

DOI:10.11784/tdxbz202401021

金属封装管壳随机振动失效分析及抗振优化

龚宝明^{1,2}, 张杰¹, 李海龙^{1,2}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 混合集成电路(HIC)在服役过程中, 壳体长边焊缝内侧区域容易出现裂纹导致失效. 本文针对这一问题对失效现象进行振动研究, 通过仿真软件 ABAQUS 对大尺寸混合集成电路封装管壳进行模态和随机振动实验与仿真, 确定器件的薄弱位置, 通过有限元仿真和实验结合的方法确定随机激励作用下盖板的危险位置和危险共振频率. 针对薄弱位置设计不同载荷下的正弦振动实验, 通过振动实验和仿真相结合的方式拟合得到材料的 $S-N$ 曲线. 分析危险位置的失效原因为由于随机振动的应力集中现象导致的振动疲劳失效, 并针对失效原因设计减振方案对原模块进行结构优化设计, 对危险位置进行减振加固, 提升器件的抗振性能.

关键词: 混合集成电路; 随机振动; 结构优化; 有限元分析

中图分类号: TG44; TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)02-0167-08

Random Vibration Failure Analysis and Antivibration Optimization of Metal Encapsulated Shell

Gong Baoming^{1,2}, Zhang Jie¹, Li Hailong^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

Abstract: During the operation of a hybrid integrated circuit (HIC), cracks easily develop in the inner area of the joint on the long side of the shell due to random vibration, leading to failure. To resolve this problem, this study investigated the vibration-related failure phenomenon. The simulation software ABAQUS was used to conduct modal and random vibration experiments and simulations on a large-sized HIC package shell to determine the weak positions on the surface of the device, that is, positions with the potential to develop cracks. The dangerous position and resonance frequency of the cover plate of the shell under random excitation were determined by combining finite element simulation and testing. Sinusoidal vibration experiments under different loads were designed to assess weak positions, and $S-N$ curves of materials were obtained by combining vibration experiments with simulation. The study results showed that the cause of failure due to the dangerous position was the vibration fatigue failure caused by the stress concentration phenomenon of random vibration; consequently, a scheme to reduce vibration was designed to optimize the structure of the original module according to the failure cause; additionally, the vibration reduction and reinforcement of the dangerous position were implemented to improve the antivibration performance of the device.

Keywords: hybrid integrated circuit (HIC); random vibration; structure optimization; finite element analysis

混合集成电路 (hybrid integrated circuit, HIC) 具有功率密度高、性能优良、可靠性高、体积小、质量轻等优点, 因此被广泛应用于航天设备、军用电器、汽车电子等领域中^[1-3]. 为了减小外界环境对芯片的影

响, 避免芯片产生损伤, 通常都会对芯片进行封装, 从而隔绝外界中的水汽、氧气和腐蚀介质, 以便于器件可以在海洋、沙漠等严苛条件下工作而不会发生损坏. 混合集成电路多采用气密性良好的管壳结构, 通

收稿日期: 2024-01-24; 修回日期: 2024-03-20.

作者简介: 龚宝明 (1983—), 男, 博士, 副教授, gong_bm@tju.edu.cn.

通信作者: 张杰, zhangjie980413@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005366).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52005366).

过平行缝焊等^[4]熔焊封装技术对管壳进行气密性封装^[5]。

但是随着混合集成电路工作环境的日益复杂化,集成度要求越来越高,HIC 在服役过程中经常发生盖板开裂问题,导致结构气密性破坏,水汽等有害物质进入壳体,减少内部芯片服役寿命,加速模块的失效进度,这极大地影响了模块工作的可靠性.随着混合集成电路功率密度和器件尺寸的不断增长,HIC 在服役过程中的密封失效问题越发严重,在一定频率下进行长时间振动服役或者高振动疲劳载荷下,密封管壳盖板在长边焊缝内侧区域往往会出现裂纹导致外壳漏气现象.水汽、有害离子、气体等进入器件腔体导致漏电,参数变坏甚至与其他器件互联失效.然而,关于随机振动下平行焊缝器件裂纹形成的原因尚不清晰,如何通过合适的方式提升平行缝焊盖板抗随机振动的能力也亟需解决.

本文将仿真和实验相结合,确认混合集成电路的振动状态,确认盖板的危险位置和危险共振频率,并依据振动状态设计混合集成电路的正弦振动实验,获得振动应力值和失效振动次数的关系,拟合得出 S-N 曲线.同时针对失效模式进行结构优化和减振设计,并对设计后的减振效果进行验证.实验结果证明,经过结构优化后的混合集成电路管壳抗振性能获得大幅度提升.

1 大尺寸混合集成电路管壳失效分析

1.1 模型参数设置

选取混合集成电路,通过绘图软件 Solidworks 按照实际尺寸绘制金属气密性封装结构.模型中包含盖板和壳体,壳体处设立安装孔,便于施加约束.同时,为了方便后续定义接触类型,将环焊缝与盖板分开建立模型.为了提高计算效率,对器件的物理模型进行简化,只对封装管壳本身进行保留,包括盖板(除焊缝部分)、环焊缝、壳体,模型如图 1 所示.

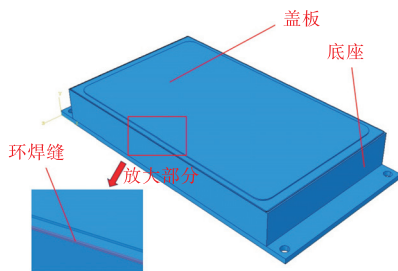


图 1 金属封装管壳模型
Fig.1 Metal encased-shell model

简化的具体内容如下:

(1) 忽略盖板及壳体的 Ni 镀层模型建立,金属镍具有很强的钝化能力,在空气中的稳定性很高,器件中 Ni 镀层的主要作用是抵抗大气、碱和某些酸性物质的腐蚀.

(2) 忽略封装结构内部的基板、芯片、电容、铜芯引脚等器件,混合集成电路在服役过程中失效位置集中出现在盖板焊缝附近,内部器件与盖板失效现象关系较小.

(3) 忽略焊接过程中存在的缺陷,将焊缝视为无任何缺陷的理想焊缝.将模型导入仿真软件 ABAQUS 中,材料参数如表 1 所示.定义接触类型时,将环焊缝底面与壳体封焊面定义为绑定关系,将环焊缝内侧与盖板四周定义为绑定关系.施加约束时,对壳体 4 个安装孔面定义为铰接.划分网格时,对环焊缝和盖板进行网格加密,以便于增加结果的精确度.

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameters

结构	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
盖板(4J42 合金)	8 120	147	0.30
环焊缝(4J42 合金)	8 120	147	0.30
壳体(10#钢)	7 820	205	0.28

1.2 模态分析

模态是一个结构或者一个系统的固有属性,通常情况下系统具有多阶模态,通过对系统不同模态振型的分析,可利用已有模态参数对结构在该频率范围内振动激励下的响应进行描述,可以判断出系统的薄弱位置并针对薄弱位置进行优化设计.HIC 金属气密性封装结构是一个多自由度振动系统,其固有振型多且高阶振型往往较为复杂,在这样一个结构中,局部的共振往往难以避免,通过研究模态来避免其在薄弱位置中产生失效问题,进而为可靠性设计提供参考.

为了使有限元模型与实验结果更好地吻合,采用扫描频率实验和半功率带宽法^[6]表征系统的阻尼比 ξ . 阻尼比 ξ 定义为

$$\xi = \frac{\Delta f}{2f_n} \tag{1}$$

式中: f_n 为 1 阶固有频率; Δf 为半功率点的带宽.在此,将响应加速器峰值的 $1/\sqrt{2}$ 倍频率带宽定义为 Δf . 在 10 ~ 2 000 Hz 开展扫频实验,用加速度计测量激振器的输入加速度和器件的输出加速度,通过响应输出结果获得半功率点的带宽.器件的加速度总体响应如图 2 所示.由图 3 可计算出半功率点带宽 Δf 为 14.60 Hz,器件的 1 阶固有频率为 613.3 Hz,代入

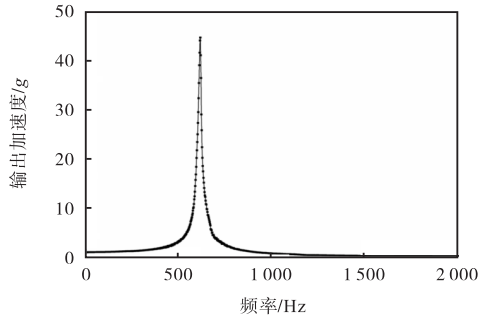


图2 加速度总体响应

Fig.2 Acceleration population response

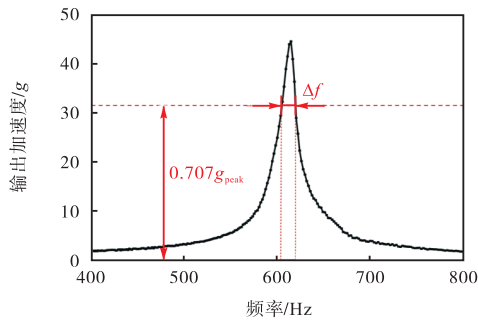


图3 加速度响应和半功率点

Fig.3 Acceleration response and half-power point

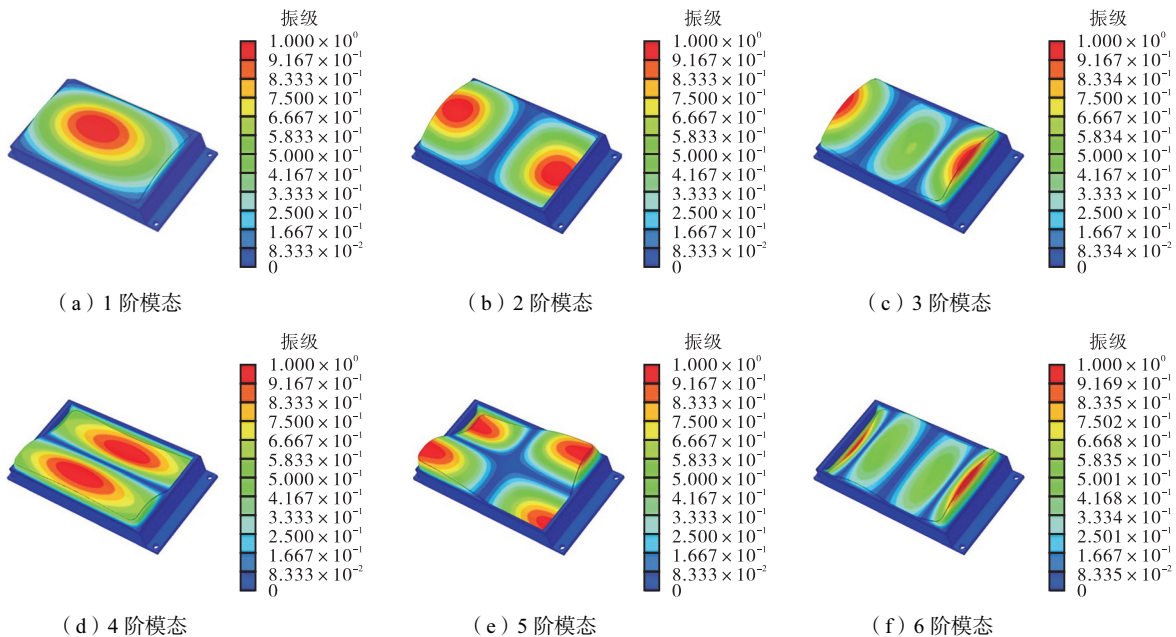


图4 模型的模态分析

Fig.4 Modal analysis of the model

计算可得阻尼比 $\xi = 0.012$.

根据 GJB 548B—2005 规定的微电子器件实验方法,通过 ABAQUS 仿真软件使用 Lanczos 算法提取器件在 10~2 000 Hz 内的所有模态.通过仿真软件计算,如图 4 和表 2 可知,HIC 在 2 000 Hz 内共有 6 阶模态,图 4(a)为模型在 1 阶模态下的振型,1 阶模态的固有频率为 585.9 Hz,实验中测得器件在 1 阶模态的频率为 613.3 Hz,误差值为 4.5%,数据基本符合.通过模态分析可知,器件的振动主要在盖板位置,在 1 阶模态下,盖板的中心位置振动最为明显,并向四周逐步减小振动变形,整体呈现“峰状”振型.

1.3 随机振动

由于随机响应分析在时域内具有不确定性,所以在研究时,往往将时域数据转换为频域下的 PSD 函数进行分析,本文采用的 PSD 加速度功率谱密度如图 5 所示.在实际对器件进行随机振动实验的过程中,所选取的 4 个样品在振动量级增加至 25g 时发生长边失效问题,失效位置在焊缝长边内侧的热影响区,且 4 个样品失效裂纹均出现在 y 方向(振动方向垂直盖板)随机振动后.通过 ABAQUS 对混合集成电路进行随机振动分析,分析结果如下.

图 6 为本文所提仿真软件算得的盖板长边处应力均方根(RMSS)云图,RS11 和 RS33 的应力最大点在盖板中心位置,向四周逐渐减小,而 RS22 的应力最大值出现在盖板长边焊缝中心内侧区域,与失效位置一致.失效形式遵循第一强度理论,该理论认为材料发生破坏的原因是结构受到的最大拉应力超过了

材料本身的强度极限,因而发生断裂.图 7 提取了盖板长边失效位置的危险频率,发现失效位置只在器件 1 阶振型时发生共振,应力为 106.5 MPa,远小于 4J42 材料强度的 590 MPa,考虑到随机振动实验时失效位置做机械性重复运动,判断为器件在实验过程中发生了疲劳断裂^[7].

表 2 模型在 20~2 000 Hz 内的固有频率

Tab.2 Inherent frequencies of the model in the range of 20—2 000 Hz

模态阶数	固有频率/Hz
1	585.9
2	880.3
3	1 267.6
4	1 611.8
5	1 807.5
6	1 848.2

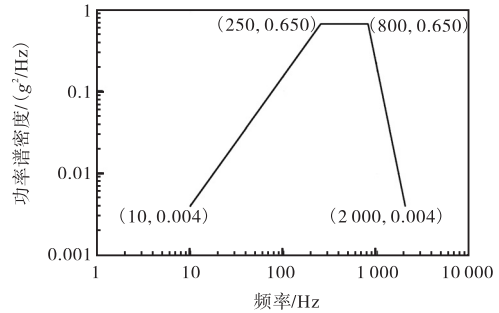


图 5 功率谱密度 (25g)

Fig.5 Power spectral density (25g)

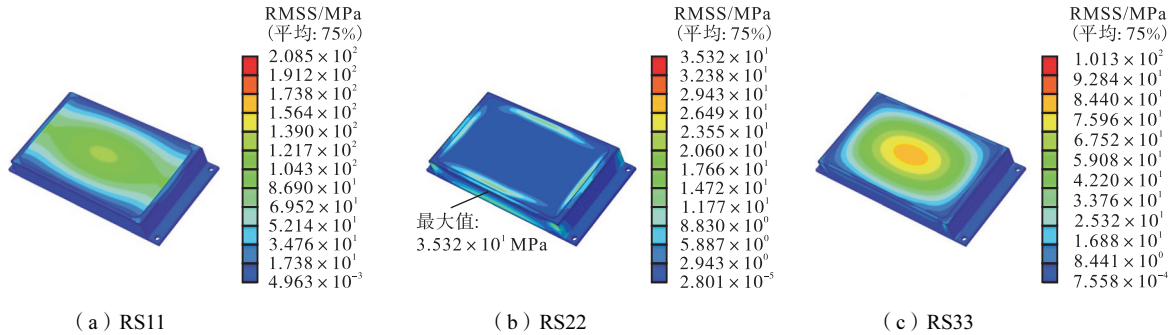


图 6 随机振动应力云图

Fig.6 Random vibration stress cloud diagram

通过仿真和实验结果可知,大尺寸平行缝焊焊接盖板在实验过程中出现裂纹有两方面的原因.其一,平行缝焊是通过滚轮电极与金属盖板接触,导入电流使得接触位置产生电阻热,呈现熔融状态,凝固后形成的一系列焊点,其焊接过程中存在异种材料线膨胀系数相异、尖锐结构等问题导致了应力集中.其二,在随机振动实验过程中器件危险位置发生了共振,振动幅度显著增大,产生了振动疲劳载荷.二者共同作用使得器件在服役过程中失效.

对器件失效位置进行应力云图分析发现,失效位置在随机振动过程中的应力主要为 RS22(垂直盖板方向)应力,其余方向应力均方根值很小.通过对失效位置进行 S22 应力提取,结果如图 7 所示,可得器件失效位置的危险共振频率为 585.9 Hz,说明器件由于随机振动导致的振动损伤主要是在 1 阶模态下产

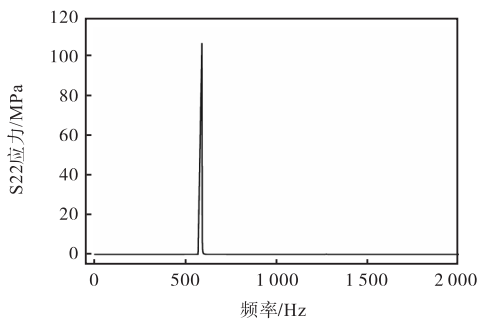


图 7 器件失效位置 S22 应力

Fig.7 S22 stress at device failure location

生的.

1.4 实验验证及 S-N 曲线拟合

材料的性能和应力水平往往会决定试样的疲劳寿命,现阶段普遍认为应力水平是影响样品寿命的主要因素,而表示应力与疲劳寿命关系的曲线被称为 S-N 曲线,通过拟合混合集成电路器件的 S-N 曲线,可以更好地对其进行可靠性分析与评价^[8].姚起杭^[9]在提出振动疲劳问题的同时,将振动疲劳与常规的静态疲劳区分开来,认为构件在共振情况或受激振动的情况下产生的破坏才属于振动疲劳.

由于器件在实验过程中总在长边焊缝中心内侧区域优先发生失效问题,失效原因在于随机振动量级的不断增大,考虑器件主要承受振动疲劳,通过仿真和实验相结合确认器件失效位置的危险频率为 1 阶固有频率,在 600 Hz 左右,当振动量级增至 25g 时发生开裂.本文选定 25g、26g、27g 3 种功率谱密度下,模拟器件在 1 阶固有频率下的振动情况,设计正弦振动实验,并通过正弦振动仿真实验获取失效位置的应力情况,拟合出器件的 S-N 曲线.

S-N 曲线的拟合采用幂函数公式,即

$$NS^K = C \tag{2}$$

式中 K 、 C 均为常数,受材料种类的影响.图 8 为根据公式拟合的 S-N 曲线.最终的拟合 S-N 曲线的公式为

$$NS^{8.5} = 9.95 \times 10^{22} \tag{3}$$

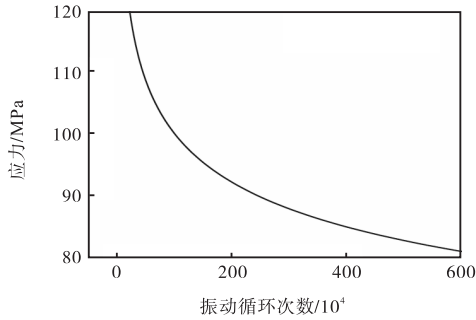


图8 器件的S-N曲线
Fig.8 S-N curve of the device

2 大尺寸混合集成电路减振优化

2.1 减振原理及思路

振动作为施加给系统的动载荷,其减振优化的思路往往共通,因此除却混合集成电路器件本身,车辆工程、航空航天等领域在实践过程中所积累的具有普遍价值的减振抗振方法一样具有良好的借鉴意义,例如主动控制、混合控制和耗能减振等都可以为服役失效的器件提供减振思路^[10-11].考虑到混合集成电路器件本身空间较为狭小,器件在随机振动实验过程中的失效振型较为单一,且存在技术与成本上的约束,故减振方案以简便为主,因此考虑以减振耗能核心思路的被动抑制减振方案,通过在结构的某些部位增设减振耗能装置,为结构提升刚度、增加阻尼^[12].

在随机振动的过程中,在特定频率下器件的某些位置趋于从外界吸收更多的能量,形成共振,共振会使得器件获得相较于其他频率和波长下更大的机械变形和动应力,最终导致器件的失效.而耗能部件可

以消耗结构的能量,减小结构在共振作用下的反应,以达到保护器件、提升器件安全裕量的作用^[13].

混合集成电路器件在随机振动实验过程中危险位置的失效主要在器件的1阶模态下,在此振型下,混合集成电路器件的盖板受到共振频率激励,以盖板中心为主向盖板外侧凸起,形成“峰状”振型.能量的传递由盖板中心惠及四周,最终导致盖板长边危险位置处产生失效问题.故而以限制1阶振型为主要思路对器件进行减振优化,减少随机振动实验过程中对危险位置的损伤^[14].

2.2 外部限位加固方式

根据问题的定位和机理,本文设计了一款用于管壳盖板外部限位加固的压板,压板为铝合金材质,与盖板接触的减振元件为8 mm × 12 mm 的硅橡胶垫片.垫片与盖板中心位置无黏接性贴合,贴片在随机振动中主要起两个方面的作用:一方面硅橡胶作为良好的减振元件可以大幅减小因共振输入盖板的能量,减轻盖板的动力反应;另一方面,通过拓扑优化改变大尺寸平行缝焊盖板的危险点位置的分布,提升刚度,使得优化后的器件危险位置远离焊缝,以达到降低共振,提升结构强度的作用.

对减振模型进行 ABAQUS 仿真分析,在大尺寸混合集成电路器件盖板上侧设置一个高度为1.2 mm、接触面为8 mm × 12 mm 的垫片,垫片与器件盖板位置关系设为接触,另一端设为绑定.由于仿真目的主要在于分析垫片对盖板的减振效果,故而对于压板进行省略.加固后模型的固有频率如图9和表3所示,经外部减振优化后,器件的共振频率上升明

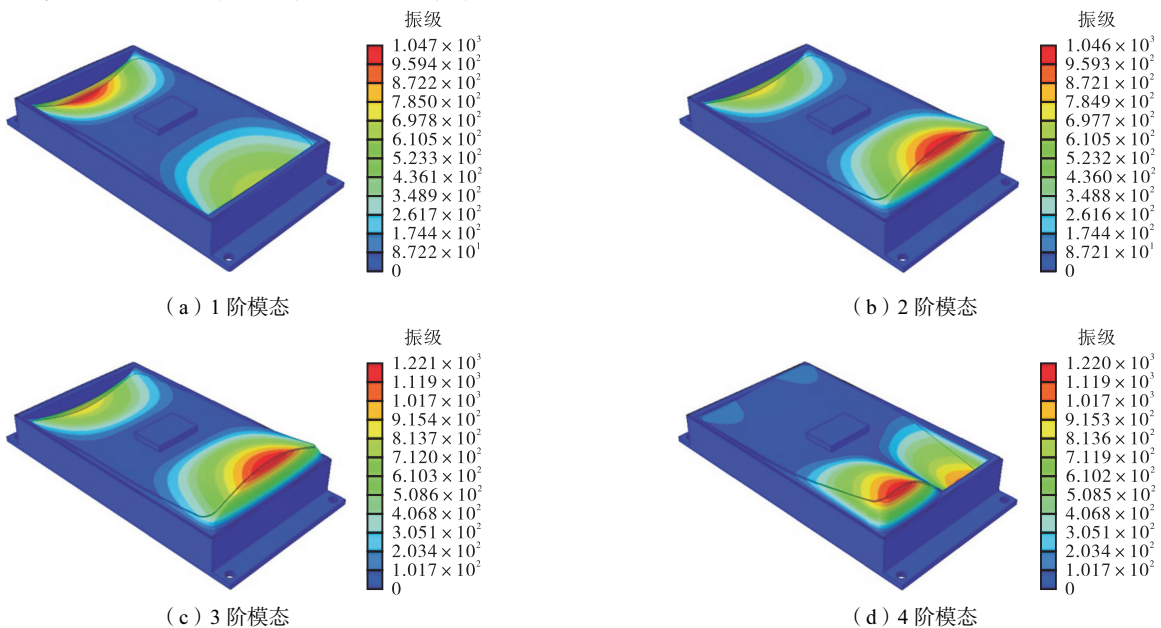


图9 外部加固后模型的模态分析

Fig.9 Modal analysis of the model after external reinforcement

显, 1 阶模态的固有频率上升至 967.2 Hz, 这意味着器件更难被激励. 同时, 由图 10 可知, 随机振动时, 盖板振动幅度被限制, 且能量被垫片大幅吸收消耗, 故而随机振动后整个盖板的应力明显减小, 对于未加固前的盖板危险位置几乎不存在应力集中的现象, 盖板边缘受力只有原来的约 1/20 量级.

表 3 外部加固模型的固有频率

Tab.3 Inherent frequencies of the external reinforcement model

模态阶数	固有频率/Hz
1	967.2
2	970.4
3	1 816.8
4	1 824.8

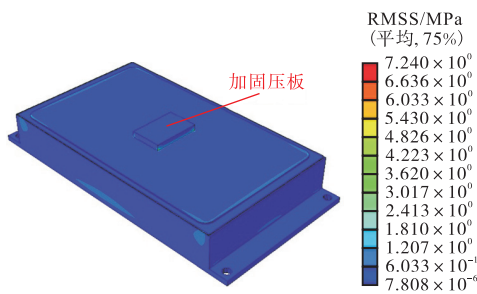


图 10 加固后模型的 RS22 应力图

Fig.10 RS22 stress diagram of the reinforced model

2.3 一体化加固方式

外部限位加固方式很好地达成了器件在随机振动实验过程中的减振目的, 但是考虑到混合集成电路器件在实际服役过程中会存在尺寸限制, 有时起到限位加固减振作用的压板不能顺利安装在盖板上, 因此考虑在器件内部设计耗能部件的方案. 由于混合集成电路内部以装置元器件为主, 故考虑以两个 8 mm × 6 mm 的垫片对盖板进行减振加固.

混合集成电路在随机振动实验过程中, 其振动过程可以用以下动力学方程进行描述, 即

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (4)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼; K 为刚度矩阵; $x(t)$ 为节点的位移; $F(t)$ 为相应节点的应力.

在进行混合集成电路一体化加固减振方案设计时, 减振耗能部件主要由与底座材料相同的 10#钢和硅橡胶垫片组成, 本文所用混合集成电路腔体高度为 8.4 mm, 在减振面积确定的前提下, 10#钢和硅橡胶的配比会引起器件质量的变化, 从而对器件模态产生影响. 经不同高度配比方案实验对比, 最终选取 10#钢高度为 7.2 mm、硅橡胶高度为 1.2 mm 组成减振元件. 在不定义硅橡胶与盖板的接触关系时, 对器件进行模态分析, 分析结果如图 11 所示, 盖板的 1 阶模

态出现振型反向现象, 在这种振型下, 盖板受到激励会向腔体内侧运动, 此时在腔体内部的减振器件可以更好地起到消耗结构能量、保护盖板的作用. 重新设定盖板与减振器件的接触, 进行模态分析和随机振动分析.

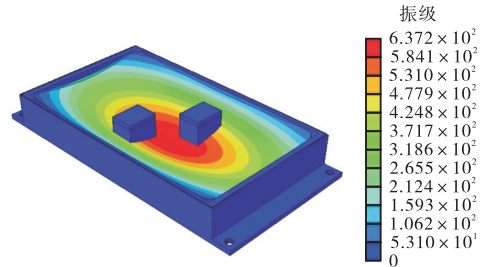


图 11 未设置接触关系的 1 阶模态

Fig.11 First-order mode without setting the contact relationship

相较于外部限位加固, 内部加固的减振优化更为明显, 由图 12 和表 4 可得知, 1 阶模态的固有频率上升至 1 029.1 Hz, 这意味着在内部限位加固的壳体服役过程中更难被激励, 从而减少损伤的可能性. 图 13 为模型随机振动的 y 方向应力均方根分布云图, 由图可知, 盖板的应力大幅度降低, 原来的危险位置的均方根应力下降至 10 MPa 以下. 这说明原来盖板危险位置会由于器件在随机振动过程中产生由于共振导致的振动疲劳损伤, 最终导致失效, 而加固后的器件在原危险位置难以被激励产生共振, 基本不再承受振动疲劳损伤, 只承受由实验过程中器件加速度导致的应力很小的静态疲劳损伤, 这基本隔绝了危险位置在随机振动不规则周期性机械载荷的反复作用下导致的失效问题. 将危险位置的应力值代入所拟合的 $S-N$ 曲线中, 由于钢材一般认为达到循环次数 1×10^7 就可以当做无限寿命, 故而认为加固后器件振动寿命无限.

将仿真结果与实验结合, 对加固后的混合集成电路器件进行抗随机振动实验验证, 将加固后的器件与未加固器件进行对比. 图 14 为未加固器件在振动量级为 25g 下随机振动实验后的失效形貌, 失效位置在长边焊缝中心内侧区域, 在同等振动量级下, 加固后器件振动循环次数达到 1×10^7 次仍未出现失效问题; 选取新的加固器件, 将振动量级增加至 50g 进行随机振动实验, 观察器件危险位置仍未出现失效问题, 加固抗振效果明显. 由仿真结果可知, 未加固器件由于共振应力损伤导致失效位置总发生在盖板长边焊缝中心内侧位置, 而加固后的器件由于基本隔绝了由于共振导致的振动应力损伤, 只存有应力值较小

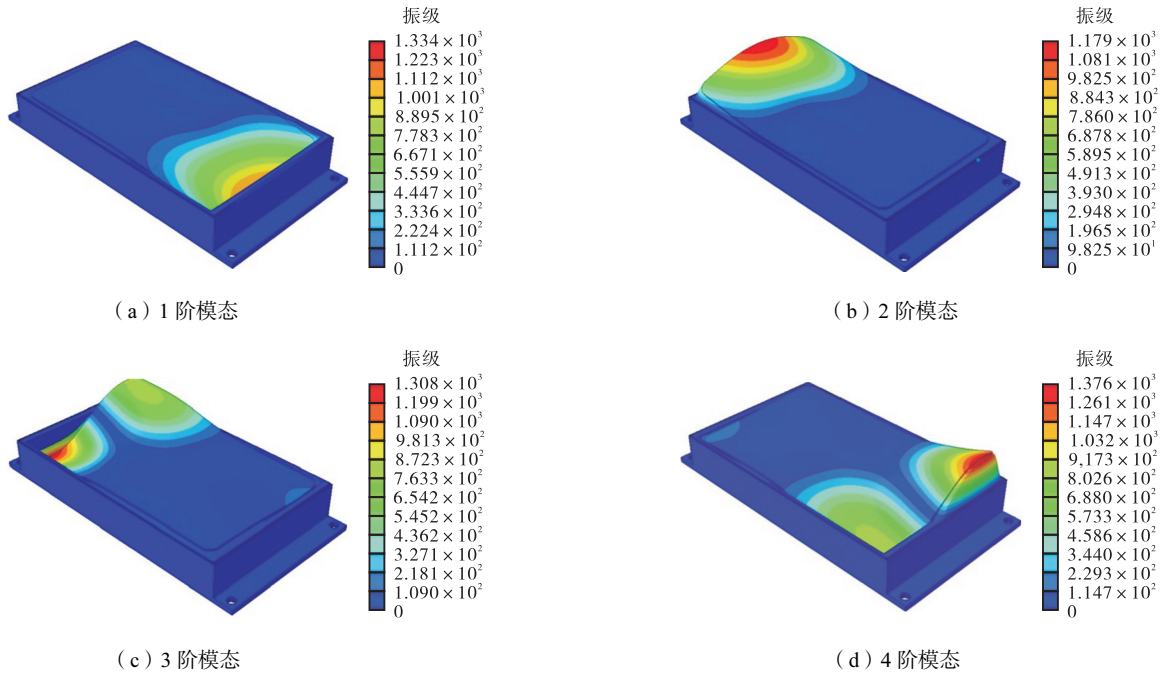


图 12 内部加固后模型的模态分析

Fig.12 Modal analysis of the model after internal reinforcement

表 4 内部加固模型的固有频率

Tab.4 Inherent frequencies of the internal reinforcement model

模态阶数	固有频率/Hz
1	1 029.1
2	1 156.6
3	1 798.6
4	1 859.1

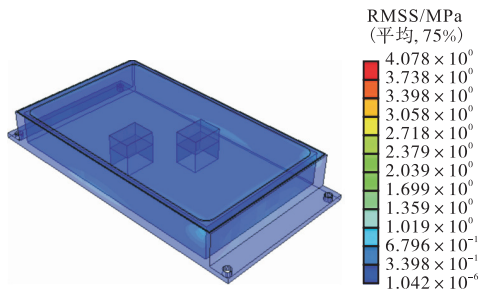


图 13 内部加固模型 y 方向的应力均方根

Fig.13 Root mean square of stress in the y direction of the internal reinforcement model

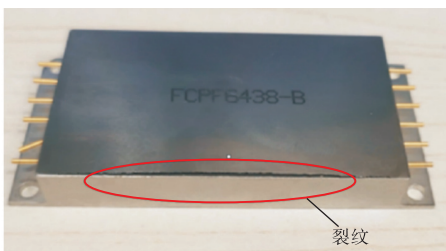


图 14 随机振动后未加固器件的失效形貌

Fig.14 Failure appearance of an unreinforced device after random vibration

的静态疲劳损伤,同时失效位置也不再存在明显的应力集中现象,器件的疲劳寿命获得极大的延长。

3 结 论

(1) 本文通过实验和仿真结合的方式研究了平行缝焊混合集成电路器件的失效问题,还原了器件在随机振动过程中的疲劳失效情况,找出器件在服役过程中的危险位置位于器件盖板长边焊缝中心内侧区域,且器件的危险频率为 1 阶固有频率,其值为 585.9 Hz。

(2) 通过正弦振动实验和仿真结合的方式,拟合器件危险位置在振动条件下混合集成电路器件的 S-N 曲线。

(3) 通过对器件失效机理的分析,对其进行减振优化,并对不同的减振优化方案进行对比,最终得出在器件内部进行减振优化不仅在空间上更有优势,且相较于外部优化方案,器件的固有频率更高,有着更好的抗振性能。

参考文献:

[1] 李振亚, 赵 钰. 混合集成电路技术与展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(2): 119-124.
Li Zhenya, Zhao Yu. The development and the prospect of hybrid integrated circuit technology[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technol-

- ogy, 2009, 4(2): 119-124(in Chinese).
- [2] Licari J J, Enlow L R. Hybrid Microcircuit Technology Handbook: Materials, Processes, Design, Testing and Production[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2008.
- [3] 毅 力. 混合微电路在军事/宇航电子装备中的应用[J]. 电子工业专用设备, 1998, 27(1): 9-19.
Yi Li. Application of hybrid microcircuits in military/aerospace electronic equipment[J]. Equipment for Electronic Products Manufacture, 1998, 27(1): 9-19(in Chinese).
- [4] 关亚男. 大规模集成电路的平行缝焊工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
Guan Yanan. Research on Parallel Seam Sealing Process for LSI[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007(in Chinese).
- [5] Wang J D, He X Q, Li X P, et al. Hermetic packaging of Kovar alloy and low-carbon steel structure in hybrid integrated circuit(HIC) system using parallel seam welding process[C]//2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology. Chengdu, China, 2014: 347-351.
- [6] An T, Qin F, Zhou B, et al. Vibration lifetime estimation of PBGA solder joints using Steinberg model[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 102: 113474.
- [7] 撒子成, 王 尚, 冯佳运, 等. SiP 器件组装焊点形态预测及其随机振动可靠性仿真研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(2): 276-283.
Sa Zicheng, Wang Shang, Feng Jiayun, et al. Simulation of SiP solder joint geometry and random vibration reliability prediction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(2): 276-283(in Chinese).
- [8] Che F X, Pang J H. Vibration reliability test and finite element analysis for flip chip solder joints[J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(7): 754-760.
- [9] 姚起杭. 谈谈加速振动试验问题[J]. 航空标准化与质量, 1975(6): 7-18.
Yao Qihang. Talk about accelerated vibration test[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 1975(6): 7-18(in Chinese).
- [10] 张景绘, 李新民. 主、被动振动控制一体化理论及技术[C]//中国宇航学会结构强度与环境工程专业委员会暨中国航天第八专业信息网 2003 年度技术信息交流会. 杭州, 中国, 2003: 177-191.
Zhang Jinghui, Li Xinmin. Active and passive vibration control integrated theory and technology[C]//The Structural Strength and Environmental Engineering Committee of the Chinese Society of Astronautics and the 2003 Technical Information Exchange Meeting of the Eighth Professional Information Network of China Aerospace. Hangzhou, China, 2003: 177-191(in Chinese).
- [11] 欧进萍, 吴 斌, 龙 旭. 耗能减振结构的抗震设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(2): 98-107.
Ou Jinping, Wu Bin, Long Xu. Seismic design method of energy dissipation and vibration reduction structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(2): 98-107(in Chinese).
- [12] 吴伟朋. 复杂隔振系统振动主动控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
Wu Weipeng. Research on Active Control of Vibration for Complex Vibration Isolation System[D]. Jinan: Shandong University, 2008(in Chinese).
- [13] 匡格平, 胡兆财, 谢金鑫, 等. 飞行器蒙皮桁条结构减振优化设计方法研究[J]. 强度与环境, 2023, 50(3): 45-52.
Kuang Geping, Hu Zhaocai, Xie Jinxin, et al. Research on vibration reduction optimization design method of aircraft Skin-Stringer structure[J]. Structure & Environment Engineering, 2023, 50(3): 45-52(in Chinese).
- [14] 王海超, 彭小伟, 郭 帆, 等. 航天电子产品 CCGA 加固工艺可靠性分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(7): 102-107, 119-120.
Wang Haichao, Peng Xiaowei, Guo Fan, et al. Research on the reliability of CCGA reinforcement process for aerospace electronic products[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(7): 102-107, 119-120(in Chinese).

(责任编辑: 田 军)