

调Q激光烧蚀具有升华特性物质的模型及应用*

刘劲松 李孟秋

(湖南大学激光研究所,长沙 410082)

摘要 建立了调Q激光烧蚀具有升华特性物质的数学模型,据此模型计算了不同脉宽与峰值功率的调Q激光烧蚀氮化硅的去除效率,结果表明,更高的峰值功率与更短的脉宽有利于减小激光烧蚀的热影响区及保持烧蚀表面的质量完整。计算结果与试验结果趋向一致。

关键词: 激光烧蚀;数学模型;去除效率;热影响区

1 引言

激光烧蚀的应用日益广泛^[1],为了控制和调整激光烧蚀后的表面粗糙度,提高烧蚀效率,减小热影响区,抑制热裂纹,了解单个激光脉冲烧蚀材料的情况是十分必要的。尤其是声光调Q的脉冲激光,因其占空比小,前后脉冲间工件有充分的时间冷却,每个脉冲可视为单独作用,而不受前面脉冲在工件上所产生的热积累的影响^[2],因而大大简化了过程的传热、传质分析。

激光烧蚀凹坑的过程与激光打孔有类似之处。1972年U. C. PEAK等把激光作为移动热源建立了激光打孔形状的模型^[3]。该模型把材料的热物理性能作为独立于温度的常数,以材料汽化温度的等温线作为加工孔的形状,使据此模型得到的孔径和孔深均比实际偏大。渡部武弘通过能量平衡法建立有限差分方程,求解出普通脉冲YAG激光作用下的温度场和加工形状^[4],该模型忽略了对流传热的影响。

本文以具有“升华”分解特性的氮化硅材料为例,研究了声-光调Q的YAG激光烧蚀的情况。由于具有“升华”特性,材料一经达到“升华”温度即不经液态直接变为气态物质,从而避开了对流传热的影响,简化了问题。

2 凹坑形貌的数值求解

2.1 数学模型

氮化硅具有“升华”分解特性,它在1880℃时直接由固态分解为气态物质氮和硅。所述问

* 国家教委博士点基金资助项目

收稿日期:1995年2月27日

题的物理过程为:脉宽为几百纳秒的声光调 Q 的 YAG 激光脉冲作用于氮化硅表面,部分能量被光致等离子体吸收及氮化硅表面反射,剩余能量被氮化硅吸收,当氮化硅吸收一定热量并达到“升华”分解温度后分解为气态物质而被去除,形成烧蚀凹坑,吸收热量期间氮化硅温度不变。等离子体吸收的能量比例取决于激光功率密度。氮化硅视为半无限体。忽略表面辐射热损失和因保护气体导致的对流热损失;热传导率和热扩散率及比热均随温度而变化⁽⁵⁾,相对于调 Q 激光的脉宽,氮化硅吸收激光后的能量弛豫时间忽略不计⁽⁶⁾。

采用 $r-\theta-z$ 圆柱极坐标。因为激光沿周向(θ 方向)近似对称,则激光作用于材料的温度场和凹坑也应沿周向近似对称,因而三维问题转化为二维问题。这样,其数学模型可表述为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (r \neq 0, z > S(t))$$

$$2 \frac{\partial}{\partial r} (\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (r = 0, z > S(t))$$

$$A \cdot q(t) = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \rho L_s \frac{dS}{dt}$$

式中: T 为氮化硅温度, λ 为氮化硅的传热系数, c 为比热, ρ 为密度, $q(t)$ 为激光功率密度, A 为高温等离子体对激光的吸收率, L_s 为氮化硅的“升华”分解热, $S(t)$ 为“升华”界面。

采用显式差分法对上述模型进行数值求解。将被烧蚀氮化硅划分为半径为 Δr , 厚度为 Δz 为微小圆环单元。时间步长设为 Δt 。当某单元达到“升华”分解温度并吸收一定分解热后即被去除。在迭代过程中,每当节点温度超过“升华”温度 1880°C 时温度就被改变到 1880°C , 直至超过的总量相当于分解热时该节点即被去除。对于内部非中心节点,其温度的差分式为

$$T_{m,n}^{p+1} = (1 - 2Fr - 2Fz)T_{m,n}^p + Fr(1 + 1/2m)T_{m+1,n}^p + Fr(1 - 1/2m)T_{m-1,n}^p + Fz(T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p)$$

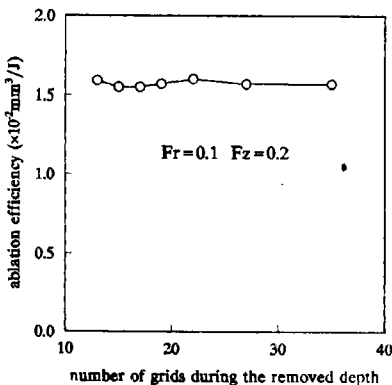
式中 $T_{m,n}^p$ 表示节点 (m, n) 处在 t 时刻的温度,且

$$r = m \cdot \Delta r, z = n \Delta z, t = p \Delta t$$

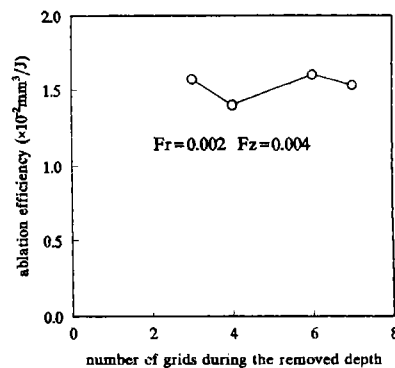
$$Fr = \alpha \Delta t / (\Delta r)^2, Fz = \alpha \Delta t / (\Delta z)^2$$

为使迭代稳定,应使

$$0 < Fr < 0.25 \text{ 且 } 0 < Fz < 0.25$$



(a)



(b)

图 1 不同网格密度下计算出的烧蚀效率

Fig. 1 Calculated ablation efficiency for different sizes of grid spacing

增大网格密度,减小时间步长可减小截断误差的影响,提高计算精度,且 Fr 、 Fz 不能太

小,否则计算结果不能反映热传导的影响。图 1(a)是假定均匀分布的激光烧蚀氮化硅且取 $Fr = 0.1, Fz = 0.2$ 不变时不同网格密度下计算出的凹坑形貌,图 1(b)是取 $Fr = 0.002, Fz = 0.004$ 时不同网格密度下计算出的凹坑形貌。

由图可见,当 Fr 及 Fz 较大且网格较细时计算结果稳定,最大相对差值在 4% 以内。误差主要来源于去除深度的计算。因此在以下计算中取 $Fr = 0.1, Fz = 0.2$,并保证去除深度内至少包含 20 个节点,且每次迭代的节点温度上升不超过 500°C 。

3 模型应用讨论

调 Q 激光烧蚀材料时能量利用率较低。其能量损失主要包括三部分,即材料对激光的反射,激光能量传入材料基体及光致等离子体对激光的吸收,如果忽略所有能量损失,激光能量全部用于去除材料,这时单位能量的激光所去除的材料体积即为最大去除效率。对氮化硅而言,激光的最大去除效率为 $1.607 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{J}$ 。本文应用上述模型研究脉冲峰值功率和脉宽与烧蚀热影响区的关系,因此在以下计算中忽略材料对激光的反射和光致等离子体对激光的吸收,而仅考虑激光能量传入材料基体引起的能量损失。

假定激光峰值功率不随时间变化,为一矩形脉冲,图 2(a)是脉宽取 500 ns 不变,(相当于 10 kHz 的调 Q 激光),用不同峰值功率的调 Q 脉冲烧蚀时的去除效率。图 2(b)是在较高的峰值功率(40000 W)下,不同脉宽的调 Q 激光烧蚀的去除效率。由于部分能量因热传导而导入材料基体,因此与氮化硅的最大去除效率相比,图中的去除效率要小于最大去除效率,根据二者的相对差值可以计算出导入基体的能量占激光总能量的百分比以及导入基体的激光能量的绝对数。计算出的数据均标注于图中。

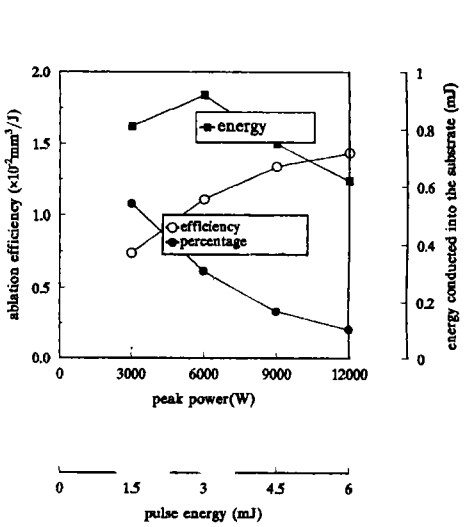


Fig. 2(a) Ablation efficiency vs peak power for the pulse width of 500 ns

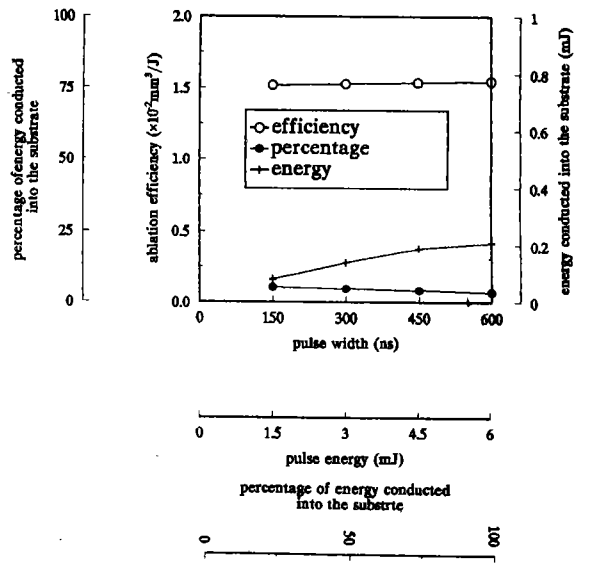
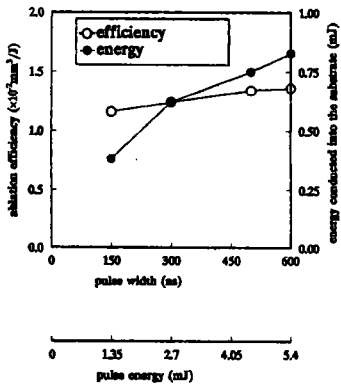


Fig. 2(b) Ablation efficiency vs pulse width for the peak power of 40000 W

由图 2(a)可见,随脉冲峰值功率的增大,去除效率迅速增大,导入基体的能量百分比迅速减小,而导入基体的能量绝对数在 6000 W 峰值功率处达到最大,此后虽然峰值功率与脉冲能



(c) Ablation efficiency vs pulse width
for the peak power of 9000 W

图 2 不同峰值功率与脉宽时的烧蚀效率

Fig. 2 Ablation efficiency for different peak
powers and pulse widths

量上升,但导入基体的能量绝对数反而下降;图 2(b)表明,在 40000 W 的高峰值功率下,脉宽对去除效率的影响很小,脉宽增大,去除效率稍有上升,导入基体的能量百分比稍有下降,但导入基体的能量绝对数有所上升;图 2(c)表明,在 9000 W 的较低峰值功率下,脉宽对去除的影响比较高峰值时的影响要大,随脉宽增大,导入基体的能量绝对数上升更快。

上述分析表明,在相同脉宽甚至脉宽稍长的情况下,更高峰值功率的激光烧蚀往往可以获得更小的热影响区;脉宽越短,热影响区越小,这在低峰值功率下更为明显。对于实际应用的调 Q 激光,其 1、3、10 kHz 时脉宽和峰值功率的数值如表 1 所示。在考虑热传导因素条件下的去除效率如图 3 所示,单脉冲能量及导入基体的能量也标注于图上。由图可见,虽然 1 kHz 的激光其单脉冲能量最大,但导入基体的能量最小,因而热影响区也应最小,而脉宽达 500 ns 的 10 kHz 激光虽然单脉冲能量最小,但导入基体的能量最多,超过 50% 的能量被传入基体,因而其热影响区也必然最大。大量实验^{[7][8]}表明,采用脉冲频率高(10 kHz)的调 Q 激光加工陶瓷时重凝层急剧变厚,且往往有热裂纹产生,证明了上述分析的正确性。

Table 1 Pulse parameters of different pulse frequencies

pulse frequency	1 kHz	3 kHz	10 kHz
pulse width	150 ns	250 ns	500 ns
peak power	40000 w	13000 w	3000 w

应用本模型还可预测激光烧蚀的实际凹坑形貌,从而研究激光烧蚀的表面粗糙度,这在激光辊轧毛化,三维烧蚀成形等实际应用中都是非常重要的。

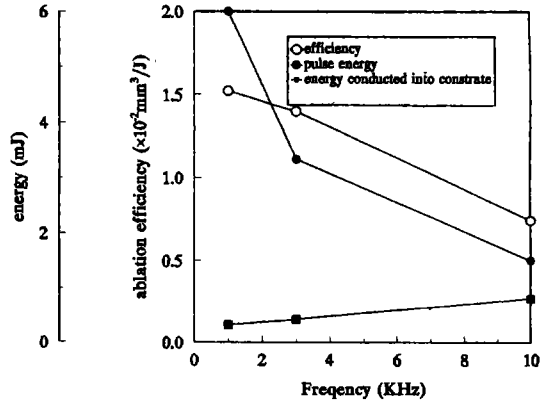


图 3 不同脉冲频率时的烧蚀效率

Fig. 3 Ablation efficiency vx pulse frequency

参 考 文 献

- [1]中国光学学会激光加工专业委员会,1995年全国激光加工产业应用研讨会论文集.上海,1995
- [2]刘劲松,谭怀亮,三维激光烧蚀加工的试验研究.光学精密工程,1995,3(3):33-37
- [3]Peak U C, Gagliano F P, Theamal Analysis of Laser Drilling Process. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, QE-8(2):112-119
- [4]渡部武弘,レーザ加工におきる熔融・除去のメカニズムと加工形状に关よる基础研究.千叶大学工学部精密加工学讲座,1991
- [5]森田升,渡部武弘,吉田嘉太郎,共有结合性セラミックスのレーザ加工に关よる研究(第2报).精密工学会志.1992,58(1):99~104
- [6]李力钧.现代激光加工及其装备.北京:北京理工大学出版社,1993
- [7]坂本治久,森田升,渡部武弘,吉田嘉太郎,YAGレーザによるセラミックスの三次元加工に关する研究.1989年度精密工学会春季大会学术讲演会讲演论文集,1989:1053-1054
- [8]张珊,康少英,激光加工结构陶瓷的实验研究.中国激光,1995,22(10):797-800

A Model and its Application of Q-switched Laser Ablating Sublimable Materials

Liu Jinsong, Li Menqiu

(Laser Institute, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract

A mathematical model of Q-switched laser ablating sublimable material is established. Ablation efficiency with different pulse widths and peak powers laser is calculated. The conclusions show that high peak power and short pulse width is beneficial for reducing heat affected zone of laser ablation and maintainging high surface integrity.

Key words: Laser ablation, Mathematical model, Ablation efficiency, Heat affected zone

刘劲松 男,1970年生,博士研究生.1991年毕业于大连理工大学,1994年获湖南大学工学硕士学位,参加过多项国家、省部科研课题工作,发表论文近十篇,主要从事激光加工的研究工作。