

可控柔性表面抛光研究综述

徐志强^{1,2}, 王秋良¹, 张高峰^{1,2}, 朱科军^{1,2}, 姜胜强^{1,2}

(1.湘潭大学 机械工程学院, 湖南 湘潭 411105;
2.复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 随着光电通讯、生物医疗、航空航天等技术的飞速发展, 高性能、高精度、高集成的零件及模具不断涌现, 其不仅结构复杂, 加工精度和表面质量要求高, 而且大部分都属于硬、脆难加工材料, 传统的抛光方法难以胜任。基于可控柔性理念的抛光技术, 为上述零件的高效率和高精度抛光提供了一种新思路, 逐渐成为超精密抛光的重要发展方向。首先, 介绍了可控柔性抛光技术的基本概念, 并就柔性执行装置、柔性“研抛模”、柔性控制系统三种可控柔性抛光方法的柔性可控原理、结构特点以及国内外研究现状等分别进行了综述; 其次, 对以上可控柔性抛光方法的加工原理、材料去除、抛光精度等进行了深入分析与比较, 进一步阐述各类方法的优缺点; 最后, 对可控柔性抛光方法基本理论的系统研究、抛光精度和效率的提高、抛光工艺的复合化和智能化以及智能材料应用等方面的发展趋势进行了展望。

关键词: 超精密加工; 抛光; 柔性可控; 表面质量; 加工精度

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0099-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.014

Controllable Flexible Surface Polishing

XU Zhi-qiang^{1,2}, WANG Qiu-liang¹, ZHANG Gao-feng^{1,2}, ZHU Ke-jun^{1,2}, JIANG Sheng-qiang^{1,2}

(1.School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2.Engineering Research Center for Complex Track Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, Xiangtan 411105, China)

ABSTRACT: With the rapid development of photoelectric communication, biomedicine and aerospace technologies, parts and dies featuring in high performance, high precision and high integration are emerging constantly. These parts and dies are characterized by complex structure, and demanding machining accuracy and surface quality. Moreover, most of them are hard-brittle intractable materials, which makes it difficult to machine in conventional polishing methods. Allowing for the above problems, the polishing technology based on controllable flexibility concept provides a new idea for high-efficiency and high-precision polishing of the above-mentioned parts, and becomes a new development direction of ultra precision polishing. Firstly, basic concept of controllable flexible polishing (CFP) technology was introduced; and a review was made with regard to flexibility control principle, structural characteristics and research status at home and abroad of flexible actuator, flexible “polishing mold” and flexible control system, respectively. Then processing principle, material removal and polishing precision of above CFP methods were thoroughly analyzed and compared, advantages and disadvantages of various polishing methods were further expounded. Finally, future development trend of CFP methods were prospected in terms of systematic study on basic theory, improvement of polishing accuracy and effi-

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-07-28

Received: 2017-05-25; Revised: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51605409, 51605410)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605409, 51605410)

作者简介: 徐志强 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为超精密磨削与抛光。

Biography: XU Zhi-qiang(1984—), Male, Doctor, Lectuer, Research focus: ultra-precision grinding and polishing.

ciency, polishing process compounding and intelligentizing as well as application of intelligent materials.

KEY WORDS: ultra-precision machining; polishing; flexibility controllable; surface quality; machining precision

近年来,超精密加工技术以前所未有的速度向前发展,其应用对象涉及光学工程、航空航天、通讯工程、生物医疗、汽车制造等诸多领域,且加工精度逐步向纳米级迈进。同时,随着机械及光电产品向小型化、轻便化发展,高精度、高复杂性和小型化零件被广泛研究和应用,例如非球面模具、微小型喷嘴、发动机叶片、人工关节骨头等超精密的产品和零件。由于这些零件大都属于产品的关键核心零部件,不仅具有形状复杂、尺寸小、高硬脆的突出特点,而且对其加工精度和尺寸稳定性的要求高,要求其表面质量为纳米级或者亚纳米级,且不存在表面或者亚表面损伤。

针对以上难题,自20世纪90年代开始,国际上陆续出现一批新型抛光技术,其加工机理大部分涉及可控柔性抛光,可以归类为可控柔性抛光(Controllable Flexible Polishing, CFP)技术。所谓“可控柔性抛光”,是指通过各种方法改变研磨抛光工具的形状和柔度(刚度的倒数),使之能够适应零件复杂面型的变化,并且材料去除函数在加工过程中可以保持长期稳定的超精密加工方法。这一概念在李圣怡^[1]、杨力^[2]和袁巨龙^[3]等学者的文献中都有提及。

CFP具有如下特点:1)基于计算机控制,可以根据零件的面型实现自动化加工,能确保抛光过程的确定性和稳定性;2)抛光工具柔度可变、可控,抛光过程中既不会将抛光工具的面型误差复制到工件表面,又具有足够高的刚度以保证材料去除率;3)抛光工具与工件表面柔性接触,能够有效减少材料表面、亚表面损伤和边缘效应。按照柔性加工机理的不同,CFP大致可归纳为基于柔性终端的抛光方法、基于柔性研抛模的抛光方法和基于柔性控制系统的抛光方法三大类。

1 典型可控柔性抛光方法

1.1 基于柔性终端的抛光方法

基于柔性终端的抛光方法是指终端执行器在计算机控制下可以实时改变抛光工具的形状,使之与工件面型匹配、贴合,从而便于进行复杂曲面的抛光处理。终端执行器用来连接抛光机与抛光工具,并执行计算机指令,其不仅能有效提高整体结构刚度,而且还可以自动补偿位置误差与适应各种形状的几何型面。代表性的加工技术有应力盘抛光方法(Stressed-lap Polishing, SLP)和气囊抛光方法(Bonnet Tool Polishing, BTP)等。SLP由Angel和

Parks于20世纪80年代提出^[4],是利用应力盘四周的驱动器和连杆装置在磨盘边沿施加一定载荷,控制磨盘在工件表面不同驻留点处的形变。根据不同型面,选择不同的驱动器分布结构来实现磨盘变形和工件柔性抛光,具体原理和结构如图1所示。

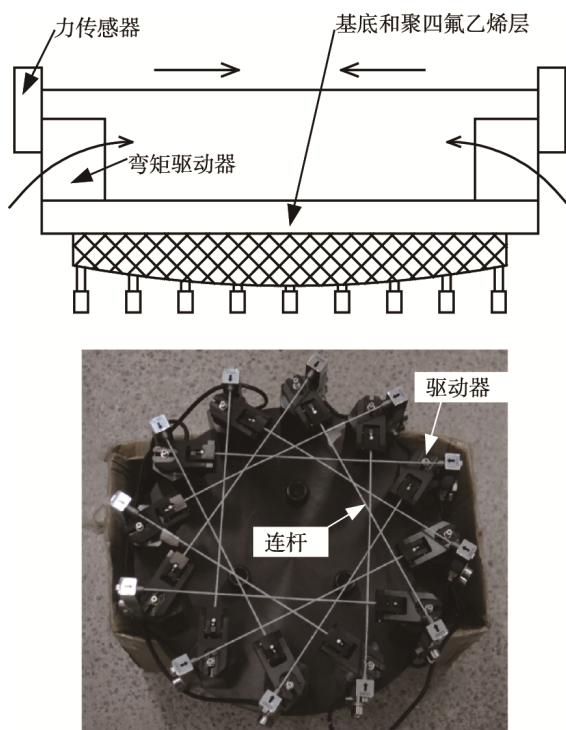


图1 应力盘抛光原理及其装置
Fig.1 Principle of SLP and its device

SLP引入应力控制系统,使磨盘变形由被动过程变为主动过程,保证了其与工件的紧密贴合,使材料去除性能更稳定,加工效率更高,为超大型复杂曲面抛光技术的研究开辟了一条新路径。利用该加工方法,Martin和Angel等人^[5,6]在1990年,用口径为0.6 m的应力盘抛光一块1.8 m f/1.0的非球面反射镜,抛光后的面型精度RMS优于17 nm。2010年,美国斯蒂瓦天文台大镜实验室利用SLP完成一块8.4 m f/2.14 GMT非球面镜的抛光,实现全口径粗糙度Ra为20 nm,面型精度PV值低于1 μm^[7]。2016年,其又报道用1.8 m应力盘完成了GMT主镜中第四部分8.4 m中心子镜的抛光^[8]。国内的长春光机所^[9,10]、南京天光所^[11]和成都光电所^[12]都有关于利用SLP抛光非球面的报道。

BTP是另外一种主要的柔性执行器形变可控的抛光方法,其由D. D. Walker等人^[13,14]首先提出。该

方法利用特殊结构的抛光头和独特的运动方式实现曲面抛光, 如图 2 所示。柔性抛光头由充有低压气体的球冠形气囊与旋转的工作部件构成, 其外表面粘有一层研抛膜。抛光头按进动理论运动, 柔性气囊可根据工件面型做出自适应变形, 使之与工件表面吻合。调节气囊内压控制接触的柔韧性程度与抛光区的大小, 可以控制材料去除效率。BTP 具有稳定的近高斯形去除函数, 而且抛光头内压、抛光接触区、进动运动、转速等变量均可独立控制, 这些特点都增加了加工的确定性和可控性。

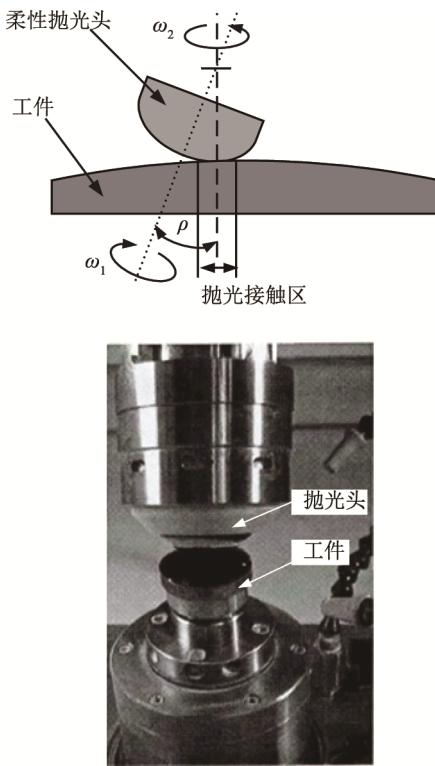


图 2 气囊抛光原理及装置
Fig.2 Principle of BTP and its device

基于 BTP 原理, Zeeko 公司研制了基于气囊柔性抛光的多轴抛光系列设备, 能够加工最大直径达 2.4 m 的光学镜面^[15,16,17]。高波等^[18]在前人的研究基础上, 采用改进的 SBCT 抛光工具加工 BK7 玻璃材料, 得到 $Ra=1.29 \text{ nm}$ 的光滑表面。计时鸣^[19]将机器人辅助气囊抛光应用到模具抛光中, 不仅得到表面粗糙度 $Ra=7 \text{ nm}$ 的工件, 还提高了加工效率。张健等^[20]提出了一套控制抛光气囊运动精度的方法, 结果显示, 抛光口径为 280 mm 的平面, 加工精度达到 0.8 nm (RMS); 抛光口径为 160 mm 的凹球面, 加工精度达到 1.1 nm (RMS)。

1.2 基于柔性研抛模的抛光方法

传统意义上的研抛模是指贴在刚性研磨盘上的聚氨酯、沥青和抛光布等各类软质材料, 其具有一定

的弹性, 但是柔度不可控。而柔度可控的研抛模是指在抛光过程中, 存在于抛光工具和工件间隙内, 由智能材料组成的黏稠抛光液。该抛光液在外界场的作用下发生相态转变, 其柔度可变、可控, 能够用于可控柔性抛光, 主要包括 MRF、EFP、EMRF 和 STP 等加工方法。

W. I. Kordonski 等人^[21,22]将电磁学、流体动力学理论、分析化学与光学加工结合, 提出了磁流变抛光 (Magnetorheological Finishing, MRF), 其利用磁流变抛光液在可控磁场中的流变特性进行抛光, 如图 3 所示。磁流变液在高强度的梯度磁场环境中会瞬间固化, 成为具有粘塑性的 Bingham 介质, 非磁性的磨粒从基液中析出至抛光液表面, 形成柔性研抛模。当其通过工件与抛光盘形成的狭小间隙时, 对工件表面产生很大的正压力和剪切力, 使磨粒与工件表面接触并产生摩擦, 达到工件表面材料去除的目的。

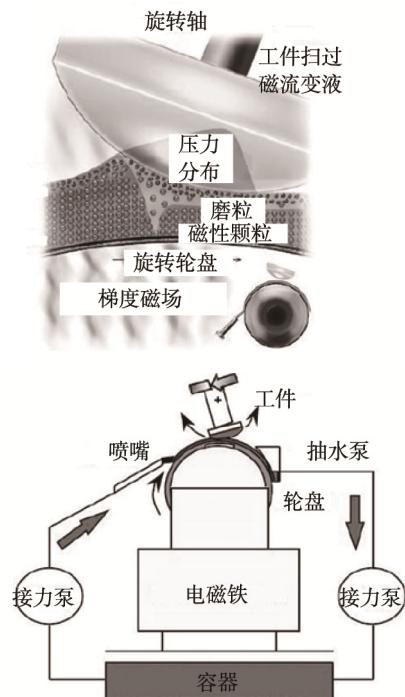


图 3 磁流变抛光原理及装置
Fig.3 Principle of MRF and its device

Rochester 大学光学加工中心于 1995 年研制出正置式轮式磁流变抛光设备, 并用于光学元件加工^[23,24]。在此基础上, 德国 Markus Schinhaerla 等人^[25,26]根据磁流变抛光的特点, 从抛光区域的抛光缎带基本形状着手, 建立了磁流变抛光的材料去除模型。印度 Manas Das 等人^[27]将磨料流技术与磁流变抛光技术相结合, 提出了一种新的加工方法 (MRAFF), 并用此方法加工复杂几何形状的不锈钢零件, 取得了良好效果。韩国 Kim 等人^[28,29]研制了磁流变抛光装置, 并利用该

装置对 BK7 玻璃和 Si_3N_4 陶瓷进行大量基础试验。国内, 长春光学精密机械与物理研究所的张峰于 1999 年率先展开 MRF 的研究^[30]。国防科技大学的李圣怡等人建立了 MRF 的材料去除数学模型, 并制作了一系列的 MRF 抛光设备^[31]。清华大学冯之敬^[32]、湖南大学尹韶辉^[33]以及广州工业大学的阎秋生^[34]等学者均对 MRF 进行了研究。

电流变抛光 (Electrorheological fluid-assisted polishing, EFP) 是一种基于电流变效应的抛光方法, 由日本学者 Kuriyagawa 首先提出, 其利用电流变液在外加电场下瞬间呈现的类固体特性抛光工件, 抛光机理如图 4 所示^[35]。在电场作用下, 电流变抛光液中的分散相颗粒会被极化, 并在电场方向呈微观链状, 而磨粒则吸附在粒子链上。最终, 抛光液在工件表面形成宏观的研抛模, 通过控制电场来改变研抛模的柔度和局部形状, 从而进行工件的抛光处理。图 4a 工件为非导体材料, 需要辅助电极; 图 4b 工件为导体材料, 可直接视作电极。

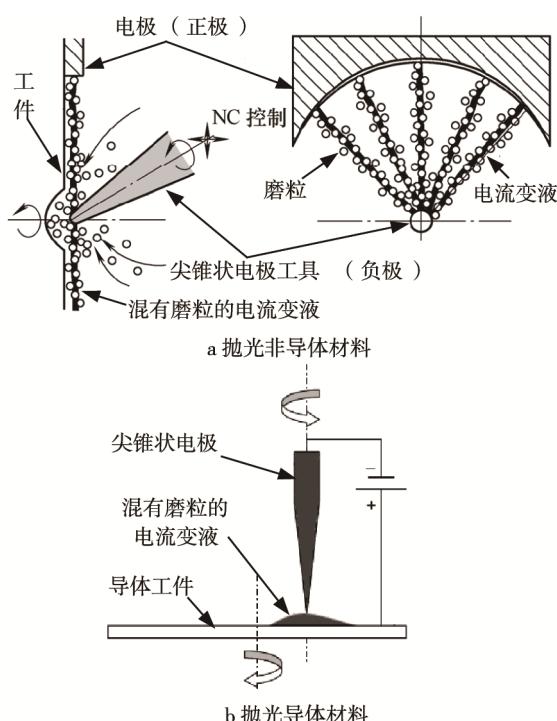


图 4 电流变抛光原理

Fig.4 Principle of EFP: a) polishing of non-conductor materials, b) polishing of conductor materials

针对于 EFP 加工原理和工艺方面的研究, Kuriyagawa 等人使用环形电极加工光学玻璃, 并研制出微小非球面抛光装置^[36]。Tsuyoshi Kaku 率先运用 EFP 抛光非球面透镜硬质合金模具, 研究不同工艺参数对加工效果的影响^[37]。W.B. Kim 对硅片等材料进行了抛光处理, 观察强电场环境下电流变抛光液去除材料的微观现象^[38]。广州工业大学路家斌等人用

Fe_3O_4 磨料加工光学玻璃, 分析了抛光压力以及抛光液剪切速度与材料去除率之间的关系^[39]。吉林大学张雷等人设计出集成电极工具, 可以用于导体和非导体的抛光, 而不需要另设电极装置^[40]。

除了以上的柔性研抛模可控方法, 还有综合电流变与磁流变特点的电磁流变抛光 (Electro-magneto-rheological polishing, EMRP) 方法^[41], 以及基于非牛顿流体剪切增稠效应的剪切增稠抛光 (Shear thickening polishing, STP) 方法等^[42]。

1.3 基于数控机床控制的柔性抛光方法

20 世纪 70 年代发展起来的小工具 CCOS 技术充分发挥了数控系统的优越性, 但 CCOS 技术采用刚性研磨盘, 且对曲面的适应能力有限。国内外开始在 CCOS 基础上开发各种柔性接触方式的抛光技术。其中, 数控砂带抛光 (CNC Abrasive Belt Polishing, CNC ABP) 技术是数控机床在柔性可控抛光领域比较成熟的应用之一, 其抛光工具由砂带、接触轮、砂带支撑轴等组成, 主要用于航空发动机、汽轮机和水轮机等设备中叶片、叶盘的高效抛光, 如图 5 所示^[43]。

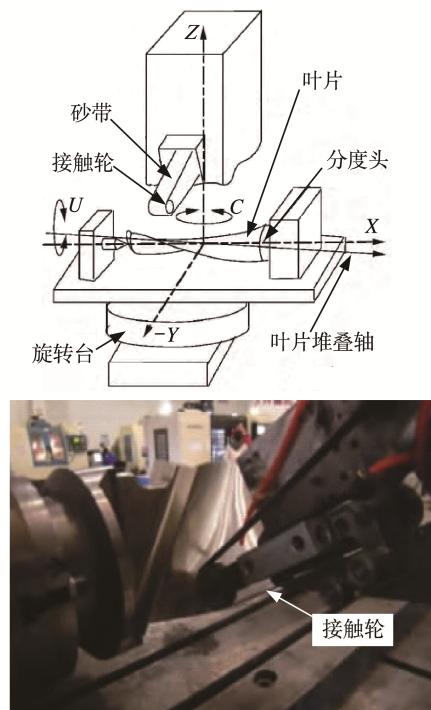


图 5 五轴联动数控砂带抛光装置

Fig.5 Polishing device of five-axis integrated CNC ABP

CNC ABP 柔性抛光的原理主要体现在三个方面: 1) 选用柔性接触轮。如图 6a 所示, 接触轮使用弹性橡胶材料, 对曲面有一定自适应能力。轮表面开槽, 使砂带和接触轮间有充分的变形空间, 起到柔性作用。2) 抛光机设计有柔性执行机构, 可实现对工

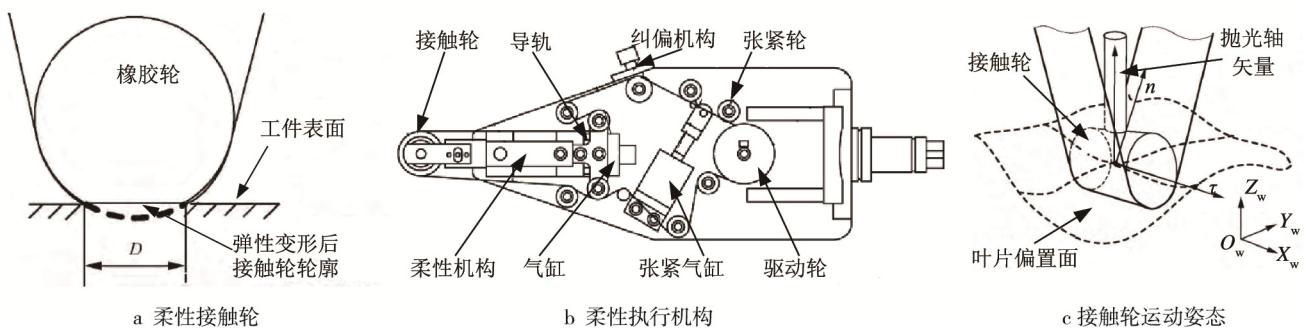


图 6 机床控制柔性抛光原理

Fig.6 Principle of CNC ABP: a) flexible contact wheel, b) flexible actuator, c) moving posture of contact wheel

件的随形抛光。如图 6b 所示。柔性机构可沿导轨直线移动, 接触轮在抛光过程中产生自动退刀, 通过控制气缸压力实现抛光力的自动调节。再结合观测器的 BP 神经网络 PID 控制, 可实现“恒力抛光、变力加载”工艺^[44]。3) 合理的数控编程用于调整机床主轴矢量, 进而控制接触轮的运动姿态。在图 6c 中, 数控系统使抛光轴矢量 T 尽可能接近抛光点处的法向矢量 n , 可满足抛光轮接触压力方向与柔性机构收缩方向基本一致。

在数控机床柔性可控抛光方面, 英国 Cyril-Adams 研制的涡轮叶片砂带磨床、Rolls-Royce 研制的叶片宽砂带型面磨床、加拿大瑞尔森大学研制的并联研抛机床和日本三菱公司研制的汽轮机叶片多轴数控砂带磨床, 均已实现工程应用^[45]。国内的研究起步较晚, 但已全面展开。重庆大学研究了四轴、六轴、七轴联动数控砂带磨削机床, 并研制出相关设备^[46]。江南大学张秋菊等对六轴联动数控抛磨机床中接触轮的位姿进行了研究^[47]。

1.4 基于机器人控制的柔性抛光方法

近些年, 机器人技术发展迅速, 其在抛光领域的应用越来越广泛。相对于数控机床抛光系统, 机器人抛光系统具有负载低、柔韧性高、能够以较低的造价实现更高自由度的特点。目前, 机器人柔性抛光 (Robot Flexible Polishing, RFP) 的研究以机器人研抛系统、力-位控制技术、研抛轨迹规划以及加工工艺为主。

机器人柔性抛光系统通常由机器人本体、末端执行器和工件构成。图 7 是一种机器人柔性抛光系统的原理及装置^[48], 主体由两个平面四杆机构组成。抛光过程中, 码盘确定进给摆杆位置, 电流传感器检测抛光力大小, 步进电机通过丝杠带动抛光轮横向进给, 机器人重复定位, 从而实现系统的恒压力柔性抛光。

机器人柔性抛光研究方面, 日本 Fusaomi Nagata 研制出了基于 CAD/CAM 力位混合控制的机器人研抛系统^[49]。韩国釜山大学研制出 5 自由度抛光机器

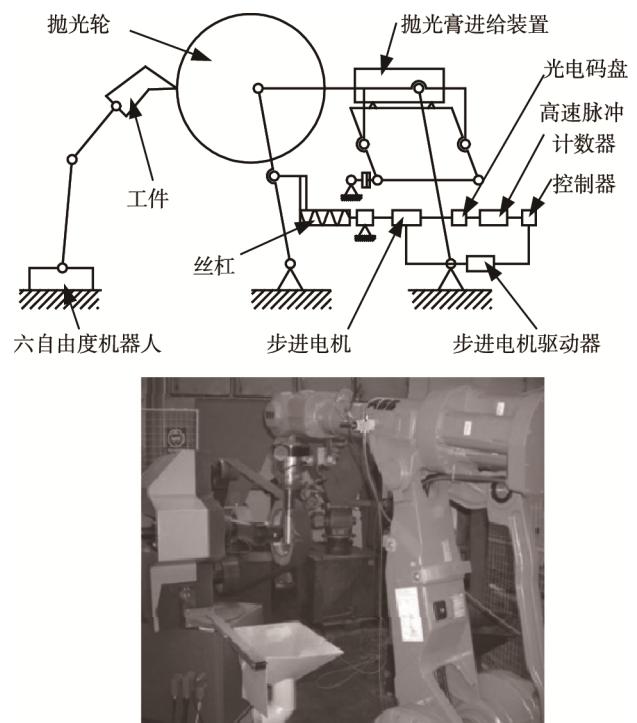


图 7 机器人柔性抛光系统原理及装置

Fig.7 Principle of RFP and its device

人, 并对其末端执行器的控制和抛光轨迹规划进行了研究^[50]。澳大利亚悉尼大学研制出专用的研磨抛光机器人终端执行器, 配合气动研磨抛光工具进行了特定的研磨抛光实验^[51]。在国内, 中国科学院以有机玻璃为研抛加工对象, 对抛光机器人的控制进行了研究^[52]。目前, 以机器人为控制平台的抛光技术正在蓬勃发展。

2 几种可控柔性抛光技术对比

上述几种柔性抛光技术的加工机理和技术特点比较如表 1 所示。SLP 和 BTP 的柔性体现在抛光工具外形可变上, 且都是基于弹性力学理论。其中, SLP 利用自身的应力控制系统控制研磨盘产生弹性变形, 加工效率显著提高, 但是抛光设备复杂、成本高。BTP

表 1 柔性抛光技术加工机理比较
Tab.1 Comparison on machining mechanism of flexible polishing technologies

| 抛光方法 | 柔性抛光机理 | 材料去除机理 | 技术特点 |
|--------------|--------------|-------------------------------------|----------------------------|
| SLP | 弹性力学理论 | 主动变形磨盘作用下的材料塑性引入应力控制系统；有效控制中、去除高频误差 | |
| BTP | 弹性力学理论 | 弹性变形气囊作用下的材料塑性去除 | 气囊结构与进动运动理论结合 |
| MRF、EFP、EMRF | 智能材料的场效应 | Bingham 流体的塑性剪切 | 磨头局部形状和柔度可控；亚表面损伤少；抛光液实时更新 |
| STP | 剪切增稠效应 | 非牛顿流体弹性剪切层磨料微切削作用去除材料 | 剪切增稠流变特性下的抛光液会形成类似“固着磨具” |
| CNC ABP | 柔性机械结构与力/位控制 | 精密机床控制下的小工具头抛光 | 采用柔性接触轮、执行机构；基于气动柔顺控制；精度高 |
| RFP | 柔性机械结构与力/位控制 | 机器人控制下的小工具头抛光 | 机器人柔性大、自由度高；加工效率高；应用多种传感技术 |

抛光设备简单，通过改变气压控制气囊的形变和柔度，再结合进动运动理论，可自适应复杂曲面型，但是其模具磨损大，还会出现运动干涉的情况。MRF、EFP 和 EMRF 的柔性体现在研抛模上，其局部形状和柔度可利用智能材料在外界场作用下的相变特性加以控制。MRF 等技术具有材料去除特性恒定、加工效率较高、亚表面损伤少、加工碎屑实时去除等优点，但是智能材料抛光液不稳定，易沉降，配制成本昂贵。STP 的柔性也体现在柔性研抛模上，但其是基于非牛顿流体的剪切增稠效应，除了具有 MRF 等的优点，还有控制简单、环保、加工成本低等好处。CNC ABP 和 RFP 的柔性体现在机械装置结构柔性和力/位控制柔性上，其最大的优点在于对加工时间和抛光工具姿态的准确控制上。

由于抛光机理和工艺的差异，不同柔性抛光处理得到的表面质量差别也很大。就抛光效果而言，SLP 的磨盘与工件仍为刚性接触，材料表面损伤比较严重。BTP 则未能消除边缘效应，而且无法抛光高陡度曲面。MRF 等基于“研抛模”柔度可控的半固着磨粒加工，有较高的加工精度，但其存在一个共性问题，即研抛模刚性不足，导致抛光效率低。CNC ABP 和 RFP 凭借控制系统的优点，有着较高的加工效率，但是精度明显不足，应当将其控制优势与新型抛光工艺结合起来，做到高效率、高精度抛光。

综上所述，不同柔性抛光方法从柔性机理、去除函数特性、抛光精度、抛光成本、抛光材料等方面都有着不小的区别，对上述几种柔性抛光技术可以进行定性总结，见表 2。

表 2 柔性抛光技术加工效果比较
Tab.2 Comparison on machining effects of flexible polishing technologies

| 抛光方法 | 抛光成本 | 抛光效率 | 亚表面损伤 | 适合抛光的形状 | 抛光材料 | 表面粗糙度/nm |
|--------------|------|------|-------|---------|-------------|----------|
| SLP | 高 | 中 | 有 | 高陡度复杂曲面 | 超大型空间非球面镜 | <10.0 |
| BTP | 较高 | 中 | 有 | 小型复杂曲面 | 金属、非金属等各型材料 | 0.64 |
| MRF、EFP、EMRF | 高 | 中 | 轻微 | 平面、凸型曲面 | 金属、非金属等各型材料 | 0.50 |
| STP | 中 | 中 | 无 | 平面、典型曲面 | 硬脆、软脆性难加工材料 | <10 |
| CNC ABP | 高 | 高 | 有 | 叶片等复杂曲面 | 金属材料 | <200 |
| RFP | 较高 | 较高 | 有 | 平面、一般曲面 | 金属材料 | <200 |

3 发展趋势

目前对可控柔性抛光技术的研究还处于起步阶段，国内的研究单位基本都在进行单一的课题研究，尚未形成成熟的柔性抛光理论体系。随着对高精度、复杂曲面加工的不断追求，可控柔性抛光研究有可能为社会带来巨大的经济效益。从目前的研究状况来

看，可控柔性抛光将朝如下的几个方向发展：

1) 可控柔性抛光理论仍需进行深入系统研究。复杂的抛光过程和落后的形面检测技术，导致对去除机理的认识仍不清晰。同时，可控柔性抛光呈现形式也各不相同，尚未有学者对其进行系统的研究和阐述。另外，如何更好地实现抛光工具对面型的自适应和抛光力对接触点的自适应仍是待解决的难题。

2) 工艺数据库的建立。柔性抛光技术，尤其是

MRF 等以智能材料作为抛光头的抛光方法, 涉及的工艺参数众多, 抛光材料广泛, 对不同材质、表面构型、精度要求很高, 选择合理加工参数可有效提高加工效率, 降低加工成本。因此, 迫切需要根据已有的试验数据建立和完善各种可控柔性抛光技术的工艺和专家数据库。

3) 可控柔性抛光工艺参数控制与形面检测的智能化。传感器技术的发展, 将使越来越多的传感器应用到抛光设备中, 如压力传感器、温度传感器等将检测到的信号反馈到控制系统, 供其做出决策, 最终改善抛光效果。另外, 加工检测技术, 尤其是在线测量技术的开发将会得到重视。总之, 加工设备的智能化程度关系到加工的稳定性、加工效率以及加工精度。

4) 多种可控柔性抛光工艺之间的复合化。为了提高加工控制精度和抛光效率, 同时保证加工的表面质量, 综合不同抛光技术的优势, 产生出新的复合或组合抛光方法。柔性抛光头与柔性控制系统相结合, 可控柔性抛光方法与电、磁、化学相结合等。

5) 更多的智能材料将用于可控柔性抛光。目前, 用于可控柔性抛光方法的智能材料有磁流变液、电流变液、剪切增稠液等。今后, 还可以研制可控柔性磨粒完全固着的抛光工具, 如以磁流变弹性体等一系列的智能纳米材料为载体制作的抛光工具, 可以根据需要调节磁场大小来控制弹性体柔度, 以实现柔性抛光。

总而言之, 可控柔性抛光技术反映出现代最新抛光技术的本质和特点, 同时为提高材料表面处理的加工精度和加工效率提供了新的研究思路, 拥有巨大的发展潜力和商业价值, 一定会吸引一大批优秀学者对其进行探究。

参考文献:

- [1] 李圣怡, 彭小强. 光学零件可控柔体制造的理论基础与方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 1-9.
LI Sheng-yi, PENG Xiao-qiang. Basic Theory and Method of Controllable Compliant Tools for Optic Elements Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 1-9.
- [2] 杨力, 郑耀, 曾志革, 等. 大型非球面反射镜的柔性光学制造技术[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 490-492.
YANG Li, ZHENG Yao, ZENG Zhi-ge, et al. The Flexible Optical Manufacturing Technologies for Large Aspheric Mirror[J]. Optical Technique, 2001, 27(6): 490-492.
- [3] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.
YUAN Ju-long, WU Zhe, LV Bing-hai, et al. Review on Ultra-precision Polishing Technology of Aspheric Surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 167-177.
- [4] MARTIN H M, ANGEL J R P, CHENG AYS. Use of an Actively Stressed Lap to Polish a 1.8-m Parabolic[C]//Proceedings of the European Southern Observatory Conference on Very Large Telescopes and Their Instrumentation. Garching: European Southern Observatory (ESO), 1988.
- [5] MARTIN H, ANDERSON D, et al. Progress in the Stressed-lap Polishing of a 1.8-m f/1 Mirror[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1990, 1236: 682-690.
- [6] ANDERSON D, BURGE J, KETELSEN D, et al. Stressed-lap Polishing of 3.5-m f/1.5 and 1.8-m f/1.0 Mirrors[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1991, 1531: 260-269.
- [7] KIM D W, BURGE J H. Rigid Conformal Polishing Tool Using Non-linear Visco-elastic Effect[J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2242-2257.
- [8] MARTIN H, BURGE J H. Status of Mirror Segment Production for the Giant Magellan Telescope[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2016, 99: 116-120.
- [9] 罗霄. 采用平转动应力盘技术加工超大口径非球面的研究[D]. 长春: 中国科学院, 2011.
- [10] LUO Xiao. Fabrication of Large Aspherics Using Stressed Lap with Orbital Tool Motion[D]. Changchun: Chinese Academy of Science, 2011.
- [11] LUO X, ZHENG L, ZHANG X. Finite Element Analysis Simulation and Experimental Verification of the Stressed Lap's Deformation Accuracy[J]. Applied Optics, 2011, 50(5): 782-787.
- [12] 崔向群, 高必烈, 汪达兴, 等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. 光学学报, 2005, 25(3): 402-407.
- [13] CUI Xiang-qun, GAO Bi-lie, WANG Da-xing, et al. A New Polishing Technology for Large Diameter and Deep Aspherical Mirror[J]. Acta Optical Sinica, 2005, 25(3): 402-407.
- [14] CHEN M, FENG Y, WAN Y, et al. Neural Network Based Surface Shape Modeling of Stressed Lap Optical Polishing[J]. Applied Optics, 2010, 49(8): 1350-1354.
- [15] BINGHAM R G, WALKER D D, KIM D H, et al. Novel Automated Process for Aspheric Surfaces[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2000, 4093: 445-450.
- [16] WALKER D D, BINGHAM A T H, BROOKS D, et al. New Results from the Precessions Polishing Process Scaled to Larger Sizes[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2004, 5180: 15-28.
- [17] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BINGHAM R G, et al. The Precessions Process for Efficient Production of Aspheric Optics for Large Telescopes and Their Instrumentation[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2002, 4842: 1-10.

- 73-84.
- [16] ANDERSEN T, ARDEBERG A, BECKERS J, et al. The Euro50 Extremely Large Telescope[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2002, 4840: 214-225.
- [17] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BINGHAM R G, et al. Precessions Aspheric Polishing: New Results from the Development Program[J]. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2003, 5180: 15-28.
- [18] 高波, 谢大纲, 姚英学, 等. 气囊式工具抛光新技术[J]. 光学技术, 2004, 30(3): 333-336.
- GAO Bo, XIE Da-gang, YAO Ying-xue, et al. New Technology of Ballonet Tool for Polishing[J]. Optical Technique, 2004, 30(3): 333-336.
- [19] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 2-6.
- JI Shi-ming, JIN Ming-sheng, ZHANG Xian, et al. New Technology of Ballonet Tool Polishing Technology Applied to Die Free Surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6.
- [20] 王飞, 张健, 彭利荣, 等. 气囊抛光过程的运动精度控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2220-2228.
- WANG Fei, ZHANG Jian, PENG Li-rong, et al. Motion-precision Control in Ballonet-polishing[J]. Optics Precision Engineering, 2015, 23(8): 2220-2228.
- [21] KORDONSKI W I. Adaptive Structures Based on Magnetorheological Fluids[C]//Proc 3rd Int Conf Adaptive Struct. San Diego: TPC, 1992.
- [22] PROKHOROV I V, KORDONSKY W I, GLEB L K, et al. New High-precision Magnetorheological Instrument-based Method of Polishing Optics[J]. OSA OF&T Workshop Digest, 1992, 24: 134-136.
- [23] JACOBSS D, GOLINI D, HSU Y, et al. Magnetorheological Finishing: A Deterministic Process for Optics Manufac-turing[C]//International Conference on Optical Fabrication and Testing. Tokyo: SPIE, 1995.
- [24] KORDONSKY W, PROKHOROV I V, GORODKIN S R, et al. Magnetorheological Polishing Devices and Methods: US, 5449313[P]. 1995-09-12.
- [25] MARKU S, GORDON S, RICHARD S, et al. Mathematical Modelling of Influence Functions in Computer-controlled Polishing: Part I[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32: 2888-2906.
- [26] MARKU S, GORDON S, RICHARD S, et al. Mathematical Modelling of Influence Functions in Computer-controlled polishing: Part II[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32: 2907-2924.
- [27] MANAS D, JAIN V K, GHOSHDASTIDAR P S. Fluid Flow Analysis of Magnetorheological Abrasive Flow Finishing (MRAFF) Process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48: 415-426.
- [28] KIM D W, CHO M W, SEO T, et al. Experimental Study on the Effects of Alumina Abrasive Particle Behavior in MR Polishing for MEMS Applications[J]. Sensors, 2008, 8(1): 222-235.
- [29] KIM D W, LEE J W, CHO M W, et al. Ultra Precision Polishing of Si_3N_4 Ceramics Using Magneto rheological Fluids and Diamond Abrasives[J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2009, 10(3): 290- 295.
- [30] 张峰, 张学军, 余景池, 等. 磁流变抛光数学模型的建立[J]. 光学技术, 2000(2): 190-192.
- ZHANG Feng, ZHANG Xue-jun, YU Jing-chi, et al. Foundation of Mathematics Model of Magnetorheological Finishing[J]. Optical Technique, 2000(2): 190-192.
- [31] PENG Wen-qiang, LI Sheng-yi, GUAN Chao-liang, et al. Improvement of Magnetorheological Finishing Surface Quality by Nanoparticle Jet Polishing[J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 410-416.
- [32] ZHANG Yun, FENG Zhi-jing, WANG Yu-yue, et al. Study of Magnetorheological Brush Finishing (MRBF) for Concave Surface of Conformal Optics[J]. Advanced Materials Research, 2012, 497: 170-175.
- [33] 尹韶辉, 徐志强, 陈逢军, 等. 小口径非球面斜轴磁流变抛光技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 33-37.
- YIN Shao-hui, XU Zhi-qiang, CHEN Feng-jun, et al. Inclined Axis Magnetorheological Finishing Technology for Small Aspherical Surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 33-37.
- [34] LU Jia-bing, YAN Qiu-sheng, YU Jun, et al. Parametric Study of Micro Machining with Instantaneous Tiny Grinding Wheel Based on the Magnetorheological Effect of Abrasive Slurry[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2008, 31(1): 113- 124.
- [35] KURIYAGAW T, SYOJI K. Development of Electrorheological Fluid Assisted Machining for 3-dimensional Small Parts[J]. Journal of Japan Society for Precision Engineering, 1999, 65(1): 145-149.
- [36] ZHANG L, KURIYAGAW T, KAKU T, et al. Investigation into Electrorheological Fluid-assisted Polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45: 1461-1467.
- [37] TSUYOSHI K, TSUNEMOTO K, NOBUHITO Y. Electrorheological Fluid-assisted Polishing of WC Micro Aspherical Glass Moulding Dies[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2006, 9: 109-119.
- [38] KIM W B, MIN B K, LEE S J. Development of a Padless Ultraprecision Polishing Method Using Electrorheological Fluid[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, s155-156(1): 1293-1299.
- [39] LU J B, YAN Q S, TIAN H, et al. Polishing Properties of Tiny Grinding Wheel Based on Fe_3O_4 Electrorheological Fluid[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4954-4957.
- [40] 张雷, 贺新升, 张莹, 等. 新型电流变抛光工具开发及其抛光实验[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(4): 1009-1014.

- ZHANG Lei, HE Xin-sheng, ZHANG Ying, et al. Development of New Type ER Fluid-assister Polishing Tool and Its Polishing Experiment[J]. Journal of Jinlin University, 2010, 40(4): 1009-1014.
- [41] LU Jia-bin, YAN Qiu-sheng, TIAN Hong, et al. Effect of Abrasive on the Machining Performance of the EMR Effect Based Tiny-grinding Wheel[J]. Advanced Materials Research, 2010, 135: 24-29.
- [42] 李敏, 吕冰海, 袁巨龙, 等. 剪切增稠抛光的材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 142-151.
- LI Min, LV Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Material Removal Mathematics Model of Shear Thickening Polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 142-151.
- [43] 蔺小军, 杨艳, 吴广, 等. 面向叶片型面的五轴联动柔性数控砂带抛光技术[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 2074-2082.
- LIN Xiao-Jun, YANG Yan, WU Guang, et al. Flexible Polishing Technology of Five-axis NC Abrasive for Blade Surface[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 2074-2082.
- [44] HUANG Z, HUANG Y, ZHANG W W, et al. The Development Cutter Location Algorithm for the 6-axis Simultaneous CNC Abrasive Belt Grinding Complex Furnace[J]. Key Engineering Materials, 2009, 416(9): 375-380.
- [45] ZHONG Z W. Recent Advances in Polishing of Advanced Materials[J]. Materials and Manufacturing Process, 2008, 23(5): 449-456.
- [46] 黄智, 黄云, 张明德, 等. 自由曲面六轴移动砂带磨削机床试验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31(6): 598-602.
- HUANG Zhi, HUANG Yun, ZHANG Ming-de, et al. Testing of a Six-axis Computer Numerical Control Abrasive Belt Grinding Machine Based on Free-form Surface[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(6): 598-602.
- [47] 石颖, 张秋菊. 六轴联动叶片砂带抛磨中接触轮姿态的确定[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(2): 196-200.
- SHI Hao, ZHANG Qiu-ju. Determination of Contact Wheel Position and Orientation for Six-axis Blade CNC Abrasive Belt Grinding System[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(2): 196-200.
- [48] 唐杰, 王涛, 常青, 等. 模具抛光机器人柔性终端执行器设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2016(2): 263-266.
- TANG Jie, WANG Tao, CHANG Qing, et al. Design and Analysis of Flexible End-effector for Mould Polishing Robot[J]. Machinery Design& Manufacture, 2016(2): 263-266.
- [49] FUSAOMI N, KEIGO W, YUKIHIRO K. New Finishing System for Metallic Molds Using a Hybrid Motion/Force Control[C]//International Conference on Robotics& Automation. Taiwan: IEEE, 2003.
- [50] LEE M C, GO S J. A Robust Trajectory Tracking Control of a Polishing Robot System Based on CAM Data[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 17: 177-183.
- [51] FURKAWA T, RYE D C. Automated Polishing of an Unknown Three Dimensional Surface[J]. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 1996, 12(3): 261- 270.
- [52] 杨林, 赵吉宾, 李论, 等. 有机玻璃研磨抛光机器人控制研究[J]. 机械设计与制造, 2015(4): 105-107.
- YANG Lin, ZHAO Ji-bin, LI Lun, et al. A Study of Grinding and Poishing Robot Force Control for Plexiglass[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(4): 105-107.