

文章编号 1004-924X(2003)02-0139-05

光学脆性材料的金刚石切削加工

张文生^{1,2}, 张飞虎¹, 董 申¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 黑龙江科技学院 机械系, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要:重点对脆性材料的超精密研磨、抛光加工技术及超精密磨削加工技术和超精密切削加工技术进行了分析研究。分析表明,硬脆材料光学元件主要应进行超精密研磨、抛光及超精密磨削加工;软脆材料光学元件主要应进行金刚石切削加工。对软脆材料金刚石切削进行了试验设计,指出了光学脆性材料的金刚石切削加工过程不同于金属加工过程,通过控制切削条件可以实现脆性材料塑性域加工,提高光学脆性材料的表面加工质量。

关键词:脆性材料;软脆材料;金刚石切削;试验设计

中图分类号: TQ171.684 **文献标识码:** A

Diamond cutting of optical brittle materials

ZHANG Wen-sheng^{1,2}, ZHANG Fei-hu¹, DONG Shen¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Dept. of Mechanical Engineering,
Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: Modern ultraprecision machining technologies essential for formation of ultraprecision optical surfaces on optical crystal, optical glass and other brittle materials, such as ultraprecision lapping, ultraprecision lapping, ultraprecision polishing, ultraprecision grinding, ultraprecision cutting, and ultraprecision diamond cutting of brittle materials in particular, are discussed in detail.

Key words: brittle material; soft-brittle material; diamond cutting; test design

1 引言

光学材料早在 17 世纪已开始应用,近年来发展较快。随着光-机-电领域的技术的进一步发展和其他技术领域的兴起,光学材料得到了应用和发展。自 20 世纪 60 年代激光出现后,其相干电磁场功率密度可达 $1 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$,相应的电场强度可与原来的库仑场强(约 $3 \times 10^8 \text{ V/m}$)相比较。因此,其极化率与电场的 2 次、3 次甚至更高次幂相关,从而开辟了非线性光学及其材料发展

这一领域。

用于频率转换的非线性光学晶体已取得了重大进展。通过频率转换器件可以得到各种频率的高功率激光,波长范围可以从红外至紫外。如,大口径的非线性频率转换器件用于强激光核聚变。由于光学脆性材料的加工具有“精”、“难”、“特”的特点,所以对于某些脆性材料(如陶瓷、KDP 晶体)如果能开发出富有竞争性的制造加工技术和先进加工工艺,并且能保证可重复加工零件的高精度,又可允许切削刀具有最好的开发利用,毫无疑问,其潜在的市场和利润将是可观的。为满足社

收稿日期:2002-08-19;修订日期:2003-02-21.

国家自然科学基金资助项目(No. 59835180)

会对光学脆性材料,如陶瓷、光学玻璃、人工晶体、石英、硅片和锗片等的日益需求,迫切需要开发出具有高精度、高效和高表面完整性的先进加工技术。在过去的十几年里,许多学者注重于应用金刚石磨削或切削方法的硬脆材料的加工机理和工艺实现研究,对硬脆材料的超精密加工研究的较多,虽取得了一些成就,但并没有形成系统化研究,还有很多工作需要去做。特别是对于软脆材料的加工机理和工艺实现的研究在国内几乎是空白且没有深入。因此,光学材料能否顺利发展和大量推广应用与其超精密加工技术水平直接相关。

硬脆材料、软脆材料是一个相对概念,是与其他脆性材料相比较得出的概念。由于硬脆材料研究的较多,而软脆材料(如 KDP 晶体)的加工研究国内未见报道。根据查阅资料,笔者把莫氏硬度 ≤ 2.5 的脆性材料称为软脆材料。光学脆性材料的应用虽然十分广泛,但这类材料脆性大,可加工性差。所谓脆性大,是指材料的弹性极限与强度极限非常接近;当材料所承受的载荷稍稍超过弹性极限时就发生断裂破坏。因此研究光学脆性材料的超精密加工技术具有重要意义。

2 超精密研磨、抛光加工技术^[1-4]

研磨、抛光技术已经过几千年的历史发展,古代研磨用于擦光宝石、铜镜等,近代作为抛光的前道工序用于加工精密零件,如透镜和棱镜等光学零件。最近的发展趋势是加工对象从加工金属、玻璃等转化为用于光学材料元件、电子工业的各种功能材料元器件的加工。研磨、抛光技术已发展到超精密研磨、抛光,计算机控制研磨、抛光及研磨、抛光自动化。为适应光-机-电等领域的要求,新原理的研磨、抛光技术不断问世,以适应特殊材料的超高精度、低表面粗糙度、无损伤的加工,如浮动抛光、水合抛光、弹性发射加工、机械化学抛光、磁流体抛光和电泳抛光等。

超精密研磨、抛光属于游离磨粒切削加工;超精密研磨是将注入磨料的研具,去除微量的工件材料,以达到高级几何精度(优于 $0.1 \mu\text{m}$)和优良表面粗糙度($R_a < 0.01 \mu\text{m}$)的方法。超精密研磨、抛光技术主要有两类:一类是为降低表面粗糙度或提高尺寸精度为目标,另一类是为实现功能

材料元件的功能要求为目标。对于光学单晶材料的加工,同时还要求平面度、厚度和晶相定向精度。对于电子材料的加工,除了要求高形状精度外,还必须达到物理或结晶学的无损伤理想镜面。

超精密研磨、抛光技术之所以能在光学材料超精密加工中得到如此广泛的应用,是因为它具有以下特点:采用“进化”加工原理,可获得很高的精度和接近几何学形状的超光滑完美表面;适合于大批量生产;加工方法简单,设备投资少;加工量可以控制,可实现原子级无损伤加工。

为了保证各种光学材料制成的光学元件的性能,采用各种原理或方式,目前已开发了一系列的无加工变质层、无表面损伤的超精密研磨、抛光方法。

3 超精密磨削加工技术

超精密磨削是在切削、研磨之后发展起来的。20 世纪 70 年代以前,超精密磨削工艺主要用于机械制造、航天航空、军事工业、加工材料是传统金属材料及合金材料。20 世纪 70 年代中期到 80 年代初,超精密磨削以黑色金属、陶瓷、超硬合金、铁氧体、玻璃、锗、硅等材料为主。20 世纪 80 年代中期以来,受美国的影响以工程陶瓷材料为主,进行了超精密磨削研究。近十几年来,由于脆性材料微量去除技术的研究应用,可以以极其微小的切深来实现塑性去除。也就是说,脆性材料去除机理可在一个微小的材料去除条件下从脆性破坏向塑性变形转变^[5-10]。由于精密工程的发展可以允许所控制的加工量达到几个纳米,使得脆性材料的加工其主要的材料去除机理是塑性流动而非脆性破坏成为可能。

塑性切削变形过程可以显著地降低次表面破坏,在这种条件下的脆性材料加工就是所谓的塑性域加工技术。对于脆性材料的塑性域磨削,其磨削表面质量相似于研磨、抛光所获得的,这样就可以省去研磨、抛光工序,而且能很好的控制形状精度。

国内在硬脆材料超精密加工领域的研究虽然较多,但不够系统化也不够深入,主要是因为加工条件落后,技术、设备不稳定,这也为我们提供了机遇和挑战。必须跟踪国外的发展趋势,不断开发国内的加工技术,使各种功能材料,如陶瓷、光

学玻璃、光学晶体、金属单晶、非金属单晶等,得到大规模的推广应用。这些功能材料大多数属于硬脆难加工材料,且要求有很高的加工精度。因此为适应我国发展的需要,特别是确保我国有关公司和企业增强国际竞争力和获得巨大的技术利益,以确保与国际接轨。应积极开展硬脆难加工材料的加工技术研究;对于软脆难加工材料(如 KDP 晶体)的加工技术研究,更应该着手进行,以填补国内空白。

4 超精密切削加工技术

美国是最先进行开发超精密加工技术的国家。早在 20 世纪 50 年代末、60 年代初,由于航天等尖端技术发展的需要,美国首先发展了金刚石刀具的超精密切削技术,称为“SPDT 技术”(single point diamond turning)或“微英寸技术”(1 $\mu\text{in} = 0.025 \mu\text{m}$),并发展了相应的空气轴承主轴的超精密机床,用于加工激光核聚变反射镜、战术导弹及载人飞船用球面非球面大型零件,等等。由于材料科学的发展,新材料不断出现,特别是功能材料;而大部分功能材料是脆性材料,随着光-机-电技术的发展,脆性材料的加工精度要求也越来越高。脆性材料的发展应用,为金刚石刀具超精密切削技术开辟了应用途径。最近十几年内,超精密切削加工技术发展迅速,可用于加工感光鼓、磁盘、多面镜,以及平面、球面或非球面的激光反射镜等中小型超精密零件和大口径光学晶体元件。超精密切削可以用于单晶铜、铝及其合金、非电镀镍层、KDP 晶体材料、锗单晶、玻璃等脆性材料的高精度镜面零件的切削。黑色金属的超精密切削还在实验室研究阶段。

虽然脆性材料在光-机-电领域应用越来越广泛,加工精度要求越来越高,但由于脆性材料的特点,使之很难像金属加工那样达到高精度。以前的金属切削模型不再适用于脆性材料的切削。关于脆性材料的切削试验和切削理论,各国学者进行了大量的研究工作,但至今还没有形成一个完整系统的理论^[11]。特别是对于软脆材料(如 KDP 晶体)的切削加工基本上是空白,更谈不上系统性研究。

光学脆性材料 KDP 晶体用于高频率激光核聚变中。晶体在制造过程中不能一次直接达到所

需零件的净形状和精度及表面粗糙度要求,还需要进行一定的机械加工。然而因这种材料的特点:硬度较低(莫氏硬度 2.5)、质软、易碎、易潮解、易开裂、对温度敏感(熔点 252)等一系列不利于光学加工的特点,故一般的加工很难达到要求。KDP 晶体早期的加工方法,研磨或抛光等表面处理不适于加工高精度的大口径晶体元件。因为 KDP 晶体质地松软,研磨、抛光时使用的磨料很容易嵌入,也容易形成新的化合物,会渗透 KDP 晶体表面内部,组成新的化学成分,使光学性质发生变化^[12]。采用精密抛光的方法很难将这些杂质从晶体表面层去除,这些杂质或缺陷构成了激光损伤的来源,对高功率激光应用是不可容忍的。国外加工此类元件已广泛采用了“SPDT 技术”^[13-15]。SPDT 的加工原理是去除元件表面一层材料,直接获得抛光质量表面,而且可以有效的减轻粗加工阶段在晶体表面形成的亚表面损伤,提高晶体元件的激光损伤阈值。国内还很少有学者开展这方面的研究^[16],而国内晶体的生长技术、晶体的界面、力学行为的研究处于国际领先地位,但晶体的加工制造技术却还很不适于高精度晶体元件的加工,特别是大口径高精度晶体元件的加工。

通过查阅资料分析^[17-21],加工高功率激光系统中使用的光学晶体,单点金刚石切削可能是最好的也是最经济的一种机械加工方法;在实际切削加工条件下,可以通过不同材料的切削加工,确定合理的切削参数,来达到加工要求。

在高功率激光系统中,单晶光学材料应用于频率转换器上,在激光放大器里作为主要的激光传播晶体,同时也是其他光学元件的一部分。在激光核聚变系统中,金刚石切削的大 KDP 晶体是频率转换器上不可缺少的元件。

文中采用了一种台肩分析技术的切削试验方法,用以评定脆性材料的切削性。这项技术要求刀具在已加工表面和未加工表面之间加工台肩时要快速退刀,如图 1 所示。在台肩处找出切削性能从脆性破碎到塑性剪切的过渡点,并测量出分离的过渡点距已加工表面的位置。

如果这样的过渡点能从加工表面上很好地区分出来,那么出现在刀具切削区过渡点上侧的脆性破碎将不会在已加工表面上留有任何损伤,因为刀具切削区过渡点的下侧正在进行塑性剪切,

由此可以展开晶体材料切削机理的研究。

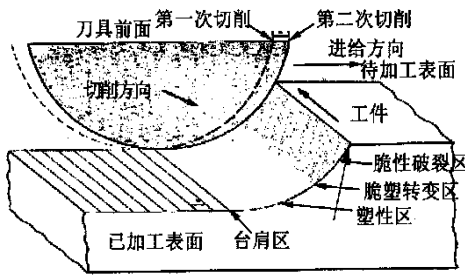


图 1 金刚石切削的台肩分析技术

Fig. 1 Shoulder analysis technique used for diamond cutting

根据所采用的切削模型,通过分析可知,并不是切削区所有材料都是以塑性变形的方式切除,而只是在形成加工表面的某一薄层区域内的材料是以塑性变形的方式切除的(故已加工表面不会有裂纹产生)。这一切削模型得到了实验验证,为脆性材料的金刚石切削研究奠定了基础。

切削加工的目的就是为了获得高质量的表面,同时要考虑加工效率和加工成本。通过上述分析,脆性材料在一定条件下也可以进行塑性域加工。切削变形、切削力、切削温度、刀具磨损和加工表面质量是影响加工过程的主要物理参数。最终表面形成是通过切削变形实现的,研究切削变形是基础,超精密金刚石切削加工也是如此。因此,对切削加工机理研究必须重视,研究切削加工机理要从切削加工模型开始,最主要的还是建立合理的切削加工模型。

在此基础上进行脆性材料金刚石切削形貌的实验分析。对脆性材料进行超精密切削时,为了得到极高的加工质量,切削厚度必须很小;这个切削厚度界限值称为临界切削厚度。临界切削厚度对于不同的脆性材料是变化的。在超精密切削时金刚石刀具的刃口钝圆半径已不容忽视,由于切削形貌包含有切削过程中丰富的信息,所以对切削形貌进行深入的观察分析将有助于人们对超精密切削过程的认识,提高加工质量。通过切削形貌的观测,可以算出切削变形的大小,进而可以分析影响切削变形的因素。

切削变形是由切削力引起的,有“力”才能产生“变形”。多大的切削力才能使脆性材料产生塑性变形,通过控制切削力在某一数值以下,就可望尽可能少地引起脆性材料的微开裂,从而保证切削加工表面质量。

切削力变为功,功变成热,热使切削区温度升

高,导致刀具磨损,从而影响表面质量。

进一步利用原子力显微镜对脆性材料的金刚石切削表面形貌进行研究。在已有超精密加工机床上,用金刚石刀具,根据上述切削模型,采用合理的切削参数对脆性材料进行超精密切削加工;然后检测加工后的工件表面粗糙度,用原子力显微镜及普通表面粗糙度轮廓测量仪进行比较分析,通过控制切削参数来获得高质量的表面形貌是可能的。控制切削参数,实质就是控制切削形貌、切削变形、切削力、切削温度、刀具磨损和加工表面质量。

以上这些物理参数对光学脆性材料金刚石切削加工的影响,还没有形成一个统一的理论。对软脆材料(如 KDP 晶体)的金刚石切削加工更有待于深入进行研究。

最后建立脆性材料(如 KDP 晶体)的超精密切削加工模型、脆性断裂判别依据、切削参数对切削过程的影响,加工前、后 KDP 晶体表面粗糙度的原子力显微镜分析,KDP 晶体的显微硬度和缺口破裂之间的关系,切削方向与解理面间的夹角变化对表面粗糙度的影响,KDP 晶体超精密切削加工切削液研究,等等。

一个给定材料的金刚石切削性能由两个因素决定,即在实际的切削加工条件下,材料的可切削加工性和金刚石刀具的磨损(疲劳)形式。应该采用一个平稳的延性(塑性)方式将工件上多余部分去除,以获得一个光滑表面。且金刚石刀具的磨损应该足够低。在确定的切削条件下,刀具磨损是决定加工表面质量和加工生产率的最重要参数。对金刚石切削加工过的晶体表面,还要进行表面成分分析。通过清洗加工后的晶体表面,对清洗液进行光谱分析;结果表明,残留油渍的确存在。所以必须选择合适的清洗剂(如甲苯)将油渍全部清洗掉,以减少对晶体雾化的影响。

5 结束语

随着光-机-电领域技术的进一步发展和其他技术领域的兴起,脆性材料的应用越来越广,精度要求越来越高。脆性材料主要使用超精密研磨、抛光加工、超精密磨削加工、超精密金刚石切削加工。

国内光学脆性材料(如 KDP 晶体)的生长技术、晶体的界面、力学行为的研究处于国际领先地位,但晶体的加工制造技术还不适于高精度晶体

元件的加工,特别是大口径高精度晶体元件的加工。为了加速该类材料的推广应用,应大力开展金刚石切削加工技术研究,不断开拓市场,创造更好的经济效益。

为了适应当代科学技术飞速发展的需要,推动我国光学、光电子及航天、航空技术迅速赶上世

界先进水平,必须重视脆性材料光学元件超精密加工技术的研究工作。因此要从理论上深入研究脆性材料超精密加工过程中的脆塑转变机制及加工机理,寻求脆性材料塑性域加工的工艺条件,提高光学脆性材料的表面加工质量。

参考文献:

- [1] 河西敏雄. 镜面加工の最新动向[J]. 机械技术, 1995, 43(3): 18-23.
- [2] 高宏刚, 曹健林. 磨削技术 - 浮动抛光原理装置及初步试验[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994. 217-220.
GAO H G, CAO J L. *Grinding technology-principle set and pilot test of float polishing* [M]. Xi'an: Publishing Pompany in Northwest Institute of Technology. 1994: 217-220. (in Chinese)
- [3] UKENO J I, TANI Y, SATO H. Nanometer grinding using ultrafine abrasive pellets- manufacture of pellets applying electrophoretic deposition[J]. *Ann CIRP*, 1990, 39(1): 341-344.
- [4] IKENO J I, TANI Y, FU KU TANI A, et al. Development of chipping-free dicing technology applying electrophoretic deposition of ultrafine abrasives[J]. *Ann CIRP*, 1991, 40(1): 351-354.
- [5] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding of brittle materials. experimental results and the development of a model[J]. *SPIE*, 1988, 966: 108-115.
- [6] MCKEOWN P A, CARLISLE K, SHORE P, et al. Ultraprecision, high stiffness CNC grinding machines for ductile-mode grinding of brittle materials[J]. *SPIE*, 1990, 1320: 301-313.
- [7] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials [J]. *Trans of the ASME, J of Eng for Ind*, 1991, 113: 184-189.
- [8] BIFANO T G, YI Y. Acoustic emission as an indicator of materials-removal regime in glass micro-machining[J]. *Precision Engineering*, 1992, 14(4): 219.
- [9] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Precision finishing of ceramics[J]. *SPIE*, 1987, 803: 12-22.
- [10] BLAKE P N, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime machining of germaics and silicon[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, 73(4): 949-957.
- [11] IWATA K, UEDA K. The Significance of dynamic crack behaviour on chip formation[J]. *Annals of the CIRP*, 1976, 25: 65-68.
- [12] FUCHS B A. Fine diamond turning of KDP crystal[J]. *Applied Optics*, 1986, (25): 1733-1753.
- [13] KAISHI S K. Single point diamond turning of KDP inorganic non-linear optical crystals for laser fusion[J]. *Journal of Japan Society Precision Engineering*, 1998, 64(10): 1181-1185.
- [14] LAHA YEO P. Using a design of experiment method to improve KDP crystals machining process[J]. *SPIE*, 1999, 3739: 388-394.
- [15] KOZLOWSKI M R, THOMAS I M. Influence of diamond turning and surface cleaning processes on the degradation of KDP crystal surfaces[J]. *SPIE*, 1991, 1561: 59-69.
- [16] XU Q, WAN J. defects of KDP crystal fabricated by single point diamond turning[J]. *SPIE*, 1999, 3862: 236-239.
- [17] 袁巨龙. 功能陶瓷的超精密加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
YUAN J L. *Ultraprecision machining technology of functional ceramic* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG L. *Advanced optical manufacture technology* [M]. Beijing: Publishing Pompany of Science, 2001. (in Chinese)
- [19] 王平, 张春河, 张飞虎, 等. 光学玻璃的磨削加工方法[J]. 光学 精密工程, 1996, 6(4): 53-58.
WANG P, ZHANG CH H, ZHANG F H, et al. Grinding manufacture of optical glass[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 6(4): 53-58. (in Chinese)
- [20] 韩荣久, 孙恒德, 高宏刚, 等. 超光滑光学表面加工技术[J]. 光学 精密工程, 1995, 5(1): 7-13.
HAN R J, SUN H D, GAO H G, et al. Fabricating technology for supersmooth surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 5(1): 7-13. (in Chinese)
- [21] 高宏刚, 王建国. 应用纳米级金刚石抛光亚纳米级光滑表面[J]. 光学 精密工程, 1999, 5: 80-84.
GAO H G, WANG J M. Application of UFD on polishing surfaces with sub nanometer scale roughness[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 9(5): 80-84. (in Chinese)

作者简介: 张文生(1962 -) 男, 吉林洮南人, 哈尔滨工业大学机电学院博士生, 黑龙江科技学院副教授, 主要从事精密和超精密切削加工。