

磁场辅助超精密光整加工技术

尹韶辉
著



湖南大学出版社
图书出版基金资助项目

湖南大学出版社



湖南大学出版社
图书出版基金资助项目

磁场辅助超精密光整加工技术

尹韶辉 著

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书是一部全面、系统地介绍磁场辅助超精密光整加工技术最新研究成果的专著，总结了作者近十多年来在该领域的研究成果，并介绍了该领域国际学术界的最新研究成果。内容主要包括磁力研磨加工、磁流变加工及其他磁场辅助光整加工技术，主要阐述了该技术的加工机理、加工设备、加工工艺及应用成果。

本书既可作为从事机械加工和光学制造的工程技术人员参考，也可作为高等院校制造类专业本科生和研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

磁场辅助超精密光整加工技术/尹韶辉著. —长沙: 湖南大学出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 81113 - 502 - 2

I. 磁... II. 尹... III. 超精加工

IV. TG506. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 009610 号

磁场辅助超精密光整加工技术

Cichang Fuzhu Chaojingmi Guangzheng Jiagong Jishu

作 者: 尹韶辉 著

责任编辑: 丁 莎

封面设计: 吴颖辉

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山

邮 编: 410082

电 话: 0731 - 88822559 (发行部), 88820008 (编辑室), 88821006 (出版部)

传 真: 0731 - 88649312 (发行部), 88822264 (总编室)

电子邮箱: dingsha008@126.com

网 址: <http://press.hnu.cn>

印 装: 长沙瑞和印务有限公司

开本: 787×1092 16 开

印张: 13

字数: 277 千

版次: 2009 年 7 月第 1 版

印次: 2009 年 7 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978 - 7 - 81113 - 502 - 2/TH · 23

定价: 32.00 元

版权所有，盗版必究
湖南大学版图书凡有印装差错，请与发行部联系

前 言

近二十年来,在现代制造技术领域里,超精密加工、特种加工技术以前所未有的速度向前发展,已成为现代微纳制造技术的重要组成部分。基于材料去除的超精密机械加工技术,已成为现代制造技术的一个重要组成部分,其产品涉及光学工程、通讯工程、国防、航空航天、计量检测、生物医学等多个领域,且正在向纳米精度级加工技术发展。超精密光整加工技术,不仅是学术界研究的前沿,也为产业界所急需,已被公认为是21世纪的前沿技术。21世纪初十年将是光整加工技术实现纳米加工的实用化并向微米精度级进军的关键十年。如何实现这一目的,人们除了对传统的光整加工方法、加工设备予以继续改良以形成各种微纳加工技术以外,还不断地探求新的特种光整加工技术。

回顾机械加工发展的历史,最初是采用刀具、砂轮等进行切削、磨削,主要利用的是机械能。后来在加工中遇到了难加工材料和复杂型面,或是为了追求加工效率,或是为了追求加工精度,人们把电场、化学场、激光等引入到加工之中,利用非机械能,如电能、化学能、光能、声能、热能等形成了所熟知的电火花加工、线切割加工、电解加工、激光加工、超声加工等。这些加工技术,由于主要不是利用机械能,而统归于“特种加工”之列。实际上这些技术已发展了半个多世纪,已经被广泛应用。大部分这些“特种加工”技术也在企业变为“普通加工”了。利用磁场的作用,把磁场引入到光整加工之中,就诞生了“磁场辅助光整加工技术”。

本书主要介绍作者近十多年来在国内外所从事的磁场辅助光整加工的研究成果,主要阐述磁力超精密研磨加工和磁流变纳米研磨技术的加工机理、加工设备、加工工艺及应用成果。同时介绍国内外在磁场辅助光整加工领域所取得的最新研究成果。全书分为十章,主要包括绪论、磁力研磨概述、磁力研磨机理、振动复合磁力研磨、磁力研磨加工的应用、磁性磨粒的开发、磁流变光整加工概述、磁流变光整加工机理、磁流变光整加工的应用、其他磁场辅助加工工艺等内容。

在磁场辅助加工技术的发展历程中,磁场的魅力吸引了一代又一代的学者、工程师从事该领域的研发工作。人们总在不断地思考利用磁场特有的功能,研发各种新的磁性磨粒、磁流变流体、磁流体、磁化工具来作为研抛工具,开发各种新的研磨方式,以形成新的磁场辅助光整加工工艺。近二十年来是磁场辅助光整加工工艺发展最快的时期,正是通过不断地创新形成了各种新的加工技术。著者深深感受到只有不断地自主创新才能推动我国在加工领域形成真正的原创技术。总结前人以及著者的研究成果,

一方面在于让读者对该领域的各种加工方法有本质的了解，能对读者的研究工作有所帮助，另一方面更为重要的是让读者也能感受到前人为研发新的技术而做出的艰辛努力，了解前人的创新方法和思路，以期将来能够发明和创造更多的新的加工方法。

著者幼时就对磁石有着浓厚的兴趣，在中学学习物理课程时就感觉到磁场的不可思议，后来从研究振动切削技术开始了自己的学术生涯，并逐渐感觉到特种加工、磁场辅助加工的魅力。接着有机会在海外做了多年这方面的工作，很想把这方面的积累和研究中的一些感想与同行们交流。加之学生们也经常请教，谈起各类文献都是日文、英文论文诸多，没有很好的中文著作，这才使我下决心整理这些年的研究所得，以期与同行和学生诸君共享。

在本书成稿之际，著者深深感谢恩师日本宇都宫大学的进村武男教授、日本理化研究所的大森整教授和华中科技大学的杨绪光教授。他们严谨的研究作风、敢于创新的勇气一直激励着著者在学术上努力上进。本书在编著过程中，博士生陈逢军、王宇、唐昆、朱科军，工程师胡天、周琼，硕士生陈越、唐贤炬、唐恒宁、曾宪良、李海峰等进行了大量的文字和附图的整理工作。对他们辛勤的劳动，在此一并表示衷心的感谢。并对资助本书出版的湖南大学出版社及各位编辑深表谢忱。最后深深感谢爱妻余艳红女士对著者多年学术生涯中所给予的大力支持和关爱。

书中的诸多加工机理探讨与结论还有待于将来的研究和实践中予以证明。书中存在的诸多不足之处，敬请读者多多批评指正，以期再版时予以订正、完善和提高。

著 者

2008 年春 于长沙岳麓山

目 次

第 1 章 绪 论

1.1 磁场辅助加工技术的发展	002
1.2 磁场辅助光整加工技术的分类	003
1.3 磁场辅助光整加工技术的地位	004

第 2 章 磁力研磨概述

2.1 磁力研磨原理	006
2.2 磁力研磨加工的发展历史	008
2.3 磁力研磨的特点	011
2.4 磁力研磨的应用领域及发展趋势	012

第 3 章 磁力研磨机理

3.1 磁力研磨的静力学分析	016
3.2 磁性磨粒的动力学分析	018
3.3 磁性磨粒的相对磁导率	020
3.4 磁力研磨的材料去除机理	021

第 4 章 振动复合磁力研磨

4.1 各种振动复合磁力研磨的提出及其加工装置的开发	028
4.2 X 方向振动复合磁力研磨的加工特性	035
4.3 Z 方向（法向方向）振动复合磁力研磨	046
4.4 椭圆振动复合磁力研磨	060

第 5 章 磁力研磨加工的应用

5.1 自由曲面的磁力研磨	077
5.2 内表面磁力研磨加工	086
5.3 磁力研磨去除毛刺	092

第 6 章 磁性磨粒的开发

6.1 磁性磨粒的性能要求和组成	102
6.2 磁性磨粒的制备技术	104
6.3 适合于金属磁性材料研磨的磁性磨粒的开发	108

第 7 章 磁流变光整加工(MRF)概述

7.1 磁流变加工原理	119
7.2 磁流变光整加工的发展历史	120
7.3 磁流变光整加工的特点	122
7.4 磁流变光整加工设备	123
7.5 应用领域及发展趋势	127

第 8 章 磁流变光整加工机理

8.1 磁流变液抛光原理	130
8.2 磁流变光整加工数学模型	135
8.3 磁流变光整加工的加工区	146

第 9 章 磁流变光整加工(MRF)的应用

9.1 CVD-SiC 平面反射镜的加工	156
9.2 硅球面反射镜的加工	162
9.3 BK7、BK13 玻璃球面透镜的加工	166
9.4 硅片加工	170
9.5 其他材料的加工	174
9.6 非球面的加工	176

第 10 章 其他磁场辅助加工工艺

10.1 磁流体浮体研磨	180
10.2 磁射流抛光	182
10.3 MAGIC 光整加工	187
10.4 磁性复合流体光整加工工艺	189
10.5 磁场辅助均匀压力抛光	192
10.6 磁粒喷洒加工	194

附 录

第1章 绪 论

随着光学、电子、通讯、航空航天、生物工程等高新产业的飞速发展,诸多复杂形状、难加工材料组成的元器件对超精密加工技术提出了更严格的要求。在传统的机械加工技术中,能够获得最低表面粗糙度的方法是光整加工工艺。所谓光整加工,是指被加工对象表面质量得到大幅度提高的同时,实现精度的稳定甚至提高加工精度等级的一种技术,是先进制造技术的一个重要组成部分。研磨、抛光是人类社会发展中最早的光整加工方法,同时也是最常用的制造光滑镜面的方法。传统的光整加工工艺主要有手工研磨、抛光、机械光整加工、超精加工等。但传统的光整加工技术在效率、精度、自动化以及所能适用的加工型面、加工材料等方面不能满足现代高科技产业发展的要求,于是就相应产生了以降低元件表面粗糙度、保持和提高形状精度为主要目标的非传统光整加工技术,主要有磁场辅助光整加工、离子束抛光、激光束抛光、化学抛光、电化学抛光、磨料流抛光、超声波研磨抛光、电泳研磨以及各种复合非传统光整加工技术(化学机械抛光、电化学复合光整加工、电火花超声波研磨等)。光整加工技术正是以提高零件表面质量、保持和提高形状精度作为出发点,经过光整加工的零件表面具有低的表面粗糙度和良好的表面微观几何形貌,不仅具有良好的外观质量,而且还有耐磨、防腐蚀和抗疲劳的效果,并同时获得较高的形状精度。

非传统光整加工工艺在很多难加工的场所具有明显的优势。因此研究和开发先进的非传统光整加工工艺,对促进现代制造技术的发展具有重要的意义。光整加工技术要解决的核心问题是表面质量,有时也有加工精度和生产效率的要求,它是实现从微米、亚微米加工技术向纳米级、皮米级加工技术发展的重要途径。传统的手工研磨、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,加工效率低。后来机械光整加工得到了迅速的发展,各国相继开发出多种形式的数控机床、机器人来替代手工作业,尤其是在模具行业得到广泛应用。但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、大型工件、微细内表面、微细凹面,实现光整加工难度更大,甚至无法加工。超声波抛光主要用于槽、缝、边角等人的手指难触及部位的抛光,这种抛光方式的加工效率较低。相比之下,化学、电化学抛光和电化学机械光整加工的加工效率则要高得多。由于这三种加工方式属于腐蚀和溶解加工,对材料的硬度、韧性和强度等几乎不受任何限制,目前已经在内、外圆柱表面的镜面加工中获得了应用。但由于影响加工的因素很多,难于控制,对环境和工人的健康也有一定程度的危害,其应用范围受到很大的制约,目前仅能应用于一些简单型面或小的复杂工件方面的光整加工。因此迫切需要开发新的特种光整加工工艺来解决这些难点。磁场辅助光整加工技术是一种有效的光整加工方法之一,这种加工方法具有高效率、高精度和高表面质量的特点,适合于内表面、球面、复杂型面的加工,并能通过误差补偿加工,提高加工精度。它可以很好地与数控机床、加工中心和机器人相结合,实现光整加工的自动化。因此,磁场辅助光整加工技术越来越被重视。

1.1 磁场辅助加工技术的发展

最早将磁场引入到光整加工之中,是由苏联工程师 Kargolow 在 1938 年提出的。他发明了“磁性磨粒研磨”(Magnetic Abrasive Finishing, MAF),在国内被称之为“磁力研磨”。上世纪 50 年代苏联的 Baron 发表了最早关于在磁场中利用磁性磨料加工研究的论文,随后保加利亚的 Mekedonski 和他的同事们展开了这方面的研究。80 年代日本研究人员展开了深入的研究,以宇都宫大学的 Shinmura、东北大学的 Kato、东京大学的 Nakagawa、日本工业大学的 Suzuki、日本理化学研究所的 Anzai 等人为代表。后来美国 Oklahoma 州立大学的 Komandury 等人也开始了有关研究工作。

在上世纪 80 年代,日本的 Imanaka、Kurobe、Tani、Uemehara 等人先后展开了磁流体研磨抛光的研究,将磁流体引入到光学加工技术之中,研发了各种磁流体光整加工技术(Magnetic fluid finishing, MFF)。1994 年, Uemehara 开发了一种“磁流体浮体研磨”的光学加工方法,这种方法通过在磁性液体中加入“浮体”,使整个“浮体”受力并与工件相接触来进行抛光,使抛光压力大大加强。

在上世纪 90 年代初,美国 Rochester 大学光学研究中心的 W. Kordonski, V. Prokhorov 等人在磁力研磨、磁流体研磨研究的基础上研发了磁流变加工技术(Magnetoreological Finishing, MRF),应用磁流变流体进行光整加工。它是一种基于流体动力学润滑理论的加工方法,并于 90 年代末将该项技术商业化。这种加工方法利用磁流变抛光液在磁场中的流变性进行加工,加工效率高,不产生亚表面损伤,备受世人青睐。该方法可在短短的几分钟内迅速使光学表面的面形精度收敛到 $1/20 \lambda$ (PV 值),表面粗糙度可达到 1 nm 以下。

在 90 年代末,日本的 Uemehara 又发明了一种利用磁场来制作磨削或研磨用的工

具,进行三维曲面的光整加工。同时,日本的 Kato、Shimada、Yongbo Wu 等人结合磁流体与磁流变流体的各自特点,研发了一种磁性复合流体的加工方法(Magneto Compound Finishing, MCF)。近几年,美国 QED 公司又开发了一种磁射流抛光工艺。韩国的研究者也开发了一种磁粒喷射加工工艺。

近十来年中,还出现了各种磁场辅助的复合加工工艺。将超声波加工与磁力研磨相结合形成超声磁力研磨,将电化学加工与磁力研磨相结合形成电化学磁力研磨,将电流变抛光与磁流变抛光相结合形成电磁流变抛光。著者将振动研磨与磁粒研磨相结合研发了振动辅助磁力研磨,同时把磁场辅助光整加工工艺与其他工艺进行组合形成新的工艺路线。著者将 ELID 镜面磨削与磁流变相结合进行超精密光学零部件的制造,也取得了较好的效果。

回顾磁场辅助光整加工技术的发展历程,可以看出,磁场的魅力吸引了一代代学者、工程师从事该领域的研发工作。人们总在不断的思考,利用磁场特有的功能,研发新的磁场辅助光整加工工艺。

1.2 磁场辅助光整加工技术的分类

磁场辅助光整加工与传统的切削、磨削等机械加工方法不同,通过外加磁场的作用,来实现光整加工。至今为止所出现的磁场辅助光整加工工艺,主要有磁力研磨(磁性研磨)、磁流体加工(磁性浮体抛光、复合磁流体加工)、磁流变加工、磁场辅助复合加工(磁场电化学磁粒复合抛光、磁辅助电化学加工、磁场辅助超声波加工、磁粒喷洒研磨加工)、磁化工具加工、磁射流加工等。

总体说来,根据其使用的工具的不同,可以分为两大类:一类是利用磁性磨粒的磁场辅助光整加工技术,另一类是利用非磁性磨粒的磁场辅助光整加工技术。

利用磁性磨粒的场合,通过外加磁场,直接作用于磁性磨粒,而形成研磨压力进行加工。磁力研磨工艺,主要以利用磁性磨粒的较多,可称之为“利用磁性磨粒的磁力研磨法”。

利用非磁性磨粒的场合,则必须添加除了非磁性磨料以外的磁性粒子或者添加磁流体、磁流变流体、复合流体等媒体,磁场通过这些媒体的作用,进而作用于非磁性磨料,使之能进行加工。采用非磁性磨粒和磁性粒子相混合,可称之为“利用非磁性磨粒的磁力研磨法”;采用磁流体的场合,称之为“磁流体研磨法”;采用磁流变流体的场合,称之为“磁流变加工”;采用复合流体的场合,称之为“复合磁流体加工”;利用磁场的作用来制作研抛工具等,称之为“磁化工具光整加工”。具体分类见表 1-1。

磁力研磨主要利用辅助磁场对高磁导率磁性磨料的超距作用、磁力线的物体透过现象、不均匀磁场分布而带来的磁力的作用、磁力结合的柔性研磨刷的作用来实现对工件表面精密研磨的加工方法,其实质是利用磁力结合的柔性研磨刷,通过磁场的作用而进行柔性加工。

表 1-1 磁场辅助光整加工技术的分类

磁 场 辅 助 光 整 加 工 技 术	种 类	加工方式	工 具
	磁力研磨（磁性研磨）	高速回转方式	磁性磨粒、混合磁性磨粒
		离心力利用方式	磁性磨粒、混合磁性磨粒
		旋转磁场方式	磁性磨粒、混合磁性磨粒
	磁流体研磨	磁性浮体抛光	磁流体
		复合磁流体加工	磁流体与磁流变液混合
	磁流变加工	旋转轮方式磁流变抛光	磁流变液
		磁射流加工	磁流变液
	磁场辅助复合加工	振动复合磁力研磨	磁性磨粒、混合磁性磨粒
		磁场辅助超声波加工	
		磁场电化学磁粒复合抛光	
		磁粒喷洒研磨加工	
		复合流体加工	磁流变液与磁流变液混合
	磁化工具加工	Magic 研抛	Magic 工具

磁流变研磨采用微米级的磁流变液（Magnetorheological Fluid），它是一种将磁性颗粒（微米级）分散于液体中当受外加磁场的作用而引起黏度增高的流体，具有流变性，响应速度极快（毫秒级），易控制等特点。当无磁场作用时，粒度悬浮在母液中随机分布，而施加作用场后，粒子表面出现极化现象形成偶极子，并沿磁场方向结成链状结构。链中相邻粒子间的吸引力随外加磁场强度增强而增加，当增值一定值时，流变体呈现固体特性，从而可以形成研磨工具。去掉外加磁场时磁性颗粒团簇随即解体而回复原状，具有流动性。基于此特点，可以实现其循环更新，保证研磨工具的稳定性。

磁流体研磨主要利用磁性流体中混合的非磁性磨粒在磁场的作用下的“上浮”原理，非磁性磨粒会上浮到流体表面，从而去除工件材料。

复合磁流体研磨则是利用磁流体和磁流变流体的优势，将两种流体及其他添加剂按比例混合，配制成智能复合型磁流体，使其具有磁流变流体与磁流体的优势，是一种相对磁流变液更微细、更稳定的复合性磁流体。即密度较大的微纳米级的径粒，较好的流变性能，高的屈服应力，更大的磁化压力和黏度，更好的稳定性，使用寿命更长，加工效率更高。

1.3 磁场辅助光整加工技术的地位

磁场辅助光整加工工艺，作为一种特种加工工艺，正在逐步得以推广应用。应该

说它是传统加工工艺的补充, 在一些特殊的场合发挥其独到的作用, 取得其特殊的加工效果。

现在磁力研磨的工业应用主要在复杂零件表面、内表面的光整加工、棱边倒角和去毛刺等方面。磁流体加工、磁流变光整加工技术目前主要应用在光学元件(球面非球面透镜、反射镜)、超精密硬质合金模具、硅片等光学、电子、通讯产品的加工之中。可以说磁流变光整加工技术是未来最具前途的光学超精密加工方法之一。

值得一提的是, 磁场辅助光整加工技术所用的工具具备柔性的特点, 便于误差补偿加工。实现高精度的加工, 一般基于两个原则, 一个是“母性原则”, 一个是“非母性原则”。“母性原则”指的是采用高精度的机床加工出高精度的产品, 基于这个原则, 人们不断开发高精度的机床、数控系统、刀具、夹具和高精度测量系统, 来实现高精度的加工。它的基本前提是, 机床精度必须比被加工零件的精度高。“非母性原则”的基本思想是, 采用低精度的机床加工出高精度的零件。所用的方法是, 采用特殊的工具和误差补偿加工的手段来加以实现。从成本的角度来考虑, “非母性原则”更具优势。磁场的引入为超精密加工技术提供了许多可以组合的新方法, 为微纳制造技术的低成本化提供了一种有效途径, 便于实现“非母性原则”加工。

第2章 磁力研磨概述

2.1 磁力研磨原理

磁力研磨 (Magnetic Abrasive Finishing, MAF) 的基本原理是利用磁场的作用, 将磁性磨粒吸引到一起, 形成磁力研磨刷, 在磁力研磨刷和工件间施加相对运动, 磁力研磨刷中的磁性磨粒将对工件表面产生滑动、滚动、切削等运动, 从而实现磁性磨粒对工件表面的研磨加工。

磁力研磨所使用的研磨工具——磁力研磨刷, 与传统的刚性工具不同, 它是由游离的磁性磨粒通过磁场的作用而形成的, 具有一定的柔性和粘弹性。在磁力研磨加工中, 磁性研磨刷能够随着工件形状的变化而变化, 因此不仅可以加工外圆、球面、平面等型面, 而且还可以加工自由曲面。在进行自由曲面加工时, 不需要像数控磨削或者数控研磨抛光那样严格的轨迹控制。由于磁力线具有像 X 射线那样的穿透作用, 可以对传统研磨工具无法伸入的内圆、内壁、微型凹槽面进行加工。

磁力研磨是将磁场效应与传统的研磨技术相结合而产生的一种新的工艺技术。磁力研磨可以定义为: 利用磁场将磁性磨粒按磁力线方向分布形成磁力研磨刷, 施加给工件与磁力研磨刷之间的相对运动 (如旋转、直线进给、振动等) 来达到去除材料的研磨技术。

下面以外圆磁力研磨为例来说明其加工原理。以铁基颗粒强磁性材料与磨料 (例如 Al_2O_3 , SiC) 等混合组成的磁性磨粒作为磨料, 工件表面与磁极留有几毫米的加工间隙, 将磁性磨粒填充到间隙。磁场作用在整个加工区内, 磁性磨粒被磁化后按磁力线方向排布形成磁力研磨刷。磁力研磨刷与加工工件产生相对运动进行研磨加工。这种磁力研磨刷具有一定的可塑性, 可以看作是介于固定磨料加工与游离磨料加工之间的一种加工方式。磁性磨粒在工件表面的运动状态通常有滑动、滚动、切削三种形式。当磁性磨粒在加工中受到的磁场力大于切削力时, 磁性磨粒处于正常的切削状态; 当

磁性磨粒受到的磁场力小于切削力时, 磁性磨粒则会产生滑动或滚动。

如图 2-1 所示, 将磁性磨粒放入磁场中, 磁性磨粒在磁场中将沿着磁力线方向有序地排列成磁力刷。把圆柱形工件放入 N-S 磁极之间, 并使工件相对 N 极和 S 极保持一定的距离。置于间隙内的磁性磨粒在磁场力的作用下, 磁性磨粒就会沿磁力线方向产生一个作用在工件上的垂直力 P_x , 其压力大小为:

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

式中: B ——加工区的磁通密度;

μ_0 ——真空磁导系数;

μ_m ——磁性磨粒相对磁导系数。

当工件对磁极作相对运动时, 磁性磨粒将对工件表面进行研磨。附在工件表面的磨料受工件旋转方向的切向力 P_y 作用, 将会出现磨料向切线方向飞散的趋势, 但磁极和工件之间生成的磁场是不均匀的, 在切线方向由于磁场强度产生了一个与 P_y 相反的磁力 F , 这个力的作用可以防止磨料向加工区域以外流动, 这样就保证了研磨工作的正常进行。影响磁力研磨的工艺参数包括磁场强度、磁极形状、工作间隙、磁极与工件相对运动速度、冷却液、工件的材质等。

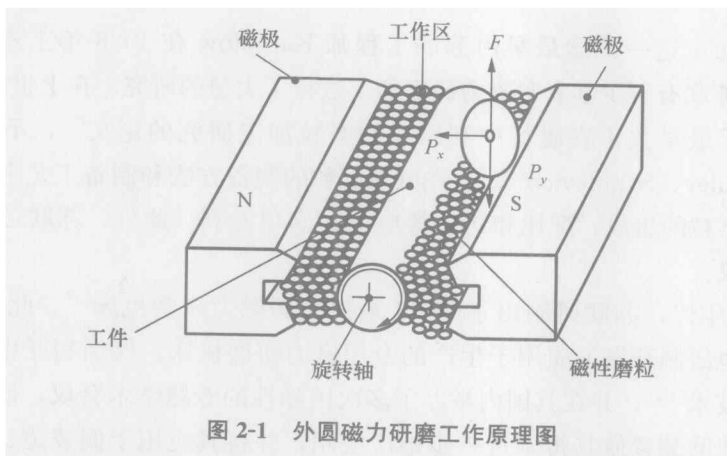


图 2-1 外圆磁力研磨工作原理图

人们为什么把磁场引入到研磨中, 发明了磁力研磨法呢? 最初还是来源于加工实际的需要。在传统的机械加工中经常遇到这样一些难题。如细长的弯管内表面、非规则形状的容器内壁、微细管内面的研磨, 内孔毛刺、交叉孔毛刺的去除等。对于这些内腔表面, 传统的刚性工具, 如刀具、砂轮、抛光研磨头等均难以进入, 人们自然而然地想到, 能否通过场的远程控制能力来操纵磨料。利用磁场的磁力线穿透功能则是其中之一。其他, 比如电场控制的电流变加工, 磁场控制的磁流体、磁流变的加工, 也是源于类似的思想。

其次, 就是复杂自由曲面研磨的难题。长期以来, 人们一直在探索一种能够进行复杂自由曲面研磨的方法。模具型腔的研磨就是一个最典型的例子。模具型腔表面复

杂,由诸多不同的表面组成,自动化很难实现。虽然人们做出了很多努力,诸如机器人研磨,数控研磨,计算机控制抛光等,但一直没有得到很好的解决。在今天的模具制造工厂,铣削加工、电火花加工、磨削加工都因为数控机床的出现而实现了高效率的自动化加工,但是研磨抛光一直是采用的“人海”战术——手工研磨。传统的自动化研磨抛光方法不能很好的推广运用,原因很多,包括成本的问题、研磨效率的问题、研磨质量的稳定性问题等,但更为主要的是因为刚性的研抛工具缺乏柔性,有时工具不能进入到加工区域(如微小凹槽部、深穴部、角部等)。另一个原因,则是这些传统的自动化研磨抛光方法需要严格的轨迹控制,制造成本高,所以人们想到用一种柔性的磁力研磨刷来研磨复杂自由曲面。

再次,就是微加工的要求。采用传统的刚性工具,切削力大,难以实现超精密微细加工的要求。况且由于机械干涉,工具难以进入微加工区域。而磁力研磨中的压力可以通过磁场控制,如果采用极微细的磁性磨粒,则可以达到高精度和高表面质量的要求。

2.2 磁力研磨加工的发展历史

磁力研磨加工这一概念最早由苏联工程师 Kargolow 在 1938 年正式提出^[1]。从 1950 年开始,苏联有不少学者对磁力研磨加工进行了大量的研究。在上世纪 60 年代苏联 Baron 发表了最早关于在磁场中利用磁性磨粒加工研究的论文^[2],不少学者(如 Knoovalov、Hulev、Sakulevich 等),在磁性磨粒的制备方法和制备工艺上做了很多工作,并就磁性磨粒的组成、配比和结构等申请了多项专利。此外,苏联还多次举办过相关的专题会议。

上世纪 70 年代,苏联研制出了 8MN 系列平面磁力研磨机床^[3]。此后,英、美、德、荷兰等国也研制开发了应用于生产的专用磁力研磨机床。保加利亚也一直在发展磁力研磨加工技术^[4-5],并在其国内举办了多次国际性的专题学术会议,研发了各种外圆和平面磁力研磨装置使其得到进一步推广应用,并将其应用于倒棱边、去毛刺等实际生产中。德国也发表了这方面的学术论文。

1981 年后,日本开始这方面的研究。Shinmura 在 1983 年的日本精密工学会春季大会上,在日本首次发表关于外圆磁力研磨的论文^[6],其后 20 年里相继对以外圆、内圆、平面、曲面为磁力研磨的加工原理、加工特点,以及相关设备进行一系列的研究^[7-15]。其他代表性的研究者有:理化学研究所的 Anzai^[16]、日本工业大学的 Suzuki^[17]、东京大学的 Nakagawa、东北大学的 Kato 等。他们研制开发了多种不同的试验装置,并对磁力研磨加工的基本原理、不同条件下的加工特性和影响因素等进行了大量的研究工作,还开发了应用于仪表、量具和家用电器等行业的专用磁力研磨机床。

1990 年后,Shinmura 和 Yamaguchi 等对内孔表面的研磨和毛刺去除做了深入的研

究,他们还将旋转磁场用于磁力研磨加工的研究中,用旋转磁极的方法开发了磁力研磨内孔加工系统,并进行了理论和试验研究,发表了多篇论文。正是由于他们的研究工作使得磁力研磨技术得到了进一步的研究和推广。Shinmura 研制开发了多种加工铁磁性工件和非铁磁性工件的磁力加工装置,如平面、内圆、外圆表面、球面等磁力加工装置,并分别对它们的光整加工特性进行了研究。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力研磨加工,有的则用产生旋转磁场的办法来实现磁力加工。Shinmura 在研制各种形式磁力加工设备的同时,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,如磁场强度、加工间隙、磨料与工件的相对移动速度、磁性磨粒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。并且培养了一大批优秀的从事磁力研磨研究的人才。不少中国学者曾在这里深造,从事该领域的研究。著者也有幸在这里从事振动辅助磁力研磨工艺的研究。近几年,Yamaguchi 一直致力于内孔的磁力研磨研究。王德斌对陶瓷内孔磁力研磨的加工特性进行了研究。Yamamoto 研究了在二维自由运动机构运用磁场辅助加工对陶瓷的镜面加工,还开发了超声波振动研磨加工装置。著者对铁磁性金属材料的磁力研磨加工和振动辅助磁力研磨加工进行了研究,开发了新型的磁性磨粒,并对其加工特性进行了探讨。

近年来,韩国的一些学者如先进科学技术研究院 Jeong-Du Kim 等研究开发了一种基于计算机控制的旋转磁场磁力研磨加工系统,实现了磁力研磨加工过程的自动控制和一些参数的自动调节^[18];同时还将有限元法引入到磁力研磨加工的理论计算中。Jeong-Du Kim, Youn-flee Kang 等人发明磁磨料喷射研磨加工装置,可以有效地研磨非圆截面管内壁。

国外关于磁力研磨的研究主要集中在日本、俄罗斯、美国、韩国等国家,以大学为中心,国立研究机关与民营企业为辅展开了一系列研究,尤其对实现复杂的微小三维曲面自动化加工、光学镜片的超精密加工等展开了研究,并且将多种工艺与磁力研磨复合或组合,取得了很多重要成果。其中大学主要包括宇都宫大学、日本工业大学、美国 Oklahoma 州立大学、Toledo 大学、俄罗斯 St. Peterburg 州立工业大学、罗马尼亚 SUCEAVA 大学、印度工业大学等,而研究机关包括理化学研究所、名古屋工业研究所、栃木县工业科技中心、韩国科学技术院,民营企业则有日本共荣电工株式会社、白俄罗斯 Polimag 公司、日本吴羽化学(株)、日本东洋研磨材(株)等。国外磁力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,超硬磨料砂轮的修整,光学透镜的研磨,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、剃须刀等的去毛刺与抛光加工,刀具研磨等。

我国从上个世纪 80 年代中期开始对磁力研磨加工进行研究。

上海交通大学研究分析了各种磁性磨粒的研磨性能及所使用的加工材料^[19],分析

了磁力研磨加工过程中单个磁性磨粒的受力状况和磨削机理,论述了磁性磨粒的性能要求和制备工艺。在改进传统的磁性磨粒烧结制备法的基础上,对复合镀层法、等离子喷涂法、原位反应复合法等新型磁性磨粒制备方法的研究与开发正不断取得新的进展和成果^[20]。探讨了磁场强度、磁极分布等研磨参数以及工件与磨粒相对运动方式对研磨质量的影响^[21]。提出了用电磁励磁产生回转磁场实现非机械方式产生相对运动的方法,并对励磁机构以简化模型为基础进行了数值仿真,使研磨压力、磁驱动力和简化模型的相关参数建立了数值上的关联,同时对数值计算的结果进行了具体的分析、研究^[22]。分析了不锈钢物流管道内表面磁力研磨运动轨迹和速度的要求,研究了各种励磁方法及其研磨运动轨迹,提出了同时产生回转磁场和往复磁场的励磁方法,设计了能实现复杂研磨轨迹的新型回转磁场装置,对管道进行了回转磁场的材料去除试验^[23]。

鞍山科技大学针对阶梯轴类工件表面的抛光处理进行了研究,对微型复杂形状的轴类工件应用磁研磨加工的可能性进行了讨论^[24]。并探讨了利用磁研磨法对复杂自由曲面型腔抛光的工作原理及加工条件^[25]。针对细长管特别是弯管的内表面加工,提出利用磁力线可以穿透非磁性材料的特性,采用磁研磨法对非磁性材料弯管内表面进行精密加工^[26-28]。

沈阳大学对电磁动力型和极化电磁型振动机构的电磁力进行了计算^[29-30]。并利用永久磁体及磁性磨料对零件表面进行研磨,提出了永久磁体磁路的计算方法,建立了高效率的磁路模型^[31]。研究了一种利用永久磁铁及磁性磨料对难加工材料不锈钢工件内外表面进行研磨。用正交实验法试验了磨料粒度、工件转速、磁极间隙等参数对磁力研磨效果的影响^[32-33]。研究了平面磁力研磨电磁感应器的设计计算问题,用磁场分割法计算电磁线圈的磁动势^[34]。还开发了一些磁力研磨装置^[35-38]。

西安工业学院探讨了内力研磨加工机理和工艺参数对加工质量影响规律^[39]。利用计算机仿真技术建立了磁力研磨加工系统数学模型、磁力研磨加工区域磁场分布模型^[40]。利用有限差分的方法对磁极开槽情况下磁力研磨加工区域中的磁场分布进行了数值分析,提出了一种等磁位线的计算绘制算法,得到了加工区域磁场分布的等磁位线图^[41-42]。在分析内圆磁力研磨加工原理的基础上,简化了磁力研磨加工区域中的磁场,并利用拉普拉斯方程及必要的边界条件推导出了在磁场中圆柱腔内、外磁感应强度的近似关系,并通过对不同壁厚的 $\Phi 45$ 钢圆柱管的对比试验验证,表明内圆磁力研磨加工比较适合加工薄壁磁性材料圆管工件^[43],提出了一种由普通车床改装的用于圆柱面加工的磁力研磨装置的设计方法。根据不同的需要,设计合理的磁极,选取合适尺寸的磁粒,设计合理的电磁感应器及相应的激励电路。经过实验验证,该设备很好地满足了磁性研磨光整加工的表面精度要求^[44]。

东北大学利用三杆五自由度并联机床,采用磁力研磨加工技术对模具型腔自动化研磨的可行性作了初步探索和研究^[45]。在3-TPT五自由度并联机床上进行磁力研磨光整加工的试验研究,对复杂曲面模具自动化研磨光整加工进行了初步探索。并针对不