

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3173

键合铜丝的研究及应用现状

周 岩¹, 刘劲松^{1,2}, 王松伟², 彭庶瑶³, 彭晓飞³

(1. 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016; 3. 江西蓝微电子科技有限公司, 江西 吉安 343000)

摘 要:目前, 键合铜丝因其价格低廉、具有优良的材料性能等特点正逐渐替代键合金丝广泛应用于电子封装领域。本文对当前市场上应用的金丝、铜丝、银丝及铝丝性能特点进行了分析对比, 探讨了以键合铜丝替代传统键合丝材料的优势; 简要介绍了铜丝材制备和键合过程的研究进展, 并对键合铜丝的封装失效形式进行了简要分析; 综述了微合金化对键合铜丝服役性能的影响规律及机理; 最后从市场需求及理论研究方面分析了键合铜丝市场的发展趋势。

关键词:键合铜丝; 引线键合技术; 电子封装; 微合金化

中图分类号: TG146.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2023)11-0988-09

Research and Application Status of Copper Bonding Wire

ZHOU Yan¹, LIU Jinsong^{1,2}, WANG Songwei², PENG Shuyao³, PENG Xiaofei³

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Shi-changxu Innovation Centre for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Jiangxi Blue Microelectronics Technology Co., Ltd., Ji'an 343000, China)

Abstract: At present, copper bonding wire is widely used in electronic packaging, integrated circuits and other microelectronics industries instead of gold bonding wire because of its low price and excellent material properties. In this paper, gold wire, copper wire, silver wire and aluminum wire with high market shares are analysed, and the advantages of copper bonding wire instead of traditional bonded wire materials are highlighted. The research progress of copper wire preparation and bonding processes is briefly introduced and the packaging failure forms of copper bonding wires are briefly analysed. The trace elements commonly added in copper bonding wire and their mechanism of action are listed. Finally, the development trend of copper bonding wire market is analysed from the aspects of market demand and related policies.

Key words: copper bonding wire; wire bonding technology; electronic packaging; microalloying

键合丝是集成电路封装的基本材料之一。常用的键合丝材料包括金丝、银丝、铜丝及铝丝。一直以来, 键合金丝因其出色的力学性能和加工性能占据着电子封装市场。然而, 随着电子产品向高密度化、高速度化和小型化发展, 芯片引脚数越来越多, 布线间距越来越小, 封装厚度越来越薄, 封装体在基板上所占的面积越来越小, 这就要求键合丝材料朝着低介电常数、高导热、低成本的方向发展^[1]。近几年, 键合铜丝以其低廉的成本及较好的综合性能已经开始占领电子封装行业的中低端市场, 主要用于二极管、三极管、集成电路、大规模集成电路等各种半导体器件中作为内引线^[2]。在无引脚封装、小间距

焊盘等高端产品领域, 键合铜丝也表现出良好的使用潜力。因此, 国内外越来越多的科研人员投入到键合铜丝的研究中。本文根据相关专利及文献, 对键合铜丝的性能特点、服役情况及其微合金化改性研究进展等方面进行了综述。

1 键合铜丝的性能特点

键合丝作为芯片与框架之间的引线, 是半导体封装的核心材料, 起着实现芯片与外界电流、信号交互的重要作用。键合丝具有繁多的产品门类、复杂多变的应用场景以及较高的质量要求, 使得其生产制造有一定的技术壁垒和工艺难度。

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220591); 吉安市“揭榜挂帅”关键核心共性技术项目

作者简介: 周 岩, 1999 年生, 硕士研究生。研究方向为金属材料先进加工。Email: 1311662911@qq.com

通讯作者: 王松伟, 1990 年生, 博士。研究方向为高性能稀土铜合金组织性能。Email: swwang16b@imr.ac.cn

引用格式: 周岩, 刘劲松, 王松伟, 等. 键合铜丝的研究及应用现状[J]. 铸造技术, 2023, 44(11): 988-996

ZHOU Y, LIU JS, WANG SW, et al. Research and application status of copper bonding wire[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 988-996

1.1 键合丝性能要求

键合丝的材质和线径不仅决定着键合过程的形弧情况,而且对后续封装厚度及器件的服役时间都有着十分重要的影响。因此,对于丝材的抗氧化性、导电、导热性、可焊接性、可靠性都有着十分严格的要求。此外,还需考虑键合丝线径的一致性及其放线性能是否顺畅、丝材表面的光洁度以及丝线在温度变化时的稳定性等。理想的键合丝材料应具备以下特点:能够保证芯片与引线框架之间形成良好的键合;键合过程所需较小的键合温度、键合力;化学性质相对稳定,尽量减少金属间化合物的生成;可塑性好等。

传统的键合丝材料有 Au、Ag、Al、Cu。4 种常见键合丝材的物理性质如表 1 所示。Al 丝在键合过程中,可与芯片铝膜电极形成 Al-Al 系统,因此不存在金属间化合物对焊接性能造成影响,但其拉伸强度及耐热性差,易导致塌丝问题且在键合过程中成球形差,不易焊接等缺点使其应用空间大大受限。Ag 丝有着优异的导电导热性能,并且在键合过程中不需要保护气体,可 Ag 具有极高的电敏感性,在高密度键合的过程中易出现塌丝以及 Ag⁺ 迁移现象,此外 Ag 的延展性差,高温下易氧化,不易加工成符合规格的键合丝。Au 丝具有极佳的机械性能、良好的焊接接合性能、稳定的化学性能以及耐腐蚀性,但 Au 丝在键合过程中易形成紫斑(AuAl₂)和白斑(Au₂Al),导致界面处形成柯肯德尔空洞以及裂纹,从而影响焊接强度。值得注意的是,Au 丝的价格成本大约是 Cu 丝的 70 倍左右,而 Cu 丝具有比 Au 丝更优异的导电和导热性能,抗拉强度也更优于 Au 丝和 Al 丝,Cu 丝也具有相当好的焊接性能。采用 Cu 作为引线框架材料时,也不会形成金属间化合物,因而 Cu 丝也是目前替代传统键合丝材料的最佳选择^[3-5]。

1.2 键合铜丝性能优势

除了以更加低廉的价格优势大幅降低了器件的制造成本,吸引更多厂商及研究人员的关注外,键合铜丝本身也具有非常优良的材料性能,使其近年来能够在电子封装等领域具有非常高的市场占有率。键合铜丝的性能优势主要表现在以下几个方面:

(1)较高的伸长率和破断力 键合铜丝优良的力学性能,主要体现在其具有较高的伸长率和破断力,二者对引线键合的质量起着十分重要的作用。高破断力代表铜丝能够抵抗更高的应力,而较高的延伸率能使铜丝在键合过程中具有更好的成弧形,避免塌丝现象,进而提高器件的可靠性^[6]。此外,在满足相同焊接强度的情况下,可采用直径更细的铜丝代替金丝,使引线键合的间距更小,进而满足对集成度要求更高的器件的生产。

(2)较高的导电导热率 曹军^[7]研究表明,铜键合丝具有良好的导电、导热性能,用铜线替代金线和铝线可缩小焊接间距,提高芯片频率和可靠性。铜的电导率大约是金的 1.33 倍,在承受相同的电流时,铜丝采用更细的丝线便可达到要求。对于芯片来说,散热能力是非常重要的指标。铜的导热率也比金高出 20%左右,减小焊丝直径更有利于铜丝散热。而且铜丝具有比金丝更高的热膨胀系数,其焊点应力自然也较低,降低了后期焊点颈部断裂的可能性,提高了器件的可靠性。此外,直径更加细小的丝线可以在微间距封装中提高功率调节器件的电流容量和性能,还能降低由于寄生电容引起的信号串扰,提高传输速度。因此,铜键合丝更适合用于高端、引线数量更大、焊接尺寸更小的元器件封装^[8]。

(3)较慢的金属间化合物生长速度 在键合过程中,影响焊接成型以及焊接可靠性的一个关键因素是焊丝与金属化层之间的金属间化合物(inter-metallic compound, IMC)的增长速率,一定含量的金属间化合物可以增加键合时的结合强度,但 IMC 生长速度较快时,易形成肯德尔空洞以及裂纹,严重影响器件的可靠性。键合时,焊丝与金属化层的扩散速率越低,使得接触电阻越低,金属间化合物的增长速度就越低,产生的热量就少,从而提升键合强度,并最终提高焊接可靠性^[9]。

铜丝与金丝焊点相比,铜丝焊点中的金属间化合物生长速度显著减小。使得产热减少,更进一步提高了器件的可靠性。瑞典 Ainouz 等^[10]研究了铜线作为互连材料在半导体封装中的性能。研究表明,铜在键合过程的匹配性及可靠性要更优于金丝和铝丝。

表1 4种常见键合丝材物理性质对比
Tab.1 Comparative analysis of the physical properties exhibited by four widely used bonding wires

材料	电阻率 /(10 ⁻⁶ Ω·m)	热导率 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	线膨胀系数 /(μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	伸长率 /%	硬度 /HB	电导率 /%IACS
Au	23.5	317.9	14.2	70	18	73.4
Ag	14.7	428.0	19.0	66	25	108.4
Cu	16.7	398.0	16.7	60	37	103.1
Al	26.6	247.0	23.6	50	20~35	65.0

2 键合铜丝的研究现状

2.1 铜丝制备过程的研究进展

传统键合丝在生产过程中需要经过拉铸、拉拔以及退火等工艺,通过拉铸将金属熔成棒材,再经过多道次的拉拔将其拉成丝状,拉拔后进行退火,以消除键合丝的内应力,避免丝材发生扭转、弯曲等情况,也可进一步对丝材的机械性能进行调整,最后根据产品要求,进行绕线以及产品检验。目前,在拉制键合铜丝时,对铜丝的断线率、表面质量都有着十分严格的要求。在键合铜丝的制备过程中经多道次的拉拔易发生断线情况,致使单盘产品无法满足要求,造成浪费。拉拔后铜丝的表面质量若不达标,会使铜丝在后续的键合过程中成球性差,导致焊接强度严重降低。

由于铜键合丝的线径较细,在拉拔过程中对坯料中的杂质含量比较敏感,坯料内部的杂质微粒及缺陷会造成丝线组织性能的不均匀,严重时便发生断裂。胡立杰^[11]提出,为防止在拉拔细丝过程中晶界出现断裂从而影响铜材的传导性能,可采用真空熔炼氩气保护热型连铸设备制备的单晶杆铜,因其具有致密的定向凝固组织,解决了气孔、横向晶界等缺陷,此外其结晶方向和拉拔方向相同,可以承受更大的塑性变形。曹军等^[12]针对单晶杆铜拉制键合铜丝的成分及断口形貌进行了分析,发现拉拔时,控制力不均会引起线材的局部应力变化,从而造成断线。在拉制过程中保持控制力稳定、避免对丝材表面造成损伤,并在成品拉丝前进行去应力退火能够大大降低断线率。

2.2 铜丝键合过程的研究进展

目前,绝大多数铜丝的键合方式均采用引线键合。引线键合技术的关键就是通过金属丝借助热、压力、超声波使芯片上的引线与底座外引线连接起来,进而实现芯片与基板间信息交互,键合后效果图如图1所示。由于引线键合具有低成本、可靠性高、产量高、适用多种封装形式等优点而占据了目前封装管脚行业约90%的市场份额^[13]。

按照键合条件及工艺的不同,引线键合技术又可分为热压键合、超声键合和热超声键合^[14],3种键合方式性能对比如表2所示。热压键合是利用微电

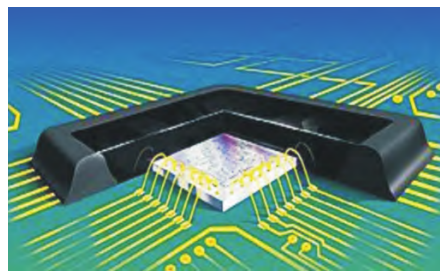


图1 引线键合技术效果图

Fig.1 Schematic diagram of the wire bonding technology

弧使引线端头在高温下发生形变,一般使其熔成球状,再通过调控时间及压力来完成键合过程^[15]。其键合强度较高且工艺简单,即便键合失败也能在同一位置再次键合。超声键合利用超声能量在常温下使键合丝发生塑性变形,并破坏引线与焊件之间的氧化薄膜,进而完成键合,使用时的超声频率通常不超过60 kHz。超声键合技术主要适用于铝丝的键合,因键合过程不会形成化合物影响焊接强度且对被焊件表面洁净度要求不高而被推崇。热压超声键合即将热压键合与超声键合两种技术结合起来,在超声键合机中通过加热器辅助加热,进而实现引线的高质量焊接^[16]。其键合温度及压力均不高,利于提高器件的可靠性,是目前较为理想也是应用最为广泛的键合技术。

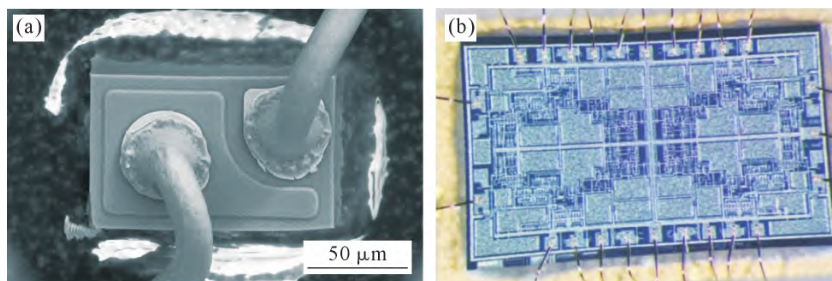
引线键合按键合工具种类不同,分为球键合及楔键合两种基本形式^[17]。两种键合方式都需先在芯片表面形成第一焊点,然后形弧,最后在基板上形成第二焊点^[18]。不同的是球键合是指将引线一端熔成球状然后使其焊接在芯片电极上的一种焊接方式,键合点无方向性。而楔键合则是借助热、压和超声能量直接将引线焊在基板上,并且楔键合的两个键合点具有严格的方向性,球键合与楔键合的键合点如图2所示。与楔键合相比,球键合具有操作便捷、焊接速度快、焊点牢固且无方向性等特点,也因此被用来实现高速自动化焊接。

针对铜丝通常采用热压超声工艺进行球键合。但在烧球过程中,常发现球表面不够光滑,成球性差。这是由于铜线在高温下熔成球状时,发生了氧化,进而影响铜球质量。赵健经研究发现,在键合过程中通入用95%(体积分数)的氮气和5%(体积分数)的氢气混合气体可有效解决此类问题^[20]。少量氢气

表2 3种键合工艺的比较

Tab.2 Comparison of the three bonding wire technologies

键合工艺	适用材料	丝径范围/ μm	键合温度/ $^{\circ}\text{C}$	键合压力	适用范围
热压键合	Au、Cu	15~100	300~500	高	常用于金丝键合及单片式大规模集成电路
超声键合	Au、Cu、Al	10~500	20	低	常用于铝丝键合
热压超声键合	Au、Cu	15~100	100~150	低	常用于铜丝键合及多芯片大规模集成电路

图2 键合点图片:(a)球键合,(b)楔键合^[19]Fig.2 Diagram of bonding position: (a) ball bonding, (b) wedge bonding^[19]

的加入还能将纯铜线在储存过程中表面生成的氧化薄膜也还原成铜。余斋等^[21]将前沿的微动学理论加以改进,并融入到探索热压超声球引线键合的机理中,提出了二类键合图,键合时通过反馈系统实时监控各项参数的变化情况,并加以调整和改进,从而保证实现更高效、可靠的键合。

3 键合铜丝的失效形式及原因

尽管键合铜丝凭借着良好的综合性能,市场占有率逐年提升,但因其硬度较大、易氧化等特性造成的封装失效仍是当前阶段急需解决的问题。在实际电子封装过程中,铜丝球键合点的失效模式大致分为粘接失效、界面失效及球内断裂三种^[22]。在不同的温度条件下,随着保温时间的延长,由于焊盘上铝和铜残余量的不同,使铜球内部结构以及 IMC 的成分含量发生变化,进而导致键合丝失效。而在实际生产和使用过程中,键合丝的失效形式更为复杂,在众多不确定的环境因素下,键合铜丝的失效原因更应引起研究人员的注意,以便早日制定出更加科学合理的防护措施。

3.1 封装缺陷

封装缺陷是指在后续封装的过程中可能会出现缺陷,包括外键合点颈部裂纹、键合丝短路等。ATi 公司采用芯片阵列球栅阵列(chip array ball grid array, CABGA)封装形式生产的处理器,在使用一段时间后发生失效,机械开封后发现塑封与引线框架之间并没有产生明显的分层,但其键合点颈部产生了局部裂纹甚至贯穿性裂纹,如图 3 所示。裂纹的产生可能与键合工艺有关,此类失效有可能在测试阶段就排查到,之后需对同批次产品依次进行测试,避免在后续应用过程中发生大规模失效。

键合丝短路可能是键合丝与接地引脚之间发生短路,或者相邻键合丝由于间距过小、走向安排不合理、线弧高度设置错误等问题造成的短路。Atheros 公司采用 CABGA 进行封装的手机处理器,由于线弧高度设置错误,造成封装引脚之间短路,

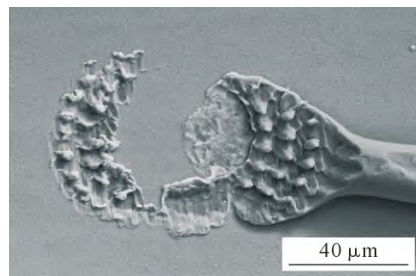


图3 铜丝键合点颈部裂纹图

Fig.3 Schematic diagram of copper wire bonding position with neck cracking phenomenon

如图 4 所示。此外,由于键合丝强度过低,封装后形成塌丝并与其他导体相互接触也易造成短路现象。键合丝塌丝可能触及电容端头,也可能触及芯片边缘造成失效^[23]。但无论何种原因造成的短路现象,都需及时优化键合参数,防止器件长期应用时,产生漏电、退化并突发失效。

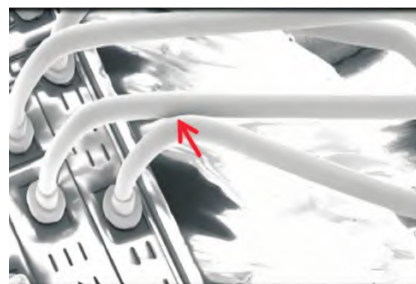
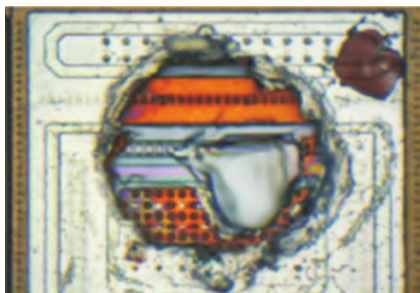


图4 键合丝相互接触短路图

Fig.4 Diagram of short circuit caused by bonded wire contact

3.2 键合点出现键合弹坑

弹坑是由于焊球在压到芯片焊区表面时,接触力、键合力和键合功率设置匹配不当导致焊区的硅层受到损伤。键合铜丝硬度越大,越容易导致弹坑的出现。国产 SOT23-6 封装的脉冲宽度调制控制芯片在焊接完成后发现功能失效,通过化学开封,发现弹坑呈现环状,说明损伤较为严重,如图 5 所示,通过扫描电镜会非常清晰地观察到硅缺失的痕迹,也说明键合过程中的键合力较大^[24]。通常情况下,弹坑损伤较小,呈月牙形。在键合过程中,对于不同类型的芯片需进行适当的工艺调整,若调整不当,则会导致键合过程中焊盘局部界面挤压现象严重,发生批次

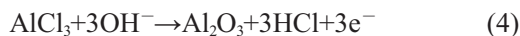
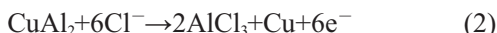
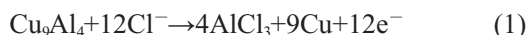
图5 焊区严重损伤时弹坑图^[24]Fig.5 Cratering diagram of the severely damaged weld area^[24]

性的键合弹坑现象。这会大大降低键合强度及介质绝缘性,表现为漏电异常,漏电会随着后续通电使用时间的增长不断加大,进而导致反向击穿电压过低,甚至击穿短路,对器件使用性能造成严重影响^[25]。键合点的弹坑损伤失效也具有潜伏性,在应用时遇到外加电应力或者温度应力会加速失效。

3.3 键合点发生化学腐蚀

TI 公司生产的超薄小型封装微处理器在使用几个月后失效,激光开封后可见氯腐蚀铜丝,键合点化学腐蚀 SEM 图像及腐蚀形貌图如图 6 所示^[24]。由于封装过程中,塑封材料中可能会检测到少量的氯元素,尽管氯离子不能直接与铜离子发生化学反应,但铜的表面可以形成 Cu_2O ,发生电化学的腐蚀作用,并且能够和氯离子形成络合离子产生进一步反应^[26-27],从而降低器件的可靠性。

在铜铝键合的过程中,铜铝键合的 IMC 主要成分为 CuAl_2 、 CuAl 和 Cu_9Al_4 ^[28]。铜丝键合点腐蚀主要是由于 Cu_9Al_4 和 CuAl_2 受到 Cl^- 侵蚀导致^[29],最终导致键合强度下降,可能的一系列反应为:



为了能够预防此类失效形式的发生,应加强对

于塑封材料中卤素含量的控制并提升塑封材料的抗湿性能。也可通过在其表面涂覆三防漆进行防护,除此之外,提升键合铜丝的抗氧化性也可进一步避免氧化物与卤素离子之间发生化学反应,进而产生腐蚀。

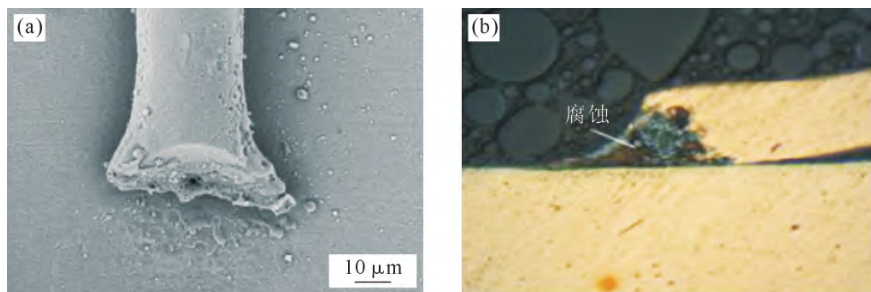
3.4 键合点发生电偶腐蚀

电偶腐蚀也被称为原电池腐蚀,是一个十分漫长的过程,需要一定的时间积累,具有潜伏性,会导致键合强度降低最终出现断裂,键合点位置过热会形成塑封料的炭化现象。铜铝键合界面失效表现为键合点没有形成弹坑,没有明显的过电应力和化学污染,键合点呈现过热失效。最终引起铝层氧化,键合强度降低。

4 键合铜丝微合金化改性研究进展

尽管铜丝键合时具有优良的力、热、电学性能,但键合铜丝的发展也有着巨大的挑战。由于铜丝键合过程中面临易氧化等问题,可以向铜丝中添加一些微量元素,延长其保存时间的同时,对于键合丝的其他性能也能得到一定程度的提高。若要得到性能更加优良的键合铜丝,便要控制铜丝的硬度,铜丝硬度过高,容易造成基板断裂、虚焊等问题^[30]。可通过提高铜丝纯度使其自身硬度降低,从而减少键合过程铜对芯片的损害,但铜丝纯度过高,又会使得自身强度下降,成型难以控制,形弧高度也不均匀;此外也会使铜丝再结晶温度降低,破断力、伸长率也会随着使用时间的延长而下降^[31]。因而合理控制铜丝中添加的微量元素种类及其含量对键合过程有着至关重要的影响。本文通过整理现有研究结果,得到各微量元素的分类及其作用机制如下:

碱金属元素:碱金属元素可作为除杂元素加入铜丝中,有利于杂质元素形成氧化物、硫化物、硒化物进而去除 O、S、Se 等元素^[32];也可作为合金元素,利于提高焊球颈部的断裂强度,降低细丝的断裂几率。专利文献 CN104278169A 中,向纯铜中加入了 0.008%~1.000%(质量分数)的 Li, 0.3%~0.5%(质量分数)的

图6 键合点化学腐蚀图:(a)键合点腐蚀扫描电镜图,(b)键合点腐蚀形貌图^[24]Fig.6 Diagram of bonding position chemical corrosion: (a) SEM image of bonding position chemical corrosion, (b) morphology of bonding position chemical corrosion^[24]

Ce,使得铜丝的耐腐蚀性得到显著增强,同时使得焊接热影响区长度较一般键合铜丝降低了 22%^[33],Li 的加入也使得焊球颈部的强度得到提升,使得断裂几率大大降低。

碱土金属元素:碱土金属元素为元素周期表第二主族元素。其中 Be、Mg 均可作为脱氧剂,但由于 Be 的价格昂贵,因而并不常使用。Ca 几乎不固溶于铜,可与杂质形成高熔点化合物,能调节键合丝力学性能和高温塑性。专利文献 CN104593635A 中,通过向铜丝中加入 0.000 5%~0.020 0%(质量分数)的 Mg、0.000 5%~0.010 0%(质量分数)的 Sr,提高球焊过程的稳定性以及铜丝的抗高温氧化性^[34]。专利 CN109390 309A 中,向纯铜中加入 0.1%~3.0%(质量分数)的 Ag 以及 0.02%~0.05%(质量分数)的 Ca 和 0.026%~0.050%(质量分数)的 Be,发现 Ca 能有效提升铜合金的焊线作业性,增强线材与芯片及基板的粘附性能,有助于提升线材的抗硫化能力和抗老化能力,而 Be 能提高铜合金线材的再结晶温度,提升线材在高温环境下的耐疲劳性,有效降低颈部断裂的几率。使得生产出的铜合金线材具有优异的作业性和可靠性,且成本较低^[35]。

过渡元素:微量的 Fe 可以细化晶粒,提高铜丝的塑性加工性能;微量的 Zn 可以抑制铜的氧化;Zr 可以提高铜丝的再结晶温度,经常和其他元素混合添加;而 Ti 可以增强铜线的键合稳定性。专利 62-130249 中在 4 N 纯铜中加入 5~200 $\mu\text{g/g}$ 的 Ti,大大提高了铜线的键合效率^[36]。专利 CN106992164A 中发表了一种微电子封装用铜合金单晶键合丝,该 Cu 丝中各成分的重量百分比如下,Ag 为 0.01%~0.02%(质量分数)、Sc 为 0.01%~0.02%(质量分数)、Fe 为 0.001%~0.015%(质量分数)、Ti 为 0.001%~0.02%(质量分数),余量为 Cu^[37]。研究发现,Sc 能影响铜合金的组织 and 性能,在保持合金塑性的同时,能够大幅提高合金强度,具有净化和改善组织的作用,而 Ti 的加入会产生很强的变质作用和抑制再结晶能力,也可与 Cu 形成固溶体,不会生成 IMC 相,提高器件的可靠性。专利 CN111004982A 中向铜钼合金中加入了一定质量分数的 Ti、Co 元素,通过研磨、压制形成中间体后,进行淬火,反复捶打后得到铜钼合金复合材料,解决了其在使用过程中易发生断裂的问题,提高了用户对产品的使用体验^[38]。

稀土元素:稀土元素具有很高的电负性以及较大的原子半径,微量的稀土元素能够细化晶粒^[39],提高铜丝抗氧化性和可焊性。添加适量稀土元素也有利于降低铜丝硬度,在添加量为 0.000 2%~0.002 0%(质

量分数)时,更有利于提高铜丝的可焊性,使器件更可靠。专利 CN105463237A 中以铜为基底材料,将 0.1%~5%(质量分数)的 Ag 作为主合金,合金中加入含量 $\leq 0.001\ 5\%$ (质量分数)的稀土元素,使得丝材在具有高强度、良好导电、导热性能的同时,降低了自身硬度,并提高了抗氧化性^[40]。专利 CN1100718526A 中以铜为基底材料,加入 0.005 1%~0.100 0%(质量分数)的稀土元素及 0.000 1%~0.080 0%(质量分数)的 Pd,所述稀土元素为 La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Y 中的一种或多种的组合^[41]。由于钕元素的添加,使得铜丝的抗氧化性得到增强,硬度降低。适量的稀土元素与铜中的微量杂质铅等形成高熔点化合物,呈细小弥散的质点在晶粒内部均匀分布,细化晶粒的同时,进一步改善了铜的力学加工性能,从而满足窄间距、低长弧、高强度的键合要求。

综上,对添加微量元素种类及其作用进行整理,如表 3 所示。

通过采用微合金化改性的手段,键合铜丝的硬度及抗氧化性也得到了改善,具体案例如下:为了降低铜丝的硬度,专利 CN104752385B 公开了一种 IC 封装用超软键合铜合金丝的制备方法,在纯度为 4 N 以上的铜丝中加入 0.000 01%~0.000 2%(质量分数)的 W,0.000 1%~0.001 0%(质量分数)的 S,0.000 4%~0.020 0%(质量分数)的 P 以及 0.000 8%~0.020 0%(质量分数)的 Ag,多次拉丝后再退火处理,最终得到的键合铜丝硬度低至 67 HV,使得铜丝硬度大幅降低,解决了由于铜丝硬度过大易对芯片及基板造成损坏的问题,大大提高了器件的可靠性^[42]。专利 CN105161476B 中采用纯度为 4 N 以上且主体氧含量 $\leq 0.000\ 5\%$ (质量分数)的 Cu,晶粒平均直径为 1.6~1.8 μm ,通过真空熔炼和定向连续拉拔工艺获得线材后再拉成丝状,其间进行两次退火处理,最终得到硬度极低、球焊时变形球圆度高的适用于细间距封装的键合铜丝^[43]。

为解决铜丝易氧化的问题,除了在铜丝表层镀覆金属,向铜中添加微量元素同样可以提高丝材抗氧化性。专利 CN109402445B 中向纯铜中加入 0.000 6%~0.001 5%(质量分数)的 Al,0.000 9%~0.001 5%(质量分数)的 Si,0.000 3%~0.000 8%(质量分数)的 P,预制合金后,压铸,在氮气保护下连续退火,使得铜的再结晶温度、力学性能得到增强的同时,其抗氧化能力也大幅提升^[44]。

在微电子封装领域,由于现代封装对于长距离、窄间距的键合要求,专利 CN107904434B 以高纯铜、锡及微量金属元素为原材料,采用定向凝固连铸

表 3 添加微量元素种类及作用
Tab.3 Types and effects of adding trace elements

类别	元素名称	元素作用
碱金属元素	Li、Na、K、Rb	Li 有利于杂质元素形成氧化物、硫化物,进而去除 O、S 元素,也可作为合金元素,利于提高焊球颈部的断裂强度,降低细丝的断裂几率。
碱土金属元素	Be、Mg、Ca、Sr	Be 作为脱氧剂的同时,能提高铜合金线材的再结晶温度,提升线材在高温环境下的耐疲劳性,有效降低颈部断裂的几率; Mg 可用作脱氧剂,适量 Mg 可避免铜合金中残存的 Cu ₂ O 和 CuO 夹杂; Ca 能有效提升铜合金的焊线作业性,增强线材与芯片及基板的黏附性能,有助于提升线材的抗硫化能力和抗氧化能力; Sr 可提高球焊过程的稳定性及铜丝的抗高温氧化性。 Sc 能影响铜合金的组织 and 性能,在保持合金塑性的同时,能够大幅提高合金强度,具有净化和改善组织的作用; Ti 的加入会产生很强的变质作用和抑制再结晶能力,也可与 Cu 形成固溶体,不会生成 IMC 相,提高器件的可靠性; Zn 可以抑制铜的氧化; Zr 可以提高铜丝的再结晶温度,经常和其他元素混合添加; Nb 能提升铜丝的抗氧化性和抗腐蚀性能; Ru 可以改善铜丝的焊接效果并增强其抗氧化性能; Mn 可作为脱氧剂,提高铜的软化温度并改善其力学性能和工艺性能,也能起到固溶强化的作用。
过渡元素	Fe、Zn、Zr、Ti、Sc、 Nb、Ru、Mn	稀土元素与铜中的微量杂质铅等形成高熔点化合物,呈细小弥散的质点在晶粒内部均匀分布,细化晶粒的同时,进一步改善了铜的力学加工性能,提高抗氧化性与可焊性,添加一定的稀土元素能防止硅片损坏,也能提升铜丝的形弧特性。
稀土元素	La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、 Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Y	Si 可以使再结晶温度上升、延迟位错回复,防止铜丝键合时发生晶界破裂,减少对器件的损害; B 具有细化晶粒和脱氧的作用;
其他元素	Si、P、B、In、Ge	P 可以提高熔体的流动性;In 可以改善铜丝的散热性,增强铜丝的断裂强度,此外 In 也有湿润性效果,能有效提升铜合金的焊线作业性,能增强线材与芯片及基板的黏附能力,提高器件的可靠性; Ge 有助于提升铜键合丝抗氧化、硫化能力,并提高焊接点的接合强度。

技术制成棒材后,在氢气气氛下退火处理,通过多道次的拉拔最终得到直径为 0.010~0.018 mm 的超细丝^[45]。制备出的铜丝不仅有良好的导电、导热性,强度也大大提高,加工态伸长率≥2.0%,且在拉拔过程中不易断线,单根细丝最大长度超三万米,解决了超细超长铜丝的技术生产难题,有利于产业化的实施和应用。

近年来,国内涌现出了多家键合丝生产厂商,并通过多年的投入及研发,打破了国外企业在中国市场的垄断地位,未来国内的键合铜丝市场也将呈现更加多样化的产品,竞争也会愈发激烈。

5 展望与总结

统计数据表明,2021 年我国键合丝需求量已经达到 238.9 亿米,而其中键合铜丝的市场占有量已远超过键合金丝。随着近年来金价的持续上涨,铜丝也一定会成为键合丝市场的主流引线键合材料,铜丝键合工艺技术也将成为重点研究方向^[46]。为有效克服当前键合铜丝存在的易氧化、热稳定性差、力学匹配性差等问题,通过向铜丝中添加多种微量元素来改善键合铜丝的性能已经成为主要趋势,由于可

添加元素种类繁多,各元素的作用较为复杂,按照传统方法通过大量实验找出较优的方案无疑需要花费大量的时间和资源。未来可利用机器学习模型对合金成分进行优化设计,以更低的资源消耗寻求更加合适的元素成分及含量,得到性能更加优良的铜丝,提高器件使用的可靠性,满足高端领域的材料需求^[47]。

参考文献:

[1] 吴建得,罗宏伟. 铜键合线的发展与面临的挑战[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2008, 26(6): 39-42.
WU J D, LUO H W. The development and challenges of Cu bonding wire[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2008, 26 (6): 39-42.

[2] 李建峰. 铜丝键合技术研究及市场趋势综述[J]. 有色矿冶,2015, 31(5): 60-63.
LI J F. Review of the copper wire bonding technology research and market trend[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2015, 31 (5): 60-63.

[3] PETERS L. Exploring advanced interconnect reliability[J]. Semiconductor International, 2002, 25(8): 63-67.

[4] 赵钰. 铜丝键合工艺在微电子封装中的应用[J]. 电子元器件应用, 2002, 4(8): 48-51.
ZHAO Y. Application of copper wire bonding in microelectronic

- packaging[J]. Electronic Component & Device Applications, 2002, 4(8): 48-51.
- [5] 伍隼,杨邦朝. IC 封装材料市场发展分析[J]. 电子与封装, 2002, 2(3): 7-9.
- WU J, YANG B Z. Market development analysis of IC packaging materials[J]. Electronics & Packaging, 2002, 2(3): 7-9.
- [6] 马晓霞,李玉芹,范红,等. 一种键合金银合金丝的制备方法: CN201210259179.3[P]. 2013-11-20.
- MA X X, LI Y Q, FAN H, et al. Preparation method of bonded gold-silver alloy wire: CN201210259179.3[P]. 2013-11-20.
- [7] 曹军. 键合铜线性能及键合性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2012.
- CAO J. Research of copper bonding wire performance and bonding performance[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [8] 雒继军. 微电子封装用主流键合铜丝半导体封装技术[J]. 电子制作, 2022, 30(14): 98-100.
- LUO J J. Main bonded copper wire semiconductor packaging technology for microelectronics packaging[J]. Practical Electronics, 2022, 30(14): 98-100.
- [9] 丁雨田,曹军,许广济,等. 电子封装 Cu 键合丝的研究及应用[J]. 铸造技术, 2006, 27(9): 971-974.
- DING Y T, CAO J, XU G J, et al. Research and application of copper bonding wire in electronic packaging[J]. Foundry Technology, 2006, 27(9): 971-974.
- [10] AINOUE L, METALLURGIST M, FEINDRAHT M, et al. The use of copper wire as an alternative interconnection material in advanced semiconductor packaging[J]. KnS Report, 1999, 11(2).
- [11] 胡立杰. 高性能键合铜丝的制备及其球键合工艺研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2009.
- HU L J. Study on the preparation and ball bonding process for the high-performance copper bonding wire[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [12] 曹军,丁雨田,曹文辉. 单晶铜键合丝制备过程中的断线研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 84-89.
- CAO J, DING Y T, CAO W H. Research of break line in single crystal copper bonding wire drawing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 84-89.
- [13] 何田. 引线键合技术的现状和发展趋势[J]. 电子工业专用设备, 2004, 33(10): 12-14, 77.
- HE T. Current situation and development trend of lead bonding technology[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2004, 33(10): 12-14, 77.
- [14] 孙千十. 集成电路封装中的引线键合技术探究[J]. 电子制作, 2015(13): 97.
- SUN Q S. Research on wire bonding technology in integrated circuit package[J]. Practical Electronics, 2015(13): 97.
- [15] 王彩媛,孙荣禄. 芯片封装中铜丝键合技术的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(z2): 206-209.
- WANG C Y, SUN R L. Research progress in copper wire bonding technology for chip packaging[J]. Materials Reports, 2009, 23(z2): 206-209.
- [16] 李元升. 引线键合机工艺技术分析[J]. 电子工业专用设备, 2004, 33(3): 78-81.
- LI Y S. Technology analysis of wire bonder[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2004, 33(3): 78-81.
- [17] HANG C J, WANG C Q, SHI M D, et al. Study of copper free air ball in thermosonic copper ball bonding[A]. 2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology[C]. Shenzhen: IEEE, 2005.
- [18] 臧宇晴,杨兆建,乔海灵. 引线键合技术进展[J]. 电子工艺技术, 2007, 28(4): 205-210.
- CHAO Y Q, YANG Z J, QIAO H L. Progress on technology of wire bonding[J]. Electronics Process Technology, 2007, 28(4): 205-210.
- [19] 姚友谊,吴琪,阳微,等. 铝质焊盘的键合工艺[J]. 电子工艺技术, 2023, 44(5): 25-28, 33.
- YAO Y Y, WU Q, YANG W, et al. Wire bonding process on aluminum pad[J]. Electronic Process Technology, 2023, 44(5): 25-28, 33.
- [20] 赵健. 铜线键合在多印线 IC 封装中的应用研究[D]. 上海:复旦大学, 2009.
- ZHAO J. Research on the application of copper bonding wire in multi-printed line IC packaging[D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
- [21] 余斋,王肇,程俊,等. 热压超声球引线键合机理的探讨[J]. 电子工艺技术, 2009, 30(4): 190-195.
- YU Z, WANG Z, CHENG J, et al. Discussion of mechanism of thermo-sonic ball wire bonding[J]. Electronics Process Technology, 2009, 30(4): 190-195.
- [22] 鲁凯,任春岭,高娜燕,等. 铜丝球键合工艺及可靠性机理[J]. 电子与封装, 2010, 10(2): 1-6, 10.
- LU K, REN C L, GAO N Y, et al. The process and reliability researches of copper wire bonding[J]. Electronics & Packaging, 2010, 10(2): 1-6, 10.
- [23] 范士海. 半导体器件键合失效模式及机理分析[J]. 环境技术, 2018 (3): 54-61, 65.
- FAN S H. Failure mode and mechanism analysis of semiconductor device wire bonding[J]. Environmental Technology, 2018 (3): 54-61, 65.
- [24] 张垠,方建明,陈金涛,等. 铜丝键合在实际应用中的失效分析[J]. 半导体技术, 2019, 44(8): 647-651.
- ZHANG Y, FANG J M, CHEN J T, et al. Failure analysis of copper wire bonding in practical applications[J]. Semiconductor Technology, 2019, 44(8): 647-651.
- [25] 徐慧,杭春进,王春青,等. 金、铜丝球键合焊点的可靠性对比研究[J]. 电子工业专用设备, 2006, 35(5): 23-27.
- XU H, HANG C J, WANG C Q, et al. Contrast research on the reliability of gold and copper wire/ball bonding[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2006, 35(5): 23-27.
- [26] SCENDO M. The influence of adenine on corrosion of copper in chloride solution[J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 2070-2077.
- [27] KEAR G, BARKER B D, WALSH F C. Electrochemical corrosion of unalloyed copper in chloride media--a critical review[J]. Corrosion Science, 2004, 46(1): 109-135.
- [28] 刘兴杰,张滨海,王德峻,等. 铜线键合 Cu/Al 界面金属间化合物微结构研究[J]. 半导体技术, 2011, 36(11): 880-884.
- LIU X J, ZHANG B H, WANG D J, et al. Properties of Cu-Al in-

- termetallic compounds in copper wire bonding[J]. Semiconductor Technology, 2011, 36 (11): 880-884.
- [29] UNO T. Bond reliability under humid environment for coated copper wire and bare copper wire[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(1): 148-156.
- [30] 黄华,都东,常保华. 铜丝引线键合技术的发展[J]. 焊接, 2008, 426(12): 15-20, 65.
HUANG H, DU D, CHANG B H. Development of copper wire bonding technology[J]. Welding & Joining, 2008, 426 (12): 15-20, 65.
- [31] KAIMORI S, NONAKA T, MIZOGUCHI A. The development of Cu bonding wire with oxidation-resistant metal coating[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(2): 227-231.
- [32] 张弓. 半导体封装用键合铜丝技术[J]. 中国新技术新产品, 2021 (10): 70-72.
ZHANG G. Bonded copper wire technology for semiconductor packaging[J]. New Technology and New Products of China, 2021 (10): 70-72.
- [33] 曹军,范俊玲,李艳梅,等. 一种耐腐蚀键合铜丝及其制备方法: CN201310293330.X[P]. 2015-01-14.
CAO J, FAN J L, LI Y M, et al. Corrosion resistant bonded copper wire and a preparation method thereof: CN201310293330.X[P]. 2015-01-14.
- [34] 蔡元华. 电子封装用铜键合线及其制备方法: CN201310532892.5 [P]. 2015-05-06.
CAI Y H. Copper bonding wire for electronic packaging and its preparation method: CN201310532892.5[P]. 2015-05-06.
- [35] 周振基,周博轩,麦宏全,等. 一种表面有镀层的铜合金线及其制备方法: CN201811141540.6[P]. 2019-02-26.
ZHOU Z J, ZHOU B X, MAI H Q, et al. Copper alloy wire with coating on the surface and its manufacturing method: CN201811141540.6[P]. 2019-02-26.
- [36] TANIGAWA T, SHIGA S, KAGA I, et al. Copper fine wire for Bonding: JP62-130249[P]. 1987.06.12.
- [37] 袁斌,徐云管,彭庶瑶,等. 一种微电子封装用铜合金单晶键合丝及其制备方法: CN201710228970.0[P]. 2019-03-01.
YUAN B, XU Y G, PENG S Y, et al. Copper alloy single crystal bonding wire for microelectronics packaging and a preparation method thereof: CN201710228970.0[P]. 2019-03-01.
- [38] 田鹏. 一种铜钯合金复合键合材料及其制备方法: CN2019111305443.0[P]. 2020-04-14.
TIAN P. Copper-palladium alloy composite bonding material and its preparation method: CN2019111305443.0[P]. 2020-04-14.
- [39] 杨国祥,郭迎春,孔建稳,等. 稀土元素对键合金丝组织与性能的影响[J]. 贵金属, 2011, 32 (1): 16-19.
YANG G X, GUO Y C, KONG J W, et al. Effects of rare earth elements on structure and properties of gold bonding wire[J]. Precious Metals, 2011, 32 (1): 16-19.
- [40] 林良. 一种铜银合金键合丝及其制备方法: CN201510880814.3 [P]. 2016-04-06.
LIN L. Copper-silver alloy bonding wire and its preparation method: CN201510880814.3[P]. 2016-04-06.
- [41] 韩连恒,王岩,刘炳磊,等. 一种超细线距电子封装用稀土铜合金键合丝及其制备方法: CN201911005924.X[P]. 2020-01-21.
HANG L H, WANG Y, LIU B L, et al. Rare earth copper alloy bonding wire for ultra-fine wire distance electronic packaging and a preparation method thereof: CN201911005924.X[P]. 2020-01-21.
- [42] 周振基,周博轩,任智. 一种 IC 封装用超软键合丝及其制造方法: CN201510039412.0[P]. 2018-02-02.
ZHOU Z J, ZHOU B X, REN Z. Ultra-soft bonding wire for IC packaging and its manufacturing method: CN201510039412.0 [P]. 2018-02-02.
- [43] 周振基,周博轩,任智. 一种用于细间距 IC 封装的键合铜丝及其制造方法: CN201510347022.X[P]. 2018-10-30.
ZHOU Z J, ZHOU B X, REN Z. Copper bonding wire for fine pitch IC packaging and its manufacturing method: CN201510347022.X[P]. 2018-10-30.
- [44] 王娟,曹凯,刘实,等. 一种抗氧化铜基合金键合引线及其制备方法: CN201811333935.6[P]. 2021-01-15.
WANG J, CAO K, LIU S, et al. Wire bonding of anti-oxidation resistant copper-based alloy and preparation method thereof: CN201811333935.6[P]. 2021-01-15.
- [45] 周文艳,孔建稳,杨国祥,等. 一种超细超长铜合金丝及其生产方法: CN201711187576.3[P]. 2020-03-31.
ZHOU W Y, KONG J W, YANG G X, et al. Ultra-fine and ultra-long copper alloy wire and production method thereof: CN201711187576.3[P]. 2020-03-31.
- [46] 钟明君,黄福祥,阮海光,等. 铜及银键合丝材料的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(z2): 99-102.
ZHONG M J, HUANG F X, RUAN H G, et al. Research progress on the copper and silver bonding wire materials[J]. Materials Reports, 2017, 31(z2): 99-102.
- [47] 梁爽,黄福祥,彭成,等. 电子封装用铜及银键合丝研究进展[J]. 功能材料, 2019, 50(5): 5048-5053, 5063.
LIANG S, HUANG F X, PENG C, et al. Research progress on copper and silver bonding wires for microelectronic packaging technology[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(5): 5048-5053, 5063.