

石英晶体激光切割参数建模

周 岩 刘晓胜 陈向阳 杨乐民

(哈尔滨工业大学机电学院, 哈尔滨, 150001)

摘要: 运用回归分析技术, 分别建立了基于激光器功率和切割速度的石英晶体激光切割参数确定的数学模型, 分析了模型误差。根据该模型可以比较理想地选择适当的激光器功率和切割速度, 为提高加工效率和加工质量以及节约能源提供了理论保证。实践表明: 该模型能较好地满足工业生产的实际要求。

关键词: 石英晶体 激光切割 回归模型

Modeling on the parameters of laser cutting quartz crystal

Zhou Yan, Liu Xiaosheng, Chen Xiangyang, Yang Lemin

(School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: With the help of regression analytical technology, two mathematical models are presented. One is about the relationship between laser power and laser cutting parameters, the other is about the relationship between cutting velocity and laser cutting parameters. Their errors have been analyzed. The models give the theory ground to increase the efficiency of production, improve the quality and reduce the energy. Experiments show that the models can meet the requirement of industrial manufacturing process.

Key words: quartz crystal laser cutting regressive model

引 言

激光切割技术应用始于 60 年代, 是美国在金属丝的金刚石钻孔加工中首先采用的。70 年代初, 美国研制出了供金属加工用的大功率 CO₂ 激光器, 进入了板料激光切割的工程实用阶段。利用这种先进的热切割方法, 可以切割各种金属材料和各种非金属材料。该方法具有切速快、切缝窄、切口光洁、热变形小、热影响区小、质量高、成本低、效率高、切割范围广等特点。因此, 激光切割加工技术已开始广泛应用于航空航天、电子、食品、医药、纺织、汽车工业等方面。

石英晶体是一种重要的机电换能材料, 具有许多独特的优点, 例如, 压电性、温度系数小、介电常数大、无滞后、灵敏性高、再现稳定、可靠性好等。石英晶体属于高硬度、高熔点的脆性透明材料, 一般加工方法很难满足其加工要求。现有石英晶体的加工方法(例如机械研磨、磨料喷射加工、超声落料、化学蚀刻等), 均存在各种缺陷, 改进现有的石英晶体加工技术在实际生产中已显得尤为重要。将激光切割技术应用于石英晶体加工中, 可以大大地改善石英晶体加工的表面质量和提高其加工的生产率, 并且能提高系统的柔性。

然而, 激光器功率与切割速度的选择是影响激光切割质量和效率的关键技术。国内外许多学者在这方面做了大量工作, 研究了金属材料和非金属材料激光切割加工中参数的确定方法, 建立了确定激光切割参数的数学模型^[1~3]。作者重点研究了激光切割石英晶体的关键技术, 建立了激光切割石英晶体参数的模型, 为石英晶体激光切割的参数确定提供了理论依据。

1 石英晶体激光切割的原理

激光切割是利用经聚焦的高功率密度激光束照射工件,在超过阈值功率密度的前提下,热能被材料吸收,由此引起照射点材料温度急剧上升。到达沸点后,材料开始汽化,并形成孔洞。随着光束与工件的相对移动,最终使材料形成切缝。切缝处的熔渣被一定压力的辅助气体吹除。石英摆片激光切割试验装置见图 1。

用激光切割石英晶体的机理是激光束升华切割,升华切割时气流的任务是在汽化物质表面层重新凝结前将汽化物质从切缝吹掉。 CO_2 激光器的输出功率高,转换效率高(可达 30%),既可连续工作,也可脉冲工作,其波长为 $10.6\mu\text{m}$,具有良好的大气透过率,可广泛用于平面轮廓切割。由于石英晶体对 $10.6\mu\text{m}$ 波长的光束吸收率高,且其膨胀系数较低,满足激光切割要求,可以考虑用 CW CO_2 激光器进行石英晶体的轮廓切割加工^[4]。

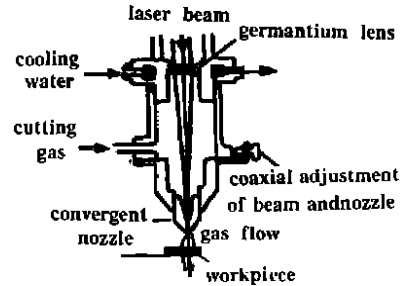


Fig. 1 The principle of laser beam cutting

2 两种数学模型的建立

影响石英晶体激光切割质量的因素主要有:激光器功率、模式、焦点位置(聚焦透镜焦平面相对于被加工表面的距离)、切割速度、材料厚度、辅助气体的种类和压力、喷嘴形状和大小及喷嘴端口距工件的距离等。但在材料厚度一定的情况下,最重要的影响因素是激光器功率和激光切割过程中工作台移动速度(即切割速度)。因此,我们利用回归分析技术,基于激光器功率和切割速度,分别建立了确定石英晶体激光切割参数的两种数学模型。

2.1 激光器功率确定

2.1.1 基于激光器功率的数学模型 石英晶体加工过程中,如何选择激光器,确定激光器的功率是非常重要的,笔者通过试验及其对试验结果的分析发现,切割速度和激光器所能切割材料的厚度直接与激光器功率有关,而激光器功率直接影响切缝宽度。我们采用回归分析法,建立了切割速度 v (mm/s),材料厚度 δ (mm),切缝宽度 s (mm) 与激光器功率 P 的函数关系。

设切割参数 v , δ 和 s 与激光器功率 P 满足如下关系:

$$P = Av^{a_1}\delta^{a_2}s^{a_3} \quad (1)$$

式中, A 为与材料性质有关的系数, a_1, a_2, a_3 为回归系数。对(1)式两端取自然对数可得:

$$\ln P = \ln A + a_1 \ln v + a_2 \ln \delta + a_3 \ln s \quad (2)$$

运用试验获得的大量试验数据,根据(2)式进行线性回归分析,并求得具体方程如下:

$$P = 93.028 \times v^{0.560} \times \delta^{0.858} \times s^{0.940} \quad (3)$$

Table 1 Results of regression

square sum of deflection (q)	average standard deflection (s)	coefficient of complex relation (r)	coefficient of deflection relation			square sum of regression (u)
			$v(0)$	$v(1)$	$v(2)$	
0.0567	0.0753	0.9771	0.9985	0.9446	0.9681	1.1937

表 1 给出了衡量回归效果的相关指标, 其复相关系数为 0.9771, 可以看出, 回归效果很好。

2.1.2 模型误差及其验证 为检验上述模型的正确性, 笔者用另外两组试验数据对模型进行验证。表 2 给出了第 1 组试验数据的试验值、计算值及其误差值。图 2 给出了模型误差分布, 由图 2 可以看出有 80% 的点误差在 ±10% 以内; 表 3 给出了第 2 组试验数据验

Table 2 Analyzing of model errors

test No.	velocity of cutting v (mm/s)	depth of cutting δ (mm)	width of cutting d (mm)	power (W)		errors (%)
				value of tests	value of calculating	
1	10.0	0.51	1.09	200.0	204.8	2.42
2	10.0	0.85	1.15	300.0	336.6	12.20
3	10.0	1.01	1.20	400.0	404.4	1.10
4	15.0	0.74	1.37	500.0	442.4	- 11.53
5	12.0	1.01	1.47	500.0	543.4	8.68
6	15.0	0.95	1.52	600.0	600.9	0.16
7	13.0	1.09	1.60	600.0	652.8	8.80
8	13.0	0.96	1.52	600.0	561.6	- 6.41
9	8.0	0.90	1.06	300.0	286.9	- 4.38
10	8.0	1.23	1.31	500.0	459.0	- 8.20

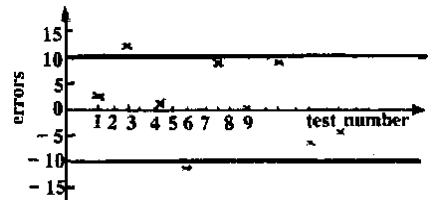


Fig. 2 Error analysis of selecting the laser power

证该模型的正确性, 第 2 组试验的试件均已切开, 理论计算值与试验结果相符。说明该模型能够满足实际生产的要求。另外, 从表 3 还可以看出: 部分所用试件比较薄, 试验时切割功率选择远大于实际需要的功率, 结果表中两个功率值的存在很大偏差。

2.2 切割速度的确定

2.2.1 基于切割速度的数学模型 在某些条件下, 激光器功率不能改变, 此时, 应根据工

件的厚度确定激光加工的合适切割速度。采用类似 2.1 节的回归分析法, 建立了如下函数关系, 即

$$v = AP^{a_1} \delta^{a_2} d^{a_3} \quad (4)$$

具体回归结果如(5)式所示:

$$v = 0.562 \times P^{0.874} \times \delta^{0.582} \times d^{0.289} \quad (5)$$

表 4 给出了衡量回归效果的相关指标, 其复相关系数为 0.9394, 可以看出, 回归效果很好。

Table 3 Verification of the second group of tests

test No.	velocity of cutting v (mm/s)	depth of cutting δ (mm)	width of cutting d (mm)	power (W)		results	
				value of tests	value of calculating	results of theory	results of tests
1	10.0	1.18	1.80	600.0	676.5	not cut	cut
2	8.0	1.18	1.19	500.0	404.7	cut	cut
3	8.0	1.22	1.28	500.0	446.0	cut	cut
4	4.0	1.18	1.18	500.0	272.3	cut	cut
5	8.0	0.44	0.50	400.0	76.8	cut	cut
6	10.0	0.76	0.86	400.0	231.7	cut	cut
7	4.0	1.18	1.20	300.0	276.6	cut	cut
8	6.0	0.46	0.50	300.0	67.9	cut	cut
9	8.0	0.76	0.80	300.0	191.0	cut	cut
10	4.0	0.74	0.75	200.0	119.2	cut	cut

Table 4 Results of regression

square sum. of deflection (<i>q</i>)	average standard deflection (<i>s</i>)	coefficient of complex relation (<i>r</i>)	coefficient of deflection relation			square sum of regression (<i>u</i>)
			<i>v</i> (0)	<i>v</i> (1)	<i>v</i> (2)	
0.0569	0.0754	0.9394	0.9998	0.9462	0.9222	0.4275

Table 5 Table of model errors analysis

test No.	power of laser (W)	depth of cutting δ (mm)	width of cutting <i>d</i> (mm)	velocity <i>v</i> (mm/s)		errors (%)
				value of tests	value of calculation	
1	200.0	0.51	1.09	10.0	10.8	7.58
2	300.0	0.85	1.15	10.0	8.9	- 10.93
3	400.0	1.01	1.20	10.0	9.	- 7.61
4	500.0	0.74	1.37	15.0	14.8	- 1.09
5	500.0	1.01	1.47	12.0	12.8	- 2.04
6	600.0	0.95	1.52	15.0	14.0	- 6.40
7	600.0	1.09	1.60	13.0	12.8	- 1.27
8	600.0	0.96	1.52	13.0	13.9	7.09
9	300.0	0.90	1.06	8.0	8.1	1.54
10	500.0	1.23	1.31	8.0	9.3	15.98

2.2.2 模型误差及其验证 表 5 给出了第 1 组试验数据的试验值、计算值及其误差值。图 3 给出了模型误差分布,由图可知有 80% 的点误差在 $\pm 10\%$ 以内;表 6 给出了第 2 组试验数据验证该模型的正确性,第 2 组试验的试件均已切开,理论计算值与试验结果相符。说明该模型能够满足实际生产的要求。

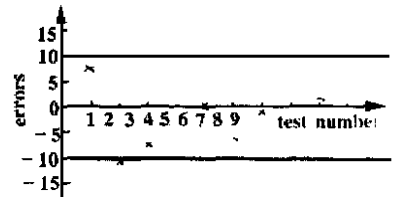


Fig. 3 Error analysis of selecting the laser power

Table 6 Verification of the second tests

test No.	power of laser (W)	depth of cutting δ (mm)	width of cutting <i>d</i> (mm)	velocity <i>v</i> (mm/s)		result	
				value of tests	value of calculation	value of tests	value of calculation
1	600.0	1.06	1.71	12.0	13.7	cut	cut
2	500.0	0.98	1.01	10.0	9.7	not cut	cut
3	500.0	1.18	1.20	6.0	9.1	cut	cut
4	500.0	0.66	0.77	10.0	11.7	cut	cut
5	400.0	1.27	1.30	8.0	7.9	not cut	cut
6	400.0	1.18	1.24	6.0	8.2	cut	cut
7	300.0	1.10	1.13	6.0	7.0	cut	cut
8	300.0	0.90	1.06	8.0	8.1	cut	cut
9	200.0	1.22	1.24	4.0	5.4	cut	cut
10	200.0	1.20	1.25	4.0	5.5	cut	cut

大通光孔径气动窗口光学特性研究

张耀宁 程祖海 李 锋 杜泽明

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

金元俊

(金策工业综合大学物理系, 朝鲜平壤)

摘要: 实验研究了引射式大通光孔径气动窗口光学特性。由哈特曼激光光束诊断仪采集的数据给出了激光束通过气动窗口后的 Strehl 比, 波像差, Zernike 多项式各系数。从这些光学特性参数可以分析引射气压、气动窗口结构对通光光束质量的影响。研究表明随引射气压增加使通光光束发散, 这和环形喷嘴喷出的气流形成的轴向气体密度分布的梯度变大有关。非均匀分布的抽口使波阵面偏斜, 这会使光束漂移。

关键词: 气动窗口 光束质量 波像差

Determination of optical characteristics of aerodynamic window with big exit aperture

Zhang Yaoning, Chen Zuhai, Li Feng, Du Zeming

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Kim Wenjun

(Department of Physics, Kim Cheak Technical University,
Pyongyang, The Democratic People's Republic of Korea)

3 结 论

在分析了激光切割石英玻璃的可行性基础上, 建立了确定石英晶体激光切割参数的数学模型, 通过大量的试验, 验证了模型的正确性。实践表明: 在不同生产条件下切割石英晶体, 运用所建立的模型可以比较理想地选择激光器功率和切割速度。

参 考 文 献

- 1 王昆林. 激光杂志, 1996; 17(3): 105~ 109
- 2 Belic I. Opt & Laser Technology, 1989; 21(4): 277~ 278
- 3 Belic I, Stanic J. Opt & Laser Technology, 1987; 19(6): 309~ 311
- 4 Vologdina S G, Ganyuchenko V M, Kalinin N A. Glass and Ceramics, 1992; 48(9/10): 434~ 435

* * *

作者简介: 周 岩, 女, 1968 年 10 月出生。博士生。现从事非金属材料激光切割、化学蚀刻加工等方面的研究工作。