

# 激光诱导钡化合物化学反应刻蚀石英玻璃的机理

丛启东, 袁根福, 章辰, 郭百澄

江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122

**摘要** 提出了两种利用红外激光诱导钡化合物化学反应刻蚀石英玻璃的新方法, 钡化合物分别选用  $\text{BaCrO}_4$  和  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 。通过能谱分析进行推理和利用 X 射线衍射图谱分析和验证, 发现激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃过程中得到的微通道出现崩边和微裂纹现象,  $\text{BaCrO}_4$  分解生成的  $\text{BaO}$  在高温条件下与  $\text{SiO}_2$  发生化学反应生成  $\text{BaSiO}_3$ , 因此这种方法能直接用于刻蚀石英玻璃; 在激光诱导  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  化学反应刻蚀石英玻璃的过程中,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  以及其分解生成的  $\text{BaO}$  在高温条件下都会与  $\text{SiO}_2$  发生化学反应生成  $\text{BaSiO}_3$ , 也能直接刻蚀石英玻璃。两种方法的刻蚀机理不同, 故刻蚀效果存在较大差异。

**关键词** 激光技术; 石英玻璃刻蚀; 激光诱导化学反应; 钡化合物

中图分类号 O641

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021402

## Etching Mechanism of Quartz Glass by Laser-Induced Chemical Reactions of Barium Compounds

Cong Qidong, Yuan Genfu, Zhang Chen, Guo Baicheng

School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

**Abstract** Two new methods for etching quartz glass by infrared-laser-induced chemical reactions of barium compounds are proposed, where the two barium compounds are  $\text{BaCrO}_4$  and  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , respectively. Via the deduction by the energy dispersive X-ray spectrometer and the analysis and test by the X-ray diffraction (XRD), it is found that micro-cracks and edges occur in the micro-channels obtained in the process of etching quartz glass by laser-induced chemical reactions of  $\text{BaCrO}_4$ . Meanwhile, the decomposition of  $\text{BaCrO}_4$  produces  $\text{BaO}$ , which has a chemical reaction with  $\text{SiO}_2$  to generate  $\text{BaSiO}_3$  at high temperature, and thus this method can be used for etching quartz glass directly. In the process of etching quartz glass by laser-induced chemical reactions of  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , both  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  and its decomposed  $\text{BaO}$  have chemical reactions with  $\text{SiO}_2$  at high temperature to generate  $\text{BaSiO}_3$ , and thus this method can also be used for etching quartz glass directly. Different etching mechanisms for these two methods lead to relatively obvious difference of etching quality.

**Key words** laser technique; quartz glass etching; laser-induced chemical reaction; barium compounds

**OCIS codes** 140.3390; 140.3580; 140.3450; 160.4670

## 1 引言

玻璃材料具有良好的透光性、电绝缘性和化学稳定性<sup>[1]</sup>, 尤其是高纯度的石英玻璃, 在紫外波段(波长大于 190 nm)具有良好的透光性<sup>[2]</sup>, 已被广泛

应用到医疗、化学、航空航天、汽车等领域<sup>[3-4]</sup>。近年来, 利用激光对玻璃材料进行高质量、高精密度的微结构加工已经成为研究热点之一。由于石英材料具有高硬脆的特性, 传统的加工方法很难在其表面实现精密刻蚀<sup>[5]</sup>。目前, 采用高能激光束刻蚀加工石

收稿日期: 2017-06-29; 收到修改稿日期: 2017-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(51175229)

作者简介: 丛启东(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光精密加工无机透明材料方面的研究。

E-mail: forcqd@126.com

导师简介: 袁根福(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光精密加工理论及应用方面的研究。

E-mail: ygf@263.net(通信联系人)

英玻璃的主要方法有激光诱导等离子体刻蚀<sup>[6-7]</sup>、激光背部湿法刻蚀、超短脉冲激光直接刻蚀<sup>[8-9]</sup>和纳秒脉冲紫外激光直接刻蚀<sup>[10-12]</sup>。其中激光诱导等离子体刻蚀原理<sup>[13-14]</sup>和激光背部湿法刻蚀原理<sup>[15-16]</sup>相似,前者以金属固体靶材作为吸收介质,而后者以液体材料作为吸收介质。激光背部湿法刻蚀石英玻璃的精度较高,但是刻蚀率非常低,仅为10 nm/pulse<sup>[6]</sup>,而激光诱导等离子体干刻法的刻蚀率较激光背部湿法刻蚀的高,但仍然较低。在石英玻璃表面制作一层辅助吸收薄层,能够提高石英玻璃对激光束的吸收率,从而提高刻蚀率,但其刻蚀率仍较低<sup>[17]</sup>。超短脉冲激光直接刻蚀石英玻璃的精度较高,但同样存在刻蚀率低的问题,且超短脉冲激光器的价格昂贵,加工成本很高,不利于工业应用的普及。利用纳秒脉冲紫外激光直接刻蚀石英玻璃,不仅难以避免裂损现象<sup>[18-19]</sup>,且刻蚀率低下。

普通红外激光器成本低廉,且具有输出稳定、单脉冲能量高等优势,但由于石英玻璃对其发出的激光束吸收率极低,国内外对普通红外激光器刻蚀石英玻璃的研究较少。本文提出了两种利用红外激光诱导钡化合物化学反应刻蚀石英玻璃的

新方法,研究了这两种方法的刻蚀机理,并通过激光诱导Ba(OH)<sub>2</sub>化学反应刻蚀石英玻璃,在保证高刻蚀率的前提下成功制备了低裂损微通道。两种刻蚀方法都具有刻蚀率高、成本低廉,工艺简单的优点,该新技术能够为激光加工玻璃材料提供技术基础,有利于激光精密加工玻璃材料的工业普及。

## 2 实验设备、材料及方法

### 2.1 实验设备和实验材料

实验材料选用 JGS1 型熔融石英玻璃片,试样尺寸为 20 mm×30 mm×1 mm,石英玻璃中 SiO<sub>2</sub> 的质量分数大于 99.5%。选用的钡化合物为 BaCrO<sub>4</sub> 和 Ba(OH)<sub>2</sub>。图 1 所示为 Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光刻蚀加工玻璃装置示意图,主要由 Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光器、三维电控位移台及位移台电机驱动器、控制计算机组成。其中,激光系统采用 Nd<sup>3+</sup>:YAG 红外激光加工机床,波长为 1064 nm,最大平均功率为 500 W,电流强度调节范围为 100~400 A,脉冲宽度调节范围为 0.2~10 ms,重复频率调节范围为 1~100 Hz。

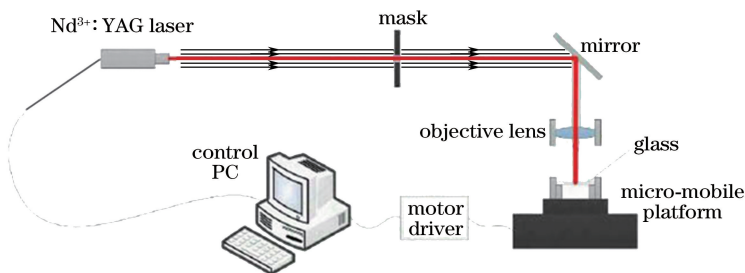


图 1 Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光刻蚀加工玻璃装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for Nd<sup>3+</sup>:YAG laser etching of glass

### 2.2 实验方法

先将经过研磨的钡化合物粉体均匀覆盖在石英玻璃上表面,并将粉体压至致密、平整。通过前期的实验研究发现,在同样的激光参数条件下,当粉体覆盖层厚度为 0.6 mm 左右时,激光诱导 BaCrO<sub>4</sub> 和 Ba(OH)<sub>2</sub> 化学反应刻蚀石英玻璃的刻蚀率都较大,故选择粉体覆盖层的厚度为 0.6 mm,设置激光束距离石英玻璃的上表面的离焦量为 0 mm。图 2 所示为实验方法示意图,两种刻蚀方法都是通过激光诱导钡化合物发生化学反应来实现石英玻璃的刻蚀。设置激光参数为:脉宽 0.8 ms,电流强度 190 A,频率 45 Hz,激光加工扫描速率 0.6 mm/s,加工扫描 1 次。激光束在石英玻璃上表面的加工扫描路径为直

线,长度为 10 mm。

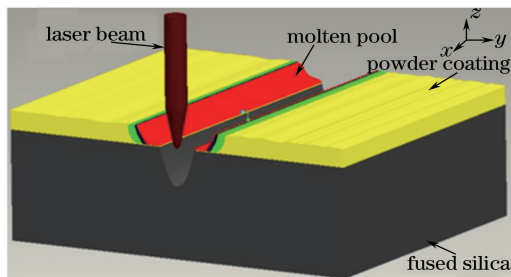


图 2 激光诱导钡化合物化学反应刻蚀石英玻璃的实验方法示意图

Fig. 2 Experimental method diagram of etching quartz glass by laser-induced chemical reactions of barium compounds

### 3 结果与讨论

#### 3.1 两种方法所刻蚀石英玻璃微通道的宏观形貌对比

图 3(a)、(b) 分别为激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  和  $\text{Ba(OH)}_2$  化学反应刻蚀石英玻璃得到的微通道宏观形貌电子扫描显微镜 (SEM) 图, 其中右半部分为微通道边缘放大 200 倍的 SEM 形貌图。由图 3(a) 可知, 激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃得到的微通道边缘存在非常严重的崩边现象, 微通道表面附着大量的熔渣; 由图 3(b) 可知, 激光诱导

$\text{Ba(OH)}_2$  化学反应刻蚀石英玻璃得到的微通道无明显崩边现象, 且微通道表面无明显熔渣附着。图 3(c)、(d) 分别为激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  和  $\text{Ba(OH)}_2$  化学反应刻蚀石英玻璃得到的微通道的截面图。对比图 3(c)、(d) 可知, 激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃得到的微通道较深, 而激光诱导  $\text{Ba(OH)}_2$  化学反应刻蚀石英玻璃得到的微通道更宽, 更深。由图 3 可知, 两种方法的刻蚀率都较高, 且在同样的激光参数和工艺参数条件下, 激光诱导  $\text{Ba(OH)}_2$  化学反应刻蚀石英玻璃的刻蚀率更高。

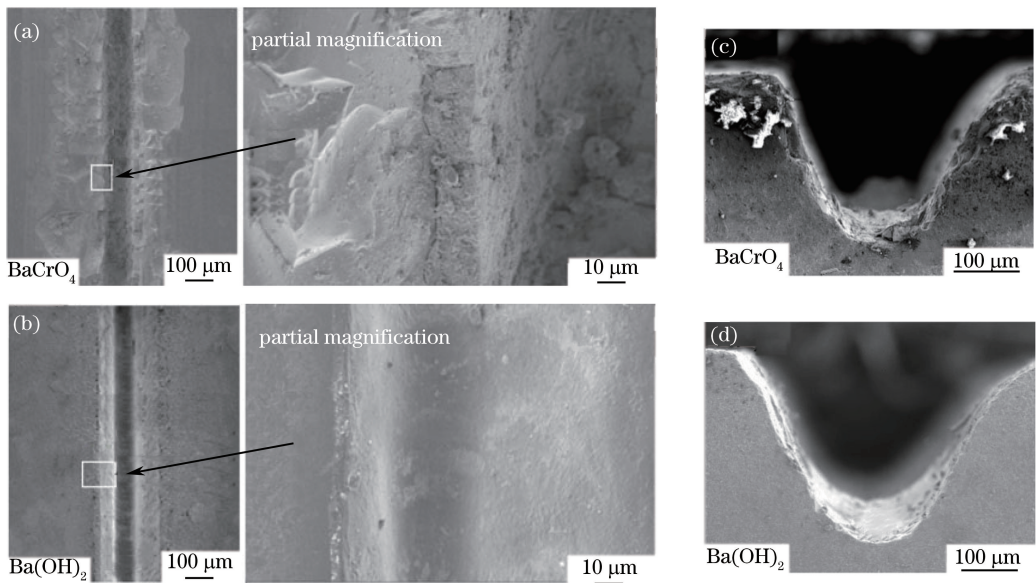


图 3 两种方法刻蚀出的微通道宏观形貌 SEM 图。

(a)  $\text{BaCrO}_4$ , 正面; (b)  $\text{Ba(OH)}_2$ , 正面; (c)  $\text{BaCrO}_4$ , 截面; (d)  $\text{Ba(OH)}_2$ , 截面

Fig. 3 SEM macro-topographies of micro-channels etched by two methods. (a)  $\text{BaCrO}_4$ , front view; (b)  $\text{Ba(OH)}_2$ , front view; (c)  $\text{BaCrO}_4$ , cross-sectional view; (d)  $\text{Ba(OH)}_2$ , cross-sectional view

#### 3.2 能谱分析刻蚀机理

为了对这两种刻蚀方法的刻蚀机理进行研究, 利用电镜拍摄未经过任何清洗处理的微通道底部表

面微观形貌。图 4(a) 所示为激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃的微通道底面的 SEM 图, 可以看出, 微通道表面除了附着一层熔融物质外, 还存在

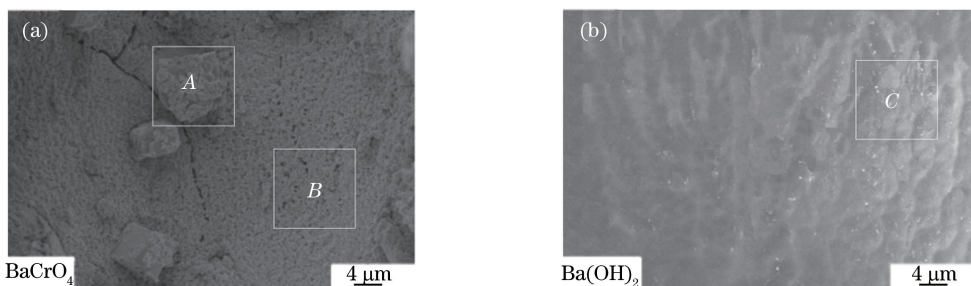


图 4 激光诱导化学反应刻蚀石英玻璃的微通道底部表面微观形貌。(a)  $\text{BaCrO}_4$ ; (b)  $\text{Ba(OH)}_2$

Fig. 4 Micro-topographies on bottom surfaces of micro-channels etched by laser-induced chemical reactions.

(a)  $\text{BaCrO}_4$ ; (b)  $\text{Ba(OH)}_2$

一些细小颗粒状物质和微裂纹。图 4(b)所示为激光诱导  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  化学反应刻蚀石英玻璃的微通道底面的 SEM 图,可以看出,微通道表面无裂纹和裂口,无明显的熔渣附着,表面比较清洁。对比可知,两种刻蚀方法得到的微通道底部表面形貌存在着较大的差异。

为了进一步对刻蚀机理进行研究,需要对附着在微通道底面的刻蚀产物进行能谱分析(EDS)。分别对图 4(a)中的区域 A 和区域 B 以及图 4(b)中的区域 C 进行分析,其中区域 A 为微通道底面附着的颗粒状物质,区域 B 为微通道底面附着的熔融物质,区域 C 为微通道底面存在的少量熔融物质。图 5(a)~(c)所示分别为区域 A、B、C 的 EDS 测试结果。由图 5(a)、(b)可知,区域 A、B 的能谱中仅出现了 Ba、Si、O 和 Cr 4 种谱峰,这 4 种元素都是石英玻璃主要成分  $\text{SiO}_2$  和覆盖层材料  $\text{BaCrO}_4$  的组成元素,故激光刻蚀过后刻蚀产物中没有新的元素出现;区域 C 的能谱中出现 Ba、Si 和 O 三种元素,这三种元素是石英玻璃主要成分  $\text{SiO}_2$  和覆盖层材料

$\text{Ba}(\text{OH})_2$  的组成元素。由于 EDS 测试无法测试到 H 元素,无法判断刻蚀后微通道中是否有 H 元素,故暂时只能确定激光诱导  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  化学反应刻蚀石英玻璃后无元素增加。

对于激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃,对比图 5(a)以及表 1 中区域 A、B 的能谱图发现,区域 A 中的 Si、O 元素的含量比其他元素的含量高很多,可初步推断区域 A 为石英玻璃的碎渣颗粒。这是因为  $\text{BaCrO}_4$  易燃,  $\text{BaCrO}_4$  粉体覆盖层在激光照射下会有明显的绿色火焰,并伴随着连续、清脆的微爆炸声,导致微通道崩边和产生微裂纹,崩边导致部分石英玻璃碎屑飞溅后落在微通道表面上。此外,区域 A 中还存在着 Ba 和 Cr 元素,可以初步推断是由  $\text{BaCrO}_4$  剧烈燃烧后部分产物附着在微通道表面导致的。由图 5(b)可知,区域 B 中包含 Ba、Cr、O 和 Si 4 种元素,由表 1 可知 4 种元素的含量差别不大,初步推测区域 B 中的物质是由这 4 种元素中的两种或多种元素构成的多种化合物混合形成的。

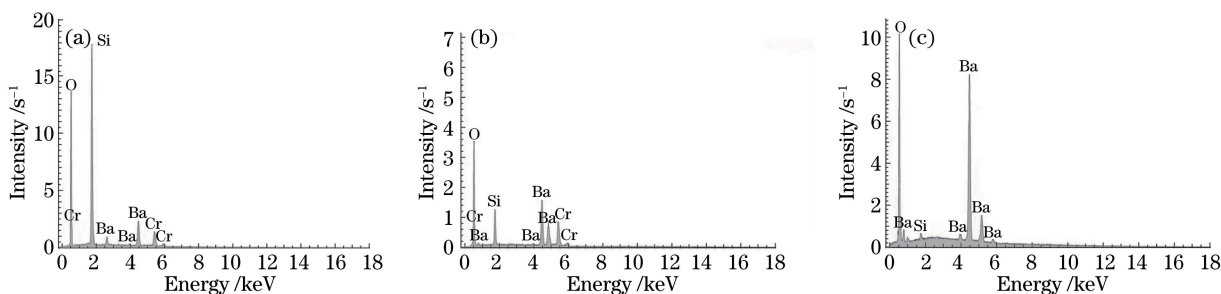


图 5 EDS 图。(a)  $\text{BaCrO}_4$ , 区域 A; (b)  $\text{BaCrO}_4$ , 区域 B; (c)  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , 区域 C

Fig. 5 EDS images. (a)  $\text{BaCrO}_4$ , area A; (b)  $\text{BaCrO}_4$ , area B; (c)  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , area C

表 1 刻蚀产物的含量

Table 1 Mass fraction and atomic fraction of etching products

| Area   | Element | Mass fraction / % | Atomic fraction / % |
|--------|---------|-------------------|---------------------|
| Area A | O       | 41.02             | 64.90               |
|        | Si      | 30.48             | 27.47               |
|        | Cr      | 7.86              | 3.83                |
|        | Ba      | 20.64             | 3.80                |
| Area B | O       | 30.26             | 51.49               |
|        | Si      | 8.77              | 16.07               |
|        | Cr      | 15.57             | 15.42               |
|        | Ba      | 45.40             | 17.02               |
| Area C | O       | 25.40             | 74.10               |
|        | Ba      | 74.19             | 25.22               |

玻璃,区域 C 中包含的元素为 Ba、O 和 Si,由表 1 以及图 5(c)可知,区域 C 中的 O 和 Ba 含量较高,由此可以初步推断,区域 C 中主要成分为由 Ba、O 两种元素组成的化合物,少量成分是由 Ba、O、Si 中两种或三种元素组成的化合物。这是由于  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  在高温条件下能够与  $\text{SiO}_2$  发生化学反应并生成  $\text{BaSiO}_3$ <sup>[12]</sup>,以及  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  分解产生的 BaO 在高温条件下能够与  $\text{SiO}_2$  发生化学反应并生成  $\text{BaSiO}_3$ ,因此区域 C 中的物质很可能以 BaO 为主,同时存在由  $\text{BaSiO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  组成的混合物,具体成分还需进一步分析验证。

### 3.3 X 射线衍射分析刻蚀机理

EDS 只能定性分析微通道表面不同区域的主要元素组成情况以及分布情况,但不能确定各区域的具体化学物质组成成分。将激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化

而对于激光诱导  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  化学反应刻蚀石英

学反应刻蚀石英玻璃的微通道表面刻蚀产物刮下并进行 XRD 分析,图 6 所示为得到的 X 射线衍射(XRD)图谱,其中  $2\theta$  为衍射角。

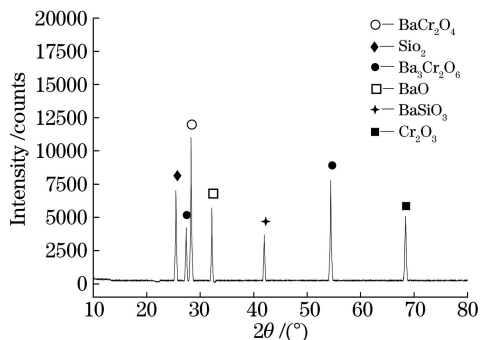


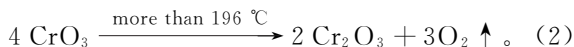
图 6 激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃的微通道内刻蚀产物的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD images of etching products in micro-channels etched by laser-induced chemical reactions of  $\text{BaCrO}_4$

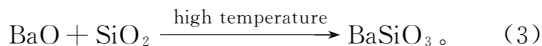
将图 6 与分析软件中 PDF 标准卡进行比对发现,其中出现了 6 种类型的衍射峰,分别为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{BaCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ba}_3\text{Cr}_2\text{O}_6$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{BaSiO}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,其中  $\text{SiO}_2$  是石英玻璃的主要成分,而  $\text{BaO}$  是  $\text{BaCrO}_4$  在  $850\text{ }^\circ\text{C}$  下分解的产物。化学反应方程式为



$\text{CrO}_3$  没有被检测到是因为当温度超过  $\text{CrO}_3$  熔点 ( $196\text{ }^\circ\text{C}$ ) 时,  $\text{CrO}_3$  受热就分解放出  $\text{O}_2$  生成  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,放出的  $\text{O}_2$  为气体无法被检测到。化学反应方程式<sup>[20]</sup>为



$\text{BaO}$  在高温条件下会与石英玻璃的主要成分  $\text{SiO}_2$  发生化学反应并生成  $\text{BaSiO}_3$ , 化学反应方程式为



故该化学反应起到直接刻蚀石英玻璃的作用。XRD 能谱显示有  $\text{BaCr}_2\text{O}_4$  和  $\text{Ba}_3\text{Cr}_2\text{O}_6$ , 这是因为  $\text{BaCrO}_4$  易燃, 一般情况下当温度超过  $900\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $\text{BaCrO}_4$  会发生燃烧并生成  $\text{BaCr}_2\text{O}_4$  和  $\text{Ba}_3\text{Cr}_2\text{O}_6$ , 而刻蚀过程中当高能量密度激光束照射在  $\text{BaCrO}_4$  上时, 温度在极短的时间内急剧升高,  $\text{BaCrO}_4$  会发生剧烈燃烧和微爆炸。

微通道中的主要物质组成是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{BaCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ba}_3\text{Cr}_2\text{O}_6$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{BaSiO}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  这 6 种, 结合区域 A、B 的 EDS 结果(图 5)进一步分析可知, 由于区域 A 中包含的 Si 元素和 O 元素的含量远大于 Ba 元素和 Cr 元素的含量, 故可以确定区域 A 中主要物

质为  $\text{SiO}_2$ , 说明区域 A 中的颗粒是石英玻璃碎屑, 上述通过 EDS 得出的初步推测得到了验证; 还可确定区域 B 中的物质为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{BaCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ba}_3\text{Cr}_2\text{O}_6$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{BaSiO}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  这 6 种物质中的某几种物质的混合物, 上述对区域 B 物质成分的初步推测也得到了验证。

综合上述对激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃的刻蚀机理的分析可知,  $\text{BaCrO}_4$  在高能量密度激光束照射下会发生剧烈燃烧和连续微爆炸并放出大量的热, 这有利于激光通过熔化、汽化刻蚀石英玻璃, 但微爆炸也会导致微通道崩边和产生微裂纹。另外,  $\text{BaCrO}_4$  分解产生的  $\text{BaO}$  在高温条件下与  $\text{SiO}_2$  发生化学反应生成  $\text{BaSiO}_3$ , 起到直接刻蚀石英玻璃的作用。

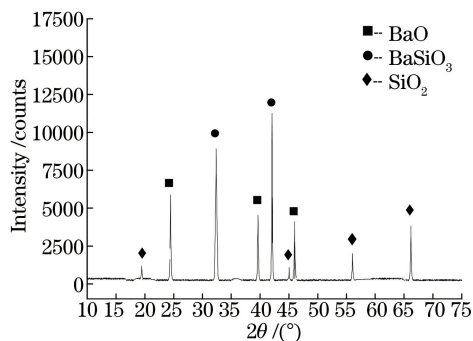
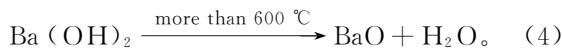


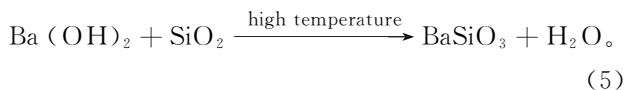
图 7 激光诱导  $\text{Ba(OH)}_2$  化学反应刻蚀石英玻璃的微通道内刻蚀产物的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD images of etching products in micro-channels etched by laser-induced chemical reactions of  $\text{BaCrO}_4$

对于激光诱导  $\text{Ba(OH)}_2$  化学反应刻蚀石英玻璃, 通过 XRD 测试对微通道内部刻蚀产物成分进行分析, 图 7 所示为 XRD 图谱。图 7 中出现了三种类型的衍射峰, 分析可知这三种衍射峰分别代表  $\text{BaO}$ 、 $\text{BaSiO}_3$  和  $\text{SiO}_2$ , 其中  $\text{SiO}_2$  为石英玻璃的主要成分,  $\text{BaO}$  是  $\text{Ba(OH)}_2$  在超过  $600\text{ }^\circ\text{C}$  高温条件下的分解产物, 化学反应方程式为



XRD 图谱中未出现  $\text{H}_2\text{O}$ , 是由于在高温条件下  $\text{H}_2\text{O}$  被蒸发到空气中; 而  $\text{Ba(OH)}_2$  分解生成的  $\text{BaO}$  和  $\text{SiO}_2$  在高于  $800\text{ }^\circ\text{C}$  的温度条件下会发生化学反应生成  $\text{BaSiO}_3$ , 化学反应方程式如(3)式所示, 故 XRD 图谱中会出现  $\text{BaSiO}_3$ 。另一方面,  $\text{Ba(OH)}_2$  和  $\text{SiO}_2$  在高温条件下会发生化学反应生成  $\text{BaSiO}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 化学反应方程式为



以上两个生成  $\text{BaSiO}_3$  的化学反应都起到直接刻蚀石英玻璃的作用。

结合图 5(c)及图 7 进一步分析可知,微通道表面附着一层  $\text{BaO}$ 、 $\text{BaSiO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的混合物,验证了上述通过 EDS 得到的初步推测。

综合上述对激光诱导  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  化学反应刻蚀石英玻璃的机理分析可知, $\text{Ba}(\text{OH})_2$  以及其分解生成的  $\text{BaO}$  在高温条件下都会与石英玻璃的主要成分  $\text{SiO}_2$  发生化学反应并生成  $\text{BaSiO}_3$ ,这两个化学反应都起到直接刻蚀石英玻璃的作用。由于该刻蚀方法主要是通过化学反应刻蚀石英玻璃,且刻蚀过程中  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  在高能量密度的激光束照射下无明显燃烧和微爆炸现象,故该刻蚀方法能够在保证高刻蚀率的同时获得无明显崩边和裂纹的刻蚀效果。

## 4 结 论

提出了两种红外激光诱导钡化合物化学反应刻蚀石英玻璃的方法,研究了这两种方法的刻蚀机理。对于激光诱导  $\text{BaCrO}_4$  化学反应刻蚀石英玻璃,当激光照射  $\text{BaCrO}_4$  粉体覆盖层时会发生剧烈燃烧和连续微爆炸并放出大量的热,这有利于通过熔化、气化去蚀石英玻璃,但  $\text{BaCrO}_4$  的连续微爆炸也会导致微通道崩边以及微裂纹的产生;另一方面, $\text{BaCrO}_4$  分解产生的  $\text{BaO}$  在高温条件下与  $\text{SiO}_2$  发生化学反应产生  $\text{BaSiO}_3$ ,该化学反应具有直接刻蚀石英玻璃的作用。对于激光诱导  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  化学反应刻蚀石英玻璃, $\text{Ba}(\text{OH})_2$  在高温条件下会发生分解产生  $\text{BaO}$ ,而  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  和  $\text{BaO}$  在高温条件下都会与  $\text{SiO}_2$  发生化学反应生成  $\text{BaSiO}_3$ 。这两个化学反应都起到直接刻蚀石英玻璃的作用。此外, $\text{Ba}(\text{OH})_2$  不具有易燃性,刻蚀过程中无剧烈燃烧和微爆炸现象,故得到的微通道无明显的崩边和微裂纹现象。由于两种方法的刻蚀机理存在差异,因此两种方法加工得到的微通道刻蚀质量存在明显差异。

## 参 考 文 献

- [1] Cheng J Y, Yen M H, Wei C W, *et al.* Crack-free direct-writing on glass using a low-power UV laser in the manufacture of a microfluidic chip[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(6): 1147-1156.
- [2] Yang G S, Chen T, Chen H. The study on crack-free

of silica glass micro-groove etched by 248 nm excimer laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902004.

杨桂栓, 陈涛, 陈虹. 248 nm 准分子激光无裂损刻蚀石英玻璃表面微通道的实验研究[J], *中国激光*, 2017, 44(9): 0902004.

- [3] Xing S L, Liu L, Zou G S, *et al.* Effect of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0403001.
- 邢松龄, 刘磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响[J], *中国激光*, 2015, 42(4): 0403001.
- [4] Cheng Z, Guo W, Liu L, *et al.* Mechanical properties of microweld of silica glass to silica by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0906004.
- 程战, 郭伟, 刘磊, 等. 石英玻璃与硅的飞秒激光微连接及其接头性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0906004.
- [5] Wu D J, Zhou S Y, Ma G Y, *et al.* Experiment of quartz glass flute precise thinning by femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0303009.
- 吴东江, 周思雨, 马广义, 等. 飞秒激光精密减薄石英玻璃凹槽实验 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303009.
- [6] Yoshizo K, Hiroyuki N, Tadatak S, *et al.* A deep micro-trench on silica glass fabricated by laser induced backside wet etching (LIBWE) [J]. *Journal of Physics*, 2007, 59: 380-383.
- [7] Wang S. A study on laser etching and polishing quartz glass technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 4-5.
- 王汕. 激光刻蚀抛光石英玻璃工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 4-5.
- [8] Huang Y Y, Qian J, Shao C Y, *et al.* Femtosecond laser induced defects in pure silica glass with different hydroxyl concentration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102011.
- 黄媛媛, 钱静, 邵冲云, 等. 飞秒激光在不同羟基浓度纯石英玻璃内部诱导缺陷研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102011.
- [9] Hao Y F, Sun M Y, Shi S, *et al.* Research on rear surface damage in picosecond laser ablation of K9 glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102015.
- 郝燕飞, 孙明营, 时双, 等. 皮秒激光烧蚀 K9 玻璃

- 后表面损伤研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102015.
- [10] Dai Y T, Xu G, Cui J L. 3D micro ablation technique of transparent materials using deep ultraviolet laser [J]. Applied Laser, 2009, 29(5): 411-414.  
戴玉堂, 徐刚, 崔健磊. 透明材料的深紫外激光三维微刻蚀工艺[J]. 应用激光, 2009, 29(5): 411-414.
- [11] Zhang J, Sugioka K, Takahashi T, *et al.* Dual-beam ablation of fused silica by multiwavelength excitation process using KrF excimer and F<sub>2</sub> lasers[J]. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 2000, 71(1): 23-26.
- [12] 张霞, 孙挺, 韩义德, 等. 无机化学[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 281-282.
- [13] Lorenz P, Ehrhardt M, Zimmer K. Laser-induced front side etching of quartz glass with KrF excimer laser using thin chromium layers [J]. Applications and Material Science, 2012, 209(6): 1114-1118.
- [14] Hamdani A H, Ansar A, Akhter R, *et al.* Laser induced backside dry etching of BK-7 and quartz in vacuum[J]. Key Engineering Materials, 2012, 510/511: 261-264.
- [15] Zimmer K, Böhme R, Ruthe D, *et al.* Backside laser etching of quartz glass using liquid gallium [J]. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 2006, 84(4): 455-458.
- [16] Tsvetkova M Y, Yusupova V I, Minaeva N V, *et al.* On the mechanisms of single-pulse laser-induced backside wet etching[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 17-23.
- [17] Nieto D, Cambronero F, Flores-Arias M T, *et al.* Aluminum thin film enhanced IR nanosecond laser-induced frontside etching of transparent materials[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 88: 233-242.
- [18] Lan B, Hong M H, Ye K D, *et al.* Laser precision engineering of glass substrates[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(10): 7102-7106.
- [19] Ihlemann J, Wolff B, Simon P. Nanosecond and femtosecond excimer laser ablation of fused glass[J]. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 1992, 54(4): 363-368.
- [20] 卢拴仓. 钡化合物对双基推进剂燃烧性能及燃气红外通过率的影响[J]. 火炸药, 1993(2): 18-22.