

专题——整弹和弹载部件加速试验技术及寿命预测方法

电子部组件延寿分析

徐鹏博, 李永强

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: 由于军用电子设备的高可靠性以及列装之前的测试无法完全模拟出真实的服役环境, 导致测试结果的参考意义不大。鉴于此, 文中将以电子部组件的任务剖面作为基础, 在制作环境载荷谱时, 参考影响电子部组件寿命的关键因素, 将电子元器件及焊点疲劳失效的机理模型作为理论依据。在绘制电子部组件的CAD模型时, 进行适当简化, 使用ANSYS软件对其进行多载荷耦合作用下的有限元仿真, 找出电子元器件的薄弱点, 并对关键部位进行寿命预测, 为军用电子设备故障的初步诊断及装备延寿分析提供借鉴。

关键词: 电子部组件; 任务剖面; 环境谱; 电子元器件; 焊点; 装备延寿

中图分类号: TJ760

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)08-0001-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.001

Life Extension Analysis of Electronic Component

XU Peng-bo, LI Yong-qiang

(Naval Aviation University, Shandong Yantai 264001, China)

ABSTRACT: Due to the high reliability of military electronic equipment and the inability of tests before installation to fully simulate the real service environment, the reference of the test results is not significant. This paper will use the task profile of the electronic component as a basis to refer to the key factors affecting the life of the electronic component when making the environmental load spectrum. The mechanism model of fatigue failure of electronic components and solder joints is used as the theoretical basis. Furthermore, when drawing CAD models of electronic components, it is necessary to make appropriate simplification and use ANSYS software to carry out finite element simulations under multi-load coupling, thereby finding out the weak points of electronic components and predict the life of key parts, which provides reference for the preliminary diagnosis of military electronic equipment failure and equipment life extension analysis.

KEY WORDS: electronic component; mission profile; environment spectrum; electronic components; solder joints; equipment life extension

随着计算机、电子电路技术的发展, 大量的电子部组件应用到军事设施当中。尽管多数电子部组件在

收稿日期: 2022-07-21; 修订日期: 2022-08-12

Received: 2022-07-22; Revised: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51975580)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975580)

作者简介: 徐鹏博 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为装备维修保障工程。

Biography: XU Peng-bo (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: equipment maintenance support project.

通讯作者: 李永强 (1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为航空装备系统工程。

Corresponding author: LI Yong-qiang (1995-), Male, Doctoral candidate, Research focus: aviation equipment system engineering.

引文格式: 徐鹏博, 李永强. 电子部组件延寿分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 001-006.

XU Peng-bo, LI Yong-qiang. Life Extension Analysis of Electronic Component[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 001-006.

出厂之前进行了性能实验,验证了其在一定时长下的可用性,但由于测试多脱离实际情况,使得测试结果的参考意义极大降低。此外,由于部分原因,多数使用手册上不会标注重点部位及关键位置,往往造成薄弱环节的加速崩溃。因此,如何在装备列装之初,迅速确定不同服役地区电子部组件寿命及薄弱点成为亟待解决的问题^[1-4]。

罗海萍等^[5]借助于有限元软件对于电子器件在机械及温湿度作用下的层间开裂现象进行了分析。罗毅飞等^[6]从过压失效、过流失效及疲劳失效3个方面对焊接型电子元器件失效进行了量化评估。景博等^[7]通过搭建环境应力试验系统,研究了焊点在耦合应力下的退化效果。王艳艳等^[8]将装备自然环境谱转变为加速试验环境谱,实现了环境应力水平及作用时间的确定。Massimo等^[9]通过电子元器件失效模型及寿命预测实现了电子部组件的修复和再利用,极大地降低了使用和维护成本。尽管以上研究在各自方面取得了一定的成果,但并没有从整体上对电子部组件寿命预测进行全过程解析,且并未对各关键环节之间的联系进行解释,故本文以电子部组件任务剖面为基础,以有限元仿真分析为手段,以电子元器件及焊点失效机理模型为依据,实现其寿命预测及薄弱点判断。

1 环境载荷谱

对于电子部组件的故障或寿命,以经验或失效数据为基础的常规判别方法不仅需要时间去积累,且难以迅速应对初期失效,极易错失最佳修复期,造成资源的极大浪费。以仿真为基础的延寿修复既能在一定程度上保证判断的准确性,而且能够在节约大量资源的基础上实现时效性。对于常规仿真或实验方法,其环境载荷的设定仅仅依据相关标准或准则,往往作为性能测试加以考虑,难以作为各种使用环境下故障及

寿命的判别依据。对于电子部组件而言,不同的任务环境和使用频次,都极大地影响着其寿命特征。因此,以任务剖面为基础,提取相关环境谱,并以此作为仿真输入参量,成为提升结果精确度的必然选择^[10]。

1.1 任务周期及剖面

依据相关研究,温度和振动导致的电子元器件失效占据70%以上^[11],又由于不同地域湿度差距较大,故应依据装备任务规划,主要提取温湿度及振动3种环境因素。多数装备都涉及库房贮存期和战备值班期2个时期^[12]。此外,多数在编单位均留有检测期及维护修整期,因其周期较长,故必须加以考虑。对于环境温湿度的获取,可以参照库房及当地气象,而对于振动,则需要参考其他装备上内置的传感器及路况,从而实现功率谱密度的测绘^[13]。导弹的服役任务剖面如图1所示。

1.2 关键环境因素

对于军用电子元器件而言,其应用及出厂之初,往往要进行多项电气检测,由电子元器件本身缺陷造成失效的可能性较低,且多数电子部组件为专用设备,一般具有对应的电气端口,能够规避大多由于不规范操作造成的电气失效。因此,对于高可靠、长寿命的军用电子部组件而言,温度、振动、湿度等外部环境往往成为长期使用下故障的主要诱因^[14-15]。周期性的温度和振动循环往往导致电子元器件疲劳损坏或接触不良,而吸湿现象及氧化现象则会导致电子元器件的开裂,从而造成电子部组件的失效。对于电子部组件而言,其故障或失效主要来自于2个方面:电子元器件疲劳失效^[16];焊点断裂致使连接失效^[17]。由于前期的电气检测,致使虚焊等缺陷的可能性较低,因此焊点断裂等故障的产生多是在长期的使用过

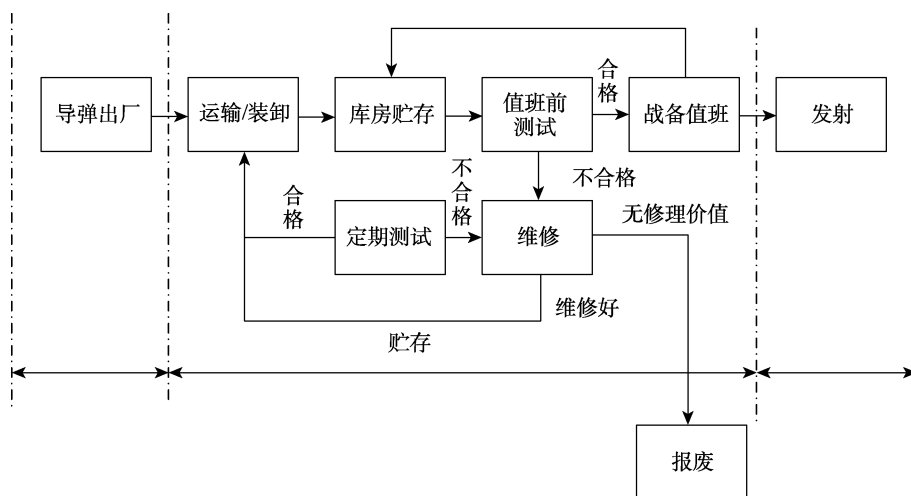


图1 导弹服役任务剖面

Fig.1 Sketch map of the mission profile of missile

程中积累的应力损伤。考虑到电子部组件多处于机箱内部, 故其可能的应力损伤主要来自 2 个方面: 温度循环和振动载荷导致的应力累积损伤; 由于温湿度组合作用下的氧化腐蚀现象。

2 模型构建与仿真

2.1 CAD 模型

传统的三维仿真模型的建立, 多数以体积类似的方块代替各类电子元器件, 对于一些体积较小的电子元器件直接忽略, 从根本上导致了仿真误差的产生^[18]。考虑到对流及传导作用, 任一电子元器件构型的变化将会对整体产生影响, 尤其是关键处的电子元器件。对于真实的电子元器件而言, 其组成部分主要包括器件主体和管脚。对于不同的电子元器件, 其各部分材料属性一般不同, 必须加以区分考虑。除焊点材料外, 其余材料可视作均为各向同性线弹性材料, 且设置为固定值^[19]。图 2 是以实际电子部组件为模板, 实现其三维模型的复现, 将最大程度上保证仿真结果的精确度。

2.2 环境载荷耦合分析

考虑到多数仿真分析仅仅针对于某一因素对电子元器件的影响进行建模分析, 而电子元器件的失效往往是多种因素叠加造成的, 而将所有的因素都加以建模分析, 既不现实, 也无必要^[20]。因此, 根据任务环境, 选取关键环境因素成为必须考虑的因素。在真实试验测试过程中, 对于温度、振动、湿度 3 个环境

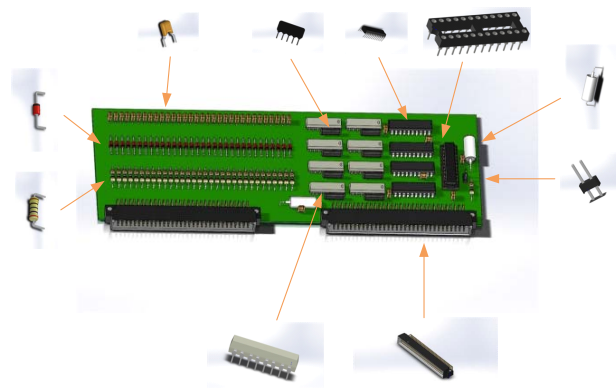


图 2 CAD 模型构建

Fig.2 Schematic of CAD model construction

因素的耦合分析, 可以将电子部组件置于温湿度试验箱中, 而后将试验箱置于振动台之上进行相关试验。对于有限元分析软件而言, 其本质是内嵌相关数学模型进行计算分析, 并不能在同一时间对于不同的模型进行叠加处理。对于此问题的处理, 一种方法是选取合适的仿真参量, 并将不同环境因素对其的影响进行叠加, 以便构建出新的合适的模型^[21-23]; 另一种是将在温湿度因素影响下的仿真结果传输到振动模块, 然后将结果再次回传, 如此往复推进^[24]。此外, 对于环境参量的设置, 尽管可以依据环境谱获取具体数据, 但如果依据实际进行复现, 其工作量及计算量将极为巨大, 所以必须考虑在保证仿真准确性的基础上, 减少工作量。因此, 必须在确定寿命或故障表征量的基础上, 对环境参量设置的方式和顺序进行综合考量。利用有限元软件进行耦合分析得出的效果图见图 3。

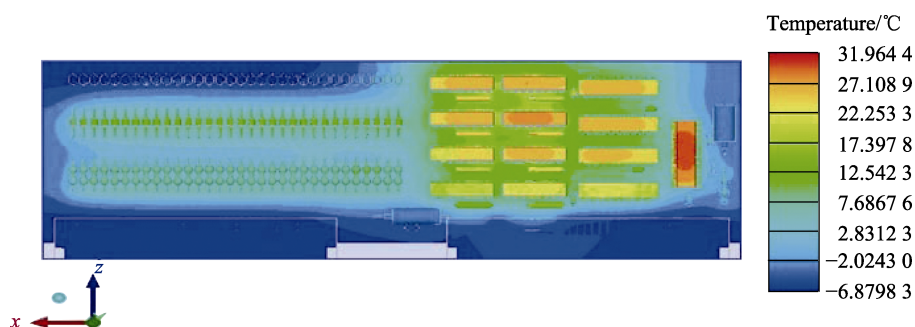


图 3 热-电-结构耦合仿真效果

Fig.3 Simulation effect of thermal-electrical-structural coupling

3 寿命判定与薄弱点定位

3.1 数据提取

在仿真分析的过程中, 除将关键环境因素作为仿真设计参量进行输入外, 还需确定器件寿命或故障的表征参量, 以便设计仿真流程, 获取仿真云图, 并提取关键结果数据^[25]。以温度对电子元器件功用的影响为例, 依据真实环境条件及热功率参量, 以所建立的

CAD 模型为基础, 仿真获取其在不同状态下的温度数据。对于多数电子元器件而言, 并没有依据真实试验绘制的温度-寿命图谱, 因此不得不参考权威的可靠性书籍 (如可靠性预计手册), 以获得权威机构发布的可靠试验数据, 或借助于 Arrhenius 模型解算电子元器件热退化失效时间^[26-27]。鉴于此, 其仿真参量的获取则转变为从环境温度的输入到器件温度的获取, 并结合相关模型进行等价转换, 以便于在缺少试验数据的基础上获取相对准确的失效数据^[28]。具体流

程如图4所示。

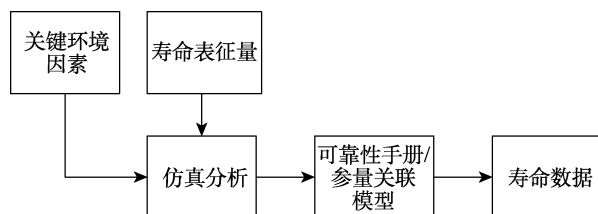


图4 仿真寿命数据的获取流程
Fig.4 Schematic of the acquisition process of simulated life data

3.2 模型适配与竞争失效

对于焊点而言,除了受部分氧化腐蚀影响之外,其主要影响因素为温度循环导致的周期热应力及振动导致的应力累积损伤^[29-31]。焊点受到热应力和振动应力的持续作用,致使焊点危险位置处萌生裂纹,并逐渐扩展,最终断裂。同时,温度循环和振动之间会产生耦合作用。温度循环载荷下,电子元件内部产生的周期性热应力会增大原本由随机振动造成的电子元件和PCB板之间的位移,从而促进裂纹扩张^[32]。随机振动产生的应力不仅会让电子元件与PCB板出现细微的磨损,致使电阻值增大,也会使接触点持续摩擦产生热量。由于集成电路板上的金属材料具有良好的导热性能,摩擦热累积到一定程度会使部分接触面温度上升,接触面各个区域之间出现的温差将导致微凸体传递热量的效率降低^[33]。热循环载荷施加一段时间后,电子元件表面温度逐渐稳定,表面温度 T_s 为:

$$T_s = T_0 + T_f \quad (1)$$

式中: T_0 为金属导体的表面温度; T_f 为闪温,这一部分温度是由接触面上的微凸体彼此作用产生的。根据热力学第一定理,可推导出 T_f 的表达式为:

$$T_f = k \frac{\mu F(v_1 - v_2)}{(c_1 \sqrt{v_1} + c_2 \sqrt{v_2}) \sqrt{\frac{b}{2}}} \quad (2)$$

式中: k 为温升系数; F 为单位长度的微凸体上的法向载荷; μ 为摩擦系数; v_1 、 v_2 均为接触面的切向速度; c_1 、 c_2 为材料常数; b 为接触带宽。

由式(2)可以看出,闪温与接触面间的相对速度、微凸体上的法向载荷成正比。当随机振动载荷提高时,会加剧集成电路板的振动幅度,接触面的相对速度升高,法向载荷增大,闪温升高。由此可以证明随机振动产生的应力同样会对热应力造成影响,2种载荷相互作用,进一步缩短焊点的疲劳寿命。

此外,对于不同的焊点类型,其应力的产生与大小各不相同,且依据的寿命模型也有所差异^[34]。针对不同的因素所建立的寿命模型不尽相同,以便合理地处理所推算的不同寿命数据,使其最为接近真实的寿

命数据。

由前文分析可得,依据短板理论,电子部组件的工作寿命取决于其薄弱部位可靠寿命,且功能板的失效主要来自电子元器件的退化失效和连接处焊点的疲劳失效^[35]。因此,以电子元器件失效模型和焊点寿命方程为基础,以仿真所得电子元器件及电路板数据为参数,分别解算电子元器件退化失效时间及焊点疲劳寿命。同时,采用竞争失效的方式评估电子部组件预测工作寿命及薄弱环节,并将寿命数据作为判断其薄弱点的定量化表征,以便开展迅速的修复和可靠的延寿工作。

4 结语

在追求时效的当下,传统的装备延寿判别方式逐步落后于武器装备的升级换代,以经验为基础的研究手段逐步丧失了其主导地位。在精简装备的大背景下,仿真分析将逐步凸显其优越性。从装备的任务规划获取环境信息,从物理构型获取仿真基础,从器件及焊点失效模型预测寿命及关键点,不仅可以在装备应用之初迅速掌握并为使用规范提供参考,而且可以反向为装备维护升级及延寿修复奠定基础。

参考文献:

- [1] 吕卫民,李永强.电子功能部件环境适应性试验优化设计[J].系统工程与电子技术,2020,42(7):1630-1636.
LYU Wei-min, LI Yong-qiang. Electronic Functional Equipment Environmental Adaptability Test Optimal Design[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(7): 1630-1636.
- [2] 关晓丹,梁万雷.微电子封装技术及发展趋势综述[J].北华航天工业学院学报,2013,23(1):34-37.
GUAN Xiao-dan, LIANG Wan-lei. An Overview of Microelectronic Packaging Technology and Its Development Trend[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2013, 23(1): 34-37.
- [3] TU K N, TIAN Tian. Metallurgical Challenges in Microelectronic 3D IC Packaging Technology for Future Consumer Electronic Products[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(7): 1740-1748.
- [4] QASAMEH A, HAMASHA S, JARADAT Y, et al. Damage Evolution in Lead Free Solder Joints in Isothermal Fatigue[J]. Journal of Electronic Packaging, 2015, 137(2): 021012.
- [5] 罗海萍,杨道国,李宇君.热-机械应力和湿气引起QFN器件层间开裂分析[J].电子元件与材料,2006,25(6):64-66.
LUO Hai-ping, YANG Dao-guo, LI Yu-jun. Analysis on Thermal-Mechanical Stress and Moisture Driven Delamination in the QFN Package Devices[J]. Electronic Components and Materials, 2006, 25(6): 64-66.

- [6] 罗毅飞, 王磊, 黄永乐, 等. 焊接型电力电子器件失效机理及量化评估方法[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 38-47.
LUO Yi-fei, WANG Lei, HUANG Yong-le, et al. Failure Mechanisms and Evaluation Methods of Power Electronic Devices[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 38-47.
- [7] 景博, 李龙腾, 胡家兴. 耦合环境应力下电子设备焊点退化试验研究[J]. 强度与环境, 2020, 47(1): 55-63.
JING Bo, LI Long-teng, HU Jia-xing. Degradation Experiment Study on Solder Joint of Electronic Equipment under Coupling Stress[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(1): 55-63.
- [8] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 34-38.
WANG Yan-yan, SHU Chang, LI Chao. Method for Conversion of Natural Environmental Spectra to Accelerated Test Environmental Spectra[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 34-38.
- [9] CONTI M, ORCIONI S. Modeling of Failure Probability for Reliability and Component Reuse of Electric and Electronic Equipment[J]. Energies, 2020, 13(11): 2843.
- [10] 潘广泽, 张铮, 罗琴, 等. 基于性能退化的电力电子器件寿命评估[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 156-162.
PAN Guang-ze, ZHANG Zheng, LUO Qin, et al. Performance Degradation Based Lifetime Evaluation of Power Electronic Devices[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 156-162.
- [11] HAMASHA S, WENTLENT L, BORGESSEN P. Statistical Variations of Solder Joint Fatigue Life under Realistic Service Conditions[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(9): 1284-1291.
- [12] GJB Z108A—2006, 电子设备非工作状态可靠性预计手册[S].
GJB Z108A—2006, Nonoperating Reliability Prediction Handbook for Electronic Equipment[S].
- [13] 舒畅, 苏艳, 吴龙益, 等. 自然环境谱编制方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 93-96.
SHU Chang, SU Yan, WU Long-yi, et al. Research on Establishment Method of Natural Environmental Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 93-96.
- [14] MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment[S].
- [15] 赵树峰. 温湿度条件下塑封电子器件力学行为的模拟[D]. 天津: 天津大学, 2005.
ZHAO Shu-feng. Simulation of Mechanical Behavior of Plastic Electronic Package under Temperature and Humidity Environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [16] BĂJENESCU T M. Reliability and Failures of Electronic Components /Systems[J]. Electrotehnica, Electronica, Automatica, 2021, 69(2): 76-82.
- [17] COYLE R J, SWEATMAN K, ARFAEI B. Thermal Fatigue Evaluation of Pb-Free Solder Joints: Results, Lessons Learned, and Future Trends[J]. JOM, 2015, 67(10): 2394-2415.
- [18] 宜紫薇. 热循环与随机振动加载下电路板的寿命预测[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(1): 89-96.
YI Zi-wei. Life Prediction of PCB under Thermal Cycling and Random Vibration Loading Condition[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(1): 89-96.
- [19] 焦鸿浩. 多物理场载荷下电子封装板级焊点仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
JIAO Hong-hao. Simulation Research on Electronic Package Board Level Solder Joint under Multiphysics Load[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [20] 刘佳豪. 焊点的多应力耦合模拟及可靠性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
LIU Jia-hao. Multi-Stress Coupling Simulation and Reliability Analysis of Solder Joints[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [21] 汤巍, 景博, 黄以锋, 等. 温度与振动耦合条件下的电路板级焊点失效模式与疲劳寿命分析[J]. 电子学报, 2017, 45(7): 1613-1619.
TANG Wei, JING Bo, HUANG Yi-feng, et al. Analysis of Failure Modes and Life of Solder Joints under Coupling of Vibration and Thermal Loads[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1613-1619.
- [22] 汤巍, 景博, 盛增津, 等. 多场耦合下基于传递熵的电路板级焊点疲劳寿命模型[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(5): 484-494.
TANG Wei, JING Bo, SHENG Zeng-jin, et al. Fatigue Life Model of Solder Joint under Multi-Physics Conditions Based on Transfer Entropy[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(5): 484-494.
- [23] Perkins A E. Investigation and Prediction of Solder Joint Reliability for Ceramic Area Array Packages under Thermal Cycling, Power Cycling, and Vibration Environments[J]. Dissertation Abstracts International, Volume: 68-05, Section: B, page: 3354.; Adviser: Suresh K. Sita, 2007.
- [24] QI Hai-yu, OSTERMAN M, PECHT M. A Rapid Life-Prediction Approach for PBGA Solder Joints under Combined Thermal Cycling and Vibration Loading Conditions[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2009, 32(2): 283-292.
- [25] MA Ke, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Thermal Loading and Lifetime Estimation for Power Device Considering Mission Profiles in Wind Power Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 590-602.
- [26] HERBERT W E. Development of the Weathering Test[J]. Test Engineering & Management, 2016, 54(4): 6-8.
- [27] 王裕鹏, 高鑫, 陈文森, 等. 基于 Arrhenius 模型的汽车电子产品加速寿命试验设计分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 22-25.

- WANG Yu-peng, GAO Xin, CHEN Wen-miao, et al. Design of Accelerated Life Test for Automotive Electronics Based on Arrhenius Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 22-25.
- [28] WANG Hong-jian, ZHAO Zhen-bo, DAI Zong-bei, et al. Using Data Mining and Root Cause Analysis Method for Failure Analysis in Electronic Components[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1043(2): 022024.
- [29] 徐鹏博, 吕卫民, 刘陵顺, 等. 热循环与随机振动下焊点可靠性的研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(6): 48-54.
- XU Peng-bo, LYU Wei-min, LIU Ling-shun, et al. Review of Research on Solder Joint Reliability under Thermal Cycling and Random Vibration[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(6): 48-54.
- [30] AN Tong, FANG Chao, QIN Fei, et al. Failure Study of Sn₃₇Pb PBGA Solder Joints Using Temperature Cycling, Random Vibration and Combined Temperature Cycling and Random Vibration Tests[J]. Microelectronics Reliability, 2018, 91: 213-226.
- [31] QI Hai-yu, OSTERMAN M, PECHT M. Modeling of Combined Temperature Cycling and Vibration Loading on PBGA Solder Joints Using an Incremental Damage Superposition Approach[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2008, 31(3): 463-472.
- [32] 赵福斌, 仇原鹰, 贾斐, 等. 热振加载条件下电子封装结构的疲劳寿命分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(2): 54-60.
- ZHAO Fu-bin, QIU Yuan-ying, JIA Fei, et al. Fatigue Lifetime Analysis of the Electronic Packaging Structures under the Combined Thermal Stress and Vibration Loading Conditions[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(2): 54-60.
- [33] 张卫. 考虑多失效机理耦合的电子产品寿命预测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- ZHANG Wei. Research on Life Prediction Method of Electronic Product Combined Multiple-Failure Mechanism[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [34] 王红芳. SMT焊点振动疲劳可靠性理论与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- WANG Hong-fang. Research on the Theory & Experiments of Vibrational Fatigue Reliability for SMT Solder Joints[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2001.
- [35] 李永强, 吕卫民. PBGA封装芯片热环境适应性仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(9): 1892-1899.
- LI Yong-qiang, LYU Wei-min. Simulation Analysis of PBGA Packaged Chips' Thermal Environment Adaptability[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1892-1899.

责任编辑: 刘世忠