

## 印制电路板低温等离子体表面改性工艺

王治伟<sup>1</sup>, 王军<sup>2,3,\*</sup>, 杨涛<sup>1</sup>, 王慧<sup>1</sup>

(1. 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009;

2. 苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 针对印制电路板(PCB)表面润湿性差的问题,对比了传统化学湿法处理和低温等离子体处理对PCB进行表面改性的效果,研究了气压和放电功率对PCB等离子体处理效果的影响。结果表明,低温等离子体的处理效果远优于化学湿法处理。在放电功率500 W、气压0.4 MPa和温度25 °C的条件下等离子体处理3 s后,PCB对水的接触角降至14.8°,润湿性较好。

**关键词:** 印制电路板; 低温等离子体; 表面改性; 水接触角

**中图分类号:** TG178

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X(2022)19-1398-05

## Surface modification of printed circuit board by low-temperature plasma

WANG Zhiwei<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2,3,\*</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>

(1. School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

3. Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor surface wettability of printed circuit board (PCB), the modification of PCB by different methods including traditional wet chemical process and low-temperature plasma treatment was compared. The effects of air pressure and discharge power during plasma treatment on the modification of PCB were studied. The results showed that the modification effectiveness of low-temperature plasma was much better than that of wet chemical process. After being treated by plasma at discharge power 500 W, air pressure 0.4 MPa, and temperature of 25 °C for 3 seconds, the PCB showed good wettability with a contact angle of 14.8° to water.

**Keywords:** printed circuit board; low-temperature plasma; surface modification; water contact angle

印制电路板(PCB)是电子元器件电气连接的提供者,是电子设备的核心部件,已被广泛应用。采用印制电路板能够大幅减少布线和装配的差错,提高自动化水平和生产效率<sup>[1]</sup>。但PCB存在表面脏污、润湿性差、粘接性能不足的缺点,这限制了其在粘接、印刷等方面的应用,因此有必要对PCB进行表面处理,主要方法有化学湿法处理、等离子体处理等。

等离子体表面改性属于干法处理工艺,通过喷枪产生的等离子体射流与材料表面发生反应来达到表面清洁与改性的目的。涉及的反应主要有两种:一种是化学反应,主要以H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CF<sub>4</sub>、空气等作为介质,经高压电离后生成高活性的自由基粒子,与材料表面的物质发生氧化还原反应生成新物质并被排出材料表面<sup>[2-3]</sup>;另一种是物理反应,采用Ar、He等惰性气体作为介质,这些气体在电离后产生的正离子、电子等高能粒子能够不断冲击材料表面,直至污染物脱离材料表面<sup>[4-5]</sup>。

等离子体改性技术兴起于20世纪六七十年代,具有高效节能、零废液的优点<sup>[6]</sup>,可以对材料表面起到清洁、活化和改性的作用,因此在微加工、超大规模集成电路、半导体薄膜器件、高分子材料表面处理等方面应用广泛<sup>[7]</sup>。García等<sup>[8]</sup>在金属化薄膜电容器的塑料盒上施加低压微波氧等离子体,令热塑性塑料盒与封装树脂之间的界面附着力增强。Choong等<sup>[9]</sup>在氧气流中对环氧树脂进行微波等离子体处理,提高了环氧树脂与有机硅之间的粘附性。Lee等<sup>[10]</sup>借助催化剂与介质阻挡放电(DBD)等离子体的相互作用对催化剂进行表面改性,

**收稿日期:** 2022-07-19 **修回日期:** 2022-08-30

**基金项目:** “十四五”江苏省重点学科项目(2021135);江苏省研究生工作站项目(2017272);江苏省研究生科研创新项目(KYCX17\_2060)。

**第一作者:** 王治伟(1998-),男,在读硕士研究生,研究方向为低温等离子体表面处理。

**通信作者:** 王军(1979-),男,博士,副教授,研究方向为光电测控技术和表面处理技术。

**引用格式:** 王治伟,王军,杨涛,等.印制电路板低温等离子体表面改性工艺[J].电镀与涂饰,2022,41(19):1398-1402.

WANG Z W, WANG J, YANG T, et al. Surface modification of printed circuit board by low-temperature plasma [J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41 (19): 1398-1402.

发现在 DBD 等离子体释放后的最初 90 min 内, 催化剂的效率迅速升高, 之后随放电时间的延长, DBD 等离子体在催化剂表面施加热膨胀而造成损伤, 使得转化率逐渐降低。汤朋等<sup>[11]</sup>为了提高环氧涂料在纤维增强聚丙烯(PP)复合材料上的附着力, 采用激光辐照和等离子体处理 PP 复合材料表面, 发现等离子体处理可大幅降低 PP 复合材料表面的水接触角, 对材料表面具有一定的清洁和刻蚀作用, 使其表面粗糙度略增。

目前对 PCB 表面处理方面的研究主要集中在化学试剂研发和超声波清洗方面, 都属于湿法处理, 有关干法处理的研究并不多<sup>[12]</sup>。本文对比了化学溶剂湿法处理工艺和低温等离子体处理工艺对 PCB 的改性效果, 研究了低温等离子体处理时气压和放电功率对 PCB 表面润湿性的影响, 以期使 PCB 表面获得最佳润湿性并维持一定的时间, 从而使其在工程应用方面发挥更优异的性能。

## 1 实验

### 1.1 PCB 预处理

采用常见的印制电路板作为实验对象, 厚度为 0.8 mm。表面改性前先后用无水乙醇和蒸馏水清洗 10 min, 以去除其表面灰尘和污渍, 再干燥。

### 1.2 PCB 表面改性工艺

#### 1.2.1 化学湿法处理

化学湿法处理所用溶剂为市售非离子聚合型含氟表面活性剂。配制 30 mg/L 表面活性剂溶液, 置于 35 °C 恒温水浴锅内加热保温, 将预处理后的 PCB 浸泡其中 30 min, 取出用蒸馏水超声清洗 5 min 后干燥。

#### 1.2.2 低温等离子体处理

等离子体射流产生装置为实验室自主研发的等离子体表面处理机。如图 1 所示, 该设备由电子控制系统、高压电源、等离子体喷枪、空压机和除水器组成。采用空气为介质, 温度为 25 °C, 保持等离子体喷枪与 PCB 表面间距为 3 cm, 经过空气压缩机通入 0.5 m<sup>3</sup>/min 的空气, 待气压稳定后调节放电功率开始放电, 一定时间后关闭电源, 取出样品。

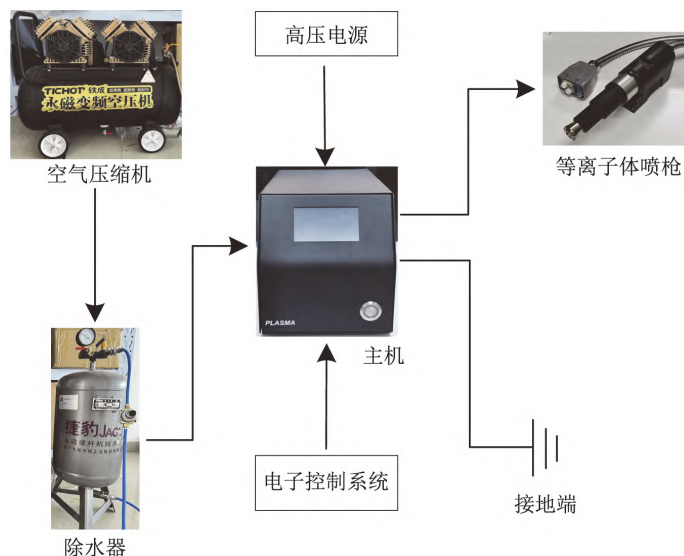


图 1 等离子体产生设备系统示意图

Figure 1 Schematic diagram showing the equipment for generation of plasma

### 1.3 测试与表征

按 GB/T 30693-2014《塑料薄膜与水接触角的测量》, 采用昆山北斗精密仪器有限公司的 CA500S 整体倾斜全自动型光学接触角测量仪测量图 2 所示 PCB 表面 3 处的水接触角( $\theta$ ), 取平均值, 用于评价 PCB 的润湿性。

采用德国布鲁克 DektakXT 台阶仪测量 PCB 表面的台阶高度( $h_p$ ), 以对比不同改性工艺对 PCB 表面粗糙度的影响。

采用德国 Arcotest 达因笔测试 PCB 的表面张力, 通过观察试液的浸润情况来判断不同改性工艺对 PCB 表面粘附性的影响。

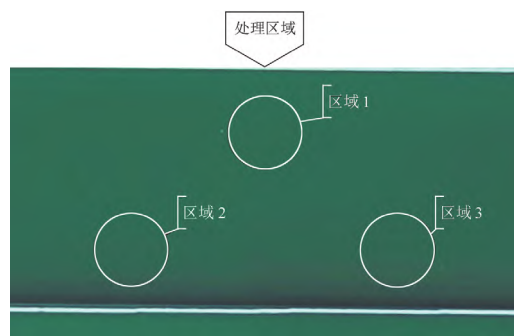


图2 水接触角测量示意图

Figure 2 Schematic diagram showing the positions for measurement of water contact angle

## 2 结果与讨论

### 2.1 化学湿法处理与等离子体处理对 PCB 表面改性效果的对比

分别采用化学湿法和等离子体工艺对 PCB 进行表面改性,以对比两种表面改性工艺的效果。其中等离子体处理的工艺条件为:气压 0.2 MPa,放电功率 400 W,时间 3 s。

#### 2.1.1 润湿性

从图 3 可以看出,未经处理的 PCB 表面水接触角约为  $70^\circ$ ;经化学湿法处理后水接触角降低到  $40^\circ$  左右,表面润湿性有所改善;低温等离子体处理后 PCB 的表面水接触角仅  $20^\circ$  左右,润湿性最好。因为空气在经高压电离后会产生显电中性的高活性自由粒子,这些粒子与 PCB 表面的物质发生氧化还原反应后会生成亲水基团,使得 PCB 表面的润湿性增强;另外,在等离子体处理过程中附带的刻蚀作用也会令 PCB 表面粗糙度增大,进而增大了固液之间的接触面积。

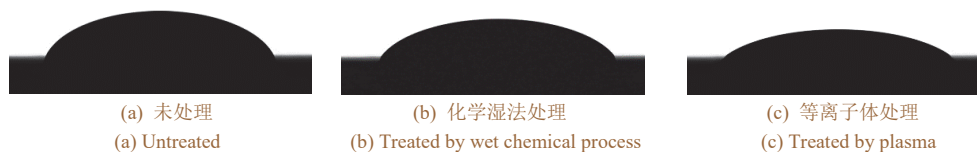


图3 采用不同工艺处理前后的 PCB 表面的水接触角

Figure 3 Water contact angles of PCB before and after being treated by different methods

#### 2.1.2 表面粗糙度

从图 4 可知,经化学湿法处理后 PCB 表面的台阶高度约为 1 093 nm,经等离子体处理后的台阶高度在 1 886 nm 左右,说明等离子体处理时 PCB 的表面粗糙度明显高于化学湿法处理时,这也是等离子体处理使 PCB 表面润湿性更好的主要原因之一。

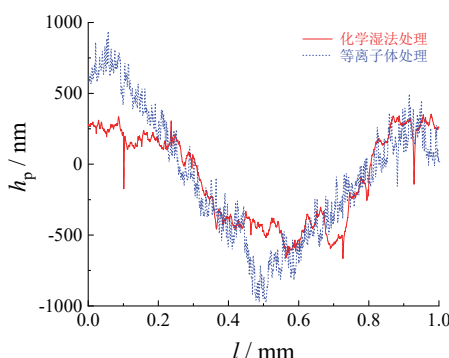


图4 采用不同工艺处理后 PCB 表面的台阶高度分布

Figure 4 Distribution of step height on surface of PCB after being treated by different methods

#### 2.1.3 粘附性

采用 50 dyn/cm(即 50 mN/m)的达因笔在 PCB 表面进行涂写。从图 5 可以看出,化学湿法处理的 PCB 表面笔迹出现断连与收缩,涂写区域颜色深浅不一,说明经化学湿法处理后 PCB 的表面张力低于 50 dyn/cm;而低温等离子体处理的 PCB 表面笔迹分布均匀,完整地铺开,说明经等离子体处理后 PCB 表面张力  $\geq 50$  dyn/cm。表面张力是反映材料表面粘附性的关键指标,表面张力越大,表示液体胶粘剂在其表面的粘附性越好,因此

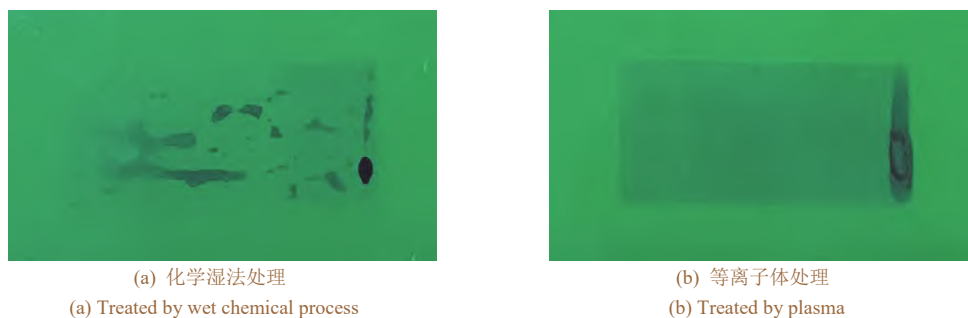


图5 50 dyn/cm 的达因笔在经不同工艺处理的 PCB 表面留下的笔迹  
Figure 5 Marks of dyne pen (50 dyn/cm) left on surface of PCB treated by different methods

等离子体处理后 PCB 表面的粘附性要优于化学湿法处理后, 可以与胶粘剂之间取到更好的胶接效果。

## 2.2 工艺参数对等离子体处理效果的影响

### 2.2.1 功率的影响

在气压为 0.2 MPa、功率不同的条件下对 PCB 进行等离子体处理 3 s。由图 6 可见, 随功率增大, PCB 表面的水接触角先减小后略增。在 500、600 和 700 W 的功率下等离子体处理后, PCB 的水接触角较小, 即润湿性较好。由此可见, 等离子体放电功率对 PCB 的改性具有显著影响, 适当增大功率能够增强改性效果, 提高 PCB 的润湿性。但功率达到一定值时, 继续增大功率对 PCB 润湿性的改善效果变化不大, 甚至可能变差。产生此现象是由低温等离子体表面处理的作用方式决定的: 等离子体处理过程中材料表面可能引入特定官能团, 对表面起到刻蚀作用, 形成交联结构层或者生成表面自由基, 这些作用一般不是单一存在, 往往是以某种作用为主, 几种作用并存。当功率过高时, 等离子体内的高能粒子增加, 刻蚀作用增强, 一部分已接枝的官能团被重新刻蚀掉<sup>[13]</sup>, 使水接触角略升。

### 2.2.2 气压的影响

根据物理化学反应的基本原理, 反应一般与压力成正比, 随着压力的升高, 参与反应的自由基变多, 反应加快<sup>[14-15]</sup>。而气体压强越低, 分子的平均自由程越长, 分子间的碰撞概率越大, 积累的能量就越多, 粒子的攻击力也就越强<sup>[16-17]</sup>。

从图 7 可以看出, 在功率一定的条件下, 随气压从 0.1 MPa 升高到 0.6 MPa, PCB 的水接触角先减小后增大, 在功率为 500 W、气压为 0.4 MPa 时, PCB 的水接触角最低, 约为 14.8°, 润湿性最好。这是因为气压升高意味着等离子体密度增大。对于以空气作为介质的化学反应主导的等离子体表面处理而言, 等离子体密度的增大能够显著提高等离子体的清洗速率和效果。但气压持续增大会导致粒子能量降低, 进而影响粒子轰击到表面所产生的刻蚀效果。

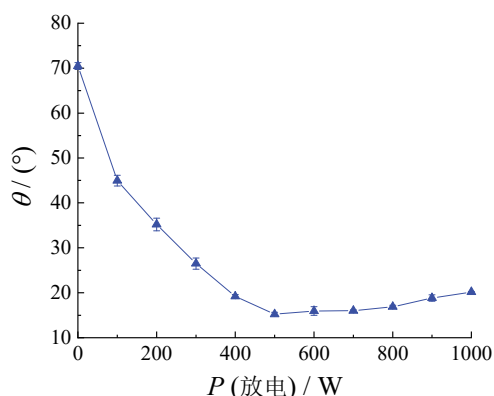


图6 等离子体处理过程放电功率对 PCB 表面水接触角的影响  
Figure 6 Effect of discharge power during plasma treatment on water contact angle of PCB surface

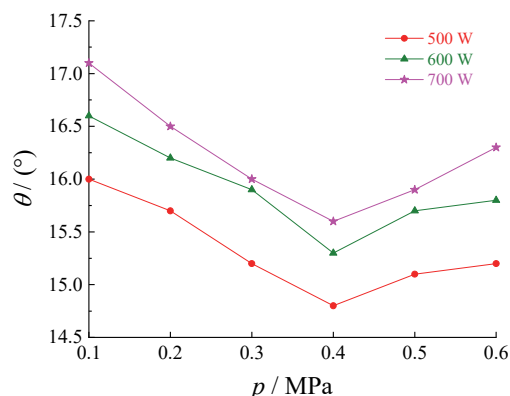


图7 等离子体过程气压对 PCB 表面水接触角的影响  
Figure 7 Effect of gas pressure during plasma treatment on water contact angle of PCB surface

## 3 结论

采用等离子体处理后 PCB 的表面润湿性优于采用化学湿法处理时。在气压 0.4 MPa、放电功率 500 W 和温度 25 °C 的条件下对 PCB 等离子体处理 3 s, PCB 表面的静态水接触角约为 14.8°, 润湿性最好。



# 参考文献:

- [1] 丁飞, 董天文, 张海涛, 等. 印制电路板的清洗技术[C]//2019中国高端SMT学术会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2019: 287-292.  
DING F, DONG T W, ZHANG H T, et al. Cleaning technology of printed circuit boards [C] // Proceedings of 2019 China High-end SMT Academic Conference. [S.l.: s.n.], 2019: 287-292.
- [2] WANG L S, WANG K, ERKAN N, et al. Metal material surface wettability increase induced by electron beam irradiation [J]. Applied Surface Science, 2020, 511: 145555.
- [3] 金英. 等离子体射流特性及在金属表面清洗中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.  
JIN Y. The properties of plasma jet and its application on metal surface cleaning [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [4] 王贵美. 低温等离子体在塑料聚合物材料表面改性中的应用[J]. 塑料科技, 2020, 48 (5): 125-128.  
WANG G M. Application of low temperature plasma in surface modification of plastic polymer materials [J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48 (5): 125-128.
- [5] 叶荣坤. 低压射频等离子体生成及清洗效果研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.  
YE R K. Study on generation and cleaning effect of low pressure RF plasma [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [6] 菅井秀郎. 等离子体电子工程学[M]. 张海波, 张丹, 译. 北京: 科学出版社, 2002.  
SUGAI H. Plasma Electronics Engineering [M]. ZHANG H B, ZHANG D, transl. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] 李高原, 赵建钢, 郭颖. 低温等离子体表面改性提高聚四氟乙烯黏结性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46 (3): 497-503.  
LI G Y, ZHAO J G, GUO Y. Adhesion property improvement of polytetrafluoroethylene through low temperature plasma surface modification [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46 (3): 497-503.
- [8] GARCÍA A A, RODRÍGUEZ-CASTELLÓN E, MILLAS D P. Surface modification of thermoplastics by low-pressure microwave O<sub>2</sub> plasma treatment for enhancement of the adhesion of the interface box/encapsulating resin and the influence on film capacitors operating under extreme humidity conditions [J]. Applied Surface Science, 2020, 513: 145764.
- [9] CHOONG L F, CHEONG K Y, RAMAKRISHNAN S, et al. The adhesion of epoxy treated by microwave oxygen plasma [J]. Applied Surface Science, 2021, 563: 150224.
- [10] LEE C J, LEE D H, KIM T. Modification of catalyst surface from interaction between catalysts and dielectric barrier discharge plasma [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2017, 17 (4): 2707-2710.
- [11] 汤朋, 汪洋, 曹东萍, 等. 激光和等离子体处理对复合材料表面涂层附着力的影响研究[J]. 涂料工业, 2019, 49 (12): 27-35.  
TANG P, WANG Y, CAO D P, et al. Study on the effect of laser and plasma treatment on the adhesion of composite surface coating [J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49 (12): 27-35.
- [12] 石国丽. 浅谈印制电路板的一种清洗工艺[J]. 低温与超导, 2012, 40 (6): 80-82.  
SHI G L. On a printed circuit board cleaning process [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40 (6): 80-82.
- [13] 崔雅楠, 严雨欣, 王莉莉, 等. 低温等离子体表面处理对氧化锆陶瓷-树脂短期粘接强度的影响[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2020, 40 (6): 897-902.  
CUI Y N, YAN Y X, WANG L L, et al. The short-term effects of nonthermal plasma treatments on zirconia ceramic-resin bond strength [J]. Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences), 2020, 40 (6): 897-902.
- [14] HUANG Y W, YU Q F, LI M, et al. Surface modification of activated carbon fiber by low-temperature oxygen plasma: textural property, surface chemistry, and the effect of water vapor adsorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 418: 129474.
- [15] PATEL A R, SHUKLA A N. Design & experiments on pen-shaped plasma torch for surface modification [J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57 (4): 3199-3203.
- [16] 刘新, 张忠涛, 刘吉宇, 等. 混氧等离子体射流对 CFRP 表面性质及粘接强度的影响[J]. 表面技术, 2022, 51 (1): 247-256.  
LIU X, ZHANG Z T, LIU J Y, et al. Effect of helium/oxygen mixed plasma jet on CFRP surface properties and bonding strength [J]. Surface Technology, 2022, 51 (1): 247-256.
- [17] BENNETT A, YU N, CASTELLI M, et al. Characterisation of a microwave induced plasma torch for glass surface modification [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2021, 16 (1): 122-132.