

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2024.02.006

环境应力影响下球栅阵列封装焊球 仿真分析与力学性能研究

祁立鑫, 朱冠政, 陈光耀, 卞康来, 边统帅

(中国电子科技集团公司第五十八研究所, 江苏 无锡 214035)

摘要:高密度、高性能集成电路主要封装技术采用球栅阵列封装(ball grid array, BGA), 其高密度 Sn-Pb 焊球在极端高、低温及湿热环境的影响下可靠性无法保证。为解决温度变化产生的热膨胀问题, 笔者通过有限元仿真计算 BGA 电路中焊球在高、低温交替循环应力下瞬态黏塑性应变范围, 并采用改进的 Coffin-Manson 经验方程计算器件在温度循环试验下的热疲劳寿命; 此外, 进一步采用准静态剪切和拉伸试验分析分别经过温度循环及高压蒸煮环境试验后焊球的力学性能, 同时采用扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)和能谱分析仪(energy dispersive spectroscopy, EDS)对焊球切面进行分析。研究表明:焊球在温度循环试验下具有较长的疲劳寿命, 在不考虑焊球导电与连接性能的前提下, 适当环境应力的影响可促使焊球与焊盘界面区域金属间化合物的生成, 有效增强了焊球的剪切力学性能。

关键词:球栅阵列封装; Sn-Pb 焊球; Coffin-Manson 经验方程; 热疲劳寿命; 准静态剪切

中图分类号: TN4; TH131.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2024)02-0037-08

Simulation and Mechanical Properties of Ball Grid Array Solder Balls under Environmental Stress

QI Lixin, ZHU Guanzheng, CHEN Guangyao, BIAN Kanglai, BIAN Tongshuai

(The 58th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi, Jiangsu 214035, China)

Abstract: Ball grid array (BGA) was recognized as the main packaging of high-density and high-performance integrated circuits (IC). However, the reliability of tin-lead solder balls could not be further guaranteed under the influence of extreme thermal, corrosion and humid environments. In order to consider the thermal expansion problem caused by temperature changes, the transient viscoplastic strain range of solder balls in BGA circuits under thermal cycling load condition was calculated. Meanwhile, Coffin-Manson empirical equation was used to figure out the cycle number of thermal fatigue through finite element simulation. Besides, quasi-static shear and tensile test had been carried out to analyze the mechanical properties of solder balls after thermal cycling, salt atmosphere and pressure cooker test (PCT) respectively. The cross-section of solder balls were also analyzed by means of scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). This research indicates this type of IC has more cycle times than that in appraisal. Furthermore, appropriate accelerated stress test and environmental test condition promote the formation of intermetallic compounds, which enhancing the shear mechanical properties of solder balls effectively.

Keywords: BGA (Ball Grid Array); tin-lead solder ball; Coffin-Manson empirical equation; thermal fatigue life; quasi-static shear

随着电子产品和封装系统向小型化、多功能化和高可靠性方向发展, 电子封装综合了方形扁平式封装(quad flat package, QFP)及插针网格阵列封装(pin

grid array, PGA)形式的优点, 其中球栅阵列封装(ball grid array, BGA)突破了传统封装引脚数的限制, 可满足客户对电子产品集成化、微型化的需求^[1-3]。BGA

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-12-27

第一作者简介: 祁立鑫(1997), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 从事集成电路可靠性试验工作。E-mail: 17361733259@163.com

封装集成电路广泛运用在计算机、手机、汽车电子以及军用航空等领域,所以其可靠性至关重要^[4]。为保证微电子器件应用过程中工况稳定可靠,成品 BGA 集成电路应用前需经一系列可靠性试验,对其进行筛选与考核,目前试验沿用标准为 MIL-STD-993L-2019。其中,环境试验(温度循环等)和高加速应力试验(高压蒸煮等)用以确定和纠正集成电路的薄弱环节^[5-6],例如试验后结构损坏、性能不达标和界面及内部损坏等。

研究者们基于环境与高加速应力试验开展了关于 BGA 封装焊球可靠性的研究。其中温度循环试验对焊球的影响是研究重点之一。研究表明电子器件的微结构在温度循环后的焊点界面处演化形成金属间化合物(intermetallic compound, IMC)^[7];此外在超过器件温循疲劳次数后,封装中焊点与焊球部位金属间化合物的累积导致焊球力学性能降低并造成裂纹扩展失效,严重影响了电路的性能^[8]。焊球的力学性能可用于表征器件的可靠性,例如焊球剪切与焊球拉脱超过标准规定的范围则能有效证明当前焊球的可靠性较高^[9-10]。同时有研究表明 BGA 器件焊球在不同回流温度过程中会出现不同微尺寸的 IMC,其对焊球力学性能有加强或减弱作用^[11,12]。另外也有研究表明焊球在高温高电流过程中会出现电迁移的现象^[13],长期影响下或可导致器件提前失效。

为了进一步研究 BGA 电路的可靠性,在现有研究的基础上,笔者建立了温度循环试验条件下 BGA 电路的固体力学和固体传热耦合模型,采用非线性 Anand 本构模型分析焊球的黏塑性行为及等效黏塑性应变范围,并通过 Coffin-Manson 理论模型预测焊球温度循环下的疲劳寿命;此外,通过准静态剪切和拉脱试验分析经过温度循环和高压蒸煮加速试验后的焊球力学性能,验证了仿真分析结果的准确性,并预测了极端环境试验后焊球的可靠性。笔者的研究为 BGA 电路的设计、生产和试验分析提供了参考。

1 焊球温度循环仿真原理及工艺参数

目前,在 GJB 548C—2021《微电子器件实验方法和程序》中的方法 2009.2 外部目检中提高了对焊球凹坑和共面性的判定标准。而 BGA 电路经过相关可靠性筛选和考核试验后表面易出现超比例的凹坑和焊球

缺失现象,目检为不合格,表明焊球可能存在力学性能不足问题。因此为确保试验 BGA 电路焊球可靠性,以新封装且试验合格的 BGA 电路为试验对象,每颗电路包含 7×11 个阵列焊球,成分为锡铅(Sn-Pb),光学显微镜下焊球无异常。以 3 颗电路为一组,分别用于后续的氮气柜贮存、温度循环和高压蒸煮试验,试验前 BGA 电路的焊球表面形貌如图 1 所示。按照 GJB 548C—2021 中外部目检相关判据,焊球目检合格,可以进行后续可靠性试验分析与验证。

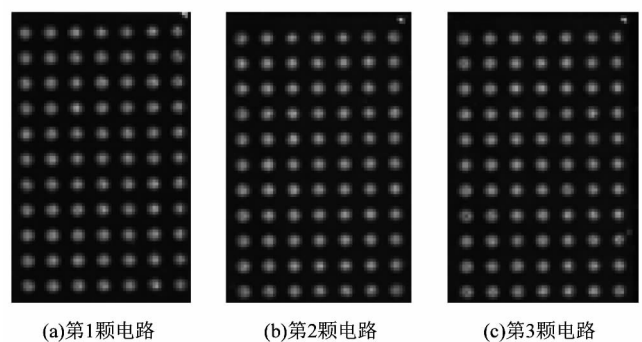


图 1 试验前 BGA 电路的焊球表面形貌

Figure 1 Surface morphology of solder balls of BGA circuit before experiment

1.1 有限元建模

首先以专用有限元软件为分析工具进行仿真工作,分析在温度循环过程中焊球的局部特征应变。为了突出主要研究问题、减少计算量并提高运算收敛性,本研究中 BGA 电路的主要结构为:Sn-Pb 焊球、Cu 焊盘和塑封料。模型中忽略阻焊层和塑封料内部 Si 芯片及其他特征结构,所有界面完全接触,不考虑结构缺陷、空洞和分层等干扰因素,BGA 电路的三维模型和网格划分如图 2 所示。如图 2(a)所示,下侧塑封料尺寸为 $15.00 \text{ mm} \times 9.00 \text{ mm} \times 4.40 \text{ mm}$;焊球直径为 $\varnothing 0.76 \text{ mm}$,焊球顶部至塑封体表面的距离为 0.60 mm ;焊盘直径为 $\varnothing 0.57 \text{ mm}$,厚度为 0.14 mm ,焊盘内嵌于塑封体内。

采用自由四面体网格划分模型如图 2(b)所示,在几何尺寸较小处网格密度较高,在 Cu 焊盘、塑封体和焊球之间做到了良好的网格过渡,保证了各部分材料之间的耦合关系。

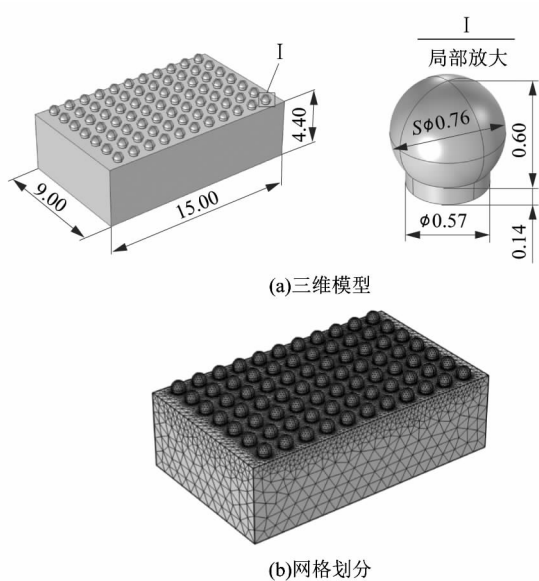


图2 BGA电路的三维模型和网格划分
Figure 2 3D model and mesh of BGA circuit

1.2 物理场控制方程与材料属性

为了分析 BGA 电路焊球在温度循环试验下的应力、应变及疲劳寿命,笔者建立了温度场-固体力学场的耦合模型,研究温度循环过程中的应力集中情况和应变范围。材料参数由选定物理场决定,塑封料和焊盘部位为线弹性材料,焊球材料为黏塑性材料 Sn-Pb,其本构方程为黏塑性 Anand 模型,流动方程、演化方程分别为:

$$\dot{\varepsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \cdot \frac{\sigma}{s}\right)\right]^{1/m}; \quad (1)$$

表2 温度场和固体力学场的材料属性

Table 2 Material properties of thermal field and solid mechanics field

材料	热膨胀系数 $\times 10^{-5}/K^{-1}$	恒压热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度 $\times 10^3 /$ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
塑封料	1.80	1 369	0.3	1.90	22.0	0.15
焊盘	1.65	384	401.0	8.96	120.0	0.34
Sn63Pb37	50.00	150	57.8	8.40	30.6	0.37

根据 GJB 548C—2021《微电子器件试验方法和程序》中温度循环相关试验条件,笔者建立了在 $-65 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的温度循环模型。以一个周期为例,焊球在温度变化过程中受到内应力与外应力的作用产生局部应变,其等效黏塑性应变随温度变化趋势如图 3

$$\dot{s} = \left\{ h_0 \left| 1 - \frac{s}{s^*} \right|^a \text{sign} \left(1 - \frac{s}{s^*} \right) \right\} \cdot \dot{\varepsilon}_p. \quad (2)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_p$ 为非弹性应变速率, s 为变形抗力, \dot{s} 为变形抗力对时间的导数, s^* 为变形抗力饱和值, R 为气体常数, T 为绝对温度, A 为黏塑性率系数, Q 为活化能, ξ 为应力乘子, σ 为特征应变, m 为应力灵敏度, h_0 为硬化系数, a 为硬化灵敏度。

其中,变形抗力 s^* 的表达式为:

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n. \quad (3)$$

式中: \hat{s} 为变形抗力饱和系数, n 为变形抗力灵敏度。

焊球的黏塑性 Anand 模型参数如表 1 所示,其中 s_0 为变形抗力初始值。

表1 焊球的黏塑性 Anand 模型参数

Table 1 Parameters of viscoplastic Anand model of solder balls

$Q/(kJ \cdot mol)$	$A \times 10^7/s^{-1}$	ξ	m	a
90.039	1.49	11	0.303	1.34
\hat{s}/MPa	s_0/MPa	h_0/kPa	n	
80.42	56.33	2.64	0.023	

温度场运算过程基于能量守恒公式;固体力学场则由平衡方程、几何方程以及本构方程描述,几何方程是保证材料在发生变形后保持连续体的条件。同时,为保证计算过程中固体力学部分收敛,设定整个 BGA 模型中塑封料底面区域固定。温度场与固体力学场的材料属性如表 2 所示。

所示。在 $-65 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,焊球等效黏塑性应变随温度升高而减小;在 $20 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,焊球等效黏塑性应变随温度升高而增大。焊球极限温度 $-65 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的应变云图如图 4 所示。在 $-65 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温环境下,焊球主要受力方向为向内收缩,如图 4(a) 所示,应力集中

区域出现在焊球与焊盘界面处以及该界面向焊球表面延伸处,最大应变为 22.76×10^{-4} ; 在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 高温环境下,焊球受热膨胀,其受力方向以及应变情况如图 4 (b)所示,焊球与焊盘界面处出现较为严重的应力集中,最大应变为 13.46×10^{-3} 。分析可知,高温下焊球与焊盘界面处应力集中较为严重,对焊球与焊盘的界面可靠性影响较大,在反复温度变化情况下可能造成焊球连接失效。

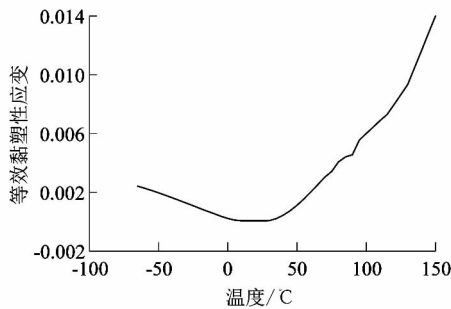


图 3 温度循环试验温度范围内焊球等效黏塑性应变随温度变化趋势

Figure 3 Change trend of equivalent viscoplastic strain with temperature within temperature range of temperature cycling test

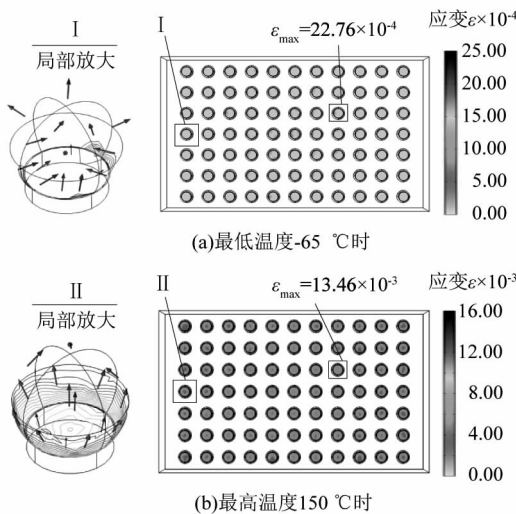


图 4 温度循环试验条件极限温度下循环温度为焊球的应变云图

Figure 4 Strain distribution of limiting temperature under temperature cycling test condition

1.3 疲劳寿命

温度循环试验条件下器件承受极端高温和低温应力,焊球本身与塑封料、焊盘等热膨胀系数不同,瞬态温度变化情况下产生应力集中与变形,周期性的应力应变容易造成焊球与焊盘界面处疲劳失效。目前一般采用 Coffin-Manson (C-M) 经验方程寿命模型预测焊球在温度循环试验条件下的疲劳寿命,笔者采用 Engelmaier 对该模型进行修正,基于改进的 Coffin-Manson 方程进行疲劳寿命预测,表达式为:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \dot{\epsilon}_f (2N_f)^c \tag{4}$$

式中: N_f 为热循环疲劳失效的次数; $\Delta \epsilon_p$ 为非弹性剪切应变范围,值为等效黏塑性应变的 $\sqrt{3}$ 倍; $\dot{\epsilon}_f$ 为疲劳延迟系数, Sn-Pb 焊料取 0.325; c 为疲劳迟滞指数。

疲劳迟滞指数 c 为:

$$c = -0.442 - 6 \times 10^{-4} T_m + 1.74 \times 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{360}{t_H} \right) \tag{5}$$

式中: T_m 为温度循环的中间温度, t_H 为高温保持时间。

由仿真模拟结果可知焊球的最大等效黏塑性应变为 13.46×10^{-3} , 温度循环条件为 $-65 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$, 高温保持时间为 10 min, 代入式(4)和式(5)计算可知焊球在温度循环试验条件下的疲劳寿命为 1 858 次循环。

2 试验分析

2.1 可靠性试验条件

为验证仿真和计算出的焊球疲劳寿命,对 BGA 封装电路展开可靠性试验分析。常规可靠性筛选试验方案根据 GJB 548C—2021 制定,试验过程中采取低循环次数(循环次数为 100)和低循环温度(循环温度为 $-55 \sim 125\text{ }^\circ\text{C}$)以验证器件的初期有效性。因此为匹配焊球有限元仿真模型,在规范的基础上加严试验条件,以较高循环温度(循环温度为 $-65 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$)和较高循环次数(循环次数为 200)为试验条件展开对焊球的可靠性分析。同时考虑该焊球在高压蒸煮下的行为,以表 3 所示试验条件对焊球展开试验分析,研究高温、高压和高湿度对焊球力学性能的影响。其中氮气柜贮存为空白对照组。

在 1、2、3 号试样分别经过氮气柜贮存、温度循环和高压蒸煮试验后,使用景深显微镜记录焊球表面形

表3 可靠性试验项目与条件

Table 3 Reliability test items and conditions

试样编号	试验项目	试验条件				
		温度/ ℃	湿度/ %	时间/ h	气压/ MPa	循环 次数
1	氮气柜贮存	20	40	168		
2	温度循环	-65 ~ 150				200
3	高压蒸煮	120	100	96	0.2	

貌,如图5所示。其中短期氮气柜贮存正常情况下不会影响焊球形貌。经过温度循环试验后的2号试样表面形貌与试验前相比无明显变化,而经过高压蒸煮试验后的3号试样表面存在类似液体固化后的渣渍,有研究表明该物质为含锡的金属化合物^[14],可影响焊球的电学性能,而在不考虑焊球电连接性能的前提下,焊球的力学性能与可靠性需进一步验证。

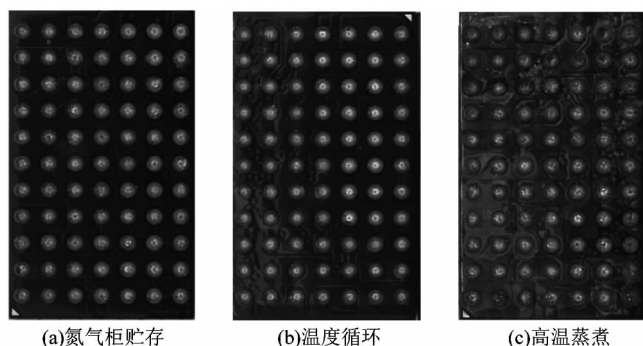


图5 可靠性试验后焊球表面形貌

Figure 5 Surface morphology of solder balls after reliability test

2.2 焊球的力学性能

为验证经过温度循环和高压蒸煮试验后焊球的力学性能,采用拉力剪切力测试仪对 BGA 封装电路焊球进行剪切和拉脱试验,试验采用规范 GJB 7677—2012《球栅阵列(BGA)试验方法》。图6所示为剪切和拉脱试验仪器,局部放大为焊球剪切试验,剪切位置为焊球高度的10%~25%(即剪切刀头与塑封料的距离为焊球高度的10%~25%)且不接触植球面。焊球拉脱采用拉力爪,与BGA器件底面呈 $90^\circ \pm 1^\circ$,夹紧焊球并施加向上的力。

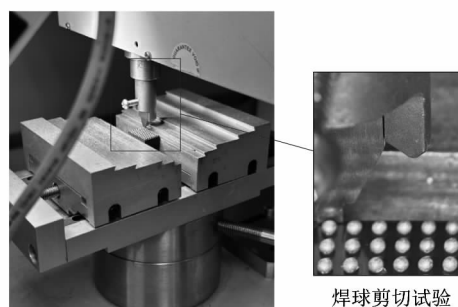


图6 焊球剪切与拉脱试验仪器

Figure 6 Test instrument for shear and tensile of solder balls

试验后通过景深显微镜记录焊球剪切界面的断裂模式,通常情况下有焊盘剥离、延性断裂、脆性断裂和混合断裂4种断裂模式。图7所示为可靠性试验后各组焊球剪切界面形貌,从图中可以看出,焊球剪切后均

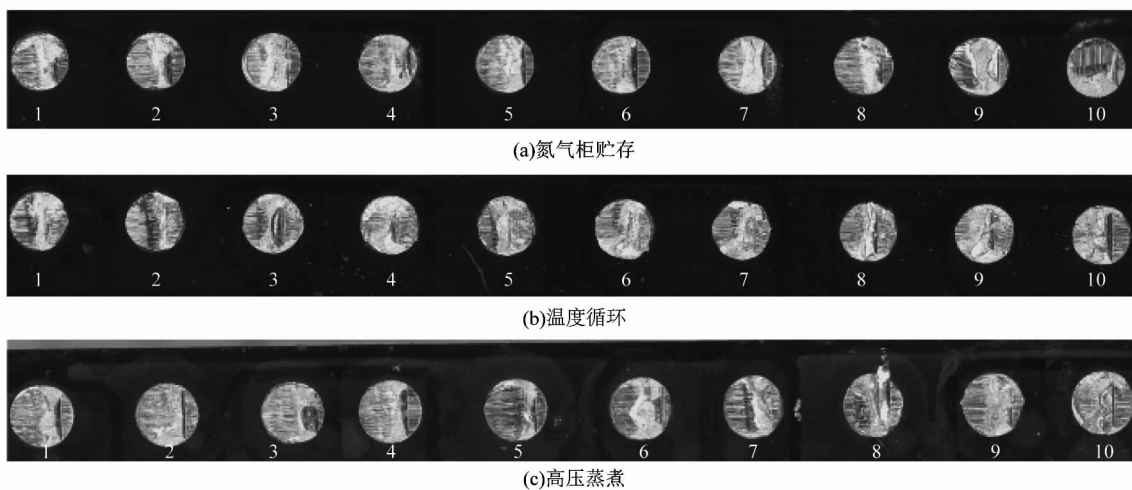


图7 可靠性试验后各组焊球剪切界面形貌

Figure 7 Fracture modes in different specimen of solder balls after reliability test of solder ball

未出现焊盘剥离现象,说明焊盘与液相焊料界面反应形成良好接触。3组试验都为延性和脆性断裂共存的混合断裂模式。延性断裂中焊料界面强度高于焊料本身,断裂发生在焊球本体区域;而脆性断裂过程中材料弹性模量较高,延性较差,剪切力相对于延性断裂较小。因此,正常情况下延性断裂区域越大,焊球剪切力越大,力学性能与可靠性越好。

图8所示为可靠性试验后焊球试样的力学性能。

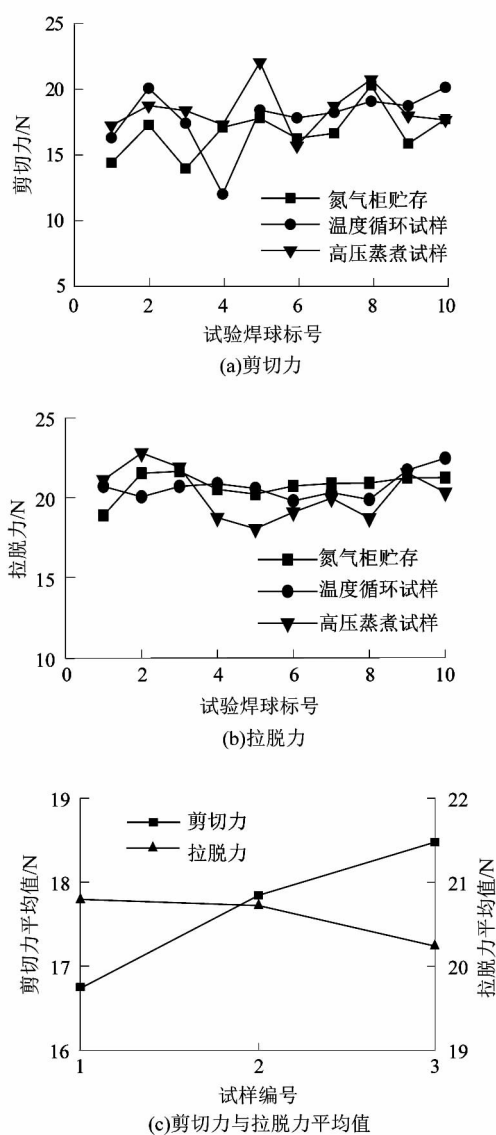


图8 可靠性试验后焊球的力学性能
Figure 8 Mechanical properties of solder balls after reliability test

将图7中焊球从左向右依次标号为1—10,与其对应的是图8(a)和8(b)中的横坐标。3组试样的剪

切力和拉脱力分别如图8(a)和8(b)所示,其中正常试样为未经环境试验的氮气柜贮存器件,数据结果表明,剪切界面中延性断裂区域面积越大,对应的焊球剪切力越大,反之则越小。3组试样的剪切力平均值如图8(c)所示,氮气柜贮存的焊球剪切力较小,而经过温度循环和高压蒸煮试验后的焊球剪切力有一定程度的提升。3组试样的拉脱力则呈现下降趋势,但结果仍远超合格力值(7 N)。由此可推论,适当试验条件的可靠性试验对焊球的剪切性能有一定的加强作用,对焊球的拉脱性能暂未发现有明显影响。

3 SEM与EDS能谱分析

通过扫描电子显微镜(SEM)对剪切试验后的焊球切面进行观测,焊球切面形貌如图9所示。图9(a)、图9(b)和图9(c)分别对应氮气柜贮存、温度循环和高压蒸煮试验后的焊球。由图9(a)可知氮气柜贮存试样剪切界面不规则度较高,呈现为起伏的波峰波谷形状,相对应的剪切力为14.411 N。而图9(b)和图9(c)的剪切界面较为平整,对应的剪切力分别为16.330 N和17.263 N,与氮气贮存试样剪切力差值超过13.3%,提升较明显。氮气柜贮存的焊球剪切界面不平整度较高,界面强度较低,而经过可靠性试验后的焊球剪切界面较为平整,界面强度较高。

进一步采用更高显微倍数电子显微镜对未剪切焊球的切面形貌进行分析,如图10所示。2组试样焊球切面图中颜色较浅区域为Sn-Pb焊球,颜色较深区域为Cu焊盘。由图10(a)可知焊球与焊盘界面区域分明,而图10(b)中的焊球与焊盘界面区域存在不规则的界面,颜色较浅区域掺杂颜色较深物质,目视判别该物质有从焊盘向焊球中心区域扩散的趋势。

为确定界面异常区域元素种类及原子百分比,采用EDS能谱分析仪对图10(b)所示区域进行元素分析,如图11所示。首先对图中浅色区域进行元素分析,如图11(a)所示,元素谱图表现为Sn, Au和C,其中Sn为焊球本身元素,原子百分比为64.06%,Au元素应为蒸金过程中吸附在焊球切面的杂质元素,C可能为电镜腔体内或器件密封胶游离出的元素。而对异常区域分析得出Sn, Au和Cu 3种元素,如图11(b)所示,谱图中Cu为焊盘区域元素,原子百分比为

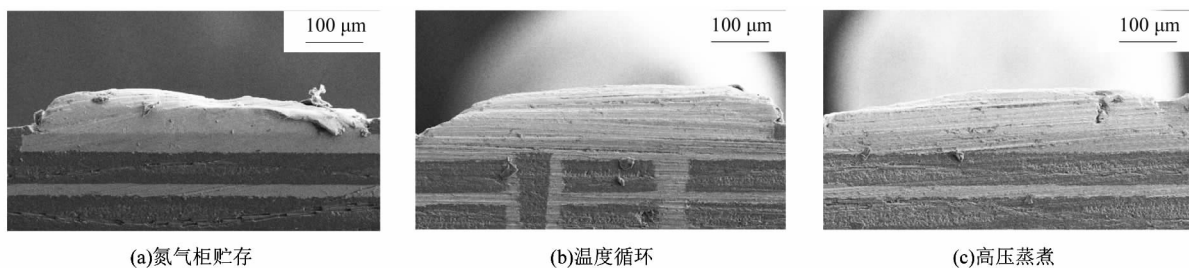


图9 剪切试验后的焊球切面形貌

Figure 9 Section morphology of solder balls after shear test

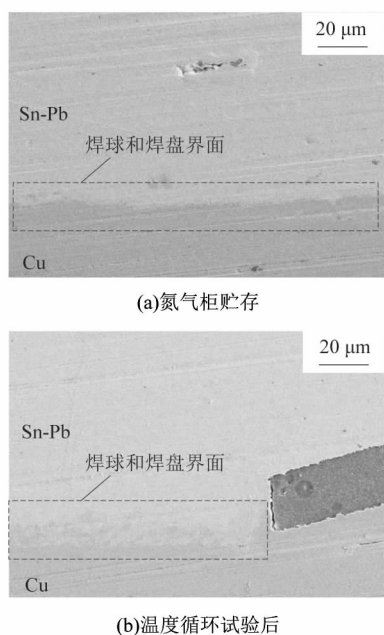


图10 未剪切焊球的切面形貌

Figure 10 Section morphology of solder balls before shear test

28.28%,同时 Sn 原子百分比降低至 37.11%,焊球异常区域检测到 Cu 元素表明该区域存在由 Sn 和 Cu 构成的金属间化合物(IMC)。IMC 的存在增强了焊球的界面结合力,从而导致焊球本身的剪切力增大,增强了焊球的可靠性。

4 结论

笔者根据筛选试验过程中 BGA 器件焊球易产生变形、凹坑等异常情况,开展了 BGA 封装焊球有限元分析及试验验证,以研究焊球的力学性能与可靠性。结果表明:①利用 Anand 本构方程与 C-M 经验方程寿命模型相结合的方法可有效计算出相应 BGA 器件的疲劳寿命,方便使用过程中对器件的可靠性进行初步

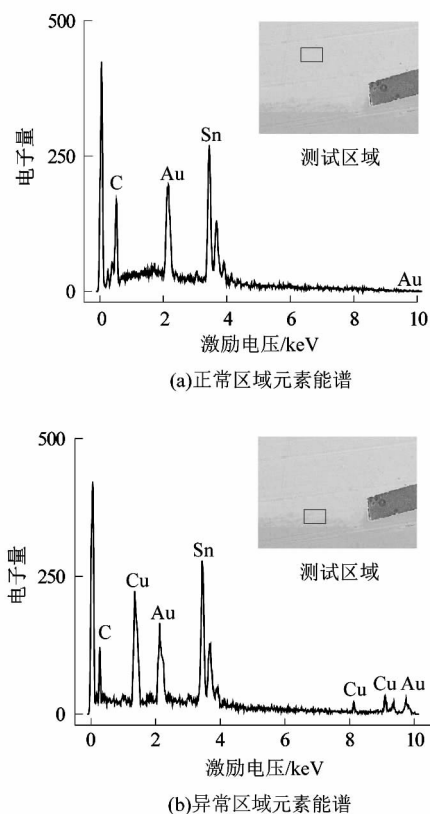


图11 温度循环试验后的焊球切面元素分析

Figure 11 Elements analysis of solder balls after temperature cycling test

估算;②焊球在温度循环和高压蒸煮可靠性试验过程中会生成金属间化合物,其对焊球剪切力学性能有一定的强化作用;③在常规研究集中于热效应失效的基础上,拓展研究高温、高湿及高压情况下的器件行为,在不考虑电连接性能的情况下,焊球的剪切力学性能有一定程度的加强。金属间化合物生成具有一定的随机性,其原理及强化作用有待进一步的研究。

(下转第 49 页)

4 结语

为了避免奇异性和提高系统的控制精度和鲁棒性,解决滑膜抖振的问题,课题组提出了一种全局自适应非奇异快速终端滑模控制策略。首先,在非奇异快速终端滑模控制的基础上引入了全局滑态因子,同时,将自适应控制和全局非奇异快速终端滑模控制相结合,并采用饱和函数代替了控制律中的符号函数;然后基于李亚普诺夫稳定性理论证明了该控制器的稳定性;最后通过 MATLAB/Simulink 搭建控制系统的仿真模型。仿真结果表明:与传统 PID 控制和滑模控制相对比,课题组所提出的 ANFTSMC 控制策略能够保证系统状态在有限时间内快速收敛,有效地减少了因抖振导致的机械部件抖振,具有更高的控制精度和更强的抗干扰能力。

参考文献:

- [1] SHAN G Q, LI Y Z, ZHANG L W, et al. Contributed review: application of voice coil motors in high-precision positioning stages with large travel ranges[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(10):101501.1-9.
- [2] 梁文祯, 龚兰芳, 刘传林. 基于模糊 PID 控制的音圈电机控制系统研究[J]. 机电工程技术, 2023, 52(9):94-98.
- [3] SHENG H L, CHEN Q, ZHANG J, et al. A high-safety active/passive hybrid control approach for compressor surge based on nonlinear model predictive control[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(1):396-412.
- [4] CHANG H J, KIM P J, SONG D S, et al. Optical image stabilizing

(上接第 43 页)

参考文献:

- [1] MORTAN F. High-speed applications drive packaging trends[J]. Electronic Packaging and Production, 2022, 42(4):28-31.
- [2] 龙乐. 面向汽车应用的功率半导体器件与封装[J]. 电子与封装, 2009, 9(12):5-10.
- [3] 张新平, 尹立孟, 于传宝. 电子和光子封装无铅钎料的研究和应用进展[J]. 材料研究学报, 2008, 22(1):1-9.
- [4] 吴梁玉, 孙清, 邵陈希, 等. 热循环载荷下 BGA 封装体热应力特性[J]. 热科学与技术, 2018, 17(6):509-516.
- [5] HALSEY C, DEPOY J, CAMPBELL D A M, et al. Accelerated lifetime testing and analysis of delta-doped silicon test structures[J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2022, 22(2):169-174.
- [6] WHITMAN C S. Accelerated life test calculations using the method of maximum likelihood: an improvement over least squares [J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(6):859-864.
- [7] 周敏波, 赵星飞, 陈明强, 等. 电子封装跨尺度凸点结构

system using multirate fuzzy PID controller for mobile device camera [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(2):303-311.

- [5] TIAN C, YAN P, ZHANG Z. Inter-sample output predictor based sampled-data ADRC supporting high precision control of VCM servo systems[J]. Control Engineering Practice, 2019, 85:138-148.
- [6] WU S, JIAO Z X, YAN L, et al. Development of a direct-drive servo valve with high-frequency voice coil motor and advanced digital controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3):932-942.
- [7] 张庆贺, 程彦礼. 滑模控制技术研究的进展概述[J]. 青年科学(教师版), 2013(2):7.
- [8] 席雷平, 陈自力, 齐晓慧. 具有抖振抑制特性的机械臂快速滑模变结构控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(7):97-102.
- [9] 王韬, 马训鸣, 刘霞, 等. 电液力伺服系统模型参考控制方法[J]. 西安工程大学学报, 2015, 29(5):589-593. DOI:10.13338/j.issn.1674-649x.2015.05.013.
- [10] GUO Y S, CHEN L. Terminal sliding mode control for coordinated motion of a space rigid manipulator with external disturbance[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2008, 29(5):583-590.
- [11] WANG H Y, ZUO Z Q, WANG Y J, et al. Composite control for trajectory tracking of wheeled mobile robots with NLESO and NTSMC [J]. IET Control Theory & Applications, 2021, 15(12):1686-1694.
- [12] YE D, ZHANG H Z, TIAN Y X, et al. Fuzzy sliding mode control of nonparallel-ground-track imaging satellite with high precision [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2020, 18(6):1617-1628. DOI:10.1007/s12555-018-0369-2.

Sn3.0Ag0.5Cu/Cu 微互连焊点界面 IMC 生长与演化及力学行为的尺寸效应[J]. 机械工程学报, 2022, 58(2):259-268.

- [8] SHNAWAH D A, SABRIMFM, BADRUDDINIA. A review on thermal cycling and drop impact reliability of SAC solder joint in portable electronic products[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(1):90-99.
- [9] 朱玉丹. BGA 焊点的热可靠性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2017:1-7.
- [10] 胡永芳. SMT 焊点的可靠性研究及 CBGA 焊点有限元分析[D]. 江苏:南京航空航天大学, 2006:30-45.
- [11] 宋显含. 金属间化合物物力学性能及焊点热可靠性研究[D]. 山西:太原科技大学, 2018:34-42.
- [12] 田飞飞, 刘清君, 李勇. Sn-37Pb 焊球与 Ni/NiP UBM 界面反应特性研究[J]. 固体电子学研究与进展, 2020, 40(2):154-158.
- [13] 郭福, 文廷玉, 马立民, 等. 高温高电流密度下 BGA 焊点电迁移损伤[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(11):1264-1274.
- [14] 徐林. PBGA 结构在湿热耦合作用下的失效机理研究[D]. 湖北:华中科技大学, 2014:32-66.