

文章编号: 1005-0523(2007)01-0108-04

# 人造宝石刚玉晶体材料的激光微孔技术研究

王宁

(华东交通大学 机电工程学院 南昌 330013)

**摘要:**通过理论分析和实验研究,探讨了人造宝石刚玉晶体材料微孔激光加工工艺参数中激光脉冲的能量、脉冲宽度、离焦量、脉冲激光的重复频率对微孔直径和孔深的影响,确定了微孔激光加工工艺参数的有效匹配组合方法。

**关键词:**人造宝石刚玉晶体材料;微孔加工;激光

中图分类号:TH16

文献标识码:A

## 1 引言

随着宝石刚玉晶体的合成生长技术的较快发展,品质优良大体积的人造宝石刚玉晶体材料越来越多。人造宝石刚玉晶体是一种具有良好热、电、电子、光学、超硬脆性能的材料,用其制造的精密微孔元件近年来广泛用于机械电子、生物医疗、航空航天以及光电技术等领域,但其可加工性较差,易产生“裂纹”和“崩豁”缺陷,要用其制作精密微孔元件,微孔加工工艺及确定相应参数的研究是很有意义的。目前在红宝石微孔加工方面领先是瑞士,在蓝宝石精密平面加工方面有较大优势是日本和美国,而我国在宝石刚玉晶体材料还处于初级水平。本文结合宇航用氧气精密控制阀中精密红宝石阀芯研制(主要技术参数见图1)的实际生产试验,探讨微孔加工各参数的调整规律,确定各工艺参数的有效匹配组合方法,提高孔加工质量和精度。

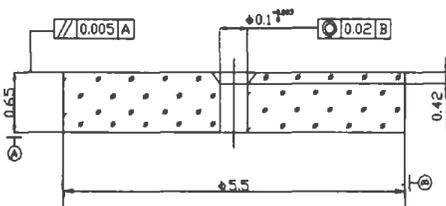


图1 红宝石阀芯示意图 内孔粗糙度为 0.025 μm

## 2 加工方法

目前国际上对红宝石晶体元件的孔加工方法,主要是激光和超声波加工。经试验,超声波对宝石刚玉晶体的孔加工,在精度和效率方面不如激光加工,尤其在微孔加工方面,超声波加工技术无法满足生产加工要求。

我们选择激光打孔,激光器为YAG激光器,它是一种固体激光器,其激光棒的基质材料为钇铝石榴石,其特征输出波长为 1.06 μm,可作脉冲输出,也可作连续输出。

YAG激光器主要有以下三种优点:一是输出的光可用普通的光学材料传递。二是宝石刚玉晶体材料对YAG激光吸收率较高。三是出波长短,稳定性好,输出能量较大。输出能量见以下电子跃迁能量公式<sup>[1]</sup>:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

式中  $c$  是光速,  $\lambda$  是波长,  $f$  是频率,  $h$  是普朗克常数,  $h = 6.6 \times 10^{-34}$  焦耳·秒

## 3 加工参数的特性

激光打孔的过程是激光和加工材料相互作用极

收稿日期: 2006-09-13

作者简介: 王宁(1971-)女,江苏镇江人,讲师,主要研究方向:机械加工  
(Copyright © East China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net)

其复杂的热、物理、化学过程,材料去除主要与激光作用区内物质的破坏及破坏产生物的运动有关,一般可表示为:

$$w_i = w_r + w_d + w_t \quad (2)$$

式中下角  $t, r, d, t$  分别表示入射、反射、吸收、透射的能量.严格分析激光打孔的成因需要解决激光打孔时产生的蒸气、气物质沿孔壁流动的动力学问题及加工材料特性,并考虑瞬间加热过程的所有因素.这个讨论十分复杂,且实验数据收集困难,难以进行,目前也没有这方面成功的报道.

我们采用试验估算的方法选择激光打孔工艺参数,并在加工中逐步修正完善.结合生产实践,经过对生产用 YAG 激光器各工艺参数与孔加工的特征及材料去除量关系的试验研究,获得了包括激光脉冲的能量、脉冲宽度、离焦量、脉冲激光的重复频率以及被加工材料的性质等加工参数具体有效匹配组合.

### 3.1 激光脉冲能量

激光棒和光学系统参数决定焦平面上的激光光斑直径的大小.其脉冲能量的变化是通过对泵浦氙灯两端输入电压的变化来实现.如图 2 所示是激光打孔几何原理简图.

假设激光器输出的光束直径为  $D$ , 发散角为  $\alpha$ , 经过会聚透镜在材料表面上聚焦, 其会聚角即会聚后的激光光束发散角为  $2\beta$ , 激光束腰半径为  $r_0$ , 在  $t$  时刻孔的底面半径为  $r(t)$ , 孔身为  $h(t)$ , 则有<sup>[2]</sup>

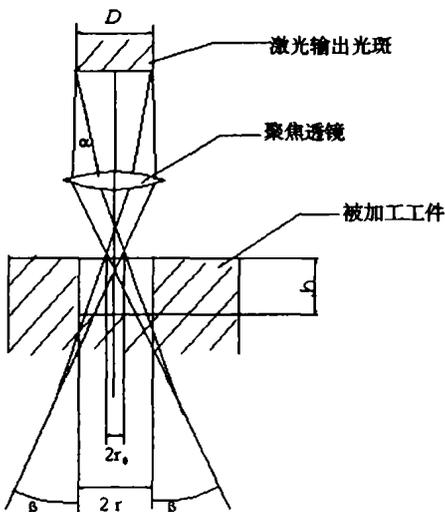


图 2 激光打孔几何原理简图

$$r(t) = r_0 + \tan(\alpha) \cdot h(t) \quad (3)$$

考虑到材料从孔底蒸发,气化的物质从孔壁高速冲刷流动,  $t$  时刻的能量守恒方程为<sup>[3]</sup>

$$P(t) dt = L_b \pi r^2(t) dh + L_m 2 \pi r(t) h(t) dr \quad (4)$$

式中,  $L_b$  为蒸发气化比能,  $L_m$  为熔化比能. 左边表示  $t$  时刻激光提供的能量增量, 右边第一项为孔底蒸发消耗的能量增量, 第二项为孔边熔化消耗的能量增量.

当  $h(t) \gg r_0$  时, 可以近似解出用激光加工的总能量  $E$  表示的孔深和孔径为<sup>[3]</sup>

$$h \approx \left[ \frac{3E}{\pi \tan^2 \alpha (L_b + 2L_m)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$r \approx h \tan \alpha \left[ \frac{3E \tan \alpha}{\pi (L_b + 2L_m)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

由式(5)及(6)可知, 激光打出的孔深度和孔径与激光脉冲能量成非线性关系, 随着激光能量单调递增.

### 3.2 通光光阑直径

在激光加工中, 一般将强度比焦点处衰减 10% 的两点间的距离定义为“焦深”, 其可用下式表示<sup>[4]</sup>

$$z = \frac{\pi}{12} \times \frac{d_0^2}{\lambda} \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中  $z$  为焦深,  $d_0$  为激光光束直径, 为激光波长.

由(7)式可知, 当改变激光光束的直径大小时, 可以改变激光的焦深, 从而改变打孔的形状和尺寸.

我们设计安装不同直径的通光光阑径进行打孔实验, 得出了选用不同直径的光阑与加工孔的深度和孔径的变化规律, 具体见下表 1.

表 1 不同直径的光阑对孔深度和孔径的影响

序号	光阑直径 (mm)	孔深 h (mm)	孔径 d (mm)	备注
1	10	2.17	0.25	
2	8	2.16	0.24	设计安装的
3	6	2.13	0.21	光阑要稳固,
4	5	2.10	0.18	同轴度应小
5	4	2.06	0.15	于 0.015mm,
6	3	1.7	0.11	而且要清洁
7	2	1.5	0.08	

从表 1 的试验数据可知, 当能量恒定时, 光阑直径在宽的范围变化时, 孔的深度改变是微小的. 当使用直径较小的光阑时, 孔的深度和直径发生了较显著的变化.

原因分析: 当激光能量不变时, 当改变光阑直径, 不改变激光束横截面内的功率密度, 而是改变了激光束的发散角和光束直径, 从而改变了激光的焦深大小, 也就改变了孔的深径比. 经试验, 当激光能量增大, 同时光阑直径减小时, 孔的深径比更大.

### 3.3 脉冲宽度

激光辐射的脉冲能量  $E$  可用以下关系式表示<sup>[5]</sup>

$$E = P(\tau) \Delta\tau \quad (8)$$

式中  $P(\tau)$ —在  $\tau$  瞬间的瞬时辐射功率,  $\tau$ —为脉冲宽度.

由(8)可知当脉冲能量一定时,脉宽越窄,其时间能量密度越大,打孔所产生的气相物质比例越大,从而产生的压力也越大.所以脉宽的变化对孔深、孔径和孔形状的影响较大.经加工试验,得出了选用不同的脉宽值时对孔深度和孔径的变化关系.具体见下表2.

表2 脉宽大小对孔加工的影响

序号	脉冲宽度(ms)	孔深度 h(mm)	孔径尺寸 d(mm)
1	1.5	4.01	0.09
2	1.2	3.42	0.11
3	1.0	3.02	0.15
4	0.8	2.68	0.17
5	0.6	2.38	0.22
6	0.5	1.89	0.26
7	0.4	1.56	0.29
8	0.3	1.15	0.31

上表2的试验数据可知,打深而小的孔,宜选用较大的脉冲宽度;打大而浅的孔,则宜选用较小的脉冲宽度.

目前市场上生产的 YAG 激光器的脉冲宽度范围为 0.20~130 ms.但加工宝石刚玉晶体时,当脉宽调到 1.2 ms 以上时所打出的孔缺陷较多,主要表现为裂纹、孔口崩裂严重、破坏层很深等缺陷.经实验得出对宝石刚玉晶体打孔时,一般选用的脉冲宽度范围为 0.35~1.2 ms.打微孔时宜选择脉冲宽度范围为 0.35~0.55 ms,打出的孔破坏层较小.

### 3.4 聚焦

聚焦系统主要由聚焦镜及聚焦装置组成.对于一台给定的 YAG 激光打孔机来说,其光学系统的主要性能已经确定,但在实际生产使用中发现光学系统的调整对加工质量的影响很大,尤其在加工宝石刚玉晶体材料方面其结果更为明显.

如图3所示,激光汇聚的最小部位称为焦点,其位于的面称为焦平面.所谓聚焦条件是指聚焦系统的焦距和该系统的焦平面相对被加工工件表面的位移.

聚焦透镜将激光光束进行聚焦时,在焦平面附近会使激光光束出现“束形”的管形汇聚现象,聚焦光斑的直径近似地表示为<sup>[6]</sup>

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (9)$$

式中  $D$  为入射激光束直径,  $f$  为透镜焦距,  $\lambda$  为激光波长.

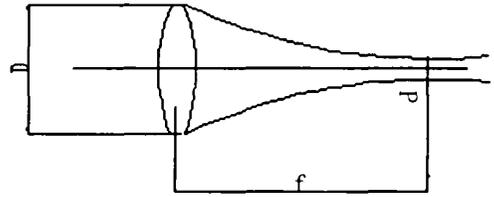


图3 激光聚焦示意图

由此可知在焦平面之外,聚焦光点直径就变大了.在激光总功率保持不变的情况下,聚焦光点越小就越意味着功率密度越大.反之,功率密度越小.当激光聚焦在加工材料的表面时,打出的孔比较深,锥度较小.在焦点处于表面下某一位置时,相同条件下,打出的孔最深;而过分的离焦量都会使激光功率密度大大降低,以致打成盲孔,离焦量是指材料上表面与透镜焦点之间的距离.

试验中,对打孔工件进行浸液投影检测,发现离焦量的大小,对孔加工形状有很大影响.当离焦量较大时,加工的孔形为抛物线形或圆锥形状;当焦平面的位置靠近工件表面某一位置时,加工的孔为圆柱形;当焦平面在被加工工件零件内部某一深度时,加工的孔为烧瓶形状.

由上式(9)可知采用焦距比较短的透镜可以打出直径较小的孔,因为用短焦距的透镜,在焦点上可获得较大的功率密度,打的孔小而深.通过选用焦距  $f$  为 20~120 mm 范围的聚焦透镜打孔试验,对打孔结果进行浸液投影检测,得出对宝石刚玉晶体打孔时选用焦距为  $f=35$  mm,  $f=45$  mm,  $f=55$  mm,  $f=75$  mm,  $f=100$  mm 的透镜打孔质量较好;在打微孔时,选择  $f=45$  mm 的透镜最好.

### 3.5 多脉冲加工

多脉冲加工其实质就是孔不是由一个脉冲形成的,而是由具有同样激光辐射参数的一组脉冲所形成,这些脉冲具有一定的能量和脉宽,连续不断的对工件进行加工,直到达到产品加工工艺要求.多脉冲加工可使工件上能量的横向扩散减小到最小,并且有助于控制孔的大小尺寸和形状要求.

综合上述,我们生产实验打孔所用 YAG 激光器的主要参数如下:

激光波长: 1.06  $\mu\text{m}$ ;

激光输出能量: 70 J;

激光脉冲频率:  $1\sim 100\text{ Hz}$ ;  
 激光脉冲宽度:  $0.35\sim 1.0\text{ ms}$ ;  
 光束发散角:  $\leq 10\text{ mrad}$ .

#### 4 采用辅助工艺方法和措施提高加工质量

试验证明,采用以下辅助办法对提高宝石刚玉晶体材料激光打孔的质量很有作用.

1) 在工件的表面施加一个正向压力,或是在工件的反面装一个低压仓,可有助于打孔过程中对产生残渣清除,并增加残渣的排出速度,从而减少加工过程中的激光能量辐射损失.

2) 加工过程中,利用压缩空气对加工的工件孔进行吹洗,能够帮助加工过程液相和残渣的排出,可以减弱加工熔化物不受控制的重新分布而对孔的尺寸和形状造成的影响,还可以保护光学系统的聚焦镜面,因为通过选择压缩空气的输送方向,可较好的防止残渣飞溅,凝聚到聚焦镜面上,破坏聚焦镜面的镀膜层,避免激光衰减加剧,影响加工质量和效率.

3) 利用一些辅助方法改变加工工件的表面状况,以改善其对激光的吸收状况,如将加工工件表面涂色,打毛等方法,以降低加工工件表面对激光的反射量.

#### 5 小结

本文以生产试验为基础,结合有关的理论,分析了激光在宝石刚玉晶体材料打孔中各参数对孔加工的影响,探讨了激光各参数在宝石刚玉晶体材料在打孔中的变化规律,包括激光脉冲的能量、脉冲宽度、离焦量、脉冲激光的重复频率以及被加工材料的性质等作了较细致的研究实验,并运用到实际生产当中,解决了过去微孔批生产加工中质量不稳定、加工困难等问题,总结出了一些好的工艺方法和辅助办法,使激光打孔质量得到了提高.

#### 参考文献:

- [1]晏绪光,高文斌,等.激光脉冲对激光加工工件质量的影响[J].应用激光,1994.6 14(3):127~129.
- [2]陈家壁,等.激光原理及应用[M].北京:电子工业出版社2004.
- [3]李相银.激光原理技术及应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [4]董峰,陆雅娟.激光切割工艺及设备[J].CAD/CAM与制造业信息化 2003.30(6):28~31.
- [5]J.E.哈里(英国).工业激光器及其应用[M].北京:机械工业出版社.1985.
- [6]金湘中,李力钧.激光加工技术及其发展[J].机械工艺师,1996.27(2):28~40.
- [7]刘磊,陈惠敏.高功率YAG激光器的实验研究[J].光学技术,2004.27(6):520~523.

## Study on Laser Machining Process for Tiny Hole on Synthetic Corundum Material

WANG Ning

(School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** By theoretical analysis and test research, this paper introduces the effect of tiny-hole laser machining parameters, such as energy of the laser pulse, width of the laser pulse, and repetition frequency of the laser pulse on the diameter and depth of the tiny hole for synthetic corundum material. Principle for proper combination for these laser machining parameters is proposed.

**Key words:** synthetic corundum material; tiny hole machining; laser machining