

表面质量控制及检测

磨料射流表面抛光研究综述

陈逢军^{1,2}, 唐宇¹, 苗想亮¹, 尹韶辉¹

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学(常州) 装备机械研究院, 常州 213164)

摘要: 作为精密超精密光学制造工艺过程中的一个重要环节, 各种新型表面抛光方法与工艺始终吸引着科研人员不断深入研究与探索。磨料射流抛光方法为小型复杂零件的表面抛光提供了一个新思路, 成为精密超精密光学加工技术的重要组成部分。对磨料射流表面抛光过程中衍生的磨料水射流抛光、磁射流抛光、负压吸流抛光、磨料气射流抛光、冰粒水射流抛光、纳米胶体射流抛光的抛光原理、方法及特点进行了综述, 分析了各射流表面抛光技术材料去除的最新发展; 从加工原理、磨料选择、抛光精度、数学模型等方面对上述新型射流抛光技术进行深入分析与比较, 其中磁射流抛光、纳米胶体射流抛光、磨料水射流抛光的抛光精度较高, 可以实现表面粗糙度纳米级的超精密抛光, 而磨料气射流抛光、冰粒射流抛光从加工成本上来讲则相对较低。最后, 对磨料射流表面抛光在去除函数优化、精度效率的提高、应用范围扩展、在线检测、商业化应用等方面的发展趋势进行了预测。

关键词: 磨料射流; 射流抛光; 超精密抛光; 表面加工; 光学加工

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)11-0119-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.019

Review on the Abrasive Jet Surface Polishing (AJP) Technology

CHEN Feng-jun^{1,2}, TAGN Yu¹, MIAO Xiang-liang¹, YIN Shao-hui¹

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Institute of Machinery Equipment, Hunan University (Changzhou), Changzhou 213164, China)

ABSTRACT: As an important link in precision optical manufacturing process, study and investigation of various new polishing methods and process always attract attention of researchers. The abrasive jet polishing technology provides a new approach for surface polishing of small complex parts, and may become a very important part of precision and ultra-precision optical processing technology. This paper reviewed the principle, method and features of the novel polishing methods derived from the abrasive jet surface polishing process such as Abrasive Water Jet, Magnetorheological Jet Polishing, Negative Pressure Polishing, Abrasive Air Jet, Ice Water Jet, and Nano-particle Jet Polishing, and analyzed the new development of material removal in these methods. The machining principle, the selection of abrasive, the polishing precision, the mathematical models of these polishing methods were analyzed in-depth and compared. It was found that the polishing precision of NJP, MJP and AWJ was relatively high, which could realize the nano-scale surface roughness, while the cost of AAJ and IWJ was relatively low. At last, the future research direction

收稿日期: 2015-08-21; 修订日期: 2015-09-18

Received: 2015-08-21; Revised: 2015-09-18

作者简介: 陈逢军(1979—), 男, 博士, 助理教授, 硕士生导师, 主要研究方向为超精密加工与控制。

Biography: CHEN Feng-jun (1979—), Male, Assistant professor, Master supervisor, Research focus: ultra-precision machining and controlling.

and tendency of AJP technology in several aspects, such as the optimization of the remove function, the increase of the efficiency and precision, extension of the application fields, the online testing and the commercial application were prospected.

KEY WORDS: abrasive jet polishing; fluid jet polishing; ultra-precision polishing; surface machining; optical processing

非球面光学元件被广泛用于天文、军事、航空、航天等高尖端领域,由于对其加工精度和表面质量的要求越来越严格,在铣削、车削、磨削等工艺后必须要通过非球面抛光技术对工件表面进行修正。传统的非球面抛光依靠手工操作,加工效率低,对操作人员的要求很高,且难以保证抛光质量与重复性^[1]。因此,国内外学者开始对新型抛光方法进行研究,这也成为超精密光学制造领域的一个重要课题。

磨料水射流抛光(abrasive water jet polishing, AJP)正是这一背景下的产物, AJP 以其独特的材料去除方式,稳定而细小的去除函数以及对工件形状较强的适应性脱颖而出,成为一项新兴的抛光方法。在 AJP 研究的基础上,许多学者对其进行了优化改造,衍生了许多新型的磨料射流抛光技术,代表为磨料气射流抛光、冰粒射流抛光、磁射流抛光、纳米胶体射流抛光、负压吸流抛光等,磨料射流抛光的发展如图 1 所示。图 2 则显示了近 10 年来国内外在磨料射流抛光领域出版的文献统计,可见磨料射流抛光技术已逐渐被研

究人员关注和认可,热度出现持续上升。

1 典型磨料射流表面抛光

1.1 传统磨料流体抛光

通过磨料对材料表面的微切削作用实现材料微量去除的典型方法之一是磨料水射流抛光,一种典型的三轴控制的 AJP 抛光装置如图 3 所示^[2];磨料和水在磨料混合系统中均匀混合后,在压力系统的作用下吸入到喷嘴,射向工件表面形成射流,通过磨料水射流低浓度、高速度的特点,完成材料去除。

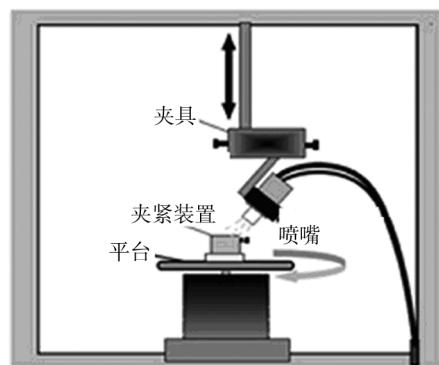


图3 磨料水射流表面抛光装置

Fig. 3 Device of abrasive water jet surface polishing

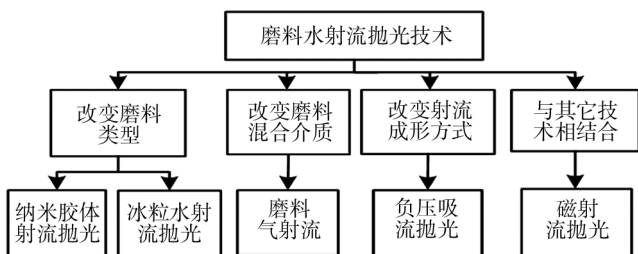


图1 磨料射流表面抛光技术发展

Fig. 1 Development of abrasive jet surface polishing

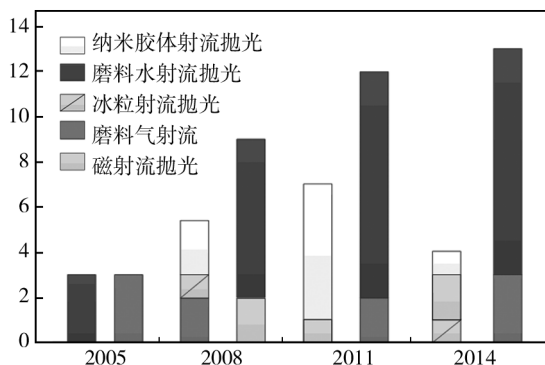


图2 近10年来磨料流体抛光文献统计

Fig. 2 Literature statistics of abrasive fluid polishing in the last decade

AJP 将射流束当成抛光头,可以对任意复杂形状的工件进行抛光,且加工材料非常广泛,加工过程中亚表面损伤很小,对边缘效应的控制也非常明显。国外对 AJP 研究起步较早, Osamu^[3] 用 AJP 对平面光学玻璃修形,抛光后玻璃面形的 PV 值由 151 nm 降低到 29 nm。Beaucamp 和 Namba^[4] 基于最新的多相流计算方法模拟液体和空气的动态界面,并用 AJP 加工了镀镍光学模具,获得了表面粗糙度为 1 nm,面形精度为 47 nm 的表面。Pham Huu Loc 等^[5] 用 AJP 对经过磨削后的铅基非晶合金材料进行抛光,60 min 后表面粗糙度 R_a 值由 657 nm 降低到 16 nm。近年来,国内苏州大学、西安工业学院、西南科技大学等科研机构对 AJP 进行了研究。其中,山东大学用 AJP 对硬脆材料氮化硅陶瓷进行了抛光, R_a 值由 2.63 μm 降低到了 0.34 μm ^[6]。西华大学研究了磨料蜡敷对 AJP 的

影响,发现蜡敷的磨料液在缩短抛光时间,提高抛光效率上有明显的效果^[7]。哈尔滨工业大学在 Finnie 研究的基础上建立了磨料水射流加工去除模型,并提出了射流加工中心区域材料去除量最高的新观点^[8]。

磨料气射流抛光(Abrasive air jet, AAJ)以冲蚀磨损理论为基础,利用气体驱动粒子冲击材料表面,在材料表面发生能量再分配^[9-10],其加工方式如图 4 所示^[11]。AAJ 非常适合高脆性非金属材料和高硬度金属材料的局部加工,试验表明将 AAJ 用于电火花粗加工后的 WC-Co 表面,可以使其平均表面粗糙度 R_a 从 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 降到 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 。日本的厨川常元^[12]提出了间歇式微磨料喷射加工(Micro Abrasive Intermittent Jet Machining, MAIJM),通过脉冲喷射的方式降低了磨料的消耗,提升了 AAJ 加工的效率。新南威尔士大学用 AAJ 对石英表面加工,表面粗糙度最低可达 20 nm ^[13]。目前国际上只有少数企业能研制并开发微型喷射加工设备,其代表为德国的 Little Things Factor 和日本的名古屋 Sintobator Pty Ltd,这也在一定程度上制约着 AAJ 技术的普及与发展。

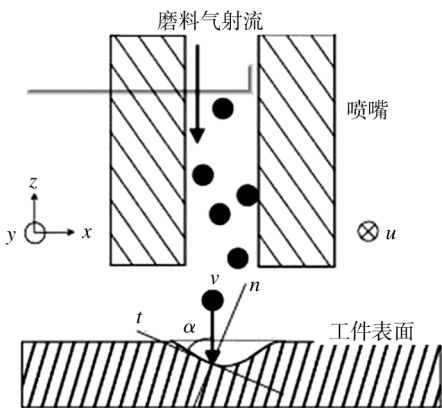


图 4 磨料气射流加工方式
Fig. 4 Principle of abrasives air jet

由于低温冰粒具有一定的粒度和硬度,在特殊环境下可以取代传统磨粒用于抛光,因而出现了冰粒射流抛光(ice jet polishing, IJP)技术。德国马格德堡大学研究出了如图 5 所示的冰粒射流装置:先通过冰粒制取装置得到低温冰粒,然后通过高速空气流卷吸冰粒从喷嘴射向工件表面,用该装置可以抛光 42CrMo4 等硬脆材料^[14]。西华大学郭宗环等^[15]用 IJP 对未经热处理的 45 钢抛光,可得 R_a 最低为 $4.9\text{ }\mu\text{m}$ 的表面。

IJP 已用于商业化应用,环球冰射流股份有限公司研发出了 MCS CX-91e 系列冰粒喷射设备及产品并得到成功应用。此外,李德玉^[16]根据液氮雾化沸腾

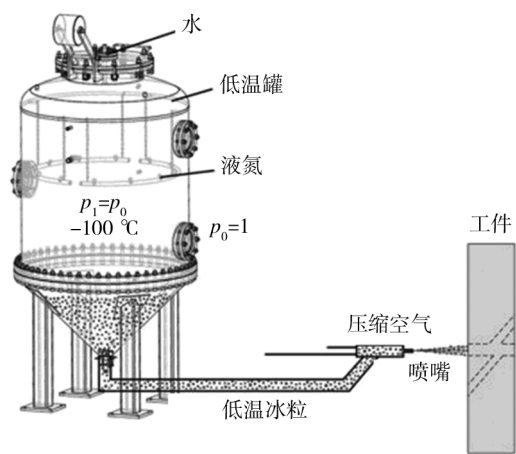


图 5 冰粒射流加工装置
Fig. 5 Ice water jet processing device

蒸发制冷和水滴冻结相变的规律设计制作了可供 IJP 利用的低温冰粒及时制取系统。虽然 IJP 是一种绿色廉价的加工方式,但仍存在着液氮雾化效果不佳、冰粒输送管遇冷变硬而失去柔性等缺陷,这些都制约着 IJP 的发展和应用,在机理和装置的完善上都还需要更深层次的研究。

1.2 复合或组合磨料流体抛光

为了进一步提高 AJP 加工得到的表面质量,在 AJP 的基础上,结合不同加工技术的优点,如磁流变抛光(Magnetorheological finishing, MRF)、弹性发射加工(Elastic Emission Machining, EEM)、空化效应,产生新的复合或组合抛光方法,也是时下磨料流体抛光领域研究的一个热点。

由于 AJP 的射流束容易受到空气的扰动,美国 QED 公司的研究人员将 AJP 与 MRF 相结合,提出了磁射流抛光技术(Magnetorheological jet polishing, MJP),工作原理如图 6 所示:利用喷嘴出口附近的局部轴向磁场对磁流变液射流束产生的稳定作用,形成稳定的细长射流束,大大提高了确定性抛光去除函数的稳定性^[17-18]。

由于 MJP 对抛光距离不敏感,使其在确定性抛光高陡度凹形光学零件和内腔复杂形面零件上有着独特的优势^[19]。西安工业大学用 MJP 对 K9 玻璃进行抛光,面形 PV 值从 162 nm 下降到 24 nm ,粗糙度 RMS 值由 43 nm 降低到 3.2 nm ^[20]。仁荷大学用 MJP 对铜和镍材料进行抛光试验,抛光斑点稳定、均匀,抛光后可得到 R_a 分别为 1.84 nm 和 2.31 nm 的超光滑表面^[21]。在 MJP 优化方面,近年来也取得了一些进

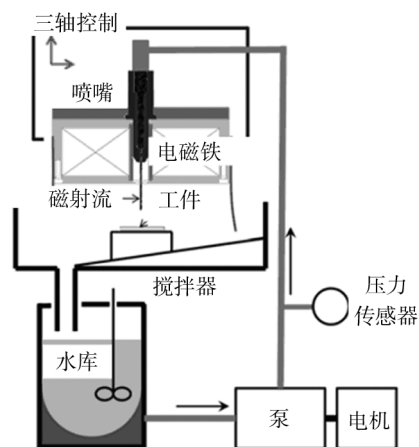


图6 磁射流抛光原理

Fig. 6 Principle of magnetorheological jet polishing

展,陈玉芳^[22]将磁屏蔽系统应用在磁射流抛光,有效地减少了磁射流抛光过程中产生的漏磁和工件磁化现象,提高了抛光精度。Wang等^[23]设计了如图7所示的偏心旋转抛光工具,对MJP去除函数进行优化,最终得到趋近因子为0.969的材料去除函数。

哈尔滨工业大学结合AJP和EEM的加工特点,用纳米胶体颗粒代替硬质磨料,提出了能得到超光滑

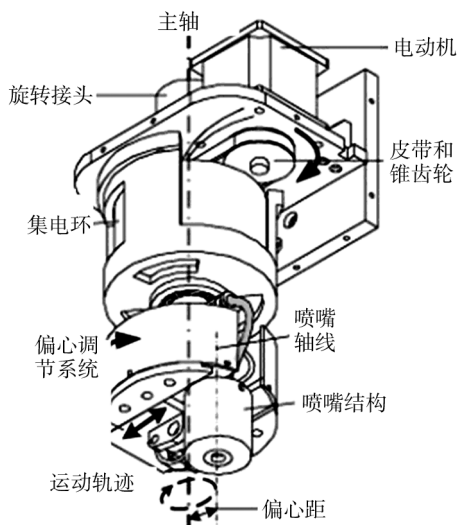


图7 带偏心旋转机构的磁射流抛光装置

Fig. 7 MJP device with Eccentric rotating mechanism

表面的纳米胶体射流抛光(Nanoparticle Jet Polishing, NJP),机理如图8所示^[24-25]。通过羟基之间的碰撞发生有氢键和水分子生成的键和反应(如式(1)所示),纳米颗粒胶体会将与之发生键和的工件表面原子带走,实现工件表层材料的原子级去除。

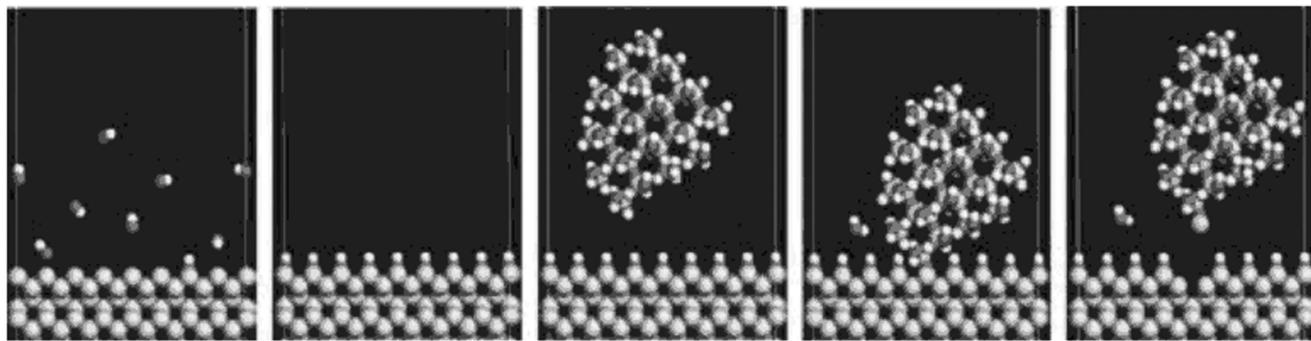


图8 纳米胶体射流抛光

Fig. 8 Principle of nanoparticle jet polishing



宋孝宗等^[26-28]设计了NJP抛光系统并应用到超精密、超光滑加工中。系统由 x, y, z 及 θ 轴组成,可实现纳米胶体射流抛光系统的微量进给及精确定位,对K9玻璃工件进行抛光试验,抛光后可得到1 nm以下的表面粗糙度。NJP可作为超精密加工的最后工序,国防科技大学用NJP继续加工MRF抛光后的石英玻璃,粗糙度的RMS值由0.72 nm降低到0.41 nm^[29]。此外,王星等将空化效应引入到NJP中,提出了纳米胶体动压空化射流抛光技术,进一步提高了NJP的效率和精度^[24,30-31]。

由于水力空化技术已经在破岩、清洗以及污染物处理方面得到广泛应用^[32-33],近年来许多学者将其引入到了超精密加工领域,浙江工业大学对磨粒流加载超声波激振,利用超声振动引发的空化现象实现湍流的强化和控制^[34]。为了降低空气对磨料射流束的扰动,提高磨料水射流抛光的精度和效率,湖南大学最新将空穴技术和AJP相结合,提出了基于负压空穴效应的抛光方法,其原理如图9所示^[35-36]:在密闭容器中产生负压空间,通过压差作用将储存箱中的磨料流体以一定的速度从喷嘴射出,在密闭容器中形成射流。通过负压状态下磨料流体产生空穴效应更为明

显的特点,加速工件表面材料的去除。该方法使磨料对材料的剪切作用和空穴效应的冲蚀作用同时进行,比起传统的 AJP 技术,抛光效率更高,表面质量更好。

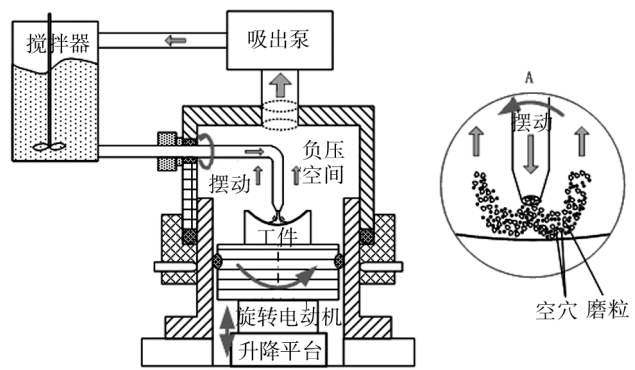


图 9 负压吸流抛光装置原理

Fig. 9 Principle of the Negative pressure polishing device

湖南大学用 Fluent 软件进行了射流和空化的仿真研究,如图 10 所示(仿真压力入口为 1 个大气压,压力出口为 0.02 MPa),验证了该方法的可行性。由于过强的空化效应会加大磨料对工件的破化作用,严重降低抛光所得的表面质量,因此将空化现象控制在合理的范围和复合抛光多参数的控制优化是该技术的研究重点。

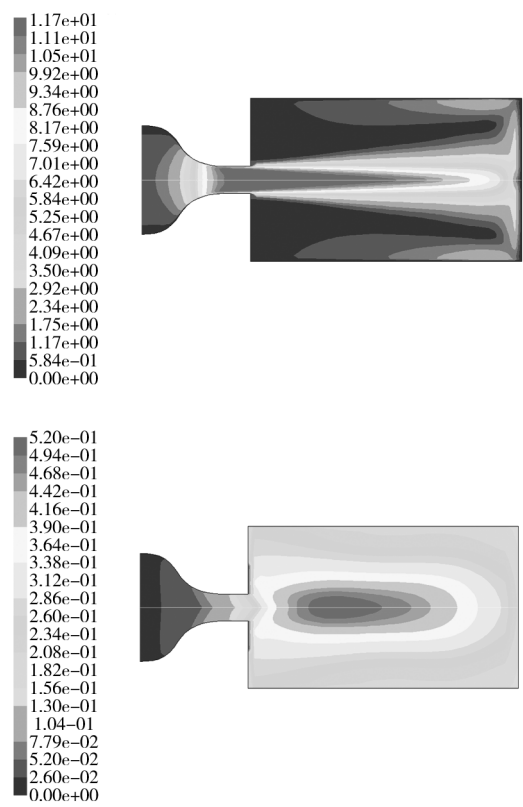


图 10 对射流流场和空化流场的仿真

Fig. 10 Simulation of the jet and cavataion

2 射流表面抛光技术比较

上述几种磨料射流表面抛光方法的主要作用机理比较如表 1 所示,AJP,AAJ,IJP,MJP,负压吸流抛光都是利用磨料粒子的剪切冲蚀完成材料的塑性去除,工件表面会残留磨料颗粒,在抛光过程中产生轻微的亚表面损伤。NJP 技术则是利用纳米胶体颗粒与工件表面的界面化学反应实现原子尺度范围内的材料去除,可以去除前面工序产生的亚表面损伤,作为超精密抛光的最终工序。图 11 显示了 AJP,AAJ,MJP 抛光时产生的射流束^[37-38],其中 AJP 和 AAJ 射流束会受到空气的扰动,引起射流束的发散,在一定程度上影响了去除函数的稳定性。MJP 通过磁场对磁流变液的硬化,大大提高了磁射流束的稳定性,不仅提高了确定性抛光去除函数的稳定性,还使得 MJP 有着不受抛光距离影响的优势。

在磨料的选择方面,AJP 和 AAJ 都属于传统磨粒

表 1 各磨料射流表面抛光机理的比较

Tab.1 Comparison on principle of abrasives jet surface polishing methods

方法	机械冲蚀	空化作用	化学作用
磨料水射流	√		
冰粒射流	√		
磁射流	√		
纳米胶体射流		√	√
磨料气射流	√		
负压吸流	√	√	

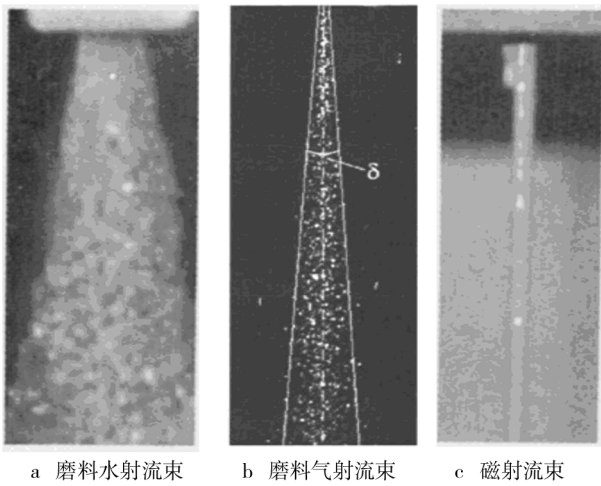


图 11 3 种射流束的比较

Fig. 11 Comparison of the three jets

流抛光,虽然成本较低,但抛光后不利于回收,容易造成磨料堵塞,浪费损失严重,因此对磨料的循环装置有着较高的要求。IJP 将低温冰粒取代传统磨料,虽然牺牲了抛光所得的表面质量,但在绿色环保上有着突出的优势。MJP 使用磁流变液做为磨料的载体,表 2 列出了几种典型的磁流变液的配方^[39-44],其复杂的流体配置与装置决定了 MJP 的成本要远高于其他磨料射流表面抛光技术,这也是阻碍磁射流技术推广的主要原因。

表 2 几种典型磁流变液配方

Tab. 2 Several typical formulations of magnetorheological fluid

研究单位	磁流变液配方
美国 Lord	48% (质量分数,下同) 的 Fe, 50% 的 Co 和 2% 的 V 组成的铁-钴合金 112 g, 与 2.24 g 硬脂酸分散剂及 30 g 的硅油
中国科学院	35% 的羟基铁, 55% 的水, 6% 的氧化铈, 3.5% 的活性剂, 0.5% 的添加剂
湖南大学	铁粉 30%, 乙二醇 10%, 油酸 5%, 聚乙烯吡咯烷酮 4.5%, 添加剂共 0.5%, 水 20%、油 30%
西安工业大学	5% 羟基铁粉, 2.5% 硅油, 40% 无水乙醇, 50% 聚乙二醇

由于作用机理的差异,不同的抛光方法所得的表面质量也有较大区别,试验结果表明,NJP 和 MJP 两种组合抛光所得的表面质量较高,可以实现对工件面形精度微米级、表面粗糙度纳米级的超精密抛光。这两种方法还处于研究的初期,在组合抛光的多参数优化问题和对大尺寸工件抛光效率低的局限性上还需要进行更深的研究,以得到更高的表面质量和加工效率。

从去除函数模型方面,李成光^[8]根据塑性剪切冲蚀机理建立了 AJP 加工去除模型,见式(2):

$$M = \begin{cases} \varphi \frac{\pi d^2}{4D^2} \left(\frac{6\chi}{\pi} \right)^{2/3} \left[\xi \left(\frac{1}{E} \right)^{6/5} \rho^{6/5} (\delta R)^{1.5} v_p^{2.4} (\sin \alpha)^{2.4} + \frac{mv_p^{2.4}}{8p} (\sin 2\alpha - 3\sin^2 \alpha) \right] & \alpha \leq 18.5^\circ \\ \varphi \frac{\pi d^2}{4D^2} \left(\frac{6\chi}{\pi} \right)^{2/3} \left[\xi \left(\frac{1}{E} \right)^{6/5} \rho^{6/5} (\delta R)^{1.5} v_p^{2.4} (\sin \alpha)^{2.4} + \frac{mv_p^{2.4}}{24p} \cos^2 \alpha \right] & \alpha \geq 18.5^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 为磨粒和金属工件抵抗变形能力的约化弹性模量, χ 为抛光液中的颗粒体积分数, φ 为磨料分布系数, p 为冲击工件材料的流动应力, m 为磨粒质量, α 为冲击交角, v_p 为冲击速度, δ 为磨粒的圆度因子, D 、 R 和 ρ 分别为磨粒的直径、半径和密度, d 为喷射距离, ξ 为等效值与冲击变形磨损系数有关。材料去除轮廓与单颗粒磨料去除量和磨料分布有关。

张学成^[17]根据计算流体力学建立了 MJP 在三维情况下的材料去除分布,见式(3):

$$R_m = \frac{k}{\mu_f} \Gamma(p_r - p_{cr}) (|\tau_{zx} U_x| + |\tau_{zy} U_y|) \quad (3)$$

式中: τ_{zx} 和 τ_{zy} 分别为三维情况下沿 z 轴射流 x 和 y 表面剪切力; p_r 为压强; p_{cr} 为材料去除的最小能量的临界压力值; U_x 、 U_y 分别为流体在 x 、 y 面上的速度; μ_f 为摩擦系数; k 为系数; Γ 为定义的一个分段函数。

宋孝宗^[45]根据量子化学建立了 NJP 的材料去除模型,见式(4):

$$\mu \cdot D \cdot V > \frac{E_{A-A}^b}{3\pi(\delta_d - \delta_b)} \quad (4)$$

式中: μ 为胶体动力粘度; D 为纳米颗粒粒径; V 为胶体射流速度; δ_b 和 δ_d 分别原键长和断裂时的键长; E_{A-A}^b 为工件表面原子的背键强度,当以上参数满足上式时就可以实现材料的去除。

综上所述,不同射流表面抛光方法从抛光原理、去除函数、抛光精度、抛光成本、抛光材料等方面都有着不小的区别,对上述几种抛光技术可以进行定性的总结比较,见表 3。

表 3 磨料射流表面抛光技术比较

Tab. 3 Comparison of different abrasive jet surface polishing processes

抛光方法	抛光成本(相对值)	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
磨料水射流抛光	较低(100)	低	轻微	平面、高陡度非球面	硬质合金、光学玻璃	2.2 nm
磨料气射流抛光	较低(80)	中	有	窄槽等结构形状	硬脆难加工材料	157 nm
纳米胶体射流抛光	较高(150)	低	无	小曲率非球面	单晶硅、光学玻璃	0.835 nm
冰粒水射流抛光	低(50)	低	有	金属平面	铝合金、不锈钢	4.9 μm
磁射流抛光	高(200)	低	轻微	高陡度凹形零件	光学玻璃等非球面	4.7 nm
负压吸流抛光	较低(100)	中	轻微	小型高陡度非球面	陶瓷、光学玻璃	纳米级

3 发展趋势

目前对磨料射流表面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,尚未形成成熟的磨料射流抛光理论体系。随着对高精度加工的不断追求,磨料射流表面抛光研究有可能为社会带来巨大的经济效益,在国家和政府的支持下将有着广阔的应用前景。从目前的研究状况来看,磨料射流表面抛光将可能向如下的几个方向发展。

1) 由于对磨料流体抛光技术的研究还不够深入,因此迫切需要进行理论的系统化研究。首先要对材料去除机理进行更进一步研究,目前大多数学者都是从宏观的圆形紊动射流冲击理论及弹性波能理论分析材料的去除机理^[46],由于不同的磨粒对材料的去除特性有不同的影响,因此有必要从微观的角度对单颗磨粒的材料去除进行研究。其次是射流去除函数的优化,对提高抛光精度、降低高频误差有着十分重要的意义,旋转抛光是优化去除函数的一个有效途径,磨料射流抛光领域的研究人员可以在这方面进行更多的试验探索。

2) 工艺数据库的建立。由于磨料射流表面抛光,尤其是NJP、MJP、负压吸流3种复合或组合抛光方法涉及的工艺参数多,抛光的材料广,对不同的材料,选择合理加工参数是提高加工效率、降低加工成本的有效手段。因此迫切需要根据已有的试验数据对工艺参数进行分析和优化,在此基础上建立和完善磨料射流表面抛光工艺数据库。同时,数据库的建立也可以为该技术后续的自动化发展打下坚实的基础。

3) 国内外在磨料射流表面抛光技术商业化应用上还有着较大的差距,荷兰TNO应用物理研究所的Faehnle和Brug与英国Zeeko公司合作将液体射流表面抛光技术和在线干涉测量技术结合起来,研发了七轴液体射流抛光机床FJP600^[47-48]。加拿大LightMachinery公司将可以对波前误差进行随机校正的软件用于磨料水射流抛光技术,研制开发了水射流抛光机床FJP1150F。由此可见,在线检测技术与机床的创新开发是影响磨料射流表面抛光技术推广的关键。国内基本上是对已有机床平台进行改造,很少见到利用磨料射流表面抛光方法新开发的设备,实验研究中搭建的平台不仅精度不高,而且稳定性不足。因此,完善抛光技术理论、创新抛光平台设计、优化抛光工艺也将是磨料射流表面抛光领域的一个重点研究方

向。

4) 磨料射流表面抛光技术要朝着节约化的方向发展。上述几种抛光方法中,AJP,AAJ,负压吸流抛光都是利用传统的磨粒进行抛光,在加工过程中会发生磨料堵塞、浪费损失严重。此外,在MJP加工中磁流变液的配置和循环也是影响其抛光成本的关键因素之一,这使得新型抛光液的开发和循环装置的创新优化设计成了磨料射流抛光领域的一个研究热点。

参考文献

- [1] 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):168—170.
YUAN Ju-long, WU Zhe, LYU Bing-hai, et al. Review on Ultra-precision Polishing Technology of Aspheric Surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (23): 168—170.
- [2] KE Juan-hung. Abrasive Jet Polishing of Micro-channels using Compound Sic Abrasives with Compound Additives [J]. Advanced Materials Research, 2013, 67 (5/8): 1151—1159.
- [3] HORIUCHI O, IKENO J, SHIBUTANI H, et al. Nano-abrasion Machining of Brittle Materials and Its Application to Corrective Figuring [J]. Precision Engineering, 2007, 31: 47—54.
- [4] ANTHONY B, YOSHIHARU N, WILHELMUS M. Surface Integrity of Fluid Jet Polished Tungsten Carbide [J]. Procedia CIRP, 2014 (13): 377—381.
- [5] PHAM H L. Investigation of Optimal Air-driving Fluid Jet Polishing Parameters for the Surface Finish of N-BK7 Optical Glass [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2013, 135(1): 15—22.
- [6] LIU Zeng-wen. Study on Polishing Technology for Hard-brittle Materials by a Micro Abrasive Water Jet [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1027: 52—57.
- [7] 袁卓林,雷玉勇,孙书蕾,等.微磨料水射流对工件表面抛光作用的研究[J].机床与液压,2010,38(21):4—6.
YUAN Zhuo-lin, LEI Yu-yong, SUN Shu-lei, et al. Study on Surface Polishing using Micro Abrasive Water Jet [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(21): 4—6.
- [8] 张成光,张勇,张飞虎,等.磨料水射流加工去除模型研究[J].机械工程学报,2015,51(7):189—194.
ZHANG Cheng-guang, ZHANG Yong, ZHANG Fei-hu, et al. Study on Removal Model of Abrasive Waterjet Machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (7): 189—194.

- [9] 李全来,黄传真,王军,等.微磨料气射流切割深度建模[J].工艺与检测,2009,8:88—92.
LI Quan-lai, HUANG Chuan-zhen, WANG Jun, et al. Cutting. Depth Model for Micro Abrasive Air Jet Machining [J]. Technology and Test, 2009, 8: 88—92.
- [10] 任延岗,吕玉山,孙建章.微磨料气射流加工特性实验研究[J].电子工业专用设备,2007,14(4):62—65.
REN Yan-kui, LYU Yu-shan, SUN Jian-zhang. Experimental Investigation on the Capabilities of Micro-abrasive Jet Machining [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2007, 14(4): 62—65.
- [11] FAN J M. Modelling the Erosion Rate in Micro Abrasive Air Jet Machining of Glasses [J]. Wear, 2008, 266 (9/10): 968—974.
- [12] 程灏波.流体辅助微纳抛光原理与技术[M].北京:科学出版社,2014.
CHENG Hao-bo. Principle and Technology of Fluid Assisted Polishing [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [13] 李全来.微磨料气射流成形加工表面粗糙度的研究[J].学术交流,2014,12:7—9.
LI Quan-lai. Surface Roughness Analysis on Micro Abrasive Air Jet Forming Technology [J]. Academic Communication, 2014, 12: 7—9.
- [14] KARPUSCHEWSKI B. Cryogenic Wet-ice Blasting-Process Conditions and Possibilities [J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2013, 62(1): 319—322.
- [15] 郭宗环,雷玉勇,陈林,等.冰粒水射流表面抛光试验研究[J].机床与液压,2012,40(23):35—37.
GUO Zong-huan, LEI Yu-yong, CHEN Lin, et al. Experimental Study on Surface Polishing using Ice Water Jet [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(23): 35—37.
- [16] 李德玉,段雄.冰射流中的冰粒制备技术[J].煤炭学报,2009,34(1):129—131.
LI De-yu, DUAN Xiong. Study on the Technology of Ice Particle Making for Ice Jet [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 129—131.
- [17] 张学成.磁射流抛光技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007.
ZHANG Xue-cheng. Study on Magnetorheological Jet Polishing Technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [18] WOOKBAE K. Material Removal of Glass by Magnetorheological Fluid Jet [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(4): 629—637.
- [19] 戴一帆,张学成,李圣怡,等.确定性磁射流抛光技术[J].机械工程学报,2009,42(5):171—174.
DAI Yi-fan, ZHANG Xue-cheng, LI Sheng-yi, et al. Deterministic Magnetorheological Jet Polishing Technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 42 (5): 171—174.
- [20] WANG Tan. Multiplex Path for Magnetorheological Jet Polishing with Vertical Impinging [J]. Applied Optics, 2014, 53(10): 2012—2019.
- [21] LEE J W. Investigation of the Polishing Characteristics of Metal Materials and Development of Micro MR Fluid Jet Polishing System for the Ultra Precision Polishing of Micro Mold Pattern [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(5): 2205—2211.
- [22] 陈玉芳,鲁聪达.磁性液体射流抛光磁屏蔽系统的设计与试验研究[J].机床与液压,2012,40(20):41—43.
CHEN Yu-fang, LU Cong-da. Design and Analysis of Magnetic Shielding System for Magnetorheological Fluid Jet Polishing [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(20): 41—43.
- [23] WANG Tang. Removal Character of Vertical Jet Polishing with Eccentric Rotation Motion Using Magnetorheological Fluid [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 9: 1532—1537.
- [24] WANG Xing, ZHANG Yong, ZHANG Fei-hu, et al. Preliminary Investigation on Nanoparticle Colloid Hydrodynamic Cavitation Jet Polishing Technology [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(6): 483—490.
- [25] 王星.纳米胶体空化射流抛光及其关键技术[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
WANG xing. Study on the Key Technology of Nanoparticle Colloid Hydrodynamic Cavitation Jet Polishing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [26] SONG X Z, ZHANG Y, ZHANG F H. Study on Removal Mechanism of Nanoparticle Colloid Jet Machining [J]. Advanced Materials Research, 2008, (53): 363—368.
- [27] SONG Xiao-zong. Ultra-precision Shaping and Ultra-smooth Polishing Investigation of High-purity Quartz Glass in Nanoparticle Colloid Jet Machining [J]. Advanced Materials Research, 2012, 426: 396—399.
- [28] SONG Xiao-zong. Research on the Characterization of Ultra-smooth K9 Glass Surface Polished by Nanoparticle Colloid Jet Machining [J]. Key Engineering Materials, 2014, 609: 552—556.
- [29] PENG Wen-qiang. Improvement of Magnetorheological Finishing Surface Quality by Nanoparticle Jet Polishing [J]. Optical Engineering, 2013, 52(4): 1—7.
- [30] 王星,张飞虎,张勇,等.纳米胶体动压空化射流抛光加工实验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2012,4(32): 23—26.
WANG Xing, ZHANG Fei-hu, ZHANG Yong, et al. Experimental Study of Nanoparticle Colloid Hydrodynamic Cavitation Jet Polishing Technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 42 (5): 171—174.

- tion Jet Polishing[J]. *Diamond & Abrasive Engineering*, 2012, 4(32): 23—26.
- [31] ZHANG Yong. Surface Quality Investigation of Nanoparticle Colloid Hydrodynamic Cavitation Jet Polishing Technology[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 487: 332—336.
- [32] 林兴华, 张敏革, 秦青, 等. 空化射流流场数值模拟的研究进展[J]. *化工进展*, 2015, 34(4): 921—927.
LIN Xing-hua, ZHANG Min-ge, QIN Qing, et al. Progress in the Numerical Simulation for Cavitation Jet Flow Field[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(4): 921—927.
- [33] 管金发, 邓松圣, 雷飞东, 等. 空化水射流理论和应用研究[J]. *石油化工应用*, 2010, 12(29): 16—20.
GUAN Jin-fa, DENG Song-sheng, LEI Fei-dong, et al. Research on the Theory and Application of Cavitation Water Jet[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2010, 12(29): 16—20.
- [34] 李宜燃. 软性磨粒流抛光超声波湍流强化发展过程与实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
LI Yi-ran. Ultrasonic Turbulence Strengthen and Experimental Studies Based on the Soft Abrasive Flow Machining[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [35] 陈逢军, 尹韶辉, 胡天, 等. 一种小口径光学件抛光方法及装置, 中国: 201210168034. 2[P]. 2015-10-10.
CHEN Feng-jun, YIN Shao-hui, HU Tian, et al. A Polishing Method and Device for Small Aperture Optical Parts, China: 201210168034. 2[P]. 2015-10-10.
- [36] 陈逢军, 尹韶辉, 胡天, 等. 一种小口径回转轴对称光学元件抛光装置及方法, 中国: 201210399583. 0[P]. 2014-06-18.
CHEN Feng-jun, YIN Shao-hui, HU Tian, et al. A Polishing Method and Device for Small Aperture Optical Parts with Rotary Shaft, China: 201210399583[P]. 2014-06-18.
- [37] 张学成, 戴一帆, 李圣怡, 等. 磁射流抛光时几种工艺参数对材料的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 1005—1008.
ZHANG Xue-cheng, DAI Yi-fan, LI Sheng-yi, et al. Effect on Material Removal of Magnetorheological Jet Polishing by Several Parameters[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 1005—1008.
- [38] 樊晶明. 微磨料气射流加工理论研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009.
FAN Jing-ming. The Research of Micro Abrasive Jet Machining[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2009.
- [39] 廖昌荣, 张玉麟, 陈伟民, 等. 汽车磁流变阻尼器的设计与试验研究[J]. *功能材料与器件学报*, 2001, 7(4): 350—354.
LIAO Chang-rong, ZHANG Yu-lin, CHEN Wei-min, et al. Design and Testing of a Magnetorheological Fluid Damper for Automobile[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2001, 7(4): 350—354.
- [40] 白杨, 张峰, 邓伟杰, 等. 磁流变抛光液的配制及其抛光的稳定性[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 2—5.
BAI Yang, ZHANG Feng, DENG Wei-jie, et al. Preparation of Magnetorheological Polishing Fluid and Its Polishing Stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 2—5.
- [41] 陈越. 光学玻璃磁流变抛光工艺试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
CHEN Yue. The Process Experimental Study on Magnetorheological Finishing for Optical Glass[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [42] 董惠文. 非水基磁流变抛光液及抛光工艺研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
DONG Hui-wen. Research on Non-water-based MR Finishing Fluids and Process of Magnetorheological Polishing[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- [43] 陈逢军, 徐志强, 程振勇, 等. 硅油基磁性复合流体斜轴抛光特性研究[J]. *制造技术与机床*, 2013(10): 34—36.
CHEN Feng-jun, XU Zhi-qiang, CHENG Zhen-yong, et al. Inclined Polishing Characteristics of Silicone Oil Based Magnetic Compound Fluid[J]. *Manufacturing Technology and Machine tools*, 2013(10): 34—36.
- [44] 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(17): 34—38.
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(17): 34—38.
- [45] 宋孝宗. 纳米颗粒胶体射流抛光机理及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
SONG Xiao-zong. Research on Mechanism and Experiments of Nanoparticle Colloid Jet Polishing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [46] 李兆泽. 磨料水射流抛光技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
LI Zhao-ze. Study on Abrasive Jet Polishing Technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [47] FAEHNLE O W, BRUG H V, FRANKEN H J. Fluid Jet Polishing of Optical Surfaces[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(28): 6771—6773.
- [48] BOOIJ S M, FAEHNLE O W, MEEDER M, et al. Jules Verne a New Polishing Technique Related to FJP[J]. *SPIE*, 2003, 5180: 89—100.