



黄立新 著



印刷电路板 高速钻削技术

● 上海科学技术出版社

印刷电路板高速钻孔技术

——黄立新 著——

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

印刷电路板高速钻削技术/黄立新著. —上海:上海
科学技术出版社, 2012. 11

ISBN 978—7—5478—1319—5

I. ①印... II. ①黄... III. ①印刷电路板(材料)
—钻削 IV. ①TM215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 106926 号

内 容 提 要

《印刷电路板高速钻削技术》一书的主要内容包括:印刷电路板高速钻削机理、印刷电路板高速钻削仿真、印刷电路板高速钻削研究方法、印刷电路板高速钻削的钻头设计。该书总体内容翔实,可作为高等院校从事高速加工技术教学人员和机械制造专业本科生与研究生的参考书,也可为从事精密工具技术领域研究的科研人员提供指导。

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.25

字数:200 千字

2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978—7—5478—1319—5/TG·57

定价:36.00 元

本书如有缺页、错装和坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

序

随着科学技术的飞速发展,各类电子产品功能、精度要求的不断提高,印刷电路板(PCB)的应用日益广泛,市场需求量不断增加。大规模集成电路的技术革新使得印刷电路板向多层、细线宽线距、细通孔方向不断转化,要求在有限的面积内线和孔的布置量最大化,以满足电子产品的高精度、高性能要求。因此,印刷电路板孔径的微细化已经成为印刷电路板发展的新课题,而印刷电路板高速钻削技术的机理研究、工艺设计和质量保证,则成为攻克这一课题的关键技术之一,具有紧迫的现实意义和广阔的市场前景。

印刷电路板的高速钻削涉及钻头材质、冷却、排屑、加工定位等一系列技术难题。《印刷电路板高速钻削技术》一书的出版,契合了印刷电路板制造业高速钻削技术应用的发展方向,对正确了解复杂条件下的微孔钻削机理、微孔钻削工艺、提高加工质量具有重要的理论意义和实用价值,可望为高速钻削技术提供重要的理论指导和技术支持,是钻削研究中不可缺少的参考工具书。

《印刷电路板高速钻削技术》一书的作者长期在高校从事超精密加工理论、刀具与加工工艺技术的研究和教学工作,印刷电路板的超高速超精密钻削加工研究是该书作者在多年研究基础上的又一重要探索,也是作者在攻读博士学位期间的主攻研究方向。作者注重理论与实践结合,研究与应用并重,将钻削技术的传统理论与现代高技术研究手段相结合,借助现代数值仿真技术、材料微观分析技术、高速摄影、红外测温法等辅助手段进行印刷电路板高速钻削机理研究和技术开发,先后获得多家知名企业支持,相关成果既具有学术价值,又具有实用意义,反映出作者较高的学术素养和严谨的工作作风。

本书的正式出版将为高等学校机械制造专业的师生,以及精密工具制造行业的相关技术人员提供理论指导和应用借鉴,并可望推动该行业的技术发展和进步。

钟秉林

前 言

本书属于机械制造和高速加工、精密加工领域。随着大规模集成电路的发展,为了顺应计算机、通信设备、数字消费电子产品的多功能、小型化、轻量化、高密度和高可靠性的要求,印刷电路板(PCB)向高层、细线宽线距、细通孔方向迅速发展,促使其要在有限的面积内布设更多的线和孔,PCB孔径的微细化就成为PCB发展的极大挑战,超微细孔加工尺寸范围为0.2mm以下,属于介观尺度(0.01~1mm)加工范畴,此项技术有重要的理论意义和广阔的应用价值。

全书从印刷电路板制造业对PCB高速高精密钻削加工技术的迫切需要出发,采用各种先进的数值仿真分析技术、材料微观分析技术、高速摄影和红外测温法等多种测试分析手段,对印刷电路板高速钻削的钻屑形成机理、钻削力、钻削温度、钻头磨损、孔加工质量控制等,进行了深入的系统研究和分析。分析了钻屑形成过程与钻削力特征、钻头磨损和毛刺的关系,分析了钻削加工中钻削力、钻削温度的动态变化规律以及钻头磨损机理。建立了高速钻削加工条件与印刷电路板钻屑形态、钻屑形成规律、已加工表面质量、钻头磨损的关系,建立了基于热-力多物理场耦合理论的钻削加工PCB板中铜箔材料表面创成过程模型,并对加工过程的多种特征进行了仿真。最后,基于对钻削过程及其主要特征的应用基础理论研究,分析了钻头结构与钻屑排屑的畅通关系,提出了改进钻头几何参数的基本原则和方法,并经过实际验证获得良好的加工效果。本文对PCB板高速钻削加工进行的系统深入的理论和实验研究,对于提高PCB孔加工理论、孔加工工艺技术和钻削工具的水平,有重要的学术和应用价值。

黄立新

目 录

第1章 绪论	1
1.1 印刷电路板钻削技术研究的背景与意义	1
1.1.1 研究的背景	1
1.1.2 研究的意义	3
1.2 印刷电路板的组成及结构	3
1.2.1 印刷电路板的组成	3
1.2.2 印刷电路板分类及结构	4
1.2.3 印刷电路板的微孔	6
1.3 印刷电路板钻削加工研究现状	7
1.3.1 印刷电路板机械钻孔加工机床	7
1.3.2 印刷电路板机械钻孔加工机理	7
1.3.3 印刷电路板机械钻孔的仿真研究	9
1.3.4 印刷电路板机械钻孔的钻头设计	10
1.3.5 印刷电路板机械钻孔的磨损	11
1.3.6 印刷电路板机械钻孔的常用标准	11
1.4 印刷电路板钻削加工中有待解决的问题	12
1.4.1 印刷电路板的钻削去除机理	12
1.4.2 超微细钻削刀具的失效机制研究	12
1.4.3 印刷电路板孔表面创成过程建模	13
1.5 项目主要研究内容	13
第2章 印刷电路板钻削加工的研究方法	15
2.1 总体研究思路	15
2.2 印刷电路板材料	16
2.2.1 覆铜板(CCL)FR-4	16
2.2.2 盖板	17
2.2.3 垫板	18
2.3 实验用钻头	18
2.3.1 钻头材料	18
2.3.2 钻头几何参数	19

2.4	研究方法	21
2.4.1	高速钻削的钻削力	21
2.4.2	钻屑的显微观察	23
2.4.3	钻屑形成的高速摄影观察	25
2.4.4	钻头磨损研究	25
2.4.5	钻削温度	27
2.4.6	孔加工质量研究	27
2.5	钻削加工模型	29
2.5.1	基于 AdvantEdge FEM 的钻削仿真研究	29
2.5.2	钻削力模型	29
2.5.3	温度仿真	31
2.5.4	力热耦合	32
2.6	本章小结	34
第3章	印刷电路板高速钻削过程与钻屑形成机理	35
3.1	高速钻削钻屑形态	35
3.2	钻削印刷电路板的铜箔	35
3.2.1	铜屑的分类	35
3.2.2	铜屑的形成过程	37
3.2.3	加工条件对铜屑生成的影响	37
3.2.4	钻屑排出过程分析	38
3.3	钻削印刷电路板的盖板	39
3.4	钻削印刷电路板的玻璃纤维/树脂	42
3.4.1	玻璃纤维/树脂屑的特征	42
3.4.2	钻屑形态与钻削力的关系	45
3.4.3	钻屑排出过程	45
3.5	各组分材料钻屑形成比较	47
3.6	孔边毛刺生成机制与控制	48
3.6.1	孔边毛刺的生成机制	48
3.6.2	影响毛刺生成的主要因素	49
3.7	本章小结	52
第4章	印刷电路板钻削加工过程特征	54
4.1	钻削力	54
4.1.1	钻削力基本特征	54
4.1.2	钻削力仿真	55

4.1.3	钻头几何参数对钻削力的影响	58
4.1.4	钻削用量对钻削力的影响	60
4.2	钻削温度	65
4.2.1	钻削温度仿真	65
4.2.2	钻削温度测量	66
4.3	钻头磨损	67
4.3.1	钻头的磨损过程	67
4.3.2	钻头的磨损形态	68
4.3.3	影响高速钻削磨损的主要因素	74
4.4	高速钻削的孔加工质量	76
4.4.1	孔径	76
4.4.2	孔壁粗糙度	79
4.5	本章小结	80
第5章	基于刀具应用的钻头、机床和钻削过程整体优化	82
5.1	高速钻削钻头对钻削性能的影响	82
5.2	基于分屑槽与横刃改进的高效钻头设计	83
5.2.1	分屑槽设计	83
5.2.2	横刃的修磨方案	86
5.3	高速钻削钻头改进方案	87
5.3.1	分屑槽钻头的钻削效果	87
5.3.2	横刃修磨后的钻削效果	91
5.3.3	高速钻削 PCB 改进型钻头的磨损	92
5.3.4	基于刀具应用的整体优化	94
5.4	本章小结	96
第6章	基于尺寸效应的微钻和微盲孔钻头设计	97
6.1	多层高密度板超微细孔加工特点	97
6.2	超微细钻头表面微观磨损与破损的分析	98
6.3	超微细孔加工质量	100
6.3.1	孔壁粗糙度	100
6.3.2	钉头	102
6.3.3	位置精度	103
6.4	影响超微细孔加工质量的因素	105
6.4.1	影响孔壁粗糙度的因素	105
6.4.2	影响钉头的因素	106

6.4.3 影响位置精度的因素	108
6.5 提高超微细孔加工质量的途径	109
6.6 超细微钻头设计	110
6.7 超细微盲孔的钻头设计	110
6.8 微钻与大钻钻削的比较	113
6.8.1 微钻钻削切屑与大直径钻头钻削切屑的比较	113
6.8.2 微钻钻削力与大直径钻头钻削力的比较	114
6.9 本章小结	114
第7章 结论与展望	116
7.1 结论	116
7.1.1 创新点	116
7.1.2 主要结论与成果应用	116
7.2 展望	119
参考文献	120
附 彩图	125
后记	140

第1章 绪 论

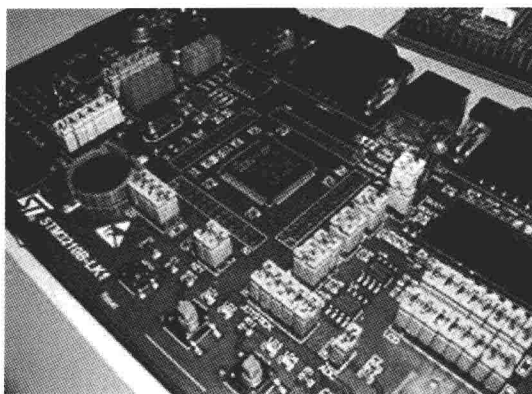
1.1 印刷电路板钻削技术研究的背景与意义

1.1.1 研究的背景

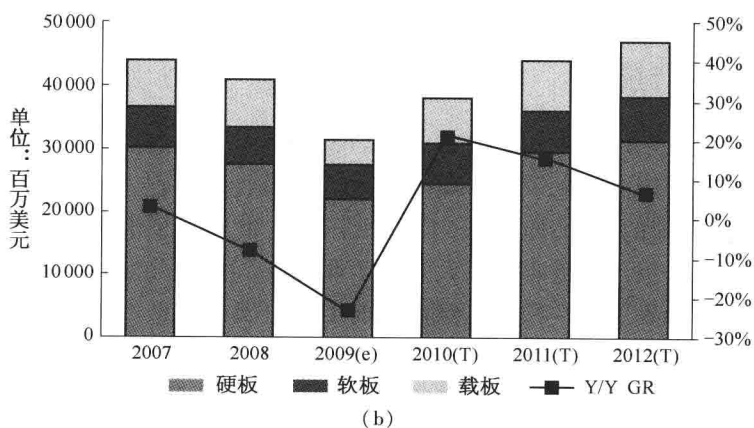
印刷电路板(PCB, Printed Circuit Board)是组装电子元器件之前的基板,主要作用是凭借电路板所形成的电子线路,将各种电子元器件连接在一起,使其发挥整体功能,以达到中继传输的目的,如图1-1(a)所示。从世界电子组件产品结构看,印刷电路板已成为电子组件制造业的最大支柱产业之一,它通过组装完整的电子产品支撑着信息化的社会发展^[1]。印刷电路板目前主要应用在信息、通信、光电、消费性产品、汽车、航天、军事、精密仪表及工业用产品等领域。从世界电子组件产品结构看,印刷电路板已成为电子组件制造业的最大支柱产业之一,其市场保持了稳定的年增长率,如图1-1(b)、(c)所示。中国的印刷电路产业无论在生产还是研发方面都将成为全球的中心。

印刷电路板钻孔工序通常是印刷电路板厂的产能瓶颈之一,印刷电路板钻孔也是生产印刷电路板和芯片封装中成本最集中的工艺步骤,钻孔的费用通常占印刷电路板制板费用的30%~40%。随着钻头直径越来越小,钻削机床的转速和精度也需要越来越高,这对钻头和钻削机床的设计与生产和超微细孔的加工工艺技术等提出了新的更高的要求。超高速多层高密度印刷电路板材料超微细孔的加工过程不同于单纯的金属材料、陶瓷材料或纤维增强材料的超微细孔加工过程,也不同于直径大于0.3mm的印刷电路板的微孔加工过程,更不同于宏观尺寸的超高速钻削过程,存在着许多具有科学意义的特殊性。该项目符合国家“十二五”规划要求,符合长三角信息产业对多层高密度印刷电路板发展的要求,更符合掌握自主创新技术对基础理论研究的迫切需求。

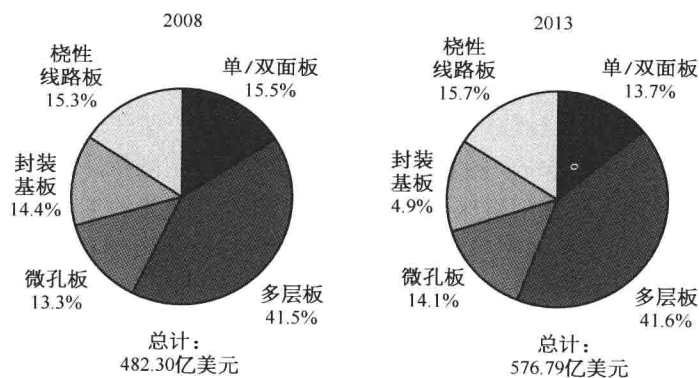
在印刷电路板钻削过程中钻头将以不同次序分别与金属、非金属和高分子材料作用,而不同性能的材料其钻削机理差异明显,因此造成多层高密度印刷电路板材料钻削机理的复杂多样性。材料去除过程会受印刷电路板的纤维强度、纤维密度、纤维



(a)



(b)



(c)

图 1-1 印刷电路产业发展

(a) 印刷电路板^[2]; (b) 全球 PCB 市场规模^[3]; (c) Prismark PCB 市场预测^[4]

网织构方向、金属导体厚度和介电层厚度等因素影响,因而印刷电路板钻削工艺对钻头钻削性能的要求呈现多样性。

钻孔的质量取决于各种因素,例如:基板质量、机床精度、钻孔工艺、钻头质量等。使用普通钻头加工印刷电路板存在排屑不畅、钻头磨损、烧伤严重等问题,而且随着转速提高,这些问题更趋严重。当印刷电路板的孔加工完成后,应可以直接电镀,但是实际生产中,许多工序是用于在钻孔后续操作过程中纠正孔的尺寸,或改正钻孔过程中造成的缺陷。例如,用机器去除毛刺、用化学制剂去除胶渣和碎屑、用酸或碱清洗剂去除污物等,这些方法都是用来去除钻孔过程中产生的质量问题的。因此,印刷电路板钻头设计与钻孔工艺优化就显得十分重要。

针对印刷电路板的高速钻削,如何从基础理论研究入手,通过理论分析、模拟仿真和创新实验研究,研究印刷电路板复合材料的去除机理;研究钻头的磨损失效机理,以及孔表面创成过程与质量控制机制;建立印刷电路板孔加工钻头设计原则和工艺技术体系,是目前印刷电路板钻削加工中急需解决的重要应用基础研究问题之一。

1.1.2 研究的意义

本文针对 PCB 印刷电路板钻削加工中,硬质合金钻头高速钻削 PCB 钻头磨损严重、钻头断屑性能差、钻头及其几何参数和钻孔加工工艺选择缺乏理论指导等关键问题,采用切削力学、材料学和有限元等理论,运用高速摄影技术、材料微观分析技术和测试分析技术,通过大量的钻削实验和三维仿真分析,深入研究高速钻削的钻屑形成机理,以及硬质合金钻头磨损机理,通过有限元技术建立基于热-力多物理场耦合理论的钻削加工 PCB 板中铜箔材料的三维仿真,分析研究印刷电路板加工的钻头材料、几何角度、工艺参数等对孔加工质量、钻削力、钻削温度和钻头磨损的影响,优化印刷电路板高速钻削工艺参数。最终,利用理论研究的成果提出 PCB 钻头设计原则,并设计了几种印刷电路板的专用钻头,实验验证其达到印刷电路板高速钻削所需要的良好的断屑、低钻削力等钻头性能,这些研究对提高超高速钻削多层高密度印刷电路板的加工技术水平具有重要意义。

1.2 印刷电路板的组成及结构

1.2.1 印刷电路板的组成

PCB 是以覆铜板(CCL, Copper-clad Laminate)作为原料而制造的电器或电子的重要结构元件。覆铜板是由木浆纸或玻纤布等作增强材料,浸以树脂单面或双面覆以铜箔,经热压而成的一种产品,图 1-2 显示了 PCB 材料的结构^[5]。

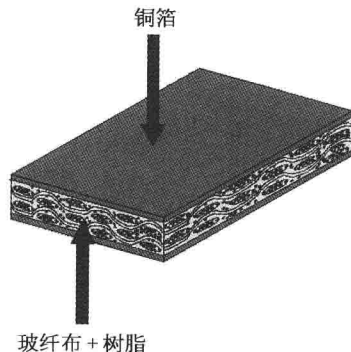


图 1-2 覆铜板结构^[5]

印刷电路板主要由基板和导线两部分构成。基板为一刚性或柔性绝缘薄板,用以支撑全部导线及组件;导线通常为按适当形状牢固附着在基材上的细带状高纯度铜质材料。基板为铜材区及其上附着的所有组件提供机械支撑。成品电路的电性能依赖于基材的绝缘性能。导线为组件提供电气连接及焊接点^[6]。

1.2.2 印刷电路板分类及结构

印刷电路板目前主要应用在信息、通信、光电、消费性产品、汽车、航天、军事、精密仪表及工业用产品等领域。印刷电路板分类见表 1-1。电路板的结构特点如下。

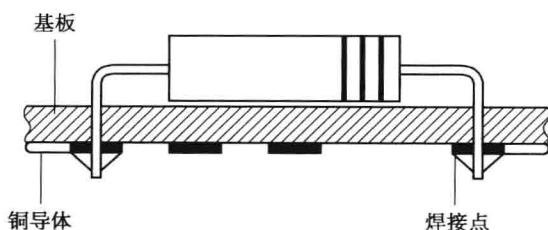
表 1-1 印刷电路板分类^[9-15]

分类方法	类 别	特 征	主 要 用 途
层数	单层 (面)板	单面敷铜,仅在基板敷了铜箔便形成导体图案	电视机、收音机、电冰箱等家电产品,计算机、打印机等消费性电子产品
	双层 (面)板	基板双面都敷有铜箔,两面形成导体图案	电子玩具、汽车用电子机器、电脑周边设备、一般通信设备、传真机等
	多层板	在基板内部形成导体图案	个人电脑、自动交换机、网络通信设备、半导体测试设备、数位控制设备、内存电路板、IC 卡
刚性/柔性	刚性印刷 电路板	至少有一个导电图形和导通孔	移动通信终端基本硬件载体,刚性印刷电路板仍占据电路板中重要地位
	挠性印刷 电路板	在可挠性基材上做成线路布置	笔记本电脑、汽车仪表、LCD 面板及驱动 IC、手机等通信领域及 TFT-LCD 等
	刚-挠 结合板	挠性基材在不同区域与刚性基材互连的 PCB 可以连接不同平面间的电路,可以折叠、卷缩、弯曲,也可以连接活动部件	航空航天,如高端的飞机挂载武器导航系统,先进医疗设备,数码相机,可携式摄像机和高品质 MP3 播放器。刚-挠结合板最常用于制造军用飞机和医疗设备
基板材料 硬度	刚性基板	刚性基板材料的重要的品种是覆铜板,它是用增强材料,浸以树脂胶黏剂,通过烘干、裁剪、叠合成坯料,然后覆上铜箔,用钢板作为模具,在热压机中经高温高压成形加工而制成的。一般的多层板用的半固化片,则是覆铜板在制作过程中的半成品(多为玻璃布浸以树脂,经干燥加工而成)	
	柔性基板	高分子薄膜、聚亚酰胺和压延铜箔	

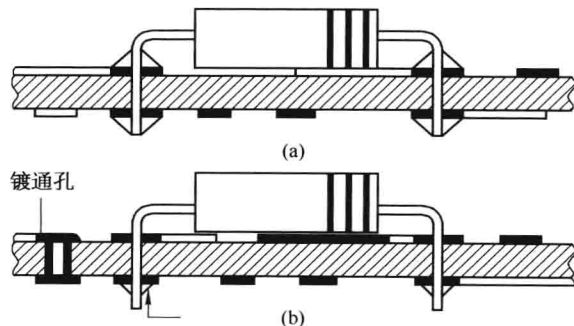
(续表)

分类方法	类别	特征	主要用途
基板材料	纸质基板	以绝缘纸为补强材、酚醛树脂为黏合材。纸基酚醛树脂(xPC、XxxPC、FR-1等)、环氧树脂(FE-3)、聚酯树脂等(FR表示阻燃)	
	复合基材	包括 CEM-1(基板绝缘纸含浸环氧树脂), CEM-3(玻璃纤维含浸环氧树脂)	
	玻璃 纤维布基	以环氧树脂、酚醛树脂、聚四氟乙烯等为黏合剂,以纸或玻纤布为材料而组成的复合材料板。 多层玻璃纤维布环氧树脂板(FR-4),环氧树脂与八层玻璃纤维布密合而成;多层刚性硬板其内层采用厚度0.05~0.7mm薄的玻纤布基覆铜板;其外层铜箔厚度外层用时5~35 μm ;内层用时为18~35 μm ;一般用环氧树脂黏结	
	其他	陶瓷、金属芯基板	

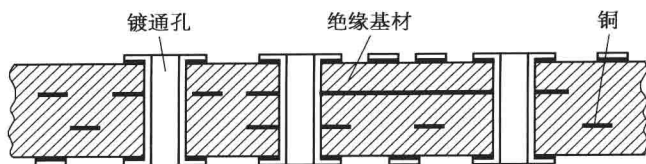
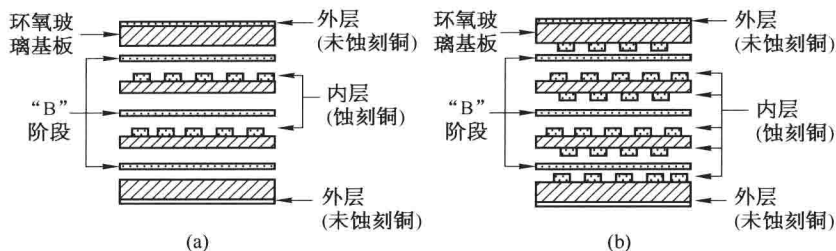
(1) 单层(面)印刷电路板。所谓“单层(面)板”是指导线分布在绝缘基板的一面上,几乎都采用纸质酚醛基材。图1-3为单层印刷电路板的结构组成^[8]。

图 1-3 单层印刷电路板^[8]

(2) 双层(面)印刷电路板。双面有印制线路图形,即绝缘基板两面都有电路,再通过孔的金属化进行双面互连形成的印刷电路板。通常使用的双层板有镀通孔连接的双层板(PTH)和无镀通孔连接的双层板(non-PTH)。图1-4所示为两种双层板的详细结构图。双层无镀通孔电路板^[8]只是单层板的扩展,因无需电镀而成本极低。必要时,此种电路板上的导通连接通过将组件引脚焊接于基板两侧来实现^[7]。

图 1-4 双层印刷电路板^[8]

(a) 无镀通孔; (b) 有镀通孔

图 1-5 四层印刷电路板^[8]图 1-6 四层及八层多层印刷电路板^[8]

(a) 四层板; (b) 八层板

1.2.3 印刷电路板的微孔

微孔是印刷电路板的重要组成部分之一。标准多层板的结构含内层线路及外层线路,再利用钻孔以及孔内金属化的制程,使各层线路的内部之间相连接。印刷电路板的孔分为导通孔与不导通孔。导通孔包括插 IC 引脚的零件孔与连接不同层间的过孔,孔壁上有铜作为导通介质来连接中间层或外层的导电图形。不导通孔包括固定板卡的机械孔等,孔壁无铜。过孔可分为穿透式导通孔,埋孔和盲孔。穿透式导通孔是从顶层直接通到底层;盲孔是仅延伸到印刷板的一个表面的导通孔,它是只从顶层通到某一层里层,或者从里层穿透出来到底层的导通孔;而埋孔是将内部两个里层之间相互连接,没有穿透底层或顶层的导通孔(如图 1-7 所示)。

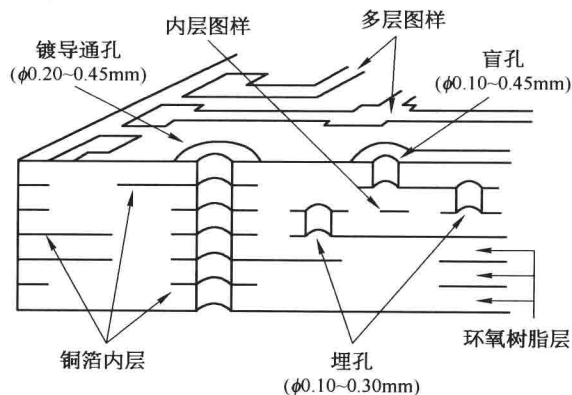


图 1-7 印刷电路板的微孔

1.3 印刷电路板钻削加工研究现状

1.3.1 印刷电路板机械钻孔加工机床

目前用于印刷电路板微孔钻削的高速钻孔机的转速都在 16 万转以上,为满足多层高密度印刷电路板和 IC 载板的超微细孔加工的需求,已有主轴转速为 350kr/min、250kr/min 和 270kr/min 的具有良好动态特性的精度高的钻床产品面市^[16]。有关 PCB 机械微孔钻孔机床的研究主要集中在机床主轴及其动态特性和控制系统等方面。Man(1999)认为,在微孔钻削中最大的困难是入孔口的振动以及高温和高深宽比,为此研究了两种控制算法,可控制主轴回转次数,以降低钻削力和扭矩,提高加工质量^[17]。Huang(2004)认为切入工件后钻头的自然频率下降^[18-19]。王英章(2004)、吴俊刚(2005)采用多体系统动力学模拟仿真 PCB 钻床的机械动态特性并以此改善机床在高速条件下的机械动态性能^[20-21]。玛嘎拉(2005)指出钻头的弯曲变形将在钻头横截面上产生应力,他利用测量钻削轴向力和扭矩不能分析钻头弯曲变形引起的应力,依据转子动力学理论,利用 Timoshenko 梁-轴理论,建立了微孔钻床主轴系统的动力学有限元模型。建立了钻头夹持长度、轴承刚度、轴承阻尼、主轴转速、系统偏心 and 钻削轴向力等因素与微钻头弯曲变形幅值之间的关系^[22]。Pei(2006)研究了微钻削用主轴系统的动态特性^[23];该课题组成员开发出了一种能稳定运转的进行 PCB 微细孔加工超高速电主轴,其最高转速可达 150kr/min^[24]。用于 PCB 行业的电主轴均采用无污染的油脂润滑轴承或空气轴承做支承。批量生产 PCB 钻铣削专用电主轴的国内厂家有石狮天马、重庆大学等,其总体水平与国外同类产品(如 Westwind, Pluritec, Excellon 等)相比还存在差距^[25-26]。本课题组设计和制造了一台最高转速可达 250kr/min 的高速钻孔机床,该机床为科研特设计有钻削力测定、快速更换主轴等功能^[27]。

目前,对电路板安装孔的钻削通常采用 PCB 钻孔机,主轴转速在 15kr/min 以下,其空气静压电主轴具有良好的旋转精度,钻床及横梁部件大多选用花岗岩或铸铁,XYZ 三轴的驱动进给,一般采用直线电机或者伺服电机来实现,工作台具有高速进给、高加减速的能力。通常,控制系统采用点位运动控制方式,能在瞬间快速准确定位、下钻,然后上提时,在离开 PCB 板面后可以一边上提一边快速移动到下一定位孔。在制造过程中通常运用花岗岩量具及激光干涉仪进行校验及校准。机床价格低廉,性能大都比较可靠^[16]。

1.3.2 印刷电路板机械钻孔加工机理

印刷电路板材料钻削机理研究是进行装备研制和钻头开发及工艺优化的前提和

必要条件。对印刷电路板的研究相对比较少,对于玻璃纤维复合材料的研究,对 PCB 钻孔的研究也有较大的参考价值,国内外主要研究现状见表 1-2 和表 1-3。在这些研究中,对 PCB 和玻璃纤维复合材料的钻削过程的理解,主要还都是通过钻削力的特征来推断,几乎不涉及钻屑形态、钻屑的排出运动等机理性研究;对钻削温度的研究尚属最基础性的温度测试,研究分析不深入;对加工质量等的研究也基本没有很好论及钻头(形状、角度等)、盖板垫板(厚度、材料等)等其他重要因素以及加工条件间的相互影响。同时,对于直径通常为 2mm 及以上的钻头钻削 PCB 的研究,尚较少涉及。

表 1-2 印刷电路板及玻璃纤维复合材料微孔(直径小于 1mm)机械钻削加工研究现状

作 者	钻 头	主 要 结 论
Watanabe 等 ^[27] , (2008)	$\phi 0.1$ (超硬质合金)	钻头在接触工件瞬间,有一向心运动,盖板能有效加强向心运动,径向跳动对孔壁质量及钻头磨损基本无影响
Hinds 等 ^[28] (2000)	$\phi 0.1, 0.25$ (PCB 加工)	轴向力和扭矩均随钻头磨损、进给量、深径比的增大而增大。纤维类型和铜层厚度也对轴向力和扭矩有影响
付连宇等 ^[29] (2008)	$\phi 0.35$ (PCB 加工)	钻头磨损随钻孔的增加而增大;钻削无卤素板时磨损比 FR4 快
郝旺身等 ^[30] (2002)	$\phi 0.4$ 不同修磨棱边长度和宽度	修磨标准微小钻头的棱边及横刃,横刃部位采取修磨
Nakagawa ^[31] (2007)	$\phi 0.6$ (PCB 加工)	钻削温度随扭矩增大升高,孔壁粗糙度随钻削温度升高而增大
马玉平等 ^[32] (2005)	$\phi 0.8$ 的未涂层和 TiC, DLC 涂层硬质合金钻头	钻削 PCB 板式临界进给速度是 1 591.2mm/min;涂层对钻削印刷电路板时的轴向力和扭矩影响不明显,但可明显提高孔壁质量

表 1-3 印刷电路板及玻璃纤维复合材料安装孔(直径大于 1mm)机械钻削加工研究现状

作 者	钻 头	主 要 结 论
Aoyama ^[33] (1995)	$\phi 1.0$	主偏角为 30° 时,孔壁表面粗糙度最大,可达 $50\mu\text{m}$
Inoue ^[34] (1997)	$\phi 0.4, 0.7, 1.0, 3.0, 5.0$	钻头半径对纤维束(玻璃纤维)宽度的比值对钻头寿命影响较大,比值越大,钻头钻削纤维束宽度也越大,钻头磨损也随之增大
Ogawa 等 ^[35] (1997)	$\phi 1$ 硬质合金钻头	横刃影响轴向力静态分力,主切刃主要影响轴向力动态分力并对孔壁质量有显著影响;孔壁粗糙度随钻削速度、进给量的增大而增大