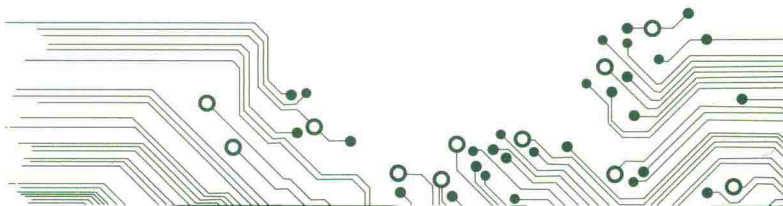
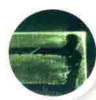


省级企业重点实验室资深技术团队经验总结
失效机理 + 失效分析思路 + 失效分析案例



PCB



PCB失效分析技术

陈 蓓 靳 婷 李志东 周 波 · 编著
乔书晓 马明诚 · 审校



科学出版社

PCB 失效分析技术

陈 蓓 靳 婷 李志东 周 波 编著
乔书晓 马明诚 审校



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容来自我国先进印制电路制造企业，是一群长期从事PCB失效分析的资深工程师的经验总结。作者以常见失效模式为切入点，针对分层起泡、可焊性不良、键合不良、导通不良和绝缘不良等，归纳出了失效机理、失效分析思路、失效分析案例。

全书共8章，主要内容包括常用分析技术、PCB分层失效分析、PCB可焊性失效分析、PCB金线键合失效分析、PCB导通失效分析、PCB绝缘失效分析、孔环裂纹失效分析案例和烧板失效分析案例。

本书可作为印制电路行业的培训用书，可用于工科院校电子工程相关专业教学，也可供电子制造企业的生产管理、质量管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

PCB失效分析技术/陈蓓等编著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-058917-0

I. P… II. 陈… III. 印刷电路-计算机辅助设计-应用软件
IV. TN410.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第218603号

责任编辑: 喻永光 杨 凯 / 责任制作: 魏 谨

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 张 凌

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

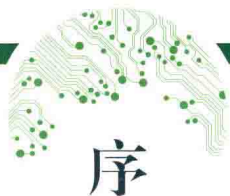
2018年11月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张: 10

字数: 180 000

定价: 88.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序

中国要强盛，就必须实现信息化与现代化相融合，就必须实现信息化与国防现代化、工业现代化、农业现代化、人民生活现代化并举。

“信息化”如果用“封装”来理解，那么集成电路（芯片）是一级封装，所有的整机，无论手机、计算机、电视机、摄影机……都是三级封装，而印制电路是二级封装。

印制电路起到承上启下、至关重要的作用，是不可或缺的。哪里有信息化、哪里有现代化，哪里就一定有印制电路板（PCB）和印制电路板组件（PCBA）。

失效分析是一项对产品失效现象进行系统性研究的课题，在提高产品质量，技术开发、改进，产品修复及仲裁失效事故等方面具有很强的实际意义。

西方发达国家早在20世纪60年代就成立了类似于“机械故障预防中心”的专业失效分析部门，遍布各行各业。而失效分析在我国的起步相对较晚，随着近年来的发展，全面开展失效分析的行业正如雨后春笋一般逐步发展壮大。在电子电路行业，一些（PCB）制造企业逐步成立了专业的失效分析实验室。

广州兴森快捷电路科技有限公司（简称兴森科技）是我国电子电路行业中的一家优秀民族企业，该公司不仅重视产品技术的提升，更重视产品的质量和保障。

该公司的分析测试实验中心，就是一个以PCB/PCBA失效分析及可靠性技术为重心的分析研发平台。

《PCB失效分析技术》一书的作者团队，陈蓓、靳婷、周波三位年轻人和李志东先生，是我们电子电路行业的后起之秀，多年从事PCB失效分析工作，有着较丰富的板级失效分析经验。他们以PCB为研究出发点，分别介绍了失效分析的概念、常见的PCB失效分析技术、失效机理和案例研究，从而

总结出了PCB失效分析基本流程和常见失效分析的思路，并汇总了常见失效分析的相关标准，为读者呈现了较完善的PCB失效分析技术和方法，将自身的经验提炼为分析方法体系，值得我们认真细读。

该书可以作为PCB失效分析技术的学习参考资料，能够为同行普及失效分析的基本知识，包括常见PCB失效类别和失效模式，以及分析思路。可以让更多的从事PCB工作的工程技术人员及操作人员，读后有所得，有所共鸣。

我们行业要迈向世界先进行列，就必须要认真进行研发和创新，要认真总结经验、教训，并且传递给大家。

兴森科技不仅重视企业技术的提升和规模的发展，更重视对员工技能的培养，该公司的分析测试实验中心把多年的失效分析经验认真总结成书，是非常值得称赞的好事情！

希望兴森科技和我们行业所有企业的工程技术人员，以及企业的管理团队，都能在研发创新过程中认真记录，及时总结经验、教训，并且把这些珍贵的总结与全行业分享，让我们行业的技术交流活动更加丰富多彩！

中国电子电路行业协会（CPCA）名誉秘书长





前言

笔者团队所在的广州兴森快捷电路科技有限公司（简称兴森科技），有着数量庞大的客户群体（活跃客户达3000家以上），涉及的产品应用领域涵盖军工、医疗、工控、通信、汽车电子、消费电子等，生产的PCB类型包括刚性、刚挠结合、HDI、金属基等，在高速高频、埋容阻/埋器件、电源厚铜、IC封装基板、IC测试板和高速光模块等方面的市场份额也在不断扩大。

随着业务的不断拓展与产品类别的不断增多，用户对产品可靠性的关注度越来越高。以前只有军工产品提可靠性要求，现在很多民品企业也会根据产品的使用要求，提各种各样的可靠性要求。不同类型的客户，不同的产品应用领域，对PCB的可靠性要求完全不同。比如，有的客户对PCB的可靠性要求是进行260℃、10h烘烤后，仍然能够满足PCB电气性能要求；有的客户要求是进行1000次以上IST循环后，产品电阻变化率小于10%；有的客户要求PCBA产品在25g加速度下满足30min共振要求；等等。

这就要求PCB厂商一方面要定位失效问题产生的根因，另一方面要满足不同类型客户对产品可靠性的要求。为此，兴森科技于2011年成立了分析测试实验中心——主要任务是PCB板级失效分析和可靠性技术研究。

分析测试实验中心自成立之日起，就主导了大量的失效分析案例，产品种类从刚性板到刚挠板，产品应用范围从民品到军品。在这一过程中，分析测试实验中心通过头脑风暴、参考大量文献资料、专门立项研究等方式，对一些常见失效有了更深的认识和理解。随着分析数据的积累，通过对分析过程进行完整记录和内部分享，总结失效分析的经验，逐步完善失效分析流程，并逐步完善失效分析案例库和失效分析思路，分析测试实验中心建立了一套失效分析方法。

失效分析作为一个方法体系，对工程师自身的能力有较高的要求。对于失效分析初学者或刚入职的工程师，在实际案例分析过程中，往往会存在思路不完善、验证步骤缺失、根因误判甚至错判的情况。因此，为了培训新入



前言

职的工程师，分析测试实验中心结合过往的失效分析经验，汇总了失效分析手段、分析案例，总结出分析思路及评判标准等，初步编写了一部《失效分析技术手册》(内部资料)。继内部培训取得较好的效果之后，《失效分析技术手册》又进一步被推广到公司的工艺、研发和品质等部门，且取得了较好的反响。为了进一步巩固和提升失效分析的技能，我们在这个基础上对内容进行了完善和细化，交付出版，希望能以此为基础，与同行一起交流和探讨失效分析技术。

本书的主要内容由陈蓓、靳婷、李志东和周波编写,相关实验和数据分析由李加全、崔思萍、王燕和梁耀晖等人完成。最后，全书由兴森科技总工程师乔书晓先生、CPCA 标准化工作委员会副主任马明诚先生审定。在成书过程中，兴森科技高级工程师胡梦海，洛阳电光设备研究所研究员吴晓鸣、王宏刚和高级工程师喻波提供了技术支持。此外，书中的部分内容还得到了许多同事和业界同仁的大力支持和帮助，在此一并表示感谢！

陈蓓



目 录

第1章 常用分析技术

1.1 切片分析	2
1.2 超声波扫描分析	3
1.3 X射线检测分析	6
1.4 光学轮廓分析	8
1.5 扫描电子显微分析	10
1.6 X射线能谱分析	14
1.7 红外光谱分析	16
1.8 短路定位探测分析	20
1.9 红外热成像分析	24
1.10 热分析技术	26
1.10.1 热重分析 (TGA)	26
1.10.2 静态热机械分析 (TMA)	28
1.10.3 动态热机械分析 (DMA)	30
1.10.4 差示扫描量热分析 (DSC)	33
参考文献	35

第2章 PCB分层失效分析

2.1 失效机理	38
2.2 失效分析思路	42
2.3 失效分析案例	45
2.3.1 外层铜箔与粘结片树脂之间分层	45
2.3.2 粘结片树脂之间分层	46
2.3.3 粘结片树脂与棕化面之间分层	48
2.3.4 玻纤与树脂之间分层	53
2.3.5 芯板铜层与树脂之间分层	56



目 录

参考文献	61
------	----

第3章 PCB可焊性失效分析

3.1 失效机理	63
3.2 失效分析思路	64
3.3 失效分析案例	64
3.3.1 镍金板	66
3.3.2 锡板	74
3.3.3 银板	79
3.3.4 OSP板	81
参考文献	83

第4章 PCB金线键合失效分析

4.1 键合过程	85
4.2 失效机理	87
4.2.1 键合参数不当	87
4.2.2 焊盘尺寸与金线直径不匹配	88
4.2.3 镀层异常	90
4.2.4 表面划伤	91
4.3 失效分析思路	91
4.4 失效分析案例	93
4.4.1 镀层异常	93
4.4.2 表面划伤	95
4.4.3 表面污染	96
参考文献	98



目 录

第5章 PCB导通失效分析

5.1 失效机理	99
5.2 失效分析思路	100
5.3 失效分析案例	100
5.3.1 线路开路	100
5.3.2 孔开路	103
5.3.3 内层互连失效	106
参考文献	108

第6章 PCB绝缘失效分析

6.1 概 述	110
6.1.1 电介质	110
6.1.2 绝缘电阻	110
6.2 失效机理	111
6.2.1 电化学迁移 (ECM)	111
6.2.2 导电阳极丝 (CAF)	111
6.2.3 化学腐蚀	113
6.3 失效分析思路	113
6.4 失效分析案例	115
6.4.1 导电阳极丝 (CAF)	115
6.4.2 化学腐蚀	117
参考文献	121

第7章 孔环裂纹失效分析案例

7.1 失效样品信息	122
7.2 失效位置确认	122
7.3 失效原因分析	125

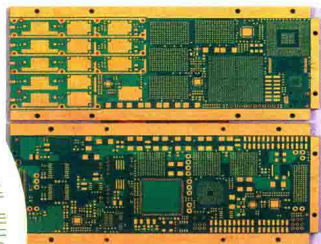
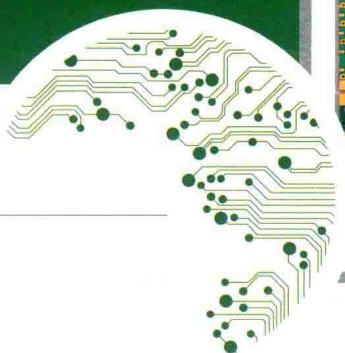


目 录

7.3.1 镍金层厚度测量·····	125
7.3.2 镍层的微观形貌和元素分析·····	126
7.3.3 板材热膨胀系数测量·····	126
7.4 根因验证·····	128
7.5 分析结论和改善建议·····	129
第8章 烧板失效分析案例	
8.1 失效样品信息·····	130
8.2 失效位置确认·····	130
8.3 失效原因分析·····	133
8.3.1 NPTH附近绝缘劣化·····	134
8.3.2 L2~L3层层间绝缘劣化·····	136
8.4 根因验证·····	136
8.5 分析结论和改善建议·····	139
附 录 PCB失效分析判定标准·····	140

第1章

常用分析技术



所谓失效分析，就是基于失效现象，通过信息收集、外观检查以及电气性能测试等，确定失效位置和可能的失效模式，即失效定位；然后针对失效模式，采取一系列的分析手段展开原因分析，并进行根因验证；最后根据分析过程所获得的测试数据，编制分析报告并提出改善建议。基本流程如图 1.1 所示。

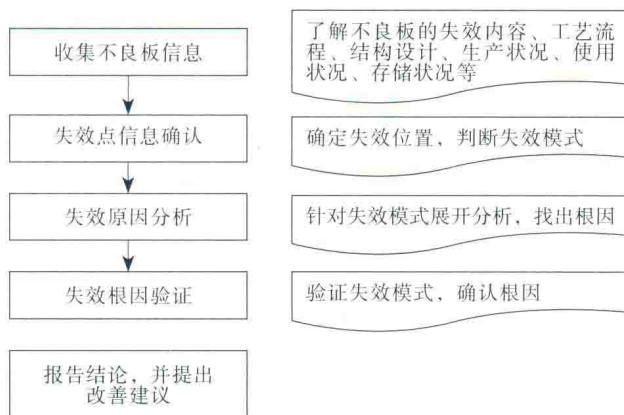


图 1.1 失效分析的基本流程

本章在分层起泡、可焊性不良、键合不良、导通不良和绝缘不良这五种失效模式的基础上，介绍常用的分析技术，如切片分析、超声波扫描分析、X 射线检测分析、光学轮廓分析、扫描电子显微分析、X 射线能谱分析、红外光谱分析、短路定位探测分析、红外热成像分析和热分析技术等。其中，切片分析和热分析属于破坏性分析技术，一旦使用了这两种技术，样品就破坏了，无法恢复。

另外，出于制作样品的要求，进行扫描电子显微分析和 X 射线能谱分析时，也可能需要部分破坏样品。因此，进行分析时要注意使用方法的先后顺序，一般应该遵循从简单到复杂、从外到里、从不破坏样品到破坏样品的基本原则。

1.1 切片分析

通用的切片制作方法一般参考 IPC-TM-650 2.1.1 节的要求。通过切片分析可以得到反映 PCB（通孔、镀层）质量和 PCBA 焊点（IMC、空洞）质量等丰富的信息，为下一步的产品质量改进提供依据。

切片制作一般包括取样、镶嵌、切片、研磨、抛光、微蚀等一系列步骤，



图 1.2 金相显微镜

目的是获得光洁的 PCB 横截面结构。制作好的切片可通过金相显微镜和扫描电子显微镜等进行微观细节分析。借助金相显微镜的明场和暗场，在不同的光场形式下进行观察，适用于孔壁质量、芯吸、晕圈等各项 PCB 可接受性标准的分析，操作方便，使用范围较广。图 1.2 为金相显微镜的外观图，其放大倍率从 50 到 1000 不等。

切片按研磨方向分为垂直切片和水平切片两种。

垂直切片即沿垂直于板面的方向切开，观察剖面状况，通常用来观察孔铜品质、叠层结构及内部结合面的状况，是切片分析的常用方式。水平切片是顺着 PCB 的叠合方向由外层向内层研磨，以观察每一层面的整体状况，通常用来辅助垂直切片进行品质异常的分析判定。

为观察晕圈而制作的垂直切片和水平切片如图 1.3 所示。垂直切片可以直观地观察到整个孔壁周围晕圈生长的状况，水平切片可以确认局部位置孔壁间晕圈相连的状态。

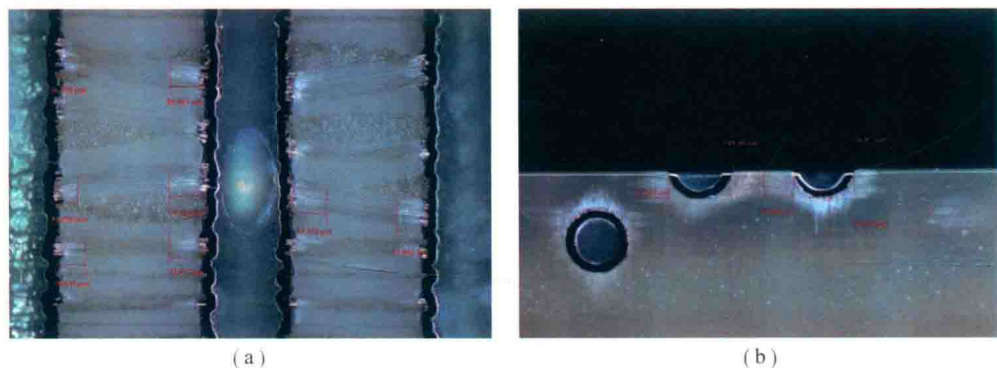
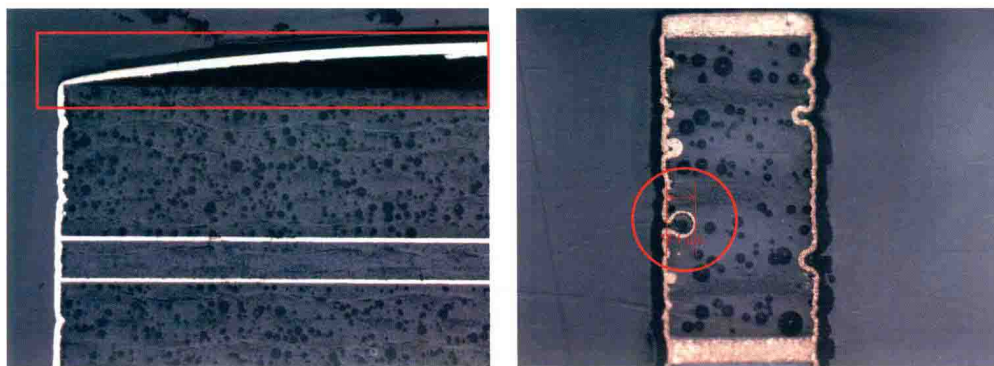


图 1.3 垂直切片 (a) 和水平切片 (b)

此外，还可以利用切片观察分层界面和孔壁质量状况等。由图 1.4 (a) 可见，分层发生在外层铜箔与粘结片（半固化片）树脂之间。由图 1.4 (b) 可见，孔壁的表面粗糙度为 $73.1\mu\text{m}$ ，比业内要求（低于 $30\mu\text{m}$ ）大很多。



(a) 分层界面

(b) 孔壁质量

图 1.4 利用切片观察分层界面和孔壁质量

只有正确地判读切片，才能做出正确的分析，给出有效的解决措施。因此，切片的制作质量尤为重要，质量差的切片会给失效分析带来严重的误导和误判。切片制作具有破坏性，一旦进行了切片，样品就必然遭到破坏。同时，切片的制样要求高，耗时也较长，需要训练有素的技术人员来完成。

1.2 超声波扫描分析

超声波是频率超过 20kHz 的声波，人耳无法听到。任何频率的超声波都不能穿透真空，而频率大于 10MHz 的超声波无法穿透空气。超声波显微镜正是利用此特性实现缺陷识别的，如使用透射模式（Through-Scan, T-Scan）时，若材料内部的分层、裂纹、空洞和气泡缺陷等位置充满空气，超声波无法透过，那么在最终的扫描图像中，无法接收到超声波信号的位置就是缺陷位置。

超声波扫描显微镜（Scanning Acoustic Microscope, SAM）的主要工作模式是层扫描工作模式（C 模式），因此也简称 C-SAM。超声波扫描显微镜的外观如图 1.5 所示。

1. 超声波扫描显微镜的工作原理

如图 1.6 所示，将电压施加到超声波探头上，由探头产生高频超声波，通过耦合介质到达样品，并穿透样品界面，最终根据接收到的信号（透射或反射）形成超声波扫描图像。



图 1.5 超声波扫描显微镜

超声波是由物体机械振动产生的一种机械波。在两种不同材料的结合面，当声阻抗差大于 0.1% 且界面明显大于波长时发生反射，碰到空气（分层或离层）时 100% 反射^[1]。图 1.7 为超声波传播示意图。

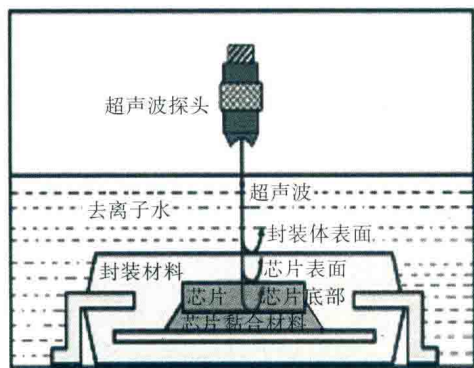


图 1.6 超声波扫描显微镜的工作原理

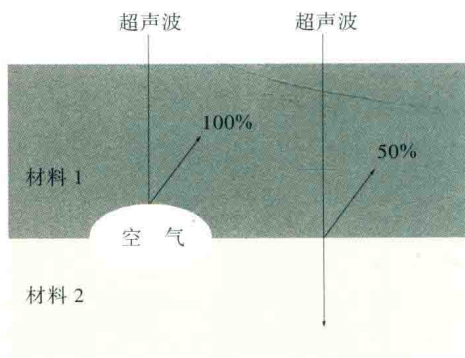


图 1.7 超声波传播示意图

2. 超声波扫描显微镜的工作模式

1) 单点扫描工作模式 (A-Scan)

该模式根据反射波的相位和大小来检测缺陷，是一种精确的检测方式，主要用于确认某一点的检测结果。其工作原理如图 1.8 所示。

2) 截面扫描工作模式 (B-Scan)

该模式能够显示某个界面垂直 X 或 Y 方向的截面图，是 A-Scan 中的某一点沿 X 或 Y 方向的线扫描，可用于检测裂缝、空洞以及芯片的倾斜等缺陷。其工作原理如图 1.9 所示。

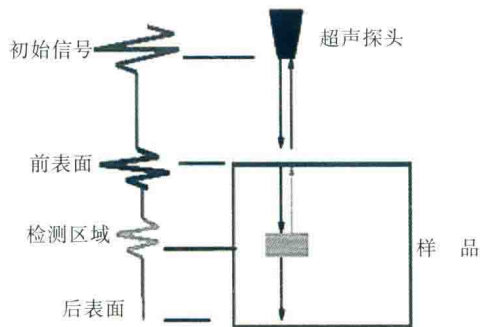


图 1.8 A-Scan 的工作原理

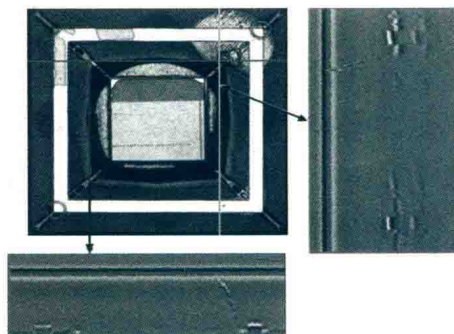


图 1.9 B-Scan 的工作原理

3) 层扫描工作模式 (C-Scan)

相较于 A-Scan 和 B-Scan，该模式能够实现样品的平面扫描，并显示对应

的二维图像。C-Scan 可以有选择地使超声波聚焦在待检测的界面上，超声波探头以逐点扫描的方式对该平面的各点进行扫描，对反射波进行收集并且通过软件自动识别分类。C-Scan 的工作原理如图 1.10 所示。



图 1.10 C-Scan 的工作原理

C-Scan 能得到样品水平截面的有效信息，但一次只能针对某一层界面进行检测。对一些内部界面层数和结构不清楚的器件进行检测时，该模式无法发挥作用。超声波断层显微成像（TAMI）扫描可以解决上述问题，其工作原理如图 1.11 所示。TAMI 可以进行多层均匀层扫描，对器件的表面、内部的黏合层以及空洞等缺陷进行扫描，有助于分析器件内部的缺陷。

4) 透射扫描工作模式（T-Scan）

T-Scan 的工作原理如图 1.12 所示，从探头处发出的超声波信号穿透器件后，被位于器件下方的接收器接收，之后系统根据接收到的信号得到 T-Scan 图像。超声波遇到空气时会 100% 反射而不会透射，接收器接收不到信号，在此位置呈现黑色，据此可以判断器件内部有无分层等缺陷。

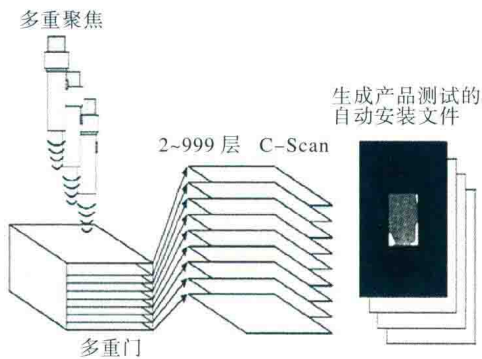


图 1.11 TAMI 的工作原理

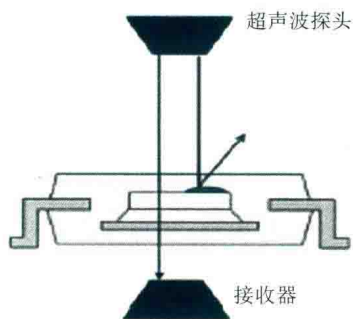


图 1.12 T-Scan 的工作原理

3. 应用范围

图 1.13 为典型的超声波扫描效果图，图（a）为反射模式，发白区域有分层缺陷；图（b）为透射模式，发黑区域有分层缺陷。

需要注意的是，超声波扫描的分辨率是有限的。理论上来说，提高超声波频率可以实现高分辨率的检测，甚至可以检测到焊点内部的空洞。但是其穿透

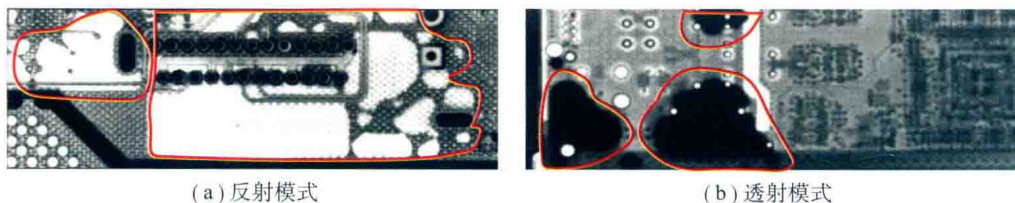


图 1.13 典型的超声波扫描图片

能力也会明显下降，测量深度受限。因此，需选择适当的超声波频率来实现不同的检测目的。并且，辨别缺陷时，需对照样品的相应位置图形设计和器件分布等综合情况做出判断。

1.3 X 射线检测分析

X 射线 (X-Ray) 是一种波长极短、能量很大的电磁波，它的光子能量比可见光的光子能量大几万甚至几十万倍，具有很强的穿透性，在物理学、工业、农业和医学上作为一种无损检测的手段得到了广泛应用。在 PCB 制造及表面贴装行业，X 射线检测机 (图 1.14) 是一种常用的检测设备，可对细小的特征进行不同角度、多方向的观察。



图 1.14 X 射线检测机

1. 检测原理

X 射线检测机类似于 X 射线投影显微镜，X 射线发射管产生高能 X 射线，照射到待测样品表面，根据样品材料本身密度与原子量，不同成分的 X 射线吸收量不同，图像接收器上产生深浅不一的投影，密度越高的物质阴影越深，据此可对样品的不同材料进行分辨。X 射线检测的工作原理如图 1.15 所示。此外，越靠近 X 射线发射管的阴影越大，反之阴影越小，即几何放大率的原理^[2]，如图 1.16 所示。

2. 应用范围

X 射线检测为表面贴装的生产检测手段带来了新的变革，不仅有助于提高生产工艺水平、生产质量，还有助于及时发现电子组装故障。在 PCB/PCBA 失