性阻尼系统，其振动圆频率为：

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \frac{C^2}{4MK}} \quad (2-16)$$

式中： C ——系统阻尼

K ——系统等效刚度

M ——系统等效质量

ω_n ——系统无阻尼固有频率

由此可见，随着预紧力的增大，各接触面的间隙减小，机构的接触刚度增大，机构的频率特性得到改善。

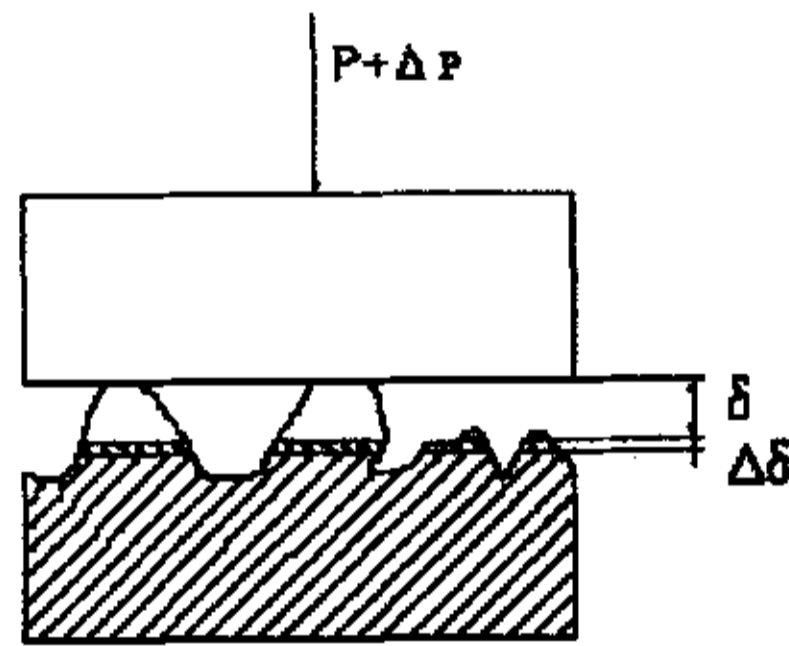


图 2-12 接触表面的物理模型

(2) . 预紧力对系统分辨率的影响

分辨率是机构能够发生微量位移的最小量值。对于机电控制系统来说，系统的分辨率是指控制量变化为最小量值时执行机构的变化量。其值为：

$$f = \frac{S}{2^n} \quad (2-17)$$

式中： f ——系统分辨率 ($\mu\text{m}/\text{bit}$)

S ——执行机构最大位移量 (μm)

n ——控制系统精度 (bit)

由上式可以看出,系统分辨率与系统的作大位移量成正比关系。压电陶瓷作动器的位移量随着载荷的增加而减小。当预紧力增大时,随着陶瓷作动器位移量的减小,系统的输出位移量减小,系统的最小分辨率单位值随之减小。由此看出,增大预紧力,减小微进给系统的最大位移量,在不提高控制系统精度的情况下,可以提高微进给系统的分辨率。

2.5.2 弹性铰链的有限元设计及参数的确定

从以上的分析可以得出,增大微进给系统的预紧力可以使系统的刚度、频响及分辨率得到提高,但带来的负面影响是减小了微进给系统的工作行程。因此,应根据实际情况在不超过压电陶瓷作动器的设计载荷和不减小设计工作行程的条件下,施加尽可能大的预紧力。弹性铰链的尺寸参数直接影响整个平台的预紧力大小,因此弹性铰链的设计至关重要。对弹性铰链的要求是刚度不能太小,刚度太小会使预紧力减小从而降低接触刚度和动平台的固有频率,并且动平台在运动过程中也会产生过冲现象,降低微进给平台的定位和加工精度;但也不能太大,刚度太大会使PZT作动器的装配非常困难,并且PZT作动器属于弹性元件,弹性铰链的刚度太大也会使微进给平台的实际输出位移减小,影响微进给平台的加工范围,因此需要选取合理的结构参数,使微进给平台既有足够的刚度又有足够的加工范围。

利用有限元软件ANSYS建立微进给平台的弹性铰链分析模型如图2-13所示。弹性铰链的加载如图2-14所示。然后用ANSYS软件对弹性铰链进行设计得到合适的结构参数。

在分析中采用SOLID92单元进行弹性铰链的单元划分。此单元为三维10节点的四面体单元,每个节点具有三个自由度:沿X、Y、Z方向的平动自由度。定义单元的材料特性为:弹性模量: $200 \times 10^9 \text{Pa}$,泊松比:0.27,密度: $7.8 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$ 。为了提高分析的精度,在弹性变形大的地方对网格进行细化。

计算时,在弹性铰链两端施加固定端约束,并且在弹性铰链与微位移作动器相接触的环形区域上,施加100N的力,此力即为微进给平台预紧力的大小。有限元的模型建立和加载完成之后,就可以进入求解过程。进行求解后,可以得到模型的变形图2-15和模型的应力图2-16。由计算结果可以看出动平台的垂直位移为 $2 \mu\text{m}$,弹性铰链处的最大应力为8Mpa,远远小于弹簧钢的许用应力。

根据公式 $K_e = \frac{F}{l}$ 可以求出平台弹性铰链的等效刚度。

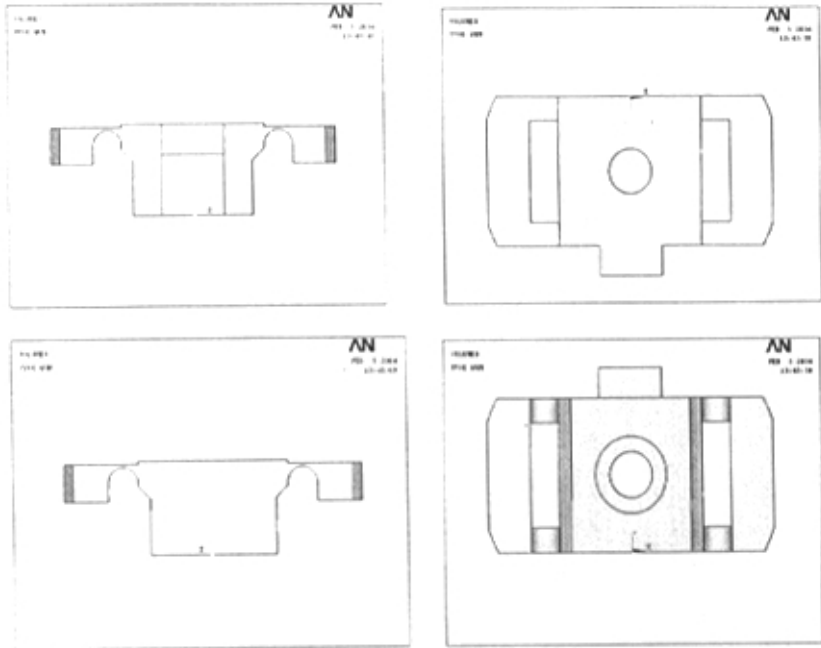


图 2-13 弹性铰链的模型图

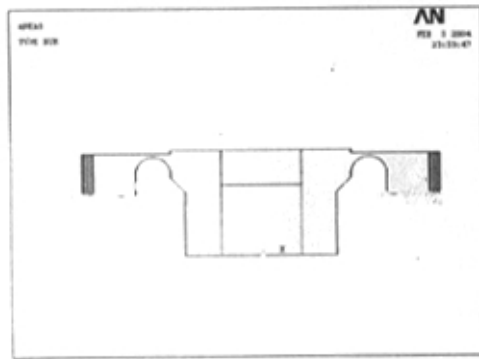


图 2-14 弹性铰链的约束及加载示意图

为了确定弹性铰链在微位移作动器的最大位移时的应力状态，需要计算平台在最大位移输出时所受的驱动力。首先要确定平台的最大输出位移。可由式(2-18)求出：

$$l_{\max} = \frac{K_e}{K_e + K_{pzt}} l_{pzt \max} \quad (2-18)$$

式中, l_{\max} 为动平台的最大输出位移

$l_{pzt \max}$ 为微位移作动器的最大名义伸长量

K_e 为弹性铰链的等效刚度

K_{pzt} 压电陶瓷作动器的刚度

由式 (2-19) 可求出最大位移时弹性铰链所受的最大驱动力。

$$F_{\max} = 100 + K_e l_{\max} \quad (2-19)$$

由于所选择的 WTYD 型微位移作动器, 其最大推动力为 3000N, 最大变形为 40 μm , 因此:

$$K_{pzt} = \frac{3000}{40} = 75 \text{ N} / \mu\text{m}$$

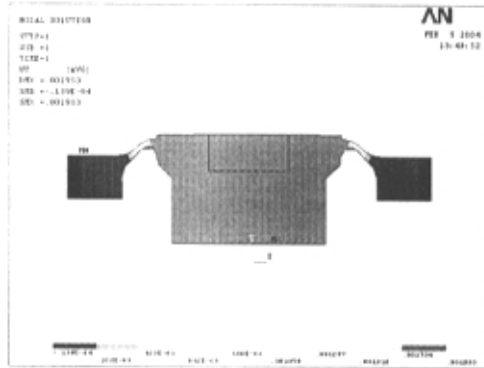


图 2-15 弹性铰链的变形图

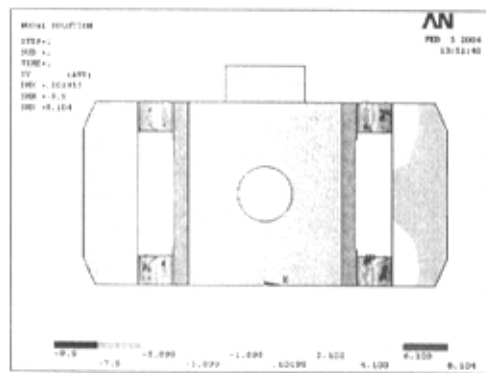


图 2-16 弹性铰链的应力分布图

$$l_{pzt \max} = 40 \mu\text{m}$$

$$Ke = \frac{100}{2} = 50 \text{ N} / \mu\text{m}$$

$$l_{\max} = 16 \mu\text{m}$$

由式 (2-18) 得: $l_{\max} = 16 \mu\text{m}$ 满足行程为 $10 \mu\text{m}$ 的设计要求。

当 $l_{\max} = 10 \mu\text{m}$ 时, 由式 (2-19) 得: $F_{\max} = 100 + 50 \times 10 = 600 \text{ N} < 3000 \text{ N}$, 满足设计要求。

将此最大驱动力作用于动平台进行有限元计算, 可以得出动平台在最大输出位移时弹性铰链的应力应变状态。并可验证其最大的应力是否小于材料的许用应力。

当在弹性铰链下方与微位移相接触的区域上施加 600 N 的载荷, 运用上述的方法通过对不同参数的弹性铰链进行有限元分析对比, 计算所得弹性铰链的应力分布如图 2-17 所示。最大应力约为 49 Mpa , 远远小于弹簧钢的许用应力, 满足设计要求。

因此最终获得的弹性铰链的合理参数如图 2-18 所示。

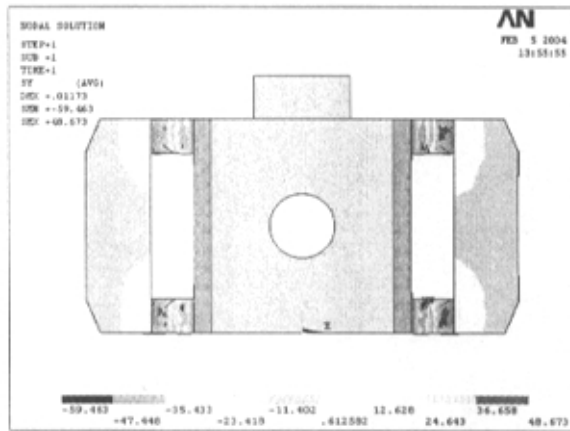


图 2-17 弹性铰链的应力分布图

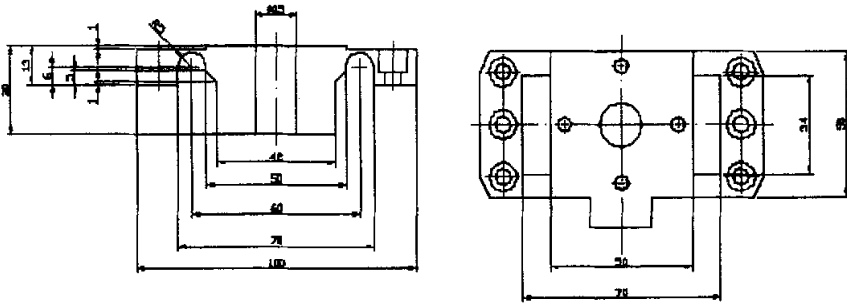


图 2-18 弹性铰链的参数示意图

2.6 微进给平台位移特性的试验研究

2.6.1 试验目的、仪器和方法

试验目的：测试微进给平台在不同电压驱动下微进给工作台的实际位移。

试验仪器：微进给工作台、ORTHOTEST 测试仪

试验方法：将动平台上边长为 35mm 的正方形周长上的 8 等分点作为测试点，如图 2-19 所示。将微进给工作台平放在 ORTHOTEST 测试仪上，然后在位移驱动器上分别加载 50V, 100V, 150V, 200V, 250V 电压，依次测量 8 个点的位移。

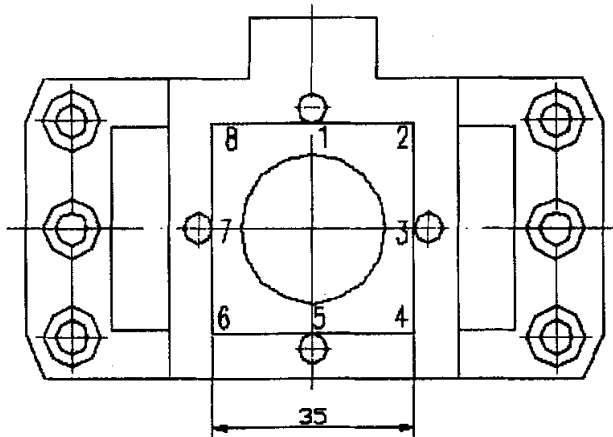


图 2-19 微进给工作台测试点分布图

2.6.2 试验结果及分析

微进给工作台的位移与驱动电压的关系图如 2-20 所示。

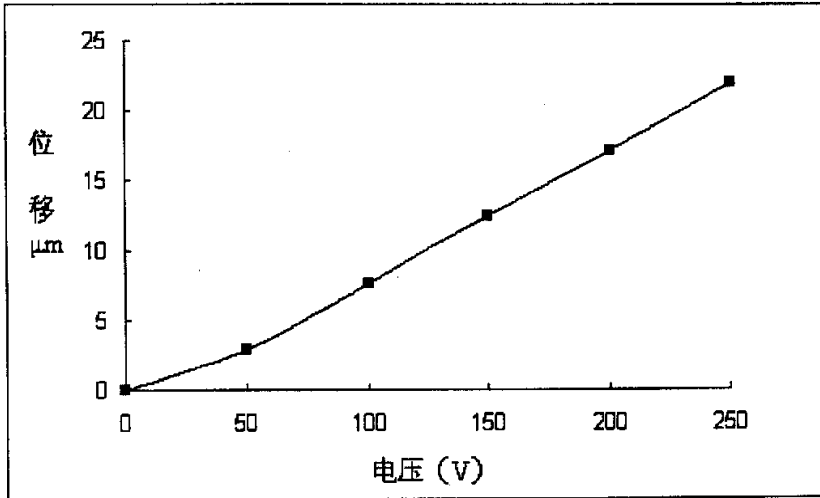


图 2-20 微进给工作台电压与位移曲线图

由图中可以看出:微进给平台的实际输出位移比 PZT 的名义输出位移小了 $15\mu\text{m}$, 分析原因主要有以下两点:

- (1) PZT 作动器为弹性元件, 在弹性铰链预紧力的作用下 PZT 作动器在推动动平台的同时自身也要压缩, 因此在最大驱动电压下其伸长量也会小于名义伸长量, 并且弹性铰链的刚度系数越大, 微进给平台的实际输出位移量偏离 PZT 作动器的名义输出位移就越大。
- (2) 微进给工作台的动平台和 PZT 作动器之间存在接触变形环节, PZT 作动器的伸长量首先要用于该环节的压缩变形, 接触变形环节的刚度越小, 动平台的实际输出位移量就越小。

但是这种原因是相互矛盾的, 一方面增加弹性铰链的刚度可以提高接触变形环节的刚度, 使得 PZT 作动器用来克服接触变形环节的伸长量变小, 从而增加了微进给平台的输出位移; 另一方面由于 PZT 作动器是弹性元件, 增大弹性铰链的刚度又会降低 PZT 作动器的实际伸长量。因此, 在实际当中要综合考虑这两方面的因素。

另外, 动平台在 $50\sim 250\text{V}$ 电压的驱动下, 位移近似与电压成正比变化, 而在 $0\sim 50\text{V}$ 电压驱动时的电压位移曲线的斜率小于 $50\sim 250\text{V}$ 时的电压位移曲线的斜率。分析原因主要为: 对 PZT 所施加的预紧力不充分造成动平台与 PZT 之间的连接不紧密, 从而使 PZT 最初的伸长量用于拟补动平台与 PZT 的间隙。

同时，由于所测量的各个点所上升的位移不同，因而造成平面会有一定程度的扭曲，以 50V 电压驱动时为例，如图 2-21 所示。分析动平台扭曲的原因，主要有：

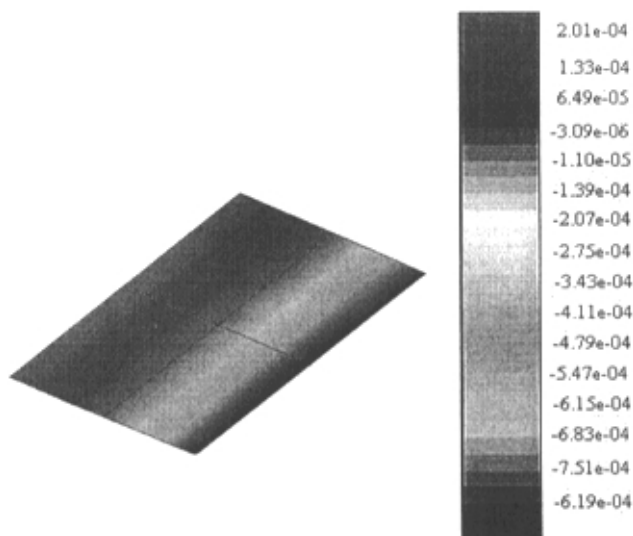


图 2-21 50V 驱动电压下动平台的高斯曲率

- (1) 四个弹性铰链的制造误差；
- (2) PZT 自身的精度误差；

因而在微进给工作台的设计制作过程中，应注意避免以上情况。

2.7 本章小结

本章设计了一台基于压电陶瓷作动器的以弹性铰链为变形元件的磨削微进给工作台，并采用 ANSYS 软件进行有限元分析，验证了微进给平台的位移输出行程并进行了平台铰链薄弱处的应力校核。在工作台制作完成后对所设计的微进给平台进行了试验研究，分析了微进给平台的输出位移特性。

第三章 铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形

试验研究

3.1 引言

随着现代技术的发展,在60年代初逐步形成的超精密加工技术已经获得了惊人的进步和广泛的应用。作为传统的精密加工方法的磨削,具有天然的近缘条件向超精密方向发展,现在超精密磨削已经成为超精密加工的主要领域之一。目前,超精密磨削大多使用金刚石或CBN(立方氮化硼)微粉砂轮。早期镜面磨削使用树脂结合剂,借助其弹性使磨削过程稳定。但是树脂结合剂耐热性差,在高温下,结合剂与磨料的结合强度低,不能发挥超硬磨料的高效切削性能。最近几年,随着铸铁结合剂金刚石微粉砂轮和在线电解修整(ELID)技术的发展,铸铁结合剂砂轮的应用日益广泛。铸铁结合剂金刚石砂轮是一种适应目前发展需要的新型砂轮,主要有以下几个特点^[43, 44]:

1. 采用了高浓度的金刚石磨料。
2. 采用了硬料填充,结合剂不易磨损,对磨粒的把持能力强,能充分发挥金刚石磨料的磨削能力,而且有利于散热。
3. 可以在从低速到高速的较宽磨削速度范围下工作,不会限制磨削用量的选择。
4. 可以选择的磨粒范围比较广,能适应于各种磨削。

铸铁结合剂金刚石微粉砂轮能够应用于超精密镜面磨削需要解决的关键在于砂轮的修整(整形和修锐)技术。对于砂轮的整形,由于铸铁结合剂的硬度较高,若沿用以往应用于树脂砂轮的碳化硅、刚玉磨条或砂轮磨削的方法,则整形效率低,精度差,一般不易达到超精密镜面磨削对砂轮形状精度的要求。由于电火花加工不受被加工材料硬度的影响,没有机械力的作用,非常适合于高硬度材料的加工去除^[45]。试验证明,电火花整形法非常适用于铸铁结合剂金刚石砂轮的整形,具有整形速度快、装置简单、便于实现等优点。

3.2 铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形原理

砂轮的整形是指使砂轮的磨削表面与其回转轴线满足一定的几何关系。铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形的原理是基于砂轮和工具电极之间的脉冲性电火花放电时电腐蚀现象蚀除多余的铸铁结合剂材料,以达到砂轮的尺寸、形状

和表面质量的加工要求。电火花放电之所以能够蚀除金属材料，主要是因为电火花放电时，火花通道中瞬时产生大量的热，达到很高的温度，足以使铸铁结合剂局部熔化、气化而被蚀除掉，形成放电凹坑。从微观角度讲，电火花加工大致可分为几个连续阶段：极间介质的电离、击穿，形成放电通道；介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀；电极材料的抛出；间隙介质的消电离。为了使电火花放电对金属材料能进行尺寸加工，必须满足下列条件^[46]：

1. 必须使工具电极和砂轮被加工表面之间经常保持一定的放电间隙，这一间隙随加工条件而定，通常为几微米至几百微米。如果间隙过大，极间电压不能击穿极间介质，因而不会产生火花放电。间隙过小，很容易形成短路接触，同样也不会产生火花放电。
2. 火花放电必须是瞬时的脉冲性放电，放电延续一段时间后，需停歇一段时间。放电延续时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ s，这样才能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分，把每一次的放电点分别局限在很小的范围内；否则，像持续电弧放电那样，使表面烧伤而无法用作尺寸加工。为此，铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形必须采用脉冲电源。
3. 电火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行，以有利于产生脉冲性的电火花放电。同时，液体介质还能把电火花加工过程中产生的金属微屑、碳黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排出，并且对电极和砂轮表面有较好的冷却作用。

3.3 铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形试验研究

3.3.1 电火花整形试验系统及试验过程

试验用电火花整形系统工作原理如图 3-1 所示：

系统组成：

机床：精密卧轴矩台平面磨床 MM7120

电源：ELID 镜面磨削高频脉冲电源 HDMD-IV 型

工具电极材料：紫铜

砂轮：铸铁结合剂金刚石砂轮 (W10)

磨削液：ELID 专用磨削液 (水基)

测量工具：千分表，JDC-III ACCUMEASURE INSTRUMENT

电火花整形电压和电流数据采集系统是由：霍尔传感器、滤波电路、采集卡及

计算机等组成。

通过图 3-2 所示的采集系统，用 LabVIEW 软件可以实时采集整形过程中电压和电流的信号。

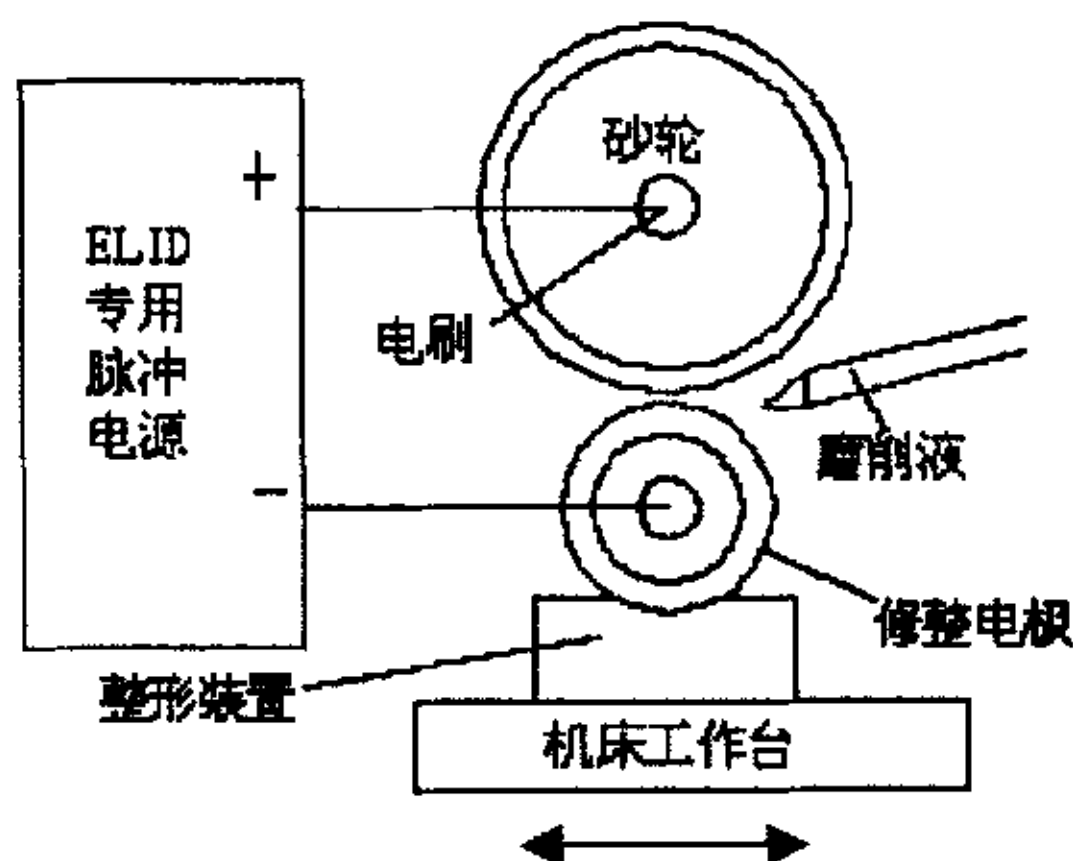


图 3-1 铸铁基金刚石砂轮电火花整形装置原理图

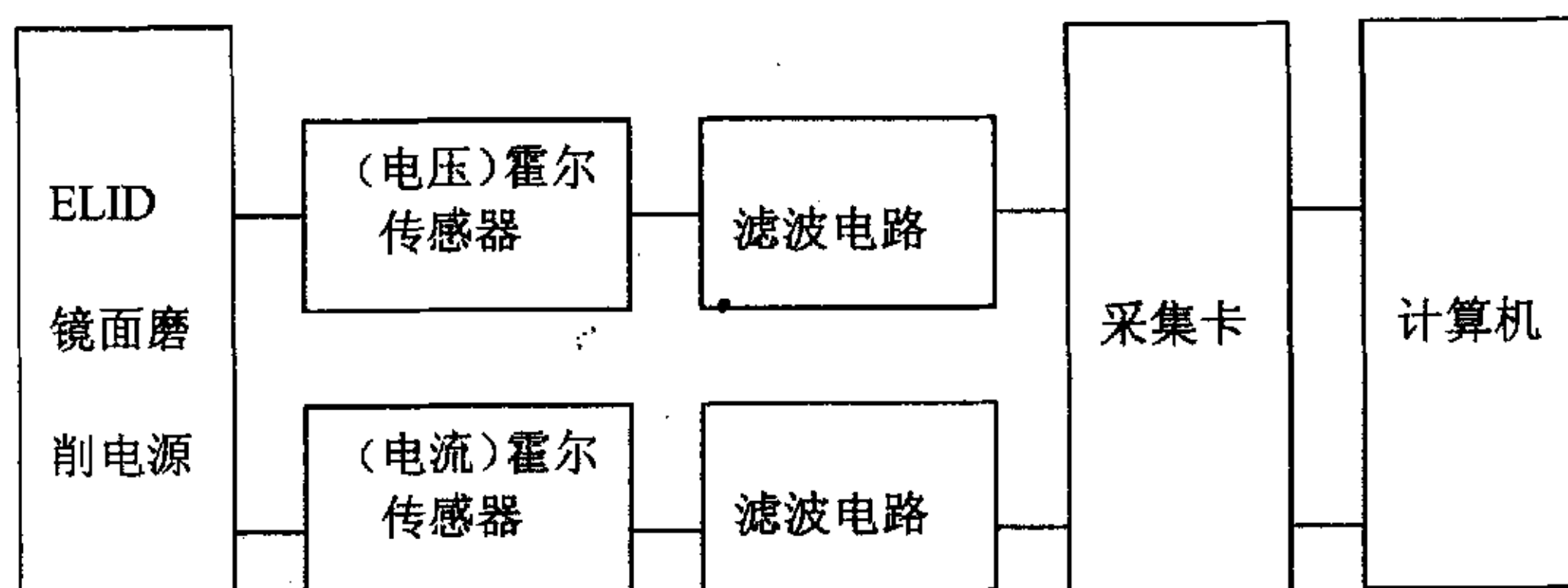


图 3-2 电火花整形过程中电压和电流采集系统原理图

LabVIEW (Laboratory Virtual instrument Engineering) 是一种图形化的编程语言，广泛地被工业界、学术界和研究试验室所接受，视为一个标准的数据采集和仪器控制软件。LabVIEW 集成与满足了 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485 协议的硬件及数据采集卡通讯的全部功能。它还内置了便于应用 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数，是一个功能强大且灵活的软件。利用 LabVIEW 可以方便地建立自己的虚拟仪器，其图形化的界面使编程及使用过程生动有趣。

图形化的程序语言，又称为“G”语言。使用这种语言编程时，基本上不写程序代码，取而代之的是流程图或流程图。LabVIEW 是一个面向最终用户的工

具, 可以增强所构建科学和工程系统的能力, 提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径。使用它进行原理研究、设计、测试并实现仪器系统时, 可以大大提高工作效率。

利用 LabVIEW, 可产生独立运行的可执行文件, 它是一个真正的 32 位编译器。像许多重要的软件一样, LabVIEW 提供了 Windows、UNIX、Linux、Macintosh 的多种版本。

为了保持和 ELID 磨削的一致性, 本试验采用 ELID 镜面磨削专用高频脉冲电源和磨削液, 在平面磨床上进行。将使工具电极旋转的电火花附加装置放置在磨床工作台上, 电极和砂轮沿轴向的相对运动由工作台完成。

电火花整形时, 砂轮接电源正极, 工具电极接电源负极, 电极与被整形砂轮相对旋转, 机床工作台带动整形装置沿砂轮轴向往复运动, 磨削液喷至砂轮与电极间的加工区内, 利用工作台垂直方向的进给可以调整砂轮与电极之间间隙, 实现小间隙电火花放电, 对砂轮的金属基体表面材料进行电蚀去除。根据电火花加工原理, 放电间隙小的地方即砂轮表面的高点首先产生放电, 逐渐将金刚石砂轮的金属结合剂的高点蚀除。随着在整形过程中电极沿砂轮径向方向不断进给, 砂轮的圆度误差将逐渐减小, 最终实现砂轮的精密整形。

对于砂轮整形方法的评价, 主要从砂轮的整形精度方面进行衡量, 同时也应该考虑效率的因素。整形精度是指该整形方法所能最终获得的砂轮表面的形状精度, 为了便于测量, 本文用圆度及沿砂轮轴线方向测量的锥度两项指标来表示。借助数据采集系统采集电火花过程中的电压和电流信号实时监测电火花整形进程, 并通过千分表对砂轮圆度和锥度进行测量, 综合以上两种方法控制砂轮的整形精度。

3.3.2 放电参数的选择

在电火花整形过程中, 放电参数是影响电火花整形精度和效率的主导因素。金刚石砂轮与工具电极发生脉冲性电火花放电, 在砂轮表面形成放电凹坑, 其形状如图 3-3 所示。在重复放电的过程中、每个脉冲放电的凹坑相互重叠, 如图 3-4 所示。随着电压的增加, 整形后的砂轮表面质量会变差, 布满较大的凹坑, 而且发现有烧伤的痕迹。其原因是在于工作液的电阻率较小, 放电过程中对放电通道的压缩作用差, 消电离能力也很低, 当脉冲能量提高到一定数值之后, 电极间工作液的介电性能也得不到恢复, 造成电弧放电, 把砂轮表面烧伤或电

蚀出较大凹坑^[57]。因此要得到较高的整形精度，宜采用低电压、窄脉冲、高功率密度的放电参数。



图 3-3 电火花放电凹坑断面几何形状



图 3-4 重叠的脉冲放电凹坑

电压与整形效率也有密切的关系。研究表明，无论正极或负极都存在着单个脉冲的蚀除量 q 与单个脉冲能量 W_M 在一定范围内成正比的关系。在某一段时间内的蚀除总量 Q 等于这段时间内单个有效脉冲蚀除量的总和。故正、负极的蚀除速度，与单个有效脉冲蚀除量成正比。用公式表示为：

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= K_a W_M f \phi t \\ Q_c &= K_c W_M f \phi t \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_a &= \frac{Q_a}{t} = K_a W_M f \phi \\ v_c &= \frac{Q_c}{t} = K_c W_M f \phi \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

式中 Q_a, Q_c ——正极，负极的总蚀除量；(角标 a 表示正极， c 表示负极)

v_a, v_c ——正极，负极的蚀除速度，亦即工件生产率或工件的损耗速度；

W_M ——单个脉冲能量；

f ——脉冲频率；

t ——加工时间；

K_a, K_c ——与正，负电极材料、脉冲参数及工作液有关的工艺参数；

ϕ ——有效脉冲利用率；

单个脉冲放电所释放的能量取决于电极间的放电电压、放电电流和放电持续时间，所以单个脉冲放电能量为

$$W_M = \int_0^{t_e} u(t)i(t)dt \quad (3-3)$$

式中 t_e ——单个脉冲实际放电时间；

$u(t)$ —— 放电间隙随时间而变化的电压 (V)；

$i(t)$ —— 放电间隙中随时间变化的电流 (A)；

W_M —— 单个脉冲放电能量 (J)；

由于电火花放电间隙的电阻的非线性特性，击穿后间隙上的火花维持电压是一个与电极材料及工作液种类有关的数值。火花维持电压与脉冲电压幅值、极间距离及放电电流大小等的关系不大，因而可以说，正负极的电蚀量正比于平均放电电流的大小和电流脉宽；对于矩形波脉冲电流，实际正比于放电电流的幅值。在通常的晶体管脉冲电源中，脉冲电流近似地为一矩形波，故当紫铜电极加工钢时的单个脉冲能量为

$$W_M = (20 \sim 25)i_e t_e \quad (3-4)$$

式中 i_e —— 脉冲电流幅值 (A)。

由此可见，提高电蚀量和生产率的途径在于：提高脉冲频率，增加单个脉冲能量 W_M ；减小脉间 t_0 ；设法提高系数 K_a 、 K_c 。当然，实际生产时要考虑到这些因素之间的相互制约关系和对其他指标的影响，例如脉冲间隔时间过短，将产生电弧放电；随着单个脉冲能量的增加，加工表面粗糙度也随之增加等等。

综合整形质量与效率的影响因素，经过对多种条件进行试验测试后，本文选定在电压为 120 伏，占空比为 80：20 的条件下对铸铁基金刚石砂轮进行电火花整形。

3.3.3 电火花整形试验结果及分析

试验条件：

电火花放电参数：电压为 120 伏，占空比为 80：20，砂轮的转速 1500r/min

测试项目及方法：

测试项目：整形过程中的电压和电流参数，及砂轮内、外圆 8 等分点处的径向跳动和砂轮的锥度。

测试方法：首先将采集系统连接在 ELID 磨削电源上。在砂轮内、外侧面的 8 等分点处做标记，然后将砂轮和工具电极安装在平面磨床上。在砂轮装配完毕以及电火花修整过程中，应注意调节砂轮与工具电极之间的间隙，使砂轮直径较大的部分产生电火花放电，直径较小的部分不发生电火花放电。在电火花整

形过程中，实时进行电压和电流的采集。在本章中，将显示分别在三个时间段，即开始整形、整形 100 分钟及 130 分钟后采集电压和电流信号并同时用千分表测量砂轮 8 等分点处的径向跳动及砂轮的锥度。

试验结果：

电火花整形过程中，砂轮在各个时间段的圆度、锥度及电压电流曲线如下所示。

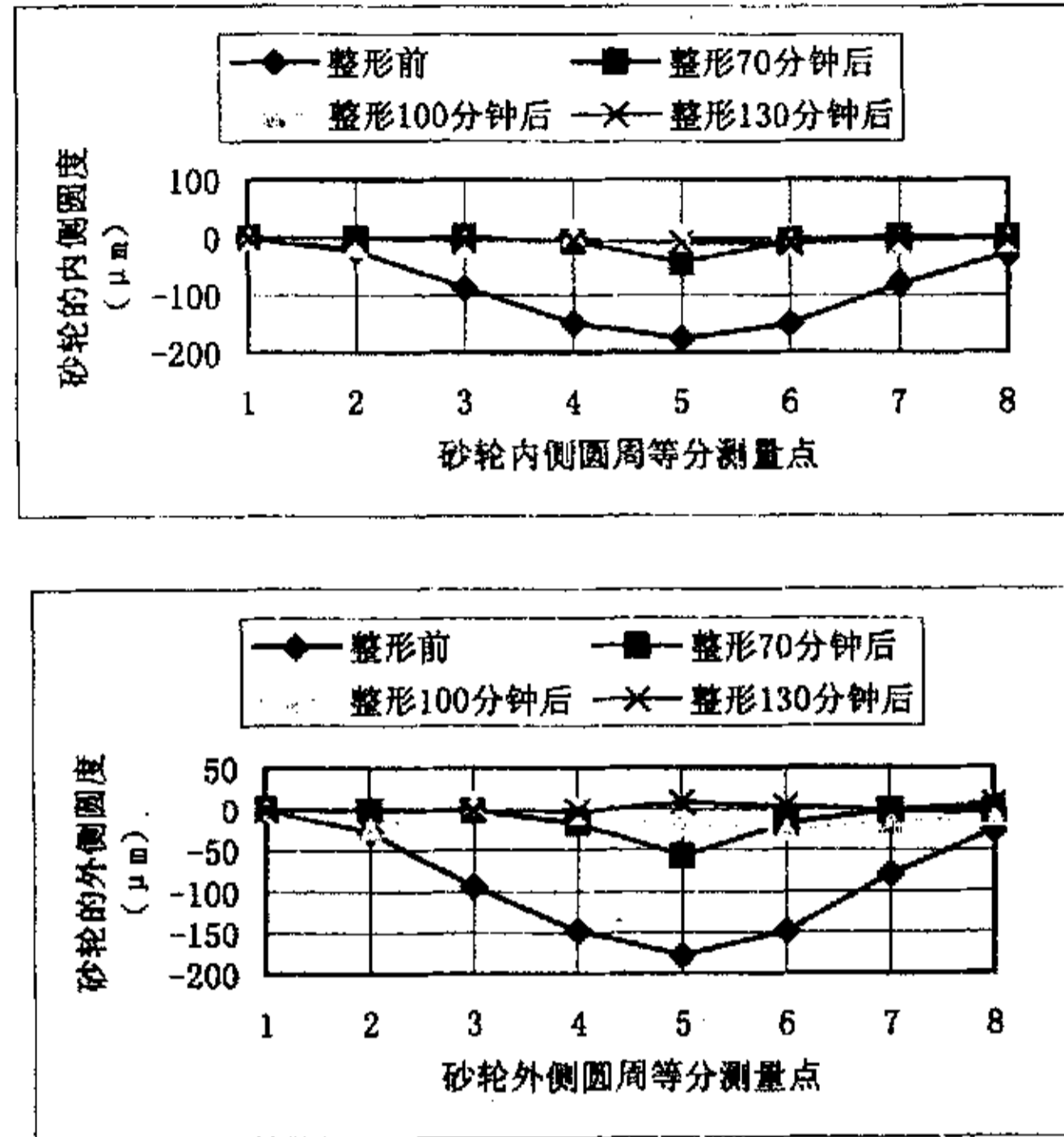


图 3-5 金刚石砂轮整形过程中内、外圆圆度的变化过程
图中所测量数据为砂轮内、外圆上各测量点处径向跳动值

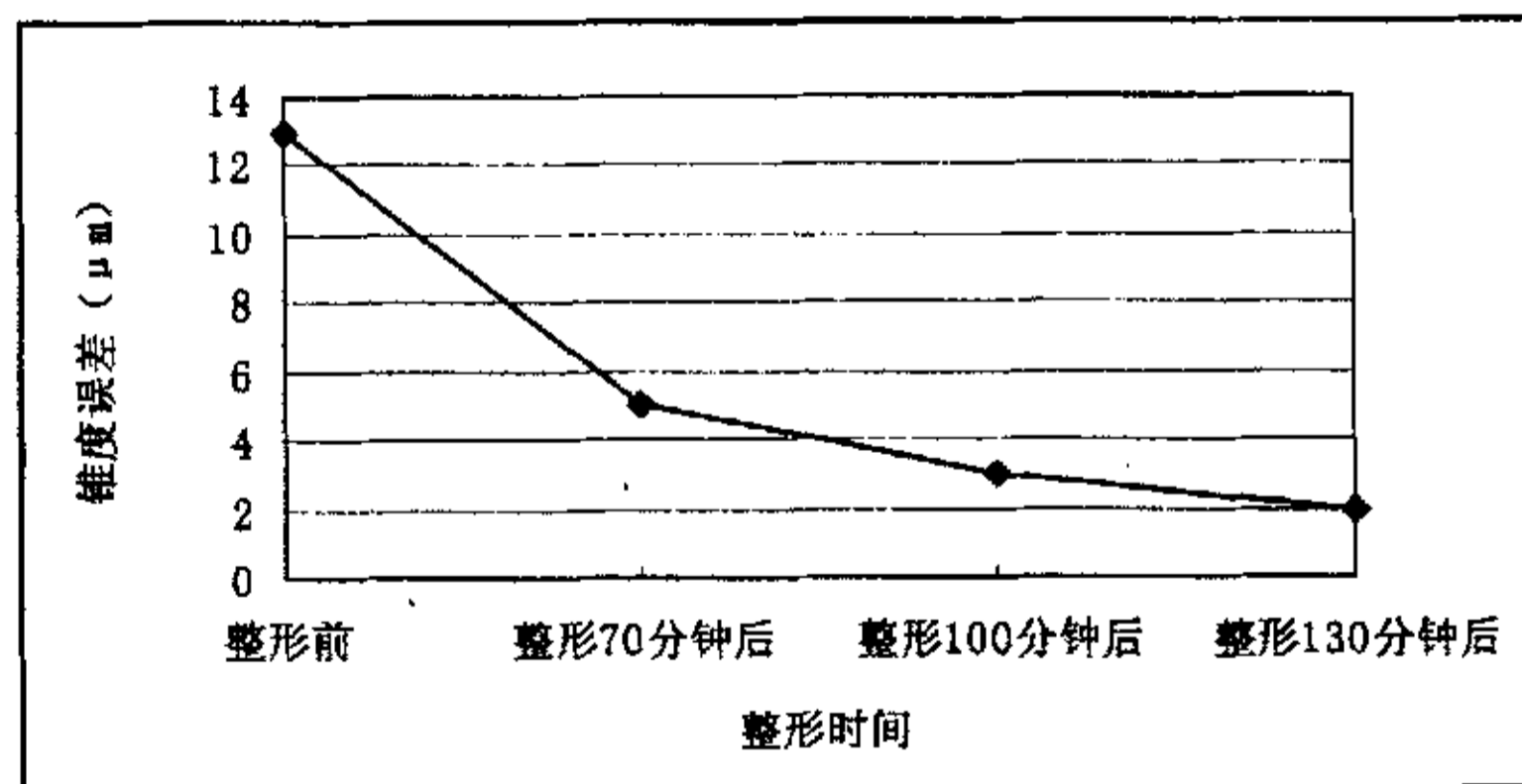


图 3-6 金刚石砂轮整形过程中锥度的变化

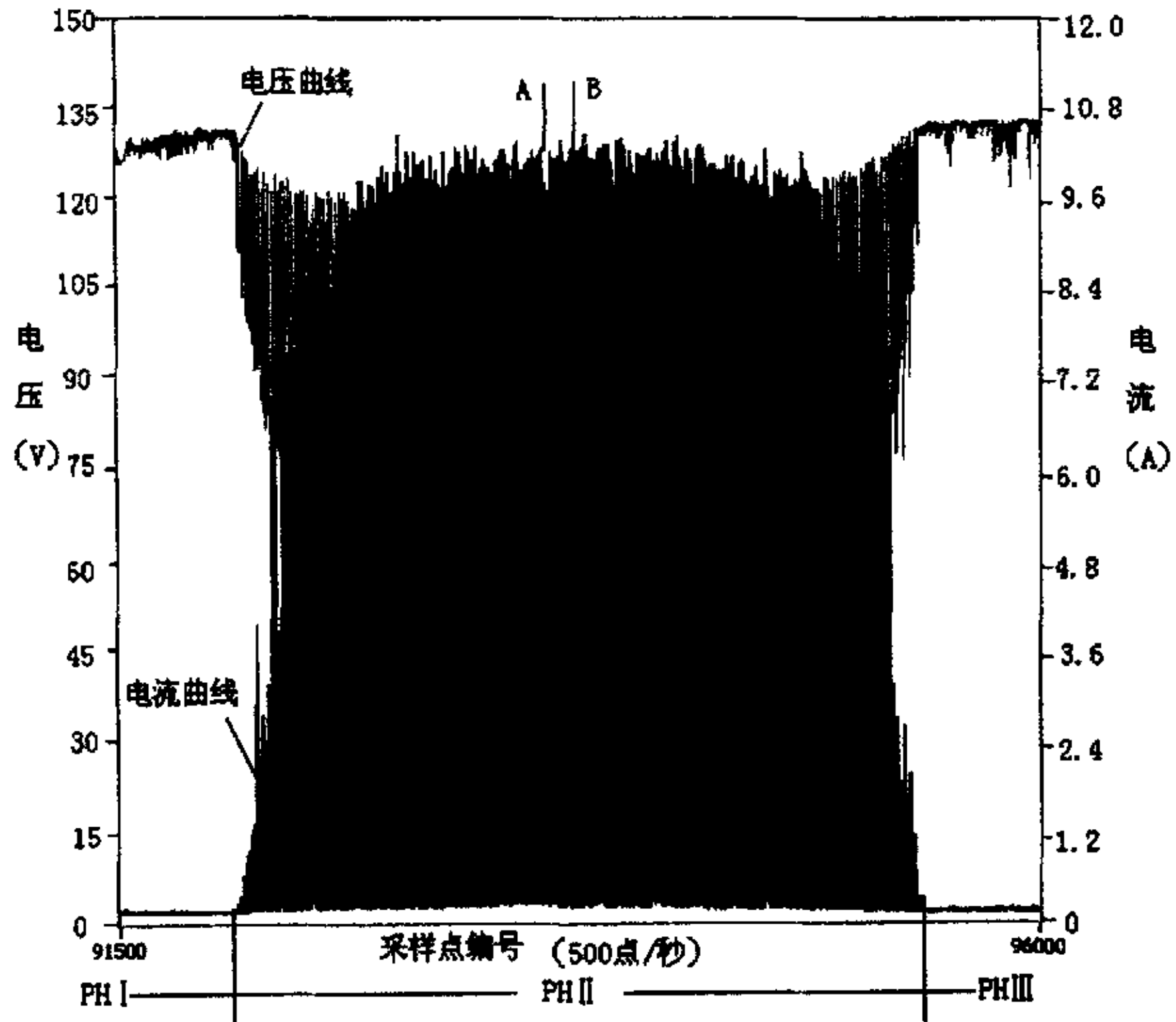


图 3-7 砂轮开始整形时采集到的电压与电流曲线宏观图

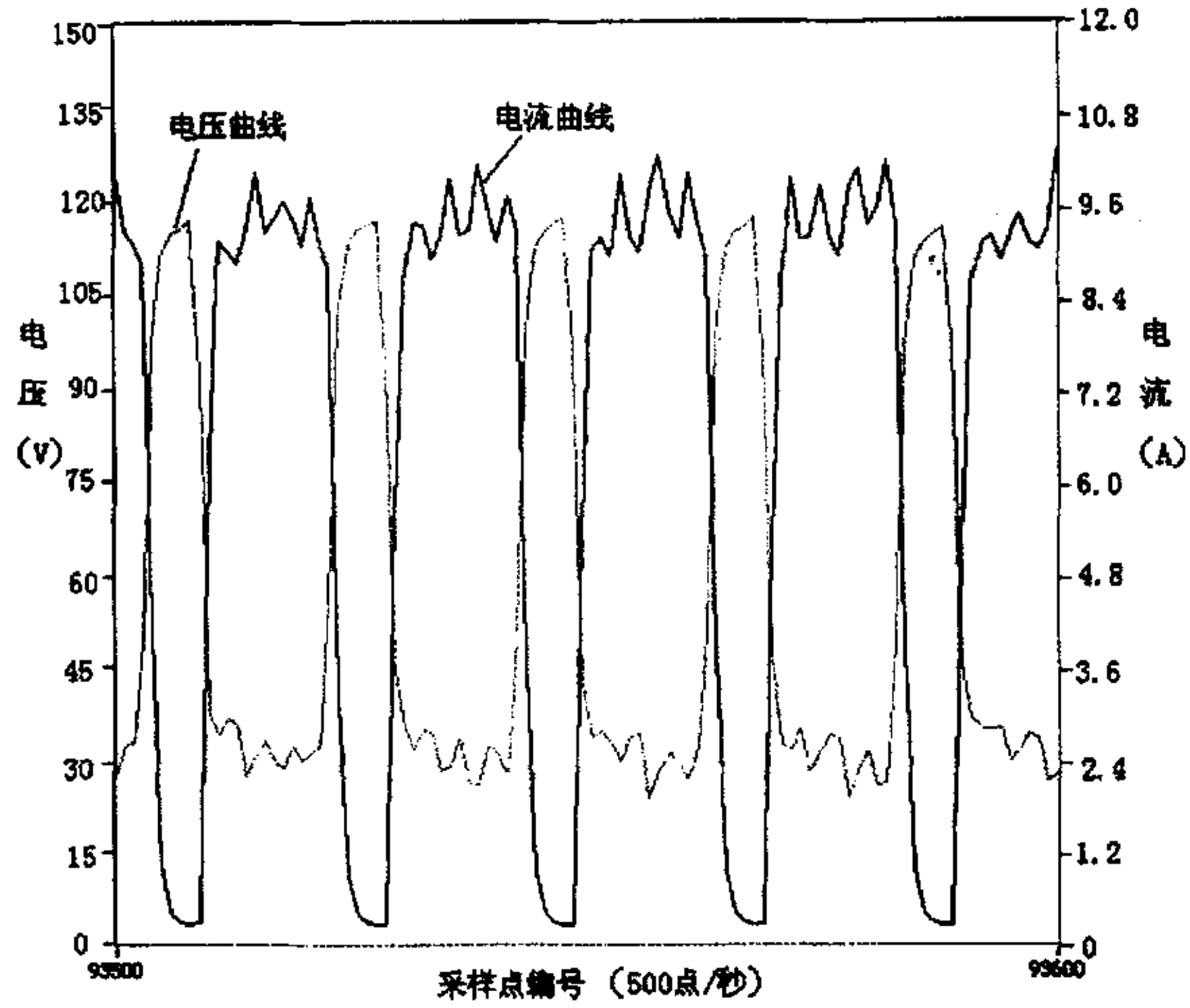


图 3-8 AB 段电压电流曲线微观图

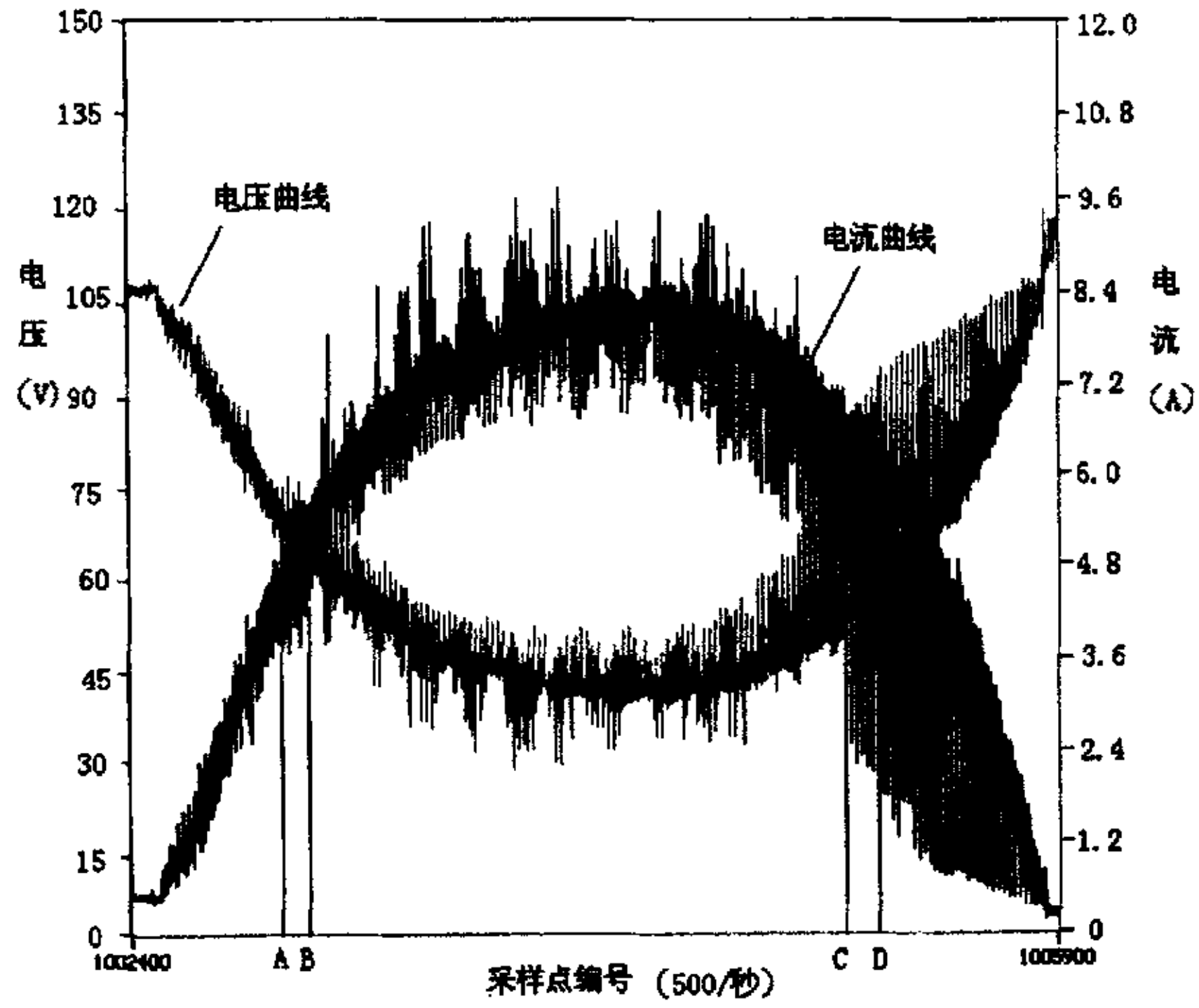


图 3-9 砂轮整形 100 分钟后所采集到的电压电流曲线

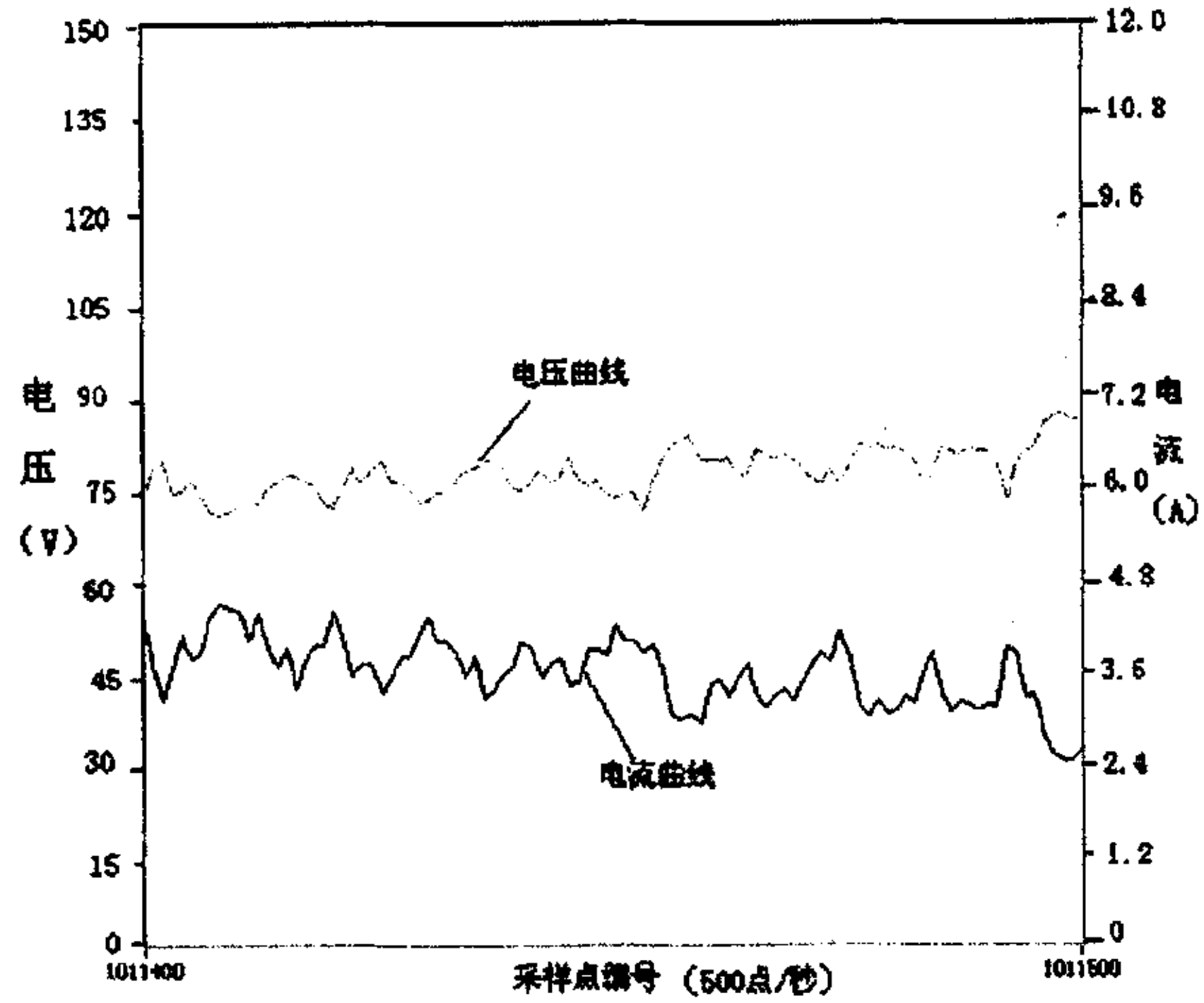


图 3-10 AB 段电压电流曲线的微观图

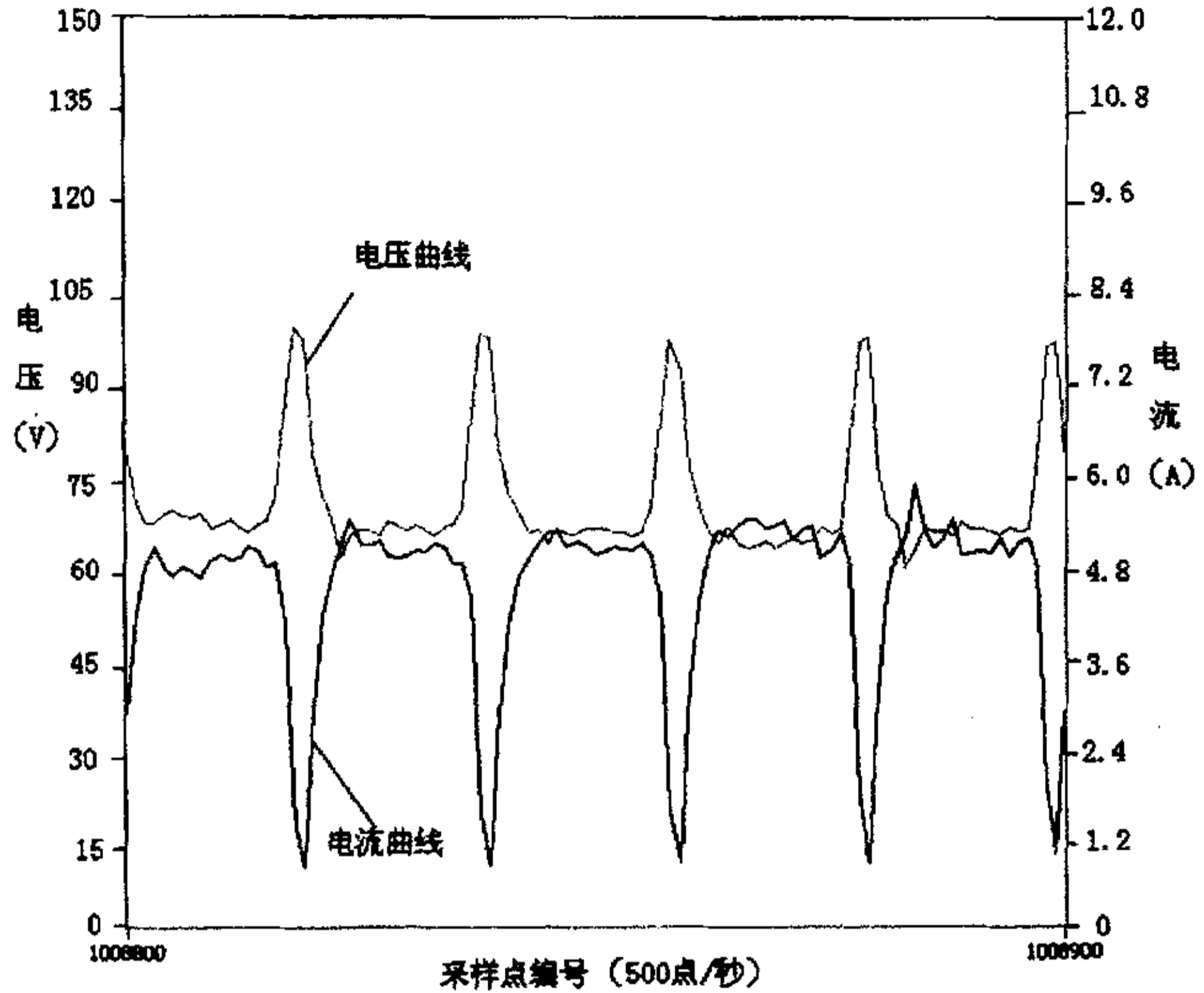


图 3-11 CD 段电压电流曲线的微观图

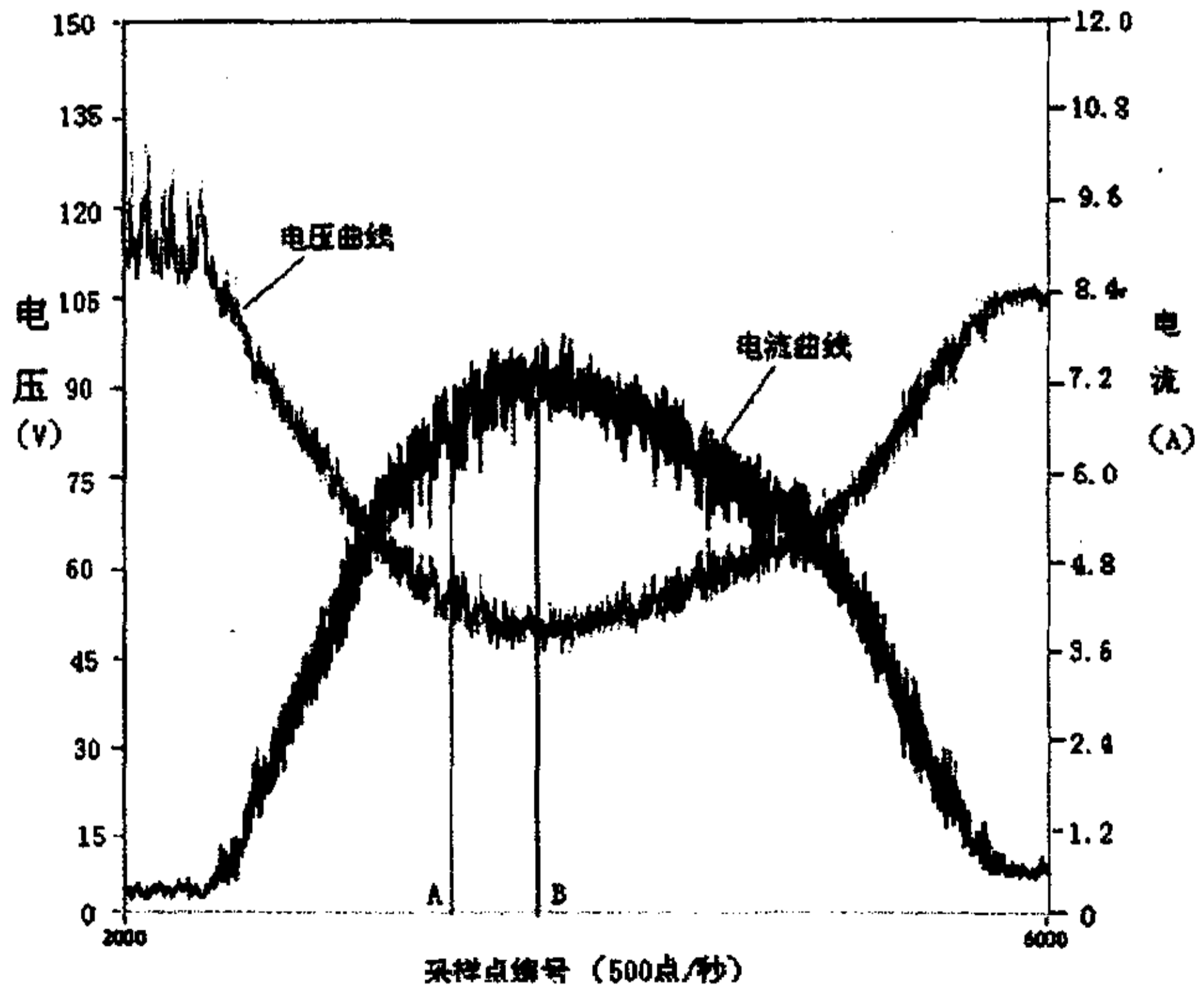


图 3-12 砂轮整形 130 分钟后所采集到的电压电流曲线

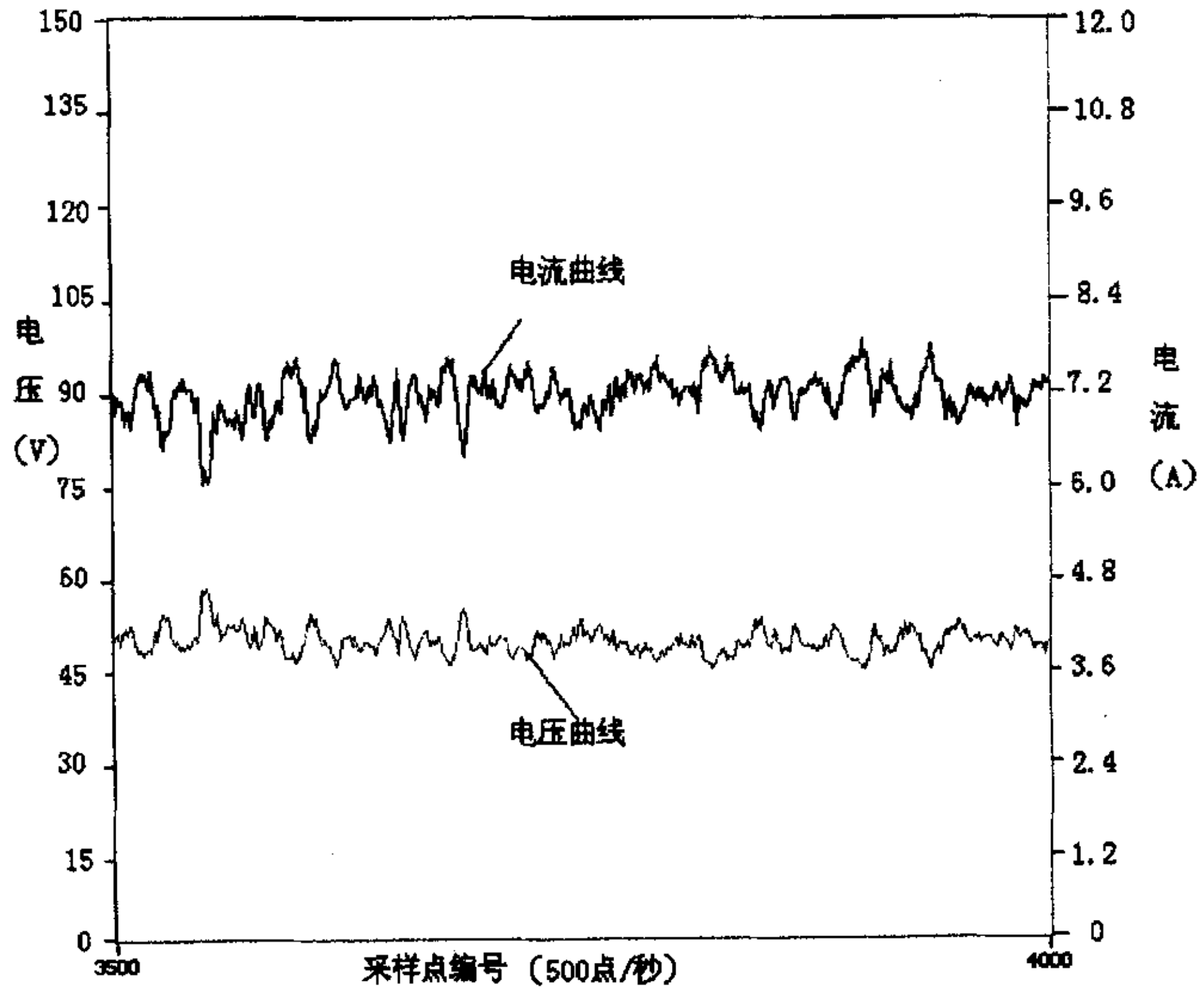


图 3-13 AB 段电压电流曲线的微观图

结果分析:

(1) 在电火花整形过程中, 由于砂轮偏心的存在, 在砂轮的一个转动周期内, 砂轮外圆的各点与工具电极之间的间隙是不同的。砂轮直径较大的部分处于可放电间隙内, 其余部分不发生电火花放电。因此砂轮的偏心是从直径较大的部分被逐渐去除的。图 3-5 与图 3-6 说明了电火花整形过程中砂轮锥度的内、外侧圆度和的变化过程。

(2) 在此次试验中, 作者根据在三个时段所采集到的电压和电流曲线对砂轮的整形精度进行实时评估。

由于金刚石砂轮在出厂时没有经过整形, 因此圆度和锥度的变化过大, 其中圆度误差为 $178\mu\text{m}$, 锥度误差为 $13\mu\text{m}$, 不能满足超精密磨削的要求。接通 ELID 电源, 对铸铁基金刚石砂轮进行整形。

在整形的整个过程中, 所采集到的铸铁基金刚石砂轮电火花整形的电压和电流曲线的宏观变化规律基本相同, 不同点在于电压与电流各自波动范围的变

化, 其中, 电流和电压曲线在刚刚开始进行整形时的波动最大, 在整形基本结束时的波动最小。

铸铁基金刚石砂轮电火花刚开始整形时的电压和电流宏观变化如图 3-7 所示: 图 3-7 为电极往复周期运动 $1/2$ 周期中的一部分。其中, 采集卡的频率为 500 点/秒, 从图中可以看出所显示区间的采集时间为 9 秒。可将图 3-7 分为 3 个阶段进行分析, 即如图所示的 PH I, PH II, PH III。PH I 为工具电极从行程的一端沿轴向开始向砂轮移动时, 当与砂轮之间的间隙较大, 不能够发生电火花放电的阶段, 此时可认砂轮和工具电极之间形成断路, 即电阻无穷大, 因而此时采集系统所采集到两极间的电压即为所施加的修整电压, 而电流近似为 0。PH II 为当工具电极在轴向越来越接近砂轮时, 当其间的间隙减小到可以被击穿, 形成放电通道时, 发生电火花放电的阶段。此时将有电火花产生, 随着电极间的间隙不断减小, 其间介质的电阻也随之减小, 因而电流将逐渐增大, 而电压逐渐降低。当工具电极和砂轮在轴向完全重合时, 此时砂轮和电极之间的正对面积最大, 间隙最小, 介质电阻最小, 因而此时的电流最大, 电压最小, 即电压和电流分别处于各自曲线的最高点和最低点处。随后, 电极继续沿轴向移动, 逐渐远离砂轮, 正对面积逐渐减小, 间隙变大, 电阻逐渐增大, 因而电流逐渐减小, 电压逐渐增大, 直至间隙增大至不可以被击穿, 不在发生电火花放电。此时电火花整形进入 PH III, 随着电极和金刚石砂轮之间的间隙越来越大, 形成断路, 因而电极间的电压继续保持所施加的整形电压, 电流接近为 0。当电极行进至行程一端的端点时, 开始向反方向移动。

为了进一步分析电火花整形过程中电压和电流的变化, 对图 3-7 中 AB 区间内电压和电流曲线的微观图进行分析, 如图 3-8 所示。由图中可以看出: 所显示曲线 AB 的采集时间为 $1/5$ 秒钟, 电压与电流变化的频率为 25Hz, 与砂轮的旋转频率相同。电压的瞬时升高与电流的瞬时下降构成矩形波, 出现这种现象的原因在于: 由于砂轮的制造精度较低, 造成砂轮表面高、低点的分布不均匀。因而在砂轮的一个转动周期内, 砂轮外圆的各点与工具电极的间隙是不同的, 砂轮直径较大的部分处于可放电间隙内, 其余部分不发生电火花。因而, 砂轮表面上的高点首先发生局部电火花放电。从而造成电流会瞬时升高, 而电压会瞬时降低。这样, 电火花所释放的能量将砂轮表面上的高点逐渐蚀除。

继续对砂轮进行电火花整形, 经过 100 分钟的整形后, 采集系统所采集到的电压和电流变化如图 3-9 所示。由图 3-9 可以看出, 图中左侧的电压和电流的波

动范围已经明显减小，而右侧的电压和电流的波动范围仍然比较大。分别对图 3-9 中电压和电流曲线左、右两侧的 AB 和 CD 段的微观图进行研究，如图 3-10、3-12 所示。图 3-10 中电压和电流的波动已经趋于平缓，这就表明砂轮一侧表面都在发生电火花放电，从而也就说明这一侧表面上高、低点之间的差异已经明显减小了。而图 3-11 中仍然有矩形波出现，这表明砂轮的另一侧表面上仍然只是凸出的高点在发生电火花放电，放电仍然局限在很小的范围内，从而造成电压和电流的瞬时升高和减小。砂轮一侧表面已经基本平整，但是另一侧表面的圆度变化仍然需较大。需要对砂轮进行进一步的整形以提高砂轮的圆度和锥度精度。从图 3-5 中可以看出此时砂轮内侧的圆度误差为 $16\mu\text{m}$ ，外侧的圆度误差为 $32\mu\text{m}$ ，与图 3-10 所反映的情况一致。

接通电源继续进行砂轮的电火花整形。130 分钟后，采集系统所采集到的电压与电流的宏观变化曲线如图 3-12 所示。此时电火花放电过程中的电压和电流已基本趋于平滑，不再出现矩形波。图 3-12 中 AB 段的微观变化如图 3-13 所示，此时的电压和电流曲线较前面所采集到曲线的波动显著变小。这也表明砂轮的表面已经基本趋于平整，圆度和锥度得到了很大改善。从图 3-13 中也可以看出，此时砂轮的圆度误差为 $9\mu\text{m}$ ，锥度误差为 $2\mu\text{m}$ ，较未整形时有了显著的改善，初步达到了 ELID 精密磨削的要求。

3.4 本章小结

铸铁结合剂金刚石砂轮的应用，为硬脆材料的加工，尤其是硬脆材料精密与超精密加工开辟了新的途径，但由于铸铁结合剂的高硬度和高强度特性带来的难于整形的特点，又限制了铸铁结合剂金刚石砂轮的进一步广泛应用，因此，整形技术是铸铁结合剂金刚石砂轮磨削的关键技术。

本章根据电火花加工原理，对铸铁结合剂金刚石砂轮进行了整形试验研究。利用工具电极和砂轮之间的电火花放电蚀除作用，对铸铁结合剂砂轮进行整形。作者建立了电压、电流的采集系统，并根据采集系统在铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形过程中所采集到的电压和电流变化曲线对整形精度进行评估。采用 120 伏电压进行电火花整形，试验获得了圆度误差为 $9\mu\text{m}$ ，锥度误差为 $2\mu\text{m}$ 的整形效果，初步达到了精密磨削对铸铁基金刚石砂轮的形状精度要求。试验结果同时也说明电火花整形方法是铸铁基金刚石砂轮有效的整形方法。

第四章 全文结论

随着现代科学技术的发展,陶瓷等硬脆材料在各个工业领域得到日益广泛的应用。但陶瓷材料等硬脆材料的加工困难,而且难于达到高精度的特点,限制了其进一步的应用,为了解决这方面的问题,同时为了满足轴承套圈沟道的成型磨削。本文设计了一台 ELID 超精密磨削用微进给工作台并对铸铁结合剂金刚石砂轮的电火花整形技术进行了一系列的试验研究,得到结论如下:

1. 采用弹性铰链作为微进给平台弹性变形元件,可以避免导轨结构微进给平台的位移爬行现象,达到很高的定位精度。利用有限元设计软件进行弹性铰链的优化设计,通过有限元分析弹性铰链的变形和应力情况,确定合适的结构参数。提高了设计的效率,避免了时间和财力的浪费。
2. 微进给工作台采用圆柱形主体双密封结构,可确保工作台在 ELID 磨削操作中的安全使用,保护内部部件。同时,四个特制弹簧可以保证预紧力的一致性和便于调节,使微进给平台有很高的定位精度和分辨率。
3. 设计并建立了电压和电流的数据采集系统。借助于采集系统和 LabVIEW 软件采集电火花整形过程中的电压和电流信号,对砂轮的整形效果进行实时评估,使电火花整形过程便于控制,提高砂轮的整形精度。
4. 建立了电火花整形系统,并在平面磨床上进行了铸铁结合剂砂轮的整形试验,总结电火花整形规律,为下一步砂轮电火花整形提供理论和实践基础。

通过电火花整形的方法,使铸铁基金刚石砂轮的最终圆度达到 $9\mu\text{m}$,锥度达到 $1\mu\text{m}$,初步满足了 ELID 超精密磨削的要求。从而证明电火花整形是用于铸铁基金刚石砂轮的有效整形方法,该系统的推广具有很大的经济意义。

作者在攻读硕士学位期间发表的论文

1. C.Z. Ren, S.W.Zhao, "Electrolytic In-process Dressing (ELID) And Super-Precision Grinding for the Ring Raceway of Ball Bearings", Key Engineering Materials Vols. 259-260: 268-272

参 考 文 献

1. 孙广山, 超精密加工技术及其发展动向, 中国机械工程, Vol No.1, 1996, 23-25
2. 张春河, 在线电解修整砂轮精密镜面磨削理论及应用技术的研究, 哈尔滨工业大学大小博士学位论文, 1996
3. W.J. Wills-Moren et al. Some Aspects of the Design and Development of a Large High Precision CNC Diamond Turning Machine. Annals of the CIRP. Vol.31 No.1,1982: pp.409-413
4. M.Weck et al. Diamond Turning of Non-symmetric Laser Optics. Proc. Of ASPE Annual Meeting, Rochester, 1990: pp.551-556
5. 何雅全, 吴明根. 超精密加工技术基础. 航空航天部的 628 所,1993
6. 张飞虎等 ELID 磨削——硬脆材料精密和超精密加工的新技术 宇航材料工艺 1999 年 第 1 期 pp.51-55
7. 王平等 在线电解修整砂轮的超精密镜面磨削新技术的发展与应用 磨料磨具与磨削 1994.4 pp.13-15
8. K.Mizutani et al. A Piezoelectric-drive Table and Its Application to Micro-Grinding of Ceramic Materials. Precision Engineering, Vol.12, No.4, 1990: pp.219-226
9. C.Steven et al. Development of a Model for Precision Contour Grinding of Brittle Mterials. Precision Engineering, Vol.13.No.4,1991: pp. 270-276
10. Noman, J.Brown. Lapping. Precision Engineering, Vol.13. No.4,1991: pp.270-276
11. 王贵成等 精密与特种加工 武汉理工大学出版社, 2001
12. 王建业等 电解加工原理及应用 国防工业出版社, 2001
13. Z.J.Yuan.et al. The Optimum Crystal Plane of Ntural Diamond Tool for Precise Machining. Annals of the CIRP. Vol,41,No.1, 1992: pp.65-69
14. Z.J.Yuan. et. al The Optimum Cystal Plane of Natural Diamond Tool for Precise Machining. Annals of the CIRP.. Vol.41, No.1,1992: pp.65-69
15. 袁哲俊. 精密和超精密加工技术. 哈尔滨工业大学, 1990
16. 史兴宽, 杨茂奎. 硬脆材料超光滑表面磨削技术的现状及发展趋势, 机械科学与技术, ,1997,Vol.16 No.5 pp883-887

17. H. Ohmori et al. Ultra-precision grinding of structural ceramics by electrolytic in-process dressing (ELID) grinding *Journal of Materials Processing Technology* 57(1996) pp.272-277
18. B.P. Bandyopadhyay et al. Efficient and stable grinding of ceramics by electrolytic in-process dressing (ELID) *Journal of Materials Processing Technology* 66 (1997) pp.18-24
19. Hwa-Young Kim et al. Study on the estimation of wheel state in electrolytic in-process dressing (ELID) grinding ISIE 2001, Pusan, KOREA, pp.1615-1618
20. H.S. Lim, et al. A fundamental study on the mechanism of electrolytic in-process dressing (ELID) grinding *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) pp.935-943
21. 大森整, 中川威雄. 电子材料 光学部品材料的超精密磨削. ELID 研削研究会报第一回, 1990: pp.98-103
22. Nobuhide Itoh, Hitoshi Ohmori, Grinding Characteristics of Hard and Brittle Materials by Fine Grain Lapping Wheels with ELID, *Journal of Materials Processing Technology* 62 1996 315-320, pp.315-320
23. 关佳亮等, ELID 砂轮结合剂作用机理的研究 *哈尔滨理工大学学报* 1998 年 8 月第三卷第四期 pp: 23-26
24. 大森整 ELID 镜面研削技术, ELID 研削研究会学报第 1 回: ELID 研削, 1990: pp.8-9
25. 王平, 张春河, 在线电解修整砂轮的超精密镜面磨削新技术的发展与应用, *磨料磨具与磨削*, 1994.4.82 pp.13-15
26. 马明霞, 王宪逵. 金属结合剂金刚石微粉砂轮电火花修整用脉冲电源的研制. *航空精密制造技术*, 1995.35(1) pp.17-19
27. 关佳亮等, ELID 镜面磨削技术—新磨削液的研制 *制造机床与技术*, 2001 年第五期, pp: 28-29
28. 关佳亮等, 精密 EHD 镜面磨削用新磨削液的研制 *金刚石与磨料磨具工程* pp: 40-41
29. 王平. 硬脆材料的 ELID 超精密镜面磨削机理和试验技术的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1995
30. 刘建琴, 微进给机构综述. *机械传动*, 第 23 卷第一期, 1999 年, pp.47-50

31. 关佳亮, ELID 镜面磨削的扩大应用及磨削液和砂轮的改进研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1998
32. 王清辉, 唐雅新等. 特种加工在修整金刚石磨轮中的应用. 航空精密制造技术, 1995.31.4
33. 刘晋春, 赵家齐. 特种加工. 机械工业出版社, 1996
34. 贾非等, 压电陶瓷, 科学技术出版社, 1979
35. 吴一辉, 王立鼎, 纳米定位控制中消除 PZT 滞后及蠕变的方法, 压电与声光, Vol.18, No.3, 1996, 207-211
36. J.M.Pross, L. Weisbord, How To Design Flexural Hinge and Micro-Motion Stage Design, Proceeding of the IEEE international conference on industrial technology, 1996
37. 孙广山, 超精密加工技术及其发展动向, 中国机械工程, Vol.7 No.1, 1996, 23-25
38. 张大卫, 田廷岭, 王本华, 高咏生 精密磨削辅助工作台及结构静动态特性研究 天津大学学报 第 4 期 2002 年 7 月 第 35 卷, pp. 506-510
39. 阎兵, 田廷岭, 张大卫, 张铁城 超精密磨削微进给工件平台的研制 天津职业技术师范学院学报 2002 年 3 月 第 12 卷 第 1 期 pp.1-5
40. 田廷岭, 微进给平台的设计及试验研究, 天津大学硕士学位论文
41. 金旻, 微进给工作台的设计及控制方法的研究, 天津大学硕士论文
42. 狄俊峰 超精密加工中微进给工作台的设计及试验研究 硕士学位论文
43. 关佳亮, ELID 镜面磨削的扩大应用及磨削液和砂轮的改进研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1998
44. 张春河, 铸铁基超硬磨料砂轮的电化学机械整形工艺及其作用机理, 中国机械工程 1998 年第 9 卷第 5 期 pp: 70-72
45. 王清辉, 唐雅新等. 特种加工在修整金刚石磨轮中的应用. 航空精密制造技术, 1995.31.4
46. 刘晋春, 赵家齐. 特种加工. 机械工业出版社, 1996
47. H.S. Lim, K. Fathima, A. Senthil Kumar ., M. Rahman A fundamental study on the mechanism of electrolytic in-process dressing grinding International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) pp.935—94
48. H. Ohmori, W. Li, A. Makinouchi, B.P. Bandyopadhyay Efficient and precision

- grinding of small hard and brittle cylindrical parts by the centerless grinding process combined with electro-discharge truing and electrolytic in-process dressing *Journal of Materials Processing Technology* 98 (2000) pp.322–327
49. K. Katahira, Y. Watanabe, H. Ohmori, T. Kato ELID grinding and tribological characteristics of TiAlN film *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) pp.1307–1313
50. Chunhe Zhanga, Hitoshi Ohmori, Teruko Kato, Noboru Morita Evaluation of surface characteristics of ground CVD-SiC using cast iron bond diamond wheels *Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology* 25 (2001) pp.56–62
51. D.J. Stephenson, J. Hedge, J. Corbett Surface finishing of Ni–Cr–B–Si composite coatings by precision grinding *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) pp.357–363
52. B.P. Bandyopadhyay, H. Ohmori The effect of ELID grinding on the flexural strength of silicon nitride *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999) pp.839–853
53. 大森整 ELID 镜面研削技术, ELID 研削研究会学报第 1 回: ELID 研削, 1990: pp8-9
54. 宋小中等, 电火花微细加工技术及其发展. 航空精密制造技术, 1996.2 pp.16-20

致 谢

本论文的研究工作自始至终是在导师任成祖教授的悉心指导下完成的,其中倾注了导师的大量心血。两年多来,导师严谨求实的学术作风、渊博的学识和崇高的敬业精神使我终生难忘,并将激励我在今后的学习和工作中克服困难,继续前进。正是导师循循善诱的教诲和无微不至的关怀、指导,使我克服学术和生活上的重重困难,最终圆满完成了论文的工作。值此论文完成之际,谨向尊敬的导师致以衷心的感谢。

在攻读硕士学位期间,得到本试验室靳新民师傅,金卫东博士,华瑾海硕士,陈锦江博士,张文轩硕士,张业硕士,刘远新硕士,李淑惠硕士及其他试验室田延岭博士的指导和帮助,在此谨向他们表示诚挚的感谢。

感谢所有曾给我以各种关心和支持的老师和同学们。

感谢在百忙中审阅本论文的专家和学者们。

感谢父母和爱人的理解、支持及在生活上无微不至的体贴和照顾。

赵淑文
二〇〇四年一月