

摘 要

在模具加工过程中，成形曲面的研磨抛光加工直接影响到制品的质量和模具的寿命。由于模具成形曲面的复杂性和多样化，大量的光整加工仍然需要手工加工完成，严重制约了模具行业的发展。磁性研磨加工方法由于具有较好的柔性和自适应性，在加工模具成形面方面具有独到的效果。本文在对磁性研磨加工过程中磁性磨粒受力、磁性研磨机理分析的基础上，通过理论分析和实验，对面向模具曲面磁性研磨加工的相关技术进行了研究和探索。

基于静磁场理论，应用有限元分析软件 Maxwell 建立了电磁感应器仿真分析模型，对电磁铁芯直径、磁极工具形状、电磁铁芯悬伸量、加工区域磁场分布、励磁电流和加工间隙对于加工区域磁场的影响进行了系统的分析，并通过测量特征点磁场强度验证了仿真结果的可靠性，为电磁感应器的结构设计优化和磁性研磨实验提供了理论依据。基于仿真分析结果研制出了用于数控铣床的磁性研磨装置。

运用正交实验方法采用混合磨料对平面进行了磁性研磨实验研究，分析了磨料配比、磁极转速、加工间隙、励磁电流、进给速度和加工时间等6个因素对加工表面粗糙度的影响，得出了各因子最优水平和各因子对磁性研磨加工的影响规律，实验结果表明，由于离心力作用混合磁性磨料不适用于采用工具旋转的磁性研磨加工方式。

应用粘结磨料进行了磁性研磨加工实验和理论分析。针对平面研磨加工对磁感应强度、加工间隙、磁极转速、加工时间等影响表面粗糙度的因素进行了研究。工艺参数选用磁感应强度 $B=1.2\sim 1.4T$ ，加工间隙 $1.2mm$ 左右，磁极转速 $n=2500r/min$ ，加工时间 $4min$ ，可以获得较低的加工表面粗糙度。针对典型的凹曲面和凸曲面分别进行了磁性研磨实验研究，对磁感应强度、加工间隙、磁极转速、加工次数等因素对加工表面粗糙度的影响进行了分析。结果表明，凹面比凸面具有较低的表面粗糙度，工艺参数选择磁感应强度 $B=1.3T\&1.2T$ ，加工间隙 $1.0\sim 1.5mm$ ，磁极转速在 $n=2500r/min$ 左右，工件表面在经过6~8次的往复研磨加工后可以获得较好

的加工表面粗糙度。

对模具的凹模、凸模进行了磁性研磨加工实验，针对于模具曲面研磨量不均匀问题，分析了影响曲面研磨量的主要因素，提出了从磁极形状和研磨轨迹等方面控制研磨量的方法，研究结果为磁性研磨加工技术在模具行业的推广应用提供了理论基础。

关键词：磁性研磨 模具曲面 表面粗糙度 磁感应强度 仿真

ABSTRACT

In the process of manufacturing mold, polishing on mold surface directly affects the quality and life-span of product. Because of complexity and variety of mold surface, most of finishing for mold surface still must be done by hand work. Therefore, it greatly restricts the development of mold industry. Magnetic abrasive finishing (MAF) has great effect at the complex mold surface finishing due to its flexibility and self-adaptability. Based on the analyses of magnetic force and grinding mechanism of MAF, investigations on the relative techniques of MAF for mold surface were performed with theory analyses and experiments.

Based on the theory of static magnetic field, the simulation model of electromagnetic inductor (EI) was constructed by finite element analysis software Maxwell. Simulation analyses about the effects of diameter parameter of the core, magnetic pole form, protruding magnetic pole, distribution of magnetic field, electric current, working clearance on magnetic field were performed. Then, the results of simulation analyses were approved by experiments. That provides with a theoretical groundwork for magnetic abrasive finishing experiment and structure design of EI. Then, based on the results of simulation analyses, the MAF machine tool was developed.

Experiments of MAF for plane workpiece were performed by orthogonal experiment method with mixed weight of unbonded magnetic abrasives. The influences of abrasive consistency, magnetic flux density, working clearance, rotational speed of magnetic pole, feed speed and finishing time on surface roughness were investigated. Then, the best levels of factors and the effect law on MAF of factors were obtained. Experimental results indicate that unbonded magnetic abrasives aren't suitable for the MAF whose tool rotates, due to the centrifugal force.

Experiments and theory analyses of MAF were performed with bonded magnetic abrasives. The effects of the magnetic flux density, working clearance, rotational speed of magnetic pole and finishing time on surface roughness were investigated by finishing plane workpiece. Better surface roughness can be obtained, when magnetic flux density $B=1.2 \sim 1.4T$, working clearance is about $1.2mm$, rotational speed of magnetic pole $n=2500r/min$, finishing time is 4min. Then, the experiments of finishing the representative concaves and convexities with MAF were performed, and the investigations about the different effects of the magnetic flux density, working clearance, rotational speed of magnetic pole and finishing times on surface roughness were done. The results indicate that better surface roughness can be obtained, when magnetic flux density $B=1.3 \& 1.2T$, working clearance is $1.0 \sim 1.5mm$, rotational speed of magnetic pole $n=2500r/min$, finishing times is 6~8.

Based on the MAF experiments of concave mold and convex mold, aiming at the problem of non-uniform material removal on the mold surface in MAF, the main effect factors are analyzed. Then, the corresponding ways for solution were presented by proving the shape of magnetic pole and polishing trajectory etc. The results offer a theoretical foundation for the development and application of MAF technology in mold industry.

Key word: Magnetic abrasive finishing (MAF); Mold surface; Surface roughness; Magnetic flux density; Simulation

独创性声明

秉承学校严谨的学风与优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，不包含本人或其他用途使用过的成果。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。

本学位论文成果是本人在广东工业大学读书期间在导师的指导下取得的，论文成果归广东工业大学所有。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任，特此声明。

指导教师签字：



论文作者签字：



2008 年 5 月 28 日

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

随着技术的不断发展和社会经济发展水平的提高，生产过程自动化程度越来越高，这极大地减轻了人们的劳动强度，也大大地提高了产品的质量 and 生产效率，缩短了产品的生产周期，降低了产品的生产成本，模具工业的发展是推动工业技术进步的重要推手之一。模具是工业生产的基础工艺装备，被称为“工业之母”，据统计 75%的粗加工工业产品零件、50%的精加工零件均由模具成型，绝大部分塑料制品由模具成型。作为国民经济的基础工业，模具涉及汽车、家电、电子、建材、塑料制品等各个行业，应用范围十分广泛。模具又是“效益放大器”，用模具加工产品，大大提高了生产效率，而且还具有节约原材料、降低能耗和成本、保证产品一致性等特点。在国外，模具被称为“金钥匙”、“进入富裕社会的原动力”等等。据国外统计资料，模具可带动其相关产业的比例大约是 1:100，即模具发展 1 亿元，可带动相关产业 100 亿元。模具制造水平已成为衡量一个国家产品制造水平的重要标志。

截至 2006 年底，中国模具制造业规模以上企业 1314 家，从业人员 244155 人；全年完成工业总产值 555.61 亿元，实现销售收入和利润 539.58 亿元和 46.75 亿元；出口 10 亿美元，进口 14.7 亿美元。数据显示，我国目前模具总产值已跃居世界第三，成为仅次于日本和美国的模具大国。然而我国的模具制造水平仍然远远落后于发达国家，大量高档模具产品，如精密级进模具、汽车覆盖件模具等都得从国外进口^[1]。目前我国模具产品质量存在的问题一个是精度，另一个是表面质量，当然模具材料也有一定的问题。而表面质量最大的问题是表面粗糙度，直接影响着模具自身寿命及其产品的质量和使用性能。

光整加工作为模具加工的最后工一道工序，直接决定着模具表面粗糙度，是影响模具质量好坏和寿命长短的最重要一环，一般占整个模具加工量的 30%~40%。虽然，由于先进加工技术和加工设备的应用，模具

加工的大部分工序（如车、铣、刨、磨、钻、铰、镗以及电火花、线切割等）已经实现了高度自动化，然而由于模具的复杂性、不规则性及精加工去除过程的微细化，使得模具的精整加工的相当一部分工作仍采用手工研抛方式。这就会受到工人情绪影响，不但效率较低而且质量也不稳定，在一定程度上制约了模具工业的发展。

磁性研磨是通过辅助磁场使磁性磨料对工件表面进行研磨的一种表面加工方法，是将磁作用力与传统研磨加工技术相结合的一种新研磨技术。它的出现为模具曲面的精整加工带来了新的曙光。由于磁性研磨所使用的工具不与工件表面直接刚性接触，具有在不破坏上道工序加工的尺寸精度、形状精度的前提下，降低表面粗糙度的特点，磁性研磨加工技术在国内外已开始成功应用。

1.2 磁性研磨加工技术概述

1.2.1 磁性研磨加工原理及其特点

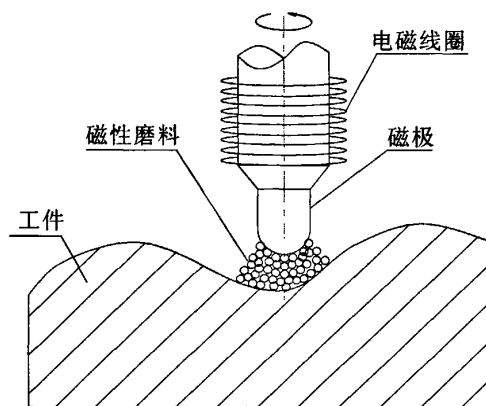


图 1-1 磁性研磨加工原理

Fig.1-1 Principle of magnetic abrasive finishing

磁性研磨 (Magnetic Abrasive Finishing MAF)，也称为磁力研磨，是在强磁场作用下，使填充在工具磁极与加工表面之间磁场中的磁性磨料沿着磁力线的方向排列起来，吸附在磁极上形成“磨料刷”，并对工

件表面产生一定的压力，磁极在带动“磨料刷”旋转的同时，保持一定的间隙沿工件表面移动，从而实现对工件表面的光整加工^[2]，如图 1-1 所示。

研磨时金属材料去除过程中，除磨料的切削作用外，还常常由化学或物理作用产生微量去除作用。在磁性“磨料刷”中除了有磨料和铁磁性粒子外，还常加有油酸、煤油之类的液体保持磁性磨料的粘结性，这些液体物质会使工件表面产生一层很软的氧化物薄膜，钢铁的成膜时间只要 0.05s，氧化膜厚度约 2~7nm^[3]。凸点处的薄膜很容易被磨料去除，露出的新鲜表面很快地继续氧化，继续被去除，如此循环，从而实现了加工表面的研磨加工，达到表面粗糙度降低的效果。

磁性研磨加工与传统的机械研磨方法不同之处在于，磁性研磨所使用的研磨工具由磁性材料制成，使用的磨料是兼具铁磁性和研磨性能的磁性磨粒，因而磁性研磨工具的设计上具有很大的灵活性。在磁性研磨加工中，磁性磨料能够随着工件形状的变化而变化，能够适应各种不同的表面，而且磁极和磨料之间的相互作用可以是超距的，不仅可以加工外圆、球面、平面等各种曲面，而且还可以对传统研磨工具无法伸入的内圆、内壁等曲面进行加工。磁性研磨加工的特点可以归纳如下：

1) 自锐性好、磨削能力强、加工效率高。加工过程中磁性磨粒存在相对运动使磁性磨料沿加工面滑动或滚动，磁性磨料间不断地更换位置，使“磨料刷”具有极好的自锐性，它不像固结磨料砂轮那样存在堵塞和磨料的钝化现象，也不像游离磨料研磨过程中磨粒完全自由运动，这在很大程度上提高了磁性研磨光整加工的效率。

2) 具有极好的柔性和自适应性。在磁场中的磁性磨粒，靠磁场的作用力和彼此间的磁性吸引力非刚性地连接在一起形成磁性“磨料刷”，这个“磨料刷”的形状在加工过程中能够随工件形状的变化而变化，表现出极好的柔性和自适应性。

3) 加工表面质量好，可达镜面。磁性研磨光整加工属于精密表面加工技术，加工后工件表面粗糙度值 Ra 可达 0.1 μ m。

4) 研磨温升小、工件变形小。在磁性研磨加工过程中，磨料不断更换位置，就单一的磨粒磨刃而言，它与工件表面的作用时间很短，因此

它对工件表面的温升影响小，表面金相组织结构没有受到破坏。这有利于工件表面质量的提高，同时也避免了因温升带来的工件变形的问题。

5) 加工装置简单。磁性研磨加工装置像普通机床的配附件一样，可用普通的或者已有的机床改造。磁性研磨工具可快速更换，不需要砂轮、油石、传动带等辅助加工设备，磁性磨料的自动供给、排出及回收也可控制，可以迅速更换。

1.2.2 磁性研磨加工的国内外发展概况

1) 磁性研磨国外研究状况及应用 磁性研磨加工这一概念最早是由前苏联的工程师 Kargolow 于 1938 年提出的。但最近 Oklahoma 州立大学的 R. Komanduri 教授发现，1897 年的一个美国专利可能是最早的磁性研磨发明。

从五十年代和六十年代开始，前苏联有不少学者如 Baron 等和他们的同事对磁性研磨加工进行了大量的研究，在磁性磨料的制备方法和制备工艺上作了很多工作，并就磁性磨料的组成、配比和结构等申请了多项专利。此外，前苏联还多次举办过相关的专题会议。七十年代以后，保加利亚的一些学者如 Makedonsky 等也开始发展磁性研磨加工技术，并取得了一定的成果，相关的国际性专题学术会议也定期在保加利亚举行。德国也已经出版了相关方面的学术论文。

20 世纪 80 年代，日本对磁性研磨技术进行了更为深入的研究，并开发出了多种磁性研磨加工装置。具有代表性的有日本宇都宫大学的 Takeo Shinmura、Toshio Aizawa, 日本东京大学的 Masahiro Anzai、Koichi Masaki 等。其中 Takeo Shinmura 研制开发出了多种加工铁磁性工件的磁性研磨加工装置，如平面、圆柱内外表面、球面等磁性研磨装置，并对它们的光整加工技术进行了研究^[4~6]。这些加工装置有的采用永久磁体来产生恒定磁场，有的则采用电磁体来形成强度可以控制的磁场，有的采用工件移动外加一定幅度和频率的振动来实现磁性研磨加工，有的则用产生旋转磁场的办法实现磁性研磨加工。Takeo Shinmura 在研制各种形式磨料加工设备的同时，对各种场合的加工工艺进行了较深入的理论

分析和试验研究,如磁感应强度、加工间隙、磨料与工件的相对移动速度、磁性磨料的成分和粒度等因素对加工质量和效率的影响以及它们之间的相互关系。Masahiro Anzai 和 Koichi Masaki 对磁性磨料的制备技术进行了研究,并研究开发成功了几种比较有应用价值的磁性磨料。他们采用的磁性磨料制备方法包括:①等离子粉末熔融法(PPM);②铁磁性金属材料与磨料纤维混合法;③液体磁性磨料。与高温烧结法相比,这些磁粒都有较高的实用价值,且制备方法简单、成本低。

韩国近几年来也在磁性研磨的研究方面,作了不少深入的研究,韩国先进科学技术研究所的 Jeong-Du Kim, YOUN-Hee Kang 等人发明了磁性磨料喷射光整加工装置,该装置为非圆截面管子内壁的光整加工提供了有效的加工方法^[7]。

印度的 V. K. Jian 等人对磁性研磨加工也进行了一定的研究,研制出了几种磁性研磨加工装置,对圆柱外表面的磁性研磨加工工艺进行了研究分析,并应用原子力显微镜、扫描电镜对工件加工前后的形貌进行扫描比较、分析^[8, 9]。

迄今为止,国外磁性研磨技术已成功地应用在多个方面。如不锈钢管和净气瓶的内壁研磨,研磨修整超硬磨料砂轮,研磨塑料透镜,细长轴类陶瓷加工,轴承环、液压机械上用的滑阀、泵齿轮、球阀、家用不锈钢器皿、螺纹轧辊、滚珠轴承保持器、盘型制动器、缝纫机零件等的去毛刺与抛光加工。研磨刀具等,以提高刃口的使用性能等^[10~12]。

2) 磁性研磨国内研究状况及应用 我国的磁性研磨加工技术研究开始于20世纪80年代中期,起步较晚,且投入的人力财力有限。目前仍处于试验研究阶段,实际应用很少。开展该项技术研究最早的是哈尔滨科技大学和大连理工大学,随后哈尔滨工业大学、山东工程学院和太原理工大学也进行了该项技术的研究。哈尔滨科技大学于九十年代初^[13,14],完成了“仪器仪表零件磁性研磨加工技术的开发”项目,成功试制了MAC系列磨料,并针对仪器仪表中的零件开发了磁性研磨装置,进行了实验研究。同时哈尔滨科技大学还对电解磁性研磨技术进行了研究^[15]。大连理工大学开展了电化学磁力加工技术方面的实验研究,实验证明:磁粒加工前30秒去除量很大,表面粗糙度可由 $Ra0.8\mu m$ 降至 $Ra0.15\mu m$,并且证

明电化学磁粒加工生产效率更高，表面质量也有改善^[16]。长春理工大学也对磁性研磨进行了一系列研究^[17]。此外，哈尔滨工业大学对液压伺服阀阀芯轴棱边毛刺的磁性研磨去除法进行了可行性研究^[18,19]，开发了磁性研磨去毛刺装置。

近年来，一些研究单位自行研制出不同的磁性研磨实验装置，并对轴承滚道、钢管、螺纹环规、丝锥、电极轴、齿轮、阶梯轴、钢球等工件进行了研磨实验，取得了较理想的加工效果。其中大连理工大学、哈尔滨科技大学还进行了电化学磁性研磨复合技术的研究开发^[20]；山东工程学院的赵玉刚等人对复杂曲面数字化磁力光整加工进行了研究，开发了复杂曲面数控磁性研磨加工机床^[21]。华侨大学的方健成等人在传统磁性研磨加工理论的基础上，进行旋转磁场磁性研磨加工的研究，提出了脉冲电路控制产生旋转磁场实现无运动部件光整加工的新思路^[22]。上海理工大学的肖作义等人分别在三种情况下：(1)对于三维切削曲面的精整加工，(2)电火花加工后的型腔面的精整加工，(3)非磁性材料的研磨，探讨了磁性研磨在模具型腔精加工的应用，指出了数控技术与磁性研磨技术的结合将是磁性研磨技术真正地应用于模具型腔精加工的关键^[23,24]。太原理工大学陈红玲等人对磁性磨料磨粒的多种制备方法和磨料的磨削机理进行了较为深入的研究，为更好地研制磁性磨料建立了一定的理论基础^[25,26]。东北大学、西安工业学院、浙江大学等国内高校也对磁性研磨加工技术进行了相关的研究。

1.3 课题的来源及本文主要研究内容

1.3.1 课题的来源

广东省科技计划项目：汽车模具曲面磁性研磨数控机床研制(2005B10201018)。

广州市科技计划项目：汽车模具大型曲面精密磁性研抛数控机床研制(05Z211004)。

1.3.2 课题的研究的主要内容

本文基于数控磁性研磨机床面向模具表面精整加工的需求对磁性研磨加工技术进行较为深入的研究，进行了实现模具光整加工自动化的相关尝试。论文的主要工作包括：

- 1) 应用有限元分析软件对电磁感应器、磁极磁感应强度和加工区域的磁场进行仿真分析，根据实验的要求对电磁感应器的各个结构参数进行优化设计。
- 2) 根据实验仿真结果研制出适用于曲面精密磁性研磨的电磁感应器装置，并在此基础上将数控铣床改造为磁性研磨机床，使其适合于磁性研磨实验的需要。
- 3) 控制磁性研磨加工过程，优化磁性研磨加工工艺。分别实现对平面和曲面两方面的加工工艺研究。即应用电磁感应器产生的磁场吸附磁性磨料形成磁性“磨料刷”，通过磁性“磨料刷”产生作用于工件表面的研磨压力，在“磨料刷”研磨压力和切向力（磁极旋转）的作用下实现对工件表面的局部加工，研究分析包括磁感应强度、加工间隙、磁极旋转速度、加工时间等研磨加工工艺参数。
- 4) 通过实验，初步实现对成套模具磁性研磨加工，并对研磨工艺参数、研磨量、磁性研磨工具的运动轨迹与研磨模具的质量的关系进行了研究分析。

第二章 磁性研磨加工机理研究

2.1 磁性磨料磨粒的受力分析

磁性研磨加工中，磁性磨粒是被磁场磁化后在磁场保持力的作用下形成磁刷，才能实现对工件的研磨加工。磁性研磨的磨削力是由磁场产生的，并以研磨压力的作用形式来实现加工过程。因此要研究其研磨机理，必须从单个磨粒的受力情况出发。

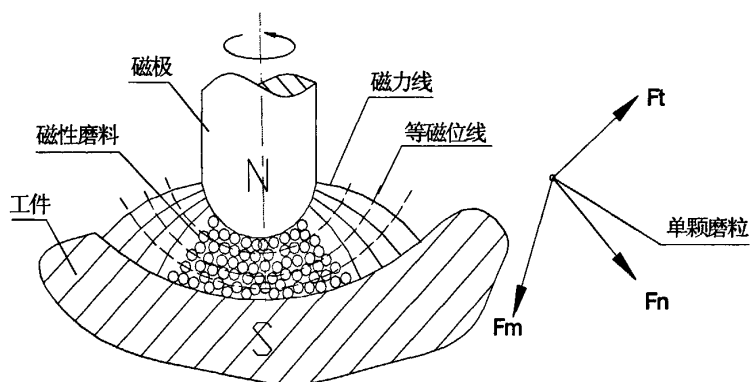


图 2-1 加工区域内单个磁粒的受力分析

Fig. 2-1 Force analyses of single abrasive in working area

图 2-1 为位于加工区域内单个磨粒的受力状况。加工区域内的各个磨粒被磁化后，就沿着磁力线方向排列成刷状，将工件置于磁场的“磨料刷”中，工件与“磨料刷”在工件表面处相互吸引，使磨粒受磁力作用紧压于工件表面。任取一磨粒讨论其受力状况。其受到的作用力有：磁场作用力 F_n ，由磁极旋转而产生的切向摩擦力 F_t ，磁性磨粒之间的相互吸引力亦称为磁场保持力 F_m 。各作用力的表达式如下^[27]

1) 单个磨粒的磁场作用力 F_n

$$F_n = (V_0 B_i \text{grad} B_i) / \mu_0 \quad (2.1)$$

式中, V_0 : 磁性磨粒的体积

B_i : 单个磁性磨粒所在位置的磁感应强度

$gradB_i$: 单个磁性磨粒所在位置的磁感应强度梯度

μ_0 : 真空中的磁导率 $\mu_0 = 47\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

2) 磁性磨料相对工件回转时所受到的切向力 F_t

$$F_t = KfF_n \quad (2.2)$$

式中, K : 磁性磨粒形状修正系数

f : 单个磨粒与工件的摩擦系数

3) 单个磨粒受到的磁场保持力 F_m

$$\left. \begin{aligned} F_m &= F_x + F_y \\ F_x &= V_0 k \mu_0 H \frac{\partial H}{\partial x} \\ F_y &= V_0 k \mu_0 H \frac{\partial H}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

式中, V_0 : 单个磨料中铁粉的体积

k : 磁性磨粒的磁化率

μ_0 : 真空中的磁导率

H : 某点的磁场强度

$\frac{\partial H}{\partial x}$: 等磁位线方向的磁场梯度

$\frac{\partial H}{\partial y}$: 磁力线方向的磁场梯度

磁性研磨过程中, 单个磨粒在磁场作用力、磁场保持力和切向摩擦力的共同作用下, 使磨粒稳定地保持在加工间隙中, 实现对工件表面的加工。同时处在加工区域外部的磨粒将自动向加工区域汇集, 填充于磁极与工件之间参与加工, 形成一个完整的连续加工过程。

磨粒在受到磁场作用力的同时, 也沿着磁力线的方向对工件表面产生一定的压力, 其大小为:

$$p = \frac{H^2 \mu_0}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \quad (2.4)$$

式中, H : 磁场强度

μ_0 : 真空磁导率

μ_m : 磨粒的相对磁导率

由于 $H = B/\mu_0$, 因此式 (2.4) 又可表达为:

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \quad (2.5)$$

式中, B 为工件表面的磁感应强度.

由以 (2.5) 可知, 磨粒对工件的压力与磁场强度的平方成正比, 与磁粒的导磁系数也成正比, 因此增大磁场感应强度或采用磁导率高的磁性磨料都可以增大工件表面的研磨的压力。

2.2 磁性磨料的磨削机理

在磁性研磨中, 磁性磨料是由微粉磨粒组成的磨粒群, 在磁场中受到磁场力的作用而压向工件表面, 磨粒受力情况如前所述。根据精密切削理论和摩擦学理论, 可以得知磨粒在磁性研磨中与工件表面产生接触滑擦、挤压、刻划和切削等现象^[25]。因此磁性研磨的磨削机理主要包括以下四个方面。

2.2.1 微量切削与挤压作用

由磨料的组成成分可知, 磨料磨粒的硬度比工件材料硬度高, 工件表面在研磨压力作用下, 以一定方式进行相对运动(磁极旋转, 工件或磁极振动), 磨粒刃尖将对工件表面产生切削作用, 同时磨粒中的铁基体还将对工件表面起到很好的挤压作用。

如前所述, 暂且不考虑磁场保持力的作用, 单颗磨粒在工件表面的作用力可分为法向力 F_n 和切向摩擦力 F_t , 法向力 F_n 使磨料压向工件表面, 如测试硬度一样, 在表面形成压痕。对表面形成了一定的挤压作用, 能够改变工件表面的应力状况。切向摩擦力 F_t 使磨粒向前推进。当磨粒的形状和方向适当时, 磨粒刃尖就如刀具的切削刃一样, 在工件表面进行微量切削而产生切屑。该切削作用的强弱与磁性磨料磨粒的形状、位置、磨粒工作角度及磁场特性等工艺参数有着密切的关系, 控制这些参数就可以控制磨粒的切削作用, 达到微量去除的目的。

同时由于磨粒在磁场中构成了弹性“磨料刷”以及磁场分布的不均匀性，磨粒随机地变换方位参与磨削。就每个磨粒而言，其切削过程是随机的和不连续的。如图 2-2 所示为假设磨粒切削刃为圆锥形状的微量切削挤压模型。在金属切削机理研究中，占有重要地位的就是刀具的几何形状和切削角度，其中前角是影响刀具切削性能的关键因素，对于磁性磨粒来说，它的切削刃前刀面方向很不规则，大都具有很大的负前角，在磁场作用力 F_n 的作用下吃刀量非常小，一般在 $1\mu\text{m}$ 左右的数量级甚至更小。因此，这种磨粒加工属于微量切削，切削力很小，产生的切削热也很少，使工件表面上弹塑性变形区域很小，加工变质层极薄，残余应力也很微小，且为压应力；另一方面，对切削过程中影响表面粗糙度的主要因素，理论残留面积高度和切削刃复印性等的影响也是非常小的。这种研磨的微量切削加工可以获得非常好的零件表面，粗糙度 R_a 值可达 $0.1\mu\text{m}$ 左右。

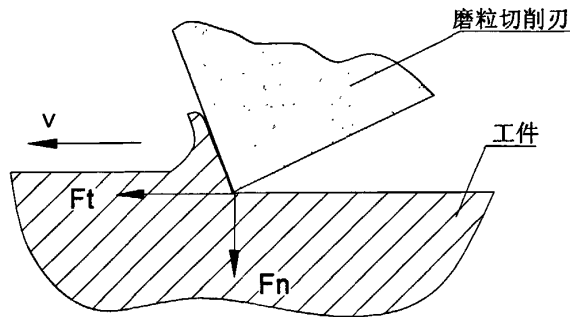


图 2-2 微量切削挤压模型

Fig. 2-1 Tiny cutting model

2.2.2 多次塑变磨损作用

磁性磨料磨粒群体形成的弹性磨具由于受磁场作用被吸附在工件表面，磨粒和工件表面始终处于接触状态，但是产生如前所述的切削过程并不是唯一的。有时磨粒会在工件表面上产生其他几种磨削现象。

一种是滑擦摩擦，磨粒一带而过，工件表面仅留下一条痕迹；第二种是发生塑性变形，擦出一条两边隆起的沟纹；第三种是飞边堆积，犁出一条沟槽，两边翻出飞边。当磨粒形状较圆钝时，或磨粒的棱角而不是棱边对着运动方向，或者磨粒和工件之间的夹角太小时，或者工件表面材料的塑性很高时，磨粒在工件表面滑移后，经常发生后两种磨削现象。在磁性磨料的连续加工过程中，已出现塑性变形或吃边堆积的表面层金属将发生反复的塑变，产生加工表面硬化作用，最后剥落成为磨屑。这就是所谓“擦伤式”的犁刨现象和“碾压式”的滚擦现象共同作用的结果。值得提出的是由于磁性研磨时磨粒一般都集中在磁力线密集的表面凸起的微小轮廓峰附近，因而表面不平的微凸体处的塑变磨损相对较大，使得该不平度下降加快。因此磨粒的多次塑变磨损作用可以较快地获得光滑的工件表面，而不影响工件的尺寸和形状精度。

2.2.3 摩擦腐蚀磨损作用

磨粒在工件表面一带而过的滑擦摩擦现象还使金属表面产生腐蚀磨损。由腐蚀磨损机理可知腐蚀是和其存在环境有关的一种化学作用，它在很大程度上取决于环境条件和周围介质。工件表面被磨粒摩擦，纯净金属表面裸露而受环境和介质的腐蚀迅速形成一层极薄的氧化膜。由于氧化膜与工件材料的膨胀系数不同，以及加工过程中温度变化等原因，在随后的滑擦摩擦中脱落。连续加工过程中，工件表面层金属不断的氧化，然后脱落，再氧化，再脱落。从而加速了研磨效果，提高了研磨效率。

2.2.4 电化学磨损作用

由于磁极带动磨料作相对于工件的转动，在加工过程中沿磁力线排列的导电磨粒链因分层运动而偏移磁力线，形成磁场梯度，在这一磁场梯度作用下，磨粒链两端必定产生一个微小电动势，工件表面产生一微小电流，工件在磁极两极间受一个交变励磁作用，强化了表面层金属的化学过程而迅速被磨损去除，进一步提高了研磨效果。

由此可见，磁性研磨不同于其他磨料磨粒的磨削机理。磁性磨料磨粒的特点，突出表现在磨粒具有导磁性以及磨粒磨削时形成的是由磁性磨粒群体构成的弹性“磨料刷”。磁性研磨过程中，磁粒在磁刷上的位置及方向会在工具磁极的旋转过程中，不断发生翻滚、错位、更迭现象，使磨粒始终以新的磨削刃参与磨削，其自锐性能更好。另一方面，由于构成的是弹性“磨料刷”，磨粒与工件接触均匀，吸振性能更好，能充分保证精密表面原有的几何精度和形状精度不会受到破坏。这些特点在加工成形表面、异形曲面的研磨过程中表现出十分明显的优势。

2.3 本章小结

本章首先对于磁性研磨加工过程中，磁性磨粒的受力情况进行了分析。接着在此基础上对磁性研磨的磨削机理：微量切削与挤压作用、多次塑变磨损作用、摩擦腐蚀磨损作用、电化学磨损作用等四个方面进行了探讨。

第三章 磁性研磨装置改造

3.1 磁性研磨数控机床技术方案分析

模具自由曲面的研抛加工不同于一般回转面的加工,只能把工件固定在工作台上、工具磁极做旋转和扫描运动,为保证研抛加工的质量均匀一致性,还要求工具磁极与加工表面间保持确定的间隙。为了实现模具自由曲面的研抛加工,工具磁极必须能够在空间中进行三维运动。本研究使用的磁性研抛数控机床在数控铣床基础上改装而成,由数控铣床具备的3个数控移动轴实现研抛工具在工件表面的扫描进给运动,磁性研抛工具安装在主轴上产生的旋转运动作为主运动。改装而成的磁性研磨数控机床如图3-1所示。

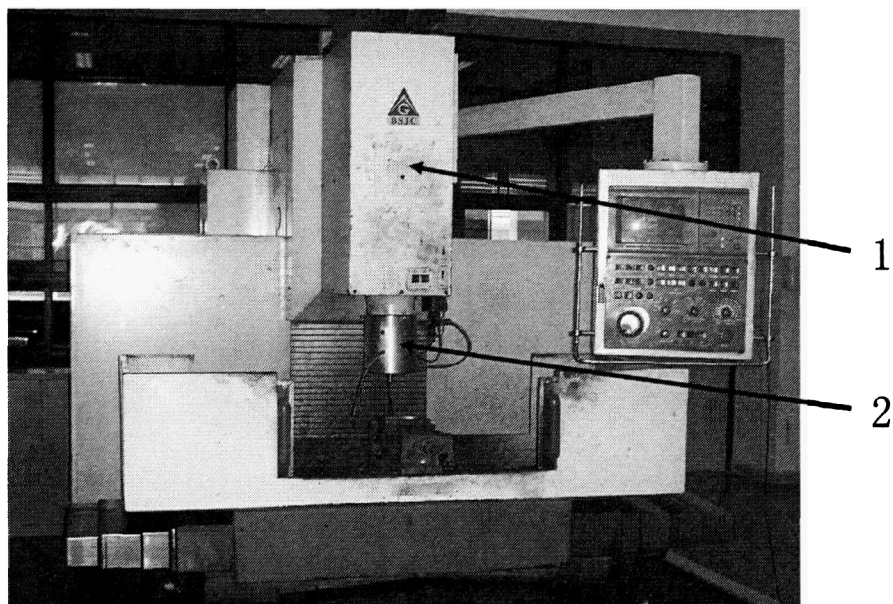


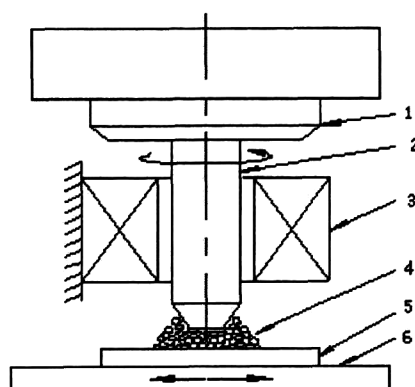
图 3-1 磁性研磨数控机床 (1 NC 铣床 2 电磁感应器)

Fig.3-1 Photograph of magnetic abrasive finishing NC milling machine

一般磁性体有永久磁体和电磁体两种。虽然永久磁体具有不需要消耗能量便可长期保持磁性的优点,但由于其产生的磁感应强度较小且不能随意调节,在磁性研抛加工中应用得较少。相比之下通过电磁感应产

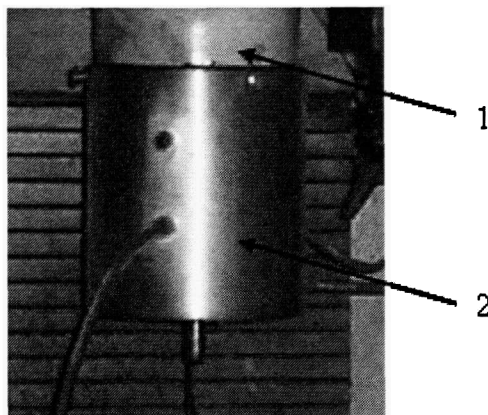
生的磁极可在加工区域获得较大的磁感应强度，且磁感应强度的大小可以根据需要调节，因此在磁性研磨加工中得到较多的应用，本研究也使用通过电磁感应产生的磁极作为研磨工具。

电磁感应器装夹在数控铣床的主轴上，其主要组成部分包括电磁铁芯、电磁线圈、线圈支架、数字可控直流电源等，其结构如图 3-2 所示。



1 NC 铣床 2 电磁铁芯 3 电磁线圈
4 磁性磨料刷 5 工件 6 工作台

(a) 电磁感应器结构



1 NC 铣床 2 电磁感应器

(b) 电磁感应器

图 3-2 电磁感应器

Fig.3-2 Electromagnetic inductor

在电磁铁芯的设计中，除了减小磁导体的长度、增加磁导体的截面积以外，就是要尽可能选用磁导率高的导磁材料。此外，从磁性加工的要求出发，磁极在电磁线圈电流断开时，磁极应能迅速退磁，这就要求选用具有低的矫顽力的软磁性材料。

典型的软磁性材料有：工业纯铁、硅钢、铁镍合金、铁铝合金、铁钴合金、恒导磁合金和软磁铁氧体。本研究的电磁铁芯材料采用由佛山市南海区保利发冶金炉料有限公司提供的工业纯铁 DT4，其化学成分分析如表 3-1 所示。工业纯铁是一种含碳量极低的软铁，具有良好的磁导率和高的磁饱和强度，其磁化曲线如图 3-3 所示。从图中可以看出工业纯铁磁导率在磁场强度比较低时比较高，随着磁场强度的增大，磁导率越来越小。在 $B=2.158T$ 时，达到饱和磁感应强度。实验中，电磁铁芯在选

用工业纯铁(DT4)作为材料后,根据实验对于铁芯端部形状的要求进行结构设计。

电磁线圈采用漆包线绕制而成,线圈在励磁电流的作用下产生磁场,同时也产生大量的热量,如若这些热量不能及时散去,那么电磁感应器的温度就会迅速升高,而电磁感应器温度的升高对感应器本身的使用性能、机床的精度以及工件的加工精度都会产生不良的影响。因此在线圈支架的设计中,除了考虑其对于线圈的支撑外,其对线圈的散热功能也必须作为一个重要因素来加以考虑。由于铝合金有较好的导热性,因此采用铝合金加工制成电磁线圈支架,其绝缘性由绝缘漆和绝缘纸来保证。同时通过压缩空气实现对线圈支架内的电磁线圈强制散热。电磁感应器电源采用 60VA 直流可控开关电源,电流为 0~3.3A 可控。

表 3-1 DT4 化学成分

Table.3-1 Chemical composition of DT4

工业纯铁	执行标准 GB9971-88			
C%	Si%	Mn%	P%	S%
0.003	0.059	0.11	0.008	0.0084

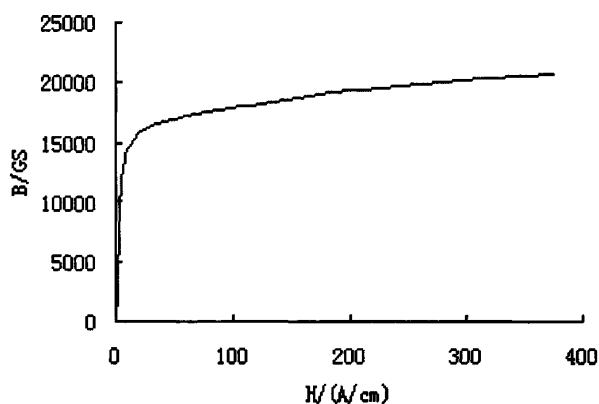


图 3-3 工业纯铁 DT4 磁化曲线

Fig.3-3 Schematic of magnetic curve of Industry pure iron DT4

在实验中，磁性研磨的方案是工具磁极旋转而线圈固定。电磁铁芯在电磁线圈的作用下产生磁场，并与机床主轴相连产生旋转运动作为磁极工具，直接影响着磁性研磨加工效果。因此电磁铁芯的尺寸、电磁铁芯端部的形状等结构参数对于磁感应强度和磁场分布有着决定性影响，在进行电磁感应器的结构设计前必须对这些参数进行研究分析。本文利用工程电磁场有限元分析软件 Maxwell 对电磁感应器的结构设计进行辅助设计，并基于有限元对磁场的模拟计算，优化电磁感应器的结构参数。

3.2 电磁场有限元计算的理论基础

3.2.1 静磁场基础理论

电磁场的边值问题实际上是求解给定边界条件下的麦克斯韦 (Maxwell) 方程及由方程组演化的其他偏微分方程问题。从求解问题的技术手段上来说，它可以分为解析求解和数值求解两大类。对于简单模型，有时可以得到方程的解析解。若模型复杂度增加，则往往很难获得模型的解析解。随着计算工具，特别是高速大容量电子计算机的发展，电磁场数值分析已深入到工业生产各个领域，解决问题的面越来越广，分析的问题也日趋复杂，电磁场数值分析已成为一门综合性的学科。

在 19 世纪中叶，麦克斯韦在总结前人工作的基础上，提出了适用于所有宏观电磁现象的数学模型，称之为麦克斯韦方程组。它是电磁场理论的基础，也是工程电磁场数值分析的出发点。

对于静态磁场而言，麦克斯韦方程组的微分形式就可以写为^[27,28]：

$$\nabla \times H = J \quad (3.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (3.3)$$

其中
$$\nabla = \frac{\delta}{\delta x} \mathbf{i} + \frac{\delta}{\delta y} \mathbf{j} + \frac{\delta}{\delta z} \mathbf{k}$$

式中， H ：磁场强度

E : 电场强度

B : 磁感应强度

J : 传导电流密度 t : 时间

H 与 B 的关系式为:

$$B = \mu\mu_0 H \quad (3.4)$$

式中 μ : 相对磁导率

μ_0 : 真空磁导率

传导电流密度可以表示为

$$J = \gamma(E + v \times B) \quad (3.5)$$

式中 γ : 电导率

v : 运动速度

对式 (3.1) ~ (3.5) 进行整理可得:

$$\nabla^2 B - \mu\mu_0 \frac{\partial B}{\partial t} = \mu\mu_0 \gamma \nabla \times (v \times B) \quad (3.6)$$

令式 (3.6) 右端项为

$$C = \mu\mu_0 \gamma \nabla \times (v \times B)$$

$$\text{得: } \nabla^2 B - \mu\mu_0 \frac{\delta B}{\delta t} = C \quad (3.7)$$

在给定边界条件和线圈励磁电流时, 通过场域离散和有限元数值分析可得出:

$$KB - K_t \frac{\partial B}{\partial t} = R \quad (3.8)$$

式中, K 、 K_t : 系数矩阵; $\frac{\partial B}{\partial t}$ 、 B : 磁感应强度列向量;

R : 右端项列向量。

3.2.2 磁性磨料刷相对磁导率计算

由于磁性磨料刷可以认为是由构成磁性磨料的铁磁材料 Fe 和硬质磨料以及空气组成, 由电学和磁学的相似性, 利用 Eucken 原理, 可以推得

磨料刷的相对磁导率为^[29]:

$$\mu_m = \frac{\mu_g}{\mu_0} \frac{1 - 2(V_a \frac{\mu_g - \mu_a}{2\mu_g + \mu_a} + V_f \frac{\mu_g - \mu_f}{2\mu_g + \mu_f})}{1 + (V_a \frac{\mu_g - \mu_a}{2\mu_g + \mu_a} + V_f \frac{\mu_g - \mu_f}{2\mu_g + \mu_f})} \quad (3.9)$$

式中, V_a 、 V_f : 分别为磁性磨料中含 Al_2O_3 、Fe 的体积

μ_g 、 μ_a 、 μ_f : 分别为空气、 Al_2O_3 、Fe 的磁导率

由于空气和 Al_2O_3 基本没有导磁性, 所以 $\mu_g \approx \mu_a \approx \mu_0$ 。而铁磁性材料的相对磁导率由电磁学的理论得 $\mu_r = \mu_f / \mu_0$ 。假设磁性磨料微粒为球形, 每颗粒子中含铁的容积率为 ω , 且按正方晶格均匀排列时 $\mu_f = \pi\omega/6$, 则

(3.9) 可写成:

$$\mu_m = \frac{6(2 + \mu_r) - 2\pi(1 - \mu_r)\omega}{6(2 + \mu_r) + \pi(1 - \mu_r)\omega} \quad (3.10)$$

3.2.3 电磁感应器计算的边界条件

在静磁场求解器中, 用户可以选择的边界条件有: ①默认边界条件; ②狄里克莱边界; ③气球边界; ④对称边界; ⑤匹配边界。本实研究所采用的电磁感应器具有轴对称结构, 满足于二维单元的分析条件, 因此, 可以沿通过电磁感应器轴线的平面剖开并取其一半为研究对象。在磁场求解中, 不同类型的边界条件对模型中静磁场的影响不同, 所以磁场的求解过程中应该根据实际问题来设定合理的边界条件。由于本电磁感应器是轴对称结构, 对于轴对称平面模型, 求解区应当向两坐标轴方向无限延伸。针对这种情况, 在数值计算中可以将无限远边界处理成气球边界, 这样处理可以减少边界定义引起的误差, 也不至于计算量过大。

3.3 电磁感应器的结构优化设计

根据前人对于电磁感应器研究的基础, 选用额定电压 $0 \sim 60V$ 、额定电流为 $0 \sim 3A$ 的直流电源。为尽可能地发挥电源的作用, 选用直径为 $0.9mm$ 的漆包线, 漆包线最大外径为 $0.96mm$, 20 摄氏度时, 其电阻为: 27.5Ω

/km, 安全电流为: 3.231A。由计算可知在本研究中, 电磁感应器的线圈漆包线总长度可为 700m 左右。电磁铁芯选用工业纯铁为材料, 根据模具曲面研抛加工的要求, 选用直径 10mm~20mm 研抛工具基体, 设定电磁线圈的内支架直径为 30mm。

初步确定以上参数后, 采用有限元分析软件对电磁感应器进行仿真分析, 并通过仿真分析来优化电磁感应器的结构参数。

3.3.1 电磁铁芯直径参数仿真分析

运用有限元分析, 在励磁电流为 2.5A 等参数相同的情况下, 对电磁铁芯不同直径: 10mm、20mm、30mm 的电磁感应器产生的磁场进行仿真分析, 得到了如图 3-4 所示的磁场分布图。电磁铁芯上的曲线为等磁位曲线, 各图右边部分的曲线为磁极轴向中心位置各点的磁感应强度曲线。

从图 3-4 可以看出来, 各不同直径磁极的磁感应强度都在其轴向的中间位置达到最高(图中 a 的点处), 并逐渐向磁极两端递减, 到端部时磁感应强度最小。电磁铁芯直径为 $\phi 10\text{mm}$ 的电磁感应器在磁极端面产生的磁感应强度达到了 0.35T; 电磁铁芯直径为 $\phi 20\text{mm}$ 的电磁感应器在磁极端面产生的磁感应强度达到 0.5T 以上; 电磁铁芯直径为 $\phi 30\text{mm}$ 的电磁感应器在磁极端面产生的磁感应强度为 0.312T。由图可以看出, 电磁铁芯直径为 $\phi 20\text{mm}$ 的电磁感应器在磁极端面产生的磁感应强度强于其它两个电磁铁芯在磁极端面产生的磁感应强度。

根据磁阻概念, 磁阻的大小为:

$$R = l / (\mu S) \quad (3.11)$$

式中, l : 磁导体的长度

μ : 磁导体的磁导率

S : 磁导体的截面积

磁感应强度与磁通量的关系为:

$$B = \Phi / S \quad (3.12)$$

式中, B : 磁感应强度

Φ : 磁通量

S : 磁导体的截面积

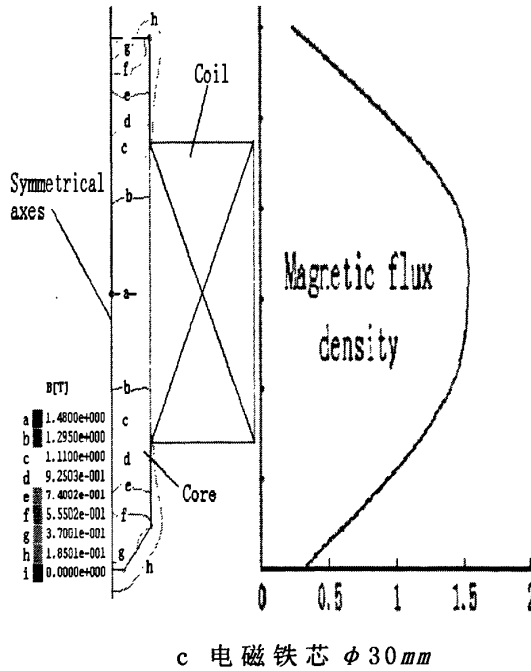
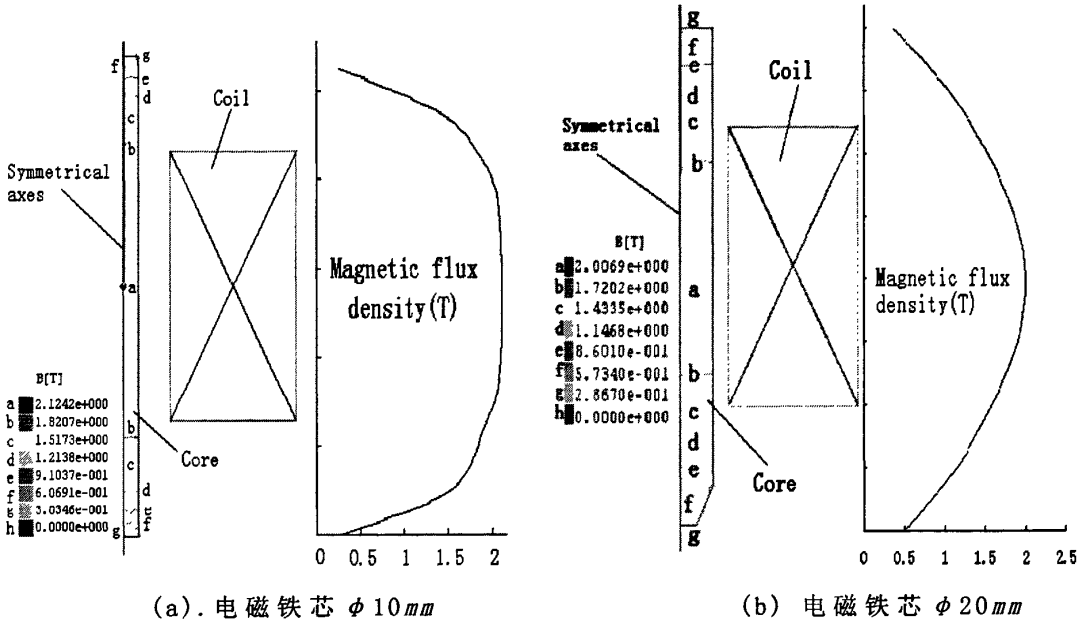


图 3-4 电磁感应器的磁场分布

Fig.3-4 Magnetic distribution of electromagnetic inductor

由式 (3.11) 和 (3.12) 可知, 在相同材料、励磁电流、线圈匝数的情况下, 大直径的铁芯有着较高的饱和磁通量而磁阻较小, 其在电磁铁芯轴向中心产生的磁感应强度却较小。

如若以磁极端面磁感应强度作为电磁感应器的评价标准, 那么曲面研抛加工中, 在其它加工条件确定的情况下磁性研抛工具直径存在着最优值。直径为 $\phi 20mm$ 的电磁铁芯端部磁感应强度高于 $\phi 10mm$ 的电磁铁芯端部磁感应强度, 这是因为 $\phi 10mm$ 的电磁铁芯轴向中心磁感应强度虽然高于 $\phi 20mm$ 电磁铁芯的轴向中心磁感应强度, 但由于这两个电磁铁芯在轴向中心位置都已经接近饱和磁感应强度致使两个电磁感应强度值相差不大, 同时由式 (3.11) 可知, 它的磁阻也为 $\phi 20mm$ 的电磁铁芯的 4 倍, 因此其电磁铁芯端部磁感应强度低于 $\phi 20mm$ 电磁铁芯的端部磁感应强度。虽然 $\phi 30mm$ 电磁铁芯的磁阻小于 $\phi 20mm$ 电磁铁芯的磁阻, 但 $\phi 30mm$ 的电磁铁芯端部磁感应强度仍然低于 $\phi 20mm$ 的电磁铁芯端部磁感应强度, 这主要是由于其轴向中心产生的磁感应强度仅为 $1.48T$ (图 3-4c 中 a 的点处) 远低于 $\phi 20mm$ 电磁铁芯在相应位置产生的磁感应强度 $2.0069T$ (图 3-4b 中 a 的点处)。因此在这三个直径的电磁铁芯中, $\phi 20mm$ 电磁铁芯可以获得最高的端部磁感应强度。

3.3.2 电磁铁芯工具磁极形状仿真分析

在磁性研磨加工中工具磁极端部形状及其磁场分布对于研磨加工效果有着显著影响, 因此, 在励磁电流为 $2.5A$, 铁芯直径为 $\phi 20mm$ 等参数相同的情况下, 对电磁铁芯不同的悬伸量进行仿真分析, 铁芯端部采用圆柱平底、圆锥平底和球形的不同形状, 对磁极工具端部产生的磁场分布进行仿真分析, 结果如图 3-5 所示。

由图 3-5 可见, 磁极采用锥形平底结构的电磁铁芯端部产生的磁感应强度最强, 但分布不均匀, 在磁极尖角处磁感应强度较强。圆柱平底结构磁场强度次之、同样具有尖角效应, 球头磁极周围产生的磁场整体较弱但分布均匀。所以在平面磁性研磨加工中, 常用的工具磁极为圆柱平底结构和锥形平底结构, 在曲面加工中, 考虑到磁极工具与曲面的几

何干涉问题，使用球形磁极较多，有时也采用锥形球形结构以增强磁场磁感应强度。

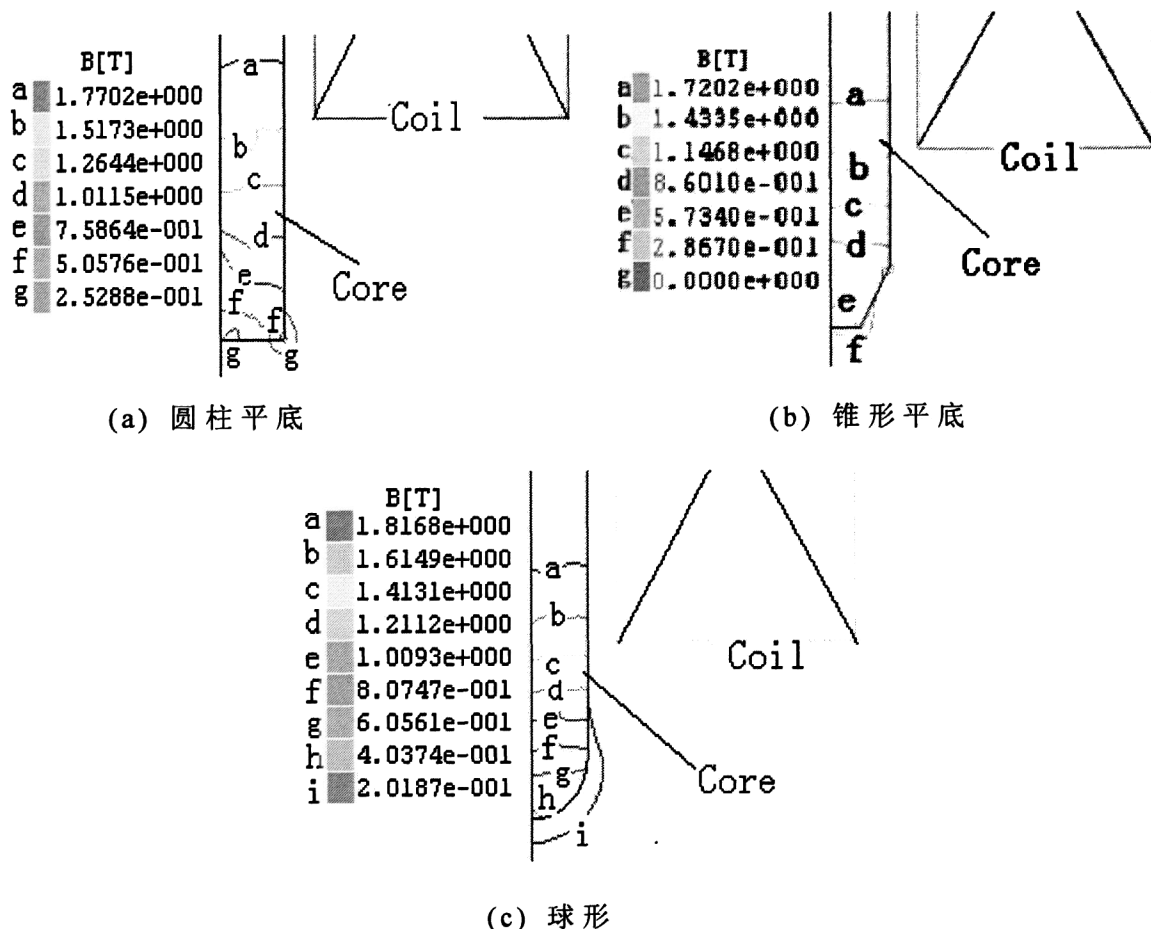
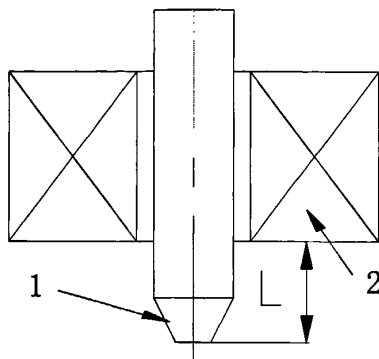


图 3-5 不同磁极形状磁场分布

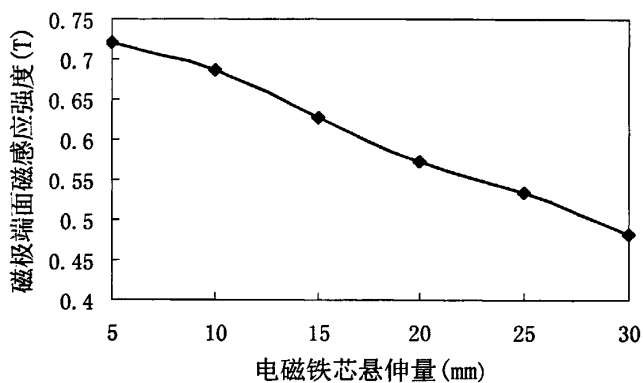
Fig.3-5 Magnetic distribution of magnetic pole with different structure

3.3.3 电磁铁芯悬伸量的分析

在电磁感应器中，电磁铁芯的悬伸量 L (如图 3-6a) 的大小也是一个影响磁极端面磁感应强度的关键参数。在电磁感应器内支架直径为 $\phi 30mm$ ，励磁线圈匝数为 3200 匝，励磁电流为 2.5A，电磁铁芯材料为 DT4，铁芯直径为 $\phi 20mm$ 等参数相同的情况下，对电磁铁芯不同的悬伸量进行仿真分析，并将其端部的磁感应强度绘成曲线，如图 3-6b 所示。



(a) 悬伸量 (1 电磁铁芯 2 励磁线圈)



(b) 磁感应强度曲线

图 3-6 工具磁极悬伸量分析

Fig.3-6 Analyses of protruding magnetic pole

由图 3-6b 曲线可见，磁极端面的磁感应强度随着电磁铁芯悬伸量的增加而程线性减小，且减小速率基本一致。这是因为电磁铁芯在励磁电流的作用下，在轴向中心产生最强磁感应强度并向两端递减，铁芯悬伸量越长，那么磁力线在传到磁极端面的过程到遇到的磁阻越大，漏磁也越大，而在相同材料的铁芯中，漏磁与悬伸量基本成正比。因此，如果想在磁性研磨加工中获得较高的磁感应强度，那么就应该在满足磁性研磨加工的条件下选用越小的铁芯悬伸量越好。

3.3.4 电磁感应器在加工状态下的仿真分析

根据所建立的电磁感应器和磁性“磨料刷”的数学模型，在有限元分析软件上构建仿真模型，励磁电流选用 2.5A，对电磁感应器在加工状态下的磁极和研磨区域磁场分布进行仿真分析，其结果如图 3-7 所示。

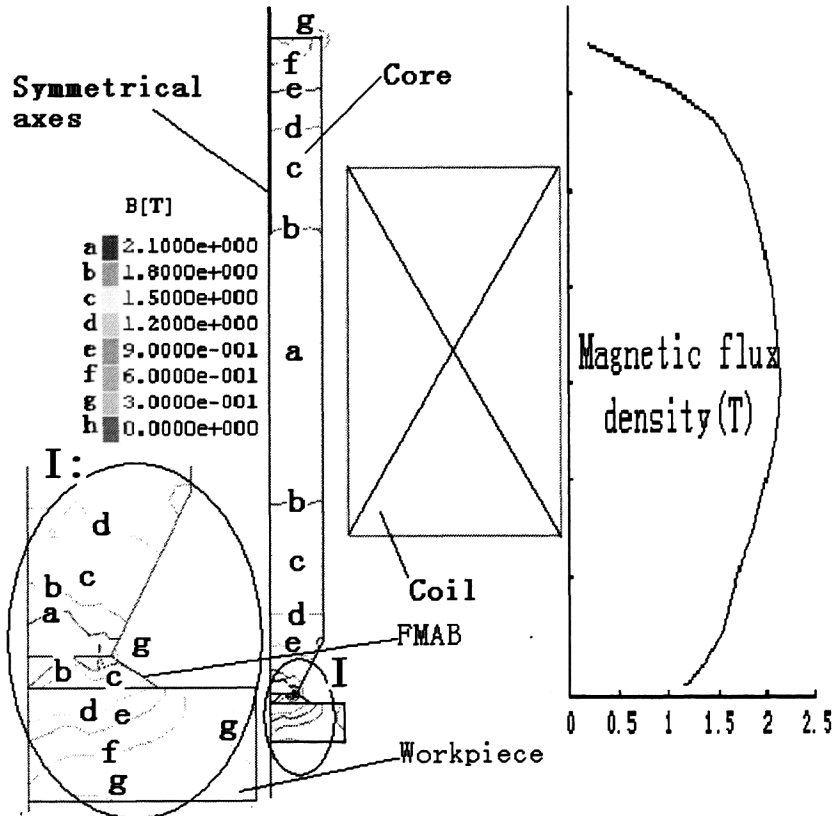


图 3-7 电磁感应器加工状态下的磁场分布

Fig.3-7 Magnetic distribution of electromagnetic inductor in finishing status

从图 3-7 的电磁感应器磁场的有限元仿真分析可以归纳出如下结果：

1) 磁感应强度沿电磁铁芯的轴向是变化的，并在电磁线圈的轴向中部达到最大，然后在两端逐渐减小，电磁感应器磁极端部的磁感应强度沿径向也呈不均匀分布，且存在着尖角效应，如图中的 I 部分所示。

2) 电磁感应器铁芯与磁性磨料和工件形成加工区域时(图 3-7)，形成从电磁铁芯(磁性研磨工具)到磁性磨料再到工件的磁力线导体，其间由于磁性磨料的导磁作用，其磁阻远小于空气磁阻，相比于图 3-4b，

研磨工具端部磁感应强度得到明显增强。

3) 电磁铁芯 (Core) 端部与磁性磨料刷 (FMAB) 接触区域磁感应强度明显高于磁性磨料刷与工件 (Workpiece) 接触区域的磁感应强度, 并且形成了由电磁铁芯向工件方向磁场强度减小的梯度变化。

3.3.5 励磁电流对加工区域磁感应强度的影响

理论上电磁感应器的磁场强度随励磁电流增大而增大, 但由于电磁铁芯的材料特性 (如图 3-3) 决定了其磁感应强度是不可能无限增大的。

在电磁感应器内支架直径为 30mm , 励磁线圈匝数 3200 匝, 磁极铁芯材料采用 DT4, 电磁铁芯直径为 $\phi 20\text{mm}$, 在加工间隙为 1.2mm , 加工工件为具有导磁性的模具钢等参数相同的情况下, 对励磁电流与加工区域磁感应强度的关系进行仿真分析并绘制成曲线图, 结果如图 3-8 所示。

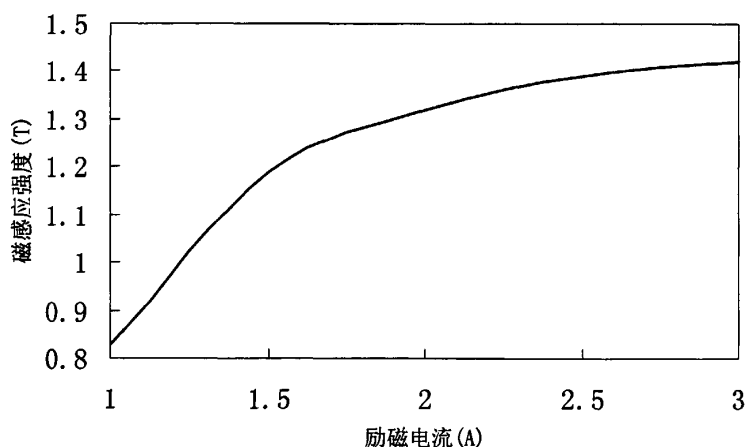


图 3-8 励磁电流与磁感应强度的关系

Fig.3-8 Relationship between electric current and magnetic flux density

由图 3-8 可见, 在励磁电流由 1A 增加到 2A 的过程中, 磁感应强度的增大速度比较快, 励磁电流大于 2A 后, 磁感应强度增加的速率越来越慢, 并逐渐趋向水平线。结合图 3-3 及图 3-8 分析可知, 在励磁电流达到 2A 后, 电磁铁芯中心部分磁感应强度已经接近饱和, 磁导率随着降低,

所以磁感应强度增大速度越来越慢并趋于停止。

3.3.6 加工间隙对加工区域磁感应强度的影响

磁性研磨加工过程中，磁极端面与工件表面之间的间隙也是影响加工效果的关键因素之一，磁极端面与工件表面必须保持一定的间隙才有磁性磨料容身空间，从而产生磁性“磨料刷”来对工件实现研磨加工。然而由于加工间隙影响着加工区域磁感应强度，影响着磁性“磨料刷”的刚度，因此在磁性研磨中，加工间隙的大小应该根据研磨的实际需要来选择。

在电磁感应器内支架直径为 30mm ，励磁线圈匝数 3200 匝，励磁电流为 2.5A ，磁极铁芯材料采用 DT4，电磁铁芯直径为 $\phi 20\text{mm}$ ，加工工件为具有导磁性的模具钢等参数相同的情况下，对加工间隙与加工区域磁感应强的关系进行仿真分析并绘制成曲线图，结果如图 3-9 所示。

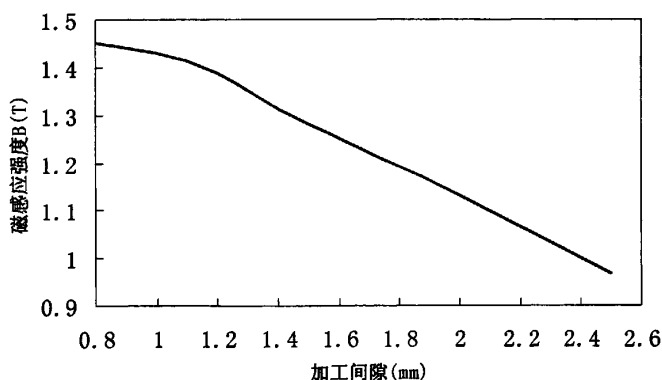


图 3-9 加工间隙对磁感应强度的影响

Fig.3-9 Relationship between working clearance and magnetic flux density

从图 3-9 可看到，加工区域的磁感应强度随着加工间隙的增大而减小，在加工间隙增加到 1.4mm 以后，磁感应强度更是随着加工间隙的增大而呈线性减小。这主要是由于加工间隙增大后，其间隙内的磁阻也随着增大，这在一定程度上阻碍了磁力线的传导，从而降低了加工区域的磁

感应强度。

3.3.7 磁感应强度测试与仿真结果分析

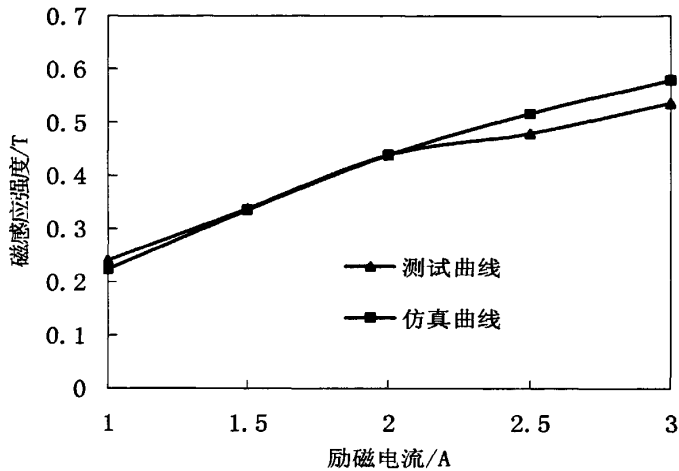


图 3-10 特征点 A 的磁感应强度测试与仿真曲线

Fig.3-10. Simulative and experimental curves of magnetic flux density at characteristic point A

在以上电磁场计算及仿真分析的基础上，设计并制造了用于磁性研磨的电磁感应器，随后用数字特斯拉计 CTS24 检测特征点磁感应强度，测试电磁感应器的性能并验证有限元仿真分析的准确性。为了测量方便和数据准确可靠，在没有磨料的情况下测量磁感应强度，并对不同情况下的两个特征点进行测试验证。一个是选取不在加工区域的电磁铁芯端面直径约 3/4 的特征点 A，该特征点贴近电磁铁芯端面，其测试与仿真结果如图 3-10 所示；另一个是选取处于加工区域且加工间隙为 2.0mm 的特征点 B，该特征点也贴近电磁铁芯端面，其测试与仿真结果如图 3-11 所示。

从图 3-10 和 3-11 可以看出，特征点 A 点和 B 点的电磁感应强度测试值与仿真值都随励磁电流的增大而增大，但随着电流强度的增大，磁

感应强度的增大速率逐渐减小。磁感应强度的测试曲线与仿真曲线基本吻合，曲线上各点的最大相对误差值不超过 7%。这验证了电磁感应器仿真分析的准确性，仿真结果也基本上能反映电磁感应器的磁感应强度特性，由此可以认为仿真分析结果能够作为对电磁感应器结构优化设计的依据。

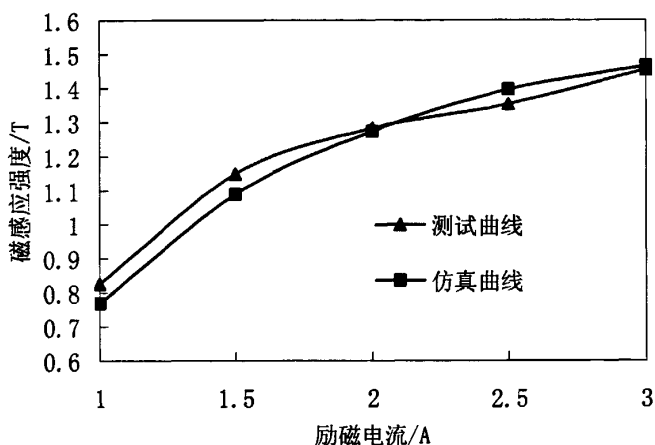


图 3-11 特征点 B 的磁感应强度测试与仿真曲线

Fig.3-11. Simulative and experimental curves of magnetic flux density at characteristic point B

仿真曲线与测试曲线存在一定差异的主要原因可以认为：

- (1) 仿真模型与实验原型在尺寸上不能完全吻合。
- (2) 在绕励磁线圈上，实际的线圈的绕法不可能完全理想化，这与仿真的线圈也存在着差别。
- (3) 仿真模型中使用的工业纯铁磁化曲线是一条近似的曲线，它不可能在每一个点上都与材料的实际磁导率特性完全匹配。
- (4) 应用数字特斯拉计测量特征点磁感应强度时存在人为因素的影响。
- (5) 有限元计算存在着一定的计算误差。

3.4 本章小结

本章首先对磁性研磨数控机床改装的技术方案进行了全面的探讨，着重就机床改装过程中电磁感应器各个部分的材料及结构进行了详细的论述。接着就电磁场有限元计算理论中的静磁场理论、磁性“磨料刷”磁导率及边界条件进行了分析。在此基础上，运用有限元分析软件就电磁感应器的结构进行了仿真分析，得到的主要结果归纳如下：

(1) 在电磁感应器其它参数相同的情况下， $\phi 20mm$ 电磁铁芯可以获得分别大于 $\phi 10mm$ 、 $\phi 30mm$ 电磁铁芯的端面磁感应强度。这主要是由饱和磁感应强度与磁阻共同作用的结果。

(2) 根据电磁学的理论，设计了磁极端部结构及磁极的悬伸量，并对其进行了有限元分析，根据理论及分析结果，来指导磁性研磨电磁感应器设计及磁性研磨过程的电磁场控制。

(3) 加工状态下电磁铁芯端面磁感应强度比非加工状态得到了增强，并在电磁铁芯、磁性磨料刷和工件中形成了磁场梯度的变化。

(4) 在其它参数不变的情况下，加工区域的磁场强度随励磁电流的增大而增大，在励磁电流达到 $2A$ 后，电磁铁芯轴向中心部分磁感应强度接近饱和，磁感应强度增大速度越来越慢并趋于停止。

(5) 在其它参数不变的情况下，加工间隙增大，其间隙内的磁阻也随着增大，致使加工区域的磁感应强度随着加工间隙的增大而减小。

(6) 根据理论和仿真分析设计的电磁感应器，通过实验测量得出的磁感应强度曲线与仿真曲线基本吻合，曲线上各点的最大相对误差值不超过 7%。验证了电磁感应器仿真分析的准确性，仿真结果也基本上能反映了电磁感应器的磁场强度特性。

第四章 平面磁性研磨加工实验研究

在磁性研磨加工中，主要从两个方面分析加工效果即：工件材料去除率和加工表面粗糙度。材料去除率表示单位时间内磁性磨料的研磨效率，可以反映加工的速度，但是磁性研磨加工是一种精细抛光方法，其材料去除率量很微小，测量不太方便，而且误差比较大，在生产中实际意义不大。但是表面粗糙度直接影响着工件的性能和寿命，而且比较容易测量，所以本文选择表面粗糙度作为评价磁性研磨加工效果的标准。

4.1 混合磨料平面磁性研磨正交实验研究

正交实验法是在实验经验与理论分析的基础上，利用现成的规格化“正交表”，科学地选取实验样本，合理安排实验。它在很多影响因子中选出代表性强的影响因子，通过相对少量的实验，找出符合客观规律的加工结论或者优选出好的方案^[30]。通过正交实验和相应的实验结果分析，可以得到以下方面的内容：

- (1)分清影响实验的诸因素的主次关系，可以找出起主要作用的因素；
- (2)找出各因素的水平高低对实验指标的影响规律；
- (3)在因素和水平的不同搭配中，优化加工方案。

混合磨料是铁磁微粒与磨料微粒的机械混合，其研磨磁性“磨料刷”形成主要依靠铁磁微粒磁串对非磁性磨料微粒的约束作用。本磁性研磨正交实验是在前期大量实验的基础之上，对磁性研磨加工工艺参数的进一步探索性实验，其主要目的是在影响磁性研磨的这些加工工艺因素中找出最优水平，提出最佳工艺参数组合。并对混合磨料在本磁性研磨加工实验中的应用做出方向性判断。

为了分析包括磨料配比、磁极转速、加工间隙、励磁电流、进给速度和加工时间等 6 个因素对表面粗糙度的影响，选择了正交实验方法并对各个因素取 3 个水平进行实验研究，所取的因子和水平列于表 4-1。对

于 6 因素 3 水平正交实验,选用 $L_{18}(3^7)$ 正交表,在表头设计方面,可将因子 A, B, C, D, E, F 分别安排在第 1 到第 6 列,剩下第 7 列作为空白列。按照正交实验设计进行实验,由测得的表面粗糙度求各列与各水平对应的均值和各列的极差,计算结果分别如表 4-2、4-3 所示。

表 4-1 正交实验因子及水平

Table.4-1 The orthogonal experiment factor and level

因子	水平 1	水平 2	水平 3
A: 白刚玉磨料与还原铁粉质量比	1:6	1:5	1:4
B: 磁极转速 (rpm)	2000	2500	3000
C: 加工间隙 (mm)	0.8	1.0	1.2
D: 励磁电流 (A)	2.8	2.5	2.2
E: 进给速度 (m/min)	0.015	0.030	0.045
F: 加工时间 (min)	10	8	6

实验设备是采用之前研制的磁性研磨数控机床,试件材料选择塑料模具钢 718,原始表面粗糙度 $Ra=1.76\mu m$ 左右;研磨液为硅油,加工面积为 $15\times 30mm$ 。正交实验设计时,考虑各个因子对磁性研抛加工表面粗糙度的影响,找出最优水平组合。

下面根据试验结果寻找最优因子水平组合:

(1) 对于因子 A,因为 A_1 的均值 = 0.4685, A_2 的均值 = 0.3343, A_3 的均值 = 0.4403, 其中 $A_2=0.3343$ 最小,所以 A_2 是最优水平。

(2) 对于因子 B,因为 B_1 的均值 = 0.5257, B_2 的均值 = 0.3340, B_3 的均值 = 0.3735, 其中 $B_2=0.3340$ 最小,所以 B_2 是最优水平。

(3) 对于因子 C,因为 C_1 的均值 = 0.2743, C_2 的均值 = 0.3572, C_3 的均值 = 0.6117, 其中 $C_1=0.2743$ 最小,所以 C_1 是最优水平。

表 4-2 正交实验表

Table.4-2 Test data of surface roughness in the orthogonal experiment

表头	A	B	C	D	E	F		
列号								加工表面粗糙度值 $Ra(\mu m)$
试验号	1	2	3	4	5	6	7	
1	1	1	1	1	1	1	1	0.264
2	1	2	2	2	2	2	2	0.522
3	1	3	3	3	3	3	3	0.764
4	2	1	1	2	2	3	3	0.516
5	2	2	2	3	3	1	1	0.232
6	2	3	3	1	1	2	2	0.444
7	3	1	2	1	3	2	3	0.432
8	3	2	3	2	1	3	1	0.62
9	3	3	1	3	2	1	2	0.586
10	1	1	3	3	2	2	1	0.965
11	1	2	1	1	3	3	2	0.346
12	1	3	2	2	1	1	3	0.2955
13	2	1	2	3	1	3	2	0.601
14	2	2	3	1	2	1	3	0.3
15	2	3	1	2	3	2	1	0.222
16	3	1	3	2	3	1	2	0.447
17	3	2	1	3	1	2	3	0.332
18	3	3	2	1	2	3	1	0.426

(4) 对于因子 D, 因为 D_1 的均值 = 0.3397, D_2 的均值 = 0.4025, D_3 的均值 = 0.5010, 其中 $D_1 = 0.3397$ 最小, 所以 D_1 是最优水平。

(5) 对于因子 E, 因为 E_1 的均值 = 0.3975, E_2 的均值 = 0.4840, E_3 的均值 = 0.3617, 其中 $E_3 = 0.3617$ 最小, 所以 E_3 是最优水平。

(6) 对于因子 F, 因为 F_1 的均值 = 0.2575, F_2 的均值 = 0.4807, F_3 的均值 = 0.5050, 其中 $F_1 = 0.2575$ 最小, 所以 F_1 是最优水平。

因此,把上面得到的各个单因子的最优水平综合起来考虑, 可以确定 6 个因子的最优水平组合为 ($A_2, B_2, C_1, D_1, E_3, F_1$), 即在磁性研磨加工中, 应选用白刚玉与还原铁粉质量比为 1:5, 磁极转速 2500r/min, 加工间隙 0.8mm, 励磁电流为 2.8A, 进给速度为 0.045m/min, 加工时间 10min, 可以得到较好的加工效果。

表 4-3 正交实验数据分析表

Table.4-3 Analyses of test data

因子		A	B	C	D	E	F	Ra(μm)
各 水 平 平 均 Ra	$\overline{R_{1j}}$	0.4685	0.5257	0.2743	0.3397	0.3975	0.2575	0.4870
	$\overline{R_{2j}}$	0.3343	0.3440	0.3572	0.4025	0.4840	0.4807	0.3593
	$\overline{R_{3j}}$	0.4403	0.3735	0.6117	0.5010	0.3617	0.5050	0.3968
极差		0.04473	0.06057	0.11247	0.05377	0.04077	0.0825	0.04257
								$\overline{\bar{X}} = 0.4619$ $SS_T = 0.473380$ 389

在表 4-3 中,从极差的大小就可以看出各个因了对于表面粗糙度的影响: 加工间隙对于工件表面粗糙度的影响最大, 紧接着是加工时间、磁极转速、励磁电流、白刚玉与还原铁粉质量比, 对工件表面粗糙度影响最小的是进给速度。

由于在模具曲面磁性研磨加工过程中需要采取磁极旋转的加工方式, 采用混合磁性磨料对于质量较大的非磁性磨料微粒很容易在离心力作用下挣脱约束, 使得磁性“磨料刷”中磨料浓度得不到保证, 研磨效率变得比较低, 加工效果有待提高, 加工表面粗糙度最好也只能达到

Ra $0.2\mu\text{m}$ 左右。因此本研究转而应用粘结磁性磨料对磁性研磨加工实验进行研究。

4.2 粘结磁性磨料磁性研磨实验

4.2.1 实验装置及实验参数

本实验采用之前研制的磁性研磨数控机床对工件平面进行磁性研磨加工实验。工件分别在实验前、后，经超声波清洗机清洗，并采用 SRM-1 (F) 型表面粗糙度测量仪测量其加工表面粗糙度 Ra 。对于工具铁芯顶端及加工区域的磁感应强度则采用上海震宏 CTS-24 霍尔效应数字磁强计进行测量。实验的基本参数如表 4-4 所示，如在实验中有相关参数发生变化，将会在实验中给予说明。

表 4-4 磁性研磨加工实验参数

Table.4-4 Experimental parameter of magnetic abrasive finishing

工件	塑料模具钢瑞典 718，加工区域 $30\times 20\text{mm}$ ；工件原始表面粗糙度值 $1.6\mu\text{m}\sim 2.3\mu\text{m}$
加工面	平面
工具磁极	锥形平底，铁芯直径： 20mm ，端部直径： 10mm
磁极转速	$2500\text{r}/\text{min}$
加工间隙	1.2mm
励磁电流	2.5A
进给速度	$0.045\text{m}/\text{min}$
加工时间	4min
磨料	粘结磁性磨料 60 目
研磨液	油酸

试件为 $80\times 40\times 8\text{mm}$ 的塑料模具钢 718，属于 P20 改良型，为真空熔炼之铬镍钼合金钢，出厂前已经过淬硬及回火处理，具有以下优点：①

无淬裂和热处理变形风险②无需热处理费用③缩短模具制作周期④降低模具所需成本（例：无需矫正变形），模具易于修正⑤可施以氮化及火焰硬化处理，以增进模具的表面硬度及耐磨性。可应用于大型长寿命塑胶注塑模，如家电制品、汽车、电脑外壳等模具高表面光洁度之塑胶制品模具吹塑模；由于硬度高，可用于塑胶模具中之滑块成形工具，压缩-制动模（湾板机模），（视生产需要可施加火焰硬化或氮化处理）构造零件及轴。其化学成分及特性如表 4-5 所示^[31]。

表 4-5 瑞典 718 的化学成分和材料特性

Table.4-5 Chemical composition and material properties of Plastic Die

Steel 718

主要化学成分 (%)						材料特性
C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	
0.38	0.3	2.0	1.0	1.4	0.2	预硬至 HB330-380；抛光性及加工性好， 钢材纯洁度高

4.2.2 影响磁性研磨加工质量的主要工艺参数分析

根据磁性研磨加工的理论，影响磁性研磨加工的因素很多，结合研制的磁性研磨装置的技术特点及之前的实验，分析所得的几个最主要影响因素是：加工区域的磁感应强度，磁极表面与工件表面之间的间隙，磁极与工件之间的相对转速，磁性磨料的成份、配比、结构和粒度，磁性研磨的加工时间，以及工件的材质和尺寸等。但是，在上述的众多影响因素中，磁性磨料的配比及成份都已经确定，所以我们在这里不将磁性磨料作为影响因素进行考虑，同时由于加工对象也是确定的，在这里也不考虑工件材质的影响。因此，根据上述的分析，本研究将重点把加工区域的磁感应强度，加工间隙，磁极转速以及磁性研磨加工时间作为主要影响参数，进行磁性研磨加工实验研究。

4.2.3 磁性研磨加工实验分析

1) 磁感应强度的影响 在磁性研磨加工中, 加工区域的磁感应强度是影响表面粗糙度的主要因素之一, 磁感应强度的改变直接影响着磁性研磨的工件表面粗糙度。但在磁性研磨加工过程中, 对于加工区域的磁感应强度一般难以直接测得, 而产生磁感应强度的励磁电流数据则可以随时得知, 另一方面, 在加工间隙发生变化时, 由于塑料模具钢具有一定的磁性, 加工区域的磁感应强度会随着加工间隙的变化而产生较大变化, 且在间隙过小的时候, 磁感应强度也无法直接测得, 因此本文在励磁电流与磁感应强度依存关系分析的基础上对励磁电流与加工表面粗糙度关系进行研究。

图 4-1 是在其它实验参数不变, 只改变励磁电流的条件下得到的实验结果。

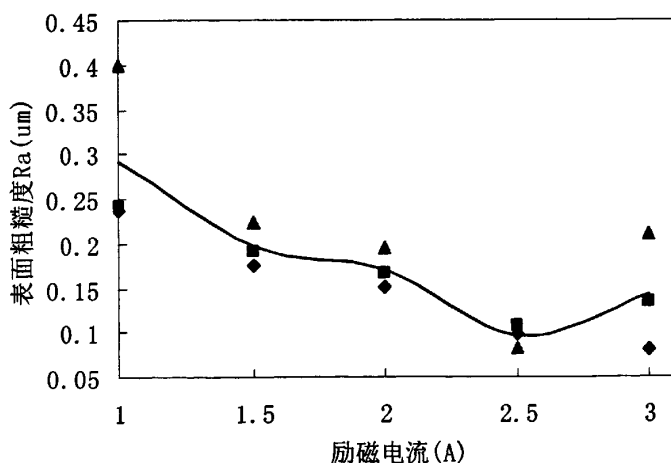


图 4-1 励磁电流对工件表面粗糙度的影响

Fig. 4-1 Effects of electric current on surface roughness

由图 3-8 和图 4-1 可知, 当磁感应强度较小时, 表面粗糙度值随磁感应强度的增加而减小。这是由于磁感应强度较小导致磁场保持力较弱, 研磨压力也较小, 对工件的磨削效果也就较弱, 因此表面粗糙度值减小

比较缓慢。随着磁感应强度的增加，磁场保持力增大，研磨压力增大，磨削能力增强，因而表面粗糙度值减小也跟着加快。但磁感应强度增加到一定程度后，研磨压力过大。一方面，使得靠近工件表面的部分磨料紧贴在工件表面上，失去了磨料与工件之间的相对运动，破坏了磨料的自锐能力，因而“磨料刷”的磨削能力不仅不会提高反而下降，工件表面粗糙度值下降减缓；另一方面，单位面积上的磨料压力增大，使得部分磨料对工件表面的划伤趋向严重，因此表面粗糙度值反而有所增加。

由图 4-1 结合图 3-8 可知加工区域的磁感应强度在 $B=1.2\sim 1.4T$ 左右可以获得较低工件表面粗糙度

2) 加工间隙的影响 加工间隙是指磁极端面与工件表面之间的间隙，在其它实验参数不变的情况下，只改变加工间隙进行磁性研磨加工实验，得到了如图 4-2 所示的实验结果。

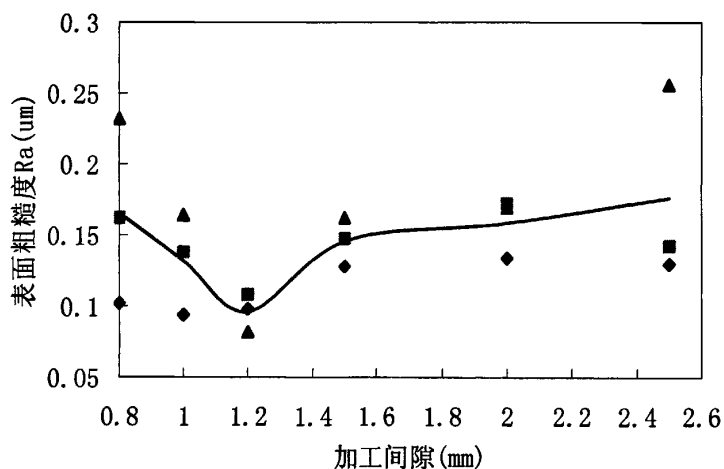


图 4-2 加工间隙对工件表面粗糙度的影响

Fig. 4-2 Effects of working clearance on surface roughness

由图 3-9 可知在励磁电流一定的情况下，加工间隙的变化会影响到加工区域磁阻的变化，也就影响到了加工区域磁感应强度的变化。加工区域磁感应强度大小与加工间隙大小呈近反比变化，即磁感应强度会随着加工间隙的增大而减小，同时也会随着加工间隙的减小而增大，且两者

呈线性变化。

由图 4-2 可知，加工间隙为 1.2mm 时，可以获得较小的表面粗糙度值，加工间隙过大或过小都会使表面粗糙度 R_a 增大。

加工间隙过大，一方面，使有限的磁性磨料排列得较为疏松，磨粒间的压力减小，磨削能力降低；另一方面，由图 3-9 及图 4-2 可知，加工间隙增大，磁阻增大，磁感应强度减小，研磨压力减小，最终使得表面粗糙度值随着增大。

加工间隙过小，一方面，磨粒在加工间隙中的翻滚和自锐作用不能发挥，从而削弱“磨料刷”去除材料的能力；另一方面，由图 3-9 可知，加工间隙过小，磁感应强度增大，“磨料刷”刚性过大，加工时容易在工件表面划出较深划痕，并最终使得工件表面粗糙度值反而增大。

因此，工件平面磁性研磨合理的加工间隙应在 1.2mm 左右较为合适。

3) 磁极转速的影响 磁极的回转速度决定了磁性“磨料刷”运动速度，理论上磁极转速越高，磨粒与加工面的相对运动速度越高，加工的效率越高，但同时磁极的回转速度受到磨料粒度、研磨液粘度、磁极形状、加工间隙、磁感应强度等多种因素的影响。在其它参数不变的情况下，只改变磁极转速进行磁性研磨加工实验，得到了如图 4-3 所示的结果。

在磁极转速 $n=1000\sim 2500\text{r}/\text{min}$ 时，磁极的转速越快，磨粒对工件表面的磨削能力越强，材料去除速度越快，表面粗糙度值减小越快。当磁极转速增大到一定程度后，在离心力的作用下，一方面，磨料会沿着磁极回转的切线方向飞出，磁性磨料在加工区域的浓度降低，磨削能力减弱；另一方面，研磨液也会过多地飞溅出去，使得加工区域供液不足，氧化膜形成减慢，研磨液的冷却作用也受到减弱，同时由于磨料对工件表面的干涉作用太强，使得工件表面划伤、摩擦更激烈，产生的热量大幅增加，工件表面温度升高，磁性磨料急速升温。这不仅会引起工件的变形，加工面出现变质层、裂纹和残留应力，而且也会由于温度的增高使得磨料的寿命降低。从而影响工件的最终表面粗糙度。

由图 4-3 可知，磁极转速在 $2500\text{r}/\text{min}$ 左右可以得到最理想的工件表面粗糙度。

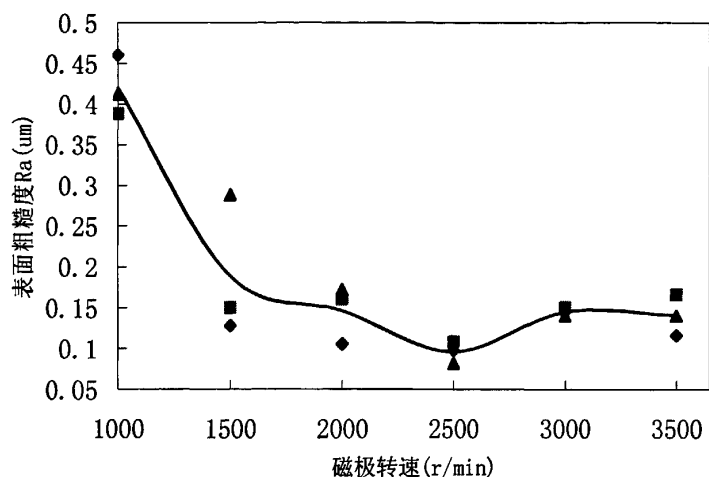


图 4-3 磁极转速对工件表面粗糙度的影响

Fig. 4-3 Effects of rotate speed on surface roughness

4) 加工时间的影响 在其它实验参数不变的情况下，只改变加工时间进行磁性研磨实验，得到实验结果如图 4-4 所示。

由图 4-4 可看出，在加工开始阶段，表面粗糙度值随着时间的增加而减小，不过经过一段时间的研磨加工后，工件表面粗糙度不再减小且有所波动到。

这是由于研磨初期，工件表面较粗糙，在表面凸起处集中了较多的磁力线，磁性“磨料刷”在其表面形成尖端效应，因此该区域的磁性磨料对于工件的磨削力较大，使得凸起部分更容易被去除，从而使得粗糙度值下降较快。当研磨加工一定时间后，磨料开始钝化，研磨液大量减少，磨料温度也升高，使得粘结磨料中的磁粒相和磨粒相因结合强度变弱而脱离，部分磨粒相在离心力的作用下沿磁极旋转的切向方向飞出了加工区域。在研磨液和部分磨粒相飞出以后，由于磁性“磨料刷”中磁粒相的比重增加，磁导率提高，而磨削刃减少，磁性“磨料刷”刚性反而增加，单个磨粒的研磨压力增大，因此使得新露出的磨削刃容易在工件表面留下较深的划痕，造成了工件表面粗糙度值在研磨 4min 后不再减小且有所波动。

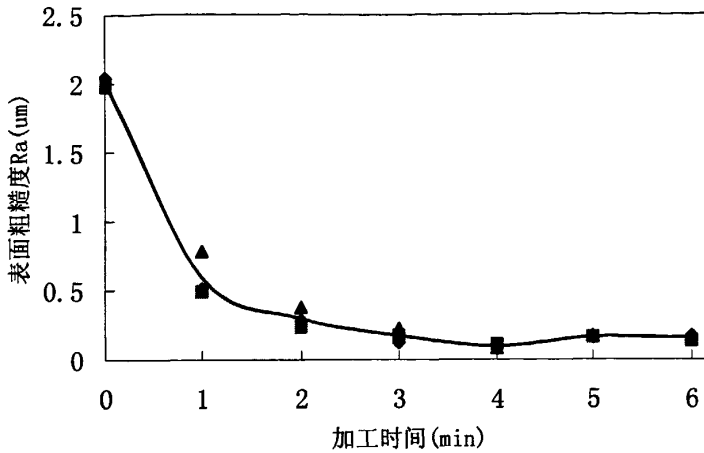
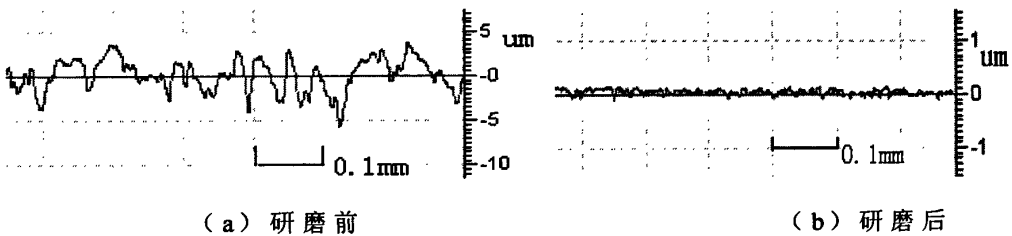


图 4-4 加工时间对表面粗糙度的影响

Fig. 4-4 Effects of finishing time on surface roughness

由图 4-4 可知，平面工件表面在经过 4min 的研磨后，可以达到比较好的表面粗糙度。



(a) 研磨前

(b) 研磨后

图 4-5 工件表面轮廓

Fig. 4-5 Surface profiles of the workpiece

5) 磁性研磨加工实验验证 根据实验结果，在其它研磨参数不变，励磁电流为 2.5A，加工间隙为 1.2min，磁极转速为 2500r/min，加工时间为 4min 的情况下进行磁性研磨，工件加工前与加工后的工件表面轮廓采用 Talysurf CLI 500 型三维表面测量仪进行扫描，结果如图 4-5 所示。

运用激光共聚焦显微镜 LEXTOLS3100 对工件的研磨前后的工件表面进行二维的扫描，其结果如图 4-6 所示。

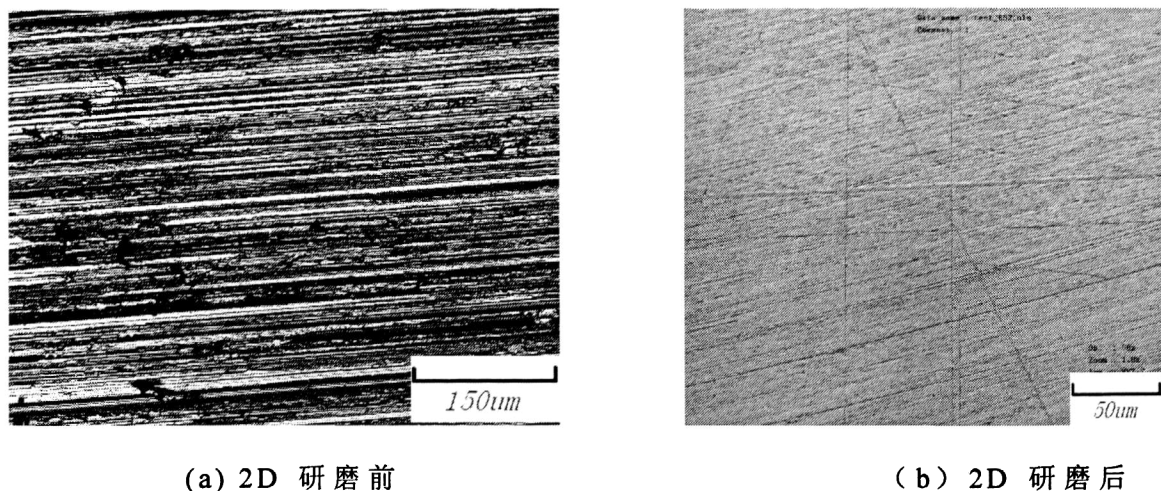


图 4-6 工件表面显微镜图

Fig.4-6 Microscopic photographs of workpiece surface

4.3 本章小结

本章首先应用混合磨料对工件平面进行磁性研磨正交实验，分析包括磨料配比、磁极转速、加工间隙、励磁电流、进给速度和加工时间等 6 个因素对表面粗糙度的影响，对各个因素取 3 个水平进行实验研究。通过正交实验分析得出：6 个因子的最优水平组合为 $(A_2, B_2, C_1, D_1, E_3, F_1)$ ，即在磁性研磨加工中，选用白刚玉与还原铁粉质量比为 1:5，磁极转速 $2500r/min$ ，加工间隙为 $0.8mm$ ，励磁电流为 $2.8A$ ，进给速度为 $0.045m/min$ ，加工时间为 $10min$ ，可以得到最好的加工效果。且从极差的大小就可以看出各个因素对于表面粗糙度的影响：加工间隙对于工件表面粗糙度的影响最大，接着依次是加工时间、磁极转速、励磁电流、白刚玉与还原铁粉质量比，对工件表面粗糙度影响最小的是进给速度。

由于混合磨料的极限性，本章接着应用粘结磁性磨料对工件平面进行磁性研磨实验。并重点把加工区域的磁感应强度、加工间隙、磁极转速以及磁性研磨加工时间作为主要影响参数进行磁性研磨加工实验研究。得出的结果归纳如下：

(1) 磁感应强度：在一定的范围内，随着磁感应强度的增大，工件表面粗糙度降低的速度加快，但磁感应强度过高，加工效率反而下降且加工的表面粗糙度也会相对增大，甚至出现工件表面划伤。因此加工区域的磁感应强度在 $B=1.2\sim 1.4T$ （即励磁电流为 $2.5A$ 左右）时可获得比较好的表面粗糙度。

(2) 加工间隙：在励磁电流一定时，加工间隙的变化直接影响着加工区域的磁感应强度大小，加工间隙过大或过小都不利于工件表面粗糙度 Ra 的改善。加工间隙较为合适的范围是在 $1.2mm$ 左右。

(3) 磁极转速：在磁极转速 $n=1000\sim 2500r/min$ 时，磁极的转速越快，磨粒对工件表面材料去除速度越快，表面粗糙度值减小越快。但磁极转速不能过高，否则磁性磨料和研磨液会因离心力的作用而飞散，从而不利于表面粗糙度的改善。

(4) 加工时间：在加工开始阶段，表面粗糙度值随着加工时间的增加而减小。经过 $4min$ 研磨加工后，工件表面粗糙度值已降到了一定程度，这时由于单个磨粒的研磨压力增大、研磨液飞散等因素的影响，导致工件表面粗糙度值不再减小。

第五章 曲面磁性研磨加工实验研究

5.1 凹凸曲面磁性研磨实验

5.1.1 实验参数

本实验采用之前研制的磁性研磨数控机床对工件曲面进行磁性研磨加工实验。工件表面经过铣床加工后，采用磁极端面研磨方式进行磁性研磨实验。工件分别在磁性研磨实验前、后，经超声波清洗机清洗，并采用 Talysurf CLI 500 型三维表面测量仪测量加工表面粗糙度 Ra 。对于工具铁芯顶端及加工区域的磁感应强度采用上海震宏 CTS -24 霍尔效应数字磁强计测量。

实验的基本参数如表 5-1 所示，如在实验中有相关参数发生变化，将会在实验中给予说明。实验用工件形状如图 5-1 所示，凹凸弧面半径都为 $50mm$ ，宽 $40mm$ ，长 $80mm$ 。

表 5-1 磁性研磨加工实验参数

Table.5-1 Experimental parameter of magnetic abrasive finishing

工件	45 钢，工件原始表面粗糙度值： $1.0\mu m \sim 1.3\mu m$
加工面	凹面、凸面
工具磁极	锥形球头，铁芯直径： $20mm$ ，端部直径： $10mm$
磁极转速	$2500r/min$
加工间隙	$1.0mm$
励磁电流	$2.5A$
进给速度	$0.050m/min$
加工往复次数	8 次
磨料	粘结磁性磨料 80 目
研磨液	油酸

5.1.2 曲面磁性研磨实验分析

1) 磁感应强度的影响 加工区域磁感应强度作为一个对工件磁性研磨的表面粗糙度有明显影响的因素, 其与励磁电流分别在加工凹、凸面时的关系如图 5-2 所示。由图可见, 磁感应强度随着励磁电流的增大而增大, 在励磁电流达到 $2.0A$ 前, 磁感应强度增长得比较快, 但其后增大速度随着励磁电流的增大逐渐减小。由于球头磁极在电磁铁芯直径、材料、电磁线圈等上面与第四章实验所用的平头磁极一致, 因此其电磁铁芯在轴向中心部分也在励磁电流达到 $2.0A$ 时接近饱和磁感应强度, 之后随励磁电流的增大, 磁感应强度增大缓慢。

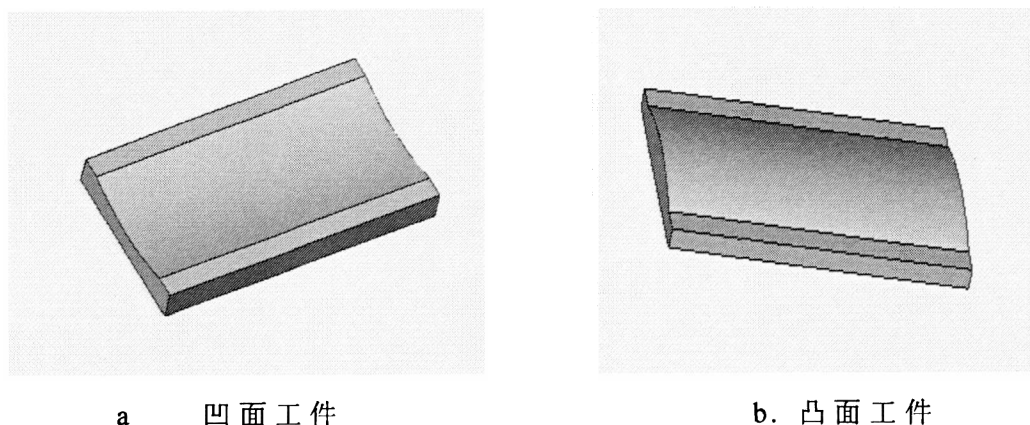


图 5-1 凹凸曲面的工件 CAD 模型

Fig.5-1 Model of workpiece with concave and convex surface

图 5-3 是在其它研磨参数不变, 只改变励磁电流的条件下得到的实验结果。

由图 5-2、图 5-3 可知, 同平面的磁性研磨一样, 在一定范围内, 随着加工区域磁感应强度(励磁电流)的增强, 工件表面粗糙度下降。在励磁电流增大到 $2.5A$ 后, 工作的表面粗糙度不再因励磁电流的增大而减小。励磁电流在 $2.0A$ 以下时, 工件表面粗糙度随着励磁电流的增加, 下降得比较快; 在励磁电流增大到 $2A$ 以上后, 工件表面粗糙度随励磁电流的增大, 下降得比较慢, 并逐渐趋于平缓, 励磁电流增大到 $2.5A$ 后, 工件表面粗糙度基本不再减小。这是由于磁感应强度较弱时, 磁场保持力小, 研磨

压力也较小，对工件的加工效果较差。随着磁感应强度增加，磁场保持力增大，研磨压力增大，去除能力增强，表面粗糙度值降低随之加快。

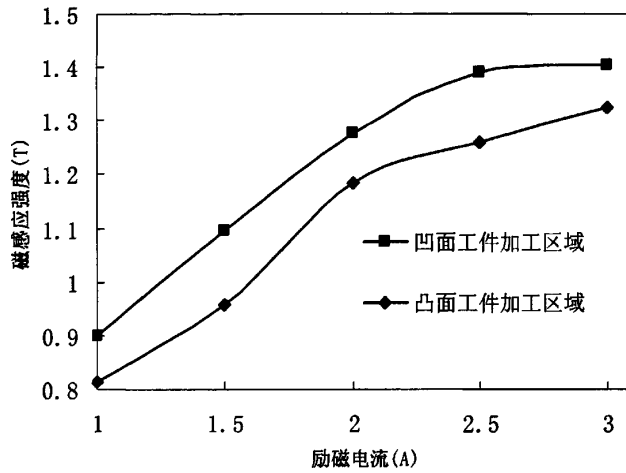


图 5-2 励磁电流与磁感应强度的关系

Fig. 5-2 Relationship between electric current and magnetic flux density

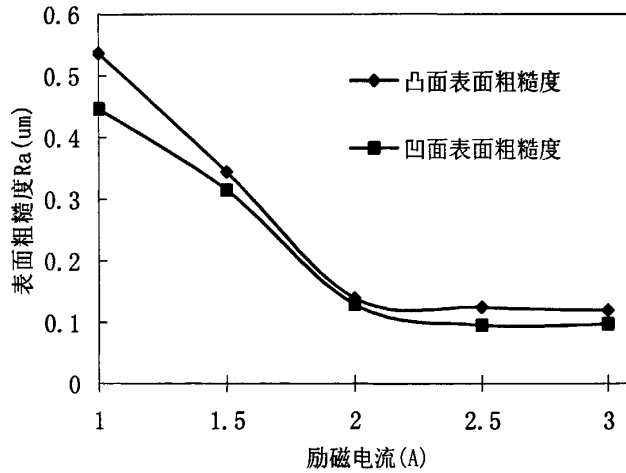


图 5-3 励磁电流对曲面表面粗糙度的影响

Fig.5-3 Effects of electric current on surface roughness

由图 5-2 结合图 5-3 可知，对于凹面工件加工区域的磁感应强度在 $B=1.3T$ 左右可以获得较好的工件表面粗糙度；对于凸面工件加工区域的磁感应强度在 $B=1.2T$ 左右可以获得较好的工件表面粗糙度。

2) 加工间隙的影响 加工间隙是指球形磁极端面顶点垂直到工件表面之间的距离。在其它实验参数不变的情况下，改变加工间隙进行磁性研磨加工实验，得到了如图 5-4 所示的实验结果。由图 5-4 可以看到，无论是凹或凸的工件在加工间隙为 $1.0\sim 2.0mm$ 时，表面粗糙度都随加工间隙的增大而增大，但增大得比较慢。而加工间隙从 $2.0mm$ 增大到 $2.5mm$ 时，工件表面粗糙度出现了比较大的增长。

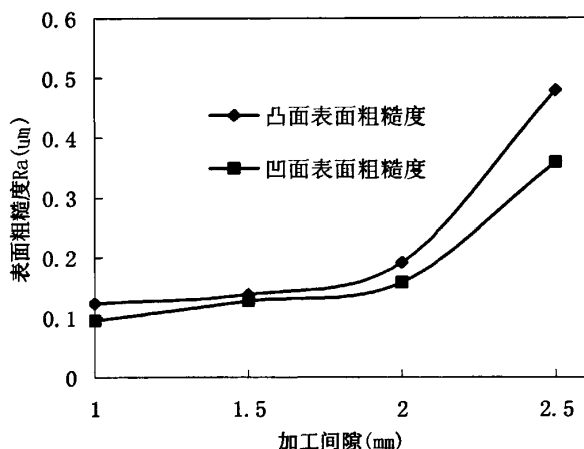


图 5-4 加工间隙对曲面表面粗糙度的影响

Fig.5-4 Effects of working clearance on surface roughness

在励磁电流为 $2.5A$ 时，将上海震宏 CTS -24 霍尔效应数字磁强计测头放于加工区域贴近工件表面处测量磁感应强度，测得加工区域磁感应强度分别在凹凸面工件加工状态下与加工间隙的关系如图 5-5 所示。由图 5-5 可见，随着加工间隙的增大，无论是在凹面工件加工区域还是在凸面加工区域，磁感应强度都随着加工间隙的增大而减小。加工间隙的大小，对于磁回路中的磁阻的大小有很密切的关系，随着加工间隙的增大，磁路中的磁阻增大，漏磁增大，磁感应强度变弱。

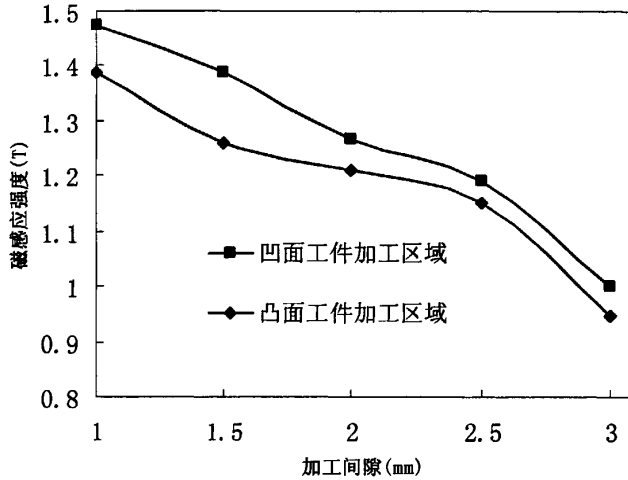


图 5-5 加工间隙对磁感应强度的影响

Fig.5-5 Effects of working clearance on magnetic flux density

结合图 5-4、5-5 可得出，在其它研磨实验条件给定的情况下，当加工间隙增大，磁感应强度减小，研磨压力随着变小，“磨料刷”对工件的磨削能力变弱，工件表面粗糙度改善变慢。当加工间隙过小时，工件表面又会因“磨料刷”的刚性过大而划伤。

因此，对于曲面工件磁性研磨合理的加工间隙在 $1.0\sim 1.5\text{mm}$ 范围较为合适。

3) 磁极转速的影响 本磁性研磨实验通过磁极带动磁性“磨料刷”旋转来实验对曲面的表面研抛，其加工效率一定程度上决定于磁极转速，理论上磁极转速越高，加工的效率越高，但磁极转速也不是越高越好，它同时受到工件形貌、磨料粒度、研磨液粘度、磁极形状、加工间隙、磁感应强度等多种因素的影响。在其它磁性研磨参数一定的情况下，对磁极转速进行实验研磨，结果如图 5-6 所示。

由图 5-6 可见，在磁极转速 $n=1000\sim 1500\text{r/min}$ 区间，随着磁极转速增大，工件表面粗糙度急速降低。继续提高磁极转速，表面粗糙度下降速率减小，当磁极转速 $n=2500\text{r/min}$ 时，曲面表面粗糙度值达到最小。根据磁性研磨加工机理可知，在一定转速范围内磁极转速加快，单位时间内

对于工件的微量切削和磨损增加，工件表面粗糙度改善加快。但当磁极转速增加到一定程度后，在离心力的作用下，磨料、研磨液会沿着磁极回转的切线方向飞出，磨削能力减弱，工作表面粗糙度改善减缓。

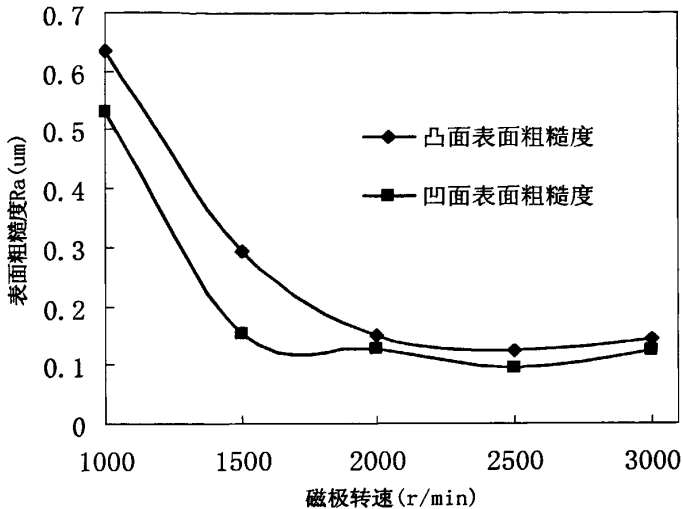


图 5-6 磁极转速对曲面表面粗糙度的影响

Fig.5-6 Effects of rotate speed on surface roughness

因此，磁极转速在 $2500r/min$ 左右可以使得凹凸曲面工件得到较好的工件表面粗糙度。

4) 加工往复次数的影响 在其它磁性研磨参数一定的情况下，对凹面和凸面的工件表面进行磁性研磨实验，得到凹、凸工件表面粗糙度与磁性研磨往复次数关系的变化曲线（如图 5-7）。

由图 5-7 可以看到，凹凸面的表面粗糙度在加工往复次数为 4 次之前，随着研磨次数的增加下降得比较快；而在往复研磨 4 次之后，工件表面粗糙度随着研磨次数的增加，减少得比较缓慢。

在磁性研磨加工往复 4 次内，由于尖端效应，工件表面凸峰处磁力线比较密集，这些凸峰单位面积上的研磨压力比较大，磁性磨粒在这些地方的切削作用比较强，因此工件表面粗糙度在此段时间内表面粗糙度急速下降。随着工件表面凸峰的下降，这些地方的单位面积研磨压力减小，磨粒切削作用较之前减弱，在这段时间（4 次~8 次）内工件表面粗

糙度下降比较缓慢。

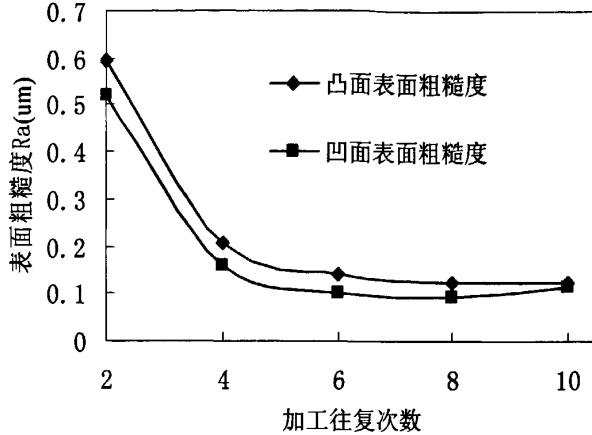


图 5-7 加工次数对曲面表面粗糙度的影响

Fig.5-7 Effects of finishing time on surface roughness

研磨往复次数继续增加，工件表面凸峰被基本磨平，切削作用变弱，磨料对工件表面的挤压、抛光开始占主导地位，故这段时间（8次~10次）内，工件表面粗糙度变化甚微，当工件表面粗糙度降到一定程度后，基本上不再随研磨的往复次数的增加而降低。

由图 5-7 可知，曲面工件表面在经过 6 到 8 次的往复研磨后，可以达到比较好的表面粗糙度。

5) 磁性研磨加工实验验证 根据以上实验结果，在其它研磨参数不变，励磁电流为 $2.5A$ ，加工间隙为 $1.0min$ ，磁极转速为 $2500r/min$ ，加工往复次数为 8 次的情况下进行磁性研磨实验，工件加工前与加工后的表面轮廓运用 Talysurf CLI 500 型三维表面测量仪进行扫描，结果如图 5-8 所示。

在以上凹、凸面不同工艺参数的磁性研磨实验中，凸面工件的表面粗糙度基本上都大于同等条件下的凹面工件表面粗糙度。这是由于一方面，具有导磁性的凹面工件对于电磁感应器磁极的包络使得其能在相同的励磁电流下，比凸面工件更大地增强加工区域的磁感应强度，从而导致了在研磨过程中，凹面研磨压力大于凸面的研磨压力，凹面工件表面的切削力大于凸面工件表面的切削力，因此使得凹面工件的表面粗糙度

改善得比凸面工件的表面粗糙度快。另一方面，凹面工件由于工件形状的优势比凸面工件更能克服磁极高速转动而产生的离心力，有利于保持住磁性磨料和研磨液，这使得凹面工件表面的“磨料刷”浓度高于凸面工件，且凹面工件表面的氧化膜形成速度也较凸面工件快。最终使得在其它条件相同的情况下，凹面工件的表面粗糙度低于凸面工件的表面粗糙度。

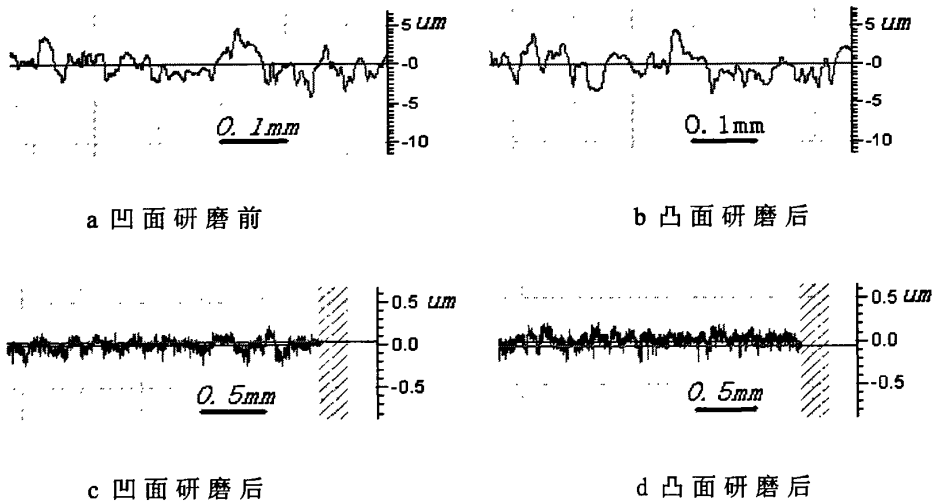


图 5-8 工件表面轮廓

Fig.5-8 Surface profiles of workpiece

5.2 模具曲面的磁性研磨实验研究

5.2.1 模具磁性研磨

目前复杂模型腔表面的精加工，仍不能实现全自动化研抛光整加工。主要依靠技术熟练工人手工完成。因此研究开发自动化研磨加工设备一直是模具加工技术探索的问题。

图 5-9 是采用数控雕刻机加工出来的凹模具、凸模具，材料为 45 钢，加工后的工件表面粗糙度为 $1.1 \mu m$ 左右。试验参数如表 5 所示，试验以循环的方式进行，对模具表面进行连续 3 遍的加工。加工后对模具表面

粗糙度进行了测量，模具表面粗糙度可达到 $0.25\mu\text{m}$ 。但模具表面各区域的粗糙存在着明显的差异。

表 5-2 磁性研磨加工实验参数

Table.5-2 Experimental parameter of magnetic abrasive finishing

工件材料	45 钢
加工面	凹面、凸面
工具磁极	锥形球头，铁芯直径 20mm ，端部直径 15mm
磁极转速	$2500\text{r}/\text{min}$
加工间隙	1.2mm
励磁电流	2.5A
进给速度	$0.060\text{m}/\text{min}$
加工往复次数	3 次
磨料	粘结磁性磨料 100 目
研磨液	油酸

5.2.2 模具曲面研磨分析

1) 模具曲面研磨量分析 在磁性研磨加工中，影响研磨效果的因素很多，如磁性磨料、磁感应强度、加工间隙、加工时间、磁极转速、加工轨迹等，其中大部分影响因素对曲面研磨和平面研磨的影响规律基本相同。但是，曲面数字化磁性研磨加工也有其自身的不同特点，其中，不同曲面区域的研磨量不均匀是最主要的问题之一^[32-37]。

本实验对于模具的磁性研磨是采用三轴数控磁性研磨机床进行研磨加工。对于倾斜角和曲率不断变化的模具曲面，在其它条件一定的情况下，虽然采用了相同的加工间隙，倾斜面及曲面上各点的研磨效果也不相同，不同点的研磨量存在差异。由于模具曲面各点倾斜角不断地变化，研磨量不均匀，在倾斜角较小的点（如图 5-9（b）A 点），研磨轨迹和研磨量分布均匀，研磨量较大。而随着倾斜角的增大，研磨量也会随着减小，在图 5-9（b）的 B 点处研磨量达到了最小。

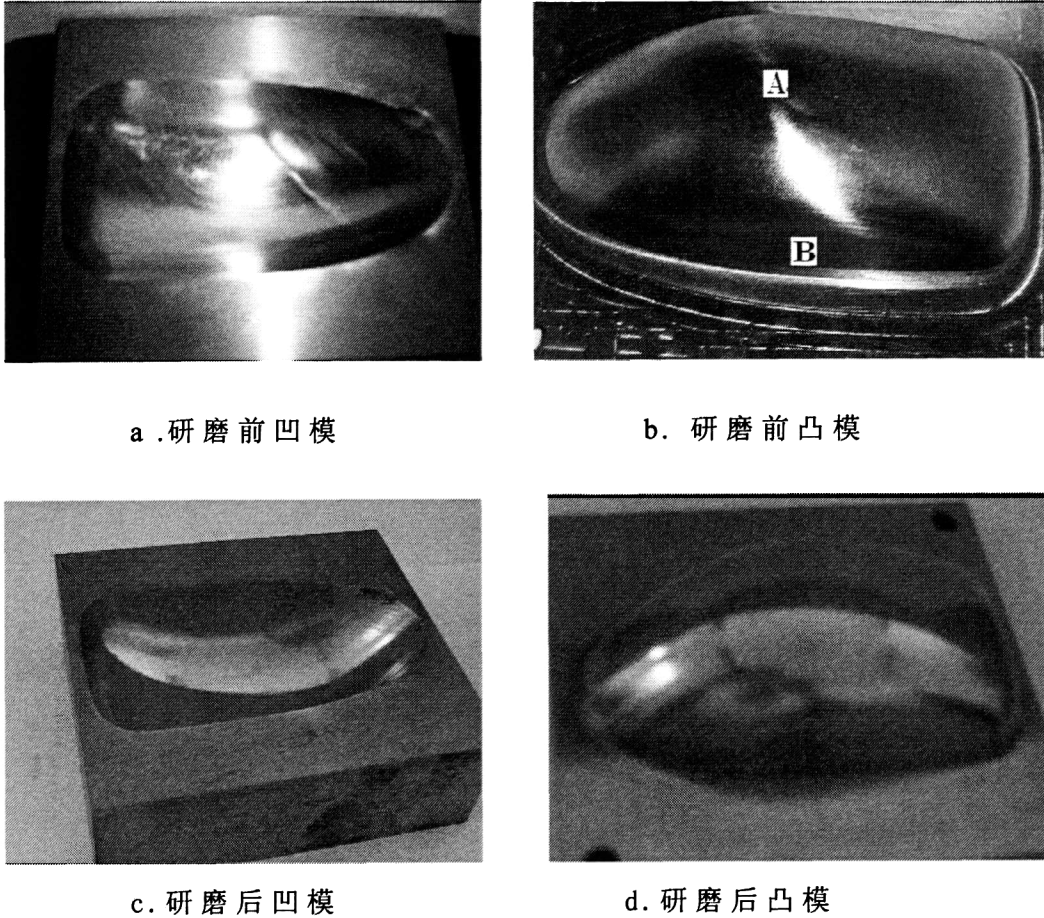


图 5-9 凹凸模具

Fig.5-9 Photograph of concave and convex mould

造成这一现象的原因是：在曲面磁性研磨加工中，在加工曲面刀触点的法线方向上，磁极与工件表面的距离最近，磁力线的分布最密集，磁感应强度也最大，而两侧的磁力线分布则较稀疏，磁感应强度也较小，从而形成了较大的磁场梯度，使位于两侧的磁性磨料在磁力作用下向中间区域集中，造成大量磁性磨粒滞留在磁极与工件之间强磁场区的现象（如图 5-10 所示）。这使得磁极反倒成了加工对象，并对于磁极造成较大磨损。尽管磁极对磁粒的吸引作用会产生一定的工作压力，磨粒与工件表面作相对运动时还会产生一定的摩擦力，但这并不足以克服磁场对磁粒的作用力。随着刀触点法线与磁极回转轴线之间夹角的增大，磁性磨料的滞留及磁极的磨损都将进一步加剧，金属去除量大幅度降低，倾斜

角越来越大，研磨作用也越来越小，以至完全失去研磨效果。

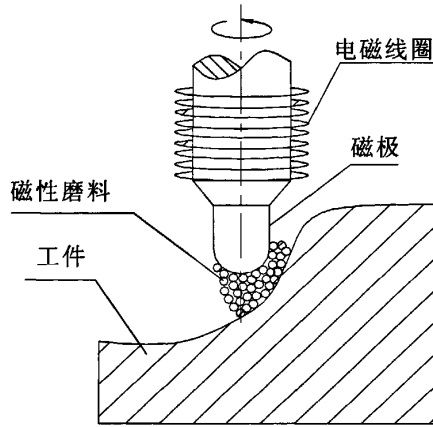


图 5-10 磁性磨料滞留现象

Fig.5-10 Schematic of resort phenomenon about magnetic abrasives

2) 研磨轨迹对曲面研磨量的影响 磁性研磨加工时，研磨运动轨迹应能保证工件加工表面和工具磁极表面上各点均有相同（或相近）的被切削条件和切削条件，工具磁极的运动应保证工件上各点均有相同（或相近）的研磨行程，磁极工具的运动轨迹应不断地、有规律地改变方向，尽可能不出现研磨轨迹周期性重复的情况，这样可使工件表面上的无数切削条痕有规律地相互交错，越研越平，达到提高工件表面精度的目的。研磨运动的轨迹应力求平稳、避免曲率过大的转角、研磨工具的局部剧烈磨损，保证研磨工具磨损均匀，以使研磨工具保持精确的几何形状^[32~36]。常规的研磨运动轨迹主要包括直线、正弦曲线、次摆线、外摆线、内摆线、椭圆线轨迹等。但对于复杂的模具型腔曲面，研磨运动轨迹也要复杂得多。较理想的研磨运动轨迹应满足切削行间距分布均匀、表面粗糙度一致、加工误差小且一致、走刀步长分布合理、加工效率高加工要求。目前在模具曲面的研磨加工中，通常采用之字形的直线运动轨迹。但是，复杂模具表面一般是由具有不同倾斜角的曲面构成，即使不考虑倾斜角对工作间隙的影响，采用之字形的直线运动轨迹（也包括其它加工运动轨迹）也很难真正实现等粗糙度加工，研磨量均匀性的问题也难

以得到解决。

5.2.3 模具曲面研磨量均匀性探讨

1) 工具磁极表面结构形式的优化设计 通过大量的实验^[38]发现, 在球头磁极的表面上开出沟槽结构, 不仅可提高加工效率, 而且可以减少加工面倾斜角对加工效率的影响。

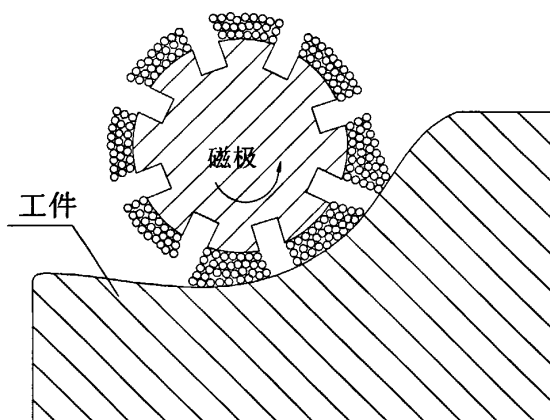


图 5-11 开槽磁极磨料分布

Fig.5-11 Schematic of magnetic abrasives distribution on magnetic pole with crossing grooves

磁性研磨加工中, 磨料对工件表面产生研磨抛光作用需要两个有条件: 第一是磁性磨粒对工件有一定的正压力, 第二是压在工件表面的磁性磨粒要与工件表面之间存在相对运动。因此, 磁性磨粒必须受到工具磁极圆周力的作用, 才能跟随磁极一起旋转, 实现对工件的切削加工。否则磁粒就会滞留在工件表面, 虽然对于工件表面有正压力, 但不会对工件表面产生切削作用。

在工具磁极表面开槽, 可以使工件加工区域的磁场形成磁场梯度, 磁极与工件之间的间隙出现了大小变化, 间隙大的部位磁阻大, 磁场强度减弱, 间隙小的部位磁场强度得到加强, 磁场的强弱变化, 使得磁性

磨粒受到向磁极表面不开槽部位集中的力，于是在磁极的表面上就形成了几个磁性“磨料刷”（其截面如图5-11所示）。在磁极的周向磁场强弱变化所产生的磁作用力，就成为了磁性磨料跟随磁极旋转的驱动力。这可在一定程度克服了由加工面倾斜角所引发的磁性磨料滞留问题，并提高研磨量均匀性。

2) 磁性研磨运动轨迹规划 磁性研磨过程实际上就是磨粒对工件表面进行切削的过程，磨粒的运动状况将直接影响研磨的加工精度、生产效率，合理地选择运动方式和加工轨迹对磁性研磨是极为重要的。

虽然应用磁性研磨轨迹很难实现真正模具曲面的等粗糙度加工，但是可以对曲面区域进行分解，对不同区域选择合理的运动轨迹和工作间隙。在实际研磨中，首先选择合适的研磨运动轨迹，如果为普通模具表面，就只要采取普通的直线型运动轨迹，选择合适的走刀和跨距方向，然后对曲面进行倾斜度分析和曲率分析，根据研磨的经验确定合理的几个倾斜度区域。接着根据平缓程度确定其平均的研磨间隙，平缓区域采取较大的间隙，陡壁区域采取较小的间隙。以图5-8所示的模具为例，对像图5-8的A点平缓区域，采取常规的投影图形方式，对于如图5-8的B点陡壁区域，可通过采用改变走刀方向等方法对这部分进行局部投影加工来进行研磨，或采用等高线加工方法进行研磨加工。也可以设法使工具磁极的旋转中心与工件曲率法线方向重合，这样就能保证旋转中心与磁力线方向相同。也就是说设法使工具磁极能随着工件表面曲率的变化自动可调，始终与工件曲率法线方向一致。

5.3 本章小结

本章首先对凹凸工件表面进行磁性研磨实验。重点把加工区域的磁感应强度,加工间隙,磁极转速以及加工往复次数作为主要影响参数,进行磁性研磨加工实验研究,得出的结果归纳如下:

(1) 磁感应强度: 对于凹面工件加工区域的磁感应强度在 $B=1.3T$ 左右可以获得较好的工件表面粗糙度; 对于凸面工件加工区域的磁感应强度在 $B=1.2T$ 左右可以获得较好的工件表面粗糙度。

(2) 加工间隙：对于曲面工件磁性研磨较合理的加工间隙在 $1.0\sim 1.5\text{mm}$ 范围内。

(3) 磁极转速：磁极转速在 $2500\text{r}/\text{min}$ 左右可以使得凹凸曲面工件得到较好的工件表面粗糙度。

(4) 往复加工次数：曲面工件表面在经过 6 到 8 次的往复研磨后，可以达到比较好的表面粗糙度。

(5) 凹面工件的表面粗糙度在以上几个工艺参数的实验中总低于凸面工件的表面粗糙度。这是因为在其它研磨条件相同的情况下，凹面工件可以获得高于凸面工件的磁感应强度，并且由于其形状的原因，可以更好地保持住磁性磨料和研磨液。

接着对凹、凸模具进行磁性研磨实验，对模具的曲面研磨量及研磨轨迹进行分析，并对模具曲面研磨量均匀性进行了初步和探讨。提出通过优化磁极结构设计及研磨轨迹来获得较为均匀的曲面研磨量。

总结与展望

在模具加工过程中光整加工作为最后一道工序，直接决定着模具表面粗糙度的大小，是影响模具质量好坏的最重要的一环，但迄今为止，其精加工仍然大部分停留在手工加工方式上，不仅劳动强度大、产品质量差，而且加工效率低。为了解决这一难题，本文基于数控技术以及磁性研磨柔性好、自锐性、自适应性强等加工特点，对于磁性研磨加工技术进行了较为深入的研究和探索。主要工作总结如下：

(1) 采用工程电磁场有限元分析软件 Maxwell 对电磁感应器进行辅助设计，并对电磁感应器所产生的磁场进行了分析。特别对电磁铁芯直径、磁极工具形状、电磁铁芯悬伸量、加工区域磁场分布、励磁电流和加工间隙对于加工区域磁感应强度的影响进行了较为深入的仿真分析，并对电磁仿真分析进行了实验验证。为如何进行电磁感应器的设计从而提高加工效率，提供了理论设计分析方法。

(2) 利用数控机床设计改装了实验所需的磁性研磨装置。在该装置中，加工区域的磁场由电磁感应线圈产生，同时通过外部直流电源控制电磁感应线圈输入电流的大小，实现了磁性研磨加工中磁感应强度可变性和可控性。

(3) 对于加工状态下的磁性磨料受力状态进行了分析，研究了磁性磨粒的磨削机理，为进一步的平面、简单曲面及模具曲面的磁性研磨加工研究打下了基础。

(4) 采用混合磨料对工件平面进行了磁性研磨正交实验，得出了各个因子的最优水平，并从极差的大小判断了各个因子对于工件表面粗糙度影响的主次，主次顺序依次为加工间隙、加工时间、磁极转速、励磁电流、白刚玉与还原铁粉质量比和进给速度。

(5) 采用粘结磨料对工件平面进行磁性研磨工艺实验，得到：在一定实验条件下，磁感应强度在 $B=1.2\sim 1.4T$ 左右、加工间隙为 $1.2mm$ 、磁极转速在 $2500r/min$ 左右、平面工件表面在经过 $4min$ 的研磨后可以获得比

较好的工件表面粗糙度。

(6) 对凹、凸面工件表面进行磁性研磨实验分析, 得到: 在一定实验条件下, 磁感应强度在 $B=1.2\sim 1.3T$ 左右、加工间隙为 $1.0\sim 1.5mm$ 、磁极转速在 $2500r/min$ 左右、工件表面在经过 6~8 次的往复研磨加工后可以获得比较好的工件表面粗糙度。凹面工件在相同的研磨加工条件下, 获得了好于凸面工件的表面粗糙度。

(7) 对凹凸模具进行磁性研磨实验及分析。对于曲面研磨量的不均匀性, 提出优化工具磁极结构及磁极工具研磨轨迹, 来加以改善。

磁性研磨加工技术作为一种新的研抛技术, 虽然国内外都已经做了不少的研究, 也已有一定的应用, 但磁性研磨要想进入到广泛实际应用的阶段, 还需要不断地改进和完善, 在理论和实验方面也还有许多工作要做:

(1) 在电磁感应器方面: 对因电磁线圈导线电阻和涡流效应引起的发热进行更加适当的冷却, 以使研磨过程中磁感应强度不受线圈发热而降低的影响, 可以进行更长时间的研磨加工; 如何克服由于铁芯悬伸量的增加而磁感应强度减小的问题; 如何在不削弱磁极磁感应强度的情况下使磁极更加耐磨, 保持磁极形状精度。

(2) 磁性研磨磁场的深入研究。根据磁学理论可知, 在加工区域内的磁性磨料受到磁场的作用, 按磁力线方向排列成“磁串”。由磁力线特性可知, 每根磁力线又产生相互排斥的作用力, 这种作用力必然对工件研磨加工产生一定的影响。且在研磨加工中, 磁性磨料由于与磁极是非刚性接触, 所以磁性磨料不可能与磁极具有相同的转速, 其分层运动对于研磨加工效果具有不可小视的影响, 可以断定磁性研磨加工机理决非简单的一定压力下的切削作用。因此有必要在磁性研磨加工的磁场内进行更为深入的研磨加工机理研究。

(3) 磁性磨料的继续研究开发。目前国内外制作的磁性磨料存在制作成本较高、使用寿命短、研磨效率低等问题, 仍然无法很好地满足磁性研磨需要, 这也很大程度上制约了磁性研磨技术的发展。因此还需要继续对磁性磨料进行研究, 力求降低制造成本, 提高使用寿命, 增强磨削能力。

(4) 磁性研磨加工工艺研究。磁性研磨不仅受到工件材质的影响，也受到工件形状尺寸的制约。对不同位置角度、不同曲率的表面，其研磨规律都有所不同，必须对其进行更为深入的研究，以求在不破坏工件原有精度的基础上取得均匀的表面粗糙度。

(5) 磁性研磨技术与数控技术的结合，这将成为磁性研磨发展的标志性技术。改进磁性研磨装置使其适合于不同结构曲面的研磨加工；如何实现对工件曲面进行测量及数据处理；在磁性研磨加工过程中实现曲面研磨的完全自动化，通过数控技术使工具磁极能随着工件表面曲率的变化自动可调，始终与工件曲率法线方向一致，以求更好地实现磁极工具对复杂曲面的研磨。

参考文献

- [1] <http://www.51report.com/research/detail/51612822.html>.
- [2] 文秀兰等编著.超精密加工技术与设备[M].北京:化学工业出版社, 2006.3.
- [3] 陈锡栋.模具精饰加工及表面强化技术[M].北京:机械工业出版社,1999.10.
- [4] T.Shinmura, Development of spindle-finish type finishing apparatus and its finishing performance using a magnetic abrasive machining process[J].JSPE,1986 (2):79-84.
- [5] T.Shinmura, Development of a Unit System Magnetic Abrasive Finishing Apparatus using permanent Magnets [J].Bull. Japan Soc. Of Prec. Engg. 1989(4):313~315.
- [6] HitomiYamamuchi, Takeo.Shinmura. Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system Discussion of the characteristic abrasive behavior [J]. Precision Engineering 24(2000): 237~244.
- [7] Jenong-Du Kim, Youn-Hee Kang, Young-Han Bee. Development of a magnetic abrasive of jet machining system for précising internal polishing of circular tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology. 1997(7), P384~393.
- [8] Dharendra K.Singh, V. K. Jian ,V.Raghuram,R.Komanduri. Analysis of surface texture generated by a flexible magnetic abrasive brush [J]. Wear 259 (2005) 1254~1261.
- [9] V.K. Jain, Prashant Kumar etc. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process [J]. Wear 250 (2001) 384~390.
- [10] M.Tsuchimoto, K.Demachi,I.Itoh. Numerical evaluation of uniform

- magnetic field within superconducting Swiss roll [J].Physical C412-414(2004):719~722.
- [11] A.G.Mamalis, D.EManolakos, A.G.Kladas, A.K.Koumoutsos. Physical principles of electromagnetic forming process: a constitutive finite element model [J].Journal of Materials Processing Technology 161(2005):294~299.
- [12] Shaohui Yin, Takeo Shinmura. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy [J].International Journal of Machine Tools & Manufacture 44(2004):1297~ 1303.
- [13] 金东燮, 张国林.磁力研磨过程的研究.机械工程师[J].1986年增刊.
- [14] 金东燮, 张国林.磁力研磨加工及其性能[J].电加工.1989(9).
- [15] 金东燮, 张国林.电解磁力研磨技术的开发及其机理的研究[J].磨料磨具与磨削.1993(2).
- [16] 杨曙光.磁力研磨法的应用[J].航空精密制造技术.1993(2).
- [17] 王振宁, 张学良.数控铣床磁力研磨加工的研究[J].机械加工与自动化.2002(4).
- [18] 李益民.磁力研磨法的原理及应用[J].机械工艺师.199D(12).
- [19] 李益民等.阀芯棱边去毛刺的控制与磁力研磨去除法[J].磨料磨具 y 磨削.1991(2).
- [20] 王翔.磁性研磨机理及工艺研究[D].长春光学精密机械学院硕士学位论文, 1993.
- [21] 赵玉刚, 江世成, 周锦进.新型的复杂曲面磁力光整加工机床[J].机械工程学报.2000(3).
- [22] 方建成, 金沫吉、徐文骥等.旋转磁场磁力光整加工研究[J].中国机械工程.2001(11)
- [23] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权.磁力研磨在模具型腔精加工的应用[J].模具工业.2003(1).
- [24] 肖作义.磁力研磨光整加工技术的实验研究[J].模具工业,2004.NO.12总 286:47~50.
- [25] 陈红玲, 张银喜.磁性磨料磨粒的磨削机理研究[J].太原理工大学学

- 报.第 31 卷第五期: 562~565.
- [26] 陈红玲 张银喜.磁性研磨加工工艺参数的实验研究[J].太原理工大学学报.第 33 卷第 1 期:16~18.
- [27] 劳塞尔 DA,席尔凡斯特 PP,电磁装置计算机辅助设计,唐任远 译[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [28] 付文智,李明哲,邓玉山.直流电磁铁磁场和牵引力的数值模拟[J].农业机械学报,2005 年 2 月,第 36 卷第 2 期:100~103.
- [29] 肖作义.磁力研磨加工参数的定量分析[J].现代制造工程,2004,(12):61~63.
- [30] 孟庆涛,徐文骥.磁力研磨加工实验研究[D].大连理工大学硕士学位论文.2006.12.
- [31] <http://www.zgbfw.com/offer/offerdetail.aspx?ID=345858>.
- [32] 袁哲俊.金属切削实验技术.北京:机械工业出版社, 1987.
- [33] 张鹏,陈元芳,刘春. 模具曲面数字化磁力研磨加工中研磨量的控制方法[J].工具技术, 2005 年第 39 卷 No7:33-36.
- [34] 冯宝富,蔡光起,孙奕澎.自由曲面模具磁力研磨的试验研究.吉林化工学院学报[J].第 22 卷第 2 期 2005 年 4 月:56~58.
- [35] 孙奕澎,蔡起光.基于五自由度并联机床的曲面磁力研磨研究[D].东北大学博士学位论文.2004.02
- [36] 王兴祥,张银喜.基于自由曲面磁性研磨永磁磁极头开发与实验研究[D].太原理工大学硕士学位论文.2003.04.
- [37] 徐立军,王文,陈子辰.曲面数字化磁力研磨加工技术基础研究[D].浙江大学硕士学位论文.2004.02.
- [38] 赵玉刚.磁粒光整加工技术与复杂曲面数字化仿形磁粒光整加工系统的研究[D],大连理工大学博士学位论文,大连,1998.5.
- [39] 邱腾雄,阎秋生,高伟强等.磁力研磨加工表面粗糙度特性研究[J].机电工程技术,2007 年第 36 卷第 12 期:25~27.
- [40] 陈显文,白万民.磁力研磨加工的研究[D].西安工业学院硕士学位论文.2005.03.
- [41] 花凤超,张树仁.磁力研磨实验研究[D].长春理工大学硕士学位论文

文.2003.12.

- [42] T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima. Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism [J]. Journal of Materials Processing Technology 143-144 (2003) 682~686.
- [43] Shaohui Yin, Takeo Shinmura. A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 383~390.
- [44] Yan Wang, Dejin Hu. Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 43~49.
- [45] S.C.Jayswal, V.K.Jain and P.M.Dixit. Magnetic abrasive finishing process-a parametric analysis [J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems Vol. 4, No. 2 (2005) 131~150.
- [46] HitomiYamamuchi, Takeo.Shinmura. Study of the surface modification resulting from an internal magnetic abrasive finishing process [J]. Wear (1999) 246~255.
- [47] HitomiYamamuchi, Takeo.Shinmura. Maki Takenaga, Development of a new precision internal machining process using an alternating magnetic field [J]. Precision Engineering 27 (2003) 51~58.
- [48] HitomiYamamuchi, Takeo.Shinmura. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process [J]. Precision Engineering 28 (2004) 135~142.
- [49] Y. M. Baron, S-L. Ko and J.I. Park. Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring [J]. Key Engineering Materials Vols. 291-292 (2005) pp. 291~296.
- [50] J.C. Fang, W.J.Xu, Z.J.Jin, G.J.Bi and J.J.Zhou. Magnetic Abrasive Finishing of Non-ferromagnetic Tube [J]. Key Engineering Materials Vols. 259-260 (2004) pp. 530~534.
- [51] 申奎东, 张国泽等.磁性研磨加工的磁路及电磁线圈计算[J].煤矿机

- 械,2004年第1期:25~27.
- [52] 肖作义.混合型磁性磨料在磁力研磨加工中的应用[J].模具工业,2005.NO.1总287:50~53.
- [53] 时立民,陈玉全,王俊.关砚聪.磁力电解机械复合抛光不锈钢模具的研究[J].哈尔滨理工大学学报, Vol.7 No.5 Oct.2002: 73~75.
- [54] 陈显文,白万民,朱镛,方舟.磁力研磨机理及研磨装置设计的研究[J].Vol. 24No.4 Dec.2004: 340~343.
- [55] 吉晓丹,周兆元,贾向义.磁性研磨机的两种电磁感应器[J].机床与液压, 2005.No.4: 74~75.
- [56] 曹师今,付生利,张琦.在磁力研磨中采用永磁铁磁路的研究[J].Dec.2003 Vol.15 No.4: 62~64.
- [57] 王艳,胡德金.磁性磨粒的磨削机理与制备工艺[J].工具技术, 2003年第37卷 No.6: 32~34.
- [58] 郭燕莹,张银喜.磁性研磨的加工特性[J].太原工业大学学报, Vol.28 No.3 Sep.1997: 92~95.
- [59] 叶旭明,贾向义,陈敏.铣床改装的磁性研磨机[J].现代机械, 2003年第3期: 75~76.
- [60] 贾向义,陈敏,陆程.在立式铣床上改装磁性研磨装置[J].机床与液压, 2003.No. 4: 316~317.
- [61] 姚新改,景毅,张银喜.用强永磁磁极实现磁性研磨的研究[J].太原理工大学学报, Vol. 35 No. 6 Nov. 2004: 655~657.
- [62] 奕斌,袁桂芳,马强.自由曲面磁性研磨的研究[J].东北煤炭技术, No. 4 Aug 1999: 48~50.
- [63] 徐立军,王文,杨诚.磁力研磨加工技术综述[J].组合机床与自动化加工技术, 2003年第1期: 41~43.
- [64] 李长河,孙奕澎,蔡光起.自由磨粒复杂曲面磁力研磨光整加工试验研究[J].工艺与检测, 2005年第5期: 72~75.
- [65] 肖作义,赵玉刚,吴文权.数字化磁粒光整加工技术的数值模拟[J].机械设计与研究, Vol.19 No.5 Oct.2003: 50~53

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 邱腾雄, 阎秋生, 高伟强, 孟利, 磁力研磨加工表面粗糙度特性研究. 机电工程技术, 2007.12.
- [2] 孟利, 阎秋生, 高伟强, 邱腾雄, 粘结磁性磨料制备及其研抛加工研究. 机电工程技术, 2007.12.
- [3] Q. S. Yan, T.X. Qiu, W.Q. Gao, L. Meng. Simulation and Experimental Analysis of Electromagnetic Inductor for Magnetic Abrasive Finishing. Key Engineering Materials, in press.
- [4] 邱腾雄, 阎秋生, 高伟强, 磁力研磨加工塑料模具钢的表面粗糙度特性研究. 制造技术与机床, 2008.04.
- [5] 邱腾雄, 阎秋生, 高伟强, 周旭光, 戴珏, 曲面磁性研磨加工表面粗糙度特性研究. 金刚石与磨料磨具工程. (已录用)

致谢

三年来，导师阎秋生教授以其渊博的学术知识、严谨的治学态度和孜孜不倦的工作态度深深地影响着我，使我受益匪浅。而本文的各个部分更无不体现着导师对我的精心培育和悉心指导，值此论文完成之际，我谨对导师三年以来对我的理解、支持、关心、帮助、悉心指导及教诲致以最衷心的感谢。

本课题在研究的整个过程中，得到了高伟强副教授的全方位的指导，在课题的关键阶段更是得到了他的全心帮助，使得研究得以顺利开展，在此谨表衷心感谢！

非常感谢实验室的路家斌老师、李伟华老师、潘继生老师三年来在学习和生活上对我的指导与帮助。感谢广东工业大学实验中心的陈建平老师、傅春辉老师、白云学院的王执中老师对研究工作的多方面支持。感谢师兄唐振宇博士在课题开始阶段的指导。

感谢师兄孔令叶博士、周旭光博士对我课题和论文工作所做的大量帮助。感谢孟利同学在课题研究中与我共进退。感谢师兄毕非凡、赖院欣、丘永亮、冯建华、余娟，还有汤爱军、田虹、吴球红、罗伟欢同学在课题和生活上的热情关心和帮助。感谢师弟宋军辉、杨勇、刘毅、李三、蓝世有、宋玥给予的关心及帮助。感谢 07 届师弟的热心支持与帮助。

特别感谢我的家人、女友及亲戚朋友在各方面给予我的极大支持与鼓励。

纪念在“5.12”汶川大地震中罹难的苦难同胞，为坚强的民族自豪！

谨以此文作为九年之忌，献予我的父亲！

邱腾雄

2008 年 5 月 12 日于广州