进动气囊抛光工艺参数研究

张利鹏，杨辉，鲍龙祥
（北京航空精密机械研究所精密制造技术航空科技重点实验室，北京 100076）

[摘要] 为了提高光学元件的面形精度，提高加工效率，针对平面光学零件，以抛光去除效率和表面粗糙度为考核指标，对影响进动气囊抛光的几个工艺参数进行了正交试验及分析，得出各工艺参数对抛光去除效率和表面粗糙度的影响规律。确定最佳工艺参数，并在此条件下进行了气囊抛光工艺试验，通过 Matlab 软件拟合出了气囊抛光去除函数，为开展驻留时间的计算和面形控制提供了依据。

[关键词] 气囊抛光；正交试验；去除效率；表面粗糙度；去除函数
[中图分类号] TN305.2 [文献标识码]A [文章编号]1003-5451(2014)01-0005-04

Research on Polishing Parameters of Bonnet Polishing

ZHANG Li-peng, YANG Hui, BAO Long-xiang
(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision Manufacturing,
Beijing Precision Engineering Institute For Aircraft Industry, Beijing 100076)

[**Abstract**] In order to improve the surface accuracy and processing efficiency of optical element, the orthogonal experiment by the processing parameters that influence bonnet polishing is made with the influence to the removal efficiency and surface roughness on the plane optical work-pieces. The result is discussed and analyzed according to bonnet polishing mechanism and material removal mechanism. The optimization parameters of bonnet polishing optical glass is got. Through the experiments integrated process parameters, the removal function of precession bonnet polishing is fitted by Matlab. This also makes it convenience for the later work like the solution of resident time and the surface control.

[**Keywords**] bonnet polishing; orthogonal experiment; removal efficiency; surface roughness; removal function

1 引言

进动气囊抛光过程采用计算机控制光学表面成型(CCOS)的光学零件抛光工艺方法，其首先需要确定材料去除模型，即去除函数，再根据选定的驻留时间计算方法，计算出相应的驻留时间，并完成路径规划，然后在进动气囊抛光数控机床上采用 CNC 方法完成加工过程。由此可见去除函数的建立在气囊抛光过程中是非常重要的，而去除函数与气囊抛光过程中的工艺参数有着直接的关系。

影响气囊抛光效率和表面质量的工艺参数有很多，例如进动角、抛光头半径、抛光液浓度、驻留时间、气囊压缩量、气囊主轴转速、进动速度、充气压力、抛光液流速等等。本试验对其中的压缩量、主轴转速、进动速度、充气压力和抛光液流速建立正交试验表，运用正交试验法进行试验，并对结果进行分析，研究进动气囊抛光工艺参数对去除特性的影响规律，从而确定最佳工艺参数，为后续加工及抛光去除函数的研究做准备。

2 气囊抛光工艺试验

进动气囊抛光采用具有一定充气压力的球形气囊作为抛光工具，抛光实验设备如图 1 所示，该设备是一台改造过后的七轴五联动数控机床，可以实现 X、Y、Z

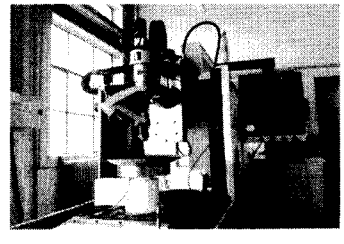


图 1 进动气囊抛光机床

三个直线轴和 A、C 两个旋转轴的联动控制，抛光加工时，被加工工件固定在 C 轴上，可以随 X 轴直线运动及 C 轴运动；抛光气囊固连于 A 轴上，由 Y、Z 两轴控制抛光头的直线位置，由 A 轴旋转控制其空间角度位置，通过各轴的联动控制可以实现加工过程中始终保持气囊与工件接触区法线通过抛光气囊球心，从而抛光头主轴和进动轴的运动可以实现进动抛光。

由于涉及到的工艺参数很多，在本课题试验中，我们只对几个比较重要的参数进行了工艺试验研究，其它参数为固定参数条件，如进动角 20°、抛光头半径 23.66mm、抛光液浓度 100g/L、驻留时间 5min。可变参数为气囊压缩量、气囊主轴转速、进动速度、充气压力及抛光液流速，抛光液循环装置采用兰格蠕动泵。具体参数值如表 1 所示。

表 1 工艺参数及取值

因素		气囊压缩量 A/mm	气囊转速 B/r·min^{-1}	进动速度 C/r·min^{-1}	充气压力 D/100kPa	抛光液流速 E/mL·min^{-1}
取值水平	1	0.2	100	10	0	150
	2	0.4	200	25	0.5	300
	3	0.6	300	40	1	450
	4	0.8	400	55	1.5	600
	5	1.0	500	70	2	750

对于本次实验，我们采取正交实验的方法，由于考虑了 5 个主要因素，且每个因素选择 5 个水平，故本实验为 5 因素 5 水平的正交实验，选用 $L_{25}(5^5)$正交表。工件材料选用平面 K9 光学玻璃，加工点的个数为 25 个，抛光方法如下：保持工件静止不动，按照正交实验表里给定的参数进行工艺实验，定点抛光 5min，形成一个个近似圆形的抛光区域，加工前后玻璃表面对比结果如图 2 所示。利用 TESA－rugosurf 90-G 粗糙度仪对抛光后的表面进行粗糙度和去除深度的测量，并计算出单位时间内的材料去除量。

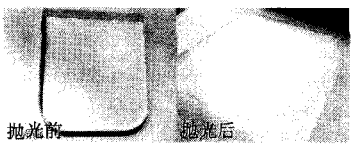


图 2 加工前后玻璃表面

3 去除效率分析

运用正交设计的初步分析方法——极差分析进行数据分析。通过正交实验分析各组实验结果和极差可以看出各个工艺参数对去除效率的影响趋势，求出各个工艺参数下的极差，然后逐一对结果进行分析，其极差分析表如表 2 所示。各工艺参数对去除效率的影响分布图如图 3 所示。

从表 2 的正交实验极差分析表可以看出各个因素对抛光效率影响的主次关系为：气囊主轴转速>气囊压缩量=充气压力>抛光液流速=进动速度。

表 2 去除效率分析

μm/min

极差分析	压缩量 A	气囊转速 B	进动速度 C	充气压力 D	抛光液流速 E
K1	2.04996	0.94812	1.90122	1.64748	1.89756
K2	2.07458	1.53626	1.92222	1.90018	1.93254
K3	1.91446	1.9638	1.90734	1.96194	1.9537
K4	1.73496	2.36186	1.87194	1.97488	1.88146
K5	1.69342	2.65734	1.86466	1.9829	1.80212
Max	2.07458	2.65734	1.92222	1.9829	1.9537
Min	1.69342	0.94812	1.86466	1.64748	1.80212
R	0.38116	1.70922	0.11512	0.33542	0.15158

①气囊压缩量对去除效率的影响。由图 3 中气囊缩量与去除效率的关系图可以看出，在压缩量较小时，去除效率基本不变，随着压缩量的继续增大，去除效率逐渐减小，这主要是因为抛光去除主要是氧化铈抛光液在进行作用，当压缩量增大时，气囊与工件的接触面积增大，且贴合比较紧密，导致抛光液不能够完全融入接触区域，从而影响抛光效率，另外由实验过程中发现，压缩量越大，接触区面积也越大，从而导致抛光区域变大，这会对加工点周围的各点造成过加工，影响之后的去除函数拟合，从而对驻留时间的求解也会产生不利影响。

②气囊转速对去除效率的影响。随着气囊主轴转速的增大，抛光材料去除效率明显加快。这是因为随着抛光头转速的增大，抛光接触区内的相对线速度也随

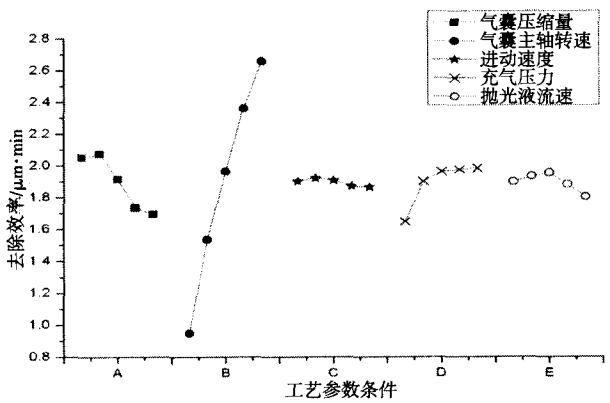


图 3 各工艺参数下的去除效率分布图

之增加，抛光液中的磨粒作用在工件表面上所产生的划痕距离也将增大，材料去除量增加，因此抛光去除效率逐渐增大。

③进动速度对去除效率的影响。从表 2 中极差分析及图 3 中进动速度对去除效率分布图可以看出，随着进动速度的增加，去除效率几乎不变，相对于其它几个因素，进动速度对抛光效率的影响几乎可以忽略，这主要是因为进动速度影响的是抛光区域的面型质量，对去除效率的影响并不是很大。

④充气压力对去除效率的影响。柔性气囊内部的压力是可以控制的，通过向里面充气可以改变接触区域的压力大小，从 Preston 方程可以得出抛光去除效率与压力之间的关系。由图 3 得出随着气囊充气压力的增加，去除效率呈现增大的趋势，但当气囊压力超过 1.0kPa 时，去除效率几乎不再增加，这主要是因为气囊对接触区的压力是由气囊的弹性系数和压缩量决定的，随着气囊充气压力的增加，气囊弹性系数相对增加的幅度不大，反映在接触区的压力变化也不大，因此抛光效率虽然随着气囊内部压力的增加呈现增大的趋势，但增大趋势并不明显。

⑤抛光液流速对去除效率的影响。由图 3 最后一个关系图可以看出抛光液流速的变化对去除效率的影响也不是很大，在抛光液流速较小时，去除效率几乎不变，随着流速继续增加，去除效率反而减小，这主要是因为气囊抛光的去除主要是由接触区中的磨粒在作用，抛光液的流动可以使接触区内始终存在新的磨粒，在前期达到一种平衡，对去除效率的影响不大，当抛光液流速很大时，过大的流速又会将接触区内的抛光液冲散，使磨粒驻留时间减小，从而降低抛光去除效率。

4 表面粗糙度分析

计算各因素条件下表面粗糙度的极差，结果如表 3 所示。各工艺参数影响分布图如图 4 所示。

从表 3 的正交实验极差分析表中可以看出，各个因素对表面粗糙度影响的主次关系为：气囊压缩量>充气压力>抛光液流速>气囊主轴转速>进动速度。

①气囊压缩量对表面粗糙度的影响。由图 4 中第一个分布图可以看出随着气囊压缩量的增加，被抛光区的表面粗糙度呈现先减小后增大的趋势，这可能是因为开始的时候压缩量的增加，气囊施加在磨粒上的压力并不与气囊压缩量成比例增加，反而促进了表面粗糙度变好，当气囊压缩量继续增加时，气囊作用在工件表面的正压力增大，气囊对磨粒的作用力增大，磨粒压入工件表面的深度加深，磨粒对工件表面的深度加深，磨粒对工件表面产生的划痕深度也增加，同时抛光接触区域变大，接触区压力不均匀，导致表面粗糙度值增大。

表 3 表面粗糙度分析 nm

极差分析	压缩量 A	气囊转速 B	进动速度 C	充气压力 D	抛光液流速 E
S1	10.2	9.12	10.46	10.92	10.88
S2	9.8	9.58	10.02	10.5	10.68
S3	9.36	9.94	10	9.48	9.96
S4	10.46	10.56	9.88	9.94	9.92
S5	11.22	11.84	10.66	10.2	9.6
Max	11.22	11.84	10.66	10.92	10.88
Min	9.36	9.12	9.88	9.48	9.6
R	1.86	1.1	0.78	1.44	1.28

②气囊转速对表面粗糙度的影响。由气囊主轴转速与表面粗糙度的影响分布图可以看出随着气囊主轴转速的增加，被抛光区的表面粗糙度呈增大的趋势，这主要是因为抛光头转速增大时，抛光区内的相对线速度随之增加，作用在工件表面上的剪切力也将增大，同时由于抛光区内抛光液的循环速度加快，使得抛光区

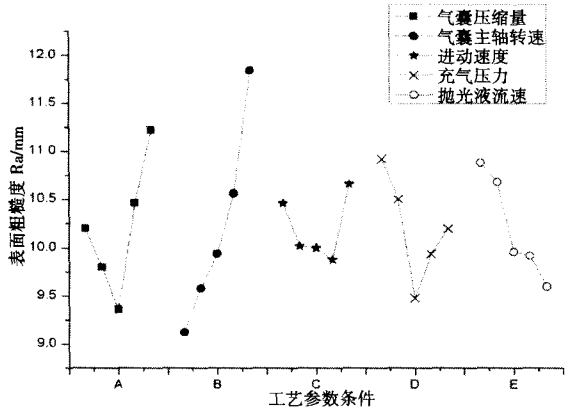


图4 各工艺参数下的表面粗糙度分析图

内的流体压力增大,因此就会产生更强的去除作用,从而使得工件表面粗糙度变差。

③进动速度对表面粗糙度的影响。由正交实验极差分析可知,进动速度对表面粗糙度的影响最小,由图4可以看出,随着进动速度的增加,表面粗糙度先减小后增大,且在中间进动速度变化过程中,对表面粗糙度的变化影响很小。

④充气压力对表面粗糙度的影响。随着气囊充气压力的增加,表面粗糙度呈现先减小后增大的趋势,说明一定的充气压力对抛光区表面粗糙度的改善有一定的促进作用,但充气压力不可过大,过大使得接触区正压力增大,气囊对磨粒的作用力也增大,使得工件表面产生很深的划痕,从而影响表面粗糙度。

⑤抛光液流速对表面粗糙度的影响。由图4抛光液流速与表面粗糙度的关系图可以看出,随着抛光液流速的增加,接触区表面粗糙度逐渐减小,这说明抛光液流速越快,磨粒流动速度加快,使得抛光区内不会存留过多磨粒,有助于表面粗糙度的改善。

5 确定最佳工艺参数

由上面实验分析可以知道,提高材料去除效率和降低表面粗糙度对抛光因素的取值有时是相互矛盾的。按照提高材料去除效率选取工艺参数会引起表面粗糙度的增大,而按照降低表面粗糙度选取工艺参数又会降低抛光效率。因此,为了达到既可以保证抛光效率高又可以降低表面粗糙度的目的,根据抛光工艺的要求,我们得到了以下最佳工艺参数:气囊压缩量0.2mm,气囊主轴转速300r/min,进动速度40r/min,充气压力100kPa,抛光液流速为450mL/min。在最佳工艺参数的基础上对工件进行了加工实验,并分别使用Matlab软件在Preston方程的基础上对去除函数进行了拟合,得到了近似高斯曲线的分布,其去除函数模型如图5所示。

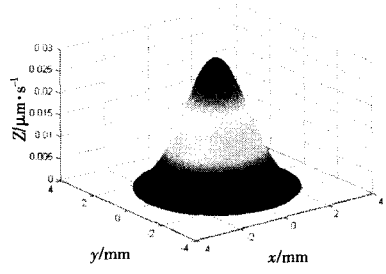


图5 去除函数模型

6 结论

以抛光去除效率和表面粗糙度为考核指标,通过建立正交试验,研究了气囊压缩量、气囊主轴转速、进动速度、充气压力和抛光液流速等工艺参数对平面工件去除效率及表面粗糙度的影响趋势,并结合光学玻璃进动气囊抛光原理进行了分析,可以得出:增大气囊主轴转速、提高充气压力可以提高抛光去除效率,但同时会造成表面粗糙度 R_a 值增大;气囊主轴转速、气囊压缩量、充气压力、抛光液流速、进动速度对抛光材料去除效率的影响依次减小;气囊压缩量、充气压力、抛光液流速、气囊主轴转速、进动速度对表面粗糙度的影响依次减弱。在最佳工艺参数的条件下进行试验,得到了去除函数三维模型,为后续开展去除函数和驻留时间的计算提供了依据,从而指导气囊抛光过程中对光学玻璃元件的面形控制。

参考文献

[1]张伟,李洪玉,金海. 气囊抛光去除函数的数值仿真与试验研究[J]. 机械工程学报,2009,45(2)

[2] 宋剑锋, 姚英学. 气囊抛光工艺参数的正交实验分析[J]. 光学技术,2009,35(2)

[3] 计时鸣,张利,金明生. 气囊抛光技术及其研究现状[J]. 机电工程学报,2010,27(5)

[4] Bingham R G, Walker D D, Kim D H, et al. Novel automated processfor aspheric surfaces [J]. Proc SPIE, 2004, 4093: 445-450

[5] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1989

[6] 侯化国,王玉民. 正交试验法[M]. 吉林:吉林人民出版社,1985

(收稿日期2013-10-22)