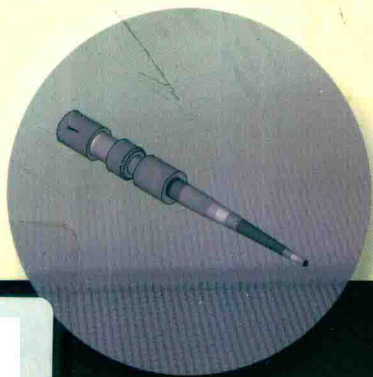


Chaosheng Yinxian Jianhe Zhiliang Jiance
yu Kongzhi Jishu

超声引线键合质量检测 与控制技术

冯武卫 李鹏鹏 郑雄胜 等 | 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

Chaosheng Yinxian Jianhe Zhiliang Jiance
yu Kongzhi Jishu

超声引线键合质量检测 与控制技术

冯武卫 李鹏鹏 郑雄胜 等 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书是为了适应新时期经济社会发展对电子封装专业人才的需求而编写的,内容主要涉及作者在电子封装引线键合质量检测和控制领域所获得的一些科研成果。全书包括超声引线键合行业背景、先进的键合质量检测方法、信号检测及处理方法、模式识别与人工智能等内容。

本书可供全国高等院校机械类、电子类等工程专业本科生、研究生选读,也可作为相关专业科研人员的学习用书或参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

超声引线键合质量检测与控制技术 / 冯武卫等著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.8
ISBN 978-7-5680-4020-4

I. ①超… II. ①冯… III. ①引线技术-键合工艺-质量检验 ②引线技术-键合工艺-质量控制 IV. ①TN405.96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 180808 号

超声引线键合质量检测与控制技术

冯武卫 李鹏鹏 郑雄胜 等著

Chaosheng Yinxian Jianhe Zhiliang Jiance yu Kongzhi Jishu

策划编辑:万亚军

责任编辑:邓薇

封面设计:原色设计

责任校对:李琴

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市铭星图文工作室

印 刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:13 插页:2

字 数:218千字

版 次:2018年8月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-115 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

引线键合是一种利用超声波能量、压力(有些设备会用到加热)将 IC 芯片引脚与外围封装引脚用金属细丝(包括 Au、Cu、Al 等)连接起来的工艺技术。引线键合从技术层面来说相对复杂,在工厂实际加工过程中,由于成本低廉、精度高以及键合点可靠性高等因素,采用引线键合封装的企业已占整个微互连封装行业的 90%左右。此外,倒装焊设备由于价格昂贵,通常适用于高端集成电路封装,因此,在未来的一段时间内,引线键合一直会是 IC 封装微互连的主要工艺形式,发展前景十分广阔。

在引线键合技术发展中,键合速度是一个重要的指标。世界各知名公司纷纷加大投资研发高性能引线键合机,如 ASMPT 香港公司的 iHawk-V 型自动键合机采用 12 μm Au 线,焊点间距为 30 μm ,焊线速度为每秒 17 线;美国 K&S 公司的新一代高速超微细间距(ultra-fine-pitch)键合机 ConnX-LED 焊线速度达到每秒 21 线,焊点间距为 25 μm ;德国 Hesse 公司的新一代 Bondjet BJ820 全自动键合机焊线速度达到每秒 25 线。国内高性能自动键合机的研制起步较晚,随着国家科研大力投入,也取得了一些可喜的成果,如中国电子科技集团第四十五研究所在 2008 年研制出的 WB-8001 型 LED 全自动引线键合机焊线速度达到每秒 10 线。

然而,由于任何一个键合点的缺陷都会导致整个 IC 电路失效,因此如何保证键合质量,对键合点的质量进行可靠检测是 IC 封装界一直探索的问题。近年来,封装界已明显加大了对键合质量的研究力度。在键合失效的基础研究方面,主要集中在材料和工艺问题上,包括引线和基板材料的特性、键合温度和时间、超声波频率和强度等;对引线键合的可靠性模型和失效机理、工艺参数对键合质量的影响、引线的弧线形式以及工作台运动精度的影响等进行了深入研究,取得了很大进展,为键合失效的影响因素研究积累了丰富的经验。

在键合质量检测方面,目前采用的主要手段之一是通过显微镜人工观测键合点的形状、位置、黏附和根部变形情况等,然后抽样进行破坏性抗拉试验。这种方法耗时费力,且容易引入人为误差。美国南卫理公会大学(Southern Methodist University)、韩国首尔大学(Seoul National University)、我国西安电子科技大学等采用图像处理和识别的方法检测键合点质量。这种方法与人工观测方法相比,具有速度快、精度高等特点;缺点是仍属离线方法。从实用性、效率和先进性等方面考虑,最理想的方法是采用在线检测,这也是长期以来 IC 封装界致力追求的一个目标。IC 技术日新月异,质量竞争日趋激烈,美国、欧洲各国、日本、东南亚各国等都纷纷加大了研究力度、致力探索。我国虽起步较晚,但有全球最大的 IC 封装潜在市场和加工能力,市场需求与日俱增,质量竞争日益加剧,对高效在线检测技术的研究已成当务之急。

本书重点介绍基于耦合信息的超声键合质量在线检测理论及方法,对键合过程机理、关键部件动态特性、键合质量影响因素、耦合信息获取、信号特征提取、模式识别以及相关理论分析和实验方法进行了深入的探讨。目前国内关于引线键合方面的书籍较少,相关科研工作者的资料获取途径主要是期刊论文等,因此,本书的编写能为引线键合领域工作者提供一些基础知识及研究方法。

本书共分 8 章,第 1 章到第 3 章由冯武卫编写,第 4 章由李鹏鹏编写,第 5 章由郑雄胜编写,第 6 章到第 8 章由冯武卫、郭磊、孟仲康合作编写,冯武卫负责全书的统稿和修改工作。

在本书的编写过程中,参考了大量相关文献资料,在此向这些参考文献的作者表示真诚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2018 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 超声引线键合质量检测与控制的意义	1
1.2 引线键合背景知识	4
1.2.1 引线键合技术	4
1.2.2 超声热压球形键合工艺及键合原理	7
第 2 章 键合失效分析及键合质量检测方法	10
2.1 引言	10
2.2 键合质量检测技术	12
2.2.1 质量检测方法	12
2.2.2 传统检测方法	13
2.2.3 现代检测方法	17
本章参考文献	24
第 3 章 键合系统关键部件机理分析	34
3.1 引言	34
3.2 换能器系统模态分析	35
3.2.1 模态分析理论基础	35
3.2.2 换能器有限元模型	36
3.2.3 换能器模态分析	37
3.3 键合工具振动特性分析	39
3.3.1 键合工具有限元模型	39
3.3.2 键合工具模态分析	40
3.3.3 键合工具振动响应分析	43

3.4 键合球变形分析	50
3.4.1 键合球接触模型	51
3.4.2 不同加载压力对键合球变形的影响	52
3.5 本章小结	55
本章参考文献	55
第4章 压电效应机理分析	58
4.1 引言	58
4.2 压电效应	59
4.2.1 压电效应边界条件	59
4.2.2 换能器等效模型与分析	62
4.3 键合质量检测存在困难	69
4.4 本章小结	70
本章参考文献	71
第5章 键合质量检测系统实验台分析	74
5.1 引言	74
5.2 检测系统实验台建立	75
5.3 键合实验设计与设备工艺参数优化	76
5.3.1 键合实验设计	76
5.3.2 键合工艺参数优化	79
5.4 压电换能器耦合电信号获取与预处理	81
5.4.1 数据采集卡的选择	82
5.4.2 数据测量电路设计	84
5.4.3 数据触发功能及数据采集	85
5.4.4 数据预处理	86
5.5 通过超声电信号识别键合工艺参数	88
5.5.1 键合时间的识别	88
5.5.2 超声功率的识别	90
5.5.3 键合压力的识别	91
5.6 键合失效模拟实验及分析	93

5.6.1 键合设备故障模拟	93
5.6.2 四类常见的键合失效模式	93
5.6.3 键合点抗剪强度测定	95
5.7 本章小结	96
本章参考文献	97
第6章 基于时频分析的键合过程质量检测方法	99
6.1 引言	99
6.2 基于 SPWD 的特征提取和分析	100
6.2.1 WVD 方法理论	100
6.2.2 基于 SPWD 的超声电信号特征提取	101
6.2.3 利用 BP 神经网络进行失效模式识别	108
6.2.4 SPWD 方法结果讨论	112
6.3 基于 EMD 的特征提取和分析	112
6.3.1 EMD 方法实现过程	113
6.3.2 基于 EMD 的超声电信号特征提取	114
6.3.3 EMD 方法存在的问题	121
6.4 两种时频分析方法结果比较	121
6.5 本章小结	122
第7章 基于超声电信号包络分段细化特征提取方法	124
7.1 引言	124
7.2 包络分段细化特征提取方法	125
7.2.1 超声电信号滤波	126
7.2.2 滤波信号的包络计算	128
7.2.3 分段细化特征提取技术	130
7.2.4 四类失效模式的识别	133
7.2.5 键合点抗剪强度识别	136
7.3 本章小结	140
第8章 键合质量控制方法初探	142
8.1 键合质量控制方面存在的难题	143

8.2 键合质量控制方法构思	144
8.2.1 键合机理分析	144
8.2.2 键合过程中的信号处理技术	145
8.2.3 键合质量控制策略与实用方法研究	147
本章参考文献	149
附录 A 换能器建模及模态分析 ANSYS 命令流	153
附录 B 键合工具动态分析 ANSYS 命令流(无接触)	158
附录 C 键合工具动态分析 ANSYS 命令流(有接触)	161
附录 D 键合工具模态分析 ANSYS 命令流	165
附录 E 键合工具振动响应分析及接触 ANSYS 命令流	167
附录 F 键合球振动响应分析及接触 ANSYS 命令流	171
附录 G Matlab 程序特征搜索	185
附录 H Matlab 程序短时傅里叶变换	187
附录 I Matlab 程序包络极值	190
附录 J Matlab 程序特征提取主函数	192

第 1 章 绪 论

1.1 超声引线键合质量检测与控制的意義

集成电路(integrated circuit, IC)产业的迅速发展,强有力地推动了世界经济的增长。IC 制造产业不仅对国民经济影响巨大,同时对国家安全、国防建设也有着举足轻重的意义,已经成为制造业最重要的领域之一。根据世界半导体贸易统计组织 WSTS 的统计,2003 年至 2016 年全球半导体行业销售额复合增速为 5.21%,其中 2016 年全球半导体行业实现销售额 3389 亿美元,同比增长了 1.12%;2017 年全球半导体行业销售额达到 4087 亿美元。WSTS 估测 2018 年全球半导体行业销售规模达到 4373 亿美元。在全球 IC 制造领域中,欧洲各国、美国、日本几乎垄断了整个行业,出现了摩托罗拉、英特尔、三星、飞利浦等一大批行业巨头。我国在 IC 领域发展较为缓慢,其产量仅占世界产量的 2%左右,在技术方面总体上还存在两代左右的差距。进入 21 世纪以来,国内加大了 IC 产业的支持力度,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部在未来发展战略报告中指出:从 2013 年到 2018 年,IC 制造产业将作为制造业中的一项重大项目而大力扶持。

IC 设计、IC 制造、IC 封装测试共同构成了 IC 制造业的三大支柱。其中,IC 封装测试技术是集成电路制造过程中一个极其重要的步骤,它不但关系到电路整体性能的可靠性、稳定性、电性能和热性能,而且对系统整体的微型化都有显著的影响。2016 年国内 IC 整体产业销售规模达 4335.5 亿元,其中封装测试行业产业销售收入由 2015 年的 1327.8 亿元增至 1523.2 亿,同比增长 14.7%。

IC 各项可靠性考核指标,如外形尺寸、键合强度以及各种机械和实验环境条件等,与 IC 封装的性能和质量都有密切的关系。因此,IC 封装技术的可靠性对于整个 IC 系统的性能和质量有着极其重要的影响。

IC 封装的定义是把各个元件(构成电子器件)以及组成部件,按照设计要求合理放置、引脚连接以及与外部环境隔离,最终起到确保芯片不受腐蚀破坏和外部环境影响的作用。在国际上,IC 封装测试产业早已成为独立的产业,它在电子集成设备的短、小、便携化等方面的实现起到了至关重要的作用。在工业实际中,随着电子元件在各个领域的应用愈来愈广泛,如果 IC 芯片中的各个元器件没有封装保护,其整体性能将难以实现。因此,IC 封装测试是集成电路制造中实现各种电气性能的重要保障。广义上讲,IC 封装总体可分为 4 级封装形式:晶片级连接、单晶片或多个晶片组件或元件封装、印刷电路板级封装和整机组装。按照技术基础进行分类,IC 封装又可分为 4 种基础技术:成膜技术、微互连技术、基板技术、密封保护技术。其中尤其以微互连技术最为重要,不论是将 IC 芯片装连到载体上还是固定在基板上,其中的引脚电气连接都将用到微互连技术。当前,微互连技术主要包含 3 种:引线键合(wire bonding, WB)、载带自动键合(tape automated bonding, TAB)和倒装封装(flip chip, FC)。图 1-1 是 3 种具有代表性的微互连形式示意图。其中,图 1-1(a)是以引线键合为代表的微互连形式,图 1-1(b)是以载带自动键合为代表的微互连形式,图 1-1(c)是以倒装封装为代表的微互连形式。3 种微互连形式适用于不同的封装场合,已经被广泛应用于 IC 封装芯片互连领域。

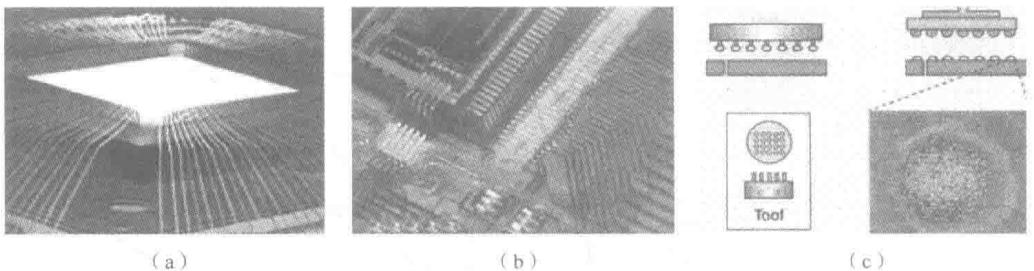


图 1-1 3 种具有代表性的微互连形式

(a)引线键合;(b)载带自动键合;(c)倒装封装

引线键合是一种利用超声波能量、压力(有些设备会用到加热)将 IC 芯片

引脚与外围封装引脚用金属细丝(包括 Au, Cu, Al 等)连接起来的工艺技术。引线键合的技术层面相对复杂,在工厂实际加工过程中,由于成本低廉、精度高以及键合点可靠性高等特点,引线键合技术已占整个微互连封装行业的 90% 左右。此外,由于倒装封装设备价格昂贵,通常适用于高端集成电路封装,因此,在未来的一段时间内,引线键合一直会是 IC 封装微互连的主要工艺形式。图 1-2 给出了全球引线键合的发展趋势,可看出其发展按指数规律递增,发展前景十分广阔。

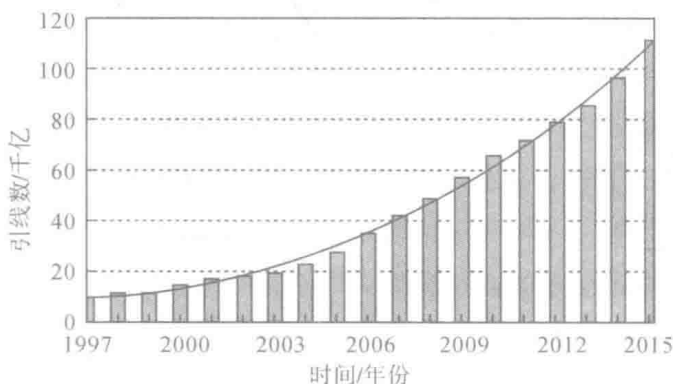


图 1-2 全球引线键合的发展趋势

随着 IC 市场的高速、大规模扩张,其对 IC 后道封装工序的引线键合设备的焊线速度、精度、可靠性等提出了更高的要求。世界各知名公司纷纷加大投资研发高性能引线键合机,如 ASMPT 香港公司的 iHawk-V 型自动键合机采用 $12\ \mu\text{m}$ Au 线,焊点间距为 $30\ \mu\text{m}$,焊线速度为每秒 17 线;美国 K&S 公司的新一代高速超微细间距(ultra-fine-pitch)键合机 ConnX-LED 焊线速度达到每秒 21 线,焊点间距为 $25\ \mu\text{m}$;德国 Hesse 公司的新一代 Bondjet BJ820 全自动键合机的焊线速度达到每秒 25 线。国内高性能自动键合机的研制起步较晚,随着国家科研大力投入,也取得了一些可喜的成果,如中国电子科技集团第四十五研究所在 2008 年研制出的 WB-8001 型 LED 全自动引线键合机的焊线速度达到每秒 10 线。

然而,高密度、高速度的发展趋势为引线键合机注入了机遇的同时也对可靠性提出了挑战。由于任何一个键合点的缺陷都会导致整个 IC 电路失效,如何保证键合质量,对键合点的质量进行可靠检测是 IC 封装界一直探索的问题。近年来,封装界已明显加大了对键合质量的研究力度,几乎每一篇涉及引线键

合的研究论文都要讨论键合失效问题。在键合失效的基础研究方面,主要集中在材料和工艺问题上,包括引线 and 基板材料的特性、键合温度和时间、超声波频率和强度等,对引线键合的可靠性模型和失效机理、工艺参数的影响、引线的弧线形式、工作台运动精度的影响等进行了深入研究,取得了很大进展,为研究键合失效的影响因素积累了丰富的经验。

在键合质量检测方面,目前采用的主要手段之一是通过显微镜人工观测键合点的形状、位置、黏附和根部变形情况等,然后抽样进行破坏性抗拉试验。这种方法耗时费力,且容易引入人为误差。美国南卫理公会大学、韩国首尔大学、我国西安电子科技大学等采用图像处理和识别的方法检测键合点质量。这种方法与人工观测相比,具有速度快、精度高等特点;缺点是仍属离线方法,对键合点的状态和工艺参数的缺陷不能给出及时的报告,不利于对工艺过程进行及时调整。从实用性、效率和先进性等方面考虑,最理想的方法是采用在线检测,这也是长期以来 IC 封装界致力追求的一个目标。IC 技术日新月异,质量竞争日趋激烈,美国、欧洲各国、日本、东南亚各国等都纷纷加大了研究力度、致力探索。我国虽起步较晚,但有全球最大的 IC 封装潜在市场和加工能力,市场需求与日俱增,质量竞争日益加剧,对高效在线检测技术的需求已成当务之急。

本书重点介绍基于耦合信息的超声引线键合质量在线检测理论及方法,对键合过程机理、关键部件动态特性、键合质量影响因素、耦合信息获取、信号特征提取、模式识别以及相关理论分析和实验方法进行了深入的研究和探讨。

1.2 引线键合背景知识

1.2.1 引线键合技术

引线键合技术尽管是最早发展起来的 IC 微互连技术,但是由于可靠性高、成本低等优势,在未来一定时期内,它仍将是 IC 微互连技术中占支配地位的封装技术。引用国际封装领域著名专家 G. G. Harman 的描述——引线键合广泛的工业基础、优良的散热性能、无可替代地对各种器件的适应性,在可以预见的

未来将一直处于支配地位而占据较大的市场份额。

引线键合金属引线通常为几十微米的 Au 丝、Cu 丝和 Al 丝,其形式多种多样,如果按照能量提供方式划分,可分成热压引线键合(thermocompression wire bonding)、超声引线键合(ultrasonic wire bonding)、超声热压引线键合(thermosonic wire bonding),现分别描述如下。

(1)热压引线键合(T/C wire bonding):热压引线键合是指依靠加键合工具的压力和基板加热共同作用而完成的键合。加热温度一般在 280~380 ℃之间,键合过程需要 1 s 左右。热压引线键合是集成电路封装中最早采用的工艺方法,由于其键合过程效率较低,目前已很少被采用。

(2)超声引线键合(U/S wire bonding):超声引线键合主要以 Al 丝的常温键合为主。键合过程是在横向高频超声振动和键合工具静压力的共同作用下完成的。超声波加载频率一般在 60 kHz 以上,一般 25 ms 左右的时间就可以完成键合过程。超声引线键合的特点:加载的超声振动易于金属引线的变形和焊盘表面坚硬氧化层的去除。

(3)超声热压引线键合(T/S wire bonding):超声热压引线键合主要应用于硬度更高的 Au 丝或 Cu 丝。尽管超声热压引线键合也需要超声能量,但它与超声引线键合最主要的区别是:①需要外部加热;②与 Al 丝不同的是,Au 丝或 Cu 丝表面没有坚硬的氧化层,键合过程易于完成,键合时间短。键合过程中的键合温度一般在 150~200 ℃之间,键合时间仅需 5~20 ms。在键合过程中,键合工艺参数如超声能量、键合温度、键合时间、键合工具静压力等对键合质量有一定的影响。因此键合之前需对工艺参数进行优化。为了直观地描述上述 3 种引线键合方式的差别,表 1-1 给出了 3 种引线键合方式的优缺点。

表 1-1 3 种引线键合方式比较

键合方式	优 点	缺 点
热压引线键合	①控制方法简单; ②键合材料不会脆裂; ③键合方向不受限制(指球形); ④可键合较粗糙的表面和不易氧化的材料; ⑤可键合易碎器件	①对键合表面的清洁度要求较高; ②会加速形成金属间隔层; ③使用温度(一般高于 300 ℃)会影响器件质量; ④加快球形键合工具的磨损

续表

键合方式	优点	缺点
超声引线键合	①对键合表面的清洁度要求较低； ②无虚焊； ③无金属间隔层问题； ④只需较低的室内温度； ⑤键合点小、易补焊	①控制方法较复杂； ②键合四周，特别是压焊丝末端易脆裂； ③键合表面光滑度要求较高； ④键合方法单一，由前向后
超声热压引线键合	①所需温度较热压引线键合低； ②可键合不能承受高温的器件； ③能延缓金属间隔层的形成； ④键合速度快	①控制方法复杂，需要调节温度、压力、时间、功率等； ②在一定温度（一般在 150~175℃）时，会发生虚焊及金属间隔层； ③键合表面清洁度要求较高

超声热压引线键合是目前应用最为广泛的一种键合技术，它兼顾热压引线键合和超声引线键合的优点，其简单的实现过程如图 1-3 所示，键合过程涉及了超声能量(U_s)、键合静压力(F)、加热温度(T)三个方面的因素。这种技术具有操作方便、键合点牢固等优点，一般应用于高速自动化引线键合。目前，超过 90% 的集成电路封装采用超声热压引线键合，最快的键合速度可以达到每秒 25 线。本书以超声热压引线键合设备为主要研究对象，研究其键合机理以及键合质量检测技术。

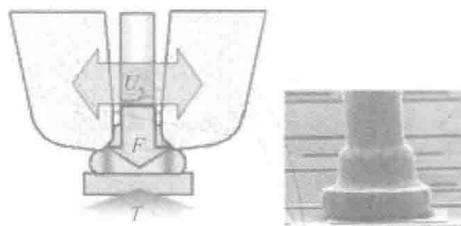


图 1-3 超声热压引线键合过程

按照键合工具的结构，引线键合又可以分为楔形键合(wedge bonding)和球形键合(ball bonding)。楔形键合采用的键合工具为楔形劈刀(wedge)，而球形键合采用的键合工具为毛细管劈刀(capillary)。图 1-4 给出了楔形键合和球形键合

形键合两种键合形式。在封装工厂中,有大约 80% 以上的集成电路封装采用球形键合工艺,其中以金丝球键合为主,它是目前键合速度最快的一种引线键合方式。需要说明的是,鉴于球形键合的优良特性及广泛应用,本书在研究键合质量检测方法的过程中,重点针对超声热压球形键合设备进行相关实验和质量检测方面的深入研究。由于各种键合形式之间存在相似性原理,因此,本书的方法对其他键合形式质量检测亦有借鉴作用。

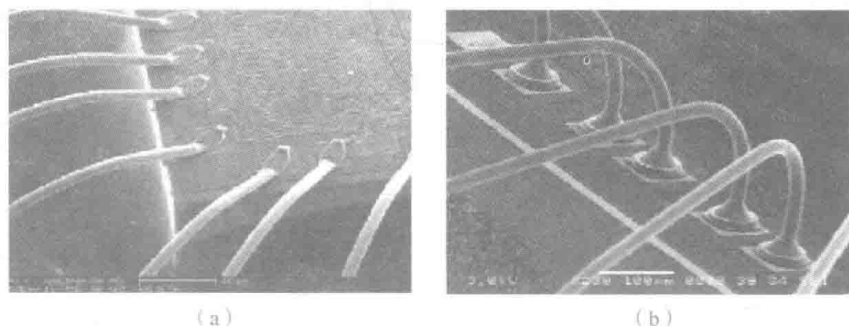


图 1-4 两种不同的键合形式

(a)楔形键合;(b)球形键合

1.2.2 超声热压球形键合工艺及键合原理

本书以超声热压球形引线键合设备为研究对象,对键合过程机理以及键合质量检测技术进行系统的研究。对于超声热压球形键合工艺,具体可按图 1-5 所示的 6 个步骤来描述:

(1)将金属引线穿过键合工具,高压放电系统使金属引线在键合工具以外的伸出部分熔化,引线在表面张力的作用下熔化并凝固形成球形;

(2)金属球在键合工具下移动,与待键合表面发生冲击接触,此时线夹处于开启状态;

(3)在高频横向超声振动和键合工具静压力的共同作用下,键合工具、金属球、待键合表面发生相互摩擦,同时金属球表面金属和待键合表面金属发生原子间互扩散以及金属塑性变形,形成牢固键合,第一次键合完成(球键合点);

(4)键合工具按照预先设定好的路径运动至第二键合点上方,准备第二键合点键合;

(5)第二次键合过程与第一次键合过程原理基本相似,其主要区别在于此

键合点是利用键合工具一侧尖端对金属引线施加超声振动以及静压力,因此所形成的键合点形状不一样;

(6)关闭线夹,此时第二键合点键合完毕,键合工具上移至线夹位置,在这个过程中金属引线被扯断,最终完成第二键合点键合。

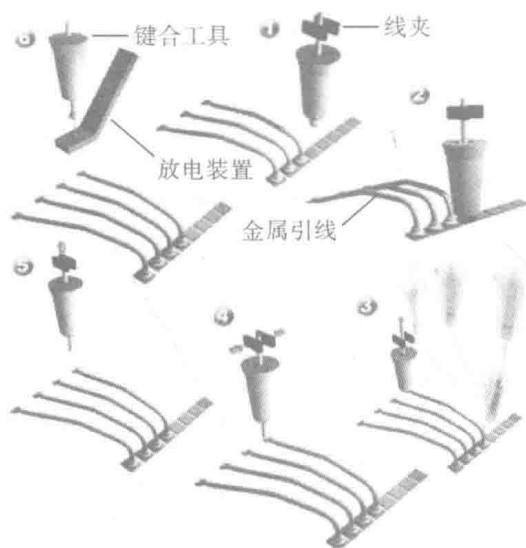


图 1-5 超声热压球形键合工艺过程

上述过程完成之后,进入下一个键合循环过程。

为了研究键合质量检测方法,需要掌握键合过程的关键原理。在超声热压球形键合工艺工程中,关键的一步是超声键合,它关系到整个焊点的好坏。为了清楚地描述整个键合过程,我们以键合设备关键部件压电换能器(piezoelectric transducer, PZT)为例进行介绍。图 1-6 给出了超声热压球形键合系统原理图,它分别由超声波发生器、压电换能器、安装套筒、变幅杆、键合工具和静压力产生装置等组成。键合过程原理具体可按以下 4 个步骤来描述:① 超声波发生器产生高频超声波能量;② 超声波能量进入压电换能器,经压电换能器转换(压电晶体反向压电效应)成高频机械振动能量(频率一般为 65 kHz 或更高,此处根据换能器系统的固有频率确定);③ 高频机械振动通过变幅杆传送到键合工具尖端,并对键合工具产生静压力;④ 当键合工具、金属引线与键合表面接触时,在静压力和振动的作用下相互摩擦、破坏、清除表面氧化膜,并发生塑性变形,致使两个纯净的金属表面紧密接触,达到原子距离的结合,形成牢固的机械