

激光加工结构陶瓷的实验研究*

张 珊 康少英

(天津市激光技术研究所, 天津 300192)

提要 针对激光加工陶瓷产生裂纹的问题,进行了实验研究。得出了消除加工裂纹的工艺条件,开发了一种实用的激光复合加工法。

关键词 结构陶瓷,激光加工,裂纹

1 引言

陶瓷属硬脆材料,机械加工相当困难,适宜用激光加工。但是,陶瓷的热稳定性一般都较差,难以承受激光产生的热应力,极易形成加工裂纹等缺陷,大大地降低了基体的机械性能。本文针对这一问题,进行了实验研究,得出了消除激光加工裂纹的工艺条件,开发了一种实用的激光复合加工法。

2 实验条件与方法

2.1 实验材料及试件

不同的陶瓷,热稳定性差异很大,为消除激光加工的裂纹,要采用不同的工艺条件。本实验选择了工业应用最广泛的热压 Si_3N_4 结构陶瓷为研究对象。试件做成适宜加工和测试的尺寸 $7 \times 13 \times 20 \text{ mm}^3$,表面经金刚石砂轮磨削,粗糙度 R_a 为 $0.8 \mu\text{m}$ 。

2.2 实验设备及仪器

分析加工裂纹产生的原因,主要来自激光形成的热冲击,一旦热应力值 σ_{\max} 超过了陶瓷的极限强度 σ_f ,则陶瓷就会产生裂纹甚至破坏^[1]。不同参量的激光,产生的热影响有很大不同,所以本项目采用多种激光加工机进行实验,其中有连续 CO_2 激光加工机、自由振荡脉冲 YAG 激光加工机和声光调 Q YAG 激光加工机。所用的主要仪器是 X-650 型扫描电子显微镜。

2.3 实验方法

用连续 CO_2 激光进行切割实验;用脉冲 YAG 激光和 Q 开关 YAG 激光进行打孔实验。打孔分别采用试件的正面打孔方法和把两块试件夹紧沿缝打孔的方法,从而得到孔的表面和剖面^[1]。

* 天津市自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年10月24日; 收到修改稿日期: 1995年4月17日

2.4 试件加工后的处理

把试件的激光加工面研磨抛光,浸入 HF 溶液中,腐蚀 20 min,再用超声波清洗 5 min,最后用扫描电镜观察、拍照孔的形貌。

3 实验结果与分析

3.1 用连续 CO₂ 激光切割时,基体遭到破坏

实验条件:功率为 100~1200 W;切割速度为 0.1~1.25 m/min;吹空气为 0.1~1.0 MPa;入焦量为 0~1.5 mm。切割结果:不同条件的切断面粗糙度虽有明显不同,但下边缘都有大量粘渣。冷却后,所有样条都出现了严重的剥裂,情况如图 1 所示。不难看出,连续激光的热影响是巨大的,已达到使陶瓷材料破坏的程度。

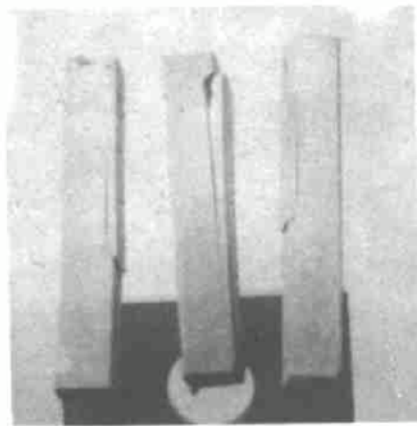


Fig. 1 Flaking-off phenomena shown by the cooled-down Si₃N₄ ceramics samples after being cut by a continuous wave CO₂-laser

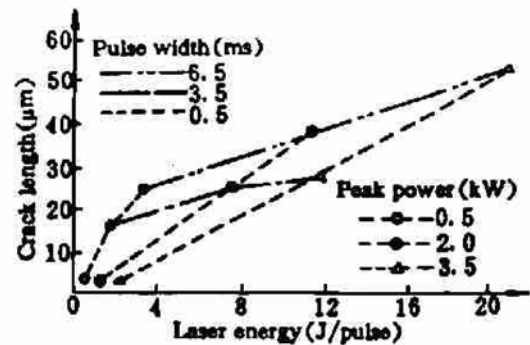


Fig. 2 The relationship between laser energy and crack length

3.2 用自由振荡脉冲 YAG 激光加工要产生裂纹

实验条件如表 1 所示。用了三种脉宽,每种脉宽又用了三种峰值功率。全照射能量,以脉宽最长峰值功率最高时的一个脉冲的能量为准,调整其他条件的照射次数,使各孔的输入能量相同。照射能量和裂纹长度的关系如图 2 所示。由图可知,全部的工艺条件都产生了加工裂纹,说明了自由振荡脉冲激光仍形成了陶瓷不能承受的热冲击。分析图 2 可知,在单脉冲能量不变的情况下,峰值功率越高或脉宽越短,则裂纹的长度越短,这一事实对进一步的研究探索是非常有意义的。

Table 1 Experimental conditions of pulsed YAG laser drilling

Pulse width (ms)	0.5			3.5			6.5		
Peak power (kW)	0.50	2.00	3.50	0.50	2.16	3.25	0.50	1.75	3.50
Single-pulse energy (J)	0.25	1.00	1.75	1.75	7.85	11.38	3.25	11.38	22.75
Pulse number (N)	90	23	13	13	3	2	7	2	1

3.3 用 Q 开关 YAG 激光加工可以消除裂纹

前面的实验结果,证明了压缩脉宽是减小热影响的重要途径,按此思路,用 Q 开关激光进行实验。从脉宽、重复频率等方面研究对加工结果的影响。

3.3.1 激光脉宽对加工结果的影响

脉宽影响的研究,是在最高峰值功率的前提下进行的。实验条件如表 2 所示,全照射能量及照射次数的设定方法同表 1,其中 ms 级脉宽的数据取自表 1。在表 2 的条件下,脉宽和裂纹长度的关系如图 3 所示。由图可知,脉宽在 ms 量级时,总存在加工裂纹,但随着脉宽的缩短,裂纹长度迅速减小;脉宽在 μs 量级时,裂纹很微小,而且变化不大;脉宽在 ns 量级时,无裂纹产生,即用 Q 开关激光实现了无裂纹缺陷的加工。

Table 2 Experimental conditions with which the results shown in Fig. 3 are obtained

Pulse width	120 ns	0.5 μs	500 μs	3.5 ms	6.5 ms
Single-pulse energy	6 mJ	2.5 mJ	1.75 J	11.38 J	22.75 J
Pulse number (<i>N</i>)	3790	9100	13	2	1
Peak power (kW)	50	5	3.5	3.25	3.5

3.3.2 重复频率对加工结果的影响

一般来讲, Q 开关激光重复频率的范围是较宽的,而图 3 仅是 1 kHz 时的实验结果。不难理解,重复频率越高,单位时间内输入的能量就越多,产生的热影响也越大,所以必须进一步研究重复频率对加工结果的影响。实验条件见表 3。表 3 中全照射能量及照射次数的确定同表 1。Q 开关波形的脉宽,随着重复频率的升高而变宽,但仍在 ns 量级^[2],所以表 3 的实验结果,主要是重复频率的影响。图 4 表示了重复频率和裂纹长度的关系。由图可知,频率小于 7 kHz 时,裂纹完全被抑制;频率大于 7 kHz 时,情况骤然变坏,裂纹产生并迅速增长。

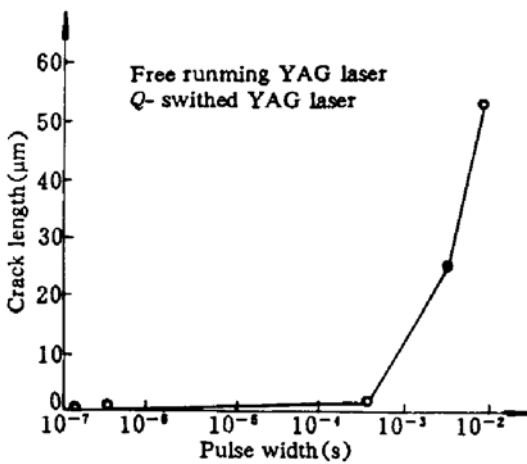


Fig. 3 The relationship between pulse width and crack length

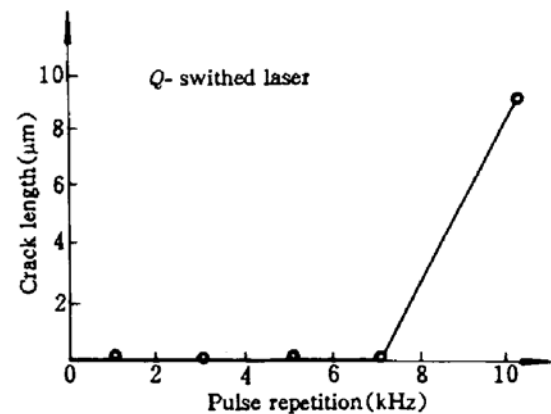


Fig. 4 The relationship between pulse repetition rate and crack length

Table 3 Experimental conditions with which the influence of laser pulse repetition rate on processing results is shown in Fig. 4

Pulse repetition rate (kHz)	1	3	5	7	10
Pulse width (ns)	120	185	250	350	400
Single-pulse energy (mJ)	6.00	0.93	1.25	1.75	2.00
Pulse number (<i>N</i>)	3790	24500	18200	13000	11380
Peak power (kW)	50	5	5	5	5

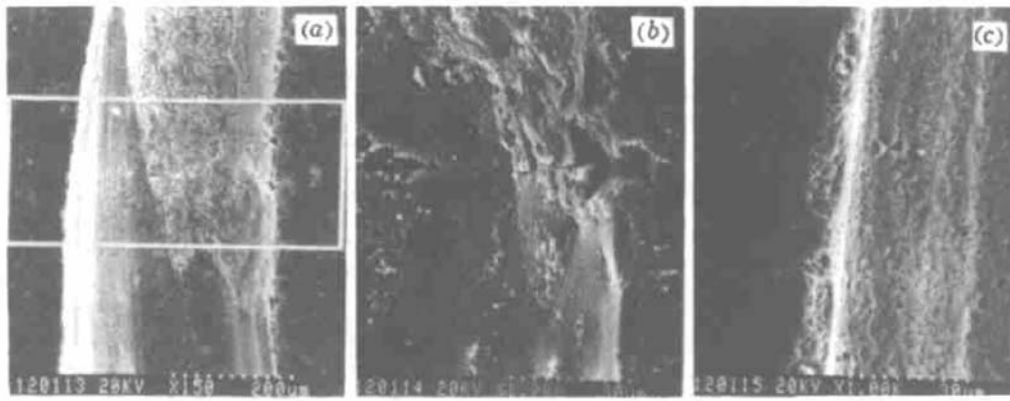


Fig. 5 Two kinds of laser composite processing

(a) status of composite processing; (b) enlarged view of pre-processed samples showing produced cracks; (c) enlarged view of reprocessed samples, indicating the disappearance of the cracks produced in the pre-processing as shown in (b)

4 消除陶瓷激光加工裂纹工艺的实用化

由上面的实验结果可知, Q 开关 YAG 激光实现了陶瓷的无裂纹加工, 但此时的单脉冲能量仅为 mJ 级, 去除量很少, 对于大孔、深孔等加工不适应。而自由振荡 YAG 激光, 单脉冲能量可达数十 J 级, 去除量很大, 适宜大孔、深孔等加工, 但此时要产生裂纹。也就是说, 这两种方法都和实际的应用有距离。

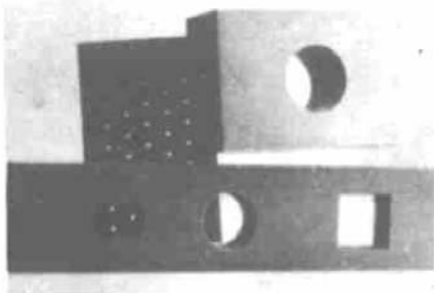


Fig. 6 Si_3N_4 ceramics samples after laser composite processing

为此, 笔者开发了将两种激光复合照射的加工方法: 首先用自由振荡 YAG 激光进行预加工, 留出一定的余量, 再用 Q 开关激光沿着已经加工的面进行再加工。预加工提高了加工效率, 再加工去除了预加工产生的缺陷层, 这就使两种激光的优势都得到了

发挥。图 5 是复合加工效果图, 图中 (a) 是复合加工状态; (a) 中孔右壁是预加工的结果, 放大图如 (b) 所示, 可知有严重的裂纹产生; (a) 中孔左壁是再加工的结果, 放大图如 (c) 所示, 可知已去除了预加工产生的裂纹。这一复合过程实现了高效无缺陷加工的目的, 使 Si_3N_4 结构陶瓷的激光加工达到了实用化的程度。复合加工的样件如图 6 所示。

参 考 文 献

- 1 张 珊, 康少英. 激光加工陶瓷的实验研究. 应用激光, 1994, 14(6):253
- 2 兰信钜, 姚建铨, 安毓英等. 激光技术. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1981. 99

Experimental Studies of Laser Processing of Constructural Ceramics

Zhang Shan Kang Shaoying

(Tianjin Institute of Laser Technology, Tianjin 300192)

Abstract This paper deals with ceramic cracks generated during laser processing and presents special technical conditions for crack-free processing. A practical method of laser composite processing is reported.

Key words constructural ceramics, laser processing, cracks