化学机械抛光的钛宝石晶体低损伤加工

金寿平，童宏伟，张玉慧，付跃刚

（长春理工大学 光电工程学院，吉林 长春 130022）

摘　要： 针对钛宝石晶体表面低损伤加工进行了系统研究，在 CCOS 数控小磨头抛光机上进行了正交实验，选用不同的抛光液对钛宝石进行化学机械抛光，有效去除精磨阶段的亚表面损伤，实验证明 SiO_2 硅溶液作为磨料的抛光效果好，适合作为钛宝石加工的抛光液。研究了抛光盘种类、抛光盘压力、抛光盘速度、硅溶胶稀释浓度这四个因素和钛宝石晶体表面粗糙度和表面疵病的关系，并获得钛宝石低缺陷加工过程中工艺参数的影响规律。按照优化后的工艺参数进行实验，获得了低缺陷、高精度的钛宝石表面。运用灰色关联分析法对抛光参数进行优化，在最佳加工工艺组合条件下，得到钛宝石表面粗糙度为 0.262 nm，表面疵病率为 1.4×10^{-3} mm^{-1}。

关键词： 钛宝石；　化学机械抛光；　表面粗糙度；　表面疵病；　灰度关联

中图分类号： O786　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.3788/IRLA201948.1215002

Low damage processing of titanium gemstone crystal based on chemical mechanical polishing

Jin Shouping, Tong Hongwei, Zhang Yuhui, Fu Yuegang

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A systematic study on the low damage processing of titanium gemstone crystal surface was carried out. The orthogonal experiment was carried out on the CCOS numerical control small grinding head polishing machine. Different polishing liquids were used to chemically polish the titanium gemstone to effectively remove the subsurface damage during the fine grinding stage. The experiment proves that the SiO_2 silicon solution has good polishing effect as an abrasive, and is suitable as a polishing liquid for processing titanium gemstone. The four factors of polishing disc type, polishing disc pressure, polishing disc speed and silica sol dilution concentration and the relationship between surface roughness and surface rickets of titanium gemstone crystal were studied, and the influence of process parameters on the process of low-defect processing of titanium gemstone was obtained. Experiments were carried out according to the optimized process parameters, and a low-defect, high-precision titanium gemstone surface was obtained. The method of grayscale correlation was employed to optimize polishing parameters. After optimization, the system was under the condition of the best combination of processing technique. Finally, a well processed titanium gemstone crystal is obtained, the surface of which possesses a roughness of 0.262 nm and the surface defect rate of the polished crystal is 1.4×10^{-3} mm^{-1}.

Key words: titanium gemstone;　chemica-mechanical polishing;　surface roughness;　surface rickets;　grayscale correlation

收稿日期： 2019-09-05；　**修订日期：** 2019-10-15

基金项目： 国家自然科学基金(61705018)

作者简介： 金寿平(1970-)，男，博士生，主要从事先进光学制造方面的研究。Email:jinsp@mail.nosta.gov.cn

导师简介： 付跃刚(1972-)，男，博士生导师，博士，主要从事光学设计和微纳光学设计与制作方面的研究。Email:fuyg@cust.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0 引 言

钛宝石作为一种多晶体材料,具有优良的机械性能、稳定的化学性质及高透光性,被广泛地应用于国防、超导、光电子等领域。因其高硬度特性,一般采用金刚石磨料进行加工,在材料去除过程中,晶体表面往往因挤压会产生裂纹、凹坑等缺陷。在强激光应用领域中,这些表面缺陷[1-2]会造成元件激光损伤,除了引起热效应和非线性效应造成光学元件及其膜层受到破坏之外,其表面所引起的散射也将导致传输光束的能量减小和质量下降。因此,对于加工元件表面的缺陷检测与控制已成为光学加工过程中必不可缺的关键技术。传统的机械加工手段主要包括金刚石车刀超精密切削、超精密砂带磨削和研抛、金刚石微粉砂轮超精密磨削等[3-7]。这些加工工艺适用于大尺寸光学元件的制备,对微纳米光学微结构不再适用。

钛宝石优异的机械性能和稳定的化学性能是表面处理工艺的难点,为获得超光滑的钛宝石表面,国内外学者进行许多探索[8-11],主要的抛光方法有:化学机械抛光、机械化学抛光、水合法抛光、纯化学抛光、机械抛光、激光束抛光、离子束抛光等。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位将数控小磨头抛光、磁流变抛光、磨料射流抛光和离子束抛光技术用于光学镜面的超精密加工[12-15]。

其中,数控小磨头抛光去除函数不能长时间稳定,存在工具磨损、塌边、亚表面损伤等缺点;磁流变抛光对工件尺寸和曲率有一定的限制,加工斑点小,且加工的工件表面误差中包含较多的中高频成份。磨料射流抛光加工去除函数不理想并且仅能抛光小口径非球面镜,目前还处于发展和完善阶段;而离子束抛光需要在真空环境下加工,加工的光学材料选择受限,去除速率低。这些先进的加工技术为钛宝石超精密加工的进一步研究打下良好的基础,而针对这些技术各自本身的局限仍有待研究改进。文中采用化学机械抛光法去除精磨阶段的缺陷层,以获取低缺陷、高精度的加工表面。

1 钛宝石晶体表面粗糙度及疵病的测量

强激光系统对光学元件的表面粗糙度、表面疵病提出了较高的要求。表面粗糙度表征待测元件表面微观形貌不均匀程度,而表面疵病则表征待测元件表面宏观划痕、麻点、破边等瑕疵。表面粗糙度测量方式包括接触式和非接触式,接触式表面轮廓仪测试较为方便,但测量精度低且易对元件表面产生划痕。经过精抛后的钛宝石属于光滑表面,不宜采用金刚石探针接触,因此笔者所在课题组采用非接触式的激光轮廓仪来检测表面粗糙度。其优点是无损伤检测,空间分辨率和测量精度高。

国标中,用字母 B 表示“表面疵病”,用字母 M 代表表面缺陷面积,单位为 mm^2,用字母 J 表征待测元件表面疵病的大小,$J=\sqrt{M}$,允许的缺陷个数为 G,长划痕用 L 表示。不同国家的检测标准不同,但大体上时对表面的划痕、麻点、破边进行检测。针对光学元件表面疵病的检测方法主要包括:目视法即人工检测,其缺点是主观性强,由检测人员操作所引入的误差较大,不够精确;光学显微镜辅助在线检测,其受限于扫描电镜的载物空间,只能适用于小口径光学元件的疵病检测;大口径数字化表面疵病仪检测,基于显微散射暗场成像原理,其分辨率高,适用于大口径平面元件的检测。基于以上检测技术现状和实际测量需要,选用大口径平面疵病仪检测表面疵病率。

2 钛宝石晶体表面的低缺陷抛光技术

晶体材料的抛光方法主要有:机械抛光、化学抛光、离子束抛光、激光束抛光等。机械抛光虽然能够实现全局平面化,但是不能实现纳米级抛光,化学抛光则恰好相反,目前尚未成熟的离子束抛光和激光束抛光也不能实现全局平面化。

为达到激光输出质量,要求钛宝石加工表面平整光滑、缺陷水平低,因此结合上述机械抛光和化学抛光的特点,根据钛宝石晶体的物理化学性质,文中提出在钛宝石晶体抛光阶段,采用化学机械抛光法去除 CCOS 数控小磨头抛光机精抛过程中产生的疵病并降低表面粗糙度,以获取低缺陷、高精度的加工表面。

2.1 化学机械抛光的原理

化学机械抛光是机械磨削和化学腐蚀的组合技术,借助超微粒子的研磨作用以及浆料的化学腐蚀

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作用,实现全局超光滑纳米级无损伤精密抛光。研磨液中的晶体相对于抛光垫旋转,施加一定的压力,使抛光液与晶体发生化学反应，不溶物质转化成易溶物质,从晶体表面脱离解吸。然后通过机械摩擦将这些易溶物从晶体表面去除，使未反应的晶面裸露出来,可控制抛光速率。化学机械抛光是一个复杂的多相反应，两个过程相互促进循环往复，影响抛光速率,为了实现晶体表面全局光滑平面化,抛光过程中的化学反应作用和机械反应作用需要达到平衡。

2.2 化学机械抛光参数的影响

化学机械抛光过程较为复杂，其复杂性不仅在于影响因素较多,还体现在各因素之间的相互作用,因此其抛光效果远大于化学去除和机械去除的简单相加。各影响因素包括:抛光液种类、温度和 PH 值,抛光压力和转速,氧化剂、磨料浓度和抛光垫等。

2.2.1 抛光压力

抛光压力不仅影响晶体与抛光垫的实际接触面积，而且会影响抛光浆料与实际晶体表面的作用时间,从而影响到氧化剂在表面的扩散深度。抛光压力还会影响到抛光接触的摩擦力和系统的摩擦热量,摩擦热会导致晶体表面温度上升，进而对抛光液的化学反应速率和机械去除过程有直接的影响。

2.2.2 抛光磨粒

抛光液是影响加工质量的决定性因素，它既影响化学作用过程,又影响到其机械作用过程。抛光液一般由超细固体磨料、表面活性剂、稳定剂、化学反应剂等组成,其化学成分影响溶液 PH 值,决定抛光液和晶体表面进行什么样的化学反应过程，反应过程中的吸热或放热,也会影响抛光温度。抛光液中的磨粒对于化学机械抛光中机械作用的强弱和表面去除速率有着非常重要的影响，磨粒的粒径和硬度会影响去除速率和材料表面损伤，磨粒的浓度和分布均匀性会影响抛光的精密程度和速率。

2.2.3 抛光辅料

在低缺陷加工过程中，选用 SiO_2 溶胶作为抛光辅料,硅溶胶为碱性材料,影响钛宝石表面的化学作用机理,以及表面软质层的形成,对抛光过程中胶体的稳定性和化学成分活性也有很大的影响。相对于酸性介质来说,硅溶胶参与的反应速率较低,但是不会腐蚀设备,不会产生非均匀化腐蚀,造成对表面局部平整度的影响。

2.2.4 活性剂

活性剂可以对抛光晶体进行浸湿和润滑，从而提高抛光表面质量,对抛光液的分散性、金属离子污染、吸附颗粒的解吸难易均有影响。采用了亲水性二氧化硅配置的硅溶胶作为抛光液，添加聚乙二醇 600 作为分散剂,提高分散液的抛光均匀性。

3 正交分析实验

选取对表面粗糙度和表面疵病率可能会产生影响的几个因素进行工艺实验，运用正交实验分析这些因素对低缺陷加工的影响，以确定这些工艺参数对表面粗糙度和表面疵病率的影响规律。

3.1 正交实验设计

实验考虑了抛光盘、抛光压力、抛光转速、硅溶胶浓度作为主要的四个影响因素，每个因素选取了三个水平,如表 1 所示。

表 1 正交实验因素和水平分布表

Tab.1 Orthogonal experimental factors and horizontal distributions

Factors	A	B	C	D
	Polishing disk	Pressure/bar	Rotating speed/r·h^{-1}	Ludox concentration
1	Copper disk	0.36	2 000	1:1
2	Pitch disk	0.58	2 500	2:1
3	Polyurethane disk	0.80	3 000	4:1

由表 1 可知实验是四因素三水平的正交实验,按照 $L_9(3^4)$的正交表进行实验方案配制。实验中选取编号为 C120-28、几何尺寸为 Φ120 mm×28 mm 的钛宝石晶体作为实验件，数控小磨头所用抛光盘的尺寸为 Φ20 mm,具体加工技术指标要求如下：

(1) 单面(箭头面)面形 PV 优于 0.5λ(@632.8 nm);(2) 透过波前 PV 优于 0.5λ;(3) 粗糙度 RMS 优于 0.5 nm;(4) 疵病等级优于 II 级。

3.2 正交实验结果

实验采用的机床是 CCOS 数控小磨头加工机床,加工程序设定为均匀去除,选用相同口径的钛宝石实验件,实验件均经过同样的工序加工。实验件的表面粗糙度是通过激光轮廓仪检测，表面疵病率是通过大口径平面疵病仪检测。实验中采用的步距为 2 mm,无公转速度,只有抛光盘的自转速度,采用的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

硅溶胶 SX-100 中位粒径在 100 nm，实验表中的硅溶胶浓度为与去离子水稀释的浓度比例。实验中采用的铜盘、沥青盘、聚氨酯盘都是相同口径，均开有“井”型凹槽，且都经过相同工艺修整。

加工后的实验件经过超声清洗以后进行表面粗糙度检测和疵病仪检测，实验结果取平均值，以降低实验过程中存在的误差影响，实验结果如表 2 所示。

表 2 正交实验方案及结果

Tab.2 Scheme and results of the orthogonal experiment

No.	Experimental scheme				Experimental results	
	A	B	C	D	RMS/nm	Defect rate /mm^{-1}
1	1	1	1	1	0.380	1.6×10^{-3}
2	1	2	2	2	0.401	2.2×10^{-3}
3	1	3	3	3	0.525	2.4×10^{-3}
4	2	1	2	3	0.812	1.6×10^{-3}
5	2	2	3	1	0.717	1.8×10^{-3}
6	2	3	1	2	0.977	2.0×10^{-3}
7	3	1	3	2	0.995	1.8×10^{-3}
8	3	2	1	3	1.117	2.6×10^{-3}
9	3	3	2	1	1.000	2.8×10^{-3}

从表 2 可以看出实验序号 1 的实验结果最好，表面粗糙度达到了 0.38，疵病率也较小，达到了 1.6×10^{-3} mm^{-1}。序号 8 的实验件表面粗糙度最差，为 1.117 nm 未达到超光滑的要求，疵病率也较差，达到 2.6×10^{-3} mm^{-1}。整体而言运用铜盘的实验加工效果较好。

3.3 正交实验分析

对表 2 结果进行正交分析，结果如表 3、表 4 所示。

表 3 表面粗糙度正交分析结果

Tab.3 Results of orthogonal analysis of surface roughness

Level	A	B	C	D
I	1.831	2.187	2.474	2.097
II	2.506	2.235	2.213	2.373
III	3.112	2.502	2.237	2.454
I/3	0.610	0.729	0.825	0.699
II/3	0.835	0.745	0.738	0.791
III/3	1.037	0.834	0.746	0.818
R	0.427	0.105	0.087	0.119
Optimal parameter	A1	B1	C2	D1

表 4 表面疵病正交分析结果

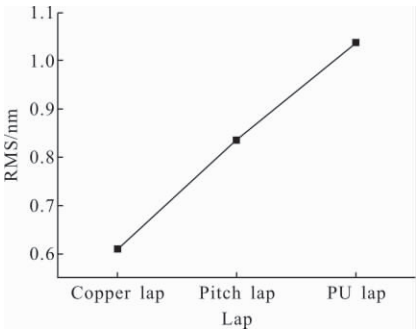
Tab.4 Results of orthogonal analysis of surface defects

Level	A	B	C	D
I	6.2	5	6.2	6.2
II	5.8	6.5	6.6	6
III	7.2	7.2	6	6.6
I/3	2.07	1.53	2.07	2.07
II/3	1.93	1.67	2.2	2
III/3	2.4	2.17	2	2
R	0.47	0.64	0.13	0.13
Optimal parameter	A2	B1	C1	D2

各个因素水平对表面粗糙度和表面疵病的影响规律如图 1 和如图 2 所示。

由表 3 可以看出，通过极差分析后可以得出各因素对表面粗糙度的影响主次关系为：抛光盘种类>硅溶胶浓度>压力>转速。

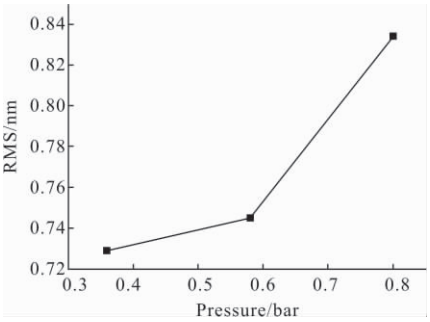
由图 1 可以看出，抛光盘选用铜盘时其表面粗糙度最小，优于沥青盘和聚氨酯盘。随着压力增大，抛光后的钛宝石晶体表面粗糙度上升。抛光压力不足时，表面反应物不能被摩擦力有效去除，化学反应占主导作用；压力增大虽然会增强机械作用，使得材料去除率增加，抛光速率增强，但是表面易出现划痕，并出现应力缺陷，此外还会导致设备震动加大。因此抛光压力不能一味过高，在兼顾抛光速率和表面光滑度的情况下，压力在 0.36 bar(1 bar=10^5 Pa)时比较理想。当转速为 2 500 r/h 时，钛宝石晶体表面粗糙度最小。随着硅溶胶浓度下降，表面粗糙度上升，因此硅溶胶稀释浓度在 1:1 时最佳。



(a) 粗糙度随抛光盘的变化曲线

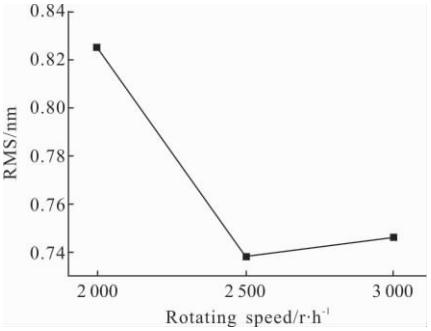
(a) Chang curve of the roughness with the polishing disk

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



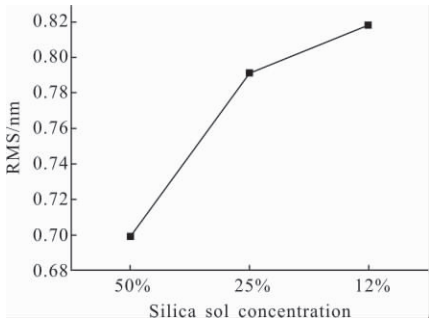
(b) 粗糙度随压力的变化曲线

(b) Change curve of the roughness with the polishing pressure



(c) 粗糙度随抛光盘自转的变化曲线

(c) Change curve of the roughness with the rotation of the polishing disk



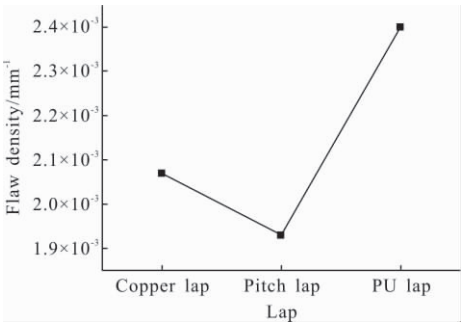
(d) 粗糙度随硅溶胶浓度的变化曲线

(d) Change curve of the roughness with the concentration of the silica sol

图 1 表面粗糙度与各因素水平的关系

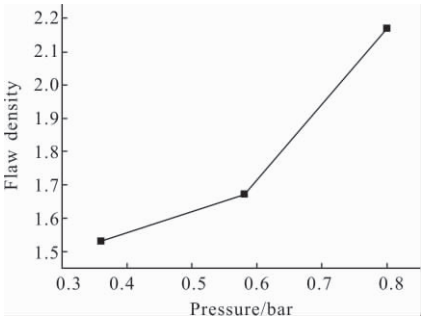
Fig.1 Relationship between surface roughness and the level of various factors

由表 4 可以看出，通过极差分析后可以得出各因素对表面疵病率的影响主次关系为：压力>抛光盘种类>硅溶胶浓度=转速。由图 2 可以看出，抛光盘选用沥青盘使其表面疵病率最小，优于铜盘和聚氨酯盘，随着压力增大，抛光后的钛宝石晶体表面疵病率上升。当转速为 2 500 r/h 时，钛宝石晶体表面疵病率最大。当硅溶胶稀释浓度为 25%时，钛宝石晶体表面疵病率最小。



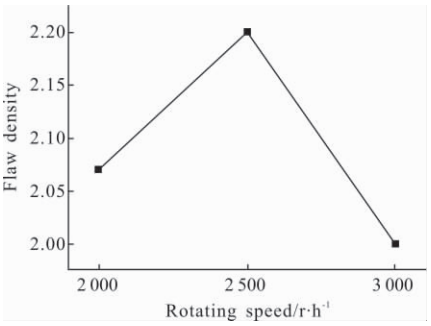
(a) 疵病率随抛光盘的变化曲线

(a) Change curve of the defect rate with the polishing disk



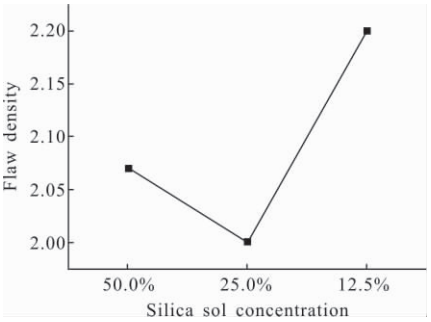
(b) 疵病率随压力的变化曲线

(b) Change curve of the defect rate with the polishing pressure



(c) 疵病率随抛光盘自转的变化曲线

(c) Change curve of the defect rate with the rotation of the polishing disk



(d) 疵病率随硅溶胶浓度的变化曲线

(d) Change curve of the defect rate with the concentration of the silica sol

图 2 疵病率与各因素的关系图

Fig.2 Relationship between defect rate and various factors

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从以上分析可以看出，钛宝石晶体表面粗糙度和表面疵病率是互不相关的，很难同时将两个指标进行优化。

4 灰色关联分析

灰色关联分析法用于分析两个指标对相同因素的变化的关联性大小的度量，若两个指标变化趋势具有一致性时，则称其关联度较高。该方法通过一定的计算寻求各因素之间的变化关系，并提供定量比较，因此非常适合分析钛宝石晶体低缺陷加工中针对表面粗糙度和表面疵病的参数优化。

4.1 结果归一化处理

由于表面粗糙度和表面疵病属于不同物理量，无法直接比较，因此先对其进行归一化处理，见表 5。

表 5 疵病归一化的处理结果

Tab.5 Normalized results of the defects

Sequence number	RMS/nm	Defect rate/mm^{-1}
1	0	0
2	0.028	0.5×10^{-3}
3	0.197	0.75×10^{-3}
4	0.586	0
5	0.457	0.17×10^{-3}
6	0.81	0.33×10^{-3}
7	0.83	0.17×10^{-3}
8	1	0.83×10^{-3}
9	0.841	1×10^{-3}

4.2 确定目标参考序列

参考序列是一个无量纲系数，将参考序列与实验结果矩阵相减取绝对值获得一个新的矩阵，由于钛宝石晶体表面粗糙度越小越好，因此其参考序列为 $Kc=\{0,0\}$，所以处理后新矩阵就是实验结果矩阵。

4.3 灰色关联度及系数的计算

实验结果矩阵的灰色关联系数计算公式如公式(1)所示。

$$\zeta_1(k)=\frac{i_{\min}k_{\min}|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\cdot i_{\max}k_{\max}|x_0(k)-x_i(k)|}{|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\cdot i_{\max}k_{\max}|x_0(k)-x_i(k)|},\quad k=1,\cdots,m \tag{1}$$

式中：ζ_i 为实验结果的灰色关联系数；$k_{\min}$、$k_{\max}$ 为实验结果中的最小值和最大值；ρ 为分辨系数，是 $k_{\max}$ 的权重，可抑制最大值对灰色关联系数的影响，削弱实验中的异常值，一般在 0~1 之间，文中实验取 0.75。

将每个指标灰色关联系数取平均数即得灰色关联度，值越大表明两个指标在该因素水平下的相关程度最大，越接近理想的实验结果。

在不同因素和水平下的灰色关联系数及灰色关联度如表 6 所示。

表 6 各因素水平的灰色关联度和系数

Tab.6 Grey correlation degree and coefficient of each factor level

Factor	Level	Grey relational coefficient		Grey relation degree
		RMS	Defect	
A	1	0.919	0.7	0.81
	2	0.554	0.836	0.695
	3	0.458	0.573	0.516
B	1	0.679	0.938	0.809
	2	0.671	0.63	0.651
	3	0.581	0.541	0.561
C	1	0.637	0.723	0.68
	2	0.665	0.696	0.681
	3	0.629	0.71	0.67
D	1	0.697	0.748	0.723
	2	0.64	0.703	0.672
	3	0.594	0.658	0.626

通过表 6 可以分析出因素 A 即抛光盘的灰色关联度顺序是：铜盘>沥青盘>聚氨酯盘，即选用铜盘时能够较好地控制疵病和表面粗糙度。因素 B 即抛光盘压力的灰色关联度顺序是：B1>B2>B3，表明压力在 0.36 bar 时，钛宝石晶体低缺陷水平较好。因素 C 即转速 C2 最大，因此抛光盘转速选用 2 500 r/h 时最佳。因素 D 即硅溶胶稀释浓度为 D1>D2>D3，即稀释浓度为 1:1 时最佳。综合考虑以上分析，最佳加工工艺参数组合为：铜盘、抛光盘压力 0.36 bar、转速 2 500 r/h、硅溶胶稀释浓度 1:1。按照优化后的工艺参数进行验证性实验，得到表面粗糙度为 0.262 nm、表面疵病率为 1.4×10^{-3} mm^{-1} 的钛宝石晶体，表面疵病

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

达到了国标 I-10 等级,如图 3 所示。

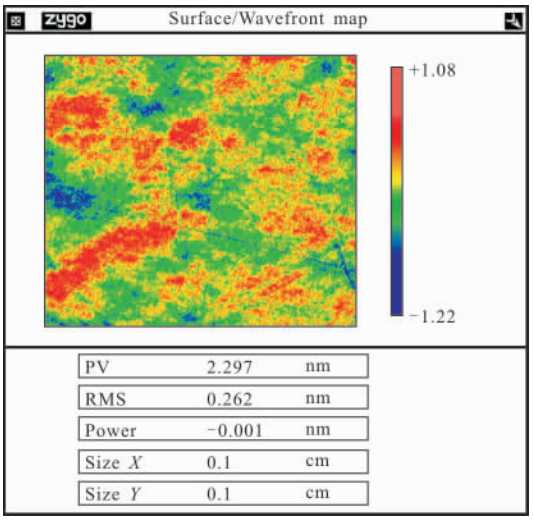


图 3 优化后得到的钛宝石晶体表面粗糙度图

Fig.3 Surface roughness graph of the titanium gemstone crystal obtained after optimization

5 结 论

文中针对钛宝石晶体表面低损伤加工进行了系统研究，选用不同的抛光条件对钛宝石进行化学机械抛光,有效去除精磨阶段的亚表面损伤。其中,展开了钛宝石低缺陷加工研究，包括钛宝石晶体表面粗糙度及疵病的检测技术，在 CCOS 数控小磨头抛光机上进行了正交实验，研究了影响表面粗糙度和表面疵病率的一些参数，并获得了钛宝石低缺陷加工过程中工艺参数的影响规律,得到如下结论：

对表面粗糙度影响的主次关系为:抛光盘种类>硅溶胶稀释浓度>抛光盘压力>抛光盘转速；对表面疵病影响的主次关系为：抛光盘压力>抛光盘种类>抛光盘转速=硅溶胶稀释浓度;运用灰色关联分析法对抛光参数进行优化,在最佳加工工艺组合即铜盘、抛光盘加压 0.36 bar、抛光盘转速 2 500 r/h、硅溶胶稀释浓度为 1:1 下进行实验验证，得到的钛宝石表面粗糙度为 0.262 nm,表面疵病率为 1.4×10^{-3} mm^{-1}。

参考文献：

[1] You Xinghai, Zhang Bin. Influence of optical element quality on signal-to-noise ratio of infrared optical system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(3): 263-271. (in Chinese)

[2] You Xinghai, Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, et al. Influence of element defect on stray radiation characteristics of infrared optical system [J]. ***Infrared and Laser Engineering, Engineering***, 2017, 46(1): 0120004. (in Chinese)

[3] Nakamura S, Senoh M, Netal Iwasa. High brigtness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures [J]. ***Jap J Appl Phys***, 1995, 34(7A): L797.

[4] Zhong Bo, Chen Xianhua, Wang Jian, et al. Manufacturing and testing of high precision off-axis aspheric lens [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(7): 0718003. (in Chinese)

[5] Wang Xing, Xu Qin, Zhang Yong, et al. Self-excited pulsed cavitation jet polishing technique for nano-colloids [J]. ***Optical Precision Engineering***, 2018, 26(9): 2295-2304. (in Chinese)

[6] Yang Zheng, Jin Zhiwei, Chen Jianjun, et al. Reactive ion etching and polishing of polyimide film[J]. ***Optical Precision Engineering***, 2019, 27(2): 302-308. (in Chinese)

[7] Eberhard Prochnow, David F Edwards. Preparing precision ultrafine sapphire surfaces: a practical method [J]. ***Appl Opt***, 1986, 16(25): 2639-2640.

[8] Preston F. The theory and design of Plate glass Polishing machines[J]. ***J Soc Glass Technol***, 1927, 9: 214-256.

[9] Kim D W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes [J]. ***Optics Express***, 2005, 13(3): 910-917.

[10] Wang Quantu, Yu Jingchi, Zhang Feng. The comparison of the polishing characteristics of the small polishing disk in the numerical control polishing [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 1999, 7(5): 73-80. (in Chinese)

[11] Zheng W M, Cao T N, Zhang X Z. Applications of a novel general removal function model in the CCOS [C]//SPIE, 2000, 4231: 51-59.

[12] Xu Le, Zhang Chunlei, Dai Lei, et al. Research on manufacturing method of non-rotationally symmetrical aspheric surface with high accuracy [J]. ***Chinese Optics***, 2016, 9(3): 364-370. (in Chinese)

[13] Peng Lirong, Ma Zhanlong, Wang Gaowen, et al. Key technology of ultra-thin optical element precision manufacture [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(6): 964-970. (in Chinese)

[14] Tang Wa. Reasearch on removal model and technology for ion beam figuring large aspherical mirror [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[15] Ma Zhanlong, Liu Jian, Wang Junlin. Material removal mechanism and influence factor of fluid jet polishing [J]. ***Journal of Applied Optics***, 2011, 32 (6): 1206-1211. (in Chinese)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net