

液体磁性磨具光整加工机理和物理性质的研究

摘 要

液体磁性磨具光整加工是应用磁流变液基本原理的精密光整加工新技术，它由磁介质微粒、基载液、稳定剂及磨粒组成。液体磁性磨具在无磁场作用时呈液体状态，表现出良好的流动特性，能与工件复杂表面充分接触；在施加磁场后，液体磁性磨具迅速发生相变，由牛顿流体变为宾汉姆体，表现出类似固体的性质，形成一个柔性的“砂轮”紧贴在工作表面，在工作件和液体磁性磨具发生相对运动的过程中实现对工作件表面的光整加工。

论文采用理论分析、试验研究、数值计算等方法，对液体磁性磨具的物理性质和加工机理进行了研究，研究的主要内容如下：

1. 通过对液体磁性磨具的组成进行理论分析和试验研究，配置出满足光整加工要求的液体磁性磨具；

2. 对液体磁性磨具的物理性质进行了理论分析和试验研究。测出了液体磁性磨具的密度和粘度值；应用自行设计的装置对液体磁性磨具在不同磁场强度下的剪切应力进行测量，得到了液体磁性磨具在不同磁场强度下的剪切应力；应用液体磁性磨具磁饱和强度测试装置，对液体磁性磨具在不同磁场强度下的磁导率进行了测量，并根据测量的数值绘制出液体磁性磨具的磁化曲线；

3. 在加工试验研究基础上，分析了磁场强度、工件的转速及加工的

时间等工艺参数对加工效率和表面质量的影响规律；在研究液体磁性磨具光整加工机理的基础上，建立了液体磁性磨具的光整加工数学模型。

这为进一步研究液体磁性磨具的加工机理，提供了理论依据；

4. 在理论分析和试验研究的基础上，提出了液体磁性磨具光整加工模式的几种构想。

液体磁性磨具对零件的表面光整加工属于柔性加工，加工后工件表面及次表面残余应力小。

关键词：液体磁性磨具；表面光整加工；实验装置；剪切应力；工艺参数

RESEARCH ON FINISHING MECHANISM AND PHYSICAL PROPERTY OF LIQUID-MAGNETIC ABRASIVE TOOL

ABSTRACT

Liquid-magnetic abrasive tool finishing is a kind of new technology on precise finishing. It is an innovative finishing technology that takes advantage of the theory of magnetorheological fluid. It is composed with magnetic particle, carrier, surfactant and abrasive particle. Liquid-magnetic abrasive tool is liquid condition at zero magnetic fields so that it can close around the complex surface of workpiece. On application of external magnetic fields, Liquid-magnetic abrasive tool prompt generates facies change from Newton fluid to plastic Bingham body. At the same time, it embeds the surface of workpiece like a molding abrasive disk. When the relative movement between workpeice and Liquid-magnetic abrasive tool happening, a portion of the part surface materials is removed.

The dissertation investigate the physical property and working mechanism of Liquid-magnetic abrasive tool with adopting combination of theoretical analysis, experimental investigation and numerical calculation.

The main research is as follows:

1. The Liquid-magnetic abrasive tool that can finish the surface of workpiece is produced through adopting combination of theoretical analysis, experimental investigation for the composition of Liquid-magnetic abrasive tool.

2. The density and viscosity of are known through researching on physical property of Liquid-magnetic abrasive tool. The shearing stresses at different magnetic fields are measured with the device that designed and made in laboratory. The magnetic conductivity Liquid-magnetic abrasive tool is measured by using the device of testing Liquid-magnetic abrasive tool saturation intensity. According to measurement, B-H Curve of Liquid magnetic abrasive tool can obtain.

3. At the basis of processing experiment, the techniques parameters such as intensity of magnetic field, the rotation of workpiece and the time of working how to influence working efficiency and the quality of workpiece surface is found. At the basis of mechanism of Liquid-magnetic abrasive tool finishing, mathematics model of Liquid-magnetic abrasive tool finishing work is established in this thesis. It provides rule for further researching Liquid-magnetic abrasive tool.

4. Several finishing modes of Liquid-magnetic abrasive tool are put forward through theoretical analysis and experimental investigation.

Liquid-magnetic abrasive tool finishing belong to flexible working, because the remanent stress existing in the surface and subsurface of workpiece is small.

KEY WORDS: Liquid-magnetic abrasive tool, surface finishing, experimental equipment, shearing stress, techniques parameter

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 茹秋生 日期： 2006.4.24

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解太原理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名： 茹秋生 日期： 2006.4.24

导师签名： 茹秋生 日期： 2006.4.24

第一章 绪论

1.1 光整加工技术概述

1.1.1 光整加工技术概念

光整加工技术是指在机械加工中旨在提高零件表面质量的各种加工方法、加工技术等。通常零件在经过铸锻、冲压、焊接之后，虽然获得了规定的毛坯尺寸、几何形状，但还存在诸多缺陷，如表面氧化层、皱曲、粘砂、残留焊渣等，所以零件在进入下道工序之前必须进行处理，称之为毛坯表面光整加工技术。零件经切削加工后，进行棱边倒圆、去除毛刺、消除微观裂纹、细化表面粗糙度、改善物理力学性能，称之为表面光整加工技术^[1]。

1.1.2 光整加工技术的发展及现状

光整加工主要有手工研磨和抛光、机械(传统)光整加工、非传统光整加工、复合光整加工^[33]。

手工方法研磨、抛光，能够实现平面、回转体、自由曲面的光整加工，适用于单件小批量生产。但这种方法劳动强度高，同时受到工人的技术等级和技术熟练程度的影响，质量不稳定，效率低。随着科学技术的发展和制造水平的不断提高，机械光整加工得到了迅速的发展。

无论是手工作业还是机械光整加工，都需要多道工序完成。各工序间必须更换磨料，磨料从粗到细。同时还必须将前道工序留下的磨料清洗干净，工作量大，效率低，已满足不了生产的需要；而且对工具头无法触及的异型件、细长管件或大型工件，实现光整加工难度更大，甚至无法加工。这也是实现自动化光整加工的难点，因此迫切需要开发新的光整加工工艺，来解决这些难点。

由于非传统加工在制造技术中的特殊地位，并针对手工作业、机械光整加工存在的缺陷，各国研究者在致力于研究进一步提高机械光整加工表面质量、加工精度和生产率的同时，也致力于非传统光整加工的研究。如化学抛光的历史可以追溯到19世纪，

面20世纪初R.Winer 等人申请了银的电化学抛光第一个专利,法国电话公司的D A Jaeguet于1931年开始较系统的研究。化学抛光和电化学抛光都是有选择性地溶解峰点,实现表面光整,不受导电材料硬度的限制,生产率高,但是光整加工后粗糙度等级只能提高1~2级,且精度难以控制。70年代开发的电化学机械光整加工,设备结构简单、成本低,吸收了机械光整加工精度的可控性和电化抛光高效率的优点,成功地实现了电化学抛光和机械光整加工的复合,改变了常规磨床高精度的要求,而且不必更换磨料,使加工效率大大提高。尽管如此,对原始粗糙度较大的表面(如 $R_a > 1.6 \mu m$),电化学机械光整加工需要的时间较长。为获得更高的生产率,大连理工大学在80年代末提出了脉冲电化学光整加工技术和脉冲电化学机械光整加工新思想,并在实际生产中得到了应用。脉冲电化学机械光整加工技术综合了脉冲电化学和电化学机械光整加工的优点,并充分发挥脉冲电化学机械光整加工独特的优势,进一步提高了加工精度和生产效率,主要用于较为粗糙表面(如 $R_a > 1.6 \mu m$)的光整加工。加工后的表面粗糙度可达 $0.08 \mu m$ 。

机械光整加工和(脉冲)电化学机械光整加工要实现复杂曲面的光整加工,工具头必须是高度柔性连接,但是对那些u型管、异型槽、口径小的大型容器等内表面,电极制作困难,甚至无法加工。

近几年不断得到重视的磁粒光整加工,由于自由磁粒受到磁场力的控制,形成具有“柔性”的磁刷,对解决上述一些难题有明显的优势。磁粒光整加工技术是前苏联工程师提出的,上世纪60年代得到迅速发展,先后申请了多项专利并开发设计多种型号的平面磁粒光整加工机床,已在实际生产中推广应用;保加利亚于上世纪60年代起一直在研究开发磁粒光整加工技术,已经取得了可喜的成果,相关国际会议已定期在保加利亚举行;德国在这一方面也进行了研究并出版了一些论文集;日本自上世纪80年代中期开始进行了大量的研究,开发出适用于不同形状、不同材质的磁粒光整加工设备。从原理上说磁粒光整加工适用于平面、回转体、球面、管内壁、细小管、大型容器、异型管、自由曲面的光整加工。

磁粒光整加工与机械光整加工、电化学机械光整加工相比,虽然更容易实现自由曲面的自动化加工,但是其最致命的缺点是生产效率低,而且还受到磁粒制造水平的

制约。

由于各种光整加工方法都有各自的最佳应用范围，或多或少存在着不足或局限性。如何充分发挥各自的优势，扬长避短，既可以大幅度降低表面粗糙度值，又能提高加工效率，实现自由曲面自动化光整加工，为此各国研究者都在探求新型的光整加工新技术。

1.2 液体磁性磨具提出的背景

1.2.1 磁性液体概述

磁性液体是由纳米级（10 纳米以下）的强磁性微粒高度弥散于某种液体之中所形成的稳定的胶体体系。60 年代美国首先应用于宇航工业，后来逐渐转为民用，现已成为很庞大的产业，在美国、日本、德国等发达国家都有磁性液体公司，全球每年要生产磁性液体数百万吨。

磁性液体中的磁性微粒必须非常小，以致在基液中呈现混乱的布朗运动，这种热运动足以抵消重力的沉降作用以及削弱粒子间电、磁的相互凝聚作用，在重力和电、磁场的作用下能稳定存在，不产生沉淀和凝聚。磁性微粒和基液浑成一体，从而使磁性液体既具有普通磁性材料的磁性，同时又具有液体的流动性，因此具有许多独特的性质。

磁性液体的特殊性质开拓了许多新的应用领域，一些过去难以解决的工程技术问题，由于磁性液体的出现而迎刃而解。下面简单地介绍几种磁性液体应用。

1. 旋转轴动态密封 磁性液体旋转轴动态密封技术是磁性液体较成熟也是最重要的应用之一，现已广泛应用于 X-射线转靶衍射仪、单晶炉、大功率激光器、计算机等精密仪器的转轴密封。磁性液体在非均匀磁场中将聚集于磁场梯度最大处，因此利用外磁场可将磁性液体约束在密封部位形成磁性液体“O”型环，具有无泄露、无磨损、自润滑、寿命长等特点。

2. 扬声器 将磁性液体注入扬声器的音圈气隙对音圈的运动起一定的阻尼作用，并能使音圈自动定位，同时音圈所产生的热量可以通过磁性液体耗散，因此加

入磁性液体可以提高扬声器的承受功率,在同样结构条件下可使输入功率提高 2 倍,同时改善频率响应,提高保真度。磁性液体用于金属膜扬声器性能更佳。

3. 阻尼器件 利用磁性液体作为旋转与线性阻尼器,以阻尼不需要的系统振荡模式。与一般阻尼介质相比优点在于可借助外磁场定位。例如在步进马达中使用磁性液体阻尼来消除系统的振荡与共振,使马达精确定位。另外在防振台中使用磁性液体阻尼,可消除外界振动噪音的干扰,以确保精密仪器(天平,光学设备等)正常工作。

4. 选矿分离 利用磁性液体的表观比重随外磁场的变化而改变的特点,可用来筛选比重不同的非磁性矿物。比重差别在 10%左右的矿物可用此技术较好地分离,一般采用水基磁性液体,可重复使用。

5. 开关 水银和磁性液体装在一个不导电的容器中,利用外磁场改变水银在容器中的位置,来达到接通和断开电流的目的。

6. 精密研磨和抛光 磁性液体研磨是利用磁性液体的浮力将微米级的磨料悬浮于液体表面,与待抛光的工件紧密接触。不论工件的表面形状多么特殊,均可用此技术精密抛光。

7. 传感器 目前有两种商用磁性液体传感器:一种是在石油勘探工业中用来测量钻头的加速和倾斜,另一种是在建筑工业中用来检测地下管道的倾斜。

8. 其它应用 除此以外,磁性液体还在许多领域有着广泛的应用前景。如:磁性液体印刷、磁性液体薄膜轴承、声纳系统、磁性药物、细胞磁性分离、磁性液体人工发热器、磁性液体涡轮发电、光学开关,磁性液体刹车,等等。

1.2.2 磁流变液概述

磁流变液(Magnetorheological Fluid,简称 MRF)和磁性液体(Magnetic Fluid,简称 MF)是两个容易混淆的概念。虽然它们都是用磁性微粒分散在合适的液态载体中形成的,但由于悬浮粒子的尺寸范围不同,因而它们的物理特性和应用领域也不同^[34]。

从粒子材料和尺寸上说,磁性液体中悬浮粒子的直径在 1~10nm 范围内,通常

用合适的表面活性剂将悬浮粒子分散在液体中,由于粒子的尺寸小,布朗运动可以阻止粒子沉淀和团聚,其稳定性能好;而磁流变液,悬浮粒子的直径为 $0.1 \sim 500 \mu\text{m}$,粒子较大,布朗运动无法阻止颗粒沉淀和团聚,必须采取如表面包裹、复合等方法来降低整个颗粒的密度,提高材料的稳定性。从受外加磁场作用而表现出来的力学性能看,磁性液体的屈服应力变化通常在几 Pa 到几百 Pa 之间;而磁流变液的屈服应力变化通常可达数十 kPa,比磁性液体的控制范围大得多。再从二者应用角度看,磁性液体主要是利用其粘度变化进行物质分离,机械装置的承载和密封等;而磁流变液主要是利用其提供的大剪切力矩,制作阻尼器件,实现阻尼控制和力矩传递。

1948 年 Rabinow 最早发明了磁流变液及应用装置(离合器)。有趣的是这几乎是与 Winslow 发明的电流变液同时出现的,然而只有在此后的几年里出现的磁流变液的专利和论文比电流变液多,之后大部分的研究则集中于电流变液。由于电流变液的屈服应力较低,且存在高压安全性问题,因而自 1990 年以来磁流变液重新引起了研究者的兴趣。尤其是近几年来,国际上召开了 3 届电流变液与磁流变液研讨会,促进了磁流变液的研究与开发^[32]。

磁流变液在外加磁场增强的过程中,液体的粘度随之增大并最终失去流动性变为固态,此过程耗能小、可逆、能产生较大屈服应力且在毫秒量级内完成。利用此一系列性能,在充分考虑磁场、温度、颗粒尺寸、壁面效应和体积浓度等诸因素对应用器件影响的基础上,可以设计开发各种磁流变阻尼器件,主要有以下几类。

1. 阻尼元件 此类装置是磁流变液的最典型应用,由于能产生强大的阻尼力,且阻尼器可根据外部的振动不同自行调节磁场强度大小,来改变振动系统的阻尼和刚度,达到主动减振的目的。根据阻尼器尺寸和使用环境不同,可以研制出机械上用各类阻尼器和阻尼力可高达 20 吨力的建筑物减振器。
2. 控制元件 由于磁流变液相变的过程在毫秒量级内完成,因此可以做成敏捷度极高的控制元件,用于联接和传递两部件之间的力或力矩。如汽车用离合器、制动器等。另外,还可制成可控阀门控制液体的流动;做成柔性夹具控制和固定物体的形状及变化等。
3. 研磨和密封 在光学镜头的加工中,加工精度是制约镜头质量的关键因素和技

术,因此提高加工精度对镜头的最后形成和微表面粗糙度有着非常重要的意义。

1.2.3 磁流变液抛磨加工

磁流变液抛磨是一种磁场辅助的流体动力抛光技术。其加工对象主要是玻璃、陶瓷和非磁性材料。它可以克服传统抛光技术的某些限制,如抛光托盘需要定期修正以保证形状准确,在抛磨先进的光学形状(如非球面)时适应性差及成本高等。磁流变抛光不仅能纠正光学元件的形状误差,平滑度很小的微观不平度,而且加工中不产生表面和次表面损伤。这里以抛光球形表面工件来说明其基本原理(图 1-1),将含有微米磁性颗粒磨料的水基磁流变液置于旋转的托盘内,工件安装在旋转的主轴上,旋转托盘将磁流变液送到工件的表面,在工件的附近施加直流磁场,则磁流变液在此处变硬,并被拖入由工件和托盘构成的间隙中。在与工件接触的小区域上产生较高的切应力,使工件表面得以抛磨。主轴由程序控制进行偏转,使工件表面扫过高切应力区域,从而整个工件得以抛光。工件在每个位置的停留时间决定了材料的磨削量。这种工艺特点是流体磨具表面具有可控性和与工件表面的一致性,抛光区域内磁流变也不断的更新,磨削及热传递具有连续性。磁流变抛光已成功应用于精度极高的光学表面的抛光,可将光学材料表面的微观不平度减小到 $0.001\ \mu\text{m}$ 以下。各种光学表面形状(包括非球形面)已用多种不同质地的材料抛出。Kordonski 和 Jacobs 等人对磁流变抛光的微观机理作了实验研究,分析了这种工艺的优点,就多种磁流变抛光装置和方法申请了专利。Kordonski 利用 Bingham 流体理论所作的分析表明,粘在移动托盘上的核(未剪切的流体)的形成导致了工件表面极高的应力。他们还研究了工件表面应力与材料磨削量的关系。Jacobs 在改进磁路、流体传输系统和计算机控制软件的基础上设计了一种新型抛光机,磁流变液位于竖直安装的轮缘上。操作者无需专门工具,就能对凸、凹、平及非球形的玻璃表面进行自动抛光加工。文献讨论了磁流变抛光技术对磁流变液特性的要求,并介绍了一种流体传输与处理系统。

Jacobs 还对抛光玻璃、陶瓷、塑料和其他非磁性材料的“标准”磁流变液进行了分析,找出其在抛光磁性材料时的局限性,对其组成加以改进,通过实验证实改进的磁流变液在抛光磁性材料方面也取得了同样的效果。此外, Kordonski 还提出用含有磨料的磁流变液在磁场中形成具有高瞄准度的硬化喷射流,用于工件成型或抛光。

张峰介绍了磁流变抛光技术的产生和发展背景、抛光机理和数学模型。

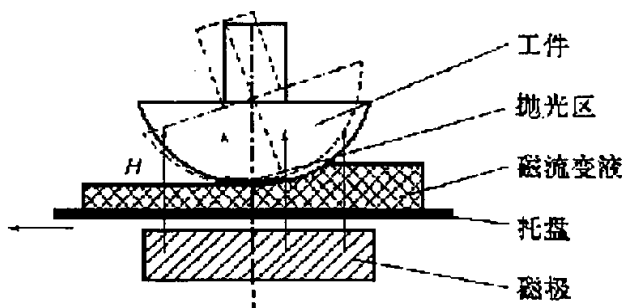


图 1-1 磁流变液抛光装置

Fig.1.1. Schematic view of magnetorheological finishing

1.3 液体磁性磨具概念的提出

随着磁流变抛光技术在陶瓷、玻璃等非金属领域内的广泛应用，光整行业内则产生了新的想法，那就是金属类零件表面特别是非规则表面的是否能够用一种新的加工方法或者说能否用类似加工非金属材料的方法来加工？

目前，一些对金属零件表面的传统加工工艺在提高表面质量和对被加工表面适应性方面均有一定的限制。这些工艺对异型表面加工、对在线细长金属丝表面光整加工均难以达到较高的要求，这是由于大部分传统加工工艺所用的磨具是固体的，这些磨具不易随着工件表面形状的变化而变化。因此研究和开发适用范围广、具有自适应能力的柔性精密表面光整加工技术是一项迫切任务，这种技术的研究成功将对提高工件表面的质量起到促进的作用。

基于磁流变这种智能材料的相变特性，我们提出一种新型精密光整加工方法——液体磁性磨具光整加工方法。就是研制一种具有磁性液体的相变特性和磨粒的切削性能的液体磁性磨具。利用液体磁性磨具在无外加磁场作用下表现出良好的流体特性，能与工件表面充分接触，一旦施加外部磁场，在磁场的作用下，它的粘度会在毫秒级的时间内增加两个数量级以上，表现出类似固体的特性，把磨粒压在工件表面上，这样就可以自动依据工件表面的形状生成一个研磨层，通过工件与研磨层的相对运动，实现磨粒对工件的微量磨削，从而达到提高工件表面质量的目的。

目前我们进行了探索性试验，在实验室条件下利用电磁技术、精细化工技术置

备了液体磁性磨具，并研制出一套加工装置，通过对铝件、45#钢件、40Cr 工件外表面加工，实验证明，这种将最新的智能材料技术、电磁技术及精细化工技术应用于光整加工领域是有效的（铝件的表面粗糙度达到 $0.05\ \mu\text{m}$ ），能加工金属材料，适应于机械制造领域。

液体磁性磨具光整加工作为一种柔性表面光整加工技术，具有一些传统刚性表面光整加工技术所无法比拟的优点：

1. 适用于加工各种不规则形状的机械零件表面和型腔；
2. 加工后表面质量好，表面粗糙度的值较低；
3. 液体磁性磨具在加工中对工件没有腐蚀或腐蚀小；
4. 液体磁性磨具光整加工是柔性加工，加工过程中不会在工件表面、次表面留下残余应力、微观裂纹等表面缺陷；
5. 易于实现微机数控。

1.4 本课题主要研究内容

目前我们已对液体磁性磨具的光整加工可行性进行了探索性的研究，试验结果表明，用液体磁性磨具对工件表面进行光整加工是确实可行的，试验中还对在加工过程中一些参数对加工质量及加工效率的影响进行了研究。

本课题将在目前的研究基础之上，进一步对液体磁性磨具的物理性能、加工机理、参数对加工效率的影响等方面进行进一步的研究，以及提出一些用液体磁性磨具对一些较复杂表面进行加工的加工模式和设备的模型，从而为液体磁性磨具尽快转变为生产力做一些必要的准备。本课题的主要研究内容：

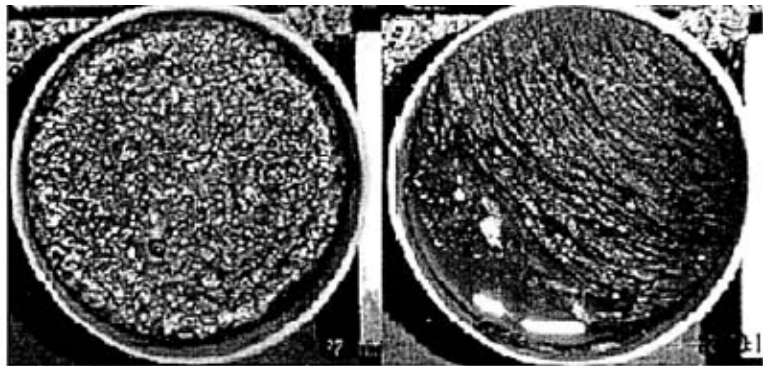
1. 对液体磁性磨具的粘度、密度、磁饱和强度、剪切强度等一些物理性质进行量的研究，设计二到三种试验测试仪器，力争得到液体磁性磨具的一些较为准确物理性质的数据来；
2. 进一步研究加工参数对加工质量和加工效率的影响，提出并确定液体磁性磨具光整加工的最佳工艺参数；
3. 根据研究的结果提出几种对复杂零件表面进行光整加工的模式构想，为液体磁性磨具光整加工技术的开发打一些基础。

第二章 液体磁性磨具

2.1 液体磁性磨具的概念

液体磁性磨具是指在液态载体中加入磁性微粒、稳定剂和一定比例和粒度的磨料,经过充分的搅拌,使磁性微粒与磨料能均匀地分布于液态载体中,而形成的一种流体状物质。在没有外部磁场的情况下,它和一般牛顿流体一样具有良好的流动性;而在磁场作用下可以在短时间(毫秒级)内由流动良好的牛顿流体变为宾汉姆体(Bingham),实现了由液态到“固态”的转变;当去掉外部磁场时又迅速恢复为流体状态。液体磁性磨具所具有的连续、可逆、迅速、易于控制的流变特性,使其类似于一个“柔性”砂轮,能够让磨具与不同型面的零件很好地贴合在一起,然后再加以一定的相对运动就可以实现对工件的表面光整加工。

将适当比例的磁介质微粒、非磁性的磨粒、载液和活性剂混合在一起。经过一段时间的搅拌,使磁介质微粒和非磁性的磨粒都均匀地分布在载液中。这样,我们便配制出液体磁性磨具。将液体磁性磨具样品静态放置一段时间来考察液体磁性磨具的稳定性。在加工过程中,不断地搅拌液体磁性磨具,可以使非磁性磨粒和磁性微粒均匀地分布于液体磁性磨具中,以免出现凝聚和沉淀现象。图 2-1 则是液体磁性磨具在零磁场下和施加磁场下的状态图:



a) 零磁场时 (at zero magnetic fields) b) 施加磁场后 (applied of external magnetic field)

图 2-1 液体磁性磨具施加磁场前后的对比

Fig.2.1. Contrasts of liquid-magnetic abrasive tool between working state and off working state

2.2 液体磁性磨具的组成

液体磁性磨具是尺寸为微米级的磁介质微粒和一定粒度的磨料按一定比例分散于载液中，并加入少量的活性剂，经过充分的搅拌配制而形成较稳定的悬浮液。因此，液体磁性磨具主要由四部分组成：分散相的磁性微粒、磨粒、连续相的基载液和稳定剂（活性剂）。

2.2.1 液体磁性磨具组分的选择原则及其性能的影响

1. 磁介质微粒

有两个公式对磁介质微粒的选择有重要的指导作用。下面对这两个公式进行简单的介绍。

Jolly 等的研究表明^[3]，在假设颗粒的磁偶极矩相同，相互吸引的颗粒沿磁场方向成直线分布，且只有平行于磁场的相邻颗粒之间才存在相互吸引作用的条件下，液体磁性磨具的剪切屈服强度可以表示为 σ

$$\sigma = \frac{9\phi\epsilon(4-\epsilon^2)|m|^2}{2\pi\mu_1\mu_0d^3r_0^3(1+\epsilon^2)^{7/2}} \quad (2-1)$$

式(2-1)中， ϕ 为颗粒的体积含量； d 为颗粒的直径； r_0 为颗粒中心的间距； ϵ 为颗粒间的剪切应变； m 为颗粒的磁偶极矩； μ_0 真空磁导率； μ_1 为磁介质微粒的磁导率。

另外，由 Stokes 公式知，在重力作用下能无限扩展的牛顿流体中，单一球形粒子的沉降速度的理论计算公式为^[4]：

$$V = \frac{2a^2(\rho - \rho_0)g}{9\eta} \quad (2-2)$$

式(2-2)中， V 是沉降的速度； a 是球体的直径； ρ 是球体的密度； ρ_0 是母液的密度； g 是重力加速度； η 是母液的表观粘度。在同等条件下，颗粒的体积越大，其沉降稳定性越差，但颗粒的体积越小，液体磁性磨具所具有的理论剪切屈服强度越低，因此为了得到剪切强度高、沉降稳定性好的液体磁性磨具必须恰当选择磁性颗粒的体积。

由上面两个公式及磁性微粒的基本性质知，磁介质微粒的选择原则主要有以下几点要求：

①式(2-1)表明高剪切屈服强度的液体磁性磨具中的磁介质微粒应该具有高饱和磁化强度和较大直径的特征;

②高磁导率,这可以使颗粒在较小的磁场作用下,便可产生较大磁偶极矩,从而使液体磁性磨具具有较高的剪切屈服强度;

③低磁矫顽力,即在零磁场作用下,颗粒基本不存在剩磁。这是磁流变液可以恢复零磁场状态的要求;

④磁滞回线狭窄、内聚力小,这是液体磁性磨具流变低能耗的要求;

⑤体积适当。

目前,通常使用四氧化三铁(Fe_3O_4)、赤铁矿($\gamma-Fe_2O_3$)、铁氧体、稀土合金及羰基铁作为磁介质微粒,但是相比较而言,羰基铁的磁导率高,低磁矫顽力,因此在实验中成为被使用最多的一种磁介质微粒。本课题的实验中所用的磁介质微粒都是羰基铁。

2. 基载液

基载液是液体磁性磨具的主要载体,其性能对液体磁性磨具有直接的影响,一般来说,液体磁性磨具的基载液的选取:应立足于满足低蒸发率、低粘度和高度化学稳定性的要求。

低蒸发率。这可以确保液体磁性磨具的组分稳定,从而保证液体磁性磨具具有较好地稳定性;

适宜的粘度。液体磁性磨具的零磁场条件下应具有较低的粘度,要求基载液的粘度越低越好,但是粘度越低,沉降稳定性越差,因此载液的黏度选择对液体磁性磨具稳定性至关重要;

基载液还应该具有化学稳定性好、无毒、无异味、价格低廉等特点。同时还应满足基载液对工件无腐蚀性的要求。

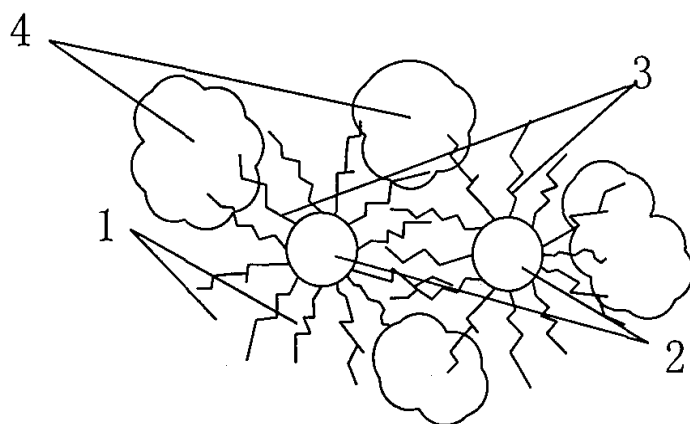
基载液一般为非导电性液体,如水、煤油、酯、硅油、醚等,但有时也可以是导电的液态金属,如水银。

目前我们试验中所用的基载液主要是水,这主要是因为水价格低廉,化学性能稳定,粘度低、对环境的污染小等优点,便于大规模工业化生产。

3. 表面活性剂

载液的密度一般为 1g/cm^3 左右, 而磁介质微粒的比重为 $7-8\text{g/cm}^3$ 。由于磁介质微粒的比重远远大于基载液的比重, 加之磨粒的比重也大于载液, 因此悬浮颗粒在基载液中非常容易发生沉降。此外, 悬浮颗粒的直径一般仅为几个微米, 表面积很大, 所以也很容易结团而后发生沉降。而目前, 解决此类沉降最为有效的方法就是添加不同类型、一定剂量的表面活性剂, 也就是稳定剂。

表面活性剂是仅需很小浓度就可大大改变溶剂(或悬浮颗粒)表面性质的物质, 它经常被用来降低不相容两相间的界面能。表面活性剂一般是亲油基和亲水基这两种性质不同的结构组成的低聚物, 它的亲水基可以吸附在磁性颗粒的表面, 而亲油基象“鞭梢”一样扩散在载液当中。磁性颗粒吸附表面活性剂以后, 由于亲油基的“鞭梢”相互缠绕及排斥, 一方面会增加颗粒的体积, 减少它们相互吸引碰撞的机会, 另一方面会在载液内部形成一个相互作用的三维骨架, 而磨粒则嵌附于这些骨架之中, 从而降低由于颗粒与载液的比重差而造成的颗粒沉降。



1 基载液; 2 磁介质微粒; 3 表面活性剂; 4 磨粒

1. Carrier 2. Magnetic particle 3. Surfactant 4. Abrasive particle

图 2-2 表面活性剂在液体磁性磨具中的作用

Fig.2.2. Action of surfactant liquid-magnetic abrasive tool

图 2-2 是液体磁性磨具表面活性剂的原理示意图。从图中可以看出: 具有长链结构的表面活性剂分子一端吸附在磁介质微粒的表面, 另一端分散于基载液中, 吸附层

的厚度由表面活性剂分子的链长决定^[8],磨粒则嵌附于这些磁介质微粒之间。

为了验证表面活性剂与磨粒是否发生吸附作用,我们做了试验:在 150ml 的水中加入 6 克的表面活性剂十二烷基磺酸钠,再加入 100 克 80[°]的绿碳化硅,用搅拌器在 900r/min 的情况下,搅拌 3 个小时之后,磨粒未能够悬浮于载液中。由于活性剂的亲水基和亲油基一般不和磨粒发生吸附作用,因此液体磁性磨具悬浮颗粒之间的作用力主要来源于磁介质微粒之间的作用力,在这里有必要将磁介质微粒之间的作用力进行分析。图 2-3 是在表面活性剂作用下磁介质颗粒之间作用能的计算简图。对于的两个直径相等的球形颗粒,由范德华引力所产生的吸引势能 U_v 为:

$$U_v = -\frac{A}{6} \left[\frac{2}{f(f+4)} + \frac{2}{(f+2)^2} + \ln \frac{f(f+4)}{(f+2)^2} \right] \quad (2-3)$$

式(2-3)中, A 为 Hamaker 常数,其值大约为 10-19N.m 数量级; $f = \frac{r_c}{R} - 2$, r_c 为颗粒中心的间距, R 为颗粒的半径。式(2-3)表明,颗粒间范德华引力作用随颗粒间距减小,迅速增大。

而当以上两颗粒相互靠近时,由表面活性剂所产生的排斥势能 U_r 为

$$U_r = 2\pi R^2 N_s kT \left\{ 2 - \frac{f}{t} - \frac{f+2}{t} \ln \frac{1+t}{1+f/2} \right\} \quad (2-4)$$

式中, N_s 为单位颗粒表面所吸附的表面活性分子数; k 为波耳兹曼常数; T 为温度; t 为表面活性剂的厚度。计算表明,当表面活性剂的厚度达到一定程度后,其产生的排斥力就可以与范德华引力相平衡,可以有效地避免颗粒的接触结团,从而可以提高悬浮液的稳定性。

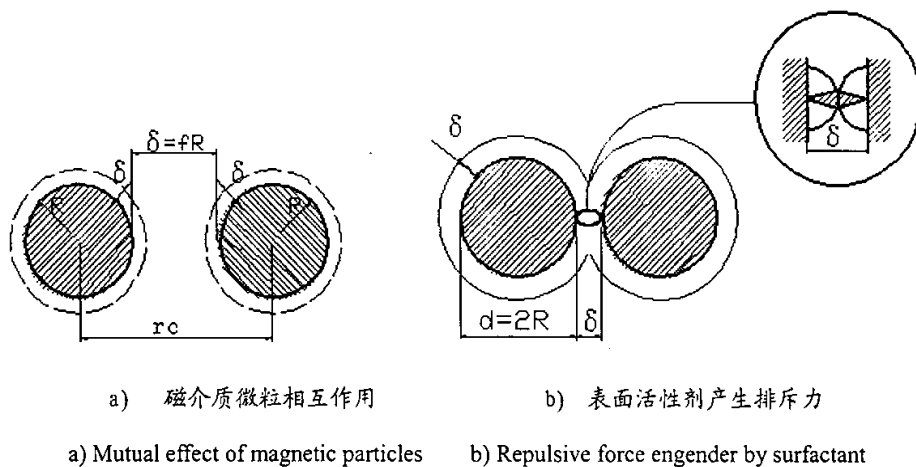


图 2-3 悬浮颗粒相互作用计算简图

Fig.2.3. Calculating diagram of mutual effect of magnetic particles

虽然表面活性剂的选择主要依据经验和实验,但其基本原则是“相似相溶”,即尽量选择,亲水基与颗粒的结构相近,而亲油基与母液的结构相近^[4]。

目前,液体磁性磨具常用的表面活性剂有 OP 乳化剂、十二烷基磺酸钠、酯类以及聚醚基等,而其掺量和复合作用主要依据试验。

4 磨粒

在液体磁性磨具中,磁性液体是磨粒的载体,而磨粒是对工件表面进行光整加工的。磨粒是磨具的主要组成部分,磨粒的材料和大小对磨削力、功率消耗、磨损、工件表面质量都有很大影响。常用的磨粒材料有氧化铝(Al_2O_3)、天然或合成金刚砂、立方氮化硼(CBN)、绿碳化硅(SiC)等。一般来讲磨粒越小,被加工表面质量越好,切向力也小。因而,磨粒的选择及其配制比例将对液体磁性磨具的加工性能和加工效果产生很大的影响,同时磨粒比例和粒度对液体磁性磨具的沉降性也有一定的影响。

通常情况下,磨粒应当满足以下几个条件:

1. 磨粒需要具有很高的硬度和锋利度,直接参与切削,硬度是磨料的基本性能。磨削作用是通过磨料刻划工件表面完成的。为此,磨粒要能切入工件,其硬度必须高于工件的硬度。磨粒的显微硬度比较列于后:

磨料种类	显微硬度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
棕刚玉	$(1800-2200) \times 9.8$
绿碳化硅	$(3200-3400) \times 9.8$
人造金刚石	$(8600-10600) \times 9.8$

2. 需要一定的韧性和耐磨性，来承受剧烈的挤压和摩擦力作用；
3. 需要一定的脆性，以便磨钝后，及时更新切削锋刃，实现自锐性；
4. 还需要有较稳定的物理和化学性能，使之在高温和湿度环境下，不过早地丧失磨削性能。

2.2.2 液体磁性磨具的制备

为了使我们的研究更具有推广价值，我们试验阶段所用的载液基本都是水，而且实践也证明，用水为基载液的液体磁性磨具，是可以满足加工要求的。

通过对目前所查阅的大量的资料进行分析，认为羧基铁磁饱和强度大且剩磁较小，化学性质比较稳定，因此用之做磁介质微粒较合适。

通过我们以前的探索性试验和资料检索，发现用绿碳化硅硬度较高，较适合对金属的加工。根据表面质量高低要求不同，选用 54 $^{\circ}$ 、80 $^{\circ}$ 和 120 $^{\circ}$ 不同规格的磨料。

为了找出合理的液体磁性磨具的配比来，依据表面活性剂选择原理，采用相同的基载液和磁介质微粒以及磨料，用不同的进行稳定剂配给进行了几组实验。

液体磁性磨具配置过程中，使用的工具主要为电子搅拌器及加热器，如图 2-4 所示：

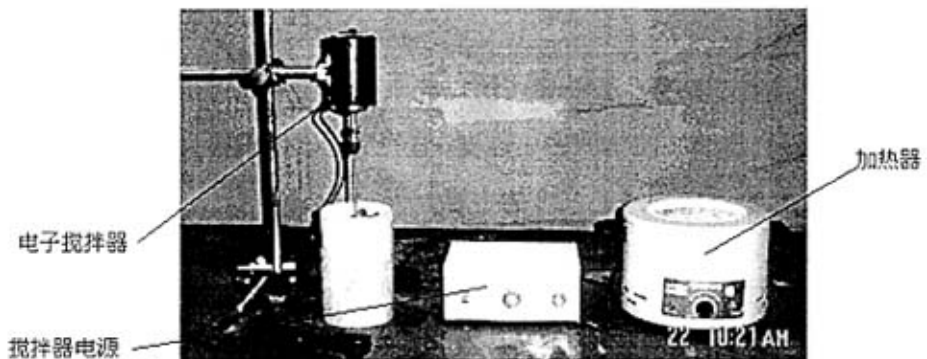


图 2-4 配置液体磁性磨具所用工具

Fig.2.4. Tools for making up Liquid-magnetic abrasive tool

经过我们多次试验,配置出一种较适合加工的液体磁性磨具。配制工艺为:称取十二烷基磺酸钠 5.9g,加入 200ml 纯净水中,在加热器上加热至完全溶解,再加入牌号为 RXe 的 270g 羰基铁粉,绿碳化硅(80[°]) 300 克,乙醇 2 克,用电子搅拌器搅拌 6 小时,转速为 1000rpm,静置 48 小时,基本无沉淀。

我们研制出液体磁性磨具,其重量比配方为:35%的羰基铁,25.6%的水,38.5%的绿碳化硅,0.5%的稳定剂,乙醇为 0.18%。

2.3 液体磁性磨具的流变机理

流变性是液体磁性磨具重要的特征之一。液体磁性磨具是由高磁导率、低磁滞性的微米级软磁性颗粒和非导磁性液体及磨粒组合而成的悬浮体,它具有在零磁场作用下为牛顿流体,而在强磁场作用下为 Bingham 体的特性。

由于液体磁性磨具的流变效应来源于磁化后的颗粒形成的磁偶极子的相互作用,因此磁性颗粒的物理性能是影响剪切屈服强度的主要因素之一。液体中的颗粒产生磁偶极矩,通过磁偶极子之间的相互作用,为了达到能量最小要求而形成链,随着外加磁场的强度加大,使这种链状结构进一步发生聚集,形成复杂的团簇结构,这种微观结构上的变化直接导致了液体流变性质的变化。

磨料颗粒为非磁性物质,它们在磁场中不会被磁化,虽然不能与磁性粒子那样产生磁偶极子作用,但它们由于在无磁场前已先均匀的分散于液体磁性磨具中,所以在施加外加磁场后,便会被均匀挟持在磁性粒子形成的链状和柱状结构之间;而且由于这些链状和柱状结构十分稳定,所以非磁性磨粒不能自由移动。

研究表明,磁介质微粒的饱和磁化强度、直径大小、体积掺量以及外加磁场的大小是决定液体磁性磨具剪切屈服强度的主要因素。

2.3.1 磁流变液流变性的两种理论

液体磁性磨具的流变性是液体磁性磨具的一个重要特征,而其流变性正是液体磁性磨具应用磁流变液的特性之一,因此有必要在此对磁流变液的流变性进行阐述。

Shulman^[2]假设在磁场中,磁流变液中的磁性微粒积聚成许多与磁场方向成一定

角度，彼此之间无相互作用的椭球状聚合体。以此为前提条件，他们推导出了磁场中磁流变液剪切应力的表达式：

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \mu_0 H^2 \phi_a \alpha \frac{\chi_a^2}{2 + \chi_a} \quad (2-5)$$

式(2-5)中： η_0 为磁流变液的初始粘度； $\dot{\gamma}$ 是剪应变率； μ_0 为真空磁导率； H 为磁场强度； ϕ_a 为磁流变液中聚合体的体积浓度； α 为椭球聚合体的长轴方向与磁场方向的夹角； χ_a 是磁性微粒聚合体的磁化率。该表达式等号右边的第二项可以 τ_0 用来表示，它代表磁场中磁流变液的屈服应力。因此该模型中的剪切应力 τ 的表达式与Bingham介质剪切应力 τ 的表达式有相同的形式，从而在理论上证明了磁场中磁流变液具有Bingham介质的性质，并被后来的试验所证实。这为我们研究液体磁性磨具的光整加工机理奠定了理论基础。

Ginder等人^{[6][7]}对磁流变液中的磁性微粒形成的链状结构进行分析，得出磁流变液的最大屈服应力为：

$$\tau^{sat} = \frac{4}{5^{5/2}} \xi(3) \phi \mu_0 M_s^2 \quad (2-6)$$

式(2-6)中： τ^{sat} 为磁流变液的饱和屈服应力； $\xi(3)=1.202$ （常数）； ϕ 是磁流变液中磁性微粒的体积比浓度； μ_0 为真空磁导率； M_s 为磁性微粒的磁饱和强度； $\mu_0 M_s$ 表示磁性微粒的磁饱和。从公式中可以看出，当磁流变液的体积比浓度一定时，选择磁饱和强度高的材料制作磁性微粒，就有可能是配置的磁流变液获得较大的饱和屈服应力，从而得到具有较高流变性的磁流变液。Ginder这一理论对我们配置液体磁性磨具时，如何选择磁介质微粒具有重要的指导意义。

2.3.2 屈服应力与磁感应强度的关系

当磁流变液未达到饱和即 $\tau_y < \tau^{sat}$ 时，屈服应力 τ_y 可用磁感应强度 B 的幂函数形式表示^[14]：

$$\tau_y(B) = \alpha \times B^n \quad (2-7)$$

其中 α 为常数, 幂指数 n 通常为 1~2 之间的数值。

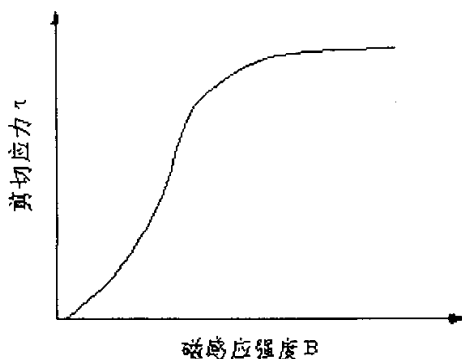


图 2-5 剪切应力 τ 与磁感应强度 B 关系

Fig.2.5. Relation in shearing strength and magnetic induction intension

由公式 (2-6) 和 (2-7) 可得到剪切应力 τ 与磁感应强度 B 的关系如图 2-5 所示。

从图中可看到当磁流变液未达到磁饱和状态时, 剪切应力随磁感应强度的增加而呈指数性增加; 当磁流变液达到磁饱和状态时, 剪切应力也趋于一个极限值而不再增大。在流变性方面液体磁性磨具和磁流变液性质相似, 因此, 在液体磁性磨具光整加工过程中可以通过控制磁感应强度的大小来控制液体磁性磨具剪切应力的大小, 进而控制零件表面切削加工力的大小。

2.3.3 结论

总之, 从以上讨论可知, 影响液体磁性磨具屈服应力的因素有如下几个方面:

(1) 磁性微粒饱和磁化强度 M_s Ginder^[6]通过有限元分析得到当磁性微粒完全磁饱和时, 液体磁性磨具的最大屈服应力 τ^{sat} 与 M_s^2 即磁性微粒的饱和磁化强度的平方成正比。因此选择微粒时应选择具有较大饱和磁化强度的材料。

(2) 磁感应强度 B 在未达到磁饱和时, 液体磁性磨具的屈服应力 τ_y 随磁感应强度 B 增大而迅速增加, 这种定性关系已被较多的实验数据曲线所证实。Bossis^[9]推导出液体磁性磨具屈服应力与体积分数和磁场强度的定量关系为: $\tau_y \propto \phi B^2$ 。Felt^[10]也通过实验研究发现: $\tau_y \propto B^2$ 。陈祖耀^[11]对液体磁性磨具的流变学测量表明屈服应力 τ_y 与 $B^{3/2}$ 成正比。以上这些结果均与式 (2-7) 的结论相一致。

(3) 磁性微粒体积比浓度 ϕ Felt^[10]和潘胜^[12]通过实验发现, 液体磁性磨具的屈服应力与磁性微粒体积比浓度成正比。Kordonski^[13]的实验研究表明, 对于较小的磁场强度, 当 $10\% \leq \phi \leq 40\%$ 时, 液体磁性磨具的屈服应力几乎与磁性颗粒体积比浓度无关; 当 $\phi \geq 40\%$ 时, 屈服应力有随磁性微粒体积比浓度增大而线性增加的趋势。因而在施加较小磁场时, $\tau_y = f(\phi)$ 的曲线上有一段屈服应力对体积比浓度不敏感的区域^[14]见图(2-5)。对于较强的磁场强度, 在 ϕ 的整个范围上, 屈服应力随磁性微粒体积比浓度增大而线性增加。

(4) 磁性微粒的直径 Felt^[10]和 Kordonski^[13]通过实验发现, 液体磁性磨具的屈服应力与磁性颗粒直径成正比。Lemaire^[15]通过实验发现, 当颗粒直径较小($0.5 \sim 1 \mu\text{m}$)时, 屈服应力随颗粒直径的增加而大大增加, 只有当颗粒直径较大($25 \sim 45 \mu\text{m}$)时, 屈服应力才与颗粒大小无关。

2.4 磁性液体抛光液中磁介质微粒和磨粒的分布情况

由于各方面的原因, 我们目前在液体磁性磨具中磁介质微粒和磨粒在有和无磁场情况下的分布情况还没有进行细致的研究。但是国外的一些学者已就磁性液体抛光液中的磁介质微粒和磨粒的分布情况进行了较为详细的研究。

2.4.1 Noritsugu 的研究结果

日本学者 Noritsugu^[16]等人在此方面作了一些研究。为了能观察到磨料在磁流变抛光液中的分布情况, 他们将磨料倒入两玻璃片之间, 两玻璃片的距离为 $100\mu\text{m}$, 然后在玻璃片中心分别施加平行于玻璃表面和垂直于玻璃表面的两个方向的磁场。观察在 200Oe 、 600Oe 、 1000Oe 不同磁场强度下磨料在磁流变抛光液中分布情况。

通过显微镜就能清楚地看到在平行于玻璃面的磁场下磨料分布情况如图 2-6, 图中黑色的部分是磁性粒子, 白色部分为磨粒。由图 2-6 我们能过看出磁性颗粒沿着磁场的方向成为一些束状链, 而磨料也在剩余的面积中组成束状, 随着磁场强度的加大这些束状粒子团变得更细更均匀。

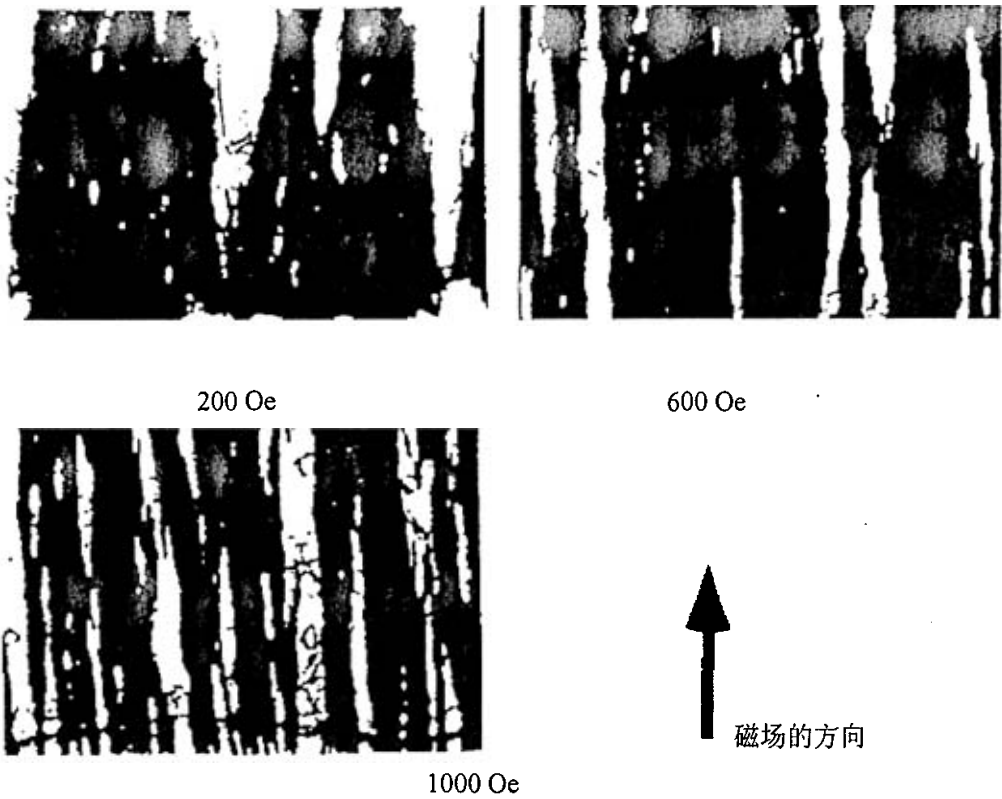


图 2-6 平行于玻璃面的磁场下磨料分布情况

Fig.2.6.The distribution of abrasives applied magnetic field in the parallel direction to the glass plates

在垂直于玻璃表面的磁场下，磨料的分布如图 2-7。由图 2-7 可以看出随着磁场强度的加大，磁性液体中的磁性粒子团所占的面积逐渐减小。磁性粒子团的平均直径和磨料粒子团的平均直径也随着磁场强度的增加，逐渐变小，磨料在磁性液体抛光液中的分布也逐渐变得均匀。

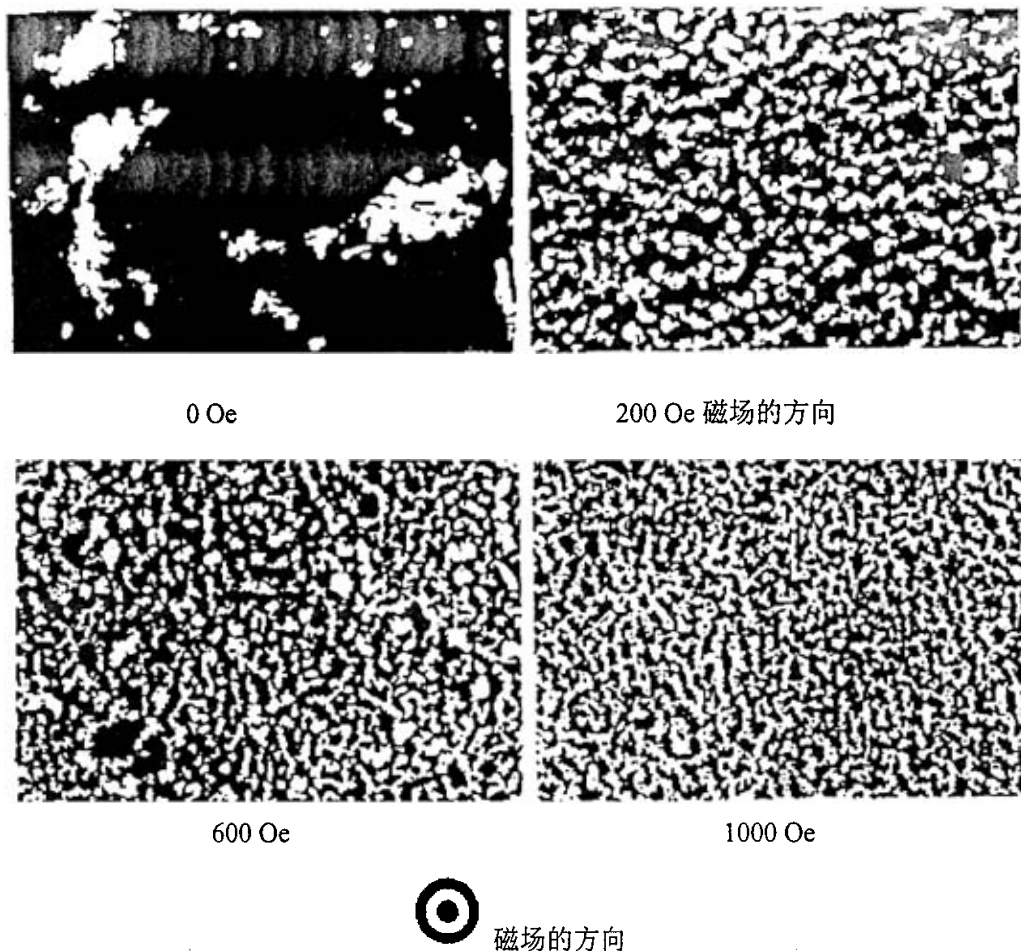


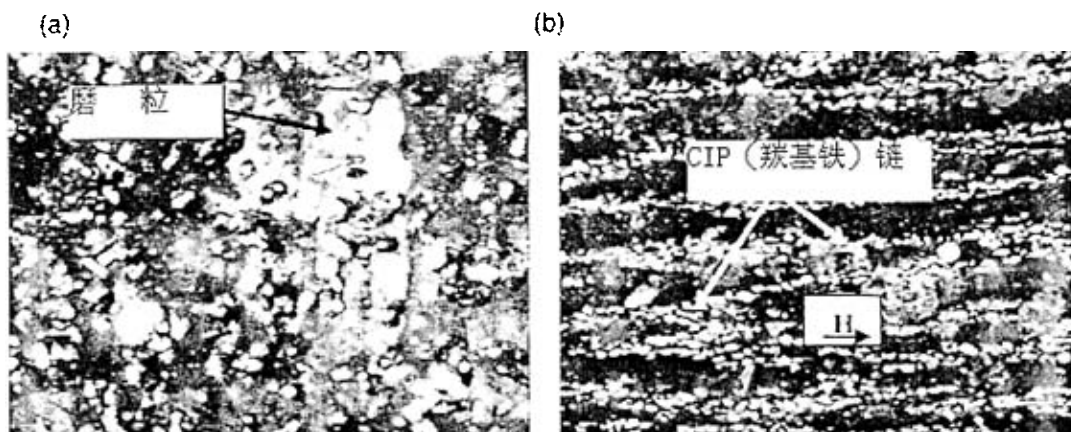
图 2-7 磨料在垂直于玻璃表面的磁场影响下的分布情况

Fig.2.7.The distribution of abrasives applied magnetic field in the perpendicular direction to the glass plates

2.4.2 Sunil Jha 的研究结果

印度学者 Sunil Jha 等人^[17]用光学显微镜对磁性液体抛光液进行了研究。在无外加磁场下，磨粒均匀的分布在磁性液体抛光液中。施加外部磁场后，羧基铁磁性微粒（CIP）沿磁场方向形成像柱状结构那样的链条，磨粒则嵌附于这些结构之间。图 2-8（a）（b）分别显示了在无磁场和有磁场情况下磁性抛光液在显微镜下的粒子分布状况的照片。照片不仅清晰的反映了羧基铁磁性微粒和磨粒的分布情况，而且也可以清楚地看出施加磁场后柱状链的结构。

由磁性粒子包含磨粒而对磨粒形成的束缚力的大小取决于磁性微粒的浓度、外加磁场的强度、磁性微粒的磁饱和强度以及磨粒的大小。



a) Abrasives & Carbonyl iron particles at zero magnetic fields;

b) Abrasive particles embedded in Carbonyl iron particle chains on application of external magnetic fields.

a) 在没有磁场时羰基铁和磨料微粒的分布情况 b) 有外加磁场时磨粒被包埋于磁性微粒形成的柱状链之间

图 2-8 磁性抛光液柱状链的形成

Fig.2.8. Chain formation in magnetorheological polishing fluid

第三章 液体磁性磨具的物理性质

3.1 液体磁性磨具的密度

液体磁性磨具的密度是液体磁性磨具的重要性质之一。它不仅是液体磁性磨具在光整加工中的重要数据,而且可以用它来计算液体磁性磨具中磁介质微粒的含量,同时液体磁性磨具的密度与其磁饱和强度有一定的关系。

如果认为液体磁性磨具的体积是其各组分体积之和的话,就可以将液体磁性磨具的密度写成下式:

$$\rho = \rho_s \varphi_s + \rho_a (\varphi_h - \varphi_s) + \rho_c (1 - \varphi_h) \quad (3-1)$$

其中, ρ_s 为固体相的密度, 固体相包括磨粒相和磁介质微粒相

ρ_a 为表面活性剂的密度

ρ_c 为载液的密度

φ_s 为固体相的体积百分比

φ_h 为表面活性剂和固体相体积百分比之和

当知道各种组分的体积百分比时,我们就可以确定液体磁性磨具的密度,此公式在我们对液体磁性磨具的密度进行估算是非常容易的^[18]。

在实验中,羰基铁的松装密度为 3.32g/cm^3 ; 绿碳化硅的松装密度(80#)为 1.58g/cm^3 ; 表面活性剂十二烷基磺酸钠的松装密度为 0.578g/cm^3 。根据我们配置的液体磁性磨具的重量比换算为体积比,则羰基铁的体积比为 16.9%; 绿碳化硅的体积比为 39.4%; 十二烷基磺酸钠的体积比为 2.1%; 载液水的体积比为 41.5%; 乙醇的体积比为 0.1%。由公式 3-1, 液体磁性磨具的密度估算为 1.55g/cm^3 。

我们测量液体磁性磨具的密度是用液体比重计,我们测得的液体磁性磨具的密度是 1.36g/cm^3 ,这和我们估算的值有一定的差距,主要因为实验测得的羰基铁、绿碳化硅及表面活性剂十二烷基磺酸钠的松装密度值,和它们的密实值存在一定的差距。

另外, 当磁场一定时(线圈的电流一定), 不同液层液体磁性磨具的表观密度随着液体磁性磨具深度的不同而不同, 深度增加, 表观密度增大^[19]。另外当磁场增大时, 可以得到不同的随磁场变化的液体磁性磨具表观密度。

3.2 液体磁性磨具的初始粘度

3.2.1 液体磁性磨具的初始粘度

流体流动时, 由于流体与固体表面的附着力、流体内部分子间的作用以及流体质点之间的动量交换, 流体质点必然会发生剪切变形, 而流体的粘滞性就是流体抵抗剪切变形的能力。粘度是流体粘滞性的度量, 用以描述流动时的内摩擦。

零场粘度 η_0 也是初始粘度, 是未加磁场时液体磁性磨具的粘度值。剪切应力与剪切应变率成线性关系。所以, 未加磁场的情况下, 液体磁性磨具呈现牛顿流体的性质, 符合牛顿定律, 可由下式描述:

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} \quad (3-2)$$

式中: τ 为剪切应力, 也就是单位面积的摩擦力; η_0 为液体磁性磨具的零场粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切应变率, 它等于流动速度沿流体厚度方向的变化率。对于牛顿流体, η_0 为常数。磁介质微粒的物理性能、体积比浓度以及基载液和表面活性剂的选择都直接影响液体磁性磨具初始粘度 η_0 的大小。

液体磁性磨具的初始粘度决定其在零磁场下的流动性, 若初始粘度较低, 则液体磁性磨具的流动性较好。对于液体磁性磨具用于光整加工来说, 我们要求其初始粘度较低, 这样不仅有利于液体磁性磨具中的磁介质微粒和磨粒的自由流动, 而且液体磁性磨具就具有良好的流动性及均匀性, 在施加磁场后, 对工件表面的光整加工效果就会比较理想。

3.2.2 液体磁性磨具粘度的测量

粘度是液体磁性磨具的重要性质之一。在液体磁性磨具光整加工中, 液体磁性磨具粘度的大小与液体磁性磨具中磁介质微粒和磨粒所占的体积比有直接关系, 因此我们有必要对液体磁性磨具的粘度进行测量。

一般来讲，测量液体粘度的方法有三种，落球法、转筒法和毛细管法。这里简要介绍一下落球法和转筒法。

1. 落球法

当半径为 R 的光滑圆球，以速度 v 在无限宽广的液体中运动时，若速度不大，球也很小，在液体中不产生涡流的情况下，斯托克斯指出，球在液体中受到的阻力 $F=6\pi\eta vr$ ，其中 η 为液体的粘度。当小球在液体中下落时，作用在小球上的力有三个，即：重力 mg ，浮力 ρVg ，粘性阻力 $6\pi\eta vr$ 。球刚开始下落时，速度 v 很小，阻力不大，小球作加速度下降。随着速度增加，阻力加大，当阻力和浮力之和等于重力时，小球开始匀速下降，即 $mg=\rho Vg + 6\pi\eta vr$ ，此时的速度称为终速度。由此可得：

$$\eta = (m - \rho V) g / 6\pi vr \quad (3-3)$$

落球法通常用来测量透明或半透明液体的粘度。

2. 转筒法

图 3-1 为转筒法的原理图。A 为转子，它由电动机主轴通过游丝带动缓慢旋转，B 为一定内径的烧杯。把待测液体置于烧杯中（液面与转子细颈下沿对齐），当电动机主轴以一定转速 ω 旋转时，转子 A 通过游丝带动跟着旋转。稳定时，转子 A 受到的粘性力矩与游丝恢复力矩平衡，此时转子 A 也以转速 ω 旋转，而转子 A 与电动机主轴相对移动了一个角度 θ （即游丝旋紧了 θ 角）。游丝旋紧的角度 θ 与粘度的关系为：

$$\eta = k \theta \quad (3-4)$$

其中， k 为仪器系数，由游丝扭转系数、转子结构及转速等决定

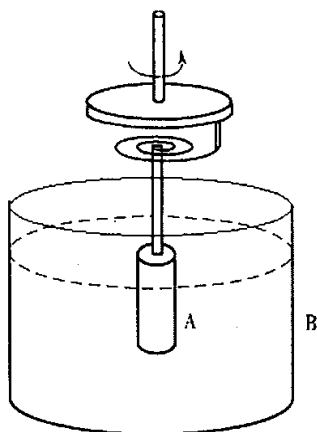


图 3-1 旋转粘度计原理

Fig.3.1.Machanism of rotary viscometer

在实验中，我们使用的粘度计为 NDJ-1 型旋转粘度计，这种粘度计采用的原理就是转筒法的原理，如图 3-2：

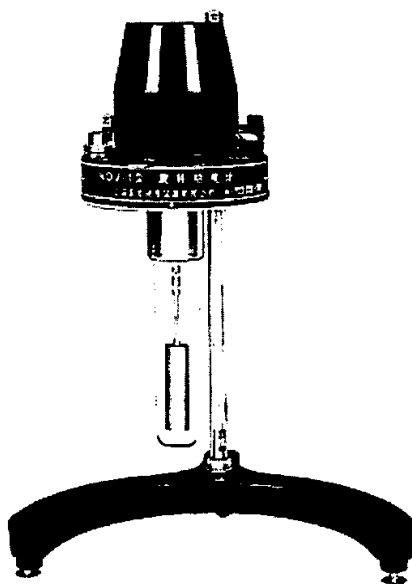


图 3-2 NDJ-1 型旋转粘度计

Fig.3.2.NDJ-1 rotary viscometer

被测的液体磁性磨具是我们在实验中的光整加工效果较好的一种，其配比为十

二烷基磺酸钠 5.9g, 纯净水 200ml, 乙醇 2 g, RXe 的羰基铁粉 270g, 绿碳化硅 (80°) 300 g, 我们一共进行了四次测试, 得到实验数据分别是 630 cP、640 cP、590 cP、590 cP, 我们配置的液体磁性磨具初始粘度四次的均值为 612.5cP。

3.3 液体磁性磨具的剪切应力

液体磁性磨具在不同磁场强度下剪切应力的大小是衡量液体磁性磨具光整加工性能好坏最重要的参数。剪切应力数值高, 液体磁性磨具光整加工的效率就高。当液体磁性磨具的成分一定时, 在一定的范围内, 磁场强度的大小决定剪切应力的大小。我们研究剪切应力的目的就是用最合理的磁场强度实现最大的剪切应力。

由于要对剪切应力进行量的分析, 因此研制一套合理装置进行分析是非常必要的。

3.3.1 目前测试磁流变液剪切应力几种装置

图 3-3 为 Felt(1996 年)所采用的装置, 在电磁线圈中放置 Brookfield LVDV III 旋转粘度计进行测量, 该粘度计为锥板结构, 能产生均匀的流场。由于该粘度计直接由线圈产生磁场, 故产生的磁感应强度很弱, 最大只能达到 800 高斯。然而, 由于锥板结构, 导致磁场在磁流变液中分布不均匀, 很大程度上影响了测试的效果^[20]。

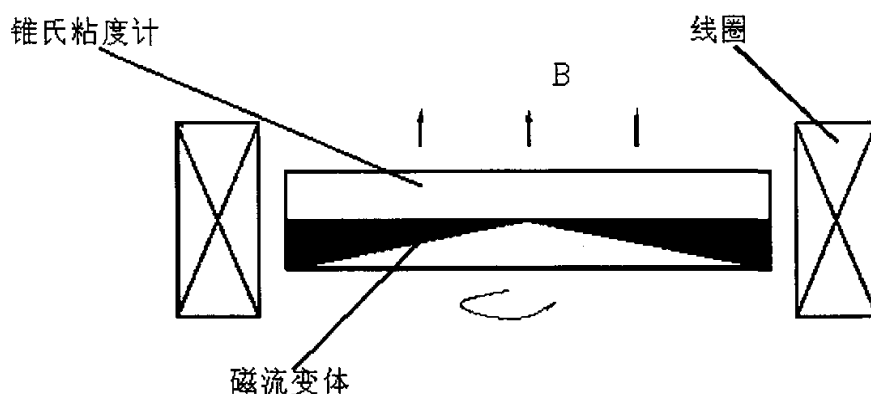


图 3-3 实验装置示意图

Fig.3.3. Schematic drawing of the experimental setup

图 3-4 是 Tang 和 Gorral(1996 年)所研制出的磁流变体静态测量仪。S、N 是电

磁铁的两个极头，能产生可调磁场，工作时由霍尔传感器与之相连的高斯仪测出磁感应强度 B 。以极小的恒定速度 v 托动铝板运动，此时磁流变体受简单剪切。测出托动铝板的力 F 的大小，由于 v 很小，则可以近似的认为是静态下的测量。这种装置的缺点在于托动铝板的力 F 大小不容易掌握很准确，同时磁性液体亦容易发生溢流现象，装置也较繁琐^[20]。

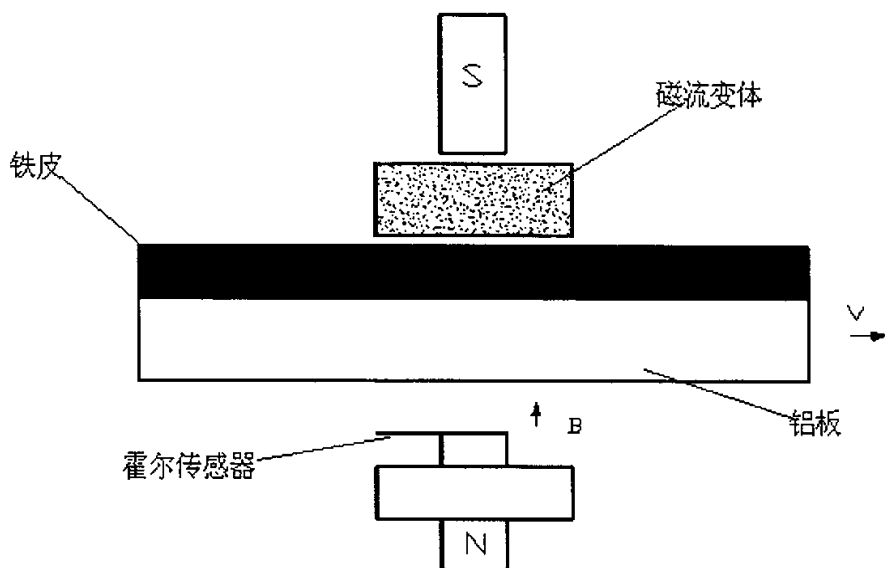


图 3-4 实验装置示意图

Fig.3.4 Schematic drawing of the experimental setup

图 3-5 是周刚毅（1998 年）等研制的磁流变体流变性能测量系统的原理图。在上下两平行碟片之间充满磁流变体，由线圈与磁回路组成的电磁铁提供磁场。驱动上碟片转动使磁流变体受到剪切，通过测量转速 ω 与驱动扭矩来得到 τ 与 γ （剪切率）的关系。在该结构中，上、下两平行碟片虽然能产生均匀磁场，但显而易见在剪切时，其剪切流场很不均匀，在碟片中心处流体基本不流动，而在边缘， γ 达到最大值， $\gamma = \omega R/d$ ， R 是碟片的半径， d 为上下两平行碟片距离，从这一点来看，这个装置是不合理的^[20]。

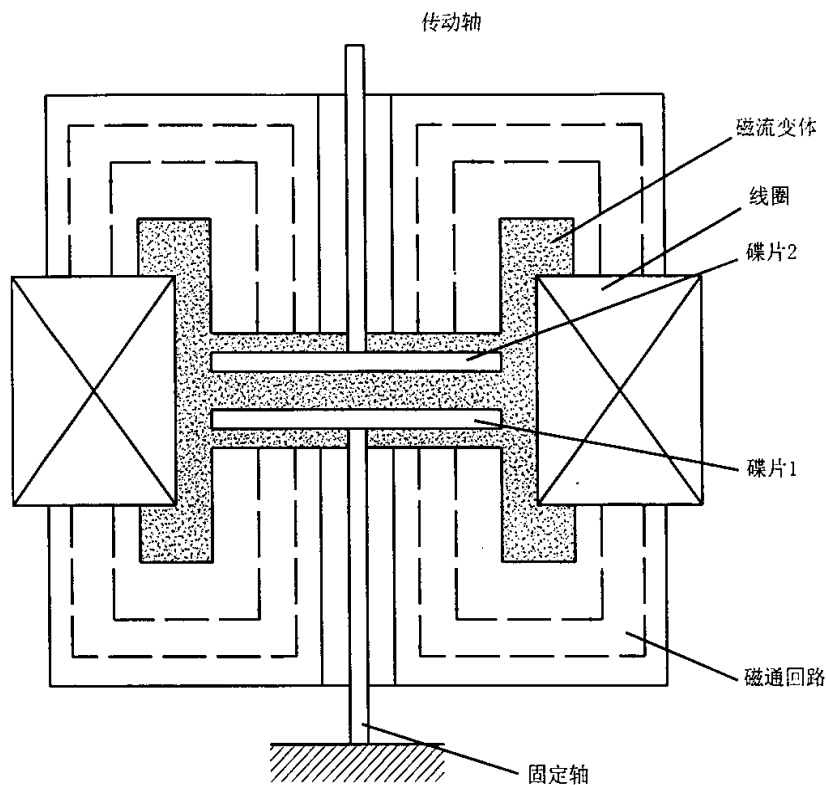


图 3-5 实验装置示意图

Fig.3.5 Schematic drawing of the experimental setup

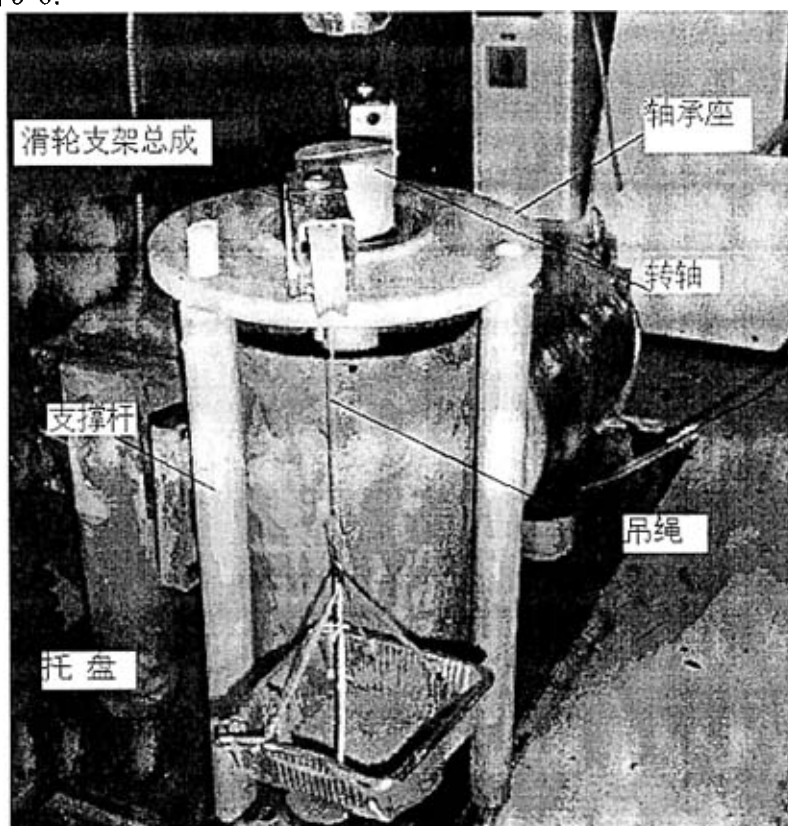
由上面的讨论可以看出,上述的几套测量装置有的是由现有的粘度计改造而成,存在着先天的不足;有的装置存在着有待改进的地方,在测量液体磁性磨具的剪切应力方面都有一定的问题。因而研制一台普通的能对液体磁性磨具的剪切应力进行测量的仪器无论是从理论研究角度还是从实验实践的角度都是必要的。在我们的实验中,最好的测量仪器应该是和我们现在的实验设备相匹配,从而能够使我们的试验更完善。

3.3.2 自行设计的测量液体磁性磨具剪切应力的装置

我们设计测量液体磁性磨具剪切应力装置主要考虑以下几点:

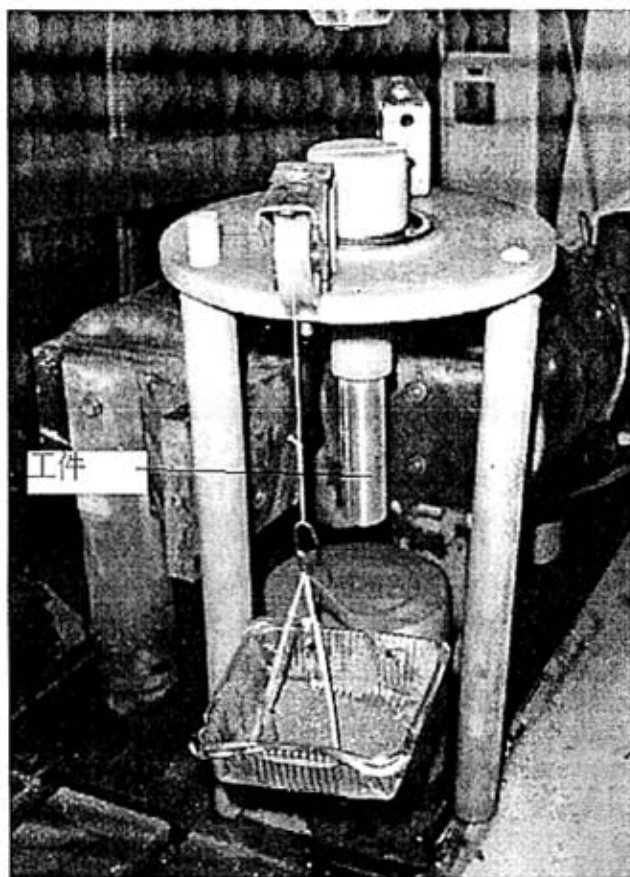
1. 能够在我们目前的试验装置中使用;
2. 应该能够测试出在不同磁场强度下工件所受的剪切应力;

在这个前提下，我们设计出了一套测试液体磁性磨具在静态下的剪切应力的装置。这套装置是由轴承、转轴、试件、支撑杆、轴承座、滑轮支架总成、吊绳及托盘组成。如图 3-6:



a) 工件浸于液体磁性磨具中

a) Workpiece dipping in liquid-magnetic abrasive tool



b) 工件暴露在空气中

b) Workpiece exposing in air

图 3-6 液体磁性磨具剪切应力测试装置

Fig.3.6.The device of testing liquid-magnetic abrasive tool shearing stress

这套装置装配原则如下：三个支撑杆将轴承座支起来为了调整轴承座的水平，三个支撑杆头部均加工成 M12X30 的螺杆，同时轴承座的三个与支撑杆相连接的孔均加工为 M12 的螺孔，这样通过支撑杆就可以调整整个装置的水平。轴承座固定的轴承为 206 轴承。转轴由轴承支撑，转轴顶部中心有一条宽和深皆为 2 毫米槽；转轴底端中心有一 M12 的内螺纹孔，工件便通过这个螺孔固定在转轴上。这时转轴在轴承的支撑作用下是能够自由转动的，且由于转轴的质量不是很大且长度较短，一盘轴承就可以保证转轴带动工件较自由的转动。轴承座的边沿固定两个滑轮支架总成，装配时应保证滑轮的轮槽中心顶部应与转轴顶部槽的底部在同一水平面上，同时通

过转动转轴，可以使转轴顶部槽的中心线与滑轮的轮槽的中心线重合，之后用细绳从转轴顶部的槽和滑轮穿过分两侧垂于下方，绳的末端分别系一质量较小的托盘。另外，还应注意的一点是，为了防止对磁场的干扰，除轴承和滑轮支架总成部分结构外，其余的所有零件均采用非导磁性材料。本套装置中，支撑杆、转轴、轴承座及滑轮材质均为尼龙，试件的材质为硬铝，这样就可以在最大程度上排除装置对磁场的干扰，从而保证试验结果的准确性。

这套装置的工作原理：先把这套实验装置置于一个带磁场的装置中，首先关掉磁场，将工件外露在空气中，逐渐往托盘中加沙子，当沙子和托盘的质量之和达到转轴极限静扭矩后，转轴发生轻微转动。此时沙子和托盘的质量乘以转轴的半径，就是转轴在此状态下的极限静扭矩。然后将试件的三分之二浸于液体磁性磨具中，逐渐加大磁场强度，在不同的磁场强度下，重复往托盘中加沙子，直至转轴轻微转动。然后用天平称取此时沙子和托盘的质量，再乘以转轴的半径，得到不同的扭矩值。这样就得到无磁场和在不同磁场强度下不同的极限静扭矩。这些扭矩值，减去在空气中的扭矩值，就得到在不同磁场下液体磁性磨具在静态下的扭矩值。

由材料力学的知识，我们知道圆轴圆截面边缘处的 剪切应力和扭矩的关系为^[21]：

$$\tau = \frac{T}{W_t} \quad (3-5)$$

其中 T 为圆轴所受的扭矩； W_t 为抗扭截面模量

$$\text{而} \quad W_t = \frac{I_p}{R} \quad (3-6)$$

I_p 为圆轴的极惯性矩； R 为圆轴的半径

又圆轴的极惯性矩

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad (3-7)$$

由(3-6)和(3-7)联立求解得

$$W_t = \frac{I_p}{\frac{d}{2}} = \frac{\pi d^3}{16} \quad (3-8)$$

由式(3-5)我们就得到了液体磁性磨具在静态下不同磁场强度中的液体磁性磨具的剪切应力。

表 3-1 则是我们设计的测试装置中转轴在不同电流的情况下所承受的最大扭力。

表 3-1 测试装置中转轴在不同情况下所承受的最大扭力 (单位: 克)

Tab.3.1.Max torsions of the device at different stations

测试状态 测试次数	在空气中	零磁场时	电流 1A	电流 1.5A	电流 2A	电流 2.5A
1	17.4	22.8	73.5	91.5	114.8	127.4
2	18.6	23.4	72.8	91	124	132
3	18	22.9	74.5	95	117.6	125.8
4	17.5	22.4	74.7	90.4	123.3	130
5	18.7	23	73.4	93.6	122.5	129.7

这六种状态下所承受的最大扭力的平均值分别为: 18.04 克; 22.9 克; 73.78 克; 92.3 克; 120.44 克; 128.98 克。而转轴的直径为 40mm, 换算成转矩则分别为: 360.8 g. mm; 458 g. mm; 1475.6 g. mm; 1846g. mm; 2408.8 g. mm; 2579.65 g. mm。

由公式 (3-5) 知: $\tau = \frac{T}{W_t}$ 工件的直径为 0.02m

所以
$$W_t = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{\pi \times 0.02^3}{16} = 1.57 \times 10^{-6}$$

则 5 种状态下的剪切应力分别为:

$$\text{在空气中时: } \tau = \frac{0.3608}{1.57 \times 10^{-6}} = 2.23 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} = 2230 \text{ Pa}$$

$$\text{在零磁场时: } \tau = \frac{0.458}{1.57 \times 10^{-6}} = 2.92 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} = 2920 \text{ Pa}$$

$$\text{在电流 1A 时: } \tau = \frac{1.4756}{1.57 \times 10^{-6}} = 9.39 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} = 9390 \text{ Pa}$$

$$\text{在电流 1.5A 时: } \tau = \frac{1.846}{1.57 \times 10^{-6}} = 1.18 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} = 11800 \text{ Pa}$$

$$\text{在电流 2A 时: } \tau = \frac{2.4088}{1.57 \times 10^{-6}} = 1.53 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} = 15300 \text{ Pa}$$

$$\text{在电流 2.5A 时: } \tau = \frac{2.58}{1.57 \times 10^{-6}} = 1.64 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} = 16400 \text{ Pa}$$

从上面的计算我们可以知道：我们把工件在空气之中的剪切应力定为装置的系统阻尼，则工件在不同状态下所受的剪切应力减去装置的系统阻尼，就为工件在这种状态下的实际所受的剪切应力。当电流达到 2.5A 时（此时磁场中的最大磁密为 0.6T 左右），液体磁性磨具的剪切应力为零磁场时的 25.4 倍之多。

这种装置目前还存在一些问题，其中最大的问题就是往托盘中加沙子时，由于托盘悬在空中，很容易造成托盘的晃动，从而影响测量值的准确性。这一点从表 3-1 中我们可以看出，在一种状态下测量的数值波动范围比较大。如果这点能得到改进，这套装置对于测量静态下液体磁性磨具的剪切应力应是简单且准确的。

由于我们掌握了剪切应力的测量方法，这就为我们今后研究液体磁性磨具的配比和加工性能提供了更有力的证据。

3.4 液体磁性磨具磁饱和强度

3.4.1 磁饱和强度的相关理论和基本概念

分子中电子的绕核运动和自转将形成分子电流，分子电流将产生磁场，每个分子都相当于一个小磁铁^[31]。

由于磁性物质分子的相互作用，使分子电流在局部形成有序排列而显示出磁性，这些小区域称为磁畴。当磁性物质没有外磁场时，各磁畴是混乱排列的，磁场相互抵消，如图 3-7（a）；在外磁场的作用下，磁畴就逐渐转到与外场一致的方向上，

即产生了一个与外场方向一致的磁化磁场，从而磁性物质内的磁感应强度大大增加——物质被强烈的磁化了，如图 3-7 (b)：

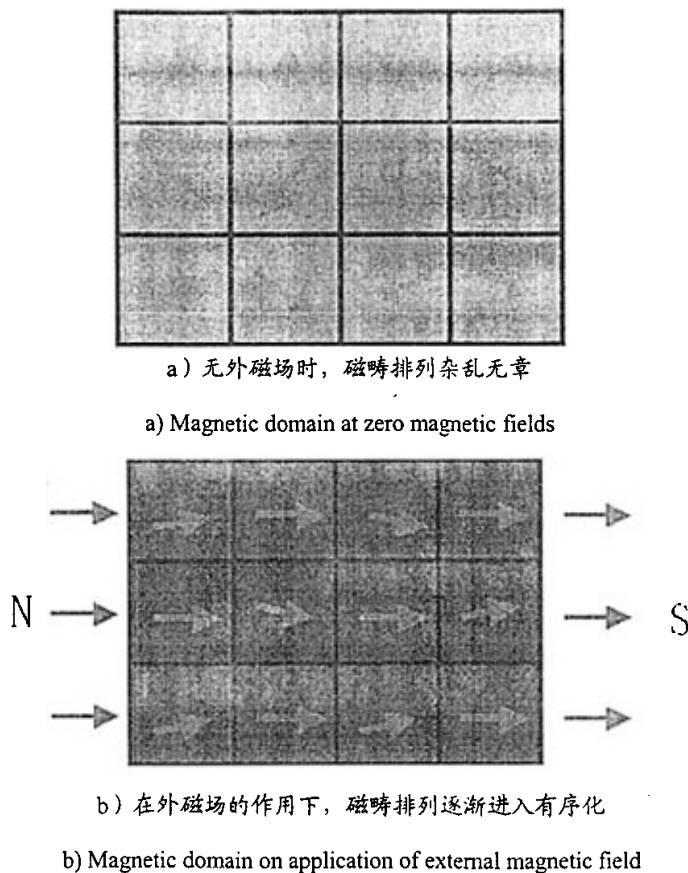


图 3-7 磁性物质磁化示意图

Fig.3.7 Schematic drawing of the magnetic material was magnetized

当然，磁性物质因磁化产生的磁感应强度是不会无限制增加的，当外磁场（或激励磁场的电流）增大到一定程度时，全部磁畴都会转向与外场方向一致。这时的磁感应强度将达到饱和值，这就是磁性物质的磁饱和强度。

3.4.2 研究液体磁性磨具磁饱和强度的目的和意义

当液体磁性磨具中的全部磁畴与外磁场方向一致时，液体磁性磨具的磁感应强度将达到饱和值，这就是液体磁性磨具的磁饱和强度。也就是说，这时再增加外磁场强度（或激励磁场的电流），液体磁性磨具的磁感应强度将不再升高。

由第二章我们知道，液体磁性磨具在外加强磁场后，磁介质微粒就沿磁场方向

形成了柱状链，磨粒就被挟持于这些柱状链之间；当液体磁性磨具达到磁饱和强度时，磨粒被磁介质微粒的挟持力达到最大，也就是在这个时候，液体磁性磨具的剪切应力达到最大值，这种状态是我们在光整加工中最需要的。因此，测出液体磁性磨具的磁饱和强度，不仅对研究液体磁性磨具的性质来讲，而且对于加工磁场的设计和节能方面来讲，都是非常必需的。

3.4.3 液体磁性磨具磁饱和强度装置的研制

1 测量液体磁性磨具的磁饱和强度原理：

图 3-8 是测试液体磁性磨具磁饱和装置示意图：

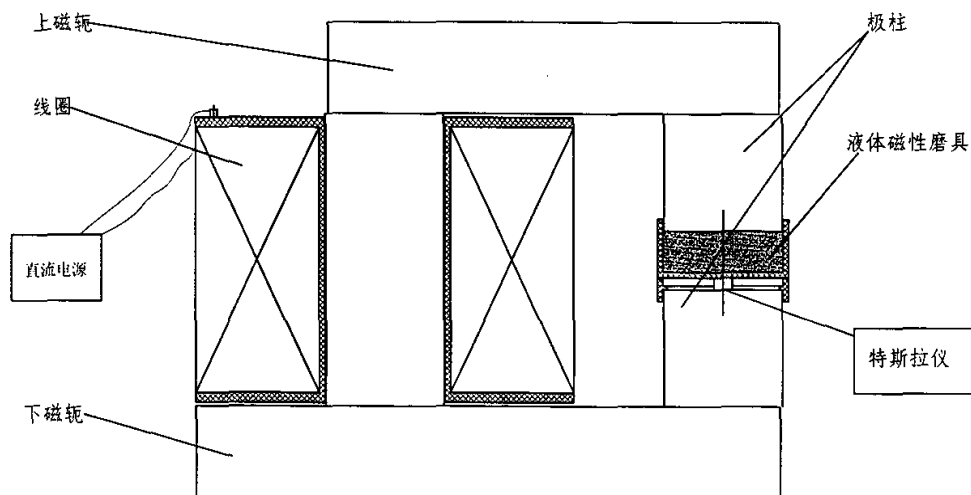


图 3-8 测试液体磁性磨具磁饱和装置示意图

Fig.3.8. Schematic drawing of testing liquid-magnetic abrasive tool saturation intensity

其测试原理是这样的：线圈由直流电源提供电能，用来产生磁场，铁芯、上下磁轭、两个极柱、液体磁性磨具及液体磁性磨具下面的空气形成封闭的磁路。用特斯拉仪测出磁路中空气的磁密，测出磁密后，由电磁学知识知：

$$F=NI=\sum H_j l_j \quad (3-9)$$

$$F=R \Phi \quad (3-10)$$

$$R = \frac{l}{\mu S} \quad (3-11)$$

$$\Phi_j = B_j S_j \quad (3-12)$$

$$H_j = \frac{B_j}{\mu_j} \quad (3-13)$$

由 3-9 与 3-10 联立求解得：

$$NI = R\Phi \quad (3-14)$$

其中：F 为磁势；N 为线圈匝数；R 为磁阻； l 为介质在磁路中长度；B 为磁密； Φ 为磁通；S 为磁路中介质的面积； μ 为介质的磁导率； H_j 为第 j 段磁路中的磁场强度； l_j 为第 j 段磁路的长度； Φ_j 为第 j 段磁路中的磁通； B_j 为第 j 段磁路中的磁密。

$$\text{由上面的公式可以得出：} \quad NI = \sum \frac{B_j l_j}{\mu_j} \quad (3-15)$$

线圈的匝数可以得知，线圈的电流由电源可以显示，磁密用特斯拉仪可以测得，介质的长度又可以测出，则这时的磁导率便可以求出。磁密已知，磁导率已知，在整个磁路中的磁通是相同的，根据公式 3-13 便可以求出介质的磁场强度 H_f 来：

$$H_f = \left[NI - \frac{B_g l_g}{\mu_0} - \frac{B_x l_x}{\mu_y} - \frac{B_y l_y}{\mu_y} \right] \div l_f \quad (3-16)$$

其中： H_f 为液体磁性磨具的磁场强度； B_g 为空气的磁密； l_g 为磁路中空气的长度； μ_0 为空气的磁导率； l_x 为铁芯和极柱的总长； B_x 为铁芯（极柱）的磁密； μ_y 为纯铁的磁导率； l_y 为上下磁轭的总长； B_y 为磁轭的磁密； l_f 为液体磁性磨具在磁回路中的长度。

在液体磁性磨具与气隙之间的分界面处，由电磁学知识可知：

$$B_g = B_f \quad (3-17)$$

当气隙磁密 $B_g = 1\text{T}$ 时， B_x 、 B_y 均小于 1T，此时铁芯及磁轭均不饱和，所以此

时的纯铁的磁导率 μ_y 远远大于空气的磁导率 μ_0 ，因此式 (3-16) 便可简化为：

$$H_f = \left[NI - \frac{B_g l_g}{\mu_0} \right] \div l_f \quad (3-18)$$

2 参数的设计及计算过程

根据目前我们研究的结果和测量液体磁性磨具剪切应力装置所得到的数值，我们估算液体磁性磨具的磁饱和强度在 1T 以下，据此我们设计的装置产生的磁感应强度不应小于 1T，初步定：

极柱的半径 $R=0.03\text{m}$ ；极柱之间的间隙 $\delta = 0.03\text{m}$ ；

真空磁导率： $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

气隙磁密： $B_g = 1\text{T}$

气隙高： $h_1 = 0.01\text{m}$

假定磁性液导磁率： $\mu = 3 \cdot \mu_0$

磁性液中的磁感应强度： $H_1 = \frac{B_g}{\mu} = 1 \div (3 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \pi) = 2.65 \times 10^5$

气隙中的磁感应强度： $H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = 1 \div (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) = 7.96 \times 10^5$

所需磁势： $F = H_1 \cdot (\delta - h_1) + H_g \cdot h_1 = 2.65 \times 10^5 \cdot (0.03 - 0.01) +$

$7.96 \times 10^5 \cdot 0.01 = 1.326 \times 10^4$

考虑铁心的磁压降： $F_{\max} = 1.2 \cdot F = 1.326 \times 10^4 \times 1.2 = 1.5912 \times 10^4$

令线圈通过的电流为： $I = 2\text{A}$

则线圈的匝数： $N = \frac{F_{\max}}{I} = 1.5912 \times 10^4 \div 2 = 7.956 \times 10^3$ 暂定 $N = 7.960 \times 10^3$

导线电流密度： $J = 4 \cdot 10^6$

确定导线直径： $d = \sqrt{\frac{4.2}{\pi \cdot J}} = 7.979 \times 10^{-4}$ 为稳妥起见选 Q0.90 的漆包线

1 级漆包线的最大外径: $d_{\max} = 0.960$

选取线圈的占空系数: $k=0.7$

线圈的窗口面积: $A_w = \frac{N \cdot d_{\max}^2}{k} = \frac{7.960 \times 10^3 \times 0.00106^2}{0.7} = 1.278 \times 10^{-2}$

线圈骨架尺寸: 设高 $H=140\text{mm}$; 壁厚 $\Delta = 2\text{mm}$

线圈骨架的内径: $\phi 1 = 2 \cdot R + 0.004 = 0.064\text{m}$

线圈骨架的外径: $\phi 2 = \phi 1 + 2 \cdot \Delta + \frac{A_w}{H - 2 \cdot \Delta} = 0.162\text{m}$

导线总长: $L_d = \pi \cdot \left(\frac{\phi 2 + \phi 1}{2} \right) \cdot N = 2825.8\text{m}$

每千米重量为 5.83kg ,

导线总重: $W = L_d \cdot 5.83 = 16.33\text{kg}$

导线电阻: $R = 0.0181 \times 10^{-6} \times \frac{L_d}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} = 80.4$

直流电压: $U = 1.4R \cdot I = 1.4 \times 80.4 \times 2 = 225.12\text{V}$

铁轭宽: $b = 2 \cdot R = 0.06$

铁轭高: $h_2 = \frac{\pi \cdot R^2}{b} = 0.047$

铁轭长: $L_y = 4 \cdot R + 0.04 + \phi 2 / 2 = 0.241$ 定位 240mm

极靴尺寸: $h_3 = \frac{(H + 0.004 - \delta)}{2} = 0.057$ 定为 60mm

根据此计算结果, 我们制作的装置照片如图 3-9:

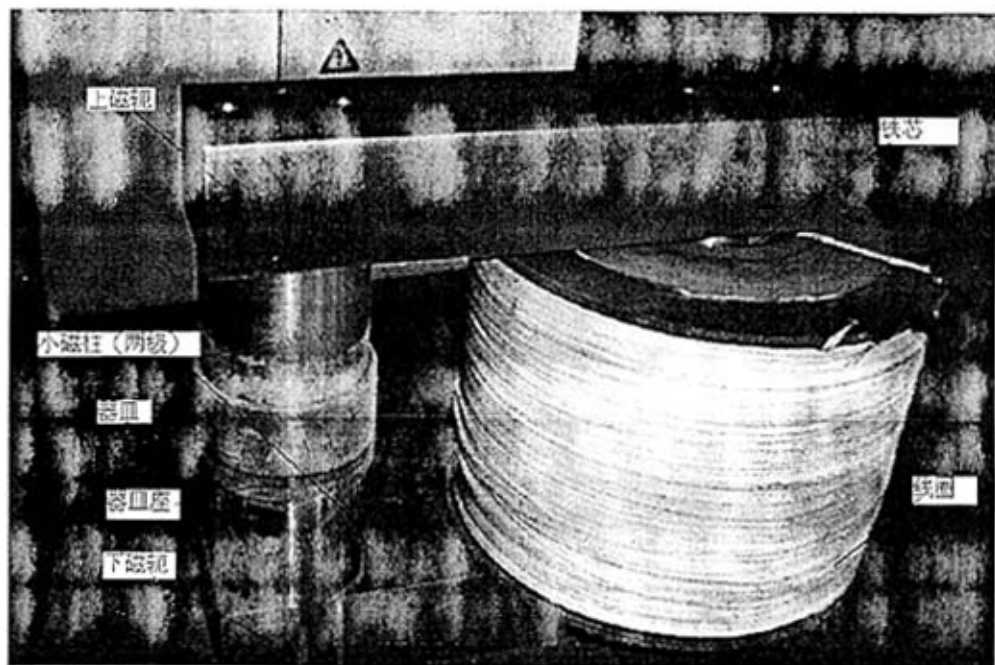


图 3-9 液体磁性磨具磁饱和和强度测试装置

Fig.3.9.The device of testing liquid-magnetic abrasive tool saturation intensity

这套装置由上下磁轭、小磁柱（两级）、器皿（盛液体磁性磨具）、器皿座、铁芯级线圈组成。

3.4.4 对装置的计算复核

铁芯截面积为 $S_y(m^2)$ ；铁芯平均总长 $L_y(m)$ ；气隙的截面积为 $S_g(m^2)$ ；气隙长为 $L_g(m)$

$$1 \text{ 气隙磁阻 } R_{mg} = \frac{L_g}{\mu_0 S_g} = 0.01 \div (\pi \times 0.0315^2) \div (4\pi \times 10^{-7}) = 2.553 \times 10^6$$

$$2 \text{ 气隙磁通 } \Phi_g = B_g S_g \text{ 令 } B_g = 1T \quad S_g = \pi r^2 = \pi \times (0.063 \div 2)^2 = 3.117 \times 10^{-3}$$

$$\Phi_g = B_g S_g = 1 \times 3.117 \times 10^{-3} = 3.117 \times 10^{-3}$$

$$3 \text{ 铁轭中的磁通 } \Phi_y = \Phi_g$$

$$4 \text{ 铁轭中的磁密 } B_y = \frac{\Phi_y}{S_y} = 3.117 \times 10^{-3} \div (0.047 \times 0.06) = 1.1$$

软磁材料的磁化曲线

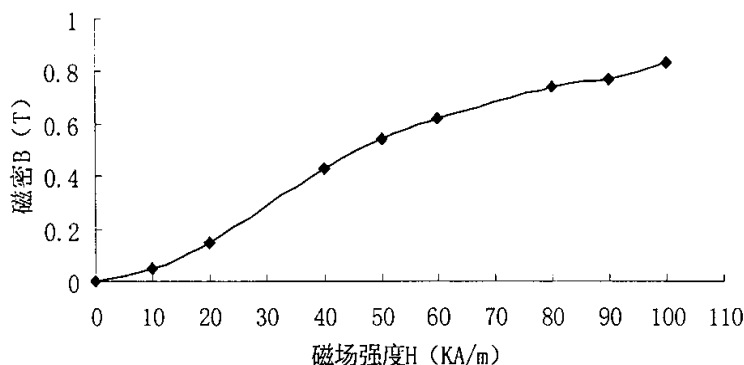


图 3-10 软磁性材料的磁化曲线

Fig.3.10. Magnetized curve of soft magnetic material

- 5 纯铁属于软磁性材料，由上面的曲线根据 B_y 大小查出对应的 H_y ，当 B_y 为 1T 时， H_y 为 120

$$\mu_y = \frac{B_y}{H_y} = 1 \div 120 = 0.0083$$

- 6 铁轭的磁阻：

$$R_{my} = \frac{L_y}{\mu_y S_y} = 0.24 \div (0.0083 \times 0.047 \times 0.06) \times 2 = 1.0253 \times 10^4 \times 2 = 2.05 \times 10^4$$

$$\text{铁芯的磁阻: } R_{mx} = \frac{L_x}{\mu_y S_{yx}} = \frac{0.27}{0.0083 \times \pi \times 0.0315^2} = 1.04 \times 10^4$$

液体磁性磨具的磁阻：

$$R_{mm} = \frac{L_m}{\mu_m S_{yx}} = 0.02 \div (3 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \pi \times 0.0315^2) = 1.703 \times 10^6$$

- 7 磁路中的总磁阻：

$$R_m = R_{mg} + R_{my} + R_{mx} + R_{mm} = 4.29 \times 10^6$$

- 8 所需磁势： $F = R_m \cdot \Phi_g = 4.29 \times 10^6 \times 3.117 \times 10^{-3} = 1.337 \times 10^4$

复核结果基本和设计结果相吻合，这说明我们设计的结果是能够满足测试液体

磁性磨具的磁饱和强度的。

3.4.5 对液体磁性磨具磁饱和强度的测试的结果及分析

用上面的实验装置（图 3-9）对液体磁性磨具进行了测试，在电磁铁的电流分别为 0.5、1、2A 时，磁回路中的磁密分别为 0.24、0.31、0.355T。用公式 3-16 分别计算液体磁性磨具三种状态下的磁场强度：

当电流为 0.5A 时：

$$H_f = \left[NI - \frac{B_g l_g}{\mu_0} \right] \div l_f = \left[7960 \times 0.5 - \frac{0.24 \times 0.009}{4\pi \times 10^{-7}} \right] \div 0.021 = 107667 \text{ A/m}$$

当电流为 1A 时：

$$H_f = \left[NI - \frac{B_g l_g}{\mu_0} \right] \div l_f = \left[7960 \times 1 - \frac{0.31 \times 0.009}{4\pi \times 10^{-7}} \right] \div 0.021 = 273323 \text{ A/m}$$

当电流为 2A 时：

$$H_f = \left[NI - \frac{B_g l_g}{\mu_0} \right] \div l_f = \left[7960 \times 2 - \frac{0.355 \times 0.009}{4\pi \times 10^{-7}} \right] \div 0.021 = 637000 \text{ A/m}$$

由上述计算结果，得出液体磁性磨具的 B-H 曲线，图 3-11：

液体磁性磨具B-H曲线

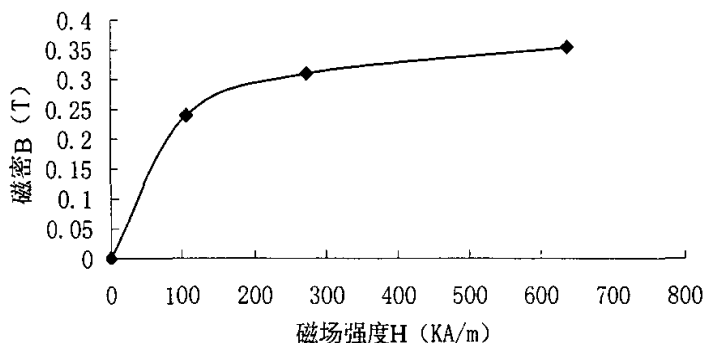


图 3-11 液体磁性磨具 B-H 曲线

Fig.3.11. B-H Curve of Liquid magnetic abrasive tool

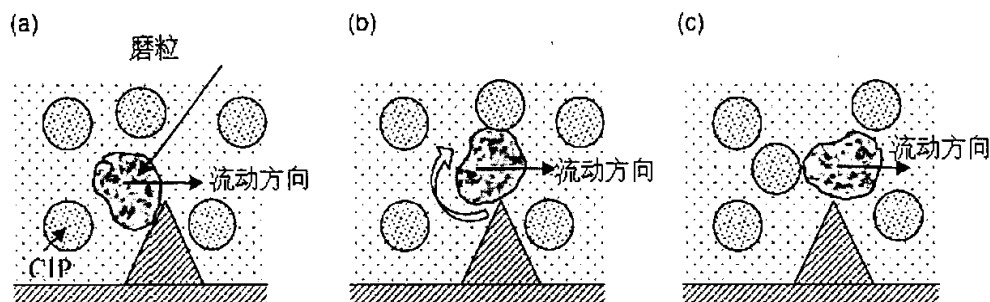
由于实验条件的不具备，加之实验电源能提供的电流值有限（最大能提供 2.5A），所以我们试验能够测得的有效值只有三个，因此这条磁化曲线不能够较完整的描述出液体磁性磨具的磁化特性，但是我们可以根据实验数据初步推算出液体磁性磨具的磁导率 μ_f 在 10^{-4} 之间，随着磁密的增加而减小。

在今后的实验中，我们要改进试验的条件，使实验的电流能够达到 4A 左右，这样应该可以绘出一条较完整的液体磁性磨具的磁化曲线，同时，液体磁性磨具的磁饱和强度也能够从试验中测得。

第四章 液体磁性磨具的光整加工机理

4.1 液体磁性磨具的加工机理

在无外加磁场情况下，磨粒均匀地分散于液体磁性磨具中，由于磁介质微粒没有形成柱状链，因而形不成对磨粒的束缚。这时当工件在液体磁性磨具中运转时，磨粒对工件的切削力极小。通过实验，我们发现即使再增加加工时间，调整转速，工件被加工表面的粗糙度也没有明显的变化。



a) 磨粒随着磁性微粒接近微观突起

a) Abrasive grain along with CIP approaching roughness peak;

b) 在缺乏磁性微粒束缚的情况下磨粒滚过微观突起

b) Abrasive grain rolling over roughness peak in absence of bonding forces;

c) 磨粒滚过微观突起后微观突起没有被切削

c) Abrasive grain crossing the roughness peak without cutting action.

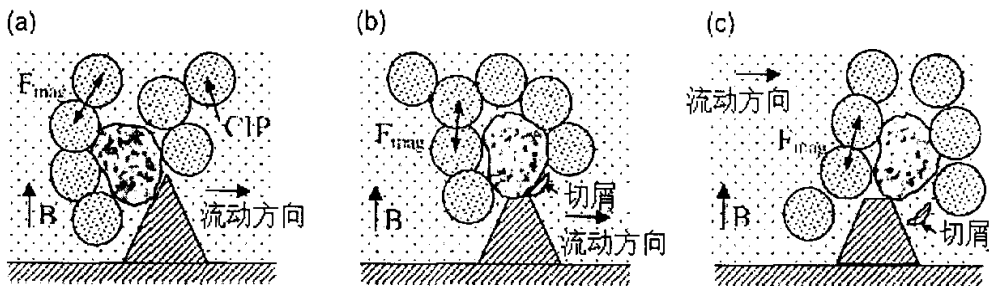
图 4-1 无外加磁场时没有切削作用

Fig.4.1. No finishing action in absence of external magnetic field

由图 4-1 能看出，在液体磁性磨具中的磨粒与工件相对运动中，当磨粒经过加工表面的微观突起时，由于磨粒没有被磁性微粒束缚在一起，因其质量较低，所以其动能较低，很难将微观突起顶部撞掉，只是随着磁性粒子一起滚过突起，基本不对工件进行光整加工。因此在无外加磁场时，用液体磁性磨具对工件表面的进行加

工，其粗糙度值几乎不变^[17]。

施加外部磁场后，碳基铁磁性微粒（CIP）沿磁场方向形成像柱状结构那样的链条（由第二章我们知道），磨粒则嵌附于这些结构之间，磨粒被磁性粒子紧紧挟持着，而磁性液体磨具此时已由牛顿流体变为类固体性质的宾汉姆体。这时当液体磁性磨具中的磨粒与工件发生相对运动时，由于磨粒被磁介质微粒紧紧包裹着，便形成了一个较大的粒子团，在相同的速度之下，粒子团的动能远远大于单个磨粒的动能，这样被加工工件的表面微观突起顶部就很容易被撞掉，如图 4-2，从而使零件被加工表面的粗糙度值降低，提高表面的质量^[17]。



a) 磨粒随着磁性微粒接近微观突起

a) Abrasive grain along with CIP chains approaching roughness peak;

b) 在磁性微粒束缚的作用下磨粒对微观突起有一个少量的切削

b) Abrasive grain takes a small cut on roughness peak in presence of bonding forces;

c) 微观突起被切掉一小块后磨粒穿过微观突起

c) Abrasive grain crossing the roughness peak after removing a microchip during cutting action.

图 4-2 施加外部磁场后发生了切削

Fig.4.2. Finishing action on a single profile in presence of external magnetic field

另外，我们的剪切应力测试实验已证实，在施加强磁场时（电流为 2.5A）的工件加工表面所受剪切应力，是无磁场情况下的 25 倍左右，工件表面所受的压力大，所以加工效率就会高的，这个实验在上一章我们已进行了详述，在此就不再赘述。

4.2 液体磁性磨具光整加工数学模型

液体磁性磨具光整加工和传统光整加工方法在材料去除的本质上是相同的：都是通过接触表面形成一定的相对速度和加工压力，利用磨料磨掉工件表面的多余

材料：因此也满足 Preston 方程，材料去除率 R 可以表示为公式^[24] (4-1)：

$$R = KP V_1 = K \frac{\tau V_1}{\varepsilon} = K \frac{W}{\varepsilon} \quad (4-1)$$

式中 K —工艺系数，与液体磁性磨具成分、加工区温度、工件材料等有关；

P —磨具对工件表面的研磨压力；

V_1 —磨具和工件表面的相对速度；

τ —磨具对工件表面的剪切应力；

ε —磨具与工件表面的摩擦系数；

W —研磨功率；

其中 K 、 V_1 可以通过实验测出，下面以型面最简单的柱面工件为例来推导液体磁性磨具加工过程中压力 P 和剪切应力 τ 的表达式，工件和磨具的相对运动方式及位置如图 4-3：

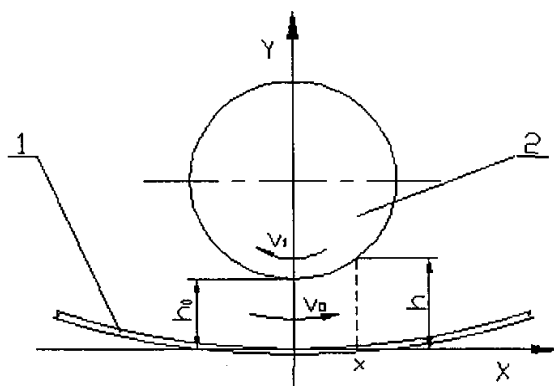


图 4-3 磨具和工件加工位置图

Fig.4.3.Position relation in abrasive tool and parts

1. 容器 2. 工件

剪切应力 τ

由流体动压润滑理论可知压力 P 和剪切应力 τ 存在如下关系：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (4-2)$$

将 (4-2) 式对 y 积分得：

$$\tau = \frac{dp}{dx} y + C_1 \quad (4-3)$$

式中: $\frac{dp}{dx}$ 表示液体磁性磨具沿接触面切向 (x 方向) 的压力梯度; C_1 表示积分常数。

根据剪切应变的定义, 应变率等于液体磁性磨具的运动速度 (在本课题中指工件在液体磁性磨具中的运动速度) 对各液层厚度的微分, 即 $\gamma = \frac{dv}{dy}$ 。在磁场中, 液体磁性磨具的流变特性满足 Bingham 方程, 剪切应力 τ 可由公式表示为^[28]:

$$\tau = \eta_0 \gamma + \text{sign}(\gamma) \tau_y \quad (4-4)$$

式中: η_0 为液体磁性磨具的初始粘度; γ 为液体磁性磨具的剪切应变率; τ_y 为外磁场作用下液体磁性磨具的屈服应力; $\text{sign}(\gamma)$ 是符号函数, “+”表示 τ_y 与 γ 同号。

联立式 (4-3) 和 (4-4) 可得:

$$\frac{dp}{dx} y + C_1 = \eta_0 \frac{dv}{dy} + \text{sign}(\gamma) \tau_y \quad (4-5)$$

上式两边再对 y 积分得:

$$\frac{1}{2} \frac{dp}{dx} y^2 - \eta_0 v - \text{sign}(\gamma) \tau_y y + C_1 y + C_2 = 0 \quad (4-6)$$

式中 C_2 表示积分常数;

将边界条件 $y=h$ 时, $v=V_1$; $y=0$ 时, $v=V_0$; 代入式 (4-6), 求得:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{h}{2} \frac{dp}{dx} + \text{sign}(\gamma) \tau_y - \frac{\eta_0 (V_0 - V_1)}{h} \\ C_2 = \eta_0 V_0 \end{cases} \quad (4-7)$$

$$\tau = \frac{dp}{dx} \left(y - \frac{h}{2} \right) - \frac{\eta_0 (V_0 - V_1)}{h} + \text{sign}(\gamma) \tau_y \quad (4-8)$$

$$v = \frac{1}{2\eta_0} \frac{dp}{dx} (y^2 - yh) + v_0 - \frac{(v_0 - v_1)y}{h} \quad (4-9)$$

式中 h — 进行加工的液体磁性磨具的有效高度;

V_0 — 工件相对液体磁性磨具移动速度;

从式 (4-8) 可以发现, 剪切应力的分布形式由液体磁性磨具粘度、屈服应力、液体磁性磨具有效高度、运动速度和接触面切向的压力梯度所决定。其中, 液体磁

性磨具有效高度 h 的最小值 $h_{\min}$ 可表示为^[25]:

$$h_{\min} = 0.78h_c \quad (4-10)$$

式中: h_c 指液体磁性磨具实际厚度。

压力 P

在液体磁性磨具光整加工中, 液体磁性磨具对工件的压力 P 是一较复杂的参数, 它主要由流体动压力 P_d 、磁化压力 P_m 和重力压强 P_g 组成:

$$P = P_d + P_m + P_g \quad (4-11)$$

在本课题实验中, 液体磁性磨具深度较小, 可以近似的认为 P_g 为 0, 下面分别对 P_d 和 P_m 进行求解。

① 流体动压力 P_d

对于二维空间的液体磁性磨具, Reynolds 方程可简化为:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta_0} \frac{dp_d}{dx} \right) = 6V_0 \frac{dh}{dx} \quad (4-12)$$

式中 $\frac{dp_d}{dx}$ 表示流体动压力沿接触面切向 (x 方向) 的梯度。

对 x 进行积分得:

$$\frac{dp_d}{dx} = \frac{(6V_0h + C_3)\eta_0}{h^3} \quad (4-13)$$

式中 C_3 —积分常数

在加工区内最大流体动压力处 $\frac{dp_d}{dx} = 0$, 设 h^* 为对应的高度可以求得:

$$C_3 = -6V_0h^* \quad (4-14)$$

将 (4-14) 式代入 (4-13) 式, 两边对 x 求积分可得到流体动压力的近似解为^[23]:

$$P_d \approx \frac{6\eta_0V_0(h_0 - h^*)}{h_0^3} x + P_0 \quad (4-15)$$

式中: P_0 表示 $x=0$ 位置处的流体动压力。

因此，在加工区内流体动压力沿接触面切向（X 方向）接近于线性分布， $\frac{dp_d}{dx}$ 为常数，它们对剪切应力的影响是相同的。

② 磁化压力 P_m

如果液体磁性磨具中的磁性微粒为球形，根据电磁学理论^[26]，磁化强度 M 与外磁场强度 H 存在如下关系：

$$M = \frac{3(\mu_1 - \mu_0)}{\mu_1 + 2\mu_0} H \quad (4-16)$$

式中： μ_0 指真空中的磁导率；

μ_1 指磁性微粒的磁导率；

实际应用中，外磁场一般较强，液体磁性磨具常常处于饱和磁化状态，即 $M=M_S$ ，因此，液体磁性磨具的内部压强可近似写为：

$$P \approx M_S B + C \quad (4-17)$$

将 $B = \mu_0(M + H) = \frac{\mu_0(4\mu_1 - \mu_0)}{\mu_1 + 2\mu_0} H$ ，代入式（4-17）得：

$$P_m = \frac{\mu_0(4\mu_1 - \mu_0)}{\mu_1 + 2\mu_0} M_S H + C_4 \quad (4-18)$$

式中： C_4 表示积分常数，与磁场发生装置的性能有关。

以上分别对流体动压力 P_d 和磁化压力 P_m 进行了分析，将其代入式（4-11）即可求得压力 P ，再根据式（4-1）计算出材料去除率 R ，则液体磁性磨具加工的工件材料去除量就等于加工时间和去除率 R 的乘积。这样就建立了液体磁性磨具光整加工的数学模型，从而为进一步实现微机数控加工奠定了基础。

4.3 液体磁性磨具光整加工实验

4.3.1 实验装置的设计

液体磁性磨具光整加工实验装置可以设计专用设备也可以利用旧设备进行改

制，但总的设计思想和目的是：

1. 首先，实验装置的设计必须建立在液体磁性磨具光整加工机理的基础上；
2. 其次，实验装置能够实现对各种不规则型面的零件的研磨加工以体现液体磁性磨具光整加工的“柔性”；
3. 通过该装置对零件的实验加工能够有效确定液体磁性磨具加工的工艺参数；
4. 根据对实验结果和实验数据的对比分析能够确定液体磁性磨具的最佳配比参数。

根据实验室目前的条件，我们自行设计了一套加工装置，这套装置主要由磁场发生装置、液体磁性磨具、可以实现 X、Y、Z 移动的三维数控铣床。装置示意图如图 4-4：

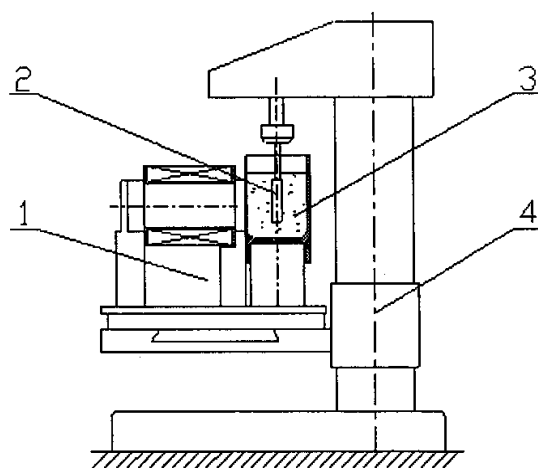


图 4-4 实验装置总体结构

Fig4.4. Structure of experimental equipment

1. 磁场发生装置 2. 工件 3. 液体磁性磨具 4. 三维数数控铣床

试验中用来进行加工的装置及试验用的直流电源，如图（4-5）、（4-6）：

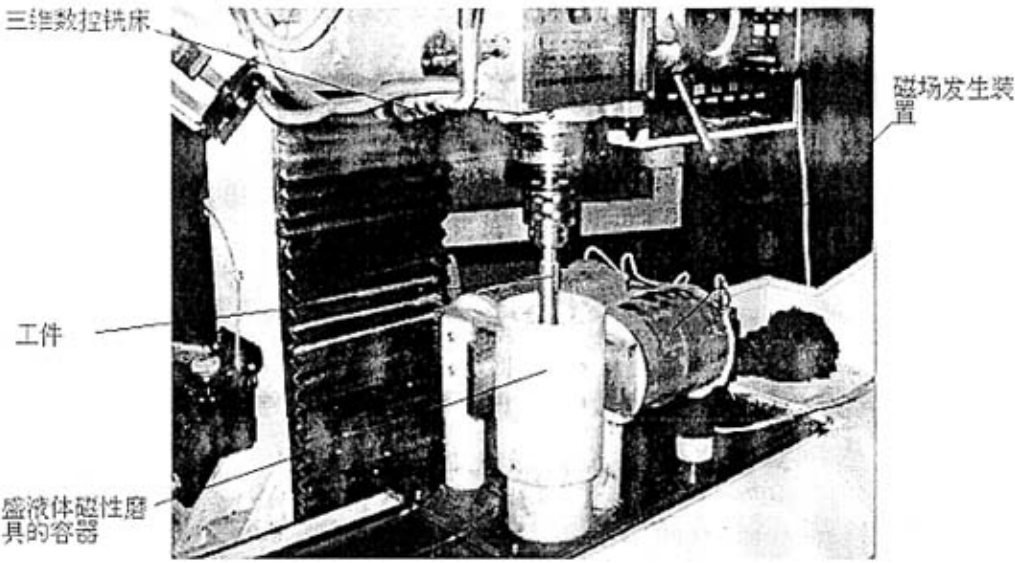


图 4-5 液体磁性磨具光整加工实验总体图

Fig.4.5. Experiment of liquid-magnetic abrasive tool finishing



图 4-6 实验用直流电源

Fig.4.6.DC Power Supply

该装置中，磁场发生装置和数控平台分别作为两个不同的模块单独进行设计，其中数控平台采用现有的三维数控铣床，要满足工件在加工过程所需的各种运动参数，而磁场发生装置作为整个实验装置的核心则是要满足液体磁性磨具本身所需的工艺参数。在整个实验装置中数控铣床可以实现工件的回转运动和轴向及径向运动，这能够保证工件在加工过程中有不同的运动轨迹；而通过调节磁场发生装置中电磁

铁电流的大小可调节磁感应强度的大小，在强磁场的作用下，液体磁性磨具就从牛顿流体瞬间转变为宾汉姆体，从而进一步控制液体磁性磨具剪切应力，实现对工件加工表面的压力和切削力的控制，最终达到对工件表面光整加工的目的。

4.3.2 对圆柱的外表面光整加工试验方案

由于我们进行的是探索性试验，也就是说液体磁性磨具能否对工件进行表面光整，加工的效果如何，这是我们试验的主要目的。如果试验取得了理想的效果，那么在此基础上，我们在对实验设备进行重新设计、制造，以使液体磁性磨具能够对复杂的表面进行加工。因此本着由简到繁的原则，我们对工件的设计如下，如图 4-7，此工件的外表面是圆柱面。

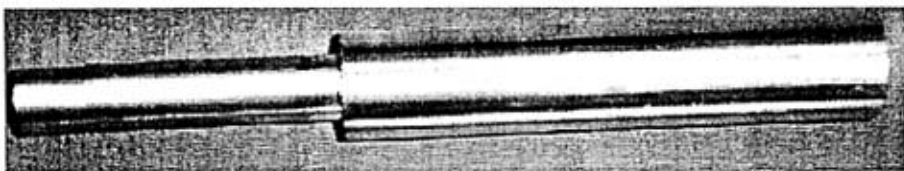


图 4-7 实验工件的外形

Fig4.4. Photo of the workpiece for experiment

本实验主要是研究在液体磁性磨具光整加工过程中加工时间、工件旋转速度、磁场强度这三个主要工艺参数对加工效果的影响，所以整个实验方案也是在现有实验条件的基础上围绕这三个工艺参数制定的，其中磁场强度是通过电流强度来表征的。在整个方案中，先将时间、转速和电流分别分作三个档次，然后通过正交法将方案进行优化，实验方案见表 4-1：

表 4-1 液体磁性磨具光整加工实验方案

Tab.4.1 Experimental scheme of liquid-magnetic abrasive tool finishing

参数 实验号	工件转速 (r/min)	电流 (A)	加工时间 (min)
1 (1*)	1600	1	5
2 (2*)	1600	2	10
3 (3*)	1600	3	15
4 (4*)	900	1	10
5 (5*)	900	2	15
6 (6*)	900	3	5
7 (7*)	600	1	15
8 (8*)	600	2	5
9 (9*)	600	3	10

表中带“*”的实验号表示试件材料是铝，不带“*”的实验号表示试件材料是45#钢。在具体实验过程中，首先要将实验试件按表 4-2 和 4-3 中的实验号进行编号，然后将它们的原始粗糙度值测出与研磨加工后的所测的粗糙度值进行对比^[22]。

实验操作中需要注意的是：在整个通电施加磁场的过程中必须保证工件处于高速运转状态。一般情况下，处于磁场中导磁性材料必然被磁化，这将对原磁场中的磁力线分布造成一定的影响，磁场强度也相应发生变化。而磁化的本质是导体中的带电粒子在外部磁场的作用下由原来的各向异性转变为各向同性而表现出一定的磁性。但是在液体磁性磨具加工过程中，工件始终处于高速旋转状态，内部的带电粒子不可能始终指向同一个方向，故导磁性材料工件也不会被磁化，在磁场中可看作一个非导磁性材料工件，条件是工件必须处于旋转状态。所以只要操作合理，导磁性材料和非导磁性材料工件在液体磁性磨具中的加工机理并没有本质上的区别。关于上述结论我们也做了一些验证性实验，首先将钢件置于磁场中，并且工件保持静止状态，发现工件完全被磁化，表面吸附了一层磁性微粒，严重破坏了液体磁性磨具的结构，同时也将磨料和工件表面隔离开，使光整加工无法正常进行。相反，先

让工件处于旋转状态，然后再施加磁场，则不会有上述现象发生，可以实现正常的研磨加工。

根据上述机理分析可知，高速旋转的导磁性材料即使在磁场中也不会被磁化，所以在实验过程中就需要注意操作步骤，必须先开动数控机床使工件处于运动状态，然后再施加磁场；在研磨加工完成后，也必须先关闭磁场电源去掉外部磁场后再关闭机床，以保证工件的加工效果。

4.3.3 测试数据

在液体磁性磨具光整加工中，工艺参数的选择是非常重要的。一组合理的工艺参数能够更好地使工件形状精度和表面质量达到预期效果。液体磁性磨具光整加工的工艺参数主要包括：研磨时间、工件旋转速度、磁场强度等。下面就按照表（4-1）制定的实验方案来研究这些参数对液体磁性磨具光整加工的加工效果的影响规律[23]。

表 4-2 和表 4-3 分别为 45#钢件和铝件加工后测得的数据。

表 4-2 45[#]钢工件实验数据Tab.4.2. Experimental datum of parts in 45[#] steel

实验	粗糙度 (μm)					平均值	差值
1	加工前	1.407	1.503	1.621	1.644	1.543	0.534
	加工后	0.990	1.033	0.975	1.041	1.009	
2	加工前	1.712	1.935	1.996	1.707	1.837	0.788
	加工后	1.069	1.115	1.016	0.976	1.049	
3	加工前	1.690	1.520	1.700	1.864	1.693	0.948
	加工后	0.760	0.759	0.792	0.672	0.745	
4	加工前	1.272	1.293	1.375	1.381	1.330	0.671
	加工后	0.790	0.545	0.675	0.629	0.659	
5	加工前	1.415	1.414	1.499	1.396	1.431	1.285
	加工后	0.158	0.140	0.113	0.173	0.146	
6	加工前	1.347	1.562	1.338	1.344	1.372	0.735
	加工后	0.642	0.623	0.660	0.623	0.637	
7	加工前	2.318	2.098	2.264	1.978	2.164	1.404
	加工后	0.750	0.786	0.743	0.762	0.760	
8	加工前	1.424	1.364	1.502	1.216	1.376	0.471
	加工后	0.899	0.897	0.961	0.863	0.905	
9	加工前	1.420	1.339	1.284	1.449	1.373	0.573
	加工后	0.777	0.717	0.821	0.885	0.800	

表 4-3 铝工件实验数据

Tab.4.3. Experimental datum of parts in YL12

实验	粗糙度 (μm)					平均值	差值
1*	加工前	1.354	1.334	1.284	1.360	1.333	0.917
	加工后	0.424	0.472	0.370	0.399	0.416	
2*	加工前	1.058	1.053	0.939	1.120	1.042	0.896
	加工后	0.097	0.119	0.150	0.218	0.146	
3*	加工前	0.935	1.043	1.032	0.985	0.999	0.842
	加工后	0.155	0.183	0.152	0.139	0.157	
4*	加工前	1.809	1.771	1.945	2.026	2.087	1.738
	加工后	0.132	0.169	0.186	0.110	0.149	
5*	加工前	1.662	1.629	1.664	1.664	1.654	1.441
	加工后	0.159	0.226	0.252	0.217	0.213	
6*	加工前	1.780	1.501	1.470	1.593	1.586	1.029
	加工后	0.590	0.585	0.512	0.544	0.557	
7*	加工前	0.775	0.767	0.768	0.795	0.776	0.555
	加工后	0.208	0.207	0.247	0.222	0.221	
8*	加工前	1.255	1.157	1.009	1.144	1.141	0.926
	加工后	0.251	0.161	0.197	0.251	0.215	
9*	加工前	1.230	1.130	1.108	1.315	1.195	0.976
	加工后	0.264	0.232	0.172	0.210	0.219	

4.3.4 对活塞和内孔表面的光整加工试验

为了进一步研究液体磁性磨具的加工机理, 为了尽快实现液体磁性磨具加工的产业化, 在对圆柱外表面进行加工的基础上, 我们对空压机用活塞外表面和铝制试件的内孔表面进行加工。

我们试验用的活塞的直径为 50mm, 由于活塞形状特殊, 为了加工活塞的外表面, 我们设计了一套夹具(夹具的零件图在后面的附录中), 这样活塞就可以在我们自行设计的实验装置中进行加工。带夹具的活塞, 图 4-8:

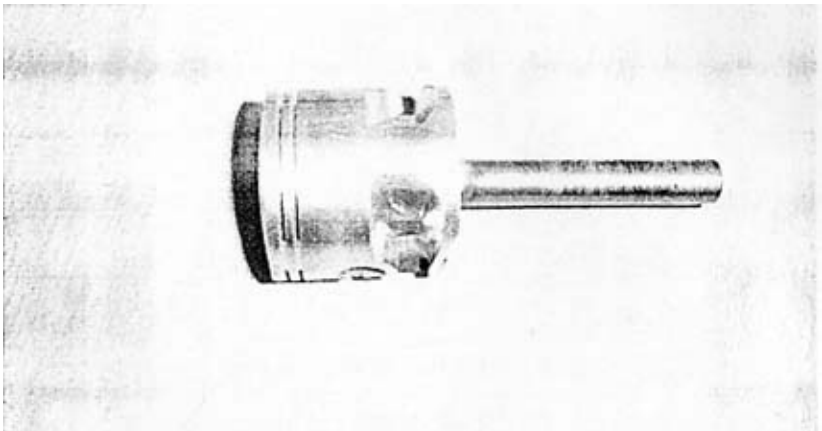


图 4-8：被加工的活塞及其夹具

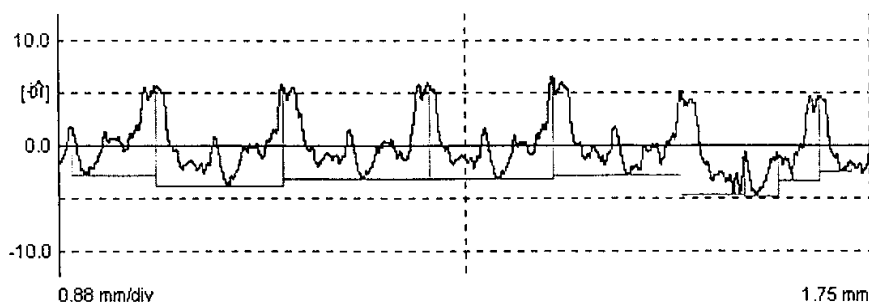
Fig.4.8.Piston and that of fixture

在实验时间和磁场强度及工件的转速一定的情况下（加工时间 5 分钟；由于活塞的直径较大，因此我们把加工转速调低，加工时的转速 600 转/分（这样加工时被加工表面的线速度就不会很高）；加工时的电流 2.5A），实验前和实验后活塞表面粗糙度的变化如下表：

表 4-4 活塞外表面粗糙度加工前后数值变化表

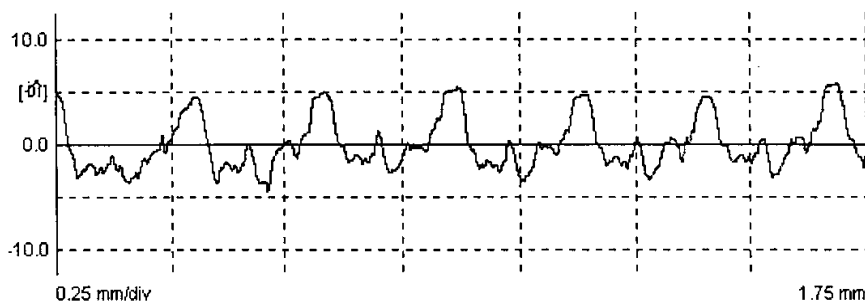
Tab.4.4. Experimental datum of part

序号	加工前的表面粗糙度值	加工前的表面粗糙度值	加工前的平均值	加工后的平均值
1	1.833	1.243	1.843	1.198
2	1.860	1.119		
3	1.827	1.354		
4	1.878	1.254		
5	1.829	1.245		
6	1.874	1.335		
7	1.824	1.235		
8	1.818	0.797		



a) 加工前活塞表面粗糙度轮廓

a) Surface roughness profile before working



b) 加工后活塞表面粗糙度轮廓

b) Surface roughness profile after working

图4-9 加工前后活塞表面轮廓变化图

Fig.4.9. Comparison of surface roughness profile between before and after working

铝制试件如图 4-10:

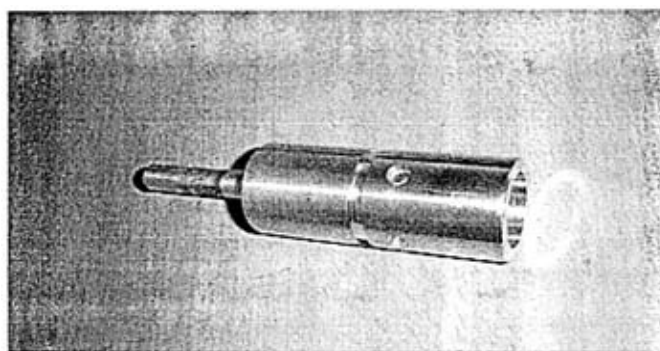


图 4-10 待加工的试件

Fig.4.10.The photo of workpiece

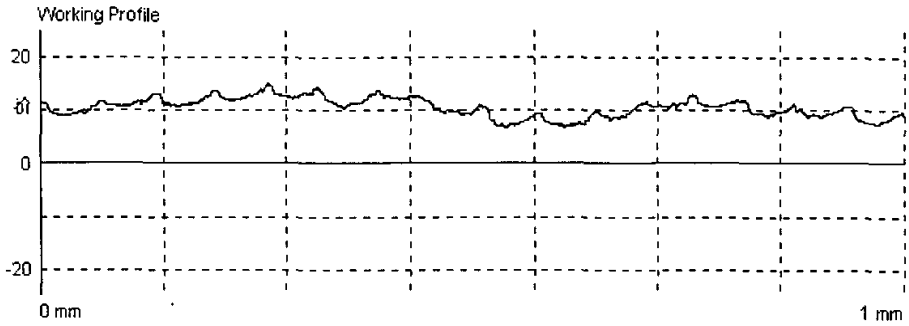
试件的待加工表面为内孔表面，其直径为 30mm，在实验时间和磁场强度及工件的转

速一定的情况下，实验前和实验后孔内表面粗糙度的变化如下表：加工时间 5 分钟；
转速 900 转/分；加工时的电流 2.5A。

表 4-5 内孔表面粗糙度加工前后数值对照表

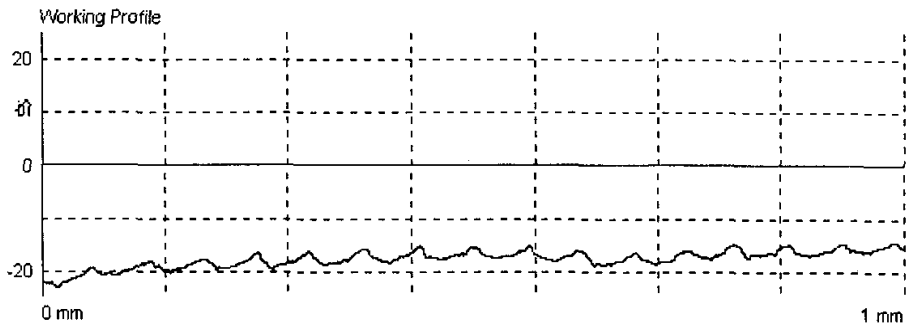
Tab.4.5. Experimental datum of part

序号	加工前的表面粗糙度值	加工前的表面粗糙度值	加工前的平均值	加工后的平均值
1	0.760	0.612	0.759	0.5545
2	0.791	0.572		
3	0.783	0.442		
4	0.790	0.607		
5	0.720	0.602		
6	0.729	0.587		
7	0.753	0.489		
8	0.746	0.525		



a) 加工前内孔表面粗糙度轮廓

a) Surface roughness profile before working



b) 加工后内孔表面粗糙度轮廓

b) Surface roughness profile after working

图4-11 加工前后内孔表面轮廓变化图

Fig.4.11.Comparison roughness profile between before and after working

4.4 液体磁性磨具工艺参数的选择原则

4.4.1 加工时间的选择原则

以下为实验中经过不同时间的光整加工后所测到的工件表面粗糙度降低量如表 4-6, 图 4-12 为变化曲线图:

表 4-6 不同加工时间下表面粗糙度的降低量

Tab.4.6 Decrement of roughness in vary time

加工时间 Ra 变化量	5 分钟	10 分钟	15 分钟
试件 (45#钢)	0.70 μm	0.81 μm	1.08 μm
试件 (YL12)	0.95 μm	1.14 μm	1.01 μm

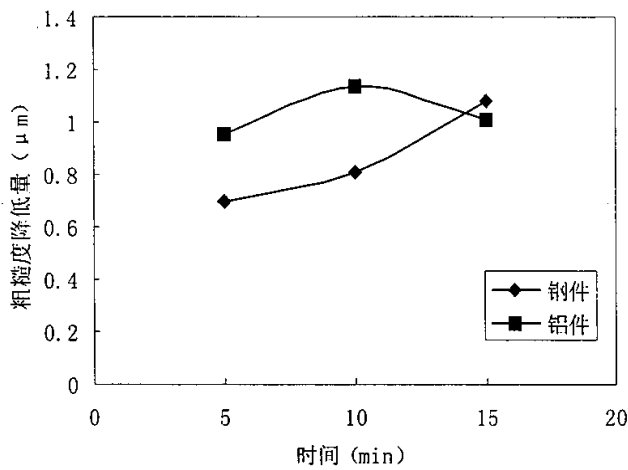


图 4-12 粗糙度降低量与加工时间的变化关系

Fig4.12. Relation between decrement of roughness and time

从图中可以看出,随着加工时间的延长,钢件的表面粗糙度值降低量越来越大,材料去除量也越来越大。对于铝件来说,在研磨时间低于 10 分钟时,变化趋势与钢件是一致的,但随着研磨时间的进一步延长,其表面粗糙度降低量则有明显减小的趋势;同时铝件表面也发现明显的点蚀痕迹。这是因为磨料相对铝件硬度要高的多,虽然去除量大、去除效率高;但是在超过一定的时间后,由于实验中所用磨料粒度较大(54 目),磨料会在磨掉原来表面微观不平度的基础上,继续对铝件表面刻划、刮擦留下新的划痕使表面粗糙度增大,同时在铝件表面较深的划痕中由于磁流变液长时间的滞留会对铝件表面产生腐蚀作用,所以会发现点蚀现象。而钢件则由于其硬度大,抗腐蚀能力强,故不会出现上述现象。总之,在液体磁性磨具光整加工中,

对于硬度较低的材料如铝、铜等零件，加工时间不要过长（10 分钟左右）。

4.4.2 工件转速的选择原则

以下为实验中工件经过不同转速的光整加工后所测到的工件表面粗糙度降低量如表 4-7，图 4-13 为变化曲线图。

表 4-7 不同转速下表面粗糙度的降低量

Tab.4.7. Decrement of roughness in vary rotate speed

工件转速 Ra 变化量	600r/min	900r/min	1600r/min
试件（45#钢）	0.88 μm	1.03 μm	0.76 μm
试件（YL12）	0.98 μm	1.20 μm	1.02 μm

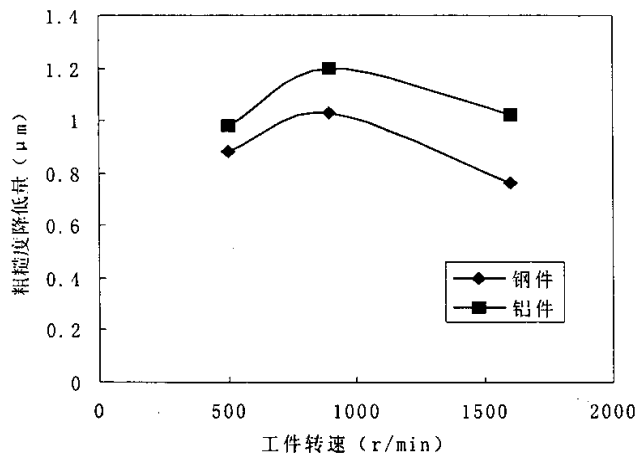


图 4-13 粗糙度降低量与工件转速的变化关系

Fig.4.13. Relation between decrement of roughness and rotation speed

工件转速的选择对于研磨效果也有很大影响。从图中可以发现，钢件和铝件的粗糙度降低量随工件转速的变化趋势相似，当工件转速太快而超过一定的范围（1000r/min）时，粗糙度降低量有减小的趋势。所以，在研磨过程中工件的旋转速度不宜太高，工件转速太高反而会使金属去除量减小，达不到理想的表面粗糙度。这是因为当工件转速太高时，工件表面与液体磁性磨具之间会出现剪切稀化现象，

从而导致剪切应力减小，磨料对工件表面形不成足够的压力使加工效果不明显。从图中可以看到工件转速不宜超过 900~1000r/min。由工件的直径 $\Phi 20\text{mm}$ ，转化成线速度大约为 55-61m/min，也就是说，加工时的工件线速度不能够超过这个数值，否则，加工效率会降低。

4.4.3 磁场强度的选择原则

以下为实验中液体磁性磨具在不同电流（电流的大小决定磁场强度的大小）下研磨加工后所测到的工件表面粗糙度降低量如表 4-6，图 4-10 为变化曲线图。

表 4-8 不同电流大小表面粗糙度的降低量

Tab.4.8 Decrement of roughness in vary current

电流大小 Ra 变化量	1A	2A	3A
试件（45#钢）	0.95 μm	1.05 μm	1.15 μm
试件（YL12）	0.98 μm	1.20 μm	1.02 μm

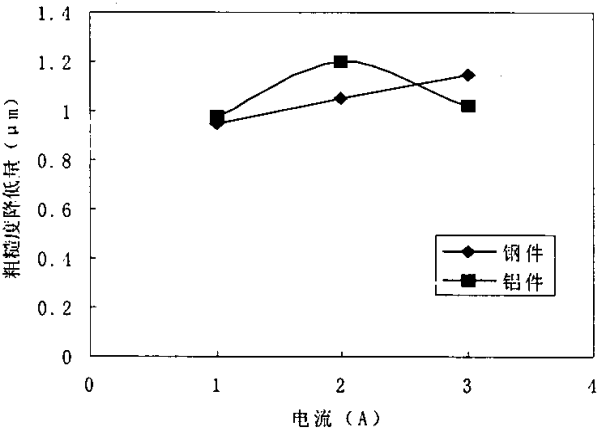


图 4-14 粗糙度降低量与电流大小的变化关系

Fig.4.14.Relation between decrement of roughness and current

从上图可以发现，钢件的粗糙度降低量与电流的大小成正比，而对于铝件则是当电流即磁场强度低于某一数值时与钢件的变化趋势一样，而当磁场强度超过一定

范围后粗糙度降低量明显减小，即表面粗糙度有所下降。这两种不同的变化趋势还是由于钢件和铝件两种材质在硬度上明显差距造成的。当磁场强度很高时，磨具对工件表面的研磨压力和剪切应力也相应增大，原来较光而又材质较软的表面在磨料的刻划下，工件表面就会出现较深的波纹和划痕，因而会出现工件表面粗糙度降低的现象。需要指出的是，当磁场强度接近或超过液体磁性磨具的磁饱和强度，再加大电流也不会提高加工效率。

第五章 液体磁性磨具光整加工模式的几种构想

5.1 永磁轮光整加工法

5.1.1 永磁轮的结构原理

首先介绍永磁轮的结构，永磁轮设计时磁场应尽量使磁场的梯度方向垂直于加工表面，以确保加工区域内的磁力线穿过抛光轮和工件之间的小间隙。永磁轮结构是这样的，如图 5-1：轮芯、轮芯套、磁轭均为导磁材料，隔磁板为不导磁材料，扇形磁铁分布于隔板的两侧，一侧为磁铁的 N 极位于外圆周，另一侧为磁铁的 S 极位于内圆周。这样轮芯、轮芯套、磁铁和磁轭就形成了一个封闭的磁路。磁铁采用的材料为永磁铁。两个磁铁之间由磁隔板隔开，并沿圆周方向形成了气隙^[27]。

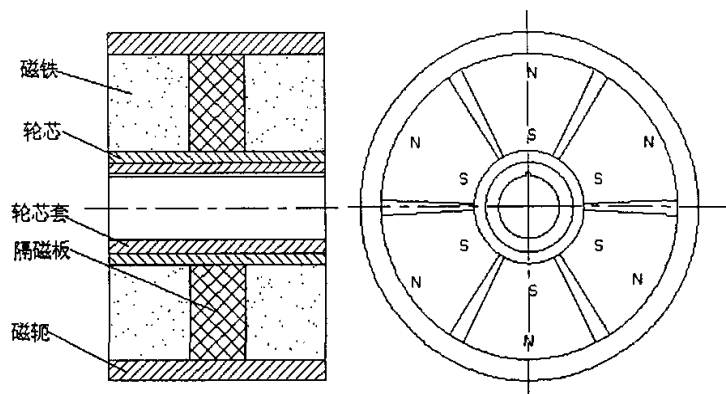


图 5-1 永磁轮结构原理图

Fig.5.1. Structure of the wheel with permanent-magnet material

5.1.2 永磁轮的加工机理

其加工机理如图 5-2 所示：加工区域内的剪切流变层上方的几何边界是圆形，在非剪切液体磁性磨具表面和工件的表面之间形成了一个狭小的间隙，间隙内形成

了一个高梯度的磁场，进入梯度磁场的液体磁性磨具就会发生流变，成为具有粘塑性的 Bingham 体，并产生突起，形成柔性磨头。发生流变的液体磁性磨具随着永磁轮旋转，到工件与永磁轮之间的间隙时，受到挤压发生剪切，在剪切应力的作用下，液体磁性磨具中的磨粒对工件表面进行刻划和划擦，从而降低工件表面的粗糙度。如果这时再允许永磁轮随轴公转，那么这种公转和自转的工具运动形式能够使加工的纹路更加复杂，有利于降低工件表面的粗糙度。

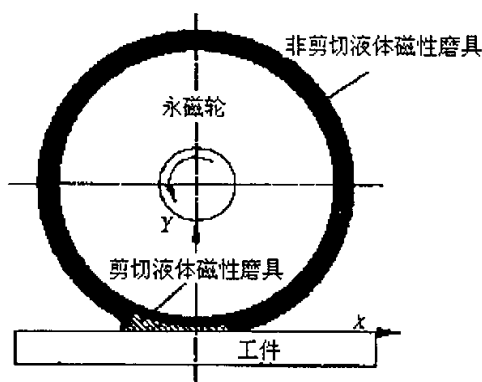


图 5-2 永磁轮光整加工原理示意图

Fig.5.2. Schematic drawing of the wheel with permanent-magnet material

当然加工效率及加工质量和永磁轮的转速、工件的运动速度、磨粒所占的体积比、抛光轮与工件的间隙、磁场的强度都有密切的关系。通过适当的调整上述参数，就可以完成较高精度的加工。这种加工方法适合对象为被加工的表面为平面或回转面的工件。

5.2 旋转抛光盘和电磁铁配合加工模式

如图 5-3 所示，在一高梯度的可控磁场的作用下，液体磁性磨具发生明显的流变效应，成为具有粘塑性的 Bingham 流体。当液体磁性磨具流经工件与抛光盘形成的微小间隙时，在磁场的作用下形成具有很高剪切屈服应力的类固态“小磨头”对工件进行加工。当液体磁性磨具流出磁场区域的时候又恢复其流体性能，通过泵和回收装置可以实现液体磁性磨具的循环使用。由于液体磁性磨具“小磨头”与工件

之间形成的是软接触，即所谓的柔性加工，代替了传统光整加工中的散粒磨料，实现对工件的精密加工。此种加工方法具有抛光效率高、磁场可控、剪切应力高、磨头无磨损、温度适用范围宽等其他传统方法所没有的优点，并且通过计算机的控制可以实现复杂光学表面的加工^[29]。

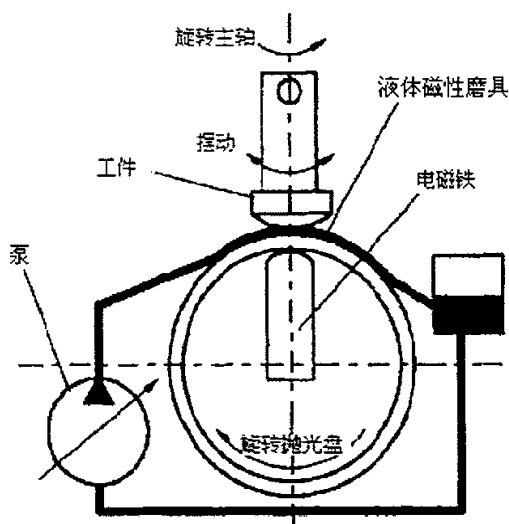


图 5-3 液体磁性磨具光整加工原理图

Fig.5.3 Schematic view of Liquid-magnetic abrasive tool experiment set

这种加工方法工件不仅可以随着机床主轴旋转，而且机床主轴还可以带动工件进行一定角度的摆动。目前，这种加工方法被较广泛用于光学镜头的加工之中，但是只要我们稍加改进，用这种加工方法对球型零件的表面加工，可以得到非常高的表面质量。

5.3 活塞式上下往复运动的加工模式

这种加工模式与挤压珩磨^[1]加工原理有一些相似之处的。挤压珩磨加工时液压缸装的介质为磨料流，但是挤压珩磨加工的缺点是加工后磨料流粘附于加工表面，不易清洗，而当液压缸装的介质为液体磁性磨具时，对工件表面进行光整加工时，为粘塑体，加工完之后，关掉磁场后液体磁性磨具又恢复为液体，加工后工件表面

易于清洗，因此这种加工模式用液体磁性磨具比用磨料流效果要好。

5.3.1 装置的结构

这套装置主要由以下几个部分组成，如图 5-4：装液体磁性磨具的液压缸（上液压缸和下液压缸）；装液压油的液压缸（包括上液压缸和下液压缸）；电磁铁线圈；电磁铁的两极；工件夹具；支撑架；低碳钢板；液压系统组成。液压系统由直流马达和变速叶片泵来提供动力。

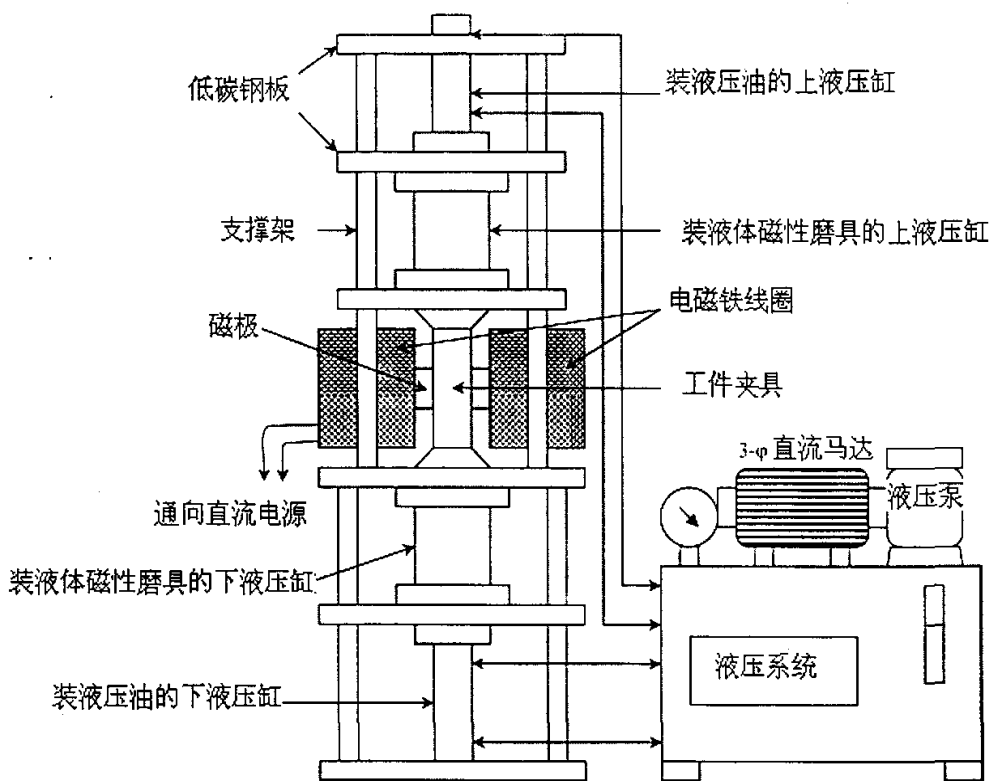


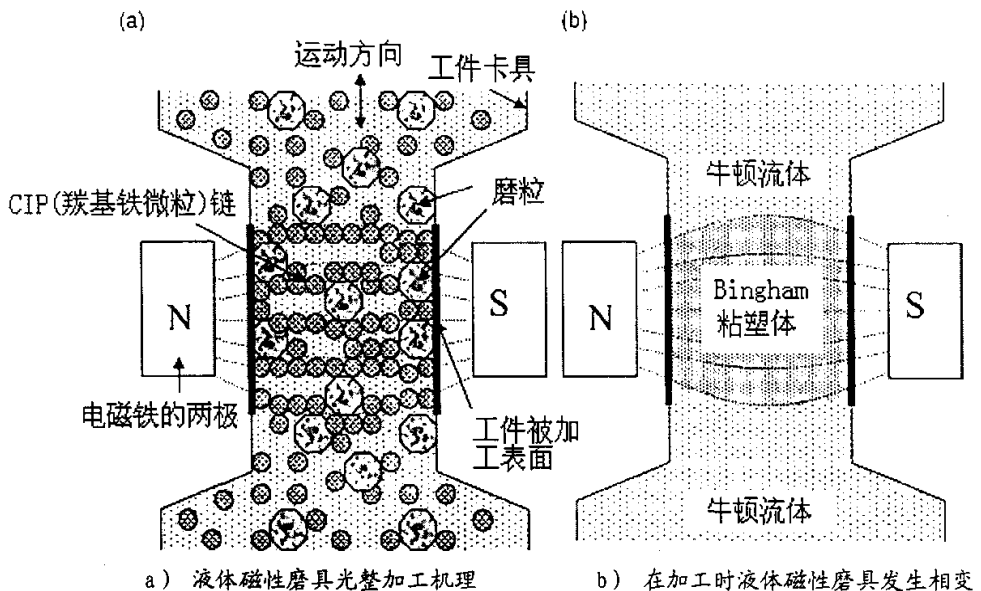
图 5-4 液体磁性磨具光整加工装置简图

Fig.5.4. Schematic of Liquid-magnetic abrasive tool experimental setup

5.3.2 装置的加工原理

其工作原理是这样的：液压系统提供动力，于是装液压油的两个液压缸开始工

作，液压油缸的活塞推动装液体磁性磨具的液压缸中的活塞运动。在两个液压油缸上下活塞的作用下，装液体磁性磨具的两个液压缸中的活塞做被动的上下往复运动。在往复运动过程中，液体磁性磨具被挤压进出工件的加工表面。无外加磁场时，液体磁性磨具在液压缸里是以牛顿流体的形式存在着；当施加外部磁场时，液体磁性磨具流经工件表面时，在强磁场的作用下，发生流变变为 Bingham 体，如图 5-5，在液压力的作用下，发生流变的 Bingham 粘塑体就从工件表面挤压而过，粘塑体中的磨粒和工件表面接触，对工件的表面进行光整加工。当穿过工件表面时，又因磁场强度的迅速减小，液体磁性磨具恢复为牛顿流体；经过上下往复多个冲程之后，工件的表面粗糙度值得到降低。



a) Mechanism of Liquid-magnetic abrasive tool finishing process

b) Change in rheological behaviour of Liquid-magnetic abrasive tool during finishing.

图 5-5 磁性抛光液加工原理图

Fig.5.5. Liquid-magnetic abrasive tool finishing process

这种加工模式特点主要有：

1. 设备结构简单，制造工艺不复杂；
2. 加工环境为封闭式环境，对操作工的人身健康影响不大；

3. 受外加电磁铁的尺寸大小的影响，可加工工件的外形尺寸较小，适合对小尺寸零件的表面光整加工；

5.4 动磨头式的加工模式

简单的讲，这种加工模式就是工件由夹具固定，磨头开始转动，磨头在被施加磁场后，吸附液体磁性磨具，在预先设定的路线下，发生流变的液体磁性磨具中的磨粒对非规则曲面进行光整加工。

图 5-6 就是对这种模式的构想模拟图，被加工工件箱体的内表面为不规则曲面，箱体被固定在工作台上；

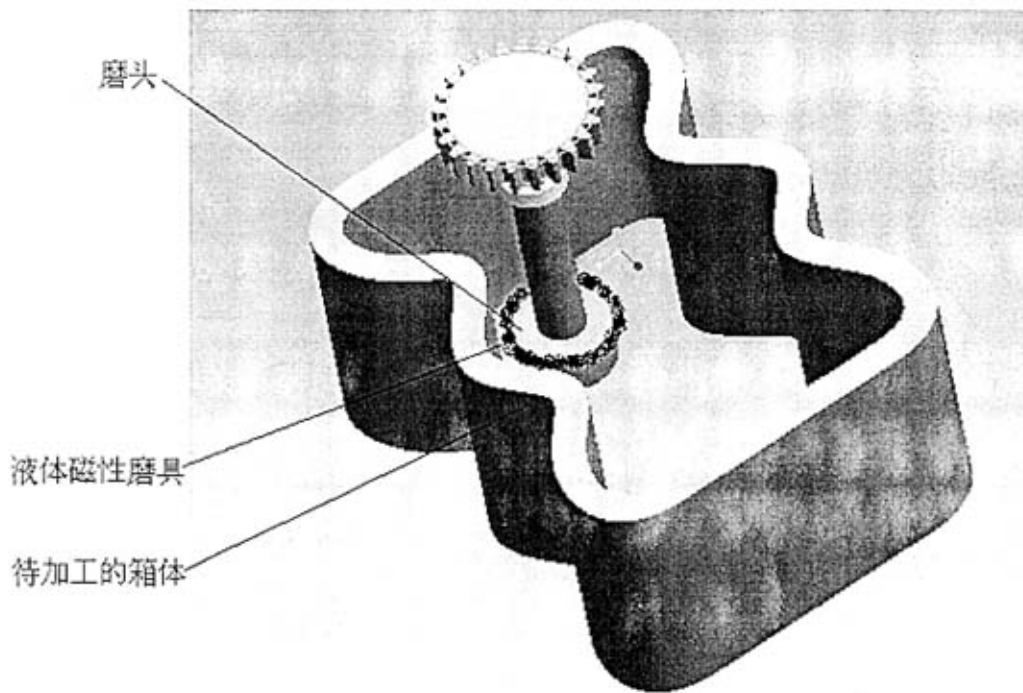


图 5-6 加工模式图

Fig. 5. 6. Schematic of the working mode

磨头的形状如图，磨头的结构如图 5-7，内部结构为一电磁线圈；磨头杆的中上部为滑环，滑环和固定在机床上的碳刷架相连，用来给电磁线圈供电；磨头的顶部为一外齿圈，通过机床的另一齿轮来传递动力使磨头旋转。

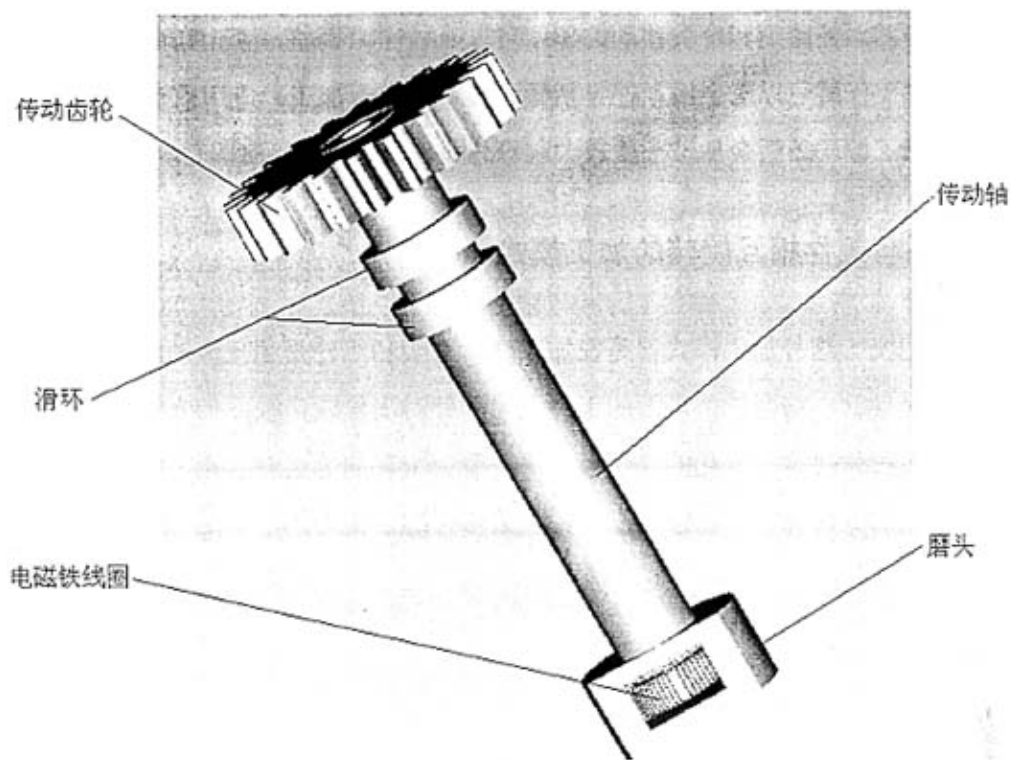


图 5-7 磨头结构图

Fig.5.7. Structure of the grinding head

这种模式的工作原理是这样的：首先根据待加工表面的形状进行编程，将磨头的工作路线输入至机床的电脑中。这种模式加工的数控机床不仅应满足磨头可以在X、Y、Z 方向上移动，而且在移动时，磨头还可以进行转动。加工开始时，为了防止工件被磁化，应先将磨头转动起来，（这个原理我们已在第四章探讨过）之后再给磨头电磁铁通电。电磁铁的电流通过碳刷架传至滑环，然后由滑环传至电磁铁。电磁铁在通上电之后，周围的液体磁性磨具便吸附在磨头上，液体磁性磨具此时便发生相变，由牛顿流体变为宾汉姆体。通过调整磨头与加工区面的间隙，磨头的转速来控制加工的效率和加工的表面质量。

此种加工模式的特点主要有：

1. 可以对比较复杂的、非规则的工件内外表面进行加工；
2. 加工时的磁场强度可以通过调节电磁铁的电流的大小，来调节磁场强度的大小；

3. 磨头与曲面的距离和磨头移动的速度可以靠程序来调整, 易于实现自动化操作;
4. 这种加工模式可以对金属零件包括导磁性零件进行加工, 应用前景较广泛;
5. 这种加工模式还适合加工一些较大的箱体零件。

5.5 磨头与工件相互旋转的加工模式

顾名思义, 这种加工模式就是在加工时, 磨头和工件是相互转动的。这种加工模式主要是针对一些回转体表面的工件, 尤其针对齿轮轮齿表面的光整加工。

图 5-8 就是对这种模式的构想模拟图: 待加工表面为齿轮的轮齿表面, 磨头的形状如图, 磨头部位装一和待加工齿轮模数相同的齿轮刀具, 但是刀具的齿厚可以略薄以标准齿轮的齿厚, 当然这个刀具得特制, 这是因为在加工时, 刀具的齿面上会吸附一些液体磁性磨具, 所以刀具的齿厚就加大了, 这样做的目的是为了尽可能的磨粒嵌入进啮合轮齿面之间, 从而起到光整加工的作用。

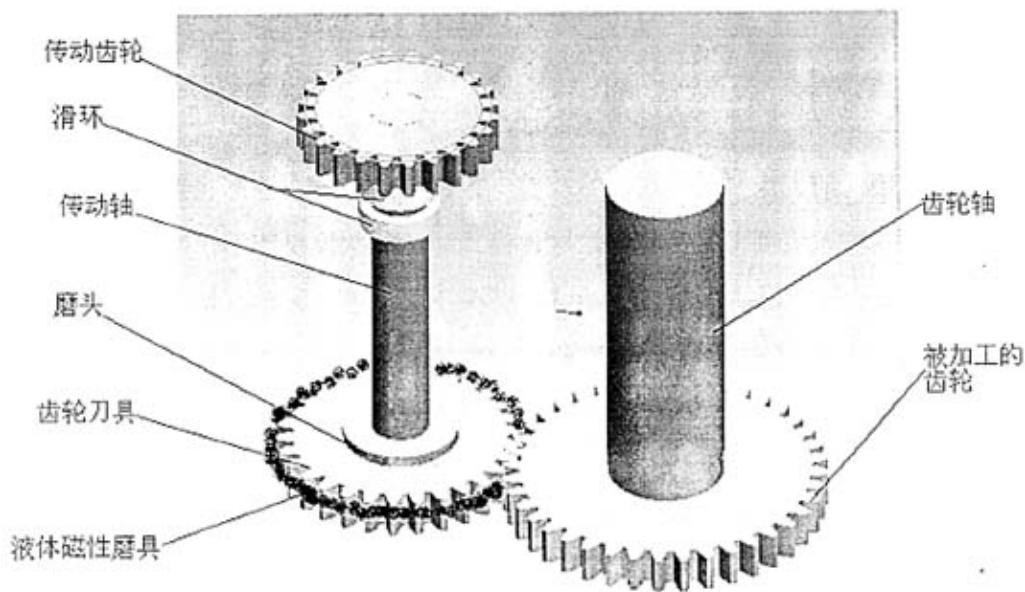


图 5-8 加工模式图

Fig.5.8. Schematic of the working mode

磨头的结构如图 5-9, 内部结构为一电磁铁; 磨头杆的中上部为滑环, 滑环和固定在机床上的碳刷架相连; 磨头的顶部为一外齿圈, 通过机床的另一齿轮来传递

动力使磨头旋转，这点同同一种加工模式的磨头基本相同（图 5-7）。但是装配这个装置时，务必保证磨头上装的齿轮与待加工齿轮的中心距，这样才能保证两个齿轮正确的啮合，也才能保证被加工轮齿表面的光整效果。

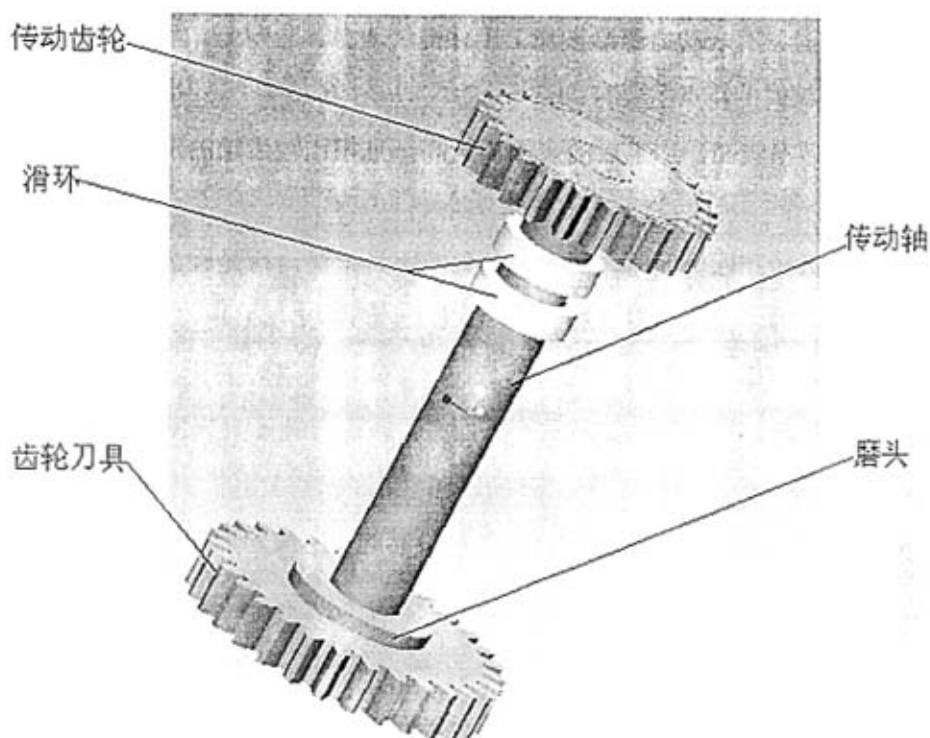


图 5-9 磨头结构图

Fig.5.9. Structure of the grinding head

这种加工模式的原理是这样的：当磨头转动时，带动被加工齿轮旋转；当磨头中的电磁线圈被通上电之后，磨头上齿轮周围的液体磁性磨具便发生相变，由牛顿流体瞬时转变为宾汉姆体，并吸附在齿轮刀具的表面。当吸附液体磁性磨具的轮齿转到与被加工齿轮的轮齿相啮合时，吸附在轮齿上的液体磁性磨具被剪切，液体磁性磨具被剪切的同时，液体磁性磨具中的磨料和齿轮表面发生接触，在啮合压力下，磨粒对轮齿表面进行挤压和划擦，这样就可以对轮齿的表面进行光整加工。由于此加工模式是齿轮在啮合状态下的光整加工，因此齿轮的轮齿表面的加工效果会比较理想的。

另外此种加工模式还可以对其回转面进行加工，和加工齿轮轮齿表面不一样的

是：

- ①磨头上装的不是齿轮刀具，而是和待加工零件一样的回转面；
- ②加工齿轮时磨头和工件的转向相反，而加工回转面时，工件和磨头的转向一致，因此必须有一动力源给被加工工件提供动力。

这种加工模式的特点主要有：

1. 加工效率较高，加工后的表面质量高，且相比较齿轮的珩磨来讲，加工成本低；
2. 加工齿轮和回转面时，对刀具的要求不是很高，这是因为刀具并不和工件直接接触，因此，刀具的制作相对要容易一些；
3. 这种加工模式所要求的机床不是非常复杂，加工时磨头不需要在 X、Y、Z 方向移动，操作简单，从这个方面来讲，更有利于大规模的推广。

上述几种模式是我们根据液体磁性磨具的加工特性提出的，具有一定的科学性，且这几种模式的提出是基于我们对液体磁性磨具的研究经验而提出的。目前，我们正在努力使这些加工模式构想转变为现实。

第六章 结论及展望

本文是在参考大量的国内外相关资料、文献的基础之上,对液体磁性磨具的物理性能和加工机理进行了研究,通过研究,对液体磁性磨具有了进一步的认识,为液体磁性磨具在未来的产业化作了一定的铺垫。通过研究,本文主要得出以下结论:

液体磁性磨具的组分原则是:磁介质微粒应选磁饱和强度大的软磁性材料;载液应立足于满足低蒸发率、低粘度和高度化学稳定性的要求;表面活性剂选择的其基本原则是“相似相溶”,即尽量选择,亲水基与颗粒的结构相近,而亲油基与母液的结构相近;磨粒的选择原则是要求有一定的硬度和韧性。在此基础上,才能配置出满足加工要求的液体磁性磨具来。

用液体比重计测量的液体磁性磨具的密度约为 $1.36\text{g}/\text{cm}^3$;液体磁性磨具在不同磁场强度下,其表观密度是不同的;在零磁场下,用旋转式粘度计测量液体磁性磨具的粘度为 610cP 。

通过试验,对液体磁性磨具在不同磁场强度下的剪切应力进行测量,得知,当电磁铁产生的磁场的磁密为 0.6T 时,其剪切应力比零磁场情况下大 25 倍左右。这从另一个角度说明,当液体磁性磨具在磁场中发生相变后,其加工效率远比在零磁场情况下加工效率要高得多。

通过实验,对液体磁性磨具的磁导率进行测量,并初步绘制了液体磁性磨具的 B-H 曲线,这为液体磁性磨具进一步的开发和利用提供了依据,也为液体磁性磨具在加工时的磁场的设计提供了依据。

在可行性加工实验中,发现了加工参数如磁场强度、工件的转速、加工的时间和加工时工件表面所受的压力对加工效率和表面质量的影响规律;同时,我们也基本总结出不同材质的工件,其加工的参数亦是不尽相同的。

液体磁性磨具对零件的表面光整加工属于柔性加工,加工后工件表面及次表面残余应力小。

目前，我们的实验还存在一些问题，这些问题主要是：

1. 目前我们研制的液体磁性磨具在首次加工前，稳定性能较好，但是在加工后稳定性则降低，易出现粒子聚集而沉淀，且加工时发泡现象较严重；
2. 我们目前对液体磁性磨具的物理性质研究还不是很全面，有待进一步的深入；
3. 液体磁性磨具的加工模式还需要在实验中进一步实践，这是开发液体磁性磨具的关键。

对未来的展望：

在以后的几年中，我们将对液体磁性磨具的物理性能进行进一步的研究，力争研制出更适合对工件表面进行光整加工的液体磁性磨具来；我们在第五章提出的液体磁性磨具未来加工的几种模式构想，在以后的实验中我们将对这些加工模式进行验证修改或重新架构，争取液体磁性磨具在实践领域取的突破。

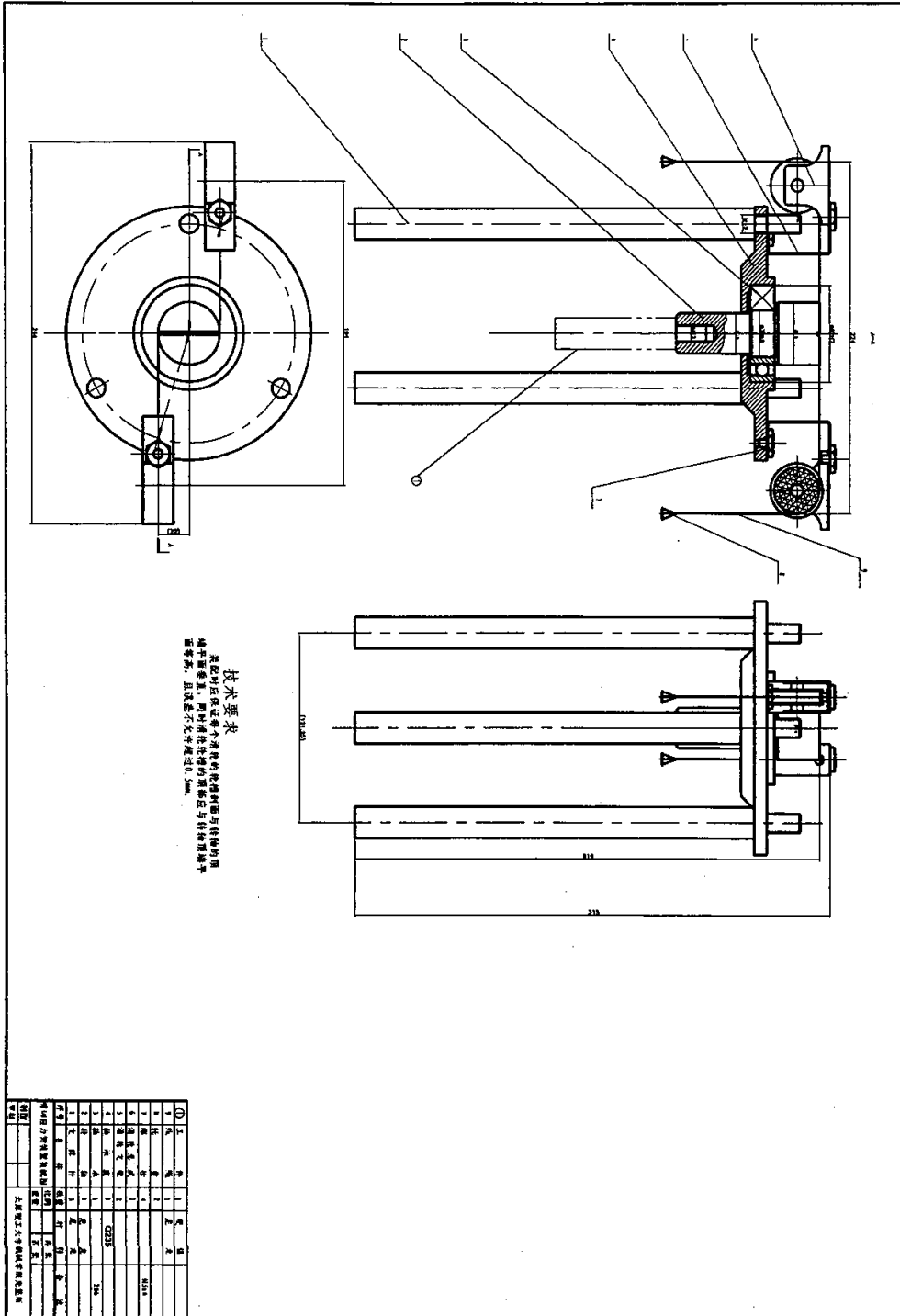
参考文献

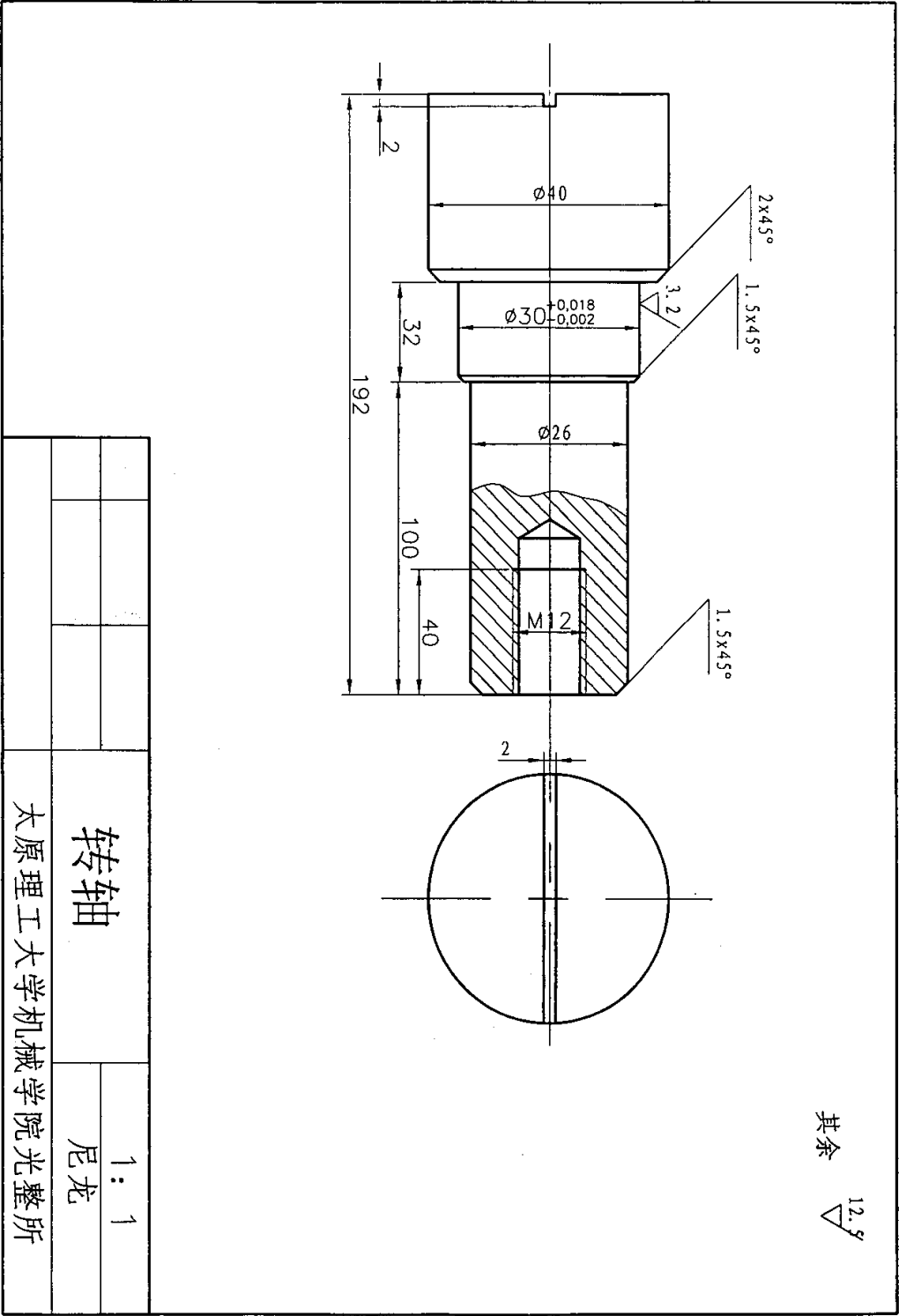
- [1] 杨世春, 汪鸣铮, 张银喜, 表面质量与光整技术, 北京, 机械工业出版社, 1999, 12
- [2] Shulman. Z. P, W. I. Kordonskv, E. A. Zaltsgendler, etc, Structure Physical Properties and Dynamics of Magnetorheological Suspensions, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 12. No. 6, 1986, 935-955.
- [3] Jolly M R, Carlson J D, Munoz B C, Smart Mater Struct, 1996, 3, 607
- [4] 关新春, 欧进萍, 李金海, 磁流变液组分选择原则及其机理探讨, 化学物理学报, 2001, 10, Vol. 14, No. 5, 592-596
- [6] J.M. Ginder, L.C. Davis, Shear stress in magnetorheological fluids: Role of magnetic saturation, Appl. Phys. Lett, 65(26), 1994, 3410-3412
- [7] J.M. Ginder, L.C. Davis, L.D. Elie, Rheology of magnetorheological fluids: modes and measurements, Int. J. Mod. Phys. B (Singapore), vol. 10. No. 23-24, 1996, 329-303
- [8] 张峰等, 磁流变抛光技术, 光学精密工程, Vol 7, No. 5, 10, 1999, 1-8
- [9] Bossis G, Mathis C, Mimouni Z, et al. EuroPhys Lett, 1990, 11(2), 133-137
- [10] Felt D W, Hagenbuchle M, Liu J, Conf. on ER fluids, MR suspensions and Associated Technology, Singapore, World Scientific, 1996, 738-746
- [11] Chen Z Y, Tang X, Zhang G C, Conf. on ER fluids, MR suspensions and their applications, Singapore, World Scientific, 1998, 486-493
- [12] 潘胜, 吴建耀, 胡林等, 功能材料, 1997, 28(2), 264-266
- [13] Kordonski W I, Gorodkin S R, Novikova Z A, Conf. on ER Fluids, MR Suspensions and their Applications, Singapore, World Scientific, 1998, 535-542
- [14] 金昀, 张培强, 汪小华等, 磁流变液剪切屈服应力的计算, 中国科学技术大学学报, 2001, 31(2), 168-173
- [15] Lemaire E, Meunier A, Bossis G, et al. Jof Rheol, 1995, 39(5), 1011-1020

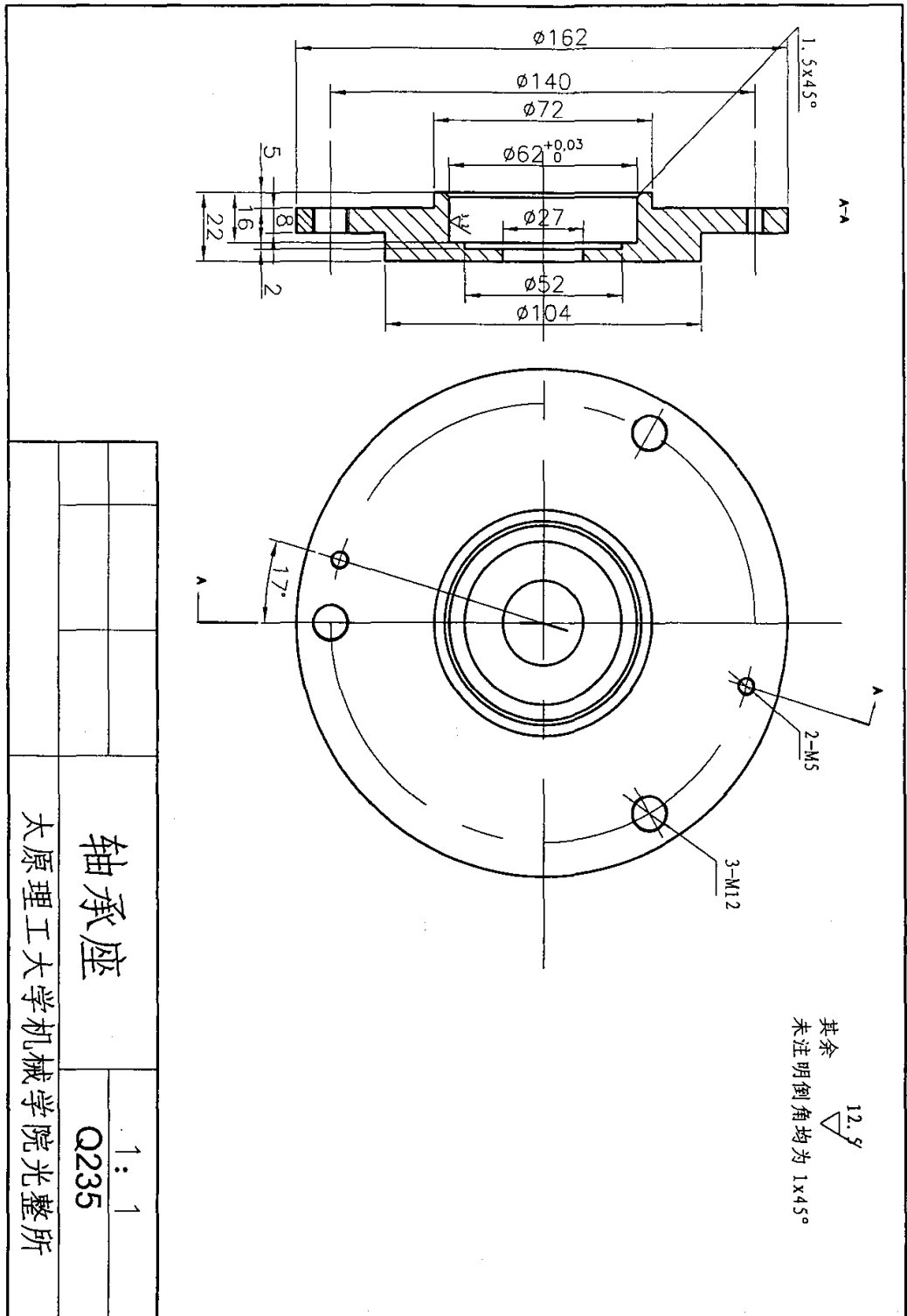
- [16] Noritsugu Umehara, Isao Shibata, Kazuya Edamura, New polishing method with magnetic congelation liquid, Conf. electrorheological fluids and magnetorheological suspensions, France, 693-699
- [17] S. Jha, V.K. Jain, Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process , International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 44 , 2004, 1019-1029
- [18] 李德才, 磁性液体理论及应用, 北京科学出版社, 2003, 132-133
- [19] 李学慧, 张 萍, 齐 锐, 磁性液体表观密度随磁场变化测量仪的研制, 物理实验, 第 23 卷, 第 7 期, 20-22
- [20] 司 鹄, 磁流变体的力学机理研究, 重庆大学博士学位论文, 2003
- [21] 郑成沛, 材料力学 , 北京, 北京工业大学出版社, 1994, 96-97
- [22] 李唯东, 面向光整加工的液体磁性磨具的研究与开发, 太原理工大学研究生毕业论文, 2005
- [23] 郝建军, 液体磁性磨具光整加工实验装置的研制与开发, 太原理工大学研究生毕业论文, 2005
- [24] J.David Carlson, What makes a good MR fluid, Conf. electrorheological fluids and magnetorheological suspensions, France, World Scientific, 2001, 63-69
- [25] P.Kulkarni L.Sheila, Study of the behavior of MR fluids in squeeze and valve modes, Conf. electrorheological fluids and magnetorheological suspensions, France, World Scientific , 2001, 201-207
- [26] 姚国治, 电(磁)流变液及其在振动控制中的应用, 西安交通大学博士论文, 1999. 1
- [27] 程灏波, 冯之敬, 王英伟, 磁流变抛光超光滑光学表面, 哈尔滨工业大学学报, Vol.37 No.4 Apr, 2005, 433-436
- [28] Kordonski Wm I, Jacobs SD, Magnetorheological Finishing, International Journal of Modern PhysicsB, 10.1996, 2837- 2848

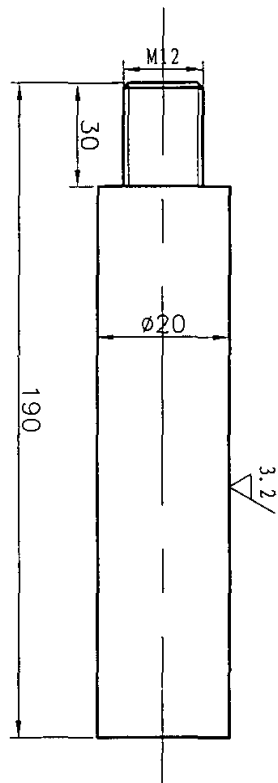
- [29] 仇中军, 张飞虎, 董申, 光学玻璃研抛用磁流变液的研究, 光学技术, Vol. 28 No. 6. Nov, 2002
- [30] 张峰等, 磁流变抛光液的研制, 功能材料, 33(5), 2002, 490-494
- [31] 孙志成, 内蒙古工业大学信息工程学院电工电子教学中心电工学电子课件, 第七章 磁路与铁心线圈电路
- [32] 王建晓, 孟光, 磁流变液研究进展, 航空学报, Vol. 23, No. 1, Jan. 2002, 6-12
- [33] 周锦进, 方建成, 徐文骥, 光整加工技术的研究与发展, 制造技术与机床, 2004年第3期, 7-11
- [34] 姜德生, R. O. Claus, 智能材料器件结构与应用, 武汉工业大学出版社, 2000年

附录1[剪切应力测试装置装配及零件图]



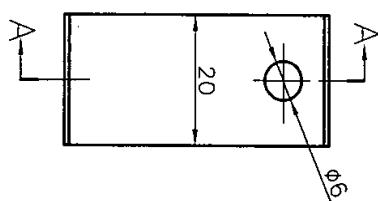
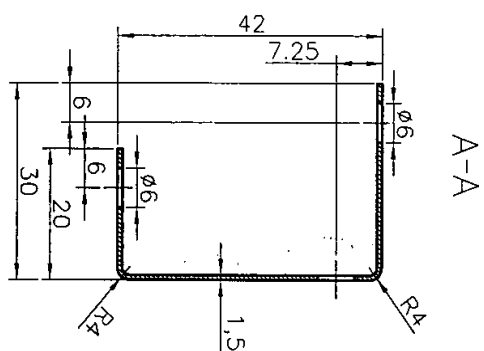






12.5/
其余
未注明倒角均为 1x45°

工件				1:1	
				硬 铝	
太原理工大学机械学院光整所					

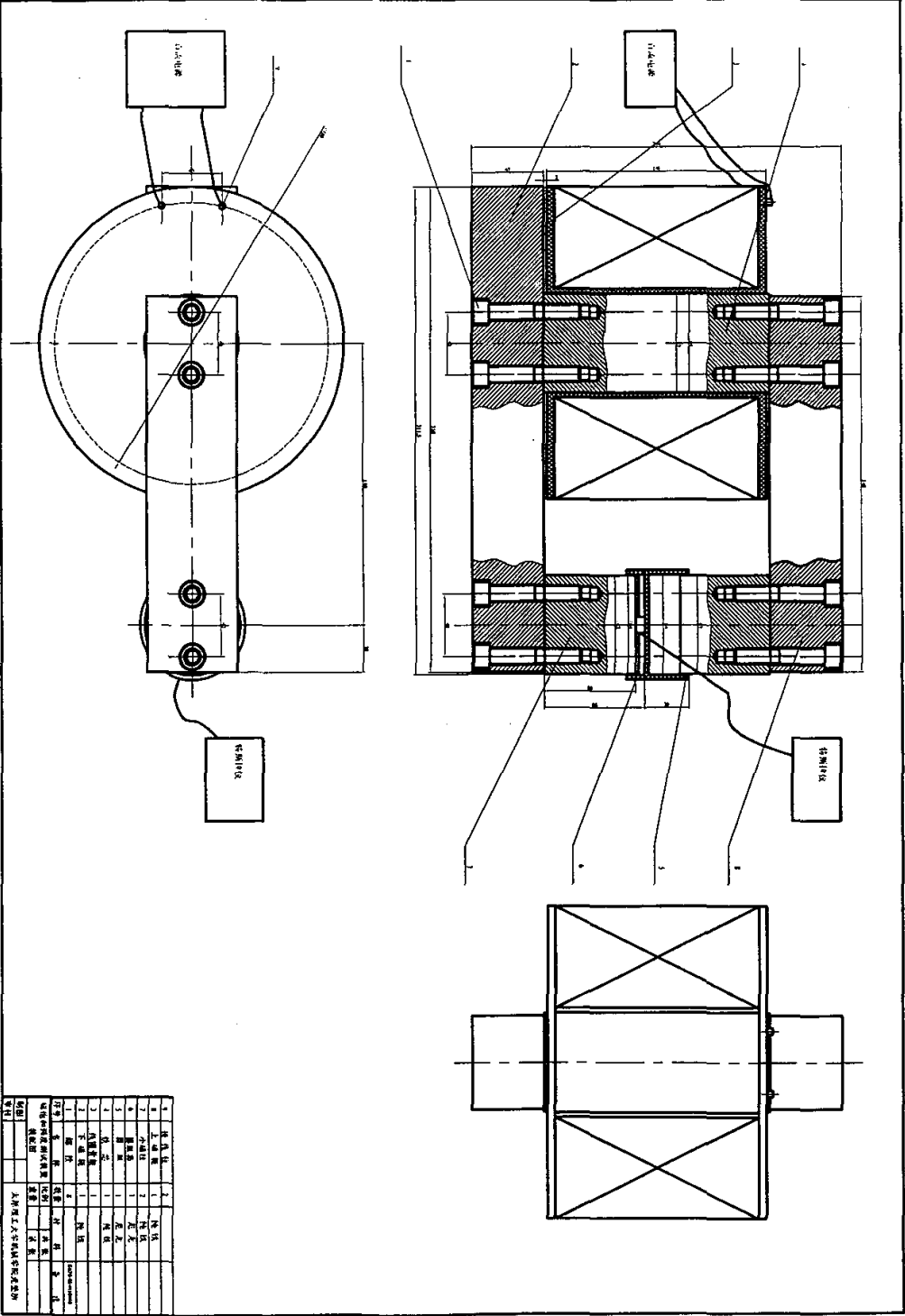


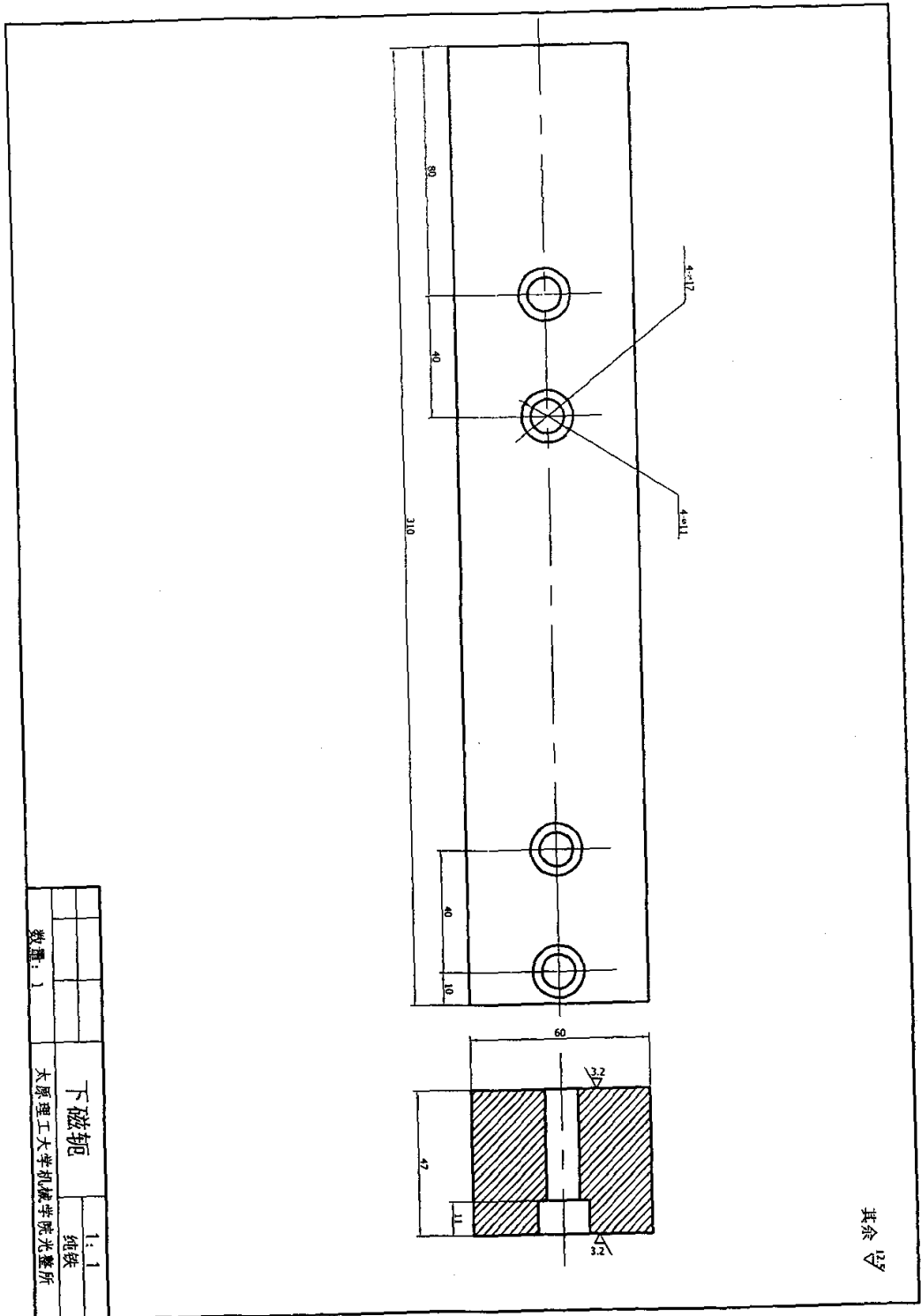
全部

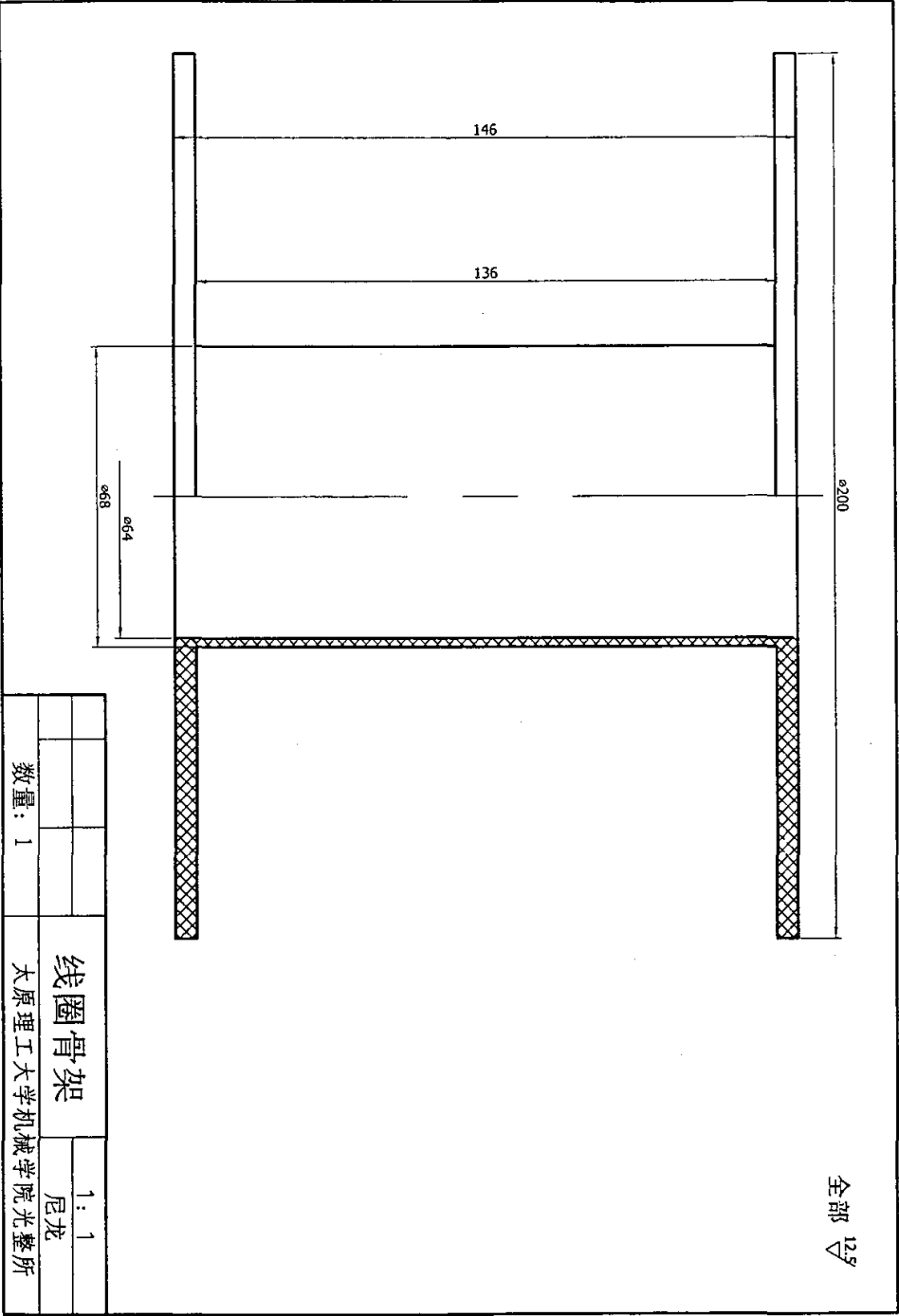


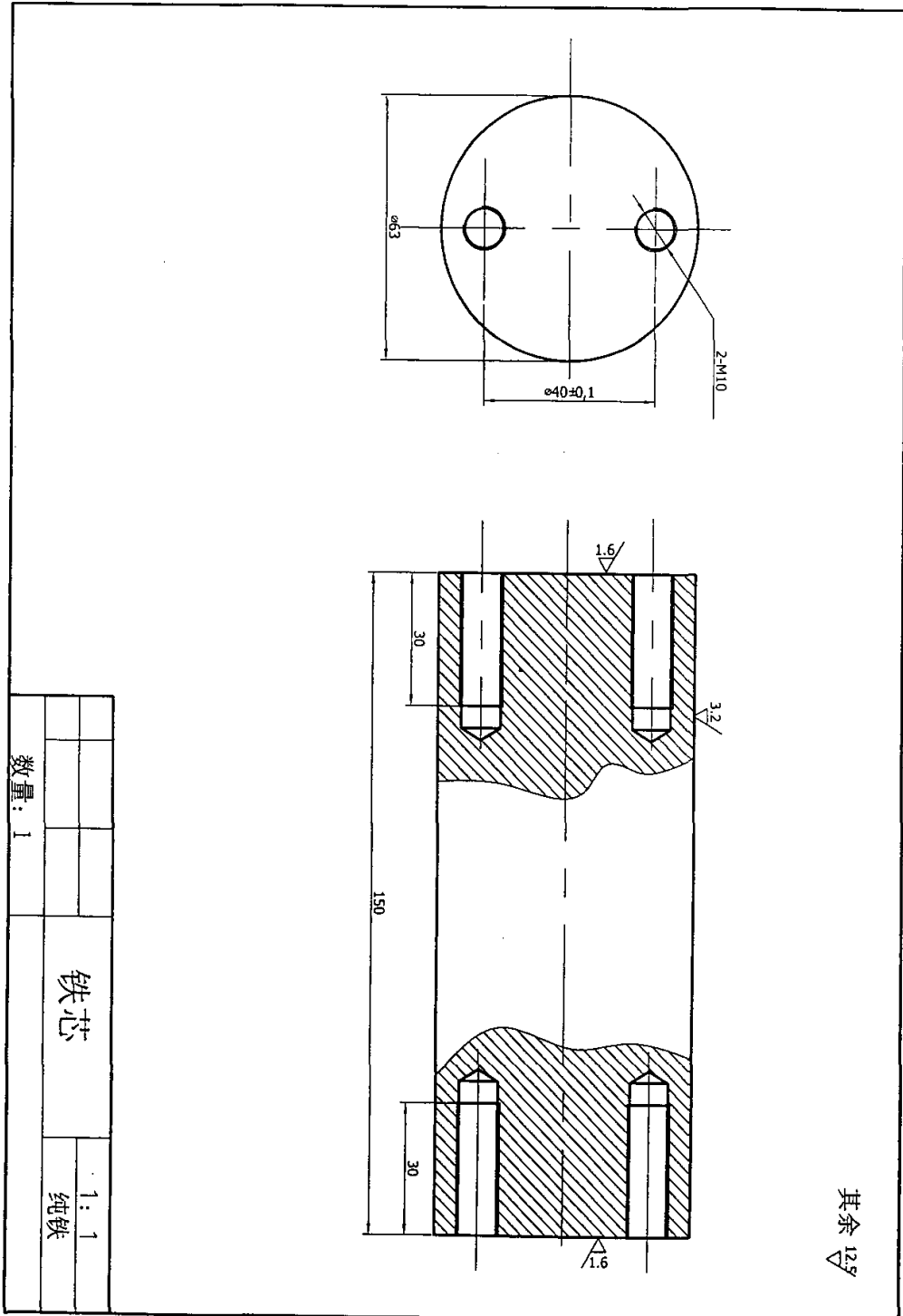
			滑轮支架	1 : 1
				$\delta = 1.5$
			太原理工大学机械学院光整所	

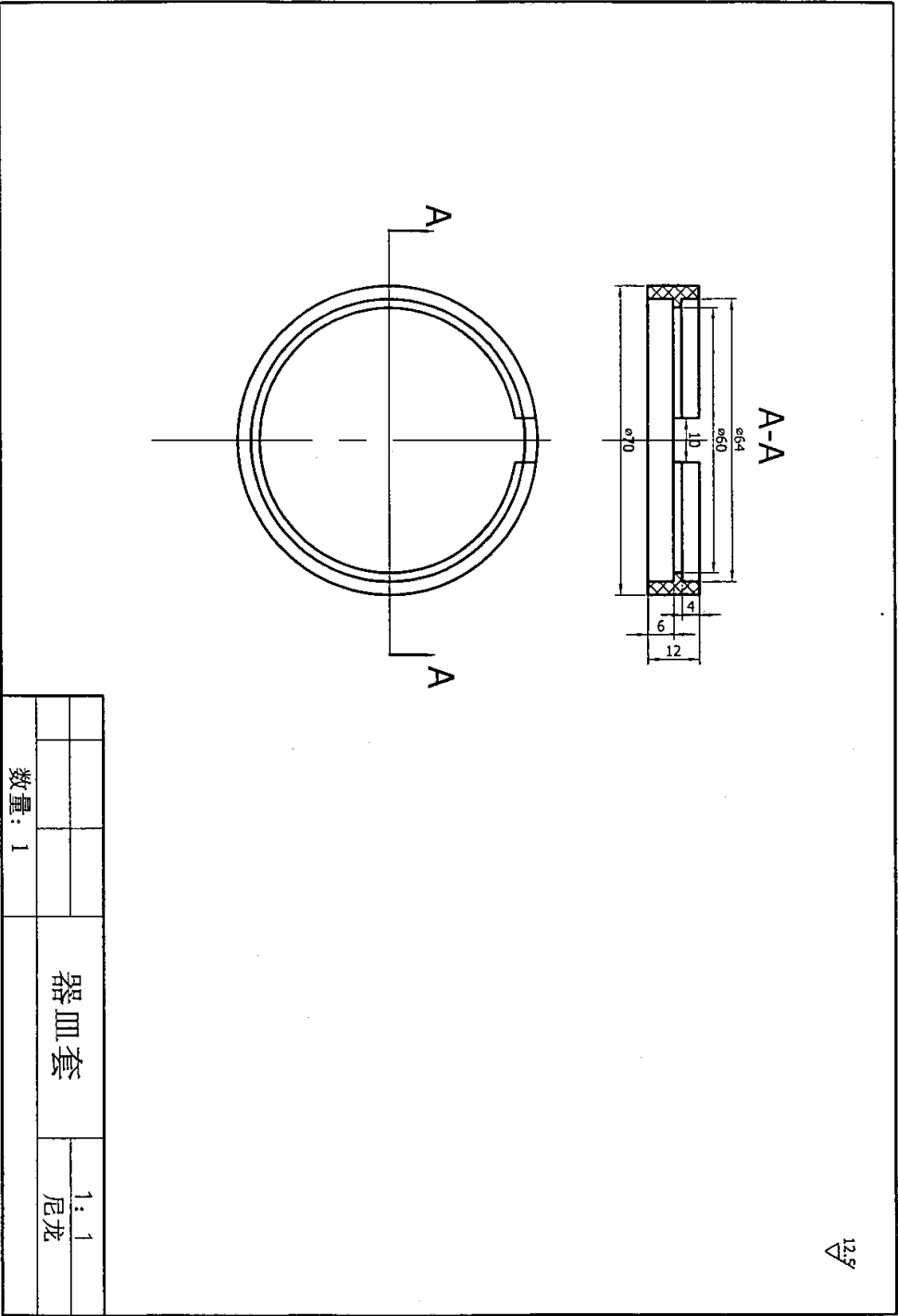
附录2[液体磁性磨具磁饱和强度测试装置装配及零件图]

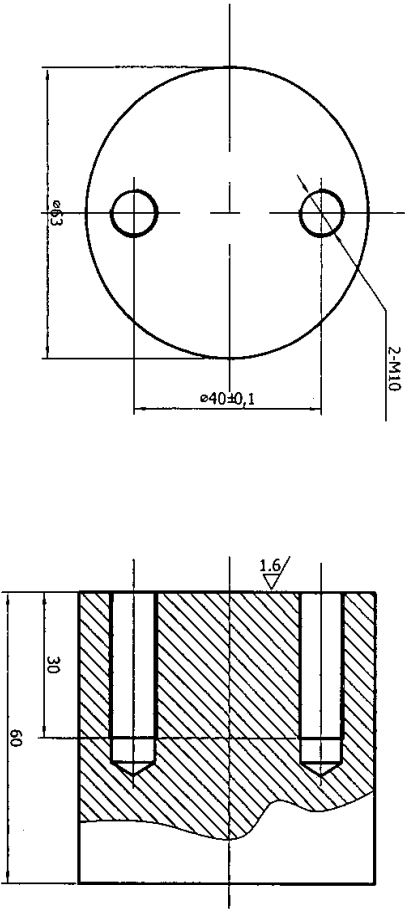






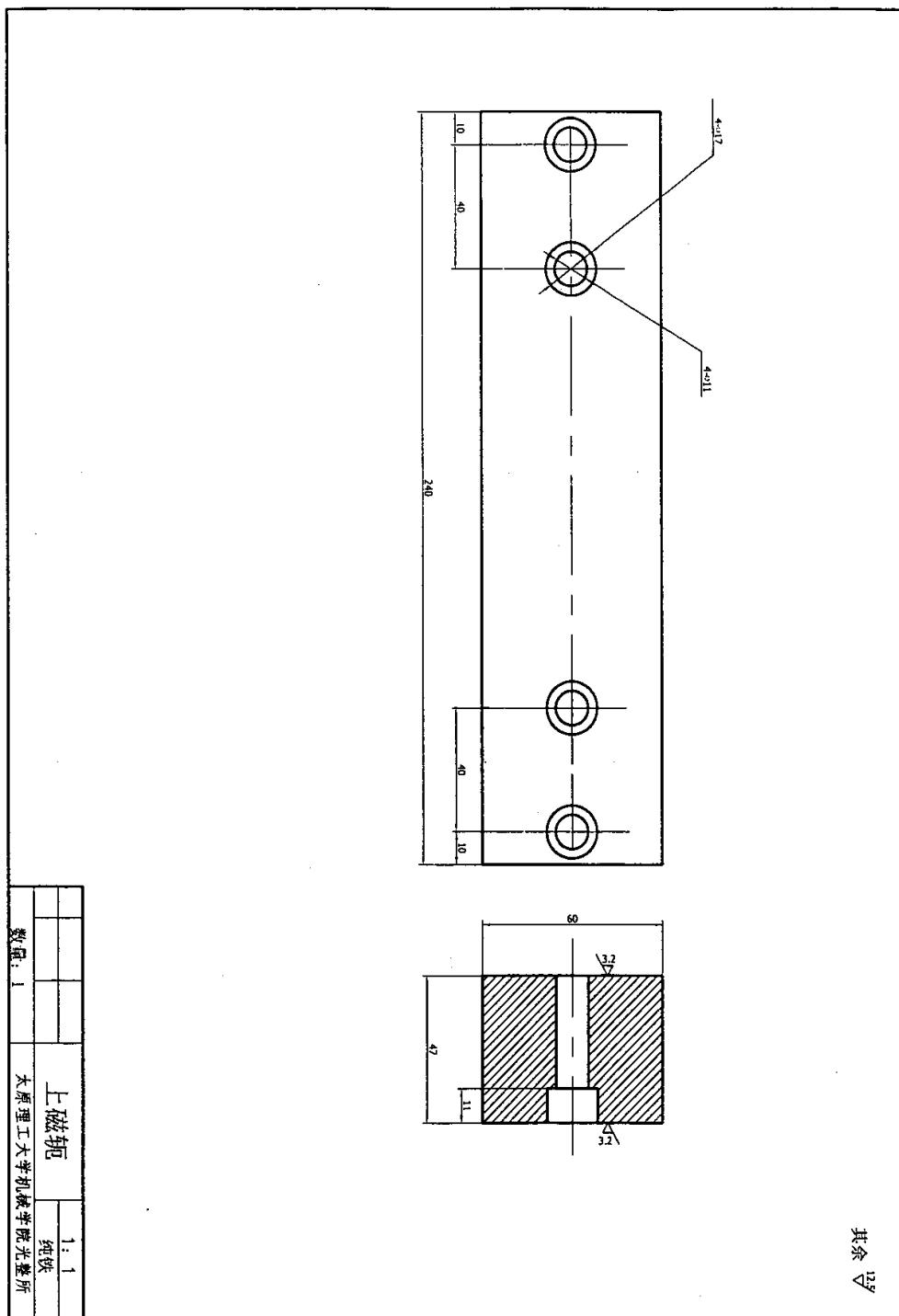






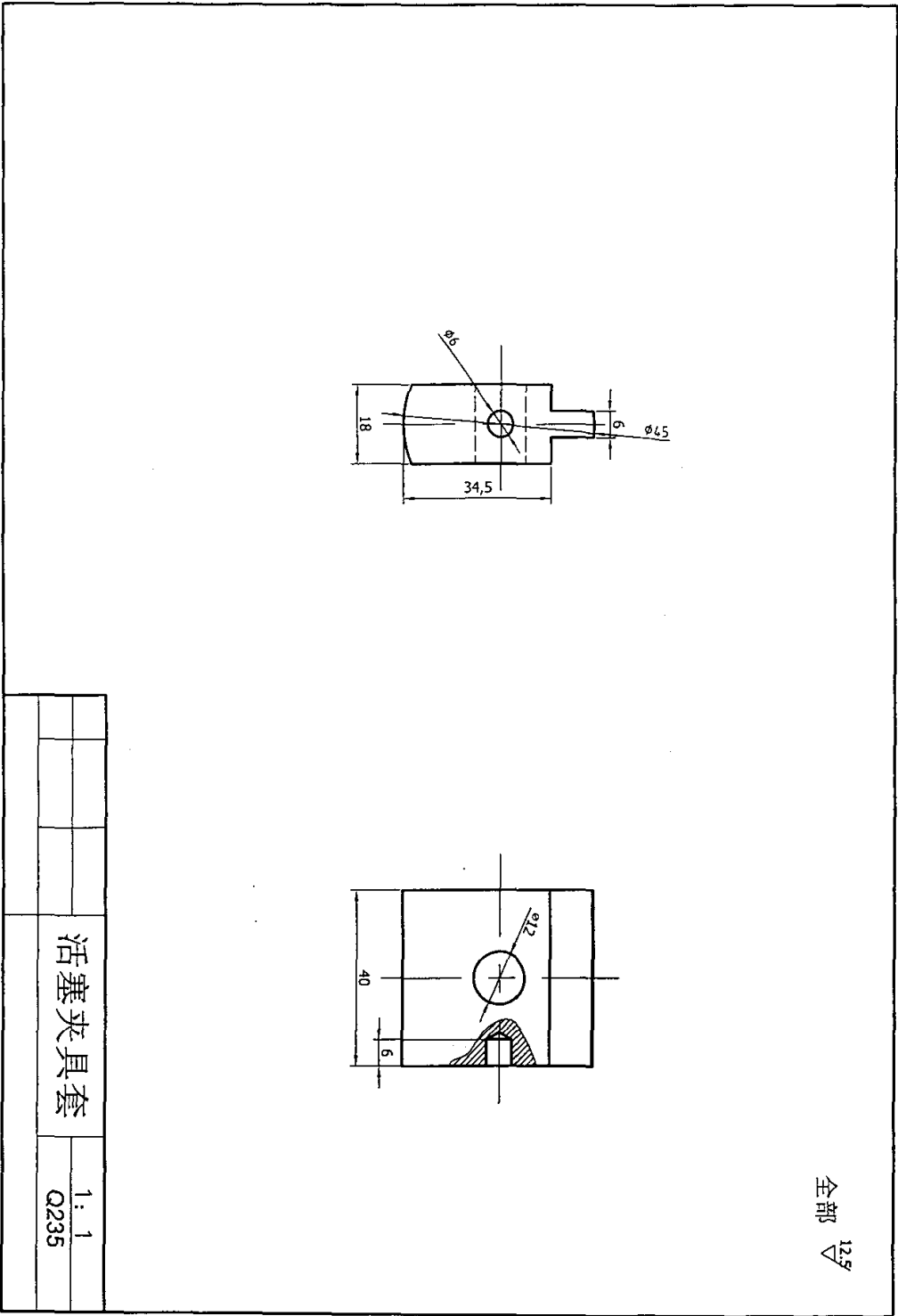
其余 $\sqrt{2}$

数量: 1		小磁柱		1:1
				纯铁
		太原理工大学机械学院光整所		





		器皿	1: 1
			尼龙
数量: 1	太原理工大学机械学院光整所		



致 谢

本硕士学位论文是在导师杨世春教授的精心指导下完成的。导师渊博的知识、严谨的治学态度和丰富的理论知识及实践经验不仅在学业上使我受益匪浅，而且对我今后的学习和生活也是极有帮助的。师恩如父，是的，在日常的生活和学习中，我每时每刻都能感受到杨老师对学生的那种父亲般的关心和照顾。杨老师对我的教诲我将牢记心中，这些教诲将激励我在以后的工作中不断的努力，用成绩来回报老师。在这里我要向自己尊敬的导师表示最衷心的感谢，同时致以崇高的敬意。

在做实验和论文撰写过程中，得到了熊光煜教授和孙桓五副教授的精心指导和大力协助，在此表示衷心的感谢。

感谢杨胜强教授、汪鸣铮教授、张银喜教授和李文辉老师在论文的写作和实验过程中给予的大力支持和帮助。

感谢师兄李唯东、郝建军他们的热情帮助。

感谢机制实验室的许师傅、赵师傅、张等师傅在实验装置的制作和实验进行过程中给予的支持和帮助。

在此论文完成之际，谨向为本课题研究付出辛勤劳动的各位老师、工人师傅和同学表示衷心的感谢。

攻读硕士期间发表论文

茹秋生，杨世春，孙桓五. 液体磁性磨具光整加工机理的研究. 机械工程及自动化, 2006, 第二期: 18-19

攻读硕士期间参与科研项目

山西省攻关项目（041145）

山西省教育厅科技项目（2003014）