

## 磨料水射流抛光技术及其发展

邵飞,刘洪军,马颖

(兰州理工大学有色金属新材料重点实验室,甘肃 兰州 730050)

**[摘要]** 磨料水射流抛光技术是应用于表面抛光加工的新技术。利用含有细小磨料粒子的抛光液在高压作用下,与工件表面发生冲击、冲蚀而微去除材料,以达到抛光目的。论述了磨料水射流抛光技术的基本原理和特点,以及影响抛光效果的主要工艺参数,并对其发展趋势进行了展望。

**[关键词]** 磨料水射流;表面抛光;磨料;工艺参数

**[中图分类号]** TG175;TP69

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2007)03-0064-03

## Polishing Techniques and Development of Abrasive Water Jet

SHAO Fei, LIU Hong-jun, MA Ying

(Key lab. of Advanced Non-ferrous Materials, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China)

**[Abstract]** Polishing technique of abrasive water jet (AWJ) is an advance process which can be applied to surface polishing. It makes use of high pressure liquid which has tiny abrasive to form an effect of impact and erosion on work-piece for polishing purpose. The postulate and specialty of AWJ were summarized. The mostly technique parameters were illuminated. The tendency of AWJ was viewed.

**[Key words]** Abrasive water jet; Surface polishing; Abrasive; Progress parameter

### 0 引言

抛光技术又称镜面加工,是制造平坦而且加工变形层很小,没有擦痕的平面加工工艺,抛光不仅增加工件的美观,而且能够改善材料表面的耐腐蚀性、耐磨性及获得特殊性能。在电子设备、精密机械、仪器仪表、光学元件、医疗器械等领域应用广泛。传统的抛光技术在抛光工具头无法触及的异形曲面、细长管件或者特殊材料的工件时,实行抛光加工的难度极大,甚至无法加工,选择合适的抛光方法和抛光工艺是提高产品质量的重要手段,许多非传统抛光技术应运而生,磨料水射流抛光技术就是其中之一。

### 1 磨料水射流简介

水射流是由喷嘴射出可形成不同形状的高速水流束,这种具有足够能量的水流束作用在材料上,可以对材料进行清洗、剥层、切割、粉碎等作业。水射流作业效率与泵的压力紧密相关,为使水射流技术广泛应用于大工业部门,人们研制高压发生设备。但由于高压设备成本居高不下,而且还给安全带来隐患,因此其应用也受到限制。后来人们发现,在射流中混合其它物质是提高射流性能的有效手段之一。磨料射流就是在射流中混入磨料粒子,高压流体作为载体使磨料粒子加速,这些磨料得到了

与流体接近的速度。由于磨粒较载体本身来讲质量大,硬度高,所以可以有效提高射流作业效率和射流作业能力。通常用水作为高压流体,这种射流人们称之为磨料水射流(Abrasive Water Jet,简称 AWJ)。

根据文献[1]记载,世界上最先研究和使用的磨料射流的是美国。20世纪60年代初 Bobo 首先用磨料射流钻井,这种方法大幅度提高了钻井速度,1963年 Bobo 取得了磨料射流钻井钻井装置专利权。1966年美国大西洋富田公司取得了磨料射流钻井钻头钻具专利权。1966年美国海湾石油公司取得了磨料射流钻井钻头喷嘴专利权。国际上大规模地对磨料射流的研究和应用始于20世纪70年代末,在20世纪80年代得到迅速发展。由于磨料射流系统简单,成本低,切削效率比相同条件的水射流高8~10倍,为此,在短短10年中磨料射流在清洗、除锈、切割和破碎岩石作业中得到了广泛的应用。

大连理工大学赵伟等人论述了高压水射流加工系统与增压原理<sup>[2]</sup>,并探讨了高压水射流的切割机理。蒋旭平等对高压水射流的冲击特性进行了理论分析和试验研究<sup>[3]</sup>,其结论是:冲击压力与泵压和靶距有关,且泵压一定的情况下,靶距越大,冲击压力越小。瑞典学者研究采用水射流控制车削外圆的切屑形状<sup>[4]</sup>,在车削加工中,切屑的形状控制相当困难,如果切屑的控制不好会大大影响零件的加工表面质量和加工精度,为了能够很好地控制切屑形状,实验采用压力80MPa,流量81L/min,射流垂直作用于刀具切削边缘处,成功地控制了切屑的上卷半径,并分析了水射流的动量与切屑的卷曲半径之间的关系,同时高压水射流在加工区域对刀具和工件起到冷却和润滑作用,使加工后的工件表面质量好,没有热变形和残余应力。

**[收稿日期]** 2006-11-31

**[作者简介]** 邵飞(1976-),男,江苏宜兴人,在读硕士,主要从事SLA原型表面处理的相关技术研究。

## 2 磨料水射流抛光

表面处理与剥层是水射流作业主要用途之一。磨料水射流抛光是利用由喷嘴小孔高速喷出的混有细小磨料粒子的抛光液作用于工件表面,通过磨料粒子的高速碰撞剪切作用达到磨削去除材料,通过控制抛光液喷射时的压力、角度及喷射时间等工艺参数来定量修正工件表面粗糙度的抛光加工工艺。

纯粹的磨料水射流抛光国内外学者做了一些工作。通过选用不同的喷射压力、磨粒粒度、靶距、流量以及横移速度等因素研究对材料表面粗糙度的影响,分析其抛光加工机理,建立其相应的理论模型。西南科技大学杨乾华作了磨液射流磨削抛光钛合金的试验<sup>[5]</sup>,取得了比较好的抛光效果,效率也很高,对抛光异形曲面工件的表面抛光加工具有一定的借鉴作用。荷兰Delft大学H van Brug等人曾进行过研究<sup>[6]</sup>,他们的实验结果表明:利用磨料水射流抛光,可使平面样板玻璃(BK7)的表面粗糙度由初始的475nm(rms)降到5nm。

### 2.1 磨料水射流抛光技术的基本原理

磨料水射流抛光的基本原理如图1所示。当压缩空气通过喷枪上喷嘴小孔高速喷出时,在喷嘴处产生负压,使液槽里搅拌好的含有细小磨料粒子的抛光液通过进液管吸入喷枪,从而形成高速射流,喷射到工件表面,借助于磨料粒子与工件表面高速碰撞,使工件上局部应力场应力高速集中,并快速变化,因而产生冲蚀、剪切,达到材料去除的目的。在抛光过程中,高速磨料粒子如同一把柔性的车刀,对工件表面进行切削加工。通过控制喷射的压力、角度及时间等参数来定量修正被加工工件表面的面形,以达到去除材料抛光的加工目的。抛光液喷出后,可通过回收装置返回盛有抛光液的容器,循环使用。

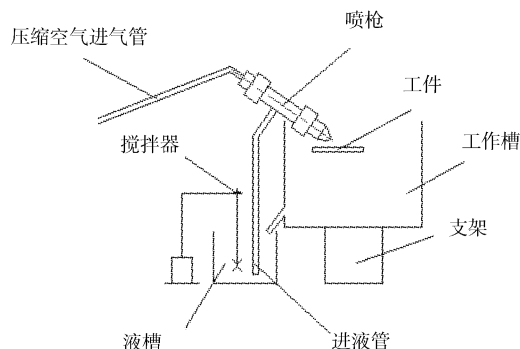


图1 磨料水射流抛光设备简图

Figure 1 The diagram of abrasive water jet polishing equipment

### 2.2 磨料水射流抛光技术的主要特点

1) 磨料喷射加工与喷砂工艺不同<sup>[7]</sup>,喷砂工艺的主要用途是清理工件表面,磨料喷射加工是利用磨粒对被加工材料进行切磨加工;喷砂工艺所使用的磨料粒度比喷射磨料加工中的磨料粒度更大;高速喷射的磨料微粒在严密控制下,能完成磨削抛光加工。

2) 与传统的抛光技术相比,它的“加工刀具”是液体状的,不存在磨具磨损的问题,去除函数保持恒定,面形精度易于控制。可不破坏零件原有的尺寸精度,而达到较高的表面光度。

3) 抛光头是一很小的液体柱,能适合各种诸如齿轮、叶

轮、各种模具、精密机械零件等各种型孔、型面及各种特殊复杂表面的抛光。抛光特性不受工件位置的影响,应用范围较广,既可用于加工金属材料,也可以加工非金属材料。

4) 磨料水射流抛光属于冷加工范畴<sup>[8]</sup>,加工时对材料无热影响,切削时无火花,工件不会产生热变形和热影响区,对加工热敏感材料尤为有利。同时由于在加工过程中抛光液不断循环流动,还能自动清除加工下来的碎屑。

5) 加工清洁,不产生有害人体健康的有毒气体和粉尘等,对环境无污染,提高了操作人员的安全性。抛光液基本不损耗,可重复使用,寿命较长。

6) 加工“磨具”为高速高压液流,加工过程中不会变钝,减少了磨具准备、刃磨等时间,效率高。喷嘴与加工表面无机械接触,能实现高速加工。

7) 设备维护简单,操作方便,可以灵活地任意选择加工起点和部位,可通过数控,容易地进行复杂形状的自动加工。

## 3 影响磨料水射流抛光能力和质量的因素

1) 磨料种类 常用的磨料有氧化物系、碳化物系、高硬磨料系及软磨料系等四类<sup>[9]</sup>。不同种类的磨料,其抛光效果是不同的,各有其适用范围。抛光时,首先应选择比工件材料硬度高的磨料种类,这样才能切入被加工物体内,使低硬度的物体表面受到切削加工。其次,要保证磨料粒子在磨削液中保持一定的化学稳定性,以免在加工过程中,与其它物质起化学反应。

2) 磨料粒径 一般来讲,采用越细的磨料加工就可以得到越细的表面粗糙度,但当对工件进行抛光时,采用的磨粒粒度根据原始表面粗糙度值选取,如果初始表面粗糙度值较小,可选用较细的磨粒直接加工即可;当初始表面的粗糙度值较大,先选用较粗的磨粒加工,加工到一定的表面粗糙度值后,再采用细的磨粒加工,粗磨粒的切削作用较强一些,这样可以提高加工的效率。

3) 喷射压力 对于给定的加工条件,工件材料的去除率对应一临界喷射压力<sup>[10]</sup>,小于临界喷射压力,没有材料去除发生,这是因为较低的喷射压力使射流中的磨粒对工件表面产生碰撞剪切去除的能量不足,只类似于弹性碰撞;当喷射压力大于临界喷射压力时,随着压力的升高,磨粒获得的动能也越大,使去除率提高。在一定压力下,可以根据单位时间的去除量控制加工时的参数,使工件的表面粗糙度达到最优。

4) 喷射时间 在一定时间段内,材料去除量与工作时间近似呈线性关系,材料去除量随工作时间的增加而线性增加,这与传统抛光技术中时间对去除量的影响是一致的<sup>[11]</sup>。随着作用时间的增长,去除量逐渐增加,工件的表面粗糙度亦随之减小。但当表面粗糙度增大到一定值时,其值不再随着去除量的增加而减小,同样趋于稳定。主要原因可能是在加工的初期,由于工件表面的凸处较多,磨粒的切削作用较强,随着时间的延续,凸处渐渐减低,磨料的横向运动对工件表面凸起不平处的切削作用相对减弱的结果。

5) 喷射距离 喷射距离指的是喷嘴口与工件待加工表面的距离。对于给定条件,材料去除率对应一最佳喷射距离<sup>[12]</sup>,因为在最佳喷射距离内,随着喷射距离的增加,磨料粒子运动惯

性能量加大,有利于材料的去除;但如果超出最佳喷射距离范围,对于给定的喷射压力,磨料粒子流压力和速度降低,磨料粒子到达工件表面的速度也相应减少,材料去除率降低。如果继续加大喷射距离,可能没有材料去除发生。

6) 喷射角度 由于磨料水射流抛光主要靠磨料粒子的剪切作用达到去除材料的目的,故在给定的加工条件下,存在着材料去除最佳喷射角度。这是由于在磨料喷射时,与工件表面发生碰撞的过程中,有一些磨料粒子被弹回而没有参与材料的切削。在最佳喷射角度内,被弹回磨粒比例随喷射角度增加而减少;当喷射角大于最佳喷射角时,随着角度的增加,被弹回的磨粒和磨料射流发生碰撞,使磨料流有效能量减少,材料去除率也相应降低。

7) 抛光液的成分 抛光液中悬浮的磨料浓度越高,单位时间内与工件表面单位面积发生碰撞的磨料粒子就越多,材料去除率相应提高。为提高磨料的浓度,可在抛光液中放入一定比例的助悬浮剂<sup>[13]</sup>,以便悬浮起更多的磨料粒子。在抛光金属材料时,可再加入少量的防锈剂。

#### 4 发展趋势

由于磨料水射流抛光加工所使用的设备简单,在进行抛光加工时可根据工件的形状特点、加工部位的加工要求,选择合适的喷嘴;针对不同的加工材料,选择相应的磨料,因此使用十分方便,特别适合加工一些用其它加工方法不能加工的工件<sup>[14]</sup>。

目前,随着科技的发展,在磨料水射流抛光技术基础上,与传统的抛光技术相结合,产生了新的抛光技术,如与金属电解抛光技术结合产生的电解磨料喷射复合抛光新工艺,其原理是:当混合液从喷嘴喷出时,电解液在喷嘴与工件之间形成导电介质,喷嘴与工件间距离较近且接通电解电源,则发生电解作用并在工件表面形成钝化膜。钝化膜会阻碍电解的继续进行,而磨料的喷射作用可以去除钝化膜,且轮廓凸峰处的钝化膜容易最先被去除,使凸峰处金属的电解溶解速度比凹处快,从而表面粗糙度得到改善。

大量研究表明,在磨料水射流抛光加工中,有超过 25 个加工参数对加工结果有直接的影响<sup>[15]</sup>。而在磨料水射流抛光加工中,只研究磨料种类、磨料粒度、喷射压力、喷射距离、喷射角度等几个参数对加工结果的影响是远远不够的。此外,磨料流

中磨料的分布规律及速度分布规律都有待于理论研究和实验验证;针对不同材料和加工条件的优化加工模型有待于完善。总之,磨料水射流抛光加工还处于发展和完善阶段,随着对加工机理认识和试验研究的深入,磨料水射流抛光在工业生产中,特别是在工件异形型面的光整加工中将会发挥更大的作用。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 山东:石油大学出版社,1998,55-60
- [2] 赵伟,刘晓冰,朱派龙. 制造业的一枝奇葩——高压水射流加工技术[J]. 机械设计与制造工程,1999,28(3):1-2
- [3] 蒋旭平,胡寿根,钟声玉. 高压水射流冲击特性分析及试验研究[J]. 上海机械学院学报,1991,15(2):107-110
- [4] Carford R, Kaminski J. Chip control in tube turning using a high-pressure water jet[J]. Processing Institute of Mechanical Engineering, Part B Manufacture Engineering, 1998, 212:362-369
- [5] 杨乾华,刘继光,徐慧,等. 磨液射流磨削抛光钛合金的试验研究[J]. 钛工业进展,2003,(2):22-24
- [6] Olive W Fahnle. Fluid Jet Polishing: removal process analysis[J]. SPIE Proceedings on Optical Fabrication and Testing, 1999, 3739:68-77
- [7] 杨建东. 高速研磨技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003. 145-150
- [8] 刘忠伟,邓英剑. 水喷射加工技术及其在机械领域中的应用[J]. 制造技术与机床, 2004, (2):37-40
- [9] 李伯民. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003,37-40
- [10] 方慧,郭培基,余景池. 液体喷射抛光材料去除机理的研究[J]. 光学技术,2004,(3):248-250
- [11] 杨建东,田春林. 高速研磨技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003. 214-216
- [12] 成建联,宋国英,李福援. 磨料水射流抛光时工艺参数对工件去除量的试验研究[J]. 西安工业学院学报,2002,22(1):67-71
- [13] 汤勇,周德明. 磨料流光整加工性研究[J]. 华南理工大学学报,2001,29(9):17-19
- [14] 杨世春. 表面质量与光整技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001. 380-384
- [15] Guo Z, Ramulu M, Jenkins M G. Analysis of the waterjet contact/impact on target material[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 33:121-139
- [7] Wang Y M, Jiang B L, Guo L X, et al. Antifriction property of microarc oxidation coating on titanium alloy under solid lubricating sliding condition[J]. Surface Review and Letters, 2004, 11(4/5):367-372
- [8] Ryu HyunSam, Song Won Hoon, Hong Seong Hyeon. Biomimetic apatite induction on Ca-containing titania[J]. Current Applied Physics, 2005,(5):512-515
- [9] 金凡亚,童洪辉,沈丽如,等. 钛合金微弧氧化陶瓷膜微观特性的分析[J]. 材料保护,2005,38(8):42-44
- [10] 郭宝刚,梁军,田军,等. 阳极电压对钛合金微弧氧化膜性能的影响[J]. 电镀与精饰,2005,27(3):1-4
- [11] 王亚明,雷廷权,蒋百灵,等. 交流窄脉冲占空比调制对钛合金微弧氧化陶瓷涂层的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2005,34(2):329-333
- [12] 王亚明,蒋百灵,雷廷权,等. 电参数对 Ti6Al4V 合金微弧氧化陶瓷膜结构特性的影响[J]. 无机材料学报,2003,18(6):1321-1327
- [13] 李哲奎,赵学枰,顾广瑞,等. 单极性脉冲频率对微弧氧化膜特性的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版),2005,27(5A):380-383
- [14] 李全军,吴汉华,汪剑波,等. 脉冲频率对纯钛微弧氧化膜生长特性的影响[J]. 无机材料学报,2006,21(2):488-492
- [15] Wu H H, Lu X Y, Wang X Q, et al. The effects of cathodic and anodic voltage on the characteristics of porous nanocrystalline titanium coatings fabricated by microarc oxidation[J]. Mater. Lett., 2005, 59:370-375
- [16] Borgioli F, Galvanetto E, Galliano F P, et al. Air treatment of pure titanium by furnace and glow-discharge processes[J]. Surf. Coat. Technol, 2001, 141:103-107

(上接第 45 页)