

引文格式: 彭云峰, 杨磊, 刘晓阳. 氟化钙抛光加工工艺及进展 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 14-25.

PENG Yunfeng, YANG Lei, LIU Xiaoyang. Polishing process and progress of calcium fluoride[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 14-25.

## 氟化钙抛光加工工艺及进展\*

彭云峰<sup>1,2</sup>, 杨磊<sup>1,2</sup>, 刘晓阳<sup>3</sup>

(1. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005;

2. 厦门大学深圳研究院, 深圳 518000;

3. 北京首量科技股份有限公司, 北京 101111)

[摘要] 氟化钙(Calcium fluoride, CaF<sub>2</sub>)晶体是一种非常重要的光学晶体,因其具备高透射率和良好的长期辐射稳定性被广泛应用于光学仪器中。随着光刻技术向较短波长的发展, CaF<sub>2</sub>更是成为极紫外光刻物镜的首选材料。CaF<sub>2</sub>是一种典型的脆性材料,断裂韧性很低,一般通过抛光加工制成 CaF<sub>2</sub>光学表面,所以其抛光加工技术与工艺尤其重要。总结了 CaF<sub>2</sub>的主要加工方法、工艺及研究成果,介绍了其粗加工阶段所涉及的超精密切削和固结磨料研磨方法;重点从超精密抛光这一方面,较全面地概述了浮法抛光、化学机械抛光、固结磨料抛光、磁流变抛光、振动辅助固结磨料抛光和离子束抛光等抛光方法的原理及进展,并对以上加工方法进行对比;最后,对 CaF<sub>2</sub>抛光加工技术的未来发展方向做了初步展望。希望能为 CaF<sub>2</sub>加工领域后续深入研究提供参考。

关键词: 氟化钙(CaF<sub>2</sub>); 脆性材料; 光学元件加工; 超精密加工; 抛光技术

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.13.014



彭云峰

教授, 博士, 研究方向为精密工程, 包括光学先进制造、单点金刚石切削、精密磨削、磨粒抛光、加工环境控制、精密制造相关检测、微摩擦、表面织构化技术等。

极紫外光刻机是现阶段高端集成电路的主流设备,其物镜系统具有加工精度高、面形复杂的特点,为保证光刻物镜的成像质量能够达到衍射极限,则核心光学元件应满足在极紫外波段必须具备极高的激光损伤阈值与低折射率,以形成超高精度、极低损伤的超光滑表面。氟化钙(Calcium fluoride, CaF<sub>2</sub>)晶体具有从真空紫外到红外的折射率和波长透过率的大范围变化,具有高达 130 nm 的透射率和良好的长期辐射稳定性<sup>[1-4]</sup>。作为一种优良的光学材料, CaF<sub>2</sub>可用于透镜、棱镜和窗口件等光学元件的制作,尤其适用于极紫外光刻物镜和下一代短波长步进透镜的衬底材料<sup>[5-6]</sup>。

CaF<sub>2</sub>晶体是一种典型的脆性材

料,材质较软,难抛光,易污染,且材料各向异性,因此很难制造成复杂形状的光学元件,如非球面透镜或衍射光栅<sup>[7]</sup>。同时,由于 CaF<sub>2</sub>的材料特性会给加工带来极大难度,所以必须解决 CaF<sub>2</sub>晶体材料的加工难题,以满足光刻物镜等光学元件制造的需要<sup>[8]</sup>。目前,能够获得较好的 CaF<sub>2</sub>晶体表面质量和表面形貌的方法就是通过超精密抛光,如:浮法抛光、化学机械抛光、固结磨粒抛光、磁流变抛光和离子束抛光等。为获得超光滑的 CaF<sub>2</sub>表面,现阶段主流抛光方法是采用化学机械抛光和离子束抛光相结合的组合工艺方法:首先利用化学机械抛光降低亚表面损伤层厚度、提高表面精度,进而通过离子束抛光获得超光滑表面。

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52075463); 深圳市科技计划项目(JCYJ20210324122001003)。

本文主要从CaF<sub>2</sub>晶体性质、抛光前的粗加工、抛光、抛光后表面清洗这4个方面对现有的CaF<sub>2</sub>晶体抛光加工技术的原理及研究成果进行介绍与分析,对CaF<sub>2</sub>抛光加工技术的未来发展方向进行初步展望。

## 1 CaF<sub>2</sub> 晶体性质

### 1.1 CaF<sub>2</sub> 晶体结构

CaF<sub>2</sub>晶体是典型的萤石型立方结构,属立方晶系,其空间群是Fm-3m,晶胞常数为a=b=c=0.5463 nm,α=β=γ=90°,Z=4。晶体结构如图1所示<sup>[9]</sup>,Ca<sup>2+</sup>与周围8个F<sup>-</sup>离子结合成八配位,形成Ca-F<sub>8</sub>立方体。F<sup>-</sup>与周围4个Ca<sup>2+</sup>离子结合成4配位,形成正四面体。

图2为CaF<sub>2</sub>{111}、{110}、{100}和{310}晶面的原子键合状态和表面结构示意图,这4个晶面是目前国内外重点研究的主要晶面<sup>[10]</sup>。

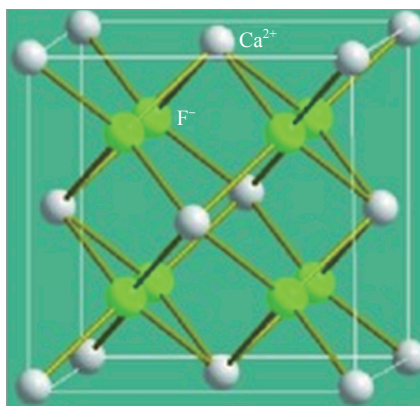


图1 CaF<sub>2</sub>晶体的结构示意图<sup>[9]</sup>  
Fig.1 Structure diagram of CaF<sub>2</sub> crystal<sup>[9]</sup>

### 1.2 CaF<sub>2</sub>的基本理化性质和光学性质

CaF<sub>2</sub>晶体是典型的脆性材料,无色透明,热膨胀系数高,导热系数低,断裂韧性很低,表1所示为CaF<sub>2</sub>晶体的基本物理性质<sup>[11]</sup>。

CaF<sub>2</sub>晶体的化学性质比较稳定,在20℃水中溶解度为0.016 g,微溶于稀无机酸,能溶于浓无机酸,放出氟化氢(HF)气体,不溶于有机溶剂<sup>[9]</sup>,高温下(>800℃)容易水解生成氧化钙(CaO)。

CaF<sub>2</sub>晶体的光学性质主要表现为具有非常宽的透光范围,透射率高,折射率低等。CaF<sub>2</sub>晶体对光的透过波长范围可从真空紫外一直到中红外,典型波长范围为125~10000 nm。图3和4分别展示了3 mm厚度、{111}晶

面取向的CaF<sub>2</sub>透过率和折射率随波长变化的情况<sup>[2]</sup>。

## 2 CaF<sub>2</sub> 抛光前处理(粗加工)

超精密切削加工和研磨加工都是光学元件加工的重要技术手段,是CaF<sub>2</sub>工艺流程中超精密抛光加工的前一道工序,其主要目的是快速高效地得到工件的形状和更接近使用需求的工件表面质量。

### 2.1 单点金刚石切削

因为具有化学惰性、极高的韧性和耐磨性,金刚石成为超精密切削中刀具的主要材料,依托于精密机床,单点金刚石切削(Single point diamond turning, SPDT)能够实现高效率、高精度的光学元件加工,图

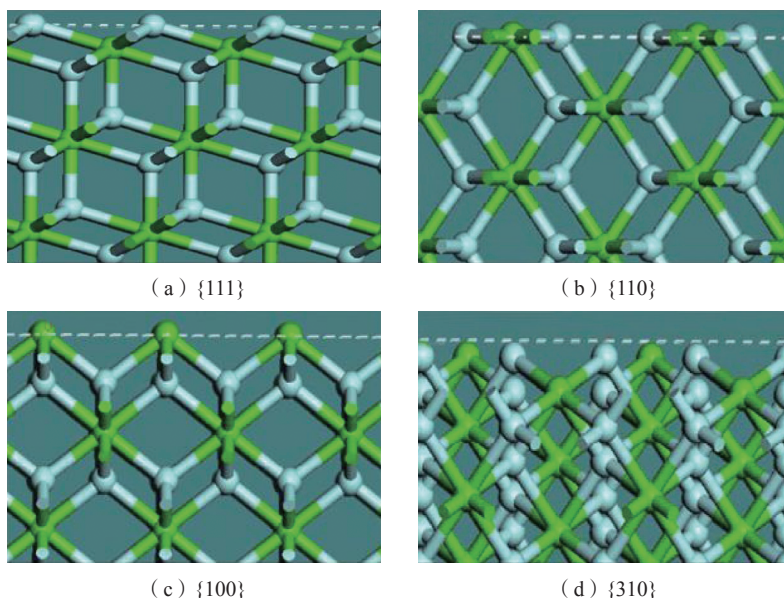


图2 CaF<sub>2</sub>{111}、{110}、{100}、{310}晶面的原子键合状态和表面结构示意图<sup>[10]</sup>  
Fig.2 Surface structure and atomic bonding of CaF<sub>2</sub>{111}, {110}, {100}, {310}<sup>[10]</sup>

表1 CaF<sub>2</sub>的基本物理性质<sup>[11]</sup>

Table 1 Basic physical properties of CaF<sub>2</sub><sup>[11]</sup>

晶体密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	热传导系数(熔体)/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热传导系数(晶体)/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	介电常数(1 MHz)	泊松系数	晶体导热率(273 K)/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热膨胀系数/℃	努氏硬度 / (kg·mm <sup>-2</sup> )
3.18	10	5	6.76	0.28	9.71	25	152~159
熔体密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	体积模量 /GPa	杨氏模量 /GPa	剪切模量 /GPa	热辐射系数	沸点/℃	熔点/℃	比热 / (J·g <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
2594	82.71	89.8	33.77	0.8	2500	1418 (1382)	0.88

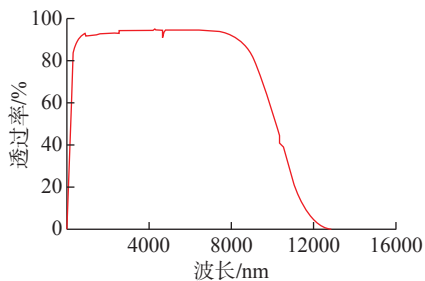


图3 CaF<sub>2</sub> 典型透射率曲线<sup>[2]</sup>

Fig.3 Typical transmittance curve of CaF<sub>2</sub><sup>[2]</sup>

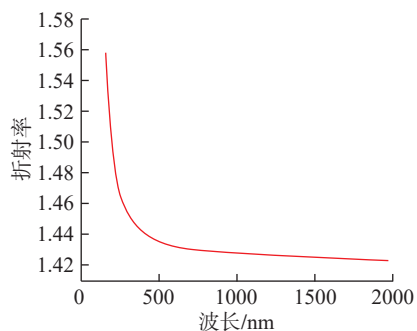
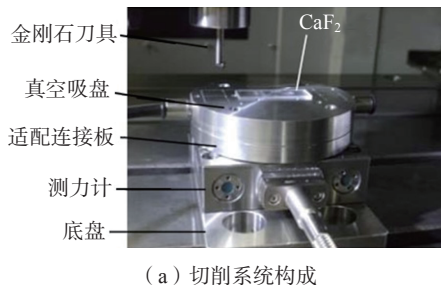


图4 CaF<sub>2</sub> 折射率随波长变化<sup>[2]</sup>

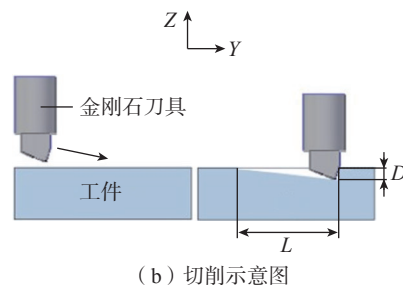
Fig.4 Variation of refractive index of CaF<sub>2</sub> with wavelength<sup>[2]</sup>

5为SPDT加工CaF<sub>2</sub>的示意图<sup>[12]</sup>。使用真空吸盘将CaF<sub>2</sub>固定在工作台上,在与CaF<sub>2</sub>表面垂直即Z轴方向上安装刀具,加工时接触CaF<sub>2</sub>表面,并沿着不同方向进行切削<sup>[12]</sup>。

日本Yan等<sup>[13]</sup>采用SPDT加工CaF<sub>2</sub>晶体,加工后使用AFM在尺寸7 μm × 7 μm的区域进行观测,得到CaF<sub>2</sub>表面的最大高度R<sub>y</sub>18.5 nm、表面粗糙度为R<sub>a</sub>3.3 nm。同时,其在单晶CaF<sub>2</sub>{111}晶面的材料去除过程中发现,切削方向影响切削质量,切削方向与该晶面的夹角较小时工件表面更容易发生解理破碎<sup>[14]</sup>。在此基础上,日本Kakinuma等<sup>[15]</sup>分别对CaF<sub>2</sub>{110}、{111}和{100}晶面的不同晶向进行切削,据此研究加工表面粗糙度的变化(图6),发现相比于其他两种晶面,滑移变形更容易发生在{100}晶面的切削过程中,其切削面的粗糙度稳定在较低值。除此之外,在金刚石刀具前角更小的情况下,切削得到的CaF<sub>2</sub>晶体会具有更



(a) 切削系统构成



(b) 切削示意图

图5 SPDT加工CaF<sub>2</sub>晶体系统示意图<sup>[12]</sup>

Fig.5 Schematic diagram of SPDT processing CaF<sub>2</sub> crystal system<sup>[12]</sup>

低的表面粗糙度和更少亚表面损伤。Chen等<sup>[16]</sup>建立了CaF<sub>2</sub>材料延性模态切削的能量模型,发现改变切削速度对CaF<sub>2</sub>临界切削深度影响小,通过试验还获得了粗糙度为R<sub>a</sub>3.5 nm的无裂纹超光滑表面。

### 2.2 CaF<sub>2</sub> 研磨

研磨加工是目前精密加工软脆材料的常规方式。南京航空航天大学沈功明等<sup>[17]</sup>针对CaF<sub>2</sub>晶体的高效精密研磨加工,对比了采用单晶金刚石和聚晶金刚石磨料制备的固结磨料垫的研磨加工性能,发现聚晶金刚石磨料制成的固结磨料垫研磨效率明显更高,研磨加工系统如图7所示,经试验得到了在10 kPa压力下,采用初始粒径为3~5 μm的聚晶金刚石固结磨粒垫进行研磨,其表面粗糙度值为R<sub>a</sub>130 nm,材料去除率可达13 μm/min的结论,为后续的抛光工作奠定了基础。

### 3 CaF<sub>2</sub> 抛光加工方法及进展

超精密抛光作为CaF<sub>2</sub>全工艺流程中最后一道工序能够进一步提升CaF<sub>2</sub>的表面质量,减少CaF<sub>2</sub>工件残余表面形貌和亚表面层,去除前道工序的工艺缺陷和加工损伤。主要加工方法包括:浮法抛光、化学机械抛光、固结磨粒抛光、磁流变抛光和离子束抛光加工等。

#### 3.1 浮法抛光

浮法抛光(Float polishing)是一种超光滑表面加工技术,由日本Namba教授在1977年首次提出。此种抛光

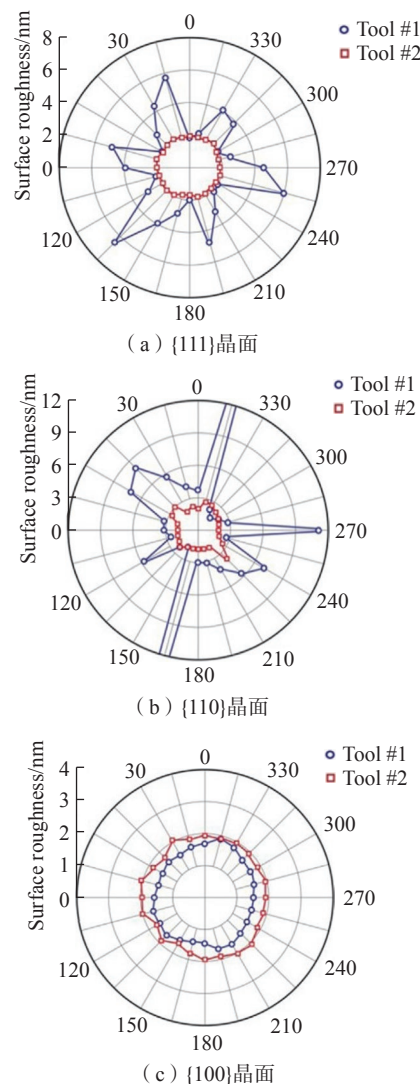


图6 沿着单晶CaF<sub>2</sub>不同晶面切削时获得的表面粗糙度<sup>[15]</sup>

Fig.6 Surface roughness obtained by cutting along different crystal planes of single crystal CaF<sub>2</sub><sup>[15]</sup>

方法通常可获得均方根粗糙度(Root mean square, RMS)低于0.1 nm、平面度低于31.6 nm的超光滑表面,广

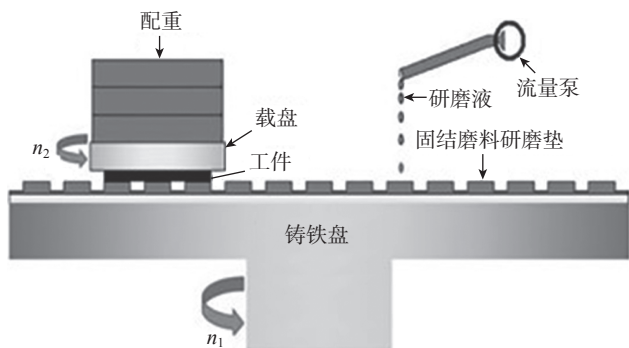


图7 固结磨料研磨垫研磨系统<sup>[17]</sup>

Fig.7 Consolidated abrasive pad grinding system<sup>[17]</sup>

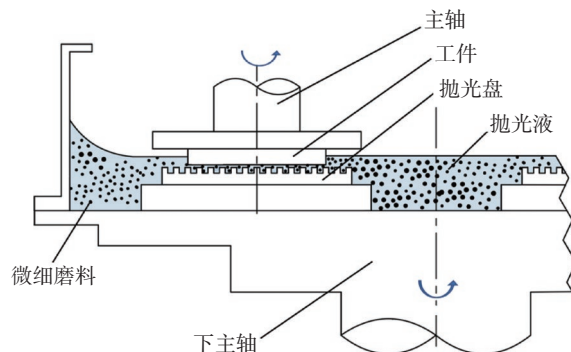


图8 浮法抛光的机械结构<sup>[19]</sup>

Fig.8 Mechanical structure of float polishing<sup>[19]</sup>

泛应用于陶瓷、宝石和光学玻璃等硬脆材料的表面抛光中<sup>[18]</sup>。

浮法抛光的机械结构如图8所示,抛光盘为带有螺旋沟槽的锡制抛光盘(具有高平面度),抛光时将抛光液浸没过盘表面并使其和工件进行同向的高速转动,此时抛光液中的小粒径磨粒会在工件和抛光盘形成的动压膜中对工件表面起到剪切作用,故而实现对材料的表面去除<sup>[19]</sup>。

Namba等<sup>[7]</sup>对CaF<sub>2</sub>进行抛光试验,采用工件尺寸直径为100mm,厚度为40mm,经80min的浮法抛光,用激光干涉仪测量直径为90mm的工件表面,获得了表面粗糙度RMS为6.03nm,平坦度PV为31.9nm的光滑表面。图9所示<sup>[7]</sup>为浮法抛光CaF<sub>2</sub>过程中平面度的变化,样品无亚表层损伤。

### 3.2 化学机械抛光

化学机械抛光(Chemical mechanical polishing, CMP)是最常见的一种复合抛光技术,该技术在1965年由Monsanto公司Walsh提出,采用SiO<sub>2</sub>凝胶抛光加工军用望远镜头片<sup>[20]</sup>。CMP技术加工CaF<sub>2</sub>时,可以在保证较高面形精度的同时得到纳米级超光滑表面质量<sup>[21-22]</sup>。CMP的工作原理如图10所示<sup>[23]</sup>,通过抛光盘转动形成的摩擦力使得工件转动,将调配好混有磨粒和化学成分的抛光液输送至抛光垫上,通过化学作用使得工件表面被软化 and 剥蚀<sup>[24]</sup>,

再通过抛光液中的磨粒对工件产生机械摩擦去除作用将软化层去除,达到全局平坦化加工的效果。

袁征等<sup>[25]</sup>通过研究CMP去除深度对氟化钙晶体表面形貌和表面粗糙度的演化规律,发现化学机械抛光能够去除传统机械研磨抛光过程产生的划痕,得到了表面粗糙度RMS 0.268nm的超光滑表面(0.94mm×0.7mm),并比较了机械抛光与化学机械抛光后的表面粗糙度(图11)。贡健<sup>[26]</sup>在KOH溶液中通过摩擦化学方法探究了材料去除极限,发现CaF<sub>2</sub>材料F-Ca-F离子层内部能够发生Ca-F<sup>+</sup>或F<sup>-</sup>部分离子层去除,去除深度约为0.23nm。基于此摩擦化学理论,其通过优化CMP方案得到了表面粗糙度RMS低于0.4nm的低损伤和超光滑表面(10μm×10μm)。王东海<sup>[27]</sup>以SiO<sub>2</sub>作为抛光液磨粒,利用CMP对CaF<sub>2</sub>晶体进行加工,研究了抛光压力、抛光液流量、抛光垫转速等工艺参数对表面质量以及材料去除率的影响,获得了表面光滑(R<sub>a</sub><1nm)、无亚表面损伤的良好CaF<sub>2</sub>晶体。Yin等<sup>[28]</sup>探究了CMP加工CaF<sub>2</sub>时抛光液pH值对抛光效果的影响,发现当抛光液pH=11时机械磨削作用与化学腐蚀作用趋于平衡状态,此时抛光得到的表面质量最佳,并在该碱性条件下通过CMP工艺改进抛光垫的方法使得CaF<sub>2</sub>粗糙度R<sub>q</sub>可达0.181nm(10

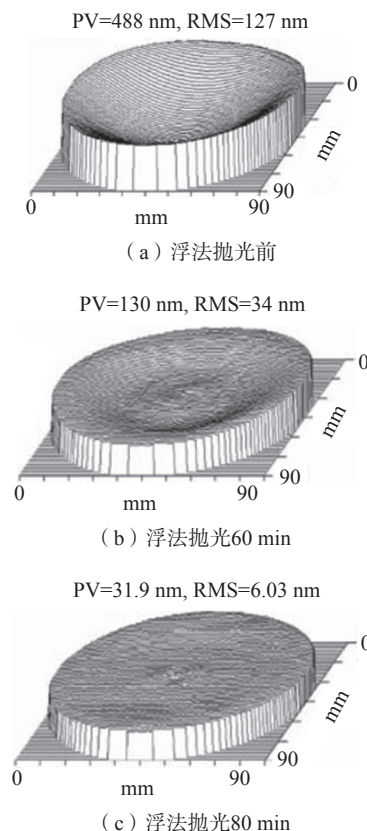


图9 CaF<sub>2</sub>在浮法抛光过程中的平面度变化<sup>[7]</sup>  
Fig.9 Flatness changes of CaF<sub>2</sub> samples during float polishing<sup>[7]</sup>

μm×10μm)。张春雷等<sup>[29]</sup>在化学机械抛光的过程中通过试验对比了沥青抛光模和聚氨酯抛光模的抛光效果,得到了使用沥青抛光模抛光CaF<sub>2</sub>材料对修正中频误差具有明显优势的结论,其在使用沥青抛光模的条件下,通过优化抛光运动参数和四轮硅溶胶抛光,最终得到的CaF<sub>2</sub>表面粗糙度RMS均值为0.31nm。

### 3.3 固结磨料抛光

固结磨料抛光 (Fixed abrasive polishing, FAP) 也属于一种化学机

械抛光,由 3M 公司于 1998 年首次提出,这是一种基于磨粒二体磨损的固结磨料化学机械抛光技术<sup>[30]</sup>。传

统的 CMP 是将不同种类和尺寸的磨粒分散在抛光液中,通过添加剂和物理搅拌使磨粒在抛光液中均匀存在,再将抛光液输送至抛光垫上,属于一种游离磨料的抛光技术。如图 12 所示,与传统的化学机械抛光不同, FAP 是将磨粒均匀的磨料固结于抛光垫的表面,再将不含磨粒的抛光液输送至抛光垫上从而配合固结磨料抛光垫完成化学机械去除<sup>[21]</sup>。

相比于 CMP,使用 FAP 可以提高固结磨料抛光垫的利用率,减少抛光液的消耗和浪费,降低废液对环境的影响,同时降低相应的处理成本。并且 FAP 对抛光液依赖性较小,条件可控性强,材料去除较为稳定<sup>[31-32]</sup>。

宋龙龙<sup>[21]</sup>采用固结磨料抛光方法,对尺寸为  $\Phi 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的  $\text{CaF}_2$  晶体进行正交试验,通过优化转速及抛光压力等工艺参数,得到试验最优参数条件:  $\text{pH}=9$ 、抛光压力  $6.7\text{ kPa}$ 、流量  $60\text{ mL/min}$  和转速  $40\text{ r/min}$ ,由此得到了表面粗糙度  $S_a\ 3.02$

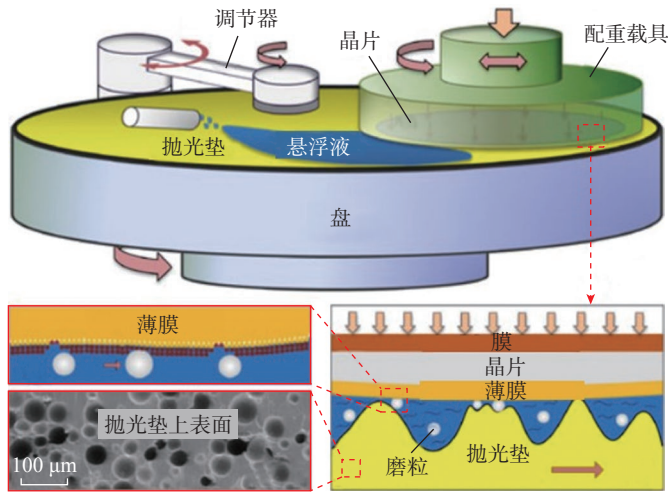


图 10 化学机械抛光系统原理图<sup>[23]</sup>

Fig.10 Schematic diagram of chemical mechanical polishing system<sup>[23]</sup>

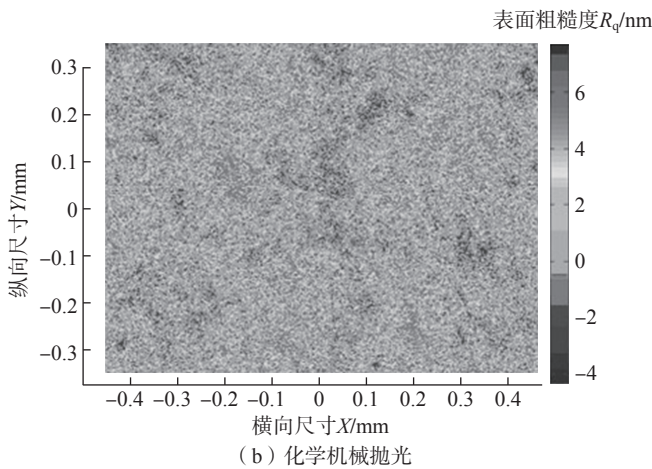
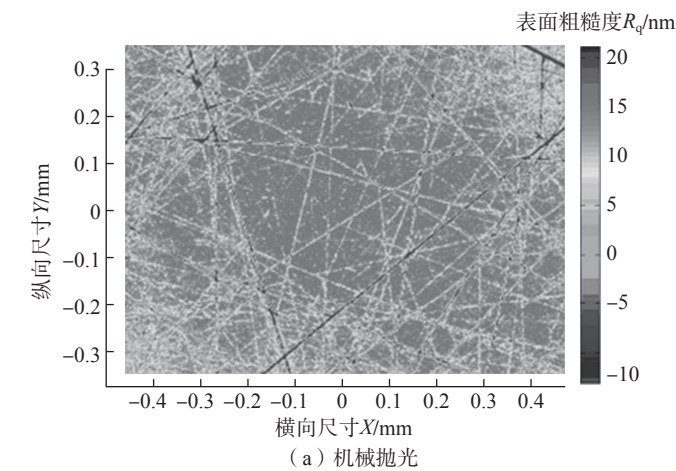
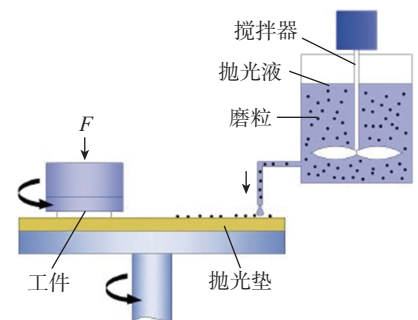
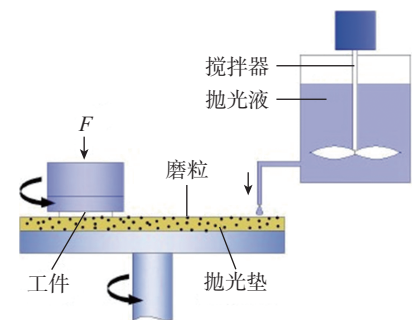


图 11 抛光后表面粗糙度<sup>[25]</sup>

Fig.11 Surface roughness after polishing<sup>[25]</sup>



(a) 传统化学机械抛光 (CMP)



(b) 固结磨料抛光 (FAP)

图 12 传统 CMP 和 FAP 加工原理对比<sup>[21]</sup>

Fig.12 Comparison of traditional CMP and FAP processing principles<sup>[21]</sup>

nm 的  $\text{CaF}_2$  晶体,材料去除率为 206  $\text{nm}/\text{min}$ ; 图 13 为经最优工艺参数抛光后的光学显微镜表面形貌和微观形貌,可见表面划痕较少,平整度高,表面质量优。

### 3.4 振动辅助的固结磨料抛光

振动辅助加工分为低频振动辅助、超声振动辅助、兆声振动辅助 3 种类型<sup>[33]</sup>。图 14 所示为超声振动辅助加工系统,其中高频正弦电信号由超声波发生器产生,经由压电陶瓷的逆压电效应将电信号转化为超声振动,该振动将结合抛光工具头的研磨抛光作用对工件进行加工,在加工过程中,引入超声振动辅助会使磨粒的运动轨迹和材料的应力-应变等发生一定的变化,从而提高传统的加工工艺效果<sup>[34-36]</sup>。

黄俊阳<sup>[36]</sup>在固结磨料抛光的基础上有效结合超声振动辅助,对工件尺寸为  $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高)的矩形  $\text{CaF}_2$  晶体采用正交试验,研究了加工工艺参数对表面质量和材料去除率的影响,有无振动辅助抛光的微观表面形貌对比如图 15 所示。该研究表明,振动辅助的最优工艺参数为转速 40  $\text{r}/\text{min}$ ,转速比 0.95,抛光液 pH 值 9,振动频率 40  $\text{kHz}$ ;在此参数下试验得到了粗糙度值  $S_a 1.92\text{ nm}$  的  $\text{CaF}_2$  晶体表面,材料去除率为 324  $\text{nm}/\text{min}$ ;对比无振

动辅助条件下的,表面粗糙度降低了 35%,材料去除率提高了 57%;优化参数加工后的  $\text{CaF}_2$  晶体表面形貌如图 16 所示,划痕明显减少,表面微观形貌得到改善<sup>[36]</sup>。

张羽驰<sup>[37]</sup>采用分子动力学仿真研究振动辅助抛光  $\text{CaF}_2$  晶体的材料

去除机理,发现径向振动更有利于提高  $\text{CaF}_2$  晶体的表面质量,径向频率为 40  $\text{GHz}$  时的表面质量较优;法向振动更有利于提高材料去除效率,法向频率为 60  $\text{GHz}$  时,  $\text{CaF}_2$  晶体的材料去除率较高;同时,其采用 Fluent 软件研究超声振动辅助抛光  $\text{CaF}_2$  晶

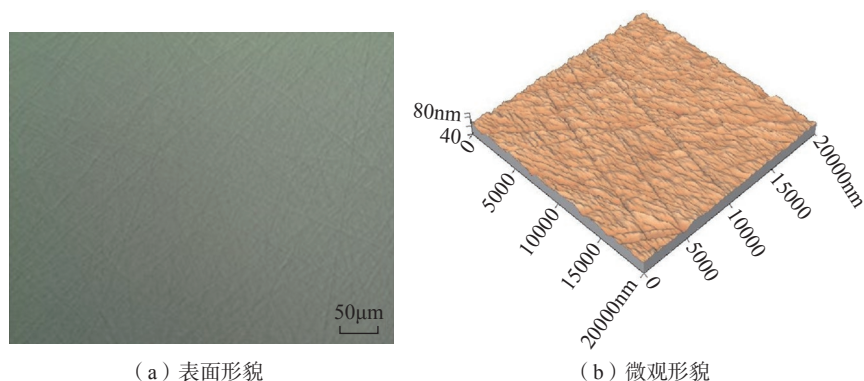


图 13 抛光后形貌<sup>[21]</sup>  
Fig.13 Polishing morphology by optical microscope<sup>[21]</sup>

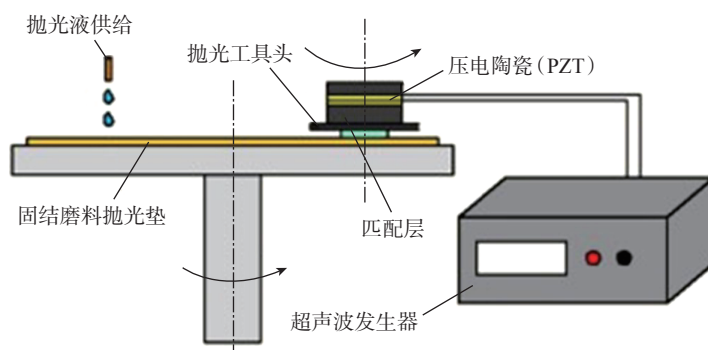


图 14 振动辅助固结磨料抛光系统<sup>[36]</sup>  
Fig.14 Vibration-assisted fixed abrasive polishing system<sup>[36]</sup>

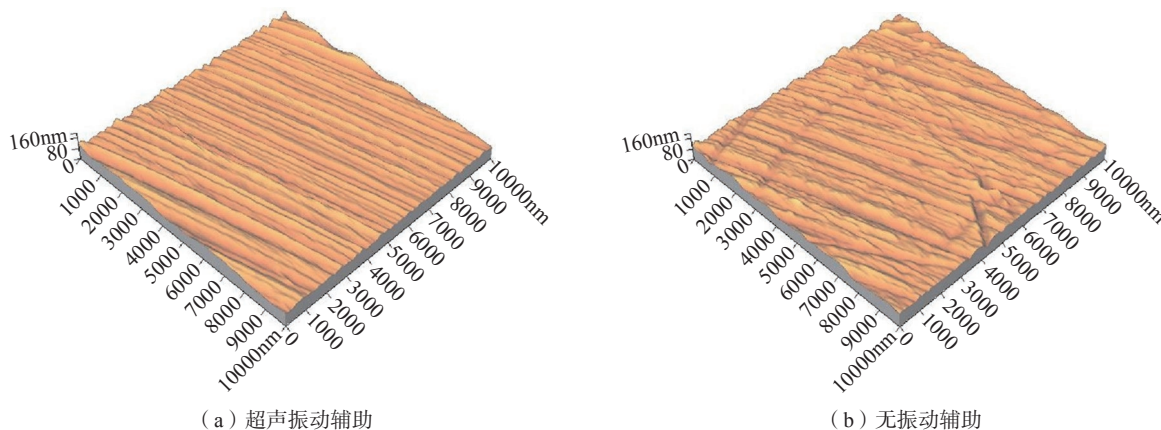


图 15 有无超声振动辅助下抛光微观形貌对比<sup>[36]</sup>  
Fig.15 Comparison of microstructure between ultrasonic vibration assisted and non-vibration assisted polishing<sup>[36]</sup>

体的抛光液性能,发现振动使得压强的有效作用范围在工件下方 2 mm 以内,其抛光液在离工件中心 15 mm 的范围内分布较为均匀;为使流场性能最优,应选择频率 20 kHz、振幅 40 μm 的条件。

### 3.5 磁流变抛光

磁流变(Magnetorheological fluid, MRF)抛光在光学微纳制造方面是公认的革命性技术,能快速获得数十纳米以下的表面精度(PV)和 1 nm 以下的表面粗糙度( $R_q$ )<sup>[38]</sup>。图 17 (a)和(b)分别为 MRF 抛光系统和去除模型示意图<sup>[39]</sup>。在抛光过程中,磁极会形成高强度磁场,性质为牛顿流体的磁流变液会在强磁场的作用下转化为黏度较大的 Bingham 流体,其中的磁敏颗粒会沿着磁场线分布形成链状结构,在旋转的过程中磨粒便依附在这种链状结构的表面以提供剪切力。磁流变抛光就是通过形成这种“柔性抛光膜”去除光学元件的表面材料。

在传统加工 CaF<sub>2</sub> 晶体后会产生三瓣效应,而磁流变抛光可以通过改善工艺方法(驻留时间补偿工艺)对三瓣效应进行有效的抑制<sup>[40]</sup>。Dumas 等<sup>[41]</sup>采用 MRF 对直径 100 mm 的非球面 CaF<sub>2</sub> 晶体进行试验,通过改变抛光点的驻留时间,借此优化经单点金刚石车削后的晶体表面形貌,以消除金刚石车削痕迹并改善粗糙度,将 RMS 值由 20 nm 降低到 2 nm。图 18 为 SPDT 和 MRF 加工后的 CaF<sub>2</sub> 表面形貌的对比<sup>[41]</sup>。谢超<sup>[8]</sup>通过优化抛光盘转速、磁场强度和抛光液流量参数,在最优参数下试验得到 RMS 1.74 nm 的 CaF<sub>2</sub> 光滑表面,且抛光 CaF<sub>2</sub> 晶体所产生的“三瓣效应”也利用磁流变驻留时间补偿工艺得到了较好的解决。图 19 和 20 对比了常规磁流变工艺抛光 CaF<sub>2</sub> 晶体和使用驻留时间补偿工艺抛光 CaF<sub>2</sub> 晶体的仿真面形残差<sup>[18]</sup>。

### 3.6 离子束抛光

离子束抛光(Ion beam figuring, IBF)不会在光学元件表面产生表面和亚表面损伤,是公认的获得纳米级表面形精度的先进加工技术之一。因此可以使用离子束加工技术来提高 CaF<sub>2</sub> 晶体的面形精度。IBF 的原理就是利

用离子溅射效应对材料进行去除(图 21<sup>[29,42]</sup>)。当聚焦离子束轰击工件表面时,离子和工件原子之间、工件原子相互之间会发生复杂的级联碰撞。在此过程中,工件表面原子吸收的能量大于表面束缚能后,就会以溅射原子的形式脱离工件表面。

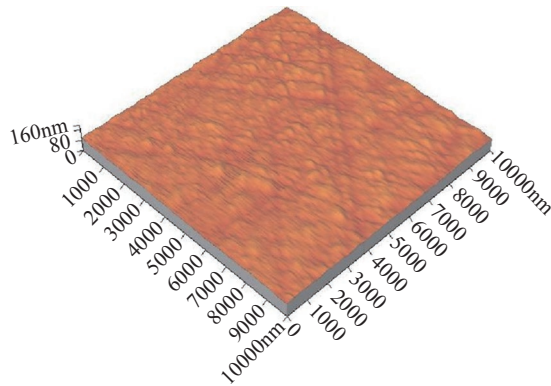
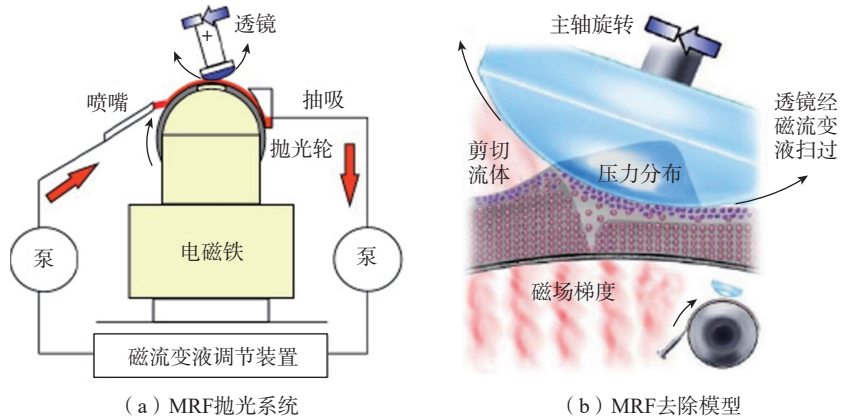


图 16 优化参数加工后的表面形貌<sup>[36]</sup>

Fig.16 Surface topography after polishing with optimized parameters<sup>[36]</sup>

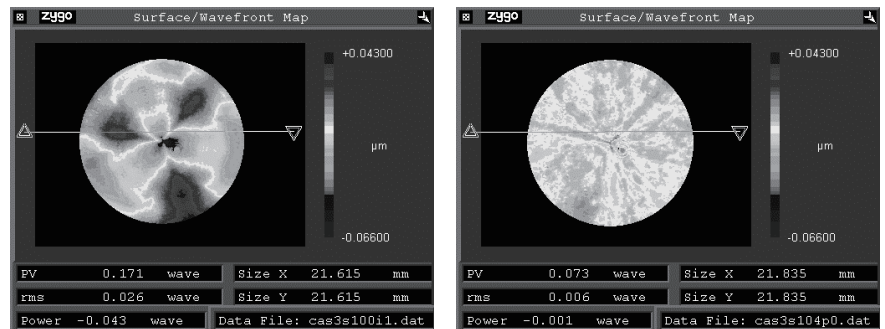


(a) MRF 抛光系统

(b) MRF 去除模型

图 17 MRF 抛光系统和去除模型示意图<sup>[39]</sup>

Fig.17 Schematic diagram of MRF polishing system and removal model<sup>[39]</sup>



(a) SPDT 加工后

(b) MRF 加工后

图 18 使用 SPDT 和 MRF 加工后表面形貌的对比<sup>[41]</sup>

Fig.18 Comparison of surface morphology after processing with SPDT and MRF<sup>[41]</sup>

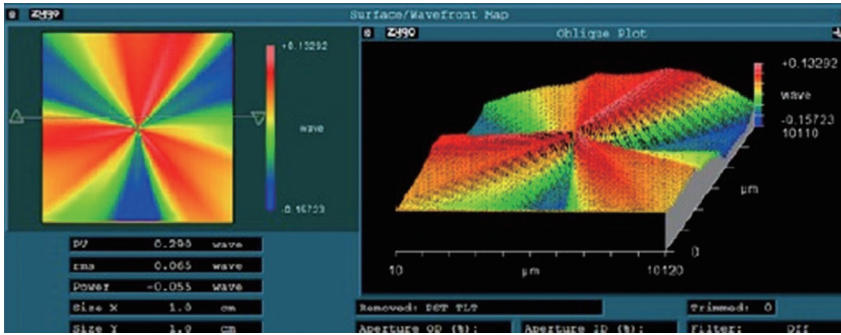


图 19 常规磁流变工艺抛光  $\text{CaF}_2$  面形仿真示意图  
Fig.19 Simulation diagram of  $\text{CaF}_2$  surface shape polished by conventional MRF<sup>[18]</sup>

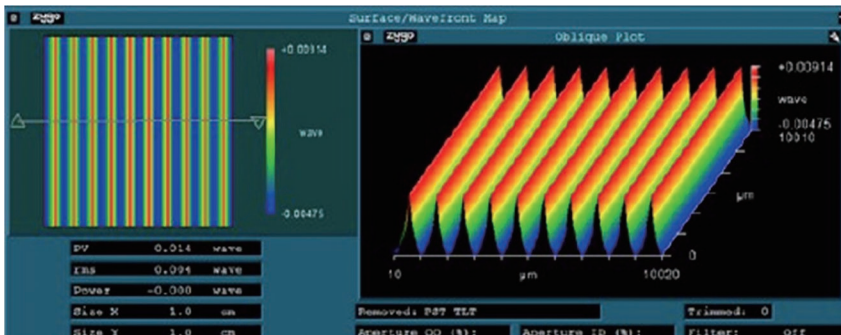


图 20 磁流变驻留时间补偿工艺抛光  $\text{CaF}_2$  面形仿真示意图<sup>[18]</sup>  
Fig.20 Simulation diagram of  $\text{CaF}_2$  surface shape polished by MRF dwell time compensation process<sup>[18]</sup>

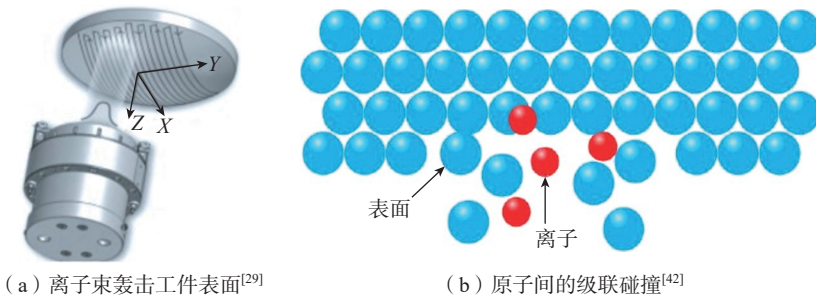


图 21 IBF 原理示意图  
Fig.21 Schematic diagram of ion beam figuring

Flamm 等<sup>[43]</sup>通过试验指出,在离子束溅射  $\text{CaF}_2$  工件表面的过程中所引起的粗糙度演变是一种内在效应,这是因为机械抛光过程产生的表面和亚表面晶体损伤会被抛光过程产生的再沉积层覆盖,随着溅射时间增长,出现面形精度提升但是粗糙度略微升高的现象。

袁征等<sup>[25]</sup>利用 CMP 与 IBF 对  $\text{CaF}_2$  晶体进行分步加工,首先通过 CMP 获得光滑表面,再利用 IBF 提高面形精度,得到 IBF 中离子入射角度和去除深度对表面粗糙度的影响如图 22 (a) 和 (b) 所示,经 IBF 加工后  $\text{CaF}_2$  晶体表面变得粗糙,且在入射角度为  $40^\circ$  左右时粗糙度值最小;在入射角度为  $40^\circ$ ,入射离子能量  $500 \text{ eV}$  和工作压强  $2.1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$  的加工条件下,得到  $\text{CaF}_2$  晶体表面粗糙度 RMS 值为  $0.281 \text{ nm}$ ,面形精度 PV 值为  $13.14 \text{ nm}$ 。Yin 等<sup>[28]</sup>也在 CMP 后采用 IBF 技术对  $\text{CaF}_2$  加工以获得更好的表面形貌,通过加工工艺参数优化试验,发现离子束入射能量 ( $400\sim 800 \text{ eV}$ ) 的改变对表面粗糙度影响不大,但材料的去除深度对粗糙度有一定影响,当去除深度小于  $200 \text{ nm}$  时,通过 IBF 可获得高精度的表面图形 ( $\text{RMS}=2.251 \text{ nm}$ ),且表面保持超光滑 ( $R_q=0.207 \text{ nm}$ )。张春雷等<sup>[29]</sup>使用 IBF 对  $\text{CaF}_2$  的面形进行精修,三轮离子束加工后 37

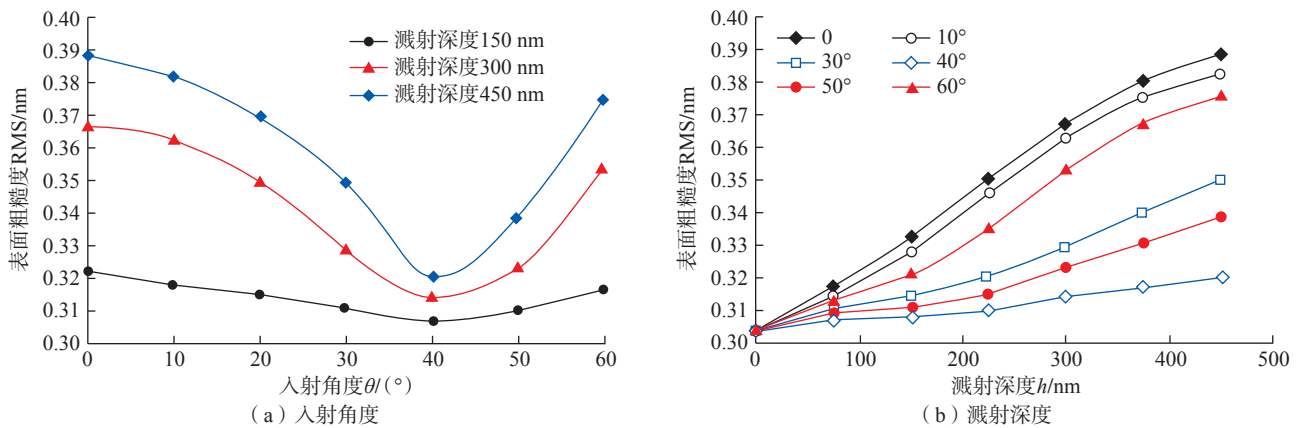


图 22 入射角度和溅射深度对表面粗糙度的影响<sup>[25]</sup>  
Fig.22 Effect of incident angle and sputtering depth on surface roughness<sup>[25]</sup>

项 Zernike 多项式拟合的面形误差 PV 值收敛至 2.43 nm, Zernike 残差 RMS 值收敛至 0.43 nm。

### 3.7 CaF<sub>2</sub> 加工方法对比

表 2 比较了当前几种加工 CaF<sub>2</sub> 材料的超精密加工方法,对于指导 CaF<sub>2</sub> 材料的高效高质量加工和新技术的开发具有重要意义。

## 4 CaF<sub>2</sub> 抛光后的表面清洗

吸附是固体表面质点与液体分子相互作用的一种现象,按作用力的性质可分为物理吸附(Physisorption)和化学吸附(Chemisorption)两种类型。针对加工后的 CaF<sub>2</sub> 晶体,依据吸附物特性和吸附状态,可将 CaF<sub>2</sub> 晶体表面的吸附物分成两种:一种是不与 CaF<sub>2</sub> 发生反应的单质、化合物,此类物质一般为物理吸附,较易清洗;另一种是电性很强的无机盐类和氧化物的粒子、胶粒等吸附物,

较难清洗。

改善化学机械抛光 CaF<sub>2</sub> 晶体表面清洗工艺的方法主要包括:(1)采用可溶性有机碱取代氢氧化钠等碱性溶液,在为抛光液提供碱性环境的同时减少碱金属离子带来的吸附;(2)抛光液为硅溶胶时,可通过调高 pH 值令有机碱与 SiO<sub>2</sub> 介质反应生成可溶性硅酸盐,使 SiO<sub>2</sub> 转化为胶体;(3)加入分散剂和表面活性剂,提高抛光液的均匀性,保证化学反应中的质量传递,令抛光液中的粒子、反应产物以及其他物理吸附不向化学吸附转化<sup>[27]</sup>。

超声波清洗技术是诸多工业生产及科学和医学领域中的常规技术<sup>[44]</sup>,因其波长短、能量集中和穿透力强,能够在液体中产生空化效应,既可以清洗结构复杂的工件,还可以去除附着力强的吸附物和杂质,减少工件在清洗中损伤。如图 23 所示,超声空

化气泡由产生到逐渐增大,当气泡破裂时产生的微射流会冲击附着在工件表面的污染物,经过多次空化效应可以实现清洗的效果<sup>[45-46]</sup>。因此,可采用超声波清洗技术清洁抛光 CaF<sub>2</sub> 晶体后残留在表面的物理吸附物质。

美国的 Stolz 等<sup>[47]</sup>采用 ArF-193 NM 平顶状准分子激光对 12 个紫外激光增反膜进行激光损伤阈值测试,其激光重复频率 100 Hz、脉宽 13 ns,测试后发现使用甲醇超声清洗的基底样品激光损伤阈值显著高于其他样品,并且抗激光损伤能力较强的样品的损伤阈值为较差样品阈值的 70 倍,这一清洗技术同样适用于 CaF<sub>2</sub> 晶体<sup>[48]</sup>。

## 5 结论与展望

本文总结了现阶段可以获得优质 CaF<sub>2</sub> 晶体表面的超精密加工方法,先通过单点金刚石切削和机械研

表 2 氟化钙加工方法的比较

Table 2 Comparison of CaF<sub>2</sub> processing methods

CaF <sub>2</sub> 加工方法	加工效率	亚表面损伤	表面粗糙度/nm	环境友好性	加工成本
单点金刚石切削	高	有	R <sub>a</sub> 3.3	中	较低
机械研磨	较高	有	R <sub>a</sub> 130	中	较低
浮法抛光	中	有	RMS6.03	中	中
化学机械抛光	较高	有	RMS0.31	差	较低
固结磨料抛光	较高	有	S <sub>3</sub> 3.02	中	中
振动辅助固结磨料抛光	高	有	S <sub>3</sub> 1.92	中	较高
磁流变抛光	中	无	RMS<2	优	高
离子束抛光	较低	无	RMS0.281	优	高

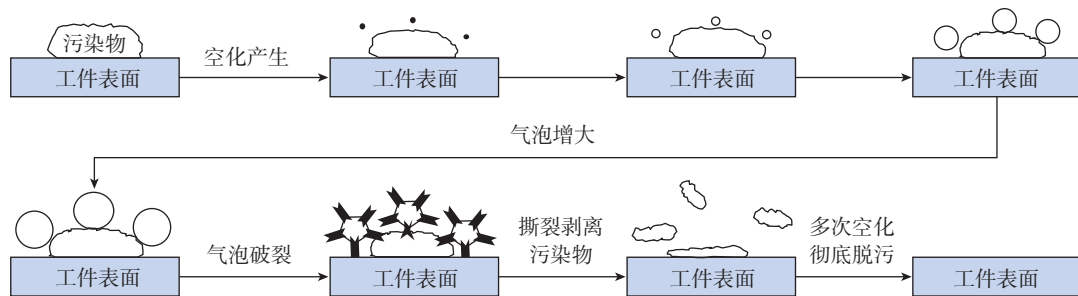


图 23 超声空化除污过程<sup>[46]</sup>

Fig.23 Ultrasonic cavitation decontamination process<sup>[46]</sup>

磨进行粗加工,再通过化学机械抛光进一步对表面进行平坦化加工并去除机械损伤层,最后进行离子束修形进一步提高表面质量并进行清洗。对于各阶段的氟化钙加工方法优缺点总结如下。

(1) 单点金刚石切削采用微量切削的方式实现了  $\text{CaF}_2$  材料去除,避免了切削导致  $\text{CaF}_2$  晶体破碎的同时也能取得纳米级的粗糙度值。但是,切削中会有较多的影响因素,这些因素会导致光学元器件表面质量下降,如产生明显纹路和导致中高频误差的增加,且切削力会引起(亚)表层材料发生晶格畸变或更严重的机械损伤,而机械研磨也会造成类似结果。

(2) 在对  $\text{CaF}_2$  晶体的抛光方法中,浮法抛光可以取得较好的表面,但是主要依靠高面形精度的锡盘将面形精度复映到工件上,难以保证工件的高面形精度,无法大规模应用。

(3) 磁流变抛光也可以获得较好的表面质量,通过磁流变驻留时间工艺方法可以抑制在传统抛光  $\text{CaF}_2$  晶体时产生的三瓣效应,但是磁流变液中含有铁粉、磨粒和一些其他杂质,抛光时会产生一些吸附物黏附、嵌入  $\text{CaF}_2$  工件表面,较难去除。同时,作为加工介质的磁流变液十分昂贵,加工成本很高。

(4) 目前化学机械抛光是  $\text{CaF}_2$  晶体抛光的主要抛光加工形式。化学机械抛光具有加工精度高、无机机械损伤以及效率高等优点,可以实现  $\text{CaF}_2$  工件表面纳米级微小单位的去除,但是抛光后会产生大量的废液,其中的化学成分对设备有一定的腐蚀性。

(5) 振动辅助固结磨料抛光等辅助抛光方法,对比无辅助时可以在一定程度上提高加工效率和加工质量,但仍需引入较复杂的辅助装置即增加较多的变量,这使得加工过程复杂,且提高加工成本。

(6) 离子束抛光其本身不会在光学元件表面产生表面和亚表面损伤,能够提高  $\text{CaF}_2$  晶体的面形精度,但溅射效应形成的材料去除速率相对较低,且只能在真空下应用的加工原理也使其受到一定的限制,该方法更适合于光学加工中最终加工目标阶段或最后为达到更高精度时应用。

在满足光学元件的全频域面形精度指标及亚表面损伤控制要求的基础上,通过将多种抛光技术复合化以期融合不同抛光方法的优势,日益成为光学元件超精密制造的发展趋势,其中化学机械抛光便是复合抛光的代表方法之一。值得一提的是,超声振动辅助抛光对氟化钙精密加工的增益效果明显。因此在抛光形式与辅助抛光方法上,结合当前的气囊抛光、水射流抛光和剪切增稠抛光等主流技术也会是比较好的尝试。此外,在对  $\text{CaF}_2$  材料的各阶段加工工艺中,通过分析各工艺规律特点及工艺间的关联因素,获得相关间参数选择的量化指标,以指导优化加工参数及实现超精密加工,服务  $\text{CaF}_2$  材料的高性能制造。

## 参 考 文 献

- [1] 李艳红,姜国经.  $\text{CaF}_2$  单晶体应用研究[J]. 人工晶体学报, 2000, 29(S1): 221.
- LI Yanhong, JIANG Guojing. Study on application of  $\text{CaF}_2$  single crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2000, 29(S1): 221.
- [2] 董永军,周国清,杨卫桥,等. 氟化钙( $\text{CaF}_2$ )晶体研发进展[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(8): 43-47.
- DONG Yongjun, ZHOU Guoqing, YANG Weiqiao, et al. Research and development of calcium fluoride crystals[J]. Laser & Optics Progress, 2003, 40(8): 43-47.
- [3] COLLIER D, PANTLEY W. Semiconductor fabrication drives deep-UV optics[J]. Laser Focus Littleton, 1998, 34(12): 7.
- [4] MCINTYRE G, SANDERS D, SOORIYAKUMARAN R, et al. The limitations of high-index resists for 193-nm hyper-NA lithography[C]//Advances in Resist Materials and

Processing Technology XXV. San Jose, 2008.

[5] LIN W, OHMORI H, YAMAGATA Y, et al. Development of large ultraprecision optics grinder for X-ray mirrors[J]. The Proceedings of the JSME Annual Meeting, 2000, 2000, 3: 485-486.

[6] LIBERMAN V, BLOOMSTEIN T M, ROTHSCHILD M, et al. Materials issues for optical components and photomasks in 157nm lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1999, 17(6): 10.116/1.590994.

[7] NAMBA Y, OHNISHI N, YOSHIDA S, et al. Ultra-precision float polishing of calcium fluoride single crystals for deep ultra violet applications[J]. CIRP Annals, 2004, 53(1): 459-462.

[8] 谢超. 氟化钙单晶材料的磁流变抛光工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.

XIE Chao. Research on magnetorheological finishing technics of optical mirror materials of  $\text{CaF}_2$ [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.

[9] 段安锋,范翊,刘景和,等.  $\text{CaF}_2$  晶体及加工技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007, 30(2): 97-99.

DUAN Anfeng, FAN Yi, LIU Jinghe, et al. Studies on  $\text{CaF}_2$  single crystals and its processing technique[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 30(2): 97-99.

[10] 高跃升,高志勇,孙伟. 萤石表面性质各向异性研究及进展[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 415-422.

GAO Yuesheng, GAO Zhiyong, SUN Wei. A review of anisotropic surface properties of fluorite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 415-422.

[11] 苏良碧,徐军. 氟化钙晶体材料及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

SU Liangbi, XU Jun. Calcium fluoride crystal material and its application[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[12] MIZUMOTO Y, AOYAMA T, KAKINUMA Y. Basic study on ultraprecision machining of single-crystal calcium fluoride[J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 264-269.

[13] YAN J W, SYOJI K, TAMAKI J. Crystallographic effects in micro/nanomachining of single-crystal calcium fluoride[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004, 22(1): 46-51.

[14] YAN J W, TAMAKI J, SYOJI K,

- et al. Single-point diamond turning of  $\text{CaF}_2$  for nanometric surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(9-10): 640-646.
- [15] KAKINUMA Y, AZAMI S, TANABE T. Evaluation of subsurface damage caused by ultra-precision turning in fabrication of  $\text{CaF}_2$  optical micro resonator[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 117-120.
- [16] CHEN H F, DAI Y F, PENG X Q, et al. The mechanism for material removal in ductile mode cutting of  $\text{CaF}_2$  brittle crystals[J]. The International Society for Optical, 2010, 7655: 128-132.
- [17] 沈功明, 顾群飞, 王科荣, 等. 固结磨料垫高效研磨氟化钙晶体研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(5): 67-72.
- SHEN Gongming, GU Qunfei, WANG Kerong, et al. Study on high efficient lapping of calcium fluoride crystal with fixed abrasive pad[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(5): 67-72.
- [18] NAMBA Y, TSUWA H. Ultra finishing of Sapphire singlecrystal[J]. Annals of the CIRP, 1977, 26: 325-329.
- [19] 池宪, 房建国, 锁小红, 等. 浮法抛光在金属纳米级超光滑表面加工中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(2): 12-14.
- CHI Xian, FANG Jianguo, SUO Xiaohong, et al. Application of float polishing in lapping of metal nanometer surface[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(2): 12-14.
- [20] WALSH R J. Process for chemical-mechanical polishing of III-V semiconductor materials: US3979239[P]. 1976-09-07.
- [21] 宋龙龙. 软脆晶体  $\text{CaF}_2$  固结磨料抛光研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- SONG Longlong. Research on fixed abrasive polishing of soft and brittle  $\text{CaF}_2$  crystal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [22] 孙发青. 超声波精细雾化化学机械抛光硬脆材料去除机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- SUN Faqing. Study on material removal mechanism of hard brittle crystal by ultrasound atomization chemical mechanical polishing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [23] ZHAO D W, LU X C. Chemical mechanical polishing: Theory and experiment[J]. Friction, 2013, 1(4): 306-326.
- [24] 陈晓春. 化学机械抛光试验及其材料去除机理的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- CHEN Xiaochun. Experimental study on material removal mechanism in chemical mechanical polishing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [25] 袁征, 戴一帆, 解旭辉, 等. 氟化钙单晶超精密抛光技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 46-51.
- YUAN Zheng, DAI Yifan, XIE Xuhui, et al. Research on ultra-precise figuring for  $\text{CaF}_2$  single crystal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 46-51.
- [26] 贡健. 面向化学机械抛光的单晶氟化钙微观去除机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- GONG Jian. Study on micro-removal mechanism of single crystal calcium fluoride for chemical mechanical polishing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [27] 王东海. 氟化钙晶体化学机械抛光工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- WANG Donghai. Study on chemical mechanical polishing of calcium fluoride single crystal[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
- [28] YIN G, LI S, XIE X, et al. Ultra-precision process of  $\text{CaF}_2$  single crystal[C]// 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. Harbin, 2014.
- [29] 张春雷, 徐乐, 刘健, 等. 全频段亚纳米精度氟化钙材料加工[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2636-2643.
- ZHANG Chunlei, XU Le, LIU Jian, et al. Sub-nanometer precision optical fabrication of  $\text{CaF}_2$  materials[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2636-2643.
- [30] GAGLIARDI J. STI polishing with 3M's fixed abrasive[C]//16th International VLSI Multilevel Interconnection Conference. Santa Clara, 1999.
- [31] HUANG W H, TAMILMANI S, ANDERSON C, et al. Material removal and particulate generation during abrasion of copper films using a fixed abrasive pad[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2004, 17(4): 525-530.
- [32] 李军, 李标, 胡章贵, 等. 固结磨料抛光  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  晶体的抛光液优化[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(6): 789-796.
- LI Jun, LI Biao, HU Zhanggui, et al. Optimization of fixed abrasive polishing slurry for  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  crystal[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(6): 789-796.
- [33] 王传琦. 机械振动作用下激光熔覆镍基合金涂层凝固组织及应力控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- WANG Chuanqi. Solidification microstructure and stress control of Ni-based alloy coatings by mechanical vibration assisted laser cladding[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [34] 焦锋. 工程陶瓷超声辅助固结磨料高效研磨机理及试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- JIAO Feng. Theoretical and experimental studies on ultrasonic aided high efficiency lapping with solid abrasive of engineering ceramics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [35] LI Y G, WU Y B, ZHOU L B, et al. Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77: 93-102.
- [36] 黄俊阳. 超声振动辅助固结磨料加工氟化钙晶体研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- HUANG Junyang. Research on ultrasonic vibration assisted fixed abrasive machining of  $\text{CaF}_2$  crystal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [37] 张羽驰. 振动辅助抛光氟化钙晶体材料去除机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- ZHANG Yuchi. Material removal mechanism of vibration assisted polishing of  $\text{CaF}_2$  crystal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [38] 高伟, 魏齐龙, 李晓媛, 等. 磁流变抛光与磁流变液: 原理与研究现状[J]. 磁性材料及器件, 2015, 46(2): 68-73.
- GAO Wei, WEI Qilong, LI Xiaoyuan, et al. Magnetorheological finishing and magnetorheological fluid: Principle and research situation[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2015, 46(2): 68-73.
- [39] SUPRANOWITZ C, HALL C, DUMAS P, et al. Improving surface figure and microroughness of IR materials and diamond turned surfaces with magnetorheological finishing (MRF)[C]//Window and Dome Technologies and Materials X. Florida, 2007, 6545.
- [40] LADISON J L, PRICE J J, HELFINSTINE J D, et al. Hardness, elastic modulus, and fracture toughness bulk properties in Corning calcium fluoride[C]//Optical Microlithography XVIII. California, 2005.
- [41] DUMAS P, GOLINI D, TRICARD M. Improvement of figure and finish of diamond

turned surfaces with magneto-rheological finishing (MRF)[C]//Window and Dome Technologies and Materials IX. Florida, 2005.

[42] 唐瓦. 离子束抛光大口径非球面去除模型与工艺研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.

TANG Wa. Research 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.

[43] FLAMM D, SCHINDLER A, BERGER M. Ion beam milling of optically polished  $\text{CaF}_2$  surfaces[C]//Optical Manufacturing

and Testing V. California, 2003.

[44] MASON T J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 519–523.

[45] 程欣. 超声波清洗技术发展研究[J]. 中国市场, 2016(2): 79–80.

CHENG Xin. Research on development of ultrasonic cleaning technology[J]. China Market, 2016(2): 79–80.

[46] 黄志超, 涂林鹏, 刘举平, 等. 超声波清洗技术及设备研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(3): 1–9.

HUANG Zhichao, TU Linpeng, LIU Juping, et al. Review of ultrasonic cleaning technology and equipment[J]. Journal of East China Jiaotong

University, 2020, 37(3): 1–9.

[47] STOLZ C J, BLASCHKE H, Jensen L, et al. Excimer mirror thin film laser damage competition[J/OL]. The International Society for Optical Engineering, [2011–11–06]. <http://10.1117/12.899187>.

[48] 宗慧雯, 赵江山, 宋兴亮, 等. 氟化钙晶体深紫外激光辐照损伤特性研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 26–35.

ZONG Huiwen, ZHAO Jiangshan, SONG Xingliang, et al. Development of research on damage characteristics of calcium fluoride crystal under deep ultraviolet laser irradiation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 26–35.

## Polishing Process and Progress of Calcium Fluoride

PENG Yunfeng<sup>1,2</sup>, YANG Lei<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoyang<sup>3</sup>

(1. Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518000, China;

3. Beijing Scitlion Technology Co., Ltd., Beijing 101111, China)

**[ABSTRACT]** Calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ) crystal is a very important optical crystal. It is widely used in optical instruments because of its high transmittance and good long-term radiation stability. Especially with the development of lithography technology to shorter wavelength,  $\text{CaF}_2$  has become the preferred material for extreme UV lithography objective.  $\text{CaF}_2$  is a typical brittle material with low fracture toughness.  $\text{CaF}_2$  optical surface is usually made by polishing, therefore, the polishing technology and process are very important. This paper summarizes the main machining methods, processes and research results of  $\text{CaF}_2$ , and introduces the ultra precision cutting and consolidated abrasive grinding methods involved in its rough machining stage; Paying more attention to ultra precision polishing, this paper comprehensively summarizes the principle and progress of float polishing, chemical mechanical polishing, fixed abrasive polishing, magnetorheological polishing, vibration assisted fixed abrasive polishing and ion-beam polishing, and the related processing methods mentioned are compared; Finally, the future development direction of  $\text{CaF}_2$  polishing technology is prospected. It aims to provide valuable reference for further research in the field of  $\text{CaF}_2$  processing.

**Keywords:** Calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ); Brittle material; Optical element processing; Ultraprecision machining;

Polishing technology

(责编 大漠)