

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0432-03

# 激光湿式清洗印刷电路板推力的数值模拟

陈 浩, 朱海红, 程祖海

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 用 Ansys/Ls-Dyna 有限元分析软件对激光湿式清洗印刷电路板(PCB)的爆炸过程进行了模拟, 计算了爆炸的压强, 并与理论估算的粒子吸附压强进行了比较。在选取的条件(脉冲能量密度  $1 \text{ J/cm}^2$ )下, 模拟的爆炸对微粒的压强大于微米及亚微米微粒的吸附压强并小于印刷电路板的破坏阈值, 可见爆炸可以有效地去除微米甚至亚微米级的粒子, 而不会破坏印刷电路板, 证明激光湿式清洗印刷电路板是可行的。此外, 从爆炸发展的时间过程可以得出激光脉冲宽度要小于  $100 \text{ ns}$ 。

**关键词** 激光技术; 激光湿式清洗; 数值模拟; 有限元分析; Ansys/Ls-Dyna

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## Numerical Simulation of Propulsive Force in Steam Laser Cleaning of Printed Circuit Board

CHEN Hao, ZHU Hai-hong, CHENG Zhu-hai

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** The explosion process of steam laser cleaning of printed circuit board (PCB) is simulated by using Ansys/Ls-Dyna finite element analysis software (FEA). Comparison with the theoretical adhere pressure of the particles and the propulsive pressure calculation are also carried out. The result shows that under the chosen conditions (energy density  $1 \text{ J/cm}^2$ ) the propulsive pressure on the particles which is in micron size or submicron size is larger than their adhere pressure but less than the destroy pressure of the PCB, so the micron or submicron particles are removed effectively without damaging the PCB. This proves that the steam laser cleaning can be used to clean PCB. From the simulation result, it is found that for laser cleaning of PCB, the laser pulse duration should be no more than  $100 \text{ ns}$ .

**Key words** laser technique; steam laser cleaning; numerical simulation; finite element analysis; Ansys/Ls-Dyna

### 1 引 言

在印刷电路板(PCB)的生产过程中, 清洗是不可省略的重要环节。传统的清洗方法如超声、强声等对微米、亚微米级的粒子不起作用, 而这些粒子正是现时电子产品失效的主要原因之一。激光清洗以其高效无污染的特点, 能够清洗亚微米级的粒子, 被认为是最有潜力的传统印刷电路板清洗方法的取代。激光清洗分为干法和湿法, 区别就是在清洗表面上是否预先覆盖一层液体, 本文中的湿法是在印刷电路板表面形成约  $10 \mu\text{m}$  的水膜, 用脉冲激光照射使水快速升温、剧烈气化产生爆炸, 通过爆炸产生的推力将粒子去除。本文采用 Ansys/Ls-Dyna 有限元分析软件对激光湿式清洗印刷电路板的爆炸过程进行了模拟, 计算了爆炸对粒子的压强, 并与理论估算的微米级粒子

的吸附压强进行比较, 旨在得出激光湿式清洗微米级粒子的可能性和条件。

### 2 理论计算

微米级的粒子与印刷电路板基板的作用力主要是范德瓦耳斯力和毛细力, 在激光清洗的条件下, 由于水瞬时加热到高温 ( $300 \text{ }^\circ\text{C}$  左右), 可以忽略毛细力<sup>[1]</sup>。

微粒的接触如图 1 所示, 范德瓦耳斯力可以用(1)式计算<sup>[2]</sup>:

$$F = \frac{hr}{8\pi z^2} + \frac{h\delta^2}{8\pi z^3}, \quad (1)$$

其中  $h$  为 Hamaker 常数,  $r$  为微粒半径,  $z$  为原子间距。  $h$  的值一般从  $0.6 \text{ eV}$  (聚合物与聚合物)到

**作者简介:** 陈 浩(1982—), 男, 湖北武汉人, 华中科技大学激光技术国家重点实验室硕士研究生, 主要从事激光科学与技术方面的研究。E-mail: gdzgcxch@163.com

9.0 eV(金与金),  $z$  的典型值为 0.4~1.0 nm。在这里,印刷电路板的树脂材料的  $h$  取 0.6 eV,铜的  $h$  取 2.5 eV,铜与树脂之间的  $h$  值为  $(0.6 \times 2.5)^{1/2} = 1.22$  eV,  $z$  取典型值 0.4 nm<sup>[3]</sup>。

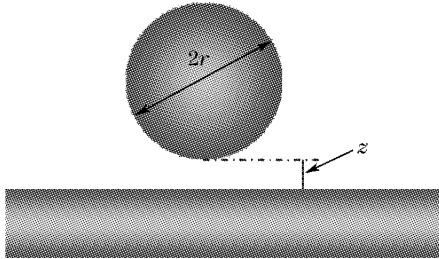


图1 物体表面微粒的示意图

Fig.1 Schematic diagram of a micro particle near a surface

在(1)式中,假设微粒为球形,第一项为规则的球形微粒与基板的作用力,第二项为球由于变形与基板接触的面积力,  $\delta$  为变形量,与微粒的尺寸、作用力大小和硬度有关,  $r$  为微米级时,  $\delta/r = 0.05$ ,  $r$  为 0.1 微米级时,  $\delta/r = 0.1$ <sup>[4]</sup>。

按照(1)式计算的不同材料和不同大小的微粒与基板的作用力如表 1 所示。

表 1 不同材料不同尺寸微粒的吸附力

Table 1 Adhere force of different materials with different sizes

Material	$h / \text{eV}$	Adhere force $F / \text{N}$		
		$r = 1 \mu\text{m}$	$r = 0.5 \mu\text{m}$	$r = 0.1 \mu\text{m}$
Resin/resin	0.6	$1.68 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-8}$	$8.4 \times 10^{-7}$
Resin/copper	1.22	$3.4 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-8}$
Copper/copper	2.5	$7 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$3.5 \times 10^{-8}$

为了便于与水的压强进行比较,定义基板对微粒的吸附压强为  $F/\pi r^2$ ,以作用力最大的铜/铜为例,不同大小的微粒的吸附压强如表 2 所示。

表 2 不同大小粒子的吸附压强(铜/铜)

Table 2 Adhere pressure of particles with different sizes (copper/copper)

	$r = 1 \mu\text{m}$	$r = 0.5 \mu\text{m}$	$r = 0.1 \mu\text{m}$
$P / \text{Pa}$	$0.22 \times 10^6$	$0.27 \times 10^6$	$1.1 \times 10^6$

### 3 数值模拟

数值模拟用的软件是 Ansys/Ls-Dyna,它是显示动力的分析有限元程序,可以精确可靠地处理各种高度非线性问题。本文中用 Ansys/Ls-Dyna 来模拟水的爆炸。激光清洗的示意图如图 2 所示,  $\text{CO}_2$  激光脉冲照射在水膜上,脉冲能量密度为

$1 \text{ J}/\text{cm}^2$ ,由于水对  $\text{CO}_2$  激光的吸收系数很大,水快速升温到  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,内部的瞬时压强可以达到 10 MPa,水膜将剧烈膨胀产生爆炸。

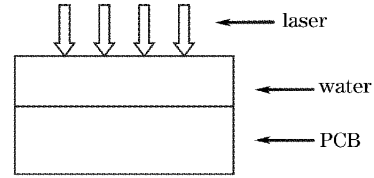


图 2 激光湿式清洗示意图

Fig.2 Schematic diagram of the steam laser cleaning

此外模拟中还采用了如下假设:忽略激光的脉宽对过程的影响;激光光束均匀。水膜厚度为  $10 \mu\text{m}$ ,光斑的半径为  $5 \sim 10 \text{ mm}$ ,由于光斑的半径远远大于水膜厚度,所以可以用准二维的方法来模拟。这样可以减少计算量,对精度的影响也比较小。

Ansys/Ls-Dyna 软件模拟爆炸用的是 JWL 物态方程,JWL 物态方程是爆炸产物压强与体积的关系方程:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V}, \quad (2)$$

其中  $A, B, R_1, R_2, \omega, E$  都是与物质特性相关的参量。由于 JWL 物态方程主要是用于炸药爆炸的,所以没有水的 JWL 物态方程的参量。虽然水的爆炸吸热与温度有很大关系,与炸药爆炸有很大不同,但是在一定范围内可以用 JWL 方程近似。取  $A = 1.0, B = 0, R_1 = 0.4, R_2 = 0, \omega = 0.3, E = 0.07$ ,在爆炸初期体积变化不是太大(10~20 倍)的一段时间内符合水的状态<sup>[5]</sup>。

在模拟中,为了读数的方便和减小误差,单位选取与实际模型相当的量级(避免出现太大或太小的数),具体如表 3。

表 3 模拟中采用的单位

Table 3 Units in the simulation

Length	Time	Mass	Density	Pressure	Velocity
$\mu\text{m}$	10 ns	$10^{-12} \text{ g}$	$1 \text{ g}/\text{cm}^3$	10 MPa	100 m/s

在模拟中,设置的时间步长为 0.5 ns,计算时间为 400 ns。在结果中截取 100 ns 时的水的速度分布图(图 3)和水的压强分布图(图 4),水膜中印刷电路板附近的和靠近空气处的压强时程图如图 5 和图 6 所示(图中各物理量单位见表 3,压强为 10 MPa,时间为 10 ns)。

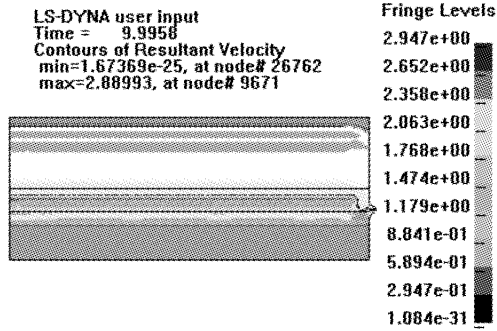


图 3 100 ns 时的速度分布图  
Fig. 3 Velocity distribution at 100 ns

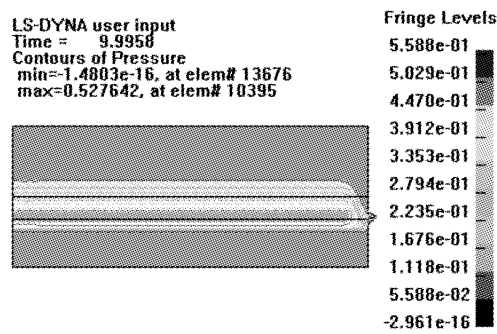


图 4 100 ns 时的压强分布图  
Fig. 4 Pressure distribution at 100 ns

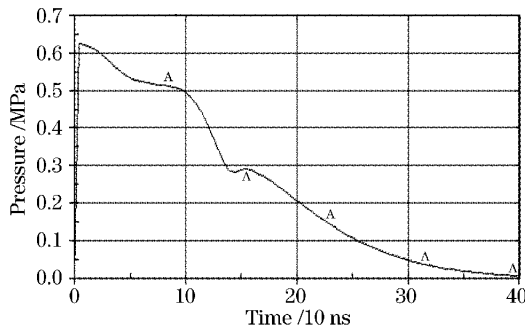


图 5 靠近印刷电路板基板的水膜的压强与时间的关系  
Fig. 5 Relationship between the pressure near PCB and the time

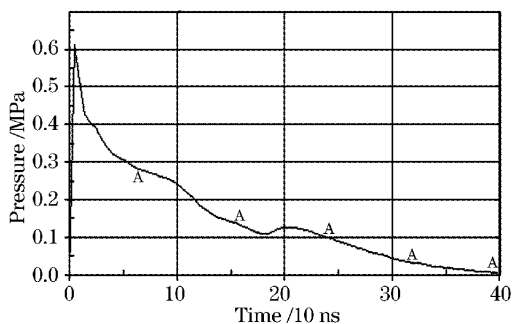


图 6 水膜靠近空气处的压强与时间的关系  
Fig. 6 Relationship between the pressure near air and the time

由图 5 和图 6 可以看出,水膜中的压强峰值约为 6 MPa,液体内部比表面的压强要大,而且下降得比较慢。印刷电路板附近的压强在 100 ns 以内大于 5 MPa,100 ns 以后下降得比较快,再结合图 3 的速度分布图,可以看到在 100 ns 时,水膜的变形已经很大,所以脉宽应该控制在 100 ns 以内,否则脉冲能量将得不到有效利用。

对比表 2,可以清楚地看到,水膜爆炸产生的压强远远大于微米级粒子的吸附压强,比半径 0.1  $\mu\text{m}$  的微粒的吸附压强大,所以在本研究假设的条件下,可以轻易地清除微米级的粒子,对于 0.1 微米级的粒子也可以进行清洗。由于印刷电路板基板材料的破坏阈值一般为几十 MPa,因此水膜由于激光作用发生爆炸所产生的压力不会对印刷电路板基板产生破坏。

### 4 结 论

从理论计算和数值模拟的结果来看,在本文的条件下,对于半径微米级的微粒,水爆炸对微粒的压强比微粒的吸附压强大得多,对于半径 0.1 微米级的微粒,水爆炸产生的压强与微粒的吸附压强相当,所以这种清洗方式对于微米级的粒子可以轻易除去,对于 0.1 微米级大小的微粒也可以进行清洗。同时也要求激光脉冲的脉宽要小于 100 ns。

### 参 考 文 献

- 1 Y. F. Lu, W. D. Song, Y. Zhang *et al.*. Low theoretical model and experimental study for dry and steam laser cleaning [C]. *SPIE*, 1998, **3550**: 7~17
- 2 Cheng Chuanxuan. Surface Chemicophysics [M]. Beijing: Science and Technology Document Publishing House, 1995. 194~196  
程传焯. 表面物理化学 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1995. 194~196
- 3 Y. F. Lu, W. D. Song, M. H. Hong *et al.*. Laser surface cleaning-basic understanding, engineering efforts and technical barriers [C]. *SPIE*, 2000, **4088**: 371~379
- 4 Patricia Alloncle, Jean-Christophe Isselin, Marjorie Provost *et al.*. Mechanisms of laser surface cleaning in liquid media [C]. *SPIE*, 1998, **3343**: 866~871
- 5 West Germany Engineer Association. Thermodynamics Character Schematics of Water and Vapor [M]. Xi'an Thermal Power Research Institute translated, Beijing: China Water Power Press, 1974. 13~16  
西德工程师协会 著. 水和水蒸气热力学性质图表 [M] 西安热工研究所译, 北京: 水利水电出版社, 1974. 13~16