

流体辅助微纳抛光 原理与技术

程灏波 著



科学出版社

流体辅助微纳抛光 原理与技术

程灏波 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细阐述了适用于精密光学元件制造的流体辅助微纳抛光原理与技术, 针对于每一种工艺方法进行了全方位的描述, 涉及起源与发展、原理、优缺点、具体的加工设备以及相关的工艺。

全书分为 9 章, 第 1 章对光学加工进行了综述, 其他章节分别介绍了磁介质辅助加工技术、磁流变抛光技术、电流变抛光技术、气射流抛光技术、水射流抛光技术、磁射流抛光技术、浮法抛光技术、化学抛光。

本书可以作为高等院校光学工程类专业的教材, 也可供相关专业的师生和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体辅助微纳抛光原理与技术/程灏波著. —北京: 科学出版社, 2014.5

ISBN 978-7-03-040521-0

I. ①流… II. ①程… III. ①纳米技术-应用-流体-抛光

IV. ①TG580.692

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 087760 号

责任编辑: 王 哲 邢宝钦/ 责任校对: 钟 洋

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏立印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 7 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2014 年 7 月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 317 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序 言

现代光学系统采用非球面元件进行像差校正、像质改善，可以简化光学系统与结构的设计方案。精密光学制造方法和工艺技术的不断发展以及新型光学系统设计技术的创新相互促进，使应用在高精度光刻机光学装置、激光约束核聚变能源装置、高分辨率遥感观测装置等光电系统中的关键光学元件呈现出以下技术特征：高面形精度、低表面粗糙度、尽可能小的表层和亚表层损伤、表面残余应力小、尺寸和结构功能日趋多样。

从制造原理和工艺方法角度来讲，高质量要求的光学元件纳米精度抛光是一个值得探索和创新研究的科学命题。例如，应用在纳米光刻光学系统中的非球面元件，要求达到高面形精度的同时保证低表面粗糙度；应用在空间精细遥感光学系统中的典型光学镜经历了从 Hubble 主镜面密度 180kg/m^2 到 Herschel 的 25kg/m^2 ，再到未来可能的 20kg/m^2 的发展趋势，要求镜体具有足够刚度、强度、结构高稳定性和面形精度；应用在激光约束核聚变装置终端光学系统中的光学元件表面损伤阈值指标为 $8\text{J/cm}^2 \cdot 3w$ ，理论上无缺陷熔石英材料的本征损伤阈值远高于这一指标 ($90 \sim 110\text{J/cm}^2 \cdot 3w$)，然而经过表面加工后的损伤阈值降低到约 $2\text{J/cm}^2 \cdot 3w$)，实现这样的目标需要探索无损伤抛光工艺，从而进一步提高元件表面质量、抑制表面亚表面缺陷。

作为精密光学制造工艺链中的一个重要环节，对抛光方法与工艺的研究和探索始终吸引着科研人员的关注。从材料柔性去除的概念角度展开分析，以高性能高精度要求的复杂光电系统、空间精细遥感仪器、高能激光武器和短波段光学领域等为技术需求背景，为追求加工技术的先进性和高精度，发展了流体辅助抛光技术(包括磁流变抛光、电流变抛光、磁射流抛光、化学机械抛光等)。磁流变和电流变抛光技术基于特殊功能材料的场致流变效应原理，借助于外加磁场/电场控制由功能粒子和磨料粒子等组成的抛光液的黏度和流变特性，形成柔性抛光盘。磁射流抛光技术在磨料水射流基础上发展起来，利用抛光液在磁场作用下发生的流变效应，在液体喷嘴出口附近施加局部轴向磁场，消除初始扰动对液柱的破坏，获得稳定汇聚的射流束冲击工件表面，从而实现材料柔性去除。化学机械抛光利用游离态磨料粒子与工件间的磨削和化学腐蚀来实现表面光整，避免了由单纯机械抛光造成的表面损伤和由单纯化学抛光易造成的抛光速度慢、表面平整度和抛光一致性差等问题。然而在工艺实施过程中，流体辅助抛光技术的加工机理和工

艺性都是相当复杂的。

本书结合作者科研团队多年来在流体辅助抛光领域的研究成果和学术积累，对流体辅助抛光原理和工艺方法进行系统的阐述，参考了大量文献并融入新的学术见解，在此谨向相关作者和同仁致以诚挚的感谢！香港城市大学的 TAM Hon Yuen 教授提出了宝贵的学术见解，有助于本书中电流变抛光原理和工艺技术相关内容的完善；本书的出版得到了国家自然科学基金的资助，另外作者的研究生也做了大量的资料整理工作，在此一并表示衷心的感谢！本书适用于航空航天、天文和信息技术等领域从事光学制造检测工作的科技人员，以及大专院校相关专业的师生。

诚恳希望读者对本书提出宝贵的意见。

程灏波

2014 年 5 月于北京

目 录

序言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 流体辅助抛光技术的分类	5
1.3 流体辅助抛光技术的发展	8
第 2 章 磁介质辅助加工	11
2.1 磁场辅助抛光技术	11
2.2 磁性液体抛光技术	11
2.3 磁力研磨技术	12
参考文献	22
第 3 章 磁流变抛光	24
3.1 概述	24
3.2 磁学理论基础	27
3.3 抛光系统与模型	31
3.4 磁流变抛光液	55
3.5 工艺研究	70
3.6 小结	76
参考文献	76
第 4 章 电流变抛光	80
4.1 概述	80
4.2 电流变液体	82
4.3 电流变抛光液	87
4.4 电流变抛光模型	96
4.5 装置设计与分析	101
4.6 工艺研究	106
4.7 小结	109
参考文献	110
第 5 章 气射流抛光	112
5.1 概述	112
5.2 基本原理	115

5.3 加工机理与技术	124
5.4 加工仿真与实验研究	134
5.5 小结	144
参考文献	145
第 6 章 水射流抛光	146
6.1 概述	146
6.2 基本原理与特点	154
6.3 理论模型	156
6.4 工艺研究	166
6.5 小结	177
参考文献	178
第 7 章 磁射流抛光	180
7.1 概述	180
7.2 流体动力学理论基础	182
7.3 液柱保形机理	186
7.4 去除函数模型与特性	189
7.5 工艺研究	199
7.6 加工装置	212
7.7 小结	218
参考文献	219
第 8 章 浮法抛光	222
8.1 概述	222
8.2 机理与模型	224
8.3 工艺研究	229
8.4 小结	230
参考文献	231
第 9 章 化学抛光	233
9.1 概述	233
9.2 机理与原理	235
9.3 加工设备	239
9.4 小结	244
参考文献	244

第1章 绪 论

1.1 概 述

光学是一门有着悠久历史的学科,起源应追溯到远古时代。当每一个新的生命诞生到这个世界上,光就无时无刻、无处不在地影响着他的生活。人类对光的研究,最初主要是试图回答“人怎么能看见周围的物体?”之类问题,但是具有强烈求知欲望的人们并不满足于此,越来越多的人开始对光进行深入研究。光学的发展经历了萌芽时期、几何光学时期、波动光学时期、量子光学时期和现代光学时期。直到21世纪,光学和其他学科之间的相互交叉和拓展形成了一批新的学科分支,如光谱学、自适应光学、晶体光学、傅里叶光学、微光学、非线性光学、统计光学、散射光学、薄膜光学、量子光学、辐射度学和X射线光学等。随着这层神秘面纱的褪去,人们获得的不仅是惊喜和赞叹,还获得了许多了解和探索这个世界的方法和技术。

光学是一项既古老又前沿的科学,是一种难以估价的科学技术,也是一门与其他学科紧密相关的学科。

光学科学技术的进展与光学仪器的设计、制造技术的发展有着紧密联系,尤其与其中核心的光学元件能够达到的功能和制造质量密切相关。在光学系统中,非球面元件(如抛物面镜、椭球面镜、高次曲面镜等)与球面元件相比较,在矫正像差、提高成像质量方面有着不可替代的优势,往往一块非球面镜就可以替代多块球面镜的作用,从而大大减小整个光学系统单元的数量与重量。因此,非球面元件在军事、武器、航天、天文、核能和重要的经济性工业领域有着广泛的应用,采用非球面元件已成为现代光学系统设计的特征。非球面镜的加工制造属于超精密加工的尖端代表性技术,有着巨大的工业产业价值,关乎国防军工,也是目前我国与先进工业国家尚有较大差距且急需大力发展的重要技术领域,列举如下几个例子进行说明:一个由7片球面元件组成的光学系统可由3片或4片非球面元件所替代。**Javelin**反坦克导弹的发射装置因为采用了非球面光学元件而使系统的重量、尺寸、复杂性和成本都得到了降低。另据美国陆军部的一项调查报告显示,1980—1990年美国军用激光和红外热成像产品使用的各种光学零件共114.77万块,其中包括自由曲面在内的非球面光学零件计23.46万块。美国**Rochester**大学的光学加工中心称,采用计算机控制加工非球面镜,在一枚导弹的光学系统中为军方创造

1400万美元的价值。1994年,由Tinsley公司与Itek、Eastern-Kodak等公司合作,完成在太空中对哈勃望远镜的修复工作,修复所用的复杂型面轴向补偿校正镜价值4000万美元,新广角行星相机价值2400万美元,哈勃望远镜经过维修后观测到120亿光年的10个星系,被我国两院院士评为1998年国际十大科技进展新闻之一。我国十五攻关项目研制目前世界上最先进的 $0.1\mu\text{m}$ 线宽光刻机,其镜头的面形精度要求达到 3nm RMS (Root Mean Square, 均方根, 光学表面评价指标之一)。

使用单个元件获得非球面波前的方法有许多,最常用、最主要的方法是采用非球面曲面获得非球面波前,这样的元件有非球面透镜和非球面反射镜;可以采用衍射光学元件获得非球面波前,衍射光学元件可分为透射式和反射式两种;可以通过改变透镜光学材料折射率的分布获得非球面波前,如应用在光纤技术中的一种自聚焦透镜就是采用这样的技术。由于受到当前制造技术、装卡支撑技术的限制,很难制造精度要求很高的衍射光学元件和变折射率光学元件,目前非球面光学系统主要采用上述第一种非球面光学元件。

虽然非球面元件具有无比的优越性,但是由于其特殊的几何形状决定了非球面的加工方法异于球面的制造方法,无论制造难度还是制造成本都远高于球面元件。对于球面镜,抛光工具与球面镜之间可以进行球面相对运动实现整个球面的接触抛光,而非球面镜的加工却难于实现工具与非球面元件的全面积接触相对运动,因此非球面镜的加工采用特殊的工艺方法。随着现代先进制造技术与计算机软硬件技术的快速发展,光学制造技术与光学设计软件得到了长足的进步。这些底层支撑技术的快速发展为光学设计人员提供充分的想象空间,使其能够设计出更为精巧、像质更高,能满足某些特殊要求的光学系统,包括作为功能元件广泛应用于光电和信息领域以实现信息感知、采集、传输、转换和控制等目的的光学元件。例如,作为窗口器件和透镜或反射镜大量使用在可见光、红外、紫外等多波段光学系统中。特别是近年来激光技术的长足进展,自由电子激光器的高效率波长转换与高功率紫外激光器新激光光源的出现,对谐振腔和周边光学系统光学元件的性能提出了更高精度、超低功耗的要求。在“惯性约束核聚变”固体激光驱动器、短波段光学领域,尤其是强激光武器等高科技关键设备中,优质功能材料制备的器件如大尺寸、高精度KDP(KH_2PO_4)光学晶体元件,由于透过波长领域宽、激光损伤阈值高而作为光路系统中的最佳光学倍频转换器和电光开关元件。在这些应用领域,对光学元件的精度要求极为苛刻,要求达到纳米级面形质量(面形畸变优于 30nm RMS),尽可能小的表层和亚表层损伤,表面残余应力极小和超光滑表面(粗糙度优于 0.5nm RMS),为了形成技术支撑,需要研究材料表面超精密加工工艺和与之配套的装备技术。

为了达到这一目的,许多国家相继在纳米级超精密加工领域进行了大量的研究工作,特别是近二十年来美国、日本、俄罗斯等发达国家对纳米级超精密加工

工艺进行了较为深入的研究并取得了一定的进展,但对纳米级超光滑加工机理的研究仍不是十分成熟。一般来讲,超光滑表面成形因其特殊的工艺性而对加工条件要求极其苛刻,传统的磨削和抛光方法易使磨粒嵌入元件中,造成表面损伤并最终影响元件功能而不再适用。20世纪60年代初发展起来的单点金刚石切削技术是目前考虑较多的超精密加工手段,它采用金刚石刀具“飞刀”切削方式,借助于高运动精度的精密数控机床对工件进行切削。但是避开工艺因素的影响,即使导轨直线度达到 $0.1\mu\text{m}/100\text{mm}$,工件面形精度也达不到单次透射波前畸变优于 40nm RMS 的指标;此外基于切削原理,机床的驱动控制精度也不可避免地引入工件表面的切削周期性波纹度,在强光非线性效应的影响下将会产生很大的增益,若再经过长距离传输,则将转化为更大的强度调制从而恶化系统输出光束质量。所以只有不断提高机床的运动和控制精度,才可能制造高质量的光学元件,因此过度依赖机床的运动和控制精度是制约这一技术取得突破性进展的一个瓶颈。为了在获得光学级面形精度的同时实现超光滑抛光,可以针对被加工材料的不同物理特性,考虑借助于磁性流体实施柔性去除方式的确定性加工技术。具体地说,磁性流体在梯度磁场作用下流变呈现黏塑性,利用其与工件接触区域的剪切力作用实现表面材料的确定性去除。磁性流体确定性加工技术具有加工速度快、精度高且不产生亚表层破坏等优点,成为实现超光滑表面加工的可考虑技术手段之一。

鉴于非球面元件的优越性能,工业发达国家(如美国、德国、法国、英国和俄罗斯等)早在20世纪70年代就已经开展其现代先进制造技术的研究。随着计算机控制技术的成熟,非球面光学元件的数控加工主要有三种工艺方法:①单点金刚石超精密镜面切削,一般只适用于有色金属反射镜的加工,受到机床精度和刀具刃磨精度的限制,其加工精度一般只达到亚微米级,且被加工金属镜的表面存在微细的走刀纹路,仅适用于长光波段;②微细金刚石砂轮超精密直接镜面磨削,近年来研究发展较快,其加工精度也受到磨床精度和砂轮修整精度的限制和磨削随机因素的影响,而且由于是刚性去除,砂轮形面与工件形面无法完全贴合,导致在磨削运动轨迹间存在极细窄的切带,引发光束散射而造成能量损失,如用强光源以 45° 斜射到磨光后的表面,在高倍显微镜下可观察到工件表面残留刚性去除划痕,因此欲使工件精度更高或适用于更宽光谱范围,必须经过后续抛光处理以进一步提高精度和表面质量;③计算机控制小工具研磨抛光,一般针对光学玻璃、光学晶体等硬脆材料制备的光学元件,常使用弹塑性的沥青等材料制作的小磨头(直径通常小于工件直径的 $1/4$)进行研磨或抛光,在小磨头与工件间加入磨料(如氧化铈、氧化铝等),利用其间的相对运动,实现工件表面材料的有效去除,加工中小磨头能够有效地跟踪非球面表面各点曲率半径的变化,与非球面的面形良好吻合从而提高加工精度,并可利用计算机执行速度快、记忆准确等优势使加工的重复精度和效率大幅度提高。计算机控制小工具研磨抛光技术自20世纪70年代初

问世以来,世界上以美国为代表的一些发达国家相继投入了大量的人力、物力和财力进行深入的研究,并在航空、航天等重要领域发挥了巨大的作用。我国在“九五”期间立项,并由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所承担研究重点空间项目中的关键部件——非球面主反射镜的制造难题,历经十余年,取得了核心技术的突破,形成了以空间应用的轻质大口径离轴非球面反射镜制造为代表的独特技术优势,为高质量空间成像光学系统提供了有力的技术支撑和储备。但是计算机控制小工具研磨抛光技术复杂程度很高,在工艺实现上还存在一些十分关键的难点:首先对于不同的光学元件面形需要不同的工具模型,只有这样才能使小磨头更好地贴合工件表面,使单位去除函数接近于高斯函数,降低计算机控制技术的通用性;其次抛光模所用的材料一般是沥青材料,在抛光过程中,由于摩擦作用,表层沥青将会发生变形并产生温升,使沥青表层的结构形状发生变化,力学性能也随之发生变化,从而影响抛光模的去除函数;再次沥青材料的弹性恢复能力比较差,如果采用高速抛光,而沥青抛光模不能及时实现弹性恢复,那么也会严重影响抛光模的面形精度,无法实现精确的材料去除,所以沥青抛光模很难实现高速抛光,也就是说很难通过提高抛光速率来提高抛光效率。20世纪90年代初期,磁流变抛光(Magneto-Rheological Finishing, MRF)技术问世,其优势在于抛光区域内始终保持新抛光磨粒在参与抛光。目前此项技术以美国Rochester大学的研究最为深入,也最具有工业应用实力。国内自1998年起开始磁流变抛光技术的研究并已取得一定的成果。

利用计算机控制加工光学非球面元件,其技术进步的目标是实现光学元件表面残余误差的确定性去除,但由于工艺材料(例如,工件材料和材质,抛光工具材料采用沥青抛光模、磁流变抛光模或聚氨酯抛光模,抛光磨料的选择)不同、工具尺寸形状和运动方式不同、数控轨迹路线不同、工艺参量匹配差异和数控加工本身的规律性过强(不一定有利于超光滑表面形成)等工艺因素的选择决策不同,在加工过程中,形面误差的消除和面形精度的收敛并不一定是理想的、确定性的。因此该项技术的复杂程度仍很高,加工、测量和判断决策仍要反复进行,其反复次数仍将很多,而且无法预料,对技术决策者的工艺经验的依赖性仍非常强。

进入21世纪,光学非球面元件的两个研究方向尤为突出,其一是更高表面质量:在高性能、高像质要求的军用光电系统、空间精细遥感仪器、高能激光武器和短波段光学领域中,元件面形精度要求达到 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8\text{nm}$, 以下的 λ 在没有特殊说明的情况下都为 632.8nm)或更高,有时为了减小因散射而造成的能量损失,甚至要求系统中采用的元件表面必须是超光滑的(表面粗糙度一般低于 0.5nm),为达到这样高的面形精度和表面形貌精度,必须采用抛光的工艺方法,特别是对于利用光学玻璃、光学晶体制造的元件,这是唯一的工艺途径;其二是元件尺寸极限制:包括前述的应用于大型空间遥感或地面观测仪器中的大口径甚至超大口径

非球面元件(口径达到800mm以上,采用计算机控制小工具加工的方法可以实现高精度制造)和满足光数字通信设备小型化、高集成度技术进展需求的小口径至微小口径非球面元件(口径仅为10~0.8mm)的确定性加工。

1.2 流体辅助抛光技术的分类

流体辅助抛光技术作为光学加工技术的一个分支,以其独特的加工方式在光学加工中占有重要的地位。它的基本思想是:借助于流体动力为浸没在其中的抛光磨粒提供动能,具有一定切削力的磨料粒子与工件表面产生相对运动,对工件表面材料进行抛光。使用流体作为基载,利用流体分子作用力较小的特性实现柔性抛光,获得表面质量较高的光学镜面。根据不同的磨料粒子载体,目前流体辅助抛光技术可分为基于气体的抛光技术和基于液体的抛光技术,如图 1.1 所示。

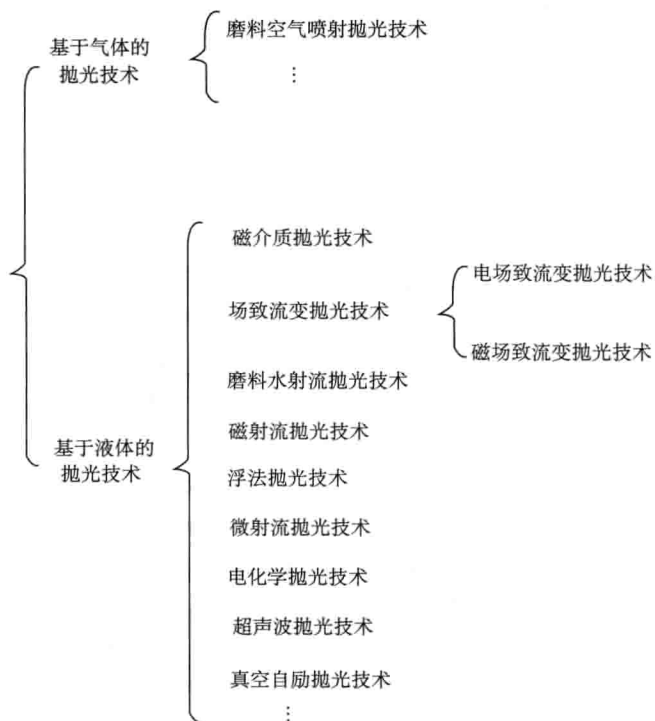


图 1.1 基于不同载体的流体辅助抛光技术的分类

以下对目前应用较为广泛的抛光技术进行简要的阐述。

1. 磨料空气喷射抛光技术

磨料空气喷射抛光(Abrasive Jet Machining, AJM)是一种非接触式的抛光技术。其抛光原理是:微细磨料喷射加工技术是以气体为载体,将微细磨料粒子加速,利用微细磨料对材料的冲击进行去除加工。

2. 磁介质辅助研抛技术

一般来说,磁介质辅助抛光可分为磁场辅助精密抛光技术、磁性液体抛光技术、磁力研磨技术和磁流体辅助抛光等几种方法。

3. 磁场致流变抛光技术

磁场致流变抛光,俗称磁流变抛光(Magneto-Rheological Finishing, MRF),是一种非接触式的抛光技术。其抛光的原理是:磁流变抛光液运动到工件与运动盘形成的小间隙附近时,在梯度磁场的作用下发生流变,形成具有一定硬度的缎带凸起。当变硬的磁流变抛光液进入小间隙时,对工件表面与之接触的区域产生很大的剪切力,从而使工件表面材料被去除。

4. 电场致流变抛光技术

电场致流变抛光,俗称电流变抛光(Electro-Rheological Finishing, ERF),是一种非接触式的抛光技术。在1999年电流变技术应用于抛光领域,主要是利用电流变液在电场作用下表观黏度会发生变化,并且它的屈服强度随着外加电场强度的增大而增加。因此在电流变液中混入磨料后,当施加外加电场时,电流变液在工具电极附近就会形成具有一定表观黏度和剪切力的柔性抛光头,并跟随工具电极运动对工件表面产生剪切,实现抛光。

5. 磨料水射流抛光技术

磨料水射流抛光,俗称液体射流抛光(Fluid Jet Polishing, FJP),是一种非接触式的抛光技术。利用由小喷管喷出的混有磨料粒子的高速抛光液作用于工件表面,形成高速运动的磨料粒子对工件表面进行切削作用,实现工件表面材料的去除。通过控制液体喷射的压力、方向和驻留时间等来定量修整被加工工件面形的光学加工工艺。

6. 磁射流抛光技术

磁射流抛光(Magneto-Rheological Jet Polishing, MJP)技术,其可简单描述为:混合细微磨料的磁流变液在容器中搅拌均匀,然后利用相对较低的压力系统将混

合液吸入安装在电磁线圈内部的铁磁材料制成的喷嘴并喷射，在电磁线圈产生的局部轴向磁场的作用下，磁流变抛光液发生流变效应，变为表观黏度较大的浆体，使得从喷嘴喷出的浆体稳定性增加，当液体冲出磁场范围后由于存在剩磁作用，液柱仍能够保持一致性，可以实现较远距离的确定性抛光，使用过的抛光液经回收装置过滤后重新回到容器中，实现循环加工。

7. 化学机械抛光技术

化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)是一种非接触式的抛光技术。根据所要抛光工件材料的不同，配制不同成分的化学抛光液体。抛光时工件与抛光液相对运动，为了获得较好的表面粗糙度，也可将电化学抛光应用于其中。另外这种抛光方法比较适合金属材料的抛光。

8. 浮法抛光技术

浮法抛光(float polishing)过程中，镜盘与磨盘稳定旋转，抛光液运动产生的动压力使镜盘与磨盘之间有数微米厚的液膜，磨料微粒在这层液膜中运动，与工件表面不断碰撞，工件表面原子在磨料微粒的撞击作用下脱离工件主体，从而被去除。

9. 微磨料射流抛光技术

微磨料射流抛光技术是一种将传统小磨头抛光、浮法抛光和射流抛光等技术相结合的非接触式加工方法，其包括微磨料空气射流加工(Micro Abrasive Jet Machining, MAJM)技术和微磨料水射流(Micro Abrasive Water Jet Machining, MAWJM)技术。微磨料射流抛光技术的加工原理为：抛光混合物在一定压力(由液体或气体提供)的作用下进入磨头内部，并由磨头底部的微孔喷出与工件表面发生碰撞后沿径向流动，微细磨料颗粒在旋转磨头和径向流动的作用下与工件表面相互作用产生强大的剪切力，从而实现工件表面材料的去除。

10. 超声波抛光技术

超声波抛光技术的原理是利用换能器将输入的超声频电振荡转换成机械振动，然后将超声机械振动传递给变幅杆加以放大，再传至固装在变幅杆端部的工具头上，使工具头发生超声频的振动，当工具头与工件之间存在有适量的磨料悬浮液并使工具头以一定压力接触工件时，工具头高频率、高速度打击工件表面，同时悬浮液产生环流和空化作用，使工件表面引起微量的碎裂和剥蚀，从而实现了超声波抛光过程。

11. 弹性发射抛光技术

两种固体相互接触时,在界面形成原子间结合力,在分离时,一方原子分离,此处原子即被去除。基于这种物理现象,将超微细粉金刚砂磨料粒子向被加工物表面供给,磨料运动,加工物表面原子被分离,实现原子与加工物体分离的加工,这就是弹性发射抛光(Elastic Emission Machining, EEM)的基本原理。EEM 加工方法的本质是粉末粒子作用在加工物表面上,粉末粒子与加工表面第一层原子发生牢固地结合。第一层原子与第二层原子结合能力低,当粉末粒子移去时,第一层原子与第二层原子分离,实现原子单位的极微小量弹性破坏的表面去除加工。

12. 真空自励抛光技术

真空自励抛光是一种非接触式的抛光技术。利用正压供液泵在工作室与工件表面形成正压区,产生向上的浮力,再由负压泵的吸附力作用在工作室与工件表面形成负压区,产生向下的吸附力,因此由于浮力与吸附力的相互作用,在磨头与工件之间形成了动态的具有一定刚度和韧性的抛光液流体层,在机床的带动下对工件表面进行抛光。

这里所说的接触和非接触是指在抛光过程中,被加工工件是否与较硬的固体抛光盘相接触。接触抛光法的缺点是:在工件抛光的同时,抛光盘也被磨损。因此抛光盘的面形在不断变化,从而使工件表面材料去除率函数不断变化。这对抛光过程稳定性和重复性的控制,以及实现数控抛光是十分不利的。另外在抛光过程中,工件与较硬的固体抛光盘相接触,工件表面受到的压力较大,因此抛光后的工件易产生下表面破坏层。非接触抛光法抛光后的工件虽然可以获得较高的表面精度,且抛光中不存在抛光盘磨损的问题,但是其抛光效率相对于接触式抛光一般比较低。

1.3 流体辅助抛光技术的发展

光学制造技术是一门有着悠久历史的加工技术,从早期的手工操作到现在的先进光学制造技术,已经取得了很大的进步,但是随着科技的发展和技术的进步,光学制造技术的发展势在必行。先进光学制造技术已经发展成为用数学模型描述工艺过程,以计算机数字控制为主导的确定性加工。流体辅助抛光技术作为光学加工技术的一个重要组成部分日趋完备。

全球范围内的高技术竞争将促进先进光学制造技术的不断发展。从20世纪80年代开始,随着国家“863”计划的实施,以及中国微电子、光通信、航空、航天、天文和国防等技术的全面发展,对当代光学制造工作者和光学制造业提出了严峻

的挑战,同时也带来了新的发展机遇,这也将促进我国先进光学制造技术的加速发展。

流体辅助抛光技术的发展方向主要体现在以下几个方面。

1. 集成化

集成化主要包含两重含义,即设备功能的集成和技术的集成。设备功能的集成主要体现在将各个功能部件集成到一体,实现光机电一体化;技术的集成主要是将两种或多种不同的技术集成为一个具有更高性能的加工技术,如磁射流技术、磁流变技术、电磁流变技术和真空自励抛光技术等。

2. 信息化

信息化培养和发展以计算机为主的智能化工具为代表的新生产力,主要是将计算机技术、软件控制技术、软件虚拟技术和数字监控技术融入到流体辅助抛光技术中,实现自动化和数字化控制加工。自动化是指加工系统在没有人或较少操作者的直接参与下,按照操作者的要求,经过控制监测、信息处理、分析判断和操纵加工一系列过程,从而达到操作者要求的预期加工目标。数字化就是将许多复杂多变的加工信息转变为可以度量的数据,再通过这些数据建立起适合于加工的数字化模型,利用其对机床进行数字化控制,实现定点定量的精确加工。

3. 超高精度

科学技术的快速发展致使对光学元器件的精度要求越来越高。超精密加工已向纳米精度发展。例如,在高性能、高像质要求的军用光电系统、空间精细遥感仪器、高能激光武器和短波段光学领域中,元件面形精度要求达到 $\lambda/50$ 或更高。

4. 超光滑

超光滑表面的评价可分为表面粗糙度和亚表面损伤两种标准。表面粗糙度是评定加工过的材料表面由峰、谷和间距等构成的微观几何形状误差的物理量,一般定义为加工表面具有的较小间距和微小峰谷不平度,对于超光滑表面其粗糙度要求一般低于 0.5nm 。光学元件的亚表面损伤大致分为两类:一种是元件材料的固有缺陷,如气孔、杂质粒子等;另一种是在加工过程中引入的损伤,包括裂纹、残余应力等,但是一般亚表面损伤主要以裂纹形式存在,故称为亚表面裂纹层。

5. 极端制造加工

对于流体辅助抛光技术，其极端制造是指在特殊条件下，在较短的时间内制造极端尺度、极高精度的器件，集中表现在尺寸上微小、巨型、超薄、超轻和面型上超精密、超光滑等方面。

6. 低污染加工

低污染加工也称为绿色加工，是一项现代化的制造模式，也是人类可持续发展战略在现代制造业中的集中体现。低污染加工的目标是使加工设备、被加工工件和加工所需要的辅助物品在整个产品的生命周期中对环境的影响最小。