

边缘加固胶点涂方式优化★

邢增程, 袁婧怡, 赵永志, 李江波, 张理想

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要: 由于陶瓷球栅阵列 (CBGA) 封装与基板热膨胀系数失配, 致使焊点在温度循环载荷下易发生热应力疲劳失效。边缘加固胶可改善焊点应力状态, 但不合理的点涂形式易在陶瓷基板中引起应力集中, 进而导致开裂。目前, 点涂形式对焊点保护与器件自身可靠性的协同影响机制尚不清晰。为此, 本文设计多种典型点涂方案, 结合温度循环试验与有限元仿真, 系统考察不同点涂布局下焊点应力及陶瓷基板受力特征。结果表明, 优化点涂形式不仅能显著降低焊点应力, 同时避免对陶瓷基板造成附加损伤。研究揭示了点涂形式与封装可靠性的内在关联, 可为CBGA 器件边缘加固工艺设计与可靠性提升提供理论依据与技术参考。

关键词: 陶瓷球栅阵列封装; 边缘加固胶; 点涂形式; 热应力; 有限元仿真; 温度循环; 封装可靠性

中图分类号: **文献标志码:** A

文章编号: 1672-5468 (XXXX) XX-0001-07 doi:10.3969/j.issn.1672-5468.XXXX.XX.001

Optimization of Dispensing Patterns for Edge Bonding Adhesives

XING Zengcheng, YUAN Jingyi, ZHAO Yongzhi, Li Jiangbo, ZHANG Lixiang

(The 13th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The ceramic-based ball grid array (CBGA) package has a coefficient of thermal expansion mismatch with the substrate, causing the solder joints to be prone to thermal stress fatigue failure under temperature cycling loads. Edge reinforcing glue can improve the stress state of the solder joints, but an improper application method can easily cause stress concentration in the ceramic substrate, thereby leading to cracking. Currently, the synergistic influence mechanism of the point coating form on the protection effect of the solder joints and the reliability of the device itself is not clear. Therefore, this paper designs several typical point coating schemes, combined with temperature cycling tests and finite element simulations, to systematically investigate the stress distribution of the solder joints and the force characteristics of the ceramic substrate under different point coating layouts. The results show that optimizing the point coating form can not only significantly reduce the stress of the solder joints but also avoid causing additional damage to the ceramic substrate. The study reveals the intrinsic relationship between the point coating method and the reliability of the package, providing theoretical basis and technical reference for the optimization design and reliability improvement of the edge reinforcing process of CBGA devices.

★基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFF1400200) 资助。

收稿日期: 2026-03-10 修回日期: 2026-06-18

作者简介: 邢增程 (1993—), 男, 河北沧州人, 中国电子科技集团公司第十三研究所工程师, 硕士, 从事电子封装可靠性研究方向的工作。

Keywords: ceramic ball grid array package; edge bonding adhesive; dispensing pattern; thermal stress; finite element simulation; temperature cycling; package reliability

0 引言

随着电子设备向高集成度、小型化与高可靠性方向持续发展，球栅阵列（BGA：Ball Grid Array）封装因互连密度高、电气性能优异等优势，已成为微电子封装领域的主流技术^[1]。但BGA器件与印制电路板（PCB：Printed Circuit Board）间热膨胀系数失配严重，在温度循环载荷作用下，焊点区域易产生应力集中，进而引发焊点开裂等失效问题，该问题已成为制约封装组件长期服役可靠性的关键瓶颈^[2]。边缘加固胶是微电子高可靠封装体系中重要的补强材料，将其点涂于BGA器件外围可实现结构强化：一方面抑制器件与PCB基板的相对形变，优化界面热匹配特性；另一方面实现焊球应力均匀化，有效降低焊点应力，显著提升BGA封装焊点的抗温度循环能力与封装服役稳定性。该工艺是解决高集成电子封装可靠性难题的重要技术手段，在航空航天、汽车电子等高端电子领域具备重要应用价值^[3]。

陶瓷球栅阵列（CBGA：Ceramic Ball Grid Array）器件兼具可靠性高、吸湿性低、封装密度大等优势，现已在高端电子装备中得到广泛应用^[4]。该类器件主要由陶瓷基板、金属围框与金属/陶瓷盖板构成。但陶瓷材料本身脆性大、抗拉强度低，若边缘加固胶点涂形式设计不合理，胶体的约束作用会使陶瓷基板产生应力集中，进而诱发微裂纹甚至贯穿性开裂，反而降低器件整体可靠性^[5-6]。

因此，为平衡焊点保护与器件安全之间的矛盾，亟需开展面向CBGA器件的边缘加固胶最佳点涂形式研究。本文通过设计多种典型点涂方案，结合温度循环试验与有限元仿真手段，系统研究各类方案对封装可靠性的影响。最终确定了可同时缓解焊点热应力、避免陶瓷基板产生附加损伤的最优点涂工艺。研究成果可为高可靠性电子封装中边缘加固工艺的设计与优化提供理论支撑与

实践参考，推动微电子封装向长寿命、高可靠方向发展。

1 试验设计

1.1 试验材料

本试验所用试样及材料包括双层结构CBGA器件、环氧树脂型边缘加固胶、高铅焊球（Pb90Sn10）及FR4型PCB基板。CBGA器件外形尺寸为16 mm×16 mm，整体高度为4.0 mm，由三层氧化铝基板与上下两层可伐围框组合而成；三层基板厚度依次为0.5、2.0、0.5 mm，上下可伐围框高度均为0.5 mm，结构形式如图1所示。焊球直径为0.4 mm，PCB基板尺寸为90 mm×50 mm×2 mm（长×宽×高）。

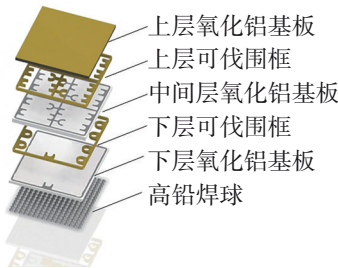


图1 双层结构CBGA器件

1.2 样品制备

将植有直径为0.4 mm高铅焊球的双层CBGA器件表贴至PCB基板，以此作为研究载体，分析胶体点涂形式对封装可靠性的影响，如图2所示。

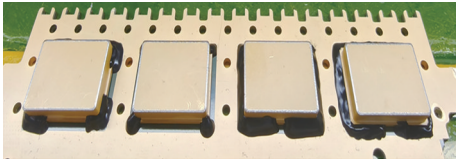


图2 不同边缘加固胶点涂方式可靠性验证件

边缘加固胶补强效果主要由点涂长度与点涂高度两大参数决定。据此对点涂方案进行分类：按胶体点涂长度划分为四边加固、四角加固、四

点加固三类，如图3所示。按点涂高度划分为两类，分别为胶体与下层氧化铝基板齐平、胶体与下层可伐围框齐平，如图4所示。



图3 点涂长度示意图

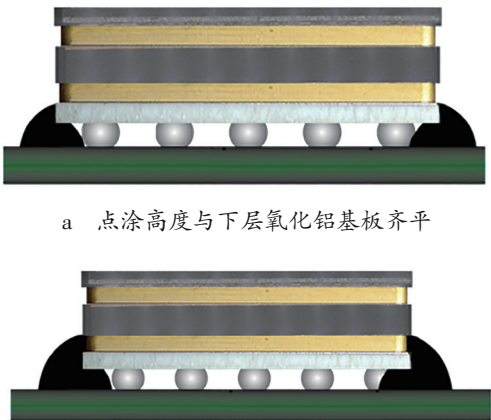


图4 点涂高度示意图

试验样品分组如表1所示，其中A、B组用于对比点涂高度对CBGA结构及焊点力学状态的影响，B、C、D组用于分析点涂长度的影响规律。

表1 点涂形式分类

点涂形式	胶的位置
A	双层陶瓷器件四边加固（底部中心位置2个焊球不作点涂），胶体高度与下层氧化铝基板齐平
B	双层陶瓷器件四边加固，胶体高度与下层可伐围框齐平
C	双层陶瓷器件四角加固（点涂长度为5个焊球间距），胶体高度与下层可伐围框齐平
D	双层陶瓷器件四点加固（点涂长度为2个焊球间距），胶体高度与下层可伐围框齐平

1.3 试验方法

依据点涂形式将试样分为4组，每组制备10只平行试样，共计40只试验样品。所有试样采用

统一的胶体固化工艺与装配流程，严格遵循单一变量原则，仅改变边缘加固胶点涂形式。

采用两箱法开展温度循环试验，温度范围为-55~+125℃，保温时间为30 min，转换时间为1 min，如图5所示。完成200次温度循环后，对各组样品的焊点进行磨抛，检测焊点形貌与开裂情况。

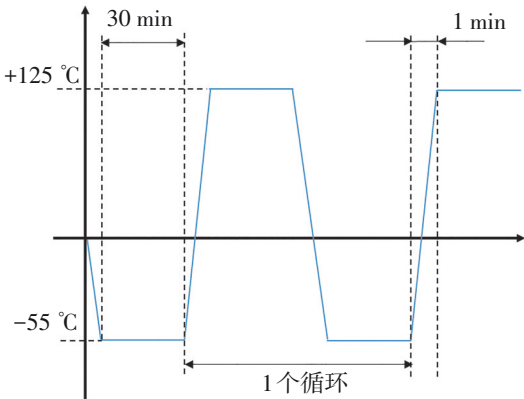
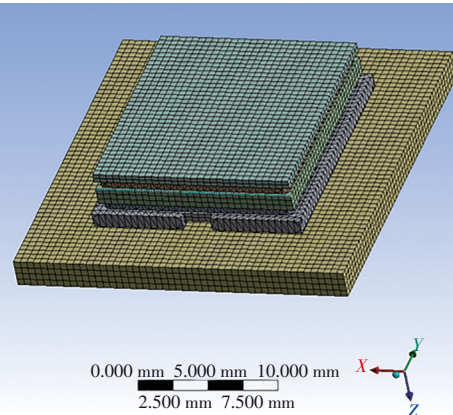


图5 温度循环曲线

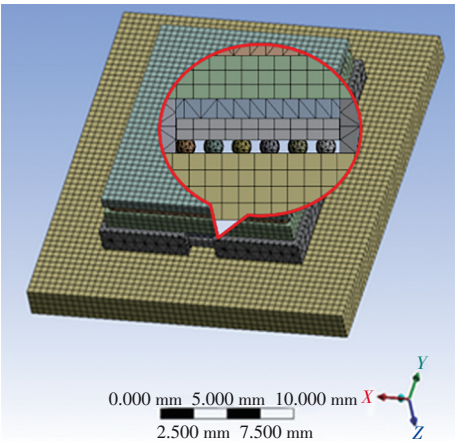
2 有限元仿真

2.1 模型建立

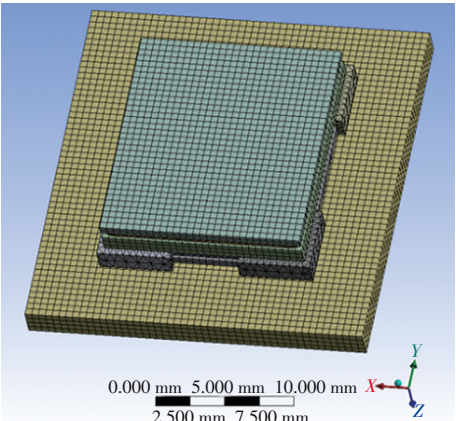
为保证仿真计算精度，按照结构实际几何尺寸建立三维有限元模型，如图6所示。模型整体划分为双层CBGA器件、焊球、PCB基板与边缘加固胶4个部分，全部采用六面体单元进行网格划分，针对焊球、陶瓷基板边角、胶层界面等应力集中区域实施局部网格加密，并结合自适应网格策略完成网格剖分。模型总网格数与节点统计结果如表2所示。



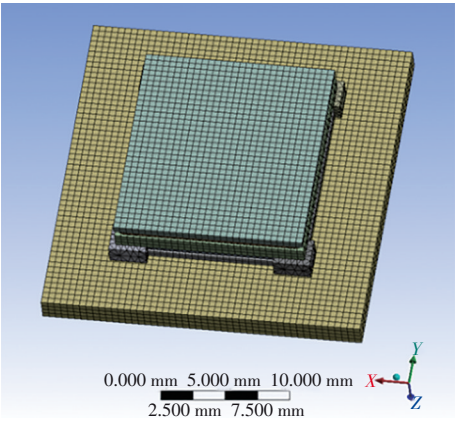
a A型点涂样品模型结构



b B型点涂样品模型结构



c C型点涂样品模型结构



d D型点涂样品模型

图6 仿真模型结构

表2 网格及节点数量

点涂形式	网格数	节点数
A	76 955	221 566
B	78 137	223 827
C	77 222	221 885
D	76 336	219 930

2.2 载荷及边界条件

根据实际试验条件对整体模型施加温度载荷，温度区间为-55~+125℃。在模型底面选取A、B、C 3个点，分别对X/Y/Z方向，X/Y方向位移、Z方向位移进行约束，以限制结构整体自由度，如图7所示。工程实践表明，该类封装结构主要失效形式为焊球或陶瓷基板开裂，因此提取焊点的 von Mises 应力与陶瓷的最大主应力作为评价指标。对于热力学耦合仿真，焊点、陶瓷基板在不同温度 T 下的应力 σ 正比于该温度与零应力温度 T_0 的差值 ΔT ($\Delta T = T - T_0$)^[7]。 T_0 的选取，将显著改变应力幅值的大小。为确定应力幅值最高点，将温度循环试验条件-55~+125℃内的 T_0 设置为125℃，对BGA焊点、陶瓷基板在-55℃下的应力进行仿真计算。

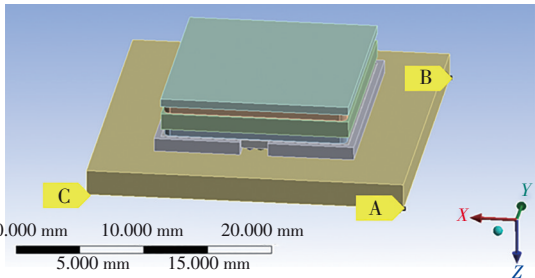


图7 仿真模型结构

2.3 材料热力学参数

仿真结构的各部分材料参数设置如表3所示^[8]，所有材料特性均视为线弹性，且材料性能不受温度影响。

表3 材料参数

部位	材料	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	热膨胀系数/ $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
上/中/下层基板	氧化铝	330.0	200.0	8.10
围框	可伐	143.0	249.0	5.17
PCB	FR4	20.0	/	20.00/20.00/8.20
焊球	Pb90Sn10	19.0	19.2	270.00
加固胶	环氧树脂	6.5	/	30.00

3 结果及分析

3.1 温度循环试验结果

完成200次温度循环后，对各组样品四角最外侧焊球进行磨抛，焊点形貌如图8所示。试验结果

表明：A、B两类点涂方案下，外侧焊球未出现开裂及明显塑性变形，焊点完整性良好；C类方案焊球无裂纹萌生，但存在轻微塑性变形；D类方案焊球塑性变形显著，且已出现微裂纹。根据焊球形貌可知，A、B两种点涂形式对焊球具备优异的防护效果。

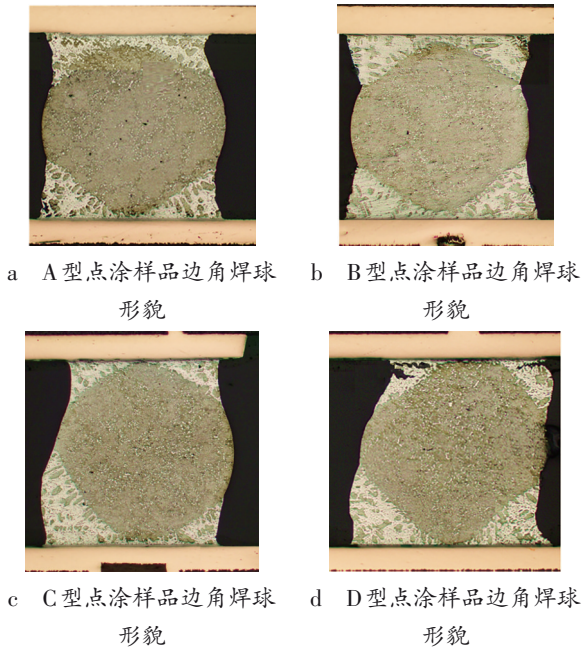
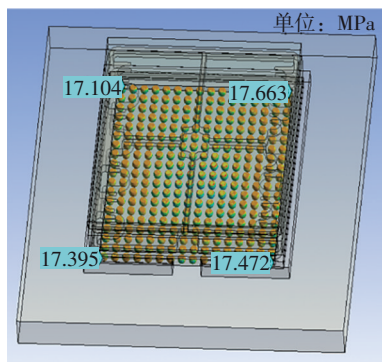


图8 焊球磨抛图

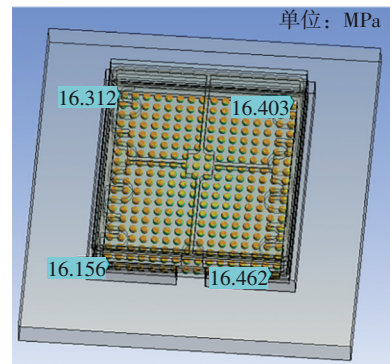
3.2 仿真结果分析

3.2.1 焊点应力分析

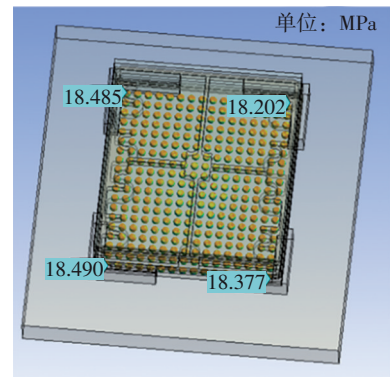
提取4种点涂方案下器件四角最外侧焊球的 von Mises 应力，仿真结果如图9所示。统计得到各组焊点峰值等效应力：A型为 17.7 MPa、B型为 16.5 MPa、C型为 18.5 MPa、D型为 20.3 MPa。对比数据可知，B型方案焊点应力水平最低，A型次之，C、D型应力依次升高。



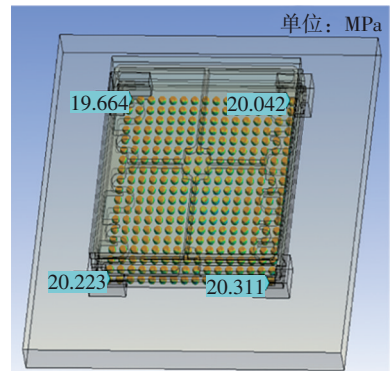
a A型点涂样品边角焊点 von Mises 应力



b B型点涂样品边角焊点 von Mises 应力



c C型点涂样品边角焊点 von Mises 应力



d D型点涂样品边角焊点 von Mises 应力

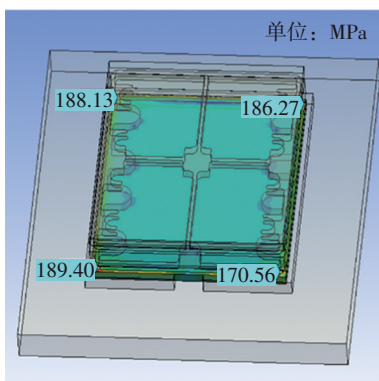
图9 4种不同点涂形式边角焊点 von Mises 应力云图

基于弹性力学变形协调条件与位移连续条件，对上述焊点应力差异产生机制进行机理分析。CBGA 器件与PCB 基板热膨胀系数差异较大，温度变化过程中两者自由变形量无法匹配，界面处产生相对位移与翘曲变形，使焊点承受剪切应力与应变，最终诱发失效^[9]。在器件边缘点涂加固胶后，固化胶体可在封装体与基板之间形成刚性约束，使两者实现协同热变形，有效削弱焊点承担的非协调变形，降低应力幅值。通过增加边缘加固胶点涂长度与高度，可进一步增加有效约束范围、提升整体约束刚度，改善结构整体的变形协

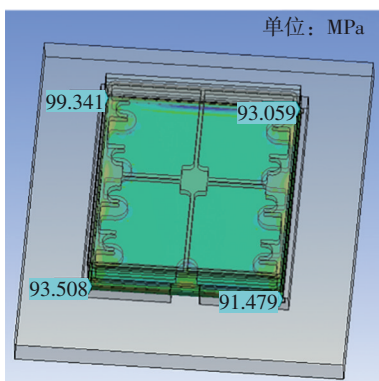
调性，从而减小焊点应力。因此B型点涂形式对焊点保护效果最佳，上述仿真规律与温度循环试验结果完全吻合^[10]。

3.2.2 氧化铝基板应力分析

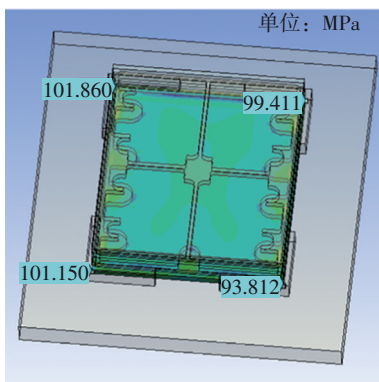
图10为4种点涂形式样品的下层氧化铝基板最大主应力云图。由云图可见，各方案陶瓷基板最大主应力极值均出现在下层可伐围框与氧化铝基板的结合界面四角位置。其中A、B、C、D型点涂样品的陶瓷最大主应力极值分别为189.4、99.3、101.9、120.0 MPa。



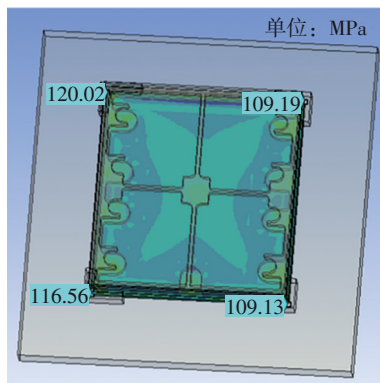
a A型点涂样品陶瓷最大主应力



b B型点涂样品边陶瓷最大主应力



c C型点涂样品陶瓷最大主应力



d D型点涂样品陶瓷最大主应力

图10 4种不同点涂形式样品下层氧化铝基板最大主应力云图

氧化铝陶瓷为典型脆性材料，依据线弹性断裂力学理论，其对应力具有高度敏感性^[11]。D型点涂方案仅对CBGA器件基板四角进行点状加固，胶体对陶瓷基板与PCB基板约束集中于局部区域，热失配引发的非协调变形无法均匀分散，造成局部应力集中，显著增加陶瓷基板开裂风险^[12]。

延长边缘加固胶的点涂长度可将约束形式由离散点状承载转变为连续线性约束。依据圣维南原理与应力重分布规律^[13]，界面约束应力可沿陶瓷基板边缘均匀传递，应力集中效应显著减弱，陶瓷基板开裂风险随之降低^[14]。在此基础上进一步增加点涂高度至与下层可伐围框齐平，胶体与可伐围框形成刚性粘结耦合，体系受力路径发生重构。根据结构刚度分配理论，在复合约束体系中，刚度更大的构件将承担主要外载荷，温度载荷产生的应力优先通过胶体传递至力学性能更优、强度更高的可伐围框，使其成为主承力结构^[15-16]，最终大幅降低脆性陶瓷基板应力水平。因此4种方案中，B型点涂形式下陶瓷基板最大主应力极值最低，开裂风险最小。

4 结束语

本文研究了4种不同边缘加固胶点涂形式在温度交变环境下对CBGA封装焊点与陶瓷基板力学特性的影响，阐明了点涂方式对焊点防护、器件结构可靠性的协同作用机制。

研究表明：合理增加边缘加固胶的点涂长度与点涂高度，可在提升焊点可靠性的同时，改善陶瓷基板应力分布，抑制应力集中，全面提升CBGA封装整体可靠性。针对存在热膨胀失配的

CBGA类封装产品，工程应用中建议采用四边点涂方案，且胶体点涂高度需高于器件下层陶瓷基板。本研究结论可为同类高可靠电子封装边缘加固工艺的优化提供参考。

参考文献：

- [1] Chen T C, Opulencia M J C, Majdi H S, et al. Estimation of thermomechanical fatigue lifetime of ball grid solder joints in electronic devices using a machine learning approach [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51 (7): 3495-3503.
- [2] Depiver J A, Mallik S, Amalu E H. Thermal fatigue life of ball grid array (BGA) solder joints made from different alloy compositions [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021 (125): 105447.
- [3] 屈云鹏, 张小龙, 李逵, 等. 温循与振动条件下三种加固方式的BGA焊点可靠性评估 [J]. *半导体技术*, 2023, 48 (12): 1137-1144.
- [4] 陆琪. 基于HTCC工艺用于DG~20 GHz超宽带表贴式陶瓷封装外壳传输结构研究 [D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2021.
- [5] 宜亚丽, 旷庆文, 陈美宇, 等. 多层PZT陶瓷自热温度影响因素分析 [J]. *压电与声光*, 2025, 47 (1): 121-128.
- [6] Timoshenko S P, Gere J M. *Mechanics of Materials* [M]. 5th ed. Boston: Cengage Learning, 2000.
- [7] 陆琪, 刘英坤, 乔志壮, 等. 陶瓷基板研究现状及新进展 [J]. *半导体技术*, 2021, 46 (4): 257-268.
- [8] 张理想, 冯思润, 冀乃一, 等. 温度循环作用下陶瓷3D-SIP BGA焊点寿命预测 [J]. *电子工艺技术*, 2025, 46 (5): 25-28.
- [9] Wang L, Gao Z Z, Zhang X H, et al. Ex-situ measurement of internal deformation in BGA packages based on digital volume correlation [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 41 (2): 312-320.
- [10] Kato Y, Hamagami H, Shibata T, et al. Simulation and experimental study on edge bonding shape for reliable BGA packages [J]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2025, 37 (1): 45-53.
- [11] 刘文辉. 高温高压应用环境下陶瓷外壳设计加工及可靠性评估 [J]. *电子工艺技术*, 2024, 45 (2): 78-82.
- [12] 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.
- [13] 徐芝纶. *弹性力学* [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 王海超, 文奕格, 费义鹏, 等. 航天电子产品CQFP封装器件加固工艺可靠性研究 [J]. *宇航材料工艺*, 2025, 51 (4): 81-86.
- [15] 张跃, 牛敬贝, 李恩泽, 等. 高温服役的陶瓷-可伐合金钎焊技术 [J]. *焊接学报*, 2025, 46 (11): 95-100.
- [16] Shakouri A, Alipooramirabad H, Paradowska A, et al. Simulation and empirical equation for thermal stress in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ ceramic joints brazed to Kovar/Monel metal alloys [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2025, 22 (3): 1123-1138.