飞秒激光微加工中热熔化与热传递现象研究*

苗恩铭 陈甦欣 牛鹏程 颜 焱 费业泰

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

【摘要】 对飞秒激光能量密度为 0.108~28.68 J/cm² 范围内加工的硅孔表面形貌尺寸进行分析,同时对热传 递现象进行研究。理论分析了飞秒激光加工区域热传导时间及温度分布,并将其与实验测量值进行对比,验证了 热影响的存在。通过理论与实验分析说明了在高能量飞秒激光加工中热传递现象不可避免,并获得了较好的孔加 工质量的激光能量合理参数。

关键词:飞秒激光 熔化 热传递 激光能量密度
中图分类号:TN24;TG665 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2011)04-0224-05

Thermal Diffusion and Thermal Melting in Femtosecond Laser Micromachining

Miao Enming¹ Chen Suxin² Niu Pengcheng¹ Yan Yan¹ Fei Yetai¹

(1. School of Instrument and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

Diameters of morphology zones of crater processed by femtosecond laser were measured in the range of laser fluence from 0. 108 J/cm^2 to 28. 68 J/cm^2 . Thermal melting on the surface of a hole and the heat conduction rule were studied. The melting zones were calculated according to the traditional thermal conduction formula. The calculated results matched with the experiment results very well. It suggested that the thermal diffusion in super power femtosecond laser micromachining was inevitable. Besides, reasonable parameters were acquired for the better quality of the micro-holes.

Key words Femtosecond laser, Melting, Heat conduction, Laser fluence

引言

随着现代工业和科技发展,飞秒激光在微电子 机械系统制造、医疗、微电子等领域的应用越来越深 入和广泛^[1-7]。由于飞秒激光加工的材料受热影响 极为有限,特别是相对于长脉冲激光而言,因此通常 认为飞秒激光加工过程中材料受热的影响可以忽 略^[7-9],使得过去关于飞秒激光微加工材料表面热 熔化现象报道和研究较少,作者在文献[9]中曾对 10个脉冲飞秒激光的孔加工最佳激光能量选择给 予了归纳及总结。在此基础上,本文以硅材料为研 究对象,使用商业用飞秒激光,对材料进行孔加工, 通过分析孔的形貌区域分布状态,探讨高能量飞秒 激光加工中热传递规律,得到不同脉冲飞秒激光的 最佳激光能量范围,以提高孔的加工质量。

1 实验装置

采用1 kHz 的商业放大 Ti: Sapphire 激光系统 作为实验装置,图1 是实验装置图。激光发射线性 偏振 130 fs 脉冲,波长 800 nm。由计算机控制机械 开关来选择脉冲激光频率,包括从单脉冲到1 kHz频 率激光。样品硅被放在分辨率为10 nm 的三维工作 台上。高斯激光通过安装在分辨率为0.1 μm的Z 轴 上的透镜照射样品。机器加工过程由 CCD 摄像机 全程监控,以便控制加工质量、加工过程分析和减少 失误。由超快脉冲激光加工的硅坑表面形貌通过电

收稿日期:2010-04-20 修回日期:2010-06-03

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50475069)、国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX04014-23)和西安交通大学机械制造系统工程国家 重点实验室开放基金资助项目(2010006)

作者简介: 苗恩铭, 副教授, 主要从事精密机械工程及热误差理论研究, E-mail: miaoem@163. com





2 飞秒激光加工的材料温度传导理论

激光照射材料表面时,激光能量沉积在材料内, 能量在材料内部进行传播的物理机理非常复杂,目 前使用最广的是由 Anisimov 提出的一维双温扩散 模型^[10-11]。根据该模型,热量在材料内部传播途径 主要有电子热传导和晶格热传导。被沉积的光能首 先以飞秒时间量级传递给电子,迅速形成电子热平 衡,同时又通过电子与晶格之间的能量耦合缓慢向 晶格传输。当激光加热脉宽与电子-晶格驰豫时间 相当或较短时,电子和晶格之间产生温度差,高温的 电子直接令原子结合键断裂,从而使材料汽化飞出。 故理论上来说使用飞秒激光加工不存在热传导现 象。

一维双温扩散模型为[10~11]

$$\begin{cases} C_{e} \frac{\partial T_{e}}{\partial t} = k_{e} \frac{\partial^{2} T_{e}}{\partial Z^{2}} - \gamma (T_{e} - T_{l}) + I(t) A\alpha \exp(-\alpha Z) \\ C_{l} \frac{\partial T_{l}}{\partial t} = k_{l} \frac{\partial^{2} T_{l}}{\partial Z^{2}} - \gamma (T_{e} - T_{l}) \end{cases}$$

(1)

式中 T_e、T_l ——材料电子、晶格温度

A——材料表面透射率

α——材料吸收系数

k_e、k_l——材料电子、晶格热传导率

γ-----晶格耦合系数 Z----材料深度

I(*t*)——激光强度 *t*——时间

 C_e 、 C_l ——材料电子、晶格比热容

对上述理论公式作进一步考虑,虽然光子能量 首先传导给电子,但并非都能使所有接触到的电子 温度高到令原子键全部断裂的地步,宏观上表现为 每激光脉冲只能汽化一定厚度的材料对象,且加工 厚度随加工深度、加工进给速率(如加工槽)和环境 等多种因素的变化而变化,这使得一些被加热的电 子有时间将热量传递给晶格。根据实验发现,激光 能量密度较低时,电子传递给晶格能量较低,不足以 产生令晶体液化的温度,故使得加工材料没有产生 热影响。当激光能量足够强,被加热的没有汽化的 电子数迅速增加,此时传递给晶格的能量可以达到 令材料溶化的程度,甚至对加工区域的周边产生不 可忽略的热影响。

3 实验研究和理论分析

实验中飞秒激光频率分别选择 2 Hz、10 Hz 和 1000 Hz,激光能量范围的洗择根据激光频率的不 同而变化。对于频率为2Hz的飞秒激光能量范围 选择从 0.255 J/cm²到 26.81 J/cm²; 对频率为 10 Hz 的激光能量范围选择从 0.17 J/cm²到 28.68 J/cm²; 对于频率为1000 Hz 的激光能量范围选择从 0.108 J/cm²到 20 J/cm²。硅的汽化点是 3 173 K,也 就是在飞秒激光照射下温度达到 3 173 K 以上时硅 将被汽化,汽化区域称之为消融区。使用高斯能量 分布规律的飞秒激光照射硅表面时,加工面上温度 分布规律与激光能量分布规律相对应,如图2所示。 图上方是飞秒激光高斯能量分布图,图下方是硅样 品表面加工区域。区域1是温度超过3173K的部 分,即消融区,这是飞秒激光实际消除材料的部位。 区域2是材料熔化区域,其边界温度为1683 K(硅 的熔点),r是区域2的边界半径。区域3是温度由 熔点降到 293 K 的区域。根据图 2 温度分布状况, 通过热传递达到热平衡是不可避免的,热平衡过程 中热熔化区域的扩大是必然的。图 2 中, 虚线区域 是包括热传递影响在内的多种因素引起的实际熔化 区域。



图 2 飞秒激光加工硅孔的温度分布示意图 Fig. 2 Scheme of temperature distribution of silicon hole processed by femtosecond laser

如图 2 所示,图上方横坐标是激光加工区域尺 寸,纵坐标是温度。在区间(-*c*,*c*)中,温度高于 3 173 K,硅材料直接汽化。汽化后的区域温度降到 3 173 K,因此区域 1 汽化后的温度为 3 173 K。在区 域(-∞, -*b*] \cup [*b*,∞),温度与环境温度 293 K 相 等。在区间(-*b*, -*c*] \cup [*c*,*b*),温度分布规律与高 斯能量分布规律线性一致。在计算由热传递引起的 熔化区域范围前必须确定出参数 b 和 c 的值。

在 c 点激光能量为

$$E(c) = E_0 \exp(-2c^2/\omega^2)$$
 (2)

式中 E₀——激光最高点能量

ω---激光光速半径

因此在 x 点能量为

$$E(x) = E_0 \exp(-2x^2/\omega^2) \quad (b \ge |x| \ge c) \quad (3)$$
考虑的 *c* 点温度为 3 173 K,因此在 *x* 点温度为

$$F(x,0) = 3 \ 173 \ \frac{E(x)}{E(c)} =$$

$$3 \ 173 \ \frac{E_0 \exp(-2x^2/\omega^2)}{E_0 \exp(-2c^2/\omega^2)} =$$

$$3 \ 173 \exp\left(-\frac{2}{\omega^2}(x^2 - c^2)\right) \tag{4}$$

式中 x——激光光斑半径

同理,在 b 点温度等于环境温度, b 值和 c 值相 互关系为

$$F(b,0) = 3\ 173\exp\left(-\frac{2}{\omega^2}(b^2 - c^2)\right) = 293 \qquad (5)$$

得

 $b = \sqrt{c^2 - 1.19\omega^2}$ (6)

式(6)中 *c* 值可以由实验确定。当 *t* > 0 时,任意 *x* 点的位置,在 *t* 时刻的实际温度 *F*(*x*, *t*)可由经典热 扩散公式计算,即

$$F(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi at}} \left[\int_{-\infty}^{-b} 293 \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{-b}^{\infty} 293 \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{-b}^{-c} F(x',0) \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{-c}^{b} F(x',0) \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{-c}^{c} 3\,173 \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' \right]$$
(7)

式中 a——材料热扩散率

3.1 加工孔消融区域微弱显现时熔化区域计算

在最高激光能量密度仅略高于硅的消融阈值 时,加工面上消融孔非常微弱,实际很难被观察到, 即可认为c=0。当 $\omega=4 \mu m, c=0$,且不考虑热传递 现象时,硅的熔化区域尺寸r可由式(4)计算得r=2.2523 μm 。考虑到热传递现象时,由式(7)计算得 $r=2.84 \mu m$ 。

也就是说,实际加工后的孔热熔化区域半径计 算值 r 为 2.84 µm。应用式(7)在上述参数条件下 计算得到的 r = 2.84 µm 位置在激光加工后温度随 时间变化规律图如图 3 所示。在 0.05 µs 时,半径 r = 2.84 µm 圆环温度达到最大值,略超过硅的熔点







图 4 是实际加工孔的扫描电子显微镜图片。在 此实验中,飞秒激光能量密度为 0.51 J/cm²,激光脉 冲数为 2。测量图 4 硅孔的熔化区域直径,水平方向为 4.986 8 µm,竖直方向为 6.465 8 µm,其平均直径为 5.726 3 µm,半径为 2.863 2 µm,这和由式(7)计算 的考虑热传递现象的半径 r = 2.84 µm 非常接近。



图 4 飞秒激光能量密度 0.51 J/cm²,脉冲数 N = 2 的硅孔表面 SEM 图

Fig. 4 SEM image of surface of silicon wafer with femtosecond laser fulence of 0.51 J/cm², the number of pulses N = 2

3.2 加工孔消融区域明显时熔化区域计算

当飞秒激光能量密度远远超过消融阈值时,加 工孔中心的消融区域显现明显,此时加工孔温度分 布规律如图 2 所示。随着激光能量密度的增加, *c*值增加,本文认为由于热传递现象的存在导致了 熔化区域范围扩大。例如,当激光能量密度为 2.2 J/cm²,脉冲数 N = 1 000 时加工孔如图 5 所示。 测量孔的汽化区域,直径水平方向为 6.087 5 μm,竖 直方向为 8.017 7 μm,平均直径为 7.052 6 μm,平均 半径为 3.526 3 μm。熔化区域半径为 5.6 μm。

当 $c = 3.5263 \mu m$ 、 $\omega = 4 \mu m$,且不考虑热传递现象时,熔化区域半径 r 由式(4)计算得 $r = 4.1842 \mu m$ 。

考虑热传递时,熔化区域半径可由式(7)计算。 此时需考虑不同区间的温度分布状态。根据前述内 容将区间分为($-\infty$,-b] \cup [b, ∞)、(-b,-c] \cup [c,b)和(-c,c),则





Fig. 5 SEM image of surface of silicon wafer with laser fulence of 2. 2 J/cm², the number of pulses N = 1000

$$F(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi at}} \left[\int_{-\infty}^{-b} 300 \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{b}^{\infty} 300 \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{-b}^{-c} F(x',0) \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{c}^{b} F(x',0) \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' + \int_{c}^{c} 3173 \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx' \right]$$

计算知, r = 5.4 μm 是熔化区域的最大半径。 r = 5.4 μm 位置在激光加工后温度随时间变化规律 如图6所示。在0.12 μs 时,半径 r = 5.4 μm 圆环温 度达到最大值,略超过硅的熔点温度1700 K,该值 与实际测量熔化区域半径值5.6 μm 更为接近。

4 不同激光脉冲的熔化区域

飞秒激光加工的熔化区域范围随激光脉冲数和 单脉冲激光能量变化。在实验中,由于材料汽化和 反射部分激光能量散失,所以未汽化的材料表面温 度应该是在汽化点温度以下。图7显示的是脉冲数





分别为2、10、1000的孔的尺寸。菱形点为不考虑 热传递因素,按照高斯能量分布规律计算的熔化区 域尺寸。星号点为根据热传递公式计算的材料熔化 区尺寸。圆点为实验中实际测量值。

将上述不同计算方法得出的熔化区域尺寸结果 与实际测量结果进行比较,可以清楚地看到熔化区 域变化规律。如图7所示,实验中测量的加工孔熔 化区域尺寸比不考虑热传递现象计算的熔化区域对 应值大很多,而和考虑热传递现象的计算值更加接 近。随着激光脉冲数的增加,按照热传递公式计算 的加工孔熔化区域尺寸逐渐超过实际测量值,这主 要是实际加工中存在热传递损耗现象,如孔与空气 的热对流、热辐射等。当激光脉冲数相对较小时,如 N = 2或N = 10时,由于脉冲之间时差为1ms,所 以激光加工时间间隔总共仅2ms和10ms,热传递 损耗不明显。当N = 1000时,加工过程持续1s时 间,此时热传递损耗变得较为明显,影响了热量在材 料内部的传递。而本文所采用的热传递计算方法中 忽略了热损耗的影响,所以出现了当 N = 1 000 时计 算的熔化区域尺寸略大于实际测量尺寸。图7中熔 化区域在一定激光能量范围内变化趋于稳定,且激 光能量范围随脉冲数不同而不同。对于 N=2, 激光 能量密度小于5J/cm²时,熔化区域快速增加,大于 5 J/cm^2 时,增速放缓;对于 N = 10,激光能量密度大 于 3 J/cm^2 时, 增速放缓; 对于 N = 1000, 激光能量密



Fig. 7 Fitting curves of melting holes processed by multiple-pulses lasers

(a) N = 2 (b) N = 10 (c) N = 1000

度大于1 J/cm²时,增速放缓。

5 结论

(1)从本文理论和实验研究中可知,飞秒激光加工的材料不受热影响是相对的,其热影响程度随 飞秒激光加工参数的选择和材料物理属性的不同而 变化。实验中发现激光能量密度越高、材料晶格热 容量越小的材料越易产生熔化现象。

(2)飞秒激光微加工中,会出现被加工材料表面热熔化现象。原因在于高能量密度激光将能量传递给电子时,电子需要更多的时间达到电子系统热平衡,这给热量由电子系统传递给晶格系统提供了可能。本文以热传递计算公式计算的熔化区域尺寸与实验实测熔化区域尺寸对比,验证了飞秒激光加

工中存在熔化区域的可能性。通过实验可以看出, 飞秒激光能量在被加工材料内部传递时,由于热损 失的存在,使得加工孔热表面熔化尺寸在一定范围 内趋于稳定(即热熔化尺寸扩大缓慢)。

(3)对于不同脉冲数的飞秒激光能量密度值, 存在关键值,可较大影响熔化区域尺寸变化速率。 如果激光能量密度低于此值,熔化区域随激光能量 密度的增加迅速扩大,若高于此值,则熔化区域增加 缓慢。另外,随着激光脉冲数的增加,达到相同熔化 区域尺寸所需激光能量密度值较低,这主要是每个 激光脉冲都会有一定的能量沉积在加工材料中,这 是飞秒激光加工的"孵蛋现象",从而使多脉冲激光 能量需要较低的单脉冲能量密度才可达到较好的加 工效果。

参考文献

- 1 Bonse J, Wrobel J M, Krüger J, et al. Ultrashort-pulse laser ablation of indium phosphide in air [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2001, 72(1):89~94.
- 2 Fauchet P M, Campbell I H, Adar F. Long range material relaxation after localized laser damage [J]. Applied Physical Letters, 1985, 47(5): 479 ~ 481.
- 3 Rudolph P, Bonse J, Kruger J, et al. Femtosecond- and nanosecond-pulse laser ablation of bariumalumoborosilicate glass [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1999,69(9): S763 ~ S766.
- 4 Armengol J, Vega F, Chaoui N, et al. Recalescence after bulk solidification in germanium films melted by ns laser pulses [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(3):1505 ~1510.
- 5 Bogaart E W, Haverkort J E M, Mano T, et al. Role of the continuum background for carrier relaxation in InAs quantum dots [J]. Physical Review B, 2005, 72(19): 195 301 ~ 195 308.
- 6 Borowiec A, Mackenzie M, Weatherly G C, et al. Femtosecond laser pulse ablation of GaAs and InP studies utilizing scanning and transmission electron microscopy [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2003, 77(2):411 ~ 417.
- 7 Jeschke H O, Garcia M E, Lenzner M, et al. Laser ablation thresholds of silicon for different pulse durations theory and experiment[J]. Applied Surface Science, 2002, 197 ~ 198: 839 ~ 844.
- 8 Semak V V, Thomas J G, Campbell B R. Drilling of steel and HgCdTe with the femtosecond pluses produced by a commercial laser system [J]. Journal of Physical D: Applied Physics, 2004,37(20): 2925 ~ 2931.
- 9 苗恩铭. 10 个脉冲飞秒激光作用下硅的热影响分析[J]. 中国机械工程,2009,20(15):1869~1872. Miao Enming. Analysis of thermal influence of Si processed with femtosecond laser[J]. China Mechanical Engineering, 2009,20(15):1869~1872. (in Chinese)
- 10 Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perelman T L, et al. Electronemission from metal surfaces exposed to ultra short laser pulses [J]. Soviet Physics-JETP, 1974,39: 375 ~ 378.
- 11 Brorson S D, Fujimoto J G, Ippen E P. Femtosecond electronic heat-transport dynamics in thin gold films [J]. Physical Review Letters, 1987,59(17): 1962 ~ 1965.

(上接第 219 页)

- 8 Laperriere L, Lafond P. Modeling tolerances and dispersions of mechanical assemblies using virtual joints [C] // Proceedings of 25th ASME Design Automation Conference, 1999.
- 9 Laperriere L, Ghie W, Desrochers A. Statistical and deterministic tolerance analysis and synthesis using a unified Jacobiantorsor model[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 417 ~ 420.
- 10 Desrochers A, Ghie W, Laperrière L. Application of a unified Jacobian-torsor model for tolerance analysis [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3(1): 2~14.

11 胡江敏.基于数字样机的产品装配公差分析技术研究[D].上海:同济大学,2007.
 Hu Jiangmin. Research on digital mockup based product assembly tolerance analysis [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

12 Destrocher A, Reviere A. A matrix approach to the representation of tolerance zones and clearances [J]. The International Journal Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(9): 630 ~ 636.