



纳米胶体射流抛光技术综述*

Review of Nanoparticle Colloid Jet Machining Technology

张勇 王星 张飞虎/哈尔滨工业大学机电工程学院

摘要: 纳米胶体射流抛光技术是一种超光滑表面加工方法, 加工范围广, 具有广泛的应用前景。本文回顾了纳米胶体射流抛光技术的提出以及目前的研究现状, 最后对其今后的发展进行了简单展望。

Abstract: Nanoparticle colloid jet machining is a new kind of ultra-precision machining technology. Based on the advantages of wide processing range, this technology is a promising manufacturing technology. In this paper, the causes and current state of the research of Nanoparticle colloid jet machining was introduced and the prospect and advice on the development of this technology in future were proposed.

关键词: 纳米胶体射流抛光; 超光滑表面; 无损加工

Keywords: Nanoparticle colloid jet machining; ultra-smooth surface; non-damage machining

0 引言

随着社会的发展, 超光滑表面和非球表面在现代科技中有着越来越广泛的应用。一方面, 在现代光学、微电子以及薄膜科学等许多领域, 器件表面要求达到超光滑表面的质量要求。例如, 在X射线光学系统中, 为了得到高反射率, 一般会要求极低的表面粗糙度并在器件表面镀膜, 这就要求其表面要采用表面粗糙度值(RMS)小于1nm的超光滑表面; 在激光系统, 光学元件需承受极高的辐照强度。因此, 必须减小镜面的散射以提高反射镜的抗激光损伤阈值, 这就需要镜面表面粗糙度值极低并且无亚表面损伤^[1,2]。另一方面, 非球表面由于具有简化仪器结构、提高仪器分辨率、改善仪器成像质量等优势, 在军用和民用领域都有极广泛的应用。大到激光核聚变光学系统、各种导弹保形光学头罩、机载光学探测系统, 小到与生活相关的照相机、投影仪, 到处都

有着非球面表面的广泛应用^[3]。因此, 如果有一种超精密加工方法, 能够方便高效的加工非球面表面, 使其表面质量达到超光滑表面的要求, 那么这种加工方法的应用前景是非常广泛的。

1 纳米胶体射流抛光技术的提出

目前的超精密加工方法根据材料去除原理, 可以分为机械作用去除、化学机械作用去除、高能粒子碰撞去除和化学作用去除。具有代表性的加工方法有计算机控制小工具头抛光(CCOS)、磁流变抛光(MRF)、液体射流抛光(FJP)、化学机械抛光(CMP)、离子束抛光(IBM)、等离子体化学加工(PCVM)、弹性发射加工(EEM)等。以机械作用实现材料去除的加工过程会给加工表面引入表面缺陷及表面变质层。因此, 虽然以机械作用去除材料的加工方法可以得到较低的粗糙度, 但很难得到高质量的超光滑表面。化学机械

抛光主要用于微电子领域硅片的平坦化加工, 不适用于非球面表面的加工。高能粒子碰撞加工的设备复杂、昂贵。等离子体化学加工会产生有毒气体污染环境, 弹性发射加工的效率太低。因此, 我们还需要需求一种新的超精密加工方法, 使其能够快捷、高效地加工达到超光滑表面要求的非球面表面。

纳米胶体射流抛光的灵感来弹性发射加工和液体射流抛光。弹性发射加工是利用聚氨酯小球搅动纳米胶体溶液, 使纳米胶体溶液中的纳米颗粒以一定速度碰撞工件表面并与其发生界面化学反应, 从而实现工件材料的去除。该方法加工的工件表面质量极好, 表层无塑性变形, 不产生晶格位错, 但是能量利用率低、加工效率极其低下、加工范围有限^[4,5]。液体射流抛光通过专门设计的喷嘴将含有磨粒的液体射向工件, 依靠磨料的高速冲击和冲刷而实现材料去除的一种方法。液体射流抛光由于使用液体作为抛光工具, 因此可以加工任意形状的表面, 并且加工中不会出现刀

* 基金项目: 航空科学基金(2009ZE77008)项目资助。

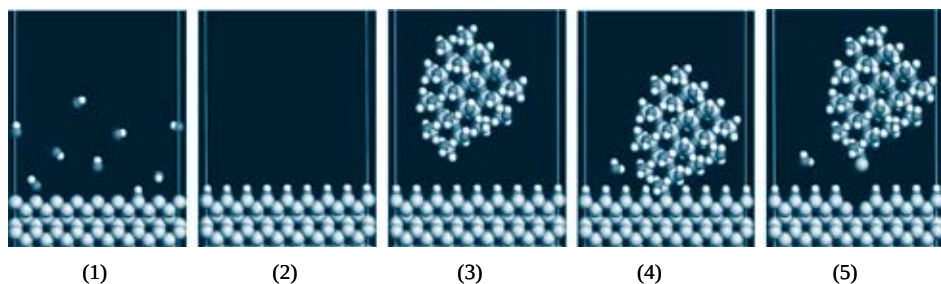


图1 纳米胶体射流抛光加工机理

具磨损和热影响问题,加工设备简单,加工过程清洁。但是由于是利用磨料的机械作用实现材料去除,因此避免不了这类加工方法的共同缺陷^[6-8]。

弹性发射加工和液体射流抛光加工各有优点和缺点,如果考虑利用它们各自的优点去补充对方的缺点,利用弹性发射加工的纳米颗粒代替硬质磨料,利用射流代替聚氨酯小球为加工进行提供能量,便形成了一种新的加工方法,即纳米胶体射流抛光。它能够在获得高质量超光滑表面的同时提高抛光加工的效率,有望全面提高超光滑表面加工的性能。

2 加工机理

纳米胶体射流抛光的加工过程可以分为3个阶段^[9-11]。

1) 胶体溶液中的羟基吸附在工件表面。如图1中(1)(2)所示。

纳米胶体溶液中存在很多具有很

强成键能力和很强反应活性的羟基。由于被加工表层原子未成键的电子的作用,抛光溶液中的羟基很容易与工件表层原子发生吸附。

2) 胶体中的纳米颗粒与吸附在工件表面的羟基发生碰撞,发生界面化学反应。如图1中(3)(4)所示。

纳米颗粒表面也存在不饱和的残键和不同键合状态的羟基。这些羟基有三种状态:孤立的羟基,缔合的羟基和双生的羟基。其中孤立的羟基和双生的羟基都有可能与吸附在工件上的羟基发生键合。纳米颗粒随同射流以一定速度与工件表面发生碰撞。碰撞时由于纳米颗粒的动能较小,因此不会对工件表面造成塑性变形。但是碰撞可以使纳米颗粒表面的羟基与原子表面吸附的羟基之间达到原子级结合,发生如下的分子键合反应。

3) 键合发生后,纳米颗粒会继续受到射流的作用,继而离开工件表面。离开工件表面时,纳米颗粒会与与之发生

键合的工件表面原子带走,实现工件表层材料的原子级去除。如图1中(5)所示。

3 加工设备

为了实现方便的对各种表面进行加工,纳米胶体射流抛光技

术设备需要满足以下几点要求^[11-13]:

- 1) 可以形成连续稳定、压强可调的微细胶体射流;
- 2) 纳米颗粒胶体抛光液连续循环使用,在循环过程中,保持纳米颗粒胶体抛光液的物理化学特性不变;
- 3) 可根据被加工表面的具体情况进行微量进给及精确定位。

根据以上要求,设计出实验所用加工系统。加工系统简图如图2所示。整个系统分为三个部分:液压系统为加工提供所需压力,纳米胶体循环系统依靠液压所提供压力实现对工件加工。数控系统实现加工的微量进给及精确定位。液压系统和纳米胶体循环系统两路系统相互隔离,实现加工系统的压力稳定并避免胶体溶液的污染。

加工时,首先使用蠕动泵向钢瓶中弹性气囊内注入胶体溶液,注入完毕后关闭注入系统管路,启动液压系统。液压油被液压系统压入钢瓶中,挤压弹性气囊,弹性气囊中胶体溶液被挤出喷射在工件表面,实现工件的加工。加工系统实物图如图3所示。

4 工艺参数

在对纳米胶体射流抛光技术进行的粗糙度实验中,对K9光学玻璃进行加工。加工前表面粗糙度值为3.805 nm (RMS),加工30min后为1.814 nm (RMS),加工120min后为0.779 nm (RMS)。粗糙度值实验结果表明,K9玻璃在加工后粗糙度值得到明显改善。

影响纳米胶体射流抛光的主要工艺参数^[11,14]有喷射压力、抛光时间、喷射距离、胶体浓度和胶体酸碱度。

随着喷射压力的增大,材料的去除量也增大,且呈现指数上升趋势。压力的上升将提高纳米颗粒的运动速度,单位时间内使更多的胶体粒子参与反应,并且压

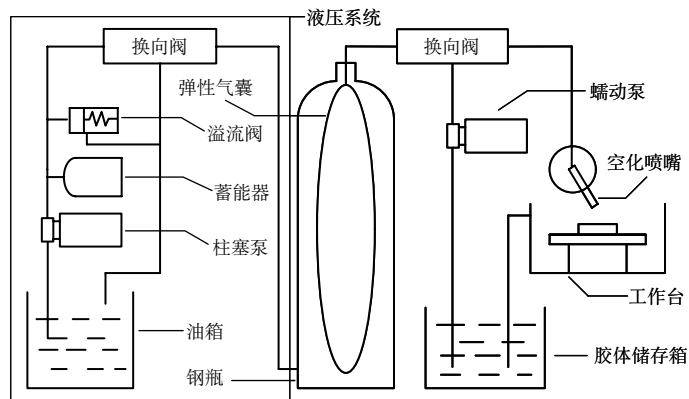


图2 纳米胶体射流抛光系统简图

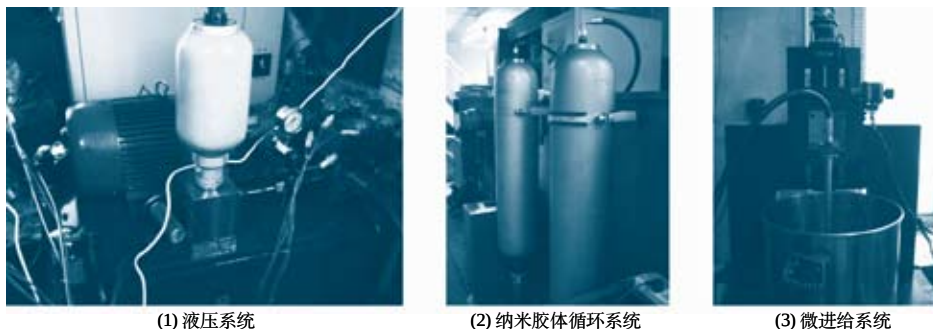
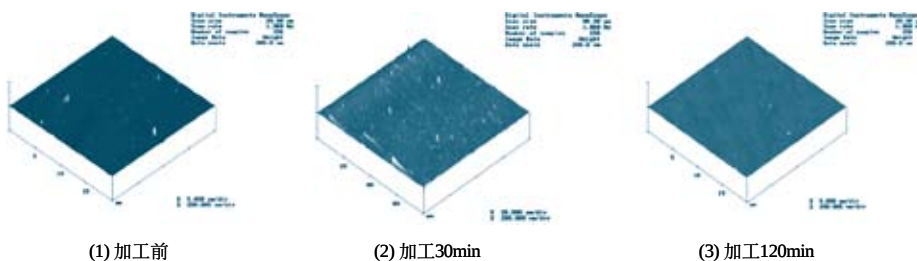


图3 纳米胶体射流抛光加工系统实物图

图4 纳米胶体射流抛光加工K9玻璃原子力显微镜图^[11]

力的增大影响纳米胶体颗粒总能量,较高的能量使得界面反应更容易进行。

随着抛光时间的增多,材料的去除量呈线性上升趋势。随着喷射距离的增大,造成喷射液流速衰减,因此,其材料去除率逐渐减小。胶体浓度对材料去除率的影响也保持线性关系,随着胶体浓度的增大,材料去除率也随着增大,这主要是由于胶体浓度的增大使抛光液中的羟基增多。

胶体酸碱度对材料去除率的影响如下:在酸性范围内,材料去除率随着pH值的增大而减小;在碱性范围内,材料去除率随着pH值的增大而增大。这是由于在酸性范围内,pH值的减小增多了工件表面的羟基数,而在碱性范围内,pH值的增大增多了抛光液中的羟基数的缘故。

5 结束语

综上所述,纳米胶体射流抛光可以方便地对非球面表面,自由曲面表面等表面进行加工,并且加工质量较好,是一项很有应用前景的加工方法。目前,纳米

胶体射流抛光还在不断研究中,以期在保证加工质量的情况下提高加工效率。提高纳米胶体射流抛光加工效率的途径主要考虑空化现象对其加工过程的强化,但空化现象对其加工过程的影响机理还不明确,这将是下一步的研究重点。

AST

参考文献

- [1] 高宏刚, 曹健林, 朱镛. 超光滑表面及其制造技术的发展[J]. 物理, 2000,29(10):610-614.
- [2] 李宝贵, 熊昌友, 李成贵. 超光滑表面加工方法[J]. 制造技术与机床, 2006,(6):60-66.
- [3] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] Kubota A, Mimura H, Inagaki K. Effect of particle morphology on removal rate and surface topography in elastic emission machining[J]. Journal of the electrochemical society, 2006,153(9):874-878.
- [5] Y Y M, Yamauchi K, Endo K.

Elastic emission machining[J]. Precision Engineering, 1987,9(3):123-128.

[6] Fahnle O W, van Brug H, Frankena H J. Fluid jet polishing of optical surfaces[J]. Applied optics, 1998, 37(28):6771-6773.

[7] 杨佩旋, 王成勇, 廖艳培. 微磨料浆体射流抛光技术[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008,(165):12-14.

[8] 方慧. 液体喷射抛光技术[D]. 苏州: 苏州大学, 2004:

[9] Song X, Zhang Y, Zhang F. Experimental Investigation on Polishing of Ultra Smooth Surface in Nanoparticle Colloid Jet Machining[J]. Proceedings of SPIE, 2009:7282.

[10] Song X Z, Zhang Y, Zhang F H. Study on Removal Mechanism of Nanoparticle Colloid Jet Machining[J]. Advanced Materials Research, 2008,53-54:363-368.

[11] 宋孝宗. 纳米颗粒胶体射流射流抛光机理及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010:

[12] Zhang F, Song X, Zhang Y, et al. Figuring of an ultra-smooth surface in nanoparticle colloid jet machining[J]. Journal of Micromechanics and Micro-engineering, 2009,19:1-6.

[13] Zhang F H, Song X Z, Zhang Y, et al. Polishing of ultra smooth surface with nanoparticle colloid jet[J]. Key Engineering Materials, 2009,404:143-148.

[14] 刘进忠. 纳米胶体射流抛光试验装置研制及工艺试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

作者简介

张勇, 哈尔滨工业大学副教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术。