

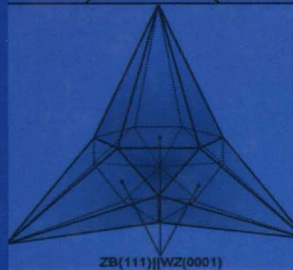
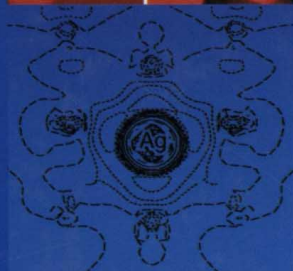
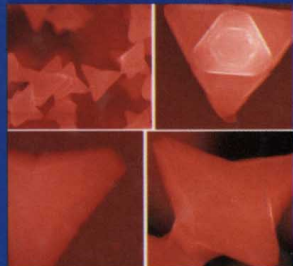


国际制造业先进技术译丛

微连接 与纳米连接

Microjoining and nanojoining

(加拿大) Y. Zhou 编
田艳红 王春青 刘威 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际制造业先进技术译丛

微连接与纳米连接

Microjoining and nanojoining

(加拿大) Y. Zhou 编
田艳红 王春青 刘威 等译



机械工业出版社

本书介绍了微连接和纳米连接的理论基础和应用实例,内容涵盖了常用的微连接和纳米连接工艺。本书分为三部分,第一部分为微连接方法,以及微连接的共性问题,如计算机模拟、传感和监测、控制和自动化、部件的夹持和定位;第二部分描述了不同微连接和纳米连接方法的特性,讨论了微连接技术扩展到纳米连接的可能性;第三部分阐述了一些材料的微连接技术,以及微连接在不同工业领域的应用。

本书为医疗元件和可植入装置、传感器和变频器、微电子和光电子器件、微系统、纳米尺度的装置和系统、燃料电池和其他微小产品的制造提供了科学和实际应用的视角,对从事微连接及纳米连接技术研究和开发的工程师和科技工作者具有很好的参考价值。本书还可作为材料科学与工程、机械工程、电气和电子工程学科的本科生和研究生的教材或参考书。

Original English Language edition published by Woodhead Publishing Ltd.

Copyright © 2008 Woodhead Publishing Limited.

All Rights Reserved Woodhead Publishing Limited.

本书中文简体翻译版由机械工业出版社独家出版,并在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

图书在版编目(CIP)数据

微连接与纳米连接/(加)周运鸿编;田艳红等译. —北京:
机械工业出版社, 2010. 4

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文: Microjoining and nanojoining

ISBN 978-7-111-30042-7

I. ①微… II. ①周…②田… III. ①微电子技术: 连接技术
IV. ①TN4②TN605

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 039761 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 赵晓峰 责任编辑: 曲彩云 版式设计: 霍永明
责任校对: 刘志文 封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 42 印张 · 2 插页 · 912 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-30042-7

定价: 128.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010)68993821

封面无防伪标均为盗版

译 从 序 言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械装备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色

化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流载体，早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选择把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套《国际制造业先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的

设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员,高等院校的教师和学生,可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际制造业先进技术译丛》的专家学者,积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐评审和翻译的知名专家,特别要感谢承担翻译工作的译者,对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意,同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助,欢迎广大读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序

本书介绍了微连接和纳米连接领域多年来的研究成果和最新进展，内容丰富而前沿，既有微连接基础理论的论述，又涵盖了许多工程实践应用。可作为材料科学与工程、机械工程、电气和电子工程学科的本科生和研究生的教材和参考书，也可供相关领域科技工作者和工程师参考。作者周运鸿(Y. Norman Zhou)目前为滑铁卢大学终身教授，是加拿大联邦政府授予的微连接领域首席科学家(Canada Research Chair)，在汽车车身焊接、医疗器件和置入装置微连接、微电子封装丝球键合以及纳米连接方面的研究具有很深的造诣。

本书的翻译是由哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室、哈尔滨工业大学深圳研究生院、哈尔滨工业大学威海香港ASM有限公司、西门子(上海)有限公司从事相关领域研究的专家和学者共同完成的。杭春进博士翻译了第1、6、8、9章，张丽霞副教授翻译了第2、11和26章，计红军博士翻译了第3章和第15章，田德文博士翻译了第4、5和17章，张威博士翻译了第7章，田艳红副教授翻译了第10、12、18章及引言和附录，刘威博士翻译了第13章和第21章，李俐群副教授和陶旺博士翻译了第14章，安荣博士翻译了第16章，张晓东博士翻译了19、20和24章，王小林博士翻译了第22章和第23章，曾超博士翻译了第25章。田艳红、刘威、安荣、杭春进、王晓林、李俐群和张丽霞对全书译稿进行了审校，最后由田艳红副教授和王春青教授对全书进行了总校。

本书由来自全球不同高校和公司的多位相关专业领域的专家写成，写作风格迥异，物理单位和专业术语不统一，在翻译的过程中物理单位遵照原文，没有按国家标准或相应的国际标准转换。在关于连接的专业术语方面，将文中所有出现的 joining 翻译为连接，welding 翻译为焊接，bonding 翻译为键合，soldering 翻译为软钎焊，而 brazing 翻译为硬钎焊。相应地，microwelding 翻译为微焊接，microjoining 翻译为微连接。其他专业术语在索引中给出。

感谢周运鸿教授的信任，将这本书的翻译交给了译者，在翻译过程中也得到了作者诸多有益的建议和帮助，翻译中还得到了哈尔滨工业大学微连接与电子封装课题组研究生韩磊磊、王学林、杨传超、王宁宁、龙博、杨东升和牛丽娜的帮助，在此表示衷心的感谢。最后，由于译者水平及经验所限，译本中可能会出现不妥的翻译和不足之处，热忱希望广大读者提出宝贵的意见和建议。

译者

引 言

连接,无论在宏观、微观还是纳米尺度,都是产品制造和组装过程的重要部分,具有机械耦合和支持、电气连接或绝缘、环境保护等功能。随着近几十年来产品的小型化趋势,这种作用越来越明显。在更小尺度的成功制造中,有效的微连接已经成为最关键的技术前提。微连接是微电子封装及互连的重要部分,但实际上涵盖更广的领域,对于制造其他更多的小型器件、装置和系统尤为关键,如医学内置物制造、传感器和换能器、电池以及光电子器件等(见表1)。

表1 微观尺度器件、装置和系统的实例

应用领域	应用实例
医用器件和装置	超声导管、内窥镜、神经刺激器、起搏器和除颤器、可植入放射胶囊、植入耳蜗
传感器和换能器	安全气囊传感器、应变片、汽车减速度器、双金属触片、烟雾探测器
微电子、光电子器件	光纤连接器(组件)、微波组件、燃料和太阳能电池、玻璃-金属密封、集成电路
微系统	微型齿轮、微型涡轮、微型泵、微电动机
其他微元件	电池、白炽灯、气相灯、喷墨盒、继电器和温度传感器
纳米尺度装置及系统	纳米机器人、纳米传感器、纳电子、纳米结构

微连接是一个广义的术语,定义很松散而且大多数与传统的(规则的、大的或者宏观尺度的)焊接或连接相关。微连接最早的定义是以被连接对象(标准构件)的尺寸为准则的。比如具有特征尺寸部件的连接,如板的厚度或丝的直径在 $100\mu\text{m}$ 以下的可以被称为微连接,在微连接和宏观连接(或毫米连接)之间、尺寸在 1mm 以上的可以称为亚毫米连接(或细观连接),同样,也可以定义纳米连接和亚微米连接。但是这种严格的限制有时会带来问题,这将在以后讨论,也会使问题趋于复杂化。

实际上有很多其他的方式来定义微连接,如基于工业或应用领域、工艺特征、使用的设备(如使用系统的精度)、被连接的材料,甚至是微焊缝的尺度等。例如,(常规的)电阻焊大多数应用在汽车车身和家电组装中的钢或铝合金的连接上,板厚或者丝的直径通常超过 0.5mm ,然而电阻微焊接主要用在精细器件和装置制造中非铁金属材料连接上面,板厚或丝的直径大约在 $20\sim 400\mu\text{m}$ 之间的范围,如电池、印制

电路板、继电器、传感器、安全气囊散射屏和医疗装置等。有时电阻焊和电阻微焊并没有对板厚的尺寸有明确界定，但两种方法使用的设备电路不同，通常由两个不同的设备制造商供应。又如半导体芯片尺度互连中的丝焊，被连接的丝线直径大多数在 $25\mu\text{m}$ 左右，但有时也有几百微米的，尤其是功率电子中。很难说丝的直径在 $100\mu\text{m}$ 以下的是微连接，其他的不是，因为两者使用的是同一个设备。同样的争论也存在于纳米尺度互连中。在大多数这方面的文献中，相对于宏观尺度的连接，微连接成为了一个灵活的词汇，如在小型产品的制造过程中连接的板厚或丝的直径在 $0.2 \sim 0.5\text{mm}$ 之间。另一方面，纳米连接是一个新的、在某种程度上又是完全不同的领域，已有的发表文献上可用信息比较少，如连接纳米管和纳米线。

很多微连接或微焊接过程可以追溯到 20 世纪 50 年代。例如，电容放电器被引入到电阻焊中，接着这项技术在 20 世纪 60 年代应用在航空航天工业上^[1]。热压丝焊，即热压焊的另一种形式，1957 年由贝尔实验室开发，60 年代演变成超声丝焊^[2]，1970 年开发了热超声丝焊^[3]，结合了超声丝焊和热压焊两种方法的优点。丝焊技术已经成为微电子产品制造中芯片级互连的关键技术之一。尽管电阻微焊和丝焊方法是微连接应用而开发的，但 1958 年开发的电子束焊接既适合于宏观尺度也适合于微观尺度的连接，具有精密性、系统集成的夹具及可控性的特点^[4]。毫无疑问，随着微电子、医疗、航空航天和国防工业的发展，很多微连接工艺和技术应运而生。

尽管现在很多微连接工艺和应用被认为是成熟的，但由于产品持续朝小型化方向发展，微连接技术依然面临挑战。例如，在 MEMS(微机电系统,也称微系统)封装和互连中，单独的电气、机械、流体和光学元件需要被连接或耦合到宏观的外部环境中。后者将产生传感器技术中独特的问题，一方面，微系统需要被保护以防止外部机械的损坏或者腐蚀；另一方面，又要被暴露在足够多的外部环境中，以获得真实确凿的物理化学数值^[5]。因此，封装和互连技术仍然在未来的微系统工业中发挥重要的作用^[5]。随着微型化的发展，在宏观和微观世界里，需要进行纳米尺度的连接，如纳米线和纳米管之间的连接形成纳米尺度器件或系统，然后将它们连接到外部环境中，集成到微米或宏观尺度的器件或系统。实际上，目前已经尝试了很多纳米连接或纳米焊接工艺^[6]。

无论是宏观、微观还是纳米尺度，所有连接工艺的目的都是在被连接部件或结构单元的两个待焊面之间通过形成初步和偶尔产生的二次化学键合而获得永久的结合或互连。当被连接部件在原子结构上不兼容时，如陶瓷与金属连接，需要中间层材料，或局部地降低熔点以使连接过程容易进行。在前述的定义中不包括机械连接或铆接，因为后者接头中材料的原始自由表面没有改变。

理论上，两个理想的固体表面，即理想的清洁状态和原子尺度上平整，两个表面一旦接触即能连接在一起^[7]。这种理论必须在严格控制的环境中才能得以实现，如直接硅圆片互连^[8]。但是，大多数工程表面是粗糙的、是被污染了的，需要施加一定形式的能量，通常为热和压力来克服表面阻碍形成接头。大体上来说，有四种类型的连

接：固态连接、软钎焊/硬钎焊、熔化焊和粘结。固态连接过程没有熔化发生，主要通过宏观或微观的变形来实现。熔化焊和钎焊接头通过熔化和熔融金属的凝固获得，熔化焊方法中基体金属局部熔化，钎焊（至少在初始阶段）只有填充金属熔化。硬钎焊所用的填充金属熔点超过 450℃，而软钎焊低于 450℃。如果在连接过程中去除液相，通过熔化焊和钎焊的方法也可以获得固相接头，如电阻交叉丝线微焊接^[9]。在粘结方法中，采用有机胶粘剂实现连接。

尽管微连接极其重要，但除了 20 年前出版的一本简短的手册和后续的扩充版本之外(300mm×210mm 的平装书,34 页)，目前还没有一本单独的关于微连接方面的综合书籍^[10,11]。Tummala 的《微电子封装》一书是一个优秀的例子，其中有很多关于微连接工艺技术方面的论述^[12]。但这些书都是从封装的视角，内容涉及设计、材料、工艺到制造、测试、性能和可靠性等方面，而从微连接工艺理论视角方面介绍的书籍是很有限的。本书将提供最新的微连接工艺和技术，包括相关的基础和技术方面，如随着尺寸持续减小而使表面性质的影响增加，由于特定材料或应用而选择连接技术。纳米连接因其重要性及新兴的领域也被纳入本书中。

本书分为三部分，涵盖常用的微连接和纳米连接工艺(见表 2)。第一部分包含微连接方法，如固相连接、软钎焊/硬钎焊和熔化微焊接的基础理论，以及微连接的共性问题，如计算机模拟、传感和监测、控制和自动化、部件的夹持和定位。第二部分描述不同微连接和纳米连接方法的特性，包含连接机理、重要参数及其对冶金和机械方面的影响(如热应力,尤其是连接不同材料产生的热应力)、设备、质量控制等。尤其是在很多章节讨论了微连接工艺和技术扩展到纳米连接上的可能性。第三部分阐述了一些材料的微连接和微连接在不同工业领域的应用。在其他一些单独介绍微连接和纳米连接方法的部分也有应用的实例。

本书为生产工程师、设计者和研究者使用、研究和开发微连接和纳米连接工艺和技术提供有益参考。在医疗元件和装置(尤其是可植入的装置)、传感器和变频器、微电子和光电子器件、微系统、纳米尺度的装置和系统、燃料电池和其他的微小产品等方面提供了科学和实际应用的依据。本书也不失为材料科学与工程、机械工程、电气和电子工程学科学生的有益教材。对连接的良好理解需要不同领域的多学科知识，如物理、化学、数学、固体和流体力学、材料科学(冶金学)、电气工程和电子。

表 2 微连接方法(附章节号)

类 型	金 属	半 导 体	陶 瓷	高 分 子 材 料
固相键合	阳极键合(21)	阳极键合(21)	阳极键合(21)	
	纳米颗粒键合(10)	纳米颗粒键合(10)	扩散键合(19,26)	
	冷压焊(1)	扩散键合(1)		
	扩散键合(1)	载带自动内引线键合(4)		

(续)

类 型	金 属	半 导 体	陶 瓷	高 分 子 材 料
固相键合	爆炸焊(25)	热压引线键合 (1,4,8)		
	摩擦焊(25)	热超声引线 键合(4,6,7,8)		
	搅拌摩擦焊(25)	超声引线键合(6,8)		
		圆片键合(21)		
软/硬钎焊	扩散软钎焊和硬 钎焊(11)	扩散软钎焊(11)	活性硬钎焊 (23,24,26)	
	浸渍软钎焊/ 硬钎焊(2)	共晶键合(2)	大气硬钎焊 (23,24,26)	
	无钎剂软钎焊/ 硬钎焊(2,12,13)	倒装键合(2)	扩散硬钎焊(11)	
	炉中软钎焊/ 硬钎焊(2)	无钎剂软钎焊, 包括利用酸性蒸 气及等离子 体(2,12,13)	超导体软钎焊(19)	
	感应钎焊软/ 硬钎焊(2)	激光软钎焊(2,12)		
	激光软钎焊/硬 钎焊(2,12)	无铅软钎焊(2)		
	再流软钎焊 (2,12,13)	再流软钎焊(2)		
	电阻软钎焊/硬 钎焊(16,20)			
	波峰软钎焊/ 硬钎焊(2)			
熔焊	电子束微焊接 (3,15,20,25)			摩擦焊, 包括旋转摩 擦焊、搅拌摩擦焊和 超声波焊(22,23)
	激光微焊接 (3,5,7,14,20,23)		玻璃封接(24)	热板和脉 冲焊(22)

(续)

类 型	金 属	半 导 体	陶 瓷	高 分 子 材 料
熔 焊	等离子微焊接(3,5,23)			激光焊(22,23)和其他电磁焊接方法,如微波焊、感应焊、电阻植入焊
	微锻接(1,3)			
	电阻微焊接,包括点焊、缝焊、凸焊、平行间隙和交叉丝线电阻焊(1,3,5,6,16,23)			
	钨极氩弧微焊接(3,5,25)			
粘 结	粘结(17)	芯片粘结(7,17)	粘结键合(17)	粘结键合(17,23)
		倒装芯片粘结(17)		
		粘结密封(17)		

参考文献

References

- [1] A. Cullison, 'Welding: A Heavyweight in a Miniature World', *Welding J.*, **75**(5), May 1996, pp. 29–34.
- [2] O.L. Anderson, H. Christensen and P. Andreatch, 'Technique for Connecting Electrical Leads to Semiconductors', *Journal of Applied Physics*, **28**(8), August 1957, p. 923.
- [3] G.G. Harman, *Wire Bonding in Microelectronics – Materials, Processes, Reliability and Yield*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [4] J.A. Stohr and J. Eriola, 'Vacuum Welding of Metals', *Welding and Metal Fabrication*, **26**, October 1958 pp. 366–374.
- [5] W. Menz, J. Mohr and O. Paul, *Microsystem Technology*, Weinheim, Germany, Wiley-VCH, 2001.
- [6] M.S. Fuhrer, J. Nygard, L. Shih, M. Forero, Y.-G. Yoon, M.S.C. Mazzone, H.J. Choi, J. Ihm, S.G. Louie, A. Zettl and P.L. McEuen, 'Crossed Nanotube Junctions', *Science*, **288**, April 21, 2000, pp. 494–497.
- [7] R.W. Messler, Jr., *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy*, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [8] U. Gösele, H. Stenzel, T. Martini, J. Steinkirchner, D. Conrad and K. Scheerschmidt, 'Self-propagating Room Temperature Silicon Wafer Bonding in Ultrahigh Vacuum', *Appl. Phys. Lett.*, **67**(24), 1995, pp. 3614–3616.
- [9] S. Fukumoto and Y. Zhou, 'Mechanism of Resistance Microwelding of Crossed Fine Nickel Wires', *Metall. Mater. Trans. A*, **35A**, 2004, pp. 3165–3176.
- [10] D.D. Zimmerman and D.H. Lewin (eds), *The Fundamentals of Microjoining Processes*, Silver Spring, MD: International Society for Hybrid Microelectronics, 1983.
- [11] K.I. Johnson (ed.), *Introduction to Microjoining*, TWI: Abington, 1985.
- [12] R.R. Tummala (ed.), *Fundamentals of Microsystems Packaging*, New York, McGraw-Hill: 2001.

目 录

译丛序言

译者序

引言

第 1 部分 微连接基础

1 固相键合工艺机理	3
1.1 简介	3
1.2 固相键合原理	5
1.3 污染物的去除及原子间键合	6
1.4 接触表面的扩展	7
1.5 被污染区域的分离	10
1.6 键合过程中晶体结构重新排列	13
1.7 氧化物及污染物的热分解	13
1.8 界面结构的破碎	15
1.9 小结	18
1.10 参考文献	19
2 软钎焊和硬钎焊机理	21
2.1 简介	21
2.2 软钎焊和硬钎焊的定义	22
2.3 软钎焊和硬钎焊中基本的冶金反应	26
2.3.1 润湿	26
2.3.2 溶解	29
2.4 软钎焊和硬钎焊材料	32
2.4.1 软钎料	32
2.4.2 软钎剂	33
2.4.3 硬钎料	34
2.4.4 硬钎剂	34
2.5 软钎焊和硬钎焊过程	35
2.5.1 方法的分类	35
2.5.2 电子封装中的软钎焊	36

2.5.3 硬钎焊	38
2.6 综述和未来趋势	39
2.7 参考文献	40
3 熔化微焊接基础	42
3.1 简介	42
3.2 基本因素	42
3.3 作用在熔池上的力	45
3.3.1 热膨胀/收缩与外部施加的机械力	45
3.3.2 蒸发	47
3.3.3 表面张力	48
3.3.4 熔池稳定性	49
3.3.5 动量/惯性力	51
3.3.6 粘度	54
3.3.7 空气动力	55
3.3.8 电磁力	55
3.3.9 重力	56
3.3.10 各种力的小结	57
3.4 实际应用	58
3.5 使用熔化微连接存在的一些问题	61
3.5.1 装卸和固定	61
3.5.2 重复性工艺特征	61
3.5.3 零件安装放置	62
3.5.4 度量/检测	62
3.5.5 小尺寸范围下模拟的问题	62
3.5.6 材料问题	62
3.6 举例：激光、电弧和电阻焊接	64
3.6.1 激光点焊	64
3.6.2 激光缝焊	66
3.6.3 电弧缝焊	66
3.6.4 电弧点焊(持久电弧)	67
3.6.5 电阻焊	67
3.7 总结	69
3.8 参考文献	70
4 固相键合模拟	73
4.1 简介	73
4.2 粘塑性变形模型及界面变形	73
4.3 热压键合	74

4.3.1	TAB 内引线键合	74
4.3.2	丝球焊	79
4.4	热超声键合	87
4.4.1	金凸点键合模型	88
4.4.2	界面微摩擦滑移的描述	88
4.4.3	倒装焊过程的数值模拟	90
4.5	搭接电阻焊的数值模拟	92
4.5.1	模拟	92
4.5.2	数值模拟	93
4.6	结论	94
4.7	参考文献	95
5	熔化微焊接模拟	97
5.1	简介	97
5.2	熔化微连接热过程的特点	98
5.3	热传导的模拟	99
5.3.1	控制方程	99
5.3.2	控制方程的求解	99
5.3.3	热源模型的定义	101
5.3.4	计算实例	101
5.4	对流换热的模拟	104
5.4.1	焊接熔池流体流动的驱动力	105
5.4.2	控制方程	105
5.4.3	边界条件	107
5.4.4	求解控制方程	109
5.4.5	计算实例	109
5.5	电阻微焊接过程的模拟	115
5.5.1	原理及特点	115
5.5.2	过程分析	115
5.5.3	接触电阻的模拟	116
5.5.4	网格划分和边界条件	118
5.5.5	计算实例	119
5.6	总结与未来趋势	123
5.7	参考文献	124
6	传感、监测和控制	127
6.1	简介	127
6.2	定义和方法	128
6.3	焊接过程中的信号	129

6.3.1	力学信号	130
6.3.2	热学信号	130
6.3.3	几何结构信号	130
6.4	应用	131
6.4.1	在线监测	131
6.4.2	过程控制	134
6.5	未来发展趋势	135
6.6	参考文献	136
7	组装工艺自动化及材料处理	140
7.1	引言	140
7.2	流水线工艺的组装设备	141
7.3	组装设备的材料处理	143
7.3.1	工艺模块布局	143
7.3.2	工艺元器件方向	144
7.3.3	图像对准技术	144
7.3.4	运动学设计和动态控制	144
7.3.5	应用工具的互换性	145
7.3.6	拾取放置工艺	145
7.3.7	薄芯片拾取工艺实例	145
7.3.8	受控放置工艺实例——热塑性载带键合工艺	146
7.4	组装工艺参数的控制	147
7.4.1	精确的时间	147
7.4.2	温度曲线	147
7.4.3	精确定位	147
7.4.4	力和压力	148
7.4.5	超声能量的应用	148
7.4.6	激光辐射的应用	148
7.4.7	还原气体的应用	149
7.5	实例：特定组装设备——用于带尾纤激光二极管同轴封装的激光对准点焊 设备的设计	149
7.5.1	组装工艺分析	149
7.5.2	原型有源对准激光焊	157
7.6	未来发展趋势	159
7.7	参考文献	160

第 2 部分 微连接和纳米连接工艺

8	微电子引线键合技术	165
----------	------------------------	------------

8.1	简介	165
8.2	丝球焊技术	166
8.2.1	基本原理	166
8.2.2	超声引线键合衍生技术	169
8.3	工艺参数	171
8.3.1	超声	171
8.3.2	键合压力	172
8.3.3	键合时间	172
8.3.4	键合温度	173
8.4	键合机理	174
8.4.1	超声热效应	174
8.4.2	塑性变形	174
8.4.3	微滑移磨损	175
8.5	质量控制	178
8.5.1	拉力测试	178
8.5.2	剪切强度测试	179
8.6	键合设备和夹具	179
8.6.1	自动键合机	179
8.6.2	半自动键合机	181
8.7	引线键合技术发展方向	181
8.7.1	Cu 线	181
8.7.2	低介电常数材料上的键合	182
8.7.3	表面绝缘金属线	182
8.7.4	细间距丝球键合	184
8.8	参考文献	184
9	固相扩散键合	189
9.1	基本定义	189
9.2	固相扩散键合与其他连接方法的比较	190
9.3	主要键合参数和装置	192
9.4	固相扩散键合理论和模拟	194
9.5	克服表面氧化物问题的方法	195
9.5.1	获得足够的塑性变形	195
9.5.2	增加表面粗糙度的微区塑性变形	195
9.5.3	添加活性合金元素	197
9.5.4	非传统固相键合方法	197
9.6	液镓去除表面污染物	197
9.7	小结	198