

# 热-力耦合作用下键合丝失效机理的仿真研究

李红梅

中国电子科技集团公司第十三研究所 河北石家庄 050000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20213

**[摘要]** 键合丝是半导体封装中芯片和基板相互连接的重要元件,它的使用寿命好坏直接关系到电子器件是否稳定。电子器件工作时,键合丝处在热-力耦合的复杂环境中,热场不均、应力应变累积、工艺缺陷容易造成其失效,从而引起整个系统的瘫痪。本文用有限元仿真建立符合实际工况的热力耦合模型进行验证,对失效机理进行系统分析,从结构、工艺、材料、监测四个方面提出防控措施,为提高键合丝可靠性、延长器件寿命提供理论和技术支持。

**[关键词]** 键合丝;热-力耦合;失效机理;有限元仿真

## 引言:

随着半导体技术向着高集成度、高功率密度方向发展,电子器件所处的环境越来越恶劣,键合丝作为主要的互连介质,其可靠性也变得十分重要。引线键合中热超声键合使用较多,键合丝结构细小、承载能力小,长期处在热-力耦合的环境下,失效概率很高。目前的研究大多只做单个载荷的实验,存在着许多不足,而有限元仿真可以准确地模拟出耦合场的变化过程。本文主要研究热力耦合作用下键合丝的失效,建立验证仿真模型、分析机理、提出防控措施,填补研究空白,促进封装技术的发展。

## 一、热-力耦合仿真模型构建与验证

### 1.1 搭建仿真模型 贴合实际工况

热力耦合仿真模型建立的关键就是再现键合丝的实际结构和服役工况,为失效机理分析赋予可靠的数值根基。根据实际的应用场景,用有限元软件建立三维模型,包括键合丝、芯片焊盘、基板、封装材料等主要部件,考虑各个部件的几何特征以及相互作用。

几何建模严格按照实际键合工艺参数,准确复制键合丝线弧、直径和焊点结构,消除几何简化造成的仿真误差,同时把环氧树脂封装层加入到模型中,完全再现服役环境。金丝球键合焊球直径控制在线径的2~4倍间,楔焊焊点为实际工艺形态。

材料属性设置符合实际情况,准确给出键合丝(金丝、铜线等)的热物理和力学参数,考虑到高温下热软化和蠕变特性,芯片、基板和封装材料的属性参照实际参数。网格划分使用自适应的方法,在焊点、线弧等易产生缺陷的地方加强,非关键区域简单化处理,达到计算精度和速度的平衡。

### 1.2 设置边界条件 还原服役环境

边界条件合理设置是模型贴合实际的前提,直接影响到仿真结果是否可靠。根据键合丝的工作状态来设置热边界和力学边界,使热力耦合场得到准确的模拟,保证仿真结果符合真实的服役环境。

热边界条件以热载荷来源为依据来设定,模拟芯片发热传递以及键合丝焦耳热,通过设置芯片焊盘温度、施加电流载荷的方式,动态模拟温度场,对基板底部进行对流换热边界,模拟热量散发,使温度场分布与实际情况一致。

力学边界条件还原实际受力状态,对基板底部施加固定约束,对芯片施加柔性约束以防止应力计算出现误差;采用温度和约束耦合的方式模拟热膨胀系数不同造成的热应力,为系统施加振动载荷来模拟运输、工作时受到的冲击;合理设置接触属性,防止出现接触分离等问题。

### 1.3 验证仿真模型 保障结果可靠

仿真模型有效性验证是失效机理分析的前提,需要从多个方面进行验证以消除模型简化和参数设置的误差,保证模型可以有效地反映键合丝在热-力耦合下真实的状况,从而保证后面分析结果的可靠性。

用对比验证法,将仿真得到的温度、应力分布趋势同已有实验结果进行比较,保证分布规律一致;用灵敏度分析法,改变材料、几何和边界参数,检验参数设置是否合理、模型是否稳定,保证仿真结果符合理论预期。

利用收敛性验证来保证计算的准确性,逐渐增加网格点数以使得仿真结果趋于稳定,改变计算步长来保证耦合计算的收敛。经过多维验证,模型可以有效地模拟出键合丝的服役情况,仿真结果可信,可以用于后续失效机理的研究。

## 二、热-力耦合作用下键合丝失效机理分析

### 2.1 热场演化不均 引发应力集中

热力耦合作用中,热场演化不均成了键合丝失效的主导因素。由于键合丝结构精细、各个部位的热传导不同、芯片和基板的热膨胀系数不一样,所以内部形成了非均匀的温度场,从而产生了局部应力集中,这是失效的起始点。

温度场不均的空间和时间两个方面表现出来,空间上焊点与芯片、基板接触热传导快,线弧部位热量积聚形成明显的温度梯度,时间上器件周期性工作使键合丝温度周期性升降。非均匀温度场造成各个部位热膨胀量不一样,受约束后就会产生热应力。

应力集中多出现在线弧根部、焊点边缘这些几何突变的地方,封装材料和键合丝的热膨胀不同也会加重这种状况。应力达到材料的屈服强度时会出现局部的塑性变形并积累成微裂纹,高温会降低材料的强韧性,使微裂纹迅速扩展,最后造成键合丝断裂失效。

### 2.2 应力应变累积 诱发蠕变疲劳

热-力耦合时,键合丝应力应变存在周期性的变化,长期积累会造成蠕变疲劳失效,这是其长时间使用的主要失效方式,本质上就是时间依赖性蠕变损伤和循环塑性损伤的耦合累积。

器件工作时有热、机械载荷的周期性变化,键合丝受周期性拉压应力循环作用会产生疲劳损伤,高温下键合丝材料会蠕变,即使应力不大于屈服强度,也会慢慢发生塑性变形并累积,从而加重材料损伤。

蠕变和疲劳耦合作用使失效提前到来,疲劳造成微裂纹产生,蠕变导致裂纹扩大,蠕变形成的微观缺陷又成了疲劳裂纹的萌生点。微观上是位错运动、晶界滑移等,两者一起造成应力不均匀,加速裂纹扩展,最后造成键合丝断裂,线弧变形也会破坏互连结构。

### 2.3 工艺缺陷叠加 加剧失效演化

键合丝的制造和键合过程中会产生各种工艺缺陷,这些薄弱环节在热力耦合作用下,加上热应力、蠕变疲劳损伤叠加,加快了失效的发展速度,降低了它的服役可靠性。

工艺缺陷分为三类,一是键合工艺缺陷(未焊透、虚焊等),降低接触强度,加剧应力集中;二是材料缺陷(杂质、气孔等),降低材料强韧性,加速裂纹扩展;三是表面缺陷(划痕、氧化层等),破坏表面完整性,成为失效起始点,各种缺

陷都会降低键合可靠性。

工艺缺陷叠加效应加大了失效的概率,应力分布更加不均匀,微裂纹更容易产生,抗蠕变、抗疲劳的能力下降,失效的时间也变短。缺陷会降低热传导效率,造成温度场不均匀,加大热应力的影响,形成缺陷、应力集中、损伤累积、失效的恶性循环。

## 三、键合丝失效防控优化策略

### 3.1 优化结构设计 缓解应力集中

为了解决由于热场不均匀造成的应力集中问题,从优化键合丝和互连结构入手,改善温度场分布和应力分布,减小应力集中,降低失效风险,提高键合丝的服役可靠性。

首先对键合丝线弧结构进行优化设计,依据热-力耦合仿真结果,合理地设计线弧的曲率半径、高度和长度,防止线弧根部出现尖锐的拐角,减小几何突变带来的应力集中,按照电子器件的功率密度和热载荷分布来布置键合丝数量和间距,防止键合丝之间存在热相互影响问题,从而改善温度场分布,减少局部温度梯度,削减热应力产生。功率密度高时用多根细径键合丝代替一根粗径键合丝,既可以保证信号传输和能量传导的效率,又可以分散应力,减小应力集中。

其次,改善焊点结构设计,改良焊点的形状和尺寸,增大键合丝和焊盘、基板之间的接触面积,减小接触部位的应力集中;对金丝球键合,合理控制焊球直径和键合压力,防止焊球过小或者过大造成应力集中;对楔焊键合,优化焊点的楔形角度,保证焊点与焊盘良好接触,提高接触强度。另外在键合丝和焊盘的连接处设置过渡结构,减小结构突变,减轻应力集中,优化封装结构设计,选用热膨胀系数与键合丝相匹配的封装材料,减少封装材料和键合丝间热膨胀差异,减小由于热膨胀不匹配造成的约束力,进一步减小应力集中。

### 3.2 改进键合工艺 减少工艺缺陷

工艺缺陷会加重键合丝的失效,改进键合丝的制造和键合工艺,减少各种工艺缺陷的产生,提高键合质量,给键合丝可靠服役提供保障。

在键合丝制造工艺上,改进材料提纯工艺,削减键合丝内部的杂质和气孔,提高材料的纯度和均匀性,改善键合丝的力学性能和热性能,改良键合丝表面的完整性,加强键合丝制造过程中的质量检测,制订严格的品质控制准则,剔除有明显瑕疵的键合丝,从源头上削减工艺上的不足。

优化热超声键合参数,合理控制超声功率、键合压力、

键合温度和键合时间等关键参数,防止由于参数不合理造成焊点未焊透、虚焊、开裂等缺陷;控制超声功率防止过高的产生界面微裂纹,控制键合压力防止过大的造成底层材料损伤或者过小的造成虚焊;对金丝球键合,优化电子打火参数保证焊球形状规则、尺寸均匀,防止线尾过短或过长造成的缺陷。改进键合工艺流程,加强键合前表面处理,去除焊盘表面氧化层和污染物,提高键合丝与焊盘的结合强度;加强键合后检测,使用无损检测技术及时发现并剔除有工艺缺陷的互连结构,减少缺陷对键合丝服役可靠性的不良影响。

### 3.3 优选材料体系 提升抗失效性

键合丝的材料性能直接影响到它抗热-力耦合失效的能力,选择合适的材料体系可以提高键合丝的耐高温、抗蠕变、抗疲劳性能,从材料上降低失效的风险,延长其服役寿命。

首先根据电子器件的服役温度、载荷条件等实际要求来选择热导率高、热膨胀系数小、弹性模量适中、抗蠕变和抗疲劳性能好的材料,如高温服役环境下用耐高温合金键合丝代替传统的金丝、铜线,提高键合丝的耐高温性能和抗蠕变能力;承受大机械载荷的场合,选用高强度、高韧性键合丝材料,减小应力应变积累造成的损伤。同时,可以采用材料改性技术,对键合丝材料进行合金化处理,加入适量的合金元素,改善材料的微观结构,提高材料的力学性能和热性能,提高材料的抗失效能力。

其次,对芯片、基板、封装材料进行优化选择,选择热膨胀系数和键合丝匹配度高的材料来减小热膨胀不匹配引起的热应力,选择热导率高的基板材料来提高散热效率,改善键合丝的温度场分布,降低局部温度,减少蠕变和疲劳损伤,选择粘结强度高、耐高温的封装材料来提高封装结构的稳定性,减少对键合丝的约束力,保护键合丝免受外界环境的侵蚀,提高键合丝的抗腐蚀能力和服役可靠性。

### 3.4 完善监测机制 实现失效预警

建立完善的键合丝失效监测体系,对键合丝在热、力耦合作用下发生的状况实施动态监测,尽早察觉失效预兆,达成失效预警,为电子器件的保养和更换赋予支撑,防止因为键合丝失效引发的电子系统瘫痪。

首先创建依靠仿真和实验相融合的监测模型,利用热-力耦合仿真来预估键合丝的应力分布,温度分布以及失效发展趋向,找出失效的前兆特点,联系实验探究,创建键合丝失效前兆同监测参数间的关联联系,选定监测指标,比如键

合丝的温度变动,应力变动,电阻变动等。其次使用先进的监测技术,比如红外测温技术、应变传感技术、电阻监测技术等等,对键合丝的温度、应力、电阻等参数变化进行实时监测,获取失效前兆信号;例如利用红外测温技术检测键合丝温度分布的变化情况,发现局部温度异常升高时即表示存在应力集中或者缺陷,应立刻查证;利用电阻监测技术测量键合丝的电阻值变化,电阻突然增大时即意味着键合丝有微裂纹产生或者焊点脱落的风险,需要立即发出警报。

另外,建立键合丝失效数据库,收集不同服役条件下键合丝的失效数据、监测数据,分析失效规律和影响因素,不断改进监测模型和预警阈值,提高失效预警的准确性、及时性;结合电子器件的工作状态,制定合理的维护措施,根据监测结果及时对有失效风险的键合丝进行维护或者更换,延长电子器件的使用寿命,提高电子系统的可靠性。

## 四、结论与展望

本文利用有限元仿真建立并验证了贴合实际的热力耦合模型,可靠性可以用于失效机理分析。从研究结果可以看出,热场不均匀造成应力集中是失效的起始点,应力应变累积引起的蠕变疲劳是主要的失效形式,工艺缺陷和热应力、疲劳损伤叠加会加重失效。因此本文从结构、工艺、材料、监测四个方面提出防控措施,可以提高键合丝的可靠性。对失效的微观机理进行深入研究,改进现有的仿真模型以获得更好的效果,研发新型的材料、工艺并将其应用到智能化系统中来实现失效预测。

## [参考文献]

- [1]田方坤,符佳佳,刘浩,等.引线键合损伤对器件造成的失效及机理研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2025,43(06):35-39.
- [2]商高屹,史万豪,杨定乾,等.高烈度地震条件下干式阀侧套管热-力耦合开裂风险研究[J/OL].高电压技术,1-11[2026-04-01].
- [3]施焕.气动膨胀蝶阀热-力耦合变形机理与补偿策略研究[J].阀门,2025,(08):954-959.
- [4]文晓东.功率器件用新型镀钎铜键合丝键合工艺及其可靠性研究[D].重庆理工大学,2025.
- [5]谢道春,甘贵生,马勇冲,等.电子封装铜键合丝的研究进展[J].中国有色金属学报,2025,35(03):758-784.