

伸缩式圆孔气囊抛光头的研究

王新海,马瑾,张永军

(陕西国防工业职业技术学院 智能制造学院,陕西 西安 710300)

摘要: 阐述椭圆柱气囊抛光头的运动方式和局限性,分析不同孔径圆孔光学元件的加工范围,设计一种可伸缩式圆孔气囊抛光头的机械结构,通过滑动模块实现抛光头直径大小的调整,以适应不同孔径光学元件的抛光。利用可伸缩式气囊抛光头进行不同孔径圆孔光学元件的工艺试验,探讨抛光中表面粗糙度的变化规律及原因,采用 5 kPa、4 kPa 和 3 kPa 等不同气囊压强进行分阶段抛光试验。试验结果表明:该抛光头可满足不同孔径光学元件的高精度加工要求。

关键词: 气囊抛光头;结构设计;工艺试验;表面粗糙度

中图分类号: TH161+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)06-0058-03

Study on Retractable Bonnet Polishing Tool for Circular Hole

WANG Xinhai, MA Jin, ZHANG Yongjun

(School of Intelligent Manufacturing, Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710300, China)

Abstract: The paper expounds the movement mode and limitations of ellipsoid bonnet polishing tool, analyzes the processing range of circular hole optical elements with different apertures, and proposes a mechanical structure of retractable circular bonnet polishing tool. The diameter of bonnet polishing tool is adjusted through sliding module to adapt to the polishing of optical elements with different apertures. The process tests of different circular hole optical elements were carried out by using the retractable bonnet polishing tool, the variation law and causes of surface roughness in polishing were discussed and the phased polishing tests were conducted by applying bonnet polishing tool such as 5 kPa, 4 kPa and 3 kPa. The experimental results show that the bonnet polishing tool can meet the requirements of high precision machining of optical elements with different apertures.

Keywords: bonnet polishing tool; structure design; process test; surface roughness

0 引言

近年来,随着现代光学、惯性约束聚变和集成电路等领域的快速发展,高精度光学系统的应用越来越广泛^[1-2]。作为光学系统中关键零件的光学元件,要求其具有更高的表面质量、加工精度和晶格结构。抛光是实现高质量光学元件表面的主要手段^[3],它是集机械、物理、材料和化学等多学科融合的一种加工方法。其中,广泛采用的传统古典法抛光对操作人员依赖性强、影响工艺因素多。气囊抛光具有工艺参数可控性好、材料去除性相对均匀和易于加工复杂型面等优点^[4],受到国内外学者的关注。气囊抛光是利用一个充气球冠抛光头与光学元件表面相接触,当产生相对运动时,夹持在两者之间的抛光液实现对光学元件表面材料的去除、抛光。

目前,伦敦光学试验室^[5]设计研发了 IRP 系列气囊抛光机床并进行了商业化应用,利用该设备对 BK7 材料进行了抛光压力、抛光路径等工艺参数的研究,工件表面粗糙度值可达到 0.5 nm。国内浙江大学计时鸣等^[6]设计了机器人气囊抛光样机,进行了工艺参数对表面粗糙度的

影响试验。厦门大学潘日等^[7]研发了数控气囊抛光机床,分析了材料去除函数和去除率,并且针对磨头磨损现象提出了修正方案。哈尔滨工业大学高波^[8]制作了实验样机,对 BK7 工件材料的光学零件进行抛光,工件表面粗糙度 R_a 可达 1.249 nm。然而,除国外有少量商业化气囊抛光机外,国内科研院所的气囊抛光技术大多尚处于试验摸索阶段,特别是针对圆孔气囊抛光技术的研究还较少报道。

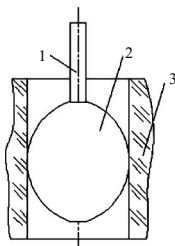
1 椭圆体气囊抛光头现状

圆孔是零件常见和常用的特征,按照作用与用途,可分为工艺孔、装配孔和定位孔等。由于光学元件一般是脆性材料,相比于传统机械零件上孔的加工工艺,圆孔光学元件作为光通道或激光发生器的重要组成部分,对孔的抛光加工精度有着更高要求。气囊抛光头作为气囊抛光技术的核心部件,对光学元件的高质量表面抛光起着关键作用,因此,圆孔气囊抛光头的合理设计是实现圆孔光学元件高质量抛光的基础。椭圆体气囊抛光头的气囊外形是一个椭圆体,抛光圆孔运动方式示意图如图 1 所示,椭圆体气囊固定在抛光杆上,抛光杆的旋转运动是主运动,

基金项目: 陕西国防工业职业技术学院 2020 年科研重点基金资助项目(Gfy20-05);陕西国防工业职业技术学院 2022 年科研基金资助项目(Gfy22-57)

第一作者简介: 王新海(1984—),男,陕西西安人,副教授,硕士,研究方向为精密加工和机械设计。

抛光杆的上下往返运动为进给运动,椭圆体气囊的外表面与玻璃圆孔内表面接触并相互挤压,当抛光杆旋转并上下往返运动时,将抛光液加入椭圆体气囊与圆孔之间,实现对圆孔表面的抛光。在椭圆体气囊外观尺寸、压强一定的情况下,不同孔径的圆孔光学元件需要设计加工出不同规格的椭圆体气囊,此类气囊抛光圆孔光学元件具有局限性。因此,设计一种新型圆孔气囊抛光头,实现不同孔径圆孔光学元件的抛光具有较高的研究价值和应用意义。



1—抛光杆;2—气囊;3—玻璃圆孔。
图1 圆孔气囊抛光方式示意图

2 理论分析

为了实现不同孔径圆孔光学元件的高精度抛光,需要对椭圆体气囊抛光头进行分析,设计出合理的伸缩式圆孔气囊抛光头。从图1可以发现椭圆体气囊抛光头为回转体,椭圆体气囊剖面的简化示意图如图2所示。当 $\triangle ABC$ 绕 AC 所在的轴线旋转时, B 点可实现与圆孔表面的接触。其中, $\triangle ABC$ 为等腰三角形, BO 为 AC 的垂线。假设椭圆体抛光头可抛光圆孔的直径为 d , $BO=r$, $AB=BC=l$,从等腰三角形的几何关系可得

$$d=2l\sin\angle OAB \quad (1)$$

由式(1)可知, l 不变的情况下, $\angle OAB$ 越小,则 d 越小;反之, $\angle OAB$ 越大, d 就越大, d 的理论数值范围为0~1。换言之,如果 $\angle OAB$ 的角度大小能够实现改变,椭圆体气囊抛光头即可适用于不同孔径圆孔光学元件的抛光。结合气囊抛光技术和椭圆体气囊抛光头的实际情况,抛光头的最外层为抛光布,抛光过程中,抛光布与圆孔光学元件的表面相接触。如果 l 不变,即抛光布在剖面内的曲线长度不变,通过合理的机械结构改变抛光布与旋转轴的夹角,即可实现伸缩式气囊抛光头的结构设计。

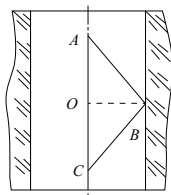
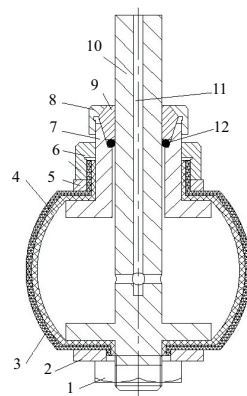


图2 圆孔气囊抛光范围分析示意图

3 伸缩式抛光头结构

伸缩式气囊抛光头是利用气囊表面的抛光布对圆孔类光学元件表面进行抛光,在一定直径范围内,可根据孔径大小进行不同尺寸气囊抛光头的调整选择,从而适应不同圆孔类光学元件内孔表面的高质量。根据前面的理论分析和

介绍,经过大量的研究与实践,本文设计的伸缩式气囊抛光头的结构如图3所示,主要由固定模块、滑动模块和气室模块等3部分组成。固定模块包括螺母、下压圈和抛光杆等零件,其功能主要是固定下端的密封膜和抛光布。其中,抛光杆下端设置有圆饼状凸台和外螺纹,外螺纹在圆饼状凸台的下端,并且延伸至抛光杆的最底端,下压圈的内孔直径大于抛光杆的直径,下压圈的外圈直径小于抛光杆下端圆饼凸台的直径,利用螺母将密封膜和抛光布压紧在圆饼凸台的下端面。滑动模块包括圆柱滑块、上压圈、压紧螺母、密封圈和锁紧螺母等零件,其主要用于实现上端密封膜和抛光布的伸缩移动和固定作用,圆柱滑块上端设置有圆锥形内孔,其底端设置有圆饼状凸台,圆柱滑块圆柱表面设置有外螺纹,上压圈的内孔直径大于圆柱滑块的外螺纹直径,上压圈的外圈直径小于圆柱滑块下端的圆饼凸台直径,使用压紧螺母将密封膜和抛光布压紧并固定圆柱滑块圆饼凸台的上端面,弹簧夹头的内孔与抛光杆的直径相一致,弹簧夹头的圆锥面与圆柱滑块上端圆锥孔相匹配,并且在弹簧夹头的下端面与圆柱滑块上端圆柱孔内放置有密封圈,拧紧锁紧螺母时,在弹簧夹头的作用下使圆柱滑块固定在抛光杆上,松开锁紧螺母,圆柱滑块可在抛光杆上上下下移动。当通过抛光杆内的气道充入气体时,密封膜、密封圈、上圆饼状凸台和下圆饼状凸台等就形成了气室模块,密封膜在气体的作用下膨胀并撑起抛光布,其中,抛光杆中心为圆柱形深小孔,深小孔的下端封闭,深小孔的径向有小通孔,保证气体通过气道可充入气室模块。



1—螺母;2—下压圈;3—抛光材料;4—密封膜;5—上压圈;
6—压紧螺母;7—圆柱滑块;8—锁紧螺母;9—弹簧夹头;
10—抛光杆;11—气道;12—密封圈。

图3 伸缩式气囊抛光头结构示意图

伸缩式气囊抛光头的安装步骤和使用方法如下:首先,将密封膜的一端套在抛光杆圆饼状凸台的下端面上,抛光布的下端覆盖在密封膜上面,下压圈套在抛光杆的下端并压住抛光布,旋紧螺母,通过螺母的拧紧使密封膜、抛光布的一端固定在抛光杆上;其次,先将圆柱滑块和抛光杆清洗干净,擦洗干净,擦洗干净后将圆柱滑块从抛光杆的上端套入,并且与下圆饼状凸台接触;再次,密封膜、抛光布和上压圈依次套在圆柱滑块的圆饼状凸台上,旋转压紧螺母,压紧螺母挤压上压圈,实现密封膜、抛光布的另一端固定在圆柱滑块上;然后,左手提着圆柱滑块,右手依次将擦拭干净的密封圈、弹簧夹头和锁紧螺母套入圆柱滑块上端的圆锥

孔内,此时不需拧紧锁紧螺母;最后,将抛光杆上端安装在机床主轴孔内,压缩气体通过机床主轴孔充入气道。根据被抛光圆孔光学元件的直径,合理调整圆柱滑块在抛光杆的位置,并拧紧锁紧螺母,固定圆柱滑块的位置,实现抛光布气囊与圆孔直径相匹配。

4 抛光试验

4.1 不同孔径抛光试验

利用伸缩式圆孔气囊抛光头对 K9 材料的光学元件进行抛光试验,调整抛光头的抛光直径分别为 20 mm、25 mm 和 30 mm,抛光头的气囊压强 3 kPa、转速 360 r/min,上下往复速度为 20 次/min,K9 光学元件初始表面粗糙度值为 390 nm 左右。采用某公司的 Form Taylor Surf Series 轮廓仪进行抛光后光学元件的检测。在抛光头不同尺寸下抛光光学元件。图 4 描绘出了 K9 玻璃表面粗糙度随着抛光时间变化的曲线图,横坐标为抛光时间,纵坐标为表面粗糙度值。

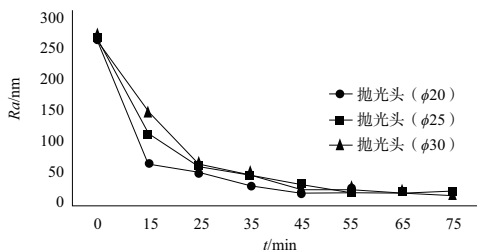


图 4 K9 玻璃表面粗糙度变化曲线图

由图 4 的结果可以看出,在利用伸缩式抛光头进行不同直径抛光光学元件过程中的变化可以总结出两点:1) 抛光前段时间比后段时间的抛光效率高,随着抛光时间的增加,表面粗糙度值趋于稳定。这是由于前半段主要抛光前道工序加工留下来的凸凹层和裂纹层,抛光时其表面大的凸起和凹陷迅速减小,表面粗糙度值下降非常迅速,抛光效率高,经过前半段的抛光,工件表面已无深的凹坑和一些大的尖锐凸点,只有一些轻微的起伏,后半段的表面粗糙度值已经比较小,且趋于稳定;2) 抛光前半段时间下,抛光头的直径越小,表面粗糙度值减小得越快。由式(1)分析可知,抛光布与旋转轴线的夹角 $\angle OAB$ 在理论上趋近于 0 时,抛光孔径趋近于 0,抛光布与工件趋于全部接触挤压,实际抛光过程中,在压强不变情况下,随着抛光圆孔直径的不断增大,使两圆饼状凸台间的距离减小,实现抛光头直径的增大,而抛光布与光学元件的接触挤压面积在逐渐减小,同一抛光时间下的材料去除率也减小。因而,小直径的抛光头在前半段抛光效率高,表面粗糙度值下降的较快,材料去除率大,后半段时间由于气囊抛光所能达到的表面粗糙度值趋于稳定,不同尺寸磨头的抛光粗糙度值趋于一致。

4.2 分阶段抛光试验

利用伸缩式气囊抛光头加工不同孔径的光学元件,通过比较不同孔径下表面粗糙度及抛光效率的差异,在不同抛光阶段,应进行工艺参数的优化调整。气囊压强是影响

抛光质量的关键工艺因素,通过改变气囊压强适应不同气囊抛光阶段的特点,即在各个抛光阶段选择一个最佳值,然后在抛光过程中,根据抛光所处的阶段,依次变换气囊压强的最佳参数值,用组合参数完成最后的抛光。伸缩式气囊抛光时划分为 3 个阶段:第一阶段采用大的气囊压强实现工件表面材料的快速去除;第二阶段气囊压强适中,在保证材料去除的同时减小工件的表层损伤;第三阶段气囊压强最小,以此保证获得较小的表面粗糙度值和较低的表层损伤。经过大量工艺试验数据组合,各阶段抛光的气囊压强分别为 5 kPa、4 kPa 和 3 kPa,分阶段选用气囊压强,在 40 min 内,使表面粗糙度由约 390 nm 降到了 10.853 nm。抛光前后表面形貌如图 5 所示,无论在效率和质量方面都优于固定气囊压强数值条件下的加工质量,实现了光学元件的高质量气囊抛光。

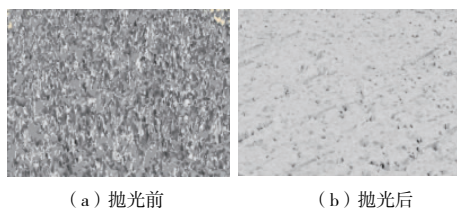


图 5 抛光前后表面形貌对比

5 结语

本文研究了一种基于气囊抛光技术的可伸缩式圆孔气囊抛光头,详细介绍了各个模块的机械结构组成及使用方法。在气囊一端固定的同时,设计的圆柱形滑块模块可以实现气囊另一端的滑动,从而使气囊抛光头的直径在一定范围内可以进行调整,扩大了气囊抛光头的抛光范围。分析探讨了进行不同孔径圆孔光学元件抛光试验中影响表面粗糙度的变化规律及原因,利用 5 kPa、4 kPa 和 3 kPa 等不同气囊压强分阶段抛光方式,获得了 10.853 nm 表面粗糙度值。试验结果表明:该抛光头可以实现不同孔径光学元件的高精度抛光,为后续深入研究孔类光学元件的气囊抛光装置奠定了基础,并提供了一种气囊抛光方式的新思路。

参考文献:

- [1] 管峰. 盘式磁流变抛光关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018.
- [2] 郑永成,黄文,罗清,等. 曲面磁流变抛光工艺与抛光头结构分析[J]. 机械设计与制造,2014(7):130-132.
- [3] 牛秦华,淮文博,王旭辉,等. 对称曲面仿形抛光机构关键控制方法[J]. 机械制造与自动化,2021,50(3):41-43,57.
- [4] 计时鸣,张利,金明生,等. 气囊抛光技术及其研究现状[J]. 机电工程,2010,27(5):1-12.
- [5] 徐志强,王秋良,张高峰,等. 可控柔性表面抛光研究综述[J]. 表面技术,2017,46(10):99-107.
- [6] 计时鸣,金明生,张宪,等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [7] 潘日,杨炜,王振忠,等. 大口径非球面元件可控气囊抛光系统[J]. 强激光与粒子束,2012,24(6):1344-1348.
- [8] 高波. 气囊抛光实验样机的研制及其关键技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.

收稿日期:2022-01-27