

文章编号: 1002-1582(2003)06-0649-03

激光核聚变光学元件超精密加工技术的研究*

杨福兴

(北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876)

摘 要: 论述了脆性材料延性加工机理。应用超精密加工技术解决了激光核聚变光学元件的大批量加工问题。研究了平面光学元件、KDP 晶体和方形透镜超精密加工技术, 给出了这三类光学元件超精密加工的工艺过程、机床设计准则和最佳工艺参数。

关 键 词: 光学元件; KDP 晶体; 超精密加工

中图分类号: TH706 **文献标识码:** A

Study on the technology of the ultra precision machining for the optical components in laser nuclear fusion

YANG Fu-xing

(Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: The mechanism of ductile machining for brittle material is described. The problems of batch manufacturing optical components in laser nuclear fusion are solved by applying the technology of the ultra precision machining. The technology of the ultra precision machining for the optical flats, KDP crystals and square lens is studied. The technology process, the rules for designing the machine and the optimized technology parameters are proposed.

Key words: optical component; KDP crystal; ultra precision machining

1 引 言

在激光核聚变需求的牵引下,美、日、法、中、英、俄等国先后建造了 20 多台大型激光装置。美国和法国正分别建造“国家点火装置”(NIF)和兆焦耳激光器,俄国计划建造 Iskra-6 激光装置,我国正在研制神光Ⅲ激光装置。在上面的所有激光装置中,都需要大量的高精度、大口径光学元件。例如美国的 NIF,在其光学系统内,用于全口径(0.5~1m)光束的光学元件超过 7000 多件,还有 15000~20000 件较小的光学元件^[1]。在大口径光学元件中,主要有平板玻璃、KDP 晶体、方形透镜三类光学元件,它们的特征是高精度面形、超光滑表面、大口径及大批量。

神光Ⅲ激光装置中的光学元件的综合技术指标已超过国内现有的制造水平和加工能力。国内光学制造业已认识到了完成神光Ⅲ光学元件制造任务的难度和艰巨性。所以要想按期、保质、保量地制造这些光学元件,必须突破现有的工艺技术,采用高效的先进制造技术。本文借鉴美国 NIF 的经验,结合我

国的实际情况,将超精密加工技术应用到激光核聚变光学元件的精密制造中。

2 脆性材料延性加工机理的研究

为了提高生产效率和满足批量生产的需要,把研磨抛光工序磨削化,通过延性磨削(Ductile Grinding)或使用最小抛光量直接加工出能满足光学质量要求的光学零件。在一定的控制条件下,使用单个或多个金刚石工具,能直接加工诸如玻璃之类的脆性材料。因为材料是由塑性流动方式去除的,所以加工表面没有损伤和没有裂纹,这个工艺过程称为“延性”或“塑性”方式加工^[2]。延性加工具有以下优点:

- (1) 表面无损伤、无裂纹;
- (2) 加工效率可以与单点金刚石车削相媲美,高于传统的抛光加工;
- (3) 可为离子束加工或传统的精密抛光提供高质量的预加工。

要想实现延性方式加工必须解决两个问题,即加工机械的运动精度和被加工件以及被加工材料微

* 收稿日期: 2003-04-02

基金项目: 国家 863 计划资助项目(416-2-4.11 和 416-2-4.16)

作者简介: 杨福兴(1965-),男,江西省人,北京邮电大学自动化学院高级工程师,博士,主要从事光学元件超精密加工的研究。

E-mail: yangfx @ china.com

小切屑的生成。因此一方面需要高精度、高刚度的加工机床;另一方面延性方式磨削需要高精度、高刚性及高保持性的砂轮。延性方式车削需要大的负前角的刀具,切削厚度必须小于临界切削厚度。

3 大口径平面光学元件超精密加工技术的研究

NIF 装置中大约有 80% 的光学元件为平面光学元件,是最昂贵的光学元件。例如仅在第一期工程中就使用了 3000 块 $800\text{mm} \times 460\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的激光玻璃板。神光Ⅲ工程中的光学元件大多数是矩形或方形元件,同圆形元件相比,这些元件的加工具有明显的边缘效应(特别是四个角)。就目前的技术水平而言,要想达到神光Ⅲ要求的透射波前($\lambda/6$)和反射波前($\lambda/4$)是比较困难的,所以在口径大平面元件的制造中必须采用先进的制造技术。

3.1 大口径光学元件 ELID 磨削技术。

作者同哈尔滨工业大学合作进行了 ELID (Electrolytic in process dressing) 磨削技术的研究。实验研究表明,生产效率明显高于传统研磨,实验件的表面粗糙度 $Ra = 5.07\text{nm}$,该工序有望取代传统抛光前的粗加工——铣磨和粗抛。存在的问题是面形精度不高,主要是由于实验机床的精度太低,只要使用超精密机床就可以解决这一问题。

3.2 大口径光学元件数控抛光技术

小工具数控抛光技术是指用一个尺寸比被加工零件小得多的抛光模,根据面形检测数据和抛光加工过程中的控制模型,在计算机的控制下,以一定路径、速度和压力抛光工件表面。使用这种技术加工了 $340\text{mm} \times 340\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的平面反射镜,初始反射镜面波前误差为 3.5λ ($\lambda = 0.6328\mu\text{m}$),经过仅 30h 的抛光,反射波前误差值已收敛至 0.26λ ,均方根值为 0.035λ [3]。

3.3 大口径光学元件连续抛光技术

连续抛光技术具有均匀化的抛光效果,压力可以自由外加,便于面形修正,转速慢,工件热变形小。在实验过程中发现,利用该技术加工的工件精度能够满足工程要求,存在的问题是加工周期长,对人的依赖性太强,操作者无法自始至终地满足神光Ⅲ的精度要求。但连续抛光可以作为大尺寸、高精度、超光滑平面光学元件的最终加工。

3.4 平面光学元件精密加工工艺过程

实验研究发现,ELID 磨削技术与数控加工技术、连续抛光技术相结合,可以解决平面光学元件的大批量加工问题。具体思路是,首先采用 ELID 磨削技术,将光学元件毛坯精密磨削到 1λ 以内,如果

使用超精密磨床的话,其精度会更高一些;然后使用数控加工机床,发挥数控加工对局部误差的高效修正优势,将光学元件加工到工程所要求的面形精度;最后使用大型环抛机,将光学元件精密抛光至工程要求,这一工序主要是解决表面粗糙度和波纹度的问题。

4 KDP 晶体超精密加工技术的研究

NIF 装置含有 600 多件大口径 KDP 晶体元件,它们主要用来作为光开关及频率转换器。KDP 晶体是一种软脆材料,硬度非常低,具有很强的吸湿性。当温度急剧变化时,容易破裂,所以镜面加工是非常困难的。同研抛加工相比,利用超精密切削,能够高精度和高效率地加工出光学表面,没有塌边,加工后的夹杂物也不会残留在表面上。因此激光核聚变 KDP 晶体的加工通常采用超精密切削的方法。

4.1 精密加工 KDP 晶体用超精密机床及对环境的要求

美国 NIF 装置中 KDP 晶体尺寸为 $450\text{mm} \times 450\text{mm}$,透射波前为 $\lambda/4$ 。我国现在还没有能加工出这样精度的机床,而且 KDP 晶体不能像其它光学元件那样采用手工修研的办法来加工。所以必须研制自己的 KDP 晶体超精密加工机床。KDP 晶体的加工环境温度为 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$,湿度在 40% 以下,室内的空气洁净度为 100 级。

4.2 KDP 晶体超精密加工工艺的研究

NIF 装置中的 KDP 晶体的三项主要技术指标是:表面粗糙度、表面波纹度和透射波前。下面对影响这三项技术指标的因素进行详细分析。

(1) 影响表面粗糙度的因素分析 [4]。影响表面粗糙度的主要因素有:主轴转速、切削深度、刀具前角、进给量、刀具半径、晶体的晶向、刀具磨损、刀具供应商、主轴平衡状况等。实验研究发现,刀具质量、刀具前角、进给量和机床主轴转速是主要的影响因素。



(2) 影响波纹度的因素分析。作者曾比较过在两台不同机床上加工 $240\text{mm} \times 240\text{mm}$ KDP 晶体的结果(使用不同的机床会导致结果相差很大),其中一个结果如图 1 所示。从图中可以看出明显的加工痕迹,这种刀痕给晶体的透射波前添加了小尺寸的周期性扰动,是必须抑制的制造误差。国内外许多学者对此进行了研究,有人认为是加工工艺引起的,有人认为是机床引

起的。作者经过研究认为主要是由工作台和进给丝杆之间的误差引起的。研制新机床时,一定要研制新的进给驱动系统,以减少 KDP 晶体的波纹度。

(3) 影响透射波前的因素分析。一般来说,只有工件两面的面形精度高,零件的透射波前才会高。如果工件两面的面形精度都低,则透射波前不一定就低。这是因为两面的面形刚好互补,零件的透射波前可能很高的缘故,但这种关系是不确定的,所以在设计机床时,就很难确定机床的主要精度指标。根据作者的经验,在设计机床时,可以采用概率分布和统计的原则来确定机床的主要精度指标。

(4) KDP 晶体超精密切削工艺。实验研究表明,为了降低被加工表面的表面粗糙度,最佳工艺参数为:切削方向和晶轴方向平行,刀具前角为 $-25^{\circ} \sim -45^{\circ}$,圆弧半径为 5mm,主轴转过一周时的进给量为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

5 方形非球面(球面)透镜超精密加工技术的研究

大口径方形非球面透镜的高精度加工一直是光学加工领域中的重大难题,国内仅有少数单位从事这方面的研究,积累的经验及技术较少,仅仅能满足单件生产的需要。为了解决方形非球面透镜的加工问题,作者从以下三个方面进行了研究。

(1) 按传统方法加工以方形透镜对角线为直径大小的圆形透镜。当透镜满足其它各项技术要求时,可切割成所需尺寸的方形透镜,即先加工后切。

(2) 将满足尺寸要求的方形材料拼合粘接成圆形工件,在按圆形非球面透镜加工方法加工到满足

指标要求后脱胶,便可得到所要求的方形透镜,即先切后加工。

(3) 由于方形非球面透镜不能用手工作法修磨,而数控加工方法可以对方形透镜进行修磨,所以必须采用先进的制造技术——计算机控制光学表面成型技术,根据所测量的面形数据,建立加工过程的控制模型,并在工件表面精确定位后,通过控制材料的去除量,实现光学元件表面的精密加工。

6 结 论

根据上面的研究和分析可以得出以下结论:

(1) 在大口径光学元件加工中采用 ELID 磨削技术、数控加工技术和连续抛光技术可以解决大口径平面光学元件的大批量精密制造问题。

(2) 在 KDP 晶体的超精密加工中,为了解决透射波前和波纹度的问题,采用概率分布和统计的原则确定机床的主要精度指标,研制出新的进给驱动方式的超精密机床。

(3) 在大口径方形透镜的制造中,建议优先使用计算机控制光学表面成型技术,并重点解决透镜的透射波前的定量测量问题。

参考文献:

- [1] Atherton J. 国家点火装置光学元件的制造[J]. 强激光技术进展. 1999, (3): 12~18.
- [2] Mckeown P A. Ultra-precision High Stiffness CNC Grinding Machines for Ductile Mode Grinding of brittle Materials [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1320: 301~311.
- [3] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] Lahaye P. Using a Design of experiment method to improve KDP crystals machining process [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3739: 388~394.

(上接第 648 页)

有一定的相关性,检测值 R 能灵敏而迅速的反应出投药量的变化。

分别测出在不同投药量下沉后水的浊度。首先在这一投药量下取检测值 R 的平均值,然后给出如图 4 所示的投药量和沉后水浊度及检测值的关系曲线。从图 4

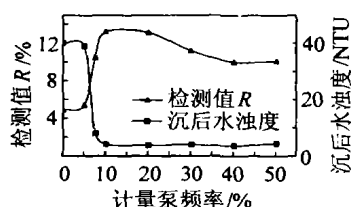


图 4 沉后水浊度与检测值的关系曲线

可以看出,检测值 R 和沉后水浊度是紧密相关的,在检测值达到最大时,沉后水浊度达到最低。因此可以根据检测值 R 来确定混凝剂的最佳投量。这种确定混凝剂最佳投量的方法不仅迅速而且准确,是一种省时省力的方法,完全可以取代传统的杯罐

搅拌试验。将检测值 R 作为混凝剂投加量控制器的反馈信号,就可以通过控制器根据原水水质的变化自动调整混凝剂投加泵的频率,从而实现混凝剂的最优自动投加。

5 结 论

透射光脉动颗粒检测仪所采用的脉动颗粒检测技术新颖,信号处理方式独特,检测仪有效的消除了光源强度的波动、取样管管壁的粘污以及电子元件老化、漂移等不利因素的影响。该检测仪克服了传统的颗粒分析仪器只能离线或者间断的进行采样分析的不足,它可对混凝过程中颗粒物质的聚合或者破碎状态进行在线连续检测,为水处理领域提供了一种快速、精细的混凝试验研究工具,为净水厂提供了一种混凝剂最优投量的监控设备。