作者简介： **文章编号**:1004-2474(2024)02-0149-05 **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2024.02.002

陶瓷介质滤波器焊接工艺技术研究

李亚飞,张钧翀,龚 旭,李医虹,唐盘良,陈彦光,马晋毅
(中国电子科集团公司 第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:针对陶瓷介质滤波器装配焊接过程中出现介质胚体开裂的问题,通过对裂纹特征观察和材料物理性质分析,在金属屏蔽罩装接、印制板焊盘设计和回流焊工艺等方面进行改进。对焊接后的器件进行温度和力学等可靠性试验,产品测试合格率为100%,破坏性物理分析(DPA)剖样观察到介质滤波器不存在开裂或微裂纹的失效隐患。结果表明,该焊接工艺能解决陶瓷介质滤波器的焊接裂纹问题,实现了较高的产品可靠性。

关键词:介质滤波器;焊接裂纹;热应力;可靠性
中图分类号:TN384 **文献标识码**:A

Research on Welding Technology for Ceramic Dielectric Filter

LI Yafei, ZHANG Junchong, GONG Xu, LI Yihong,
TANG Panliang, CHEN Yanguang, MA Jinyi
(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: After observing the crack characteristics and analyzing the physical properties of the materials involved, improvements were implemented to address the issue of dielectric blank cracking during the assembly process of a ceramic dielectric filter. These enhancements comprised installing a metal shielding cover and modifying the design of the printed board pad and reflow soldering process. Reliability tests of the welded device, including temperature and mechanical tests, were conducted, resulting in a product qualification rate of 100%. The analysis of DPA section revealed no risk of failure due to cracking or microcracking in the dielectric filter. The research findings indicate that this welding process effectively resolves the issue of welding cracks with ceramic dielectric filters, thereby achieving high product reliability.

Key words: ceramic dielectric filter; welding crack; thermal stress; reflow soldering; reliability

0 引言

随着5G时代的到来,通信设备使用量剧增,微波滤波器[1-2]使用领域越来越广。陶瓷介质滤波器是一种利用陶瓷材料压电效应制作的滤波器,通过在陶瓷介质胚体表面涂覆银层实现金属化以形成介质谐振器,多个介质谐振器依次连接形成介质滤波器[3-4]。陶瓷介质滤波器具有体积小,抑制高,插入损耗小,承受功率高及温度漂移特性好的特点,广泛应用于卫星通信、电子对抗、雷达系统及计算机等领域[5]。

目前对于陶瓷介质滤波器的研究主要集中在设计原理和指标实现上[6-7],对制作工艺和应用可靠性的研究较少。而陶瓷材料本身具有较大的脆性,在后续安装使用过程中易受外界温度和机械应力的影响,导致银层脱落或胚体开裂等故障发生[8-9],给产品的推广使用带来不利影响。

本文选取的介质滤波器由陶瓷介质本体、印制板和金属屏蔽罩构成,通过对材料物理参数、印制板焊盘设计和回流焊接曲线等方面进行分析和优化,对装配焊接后的器件进行温度和力学试验,破坏性物理分析(DPA)切片介质滤波器的陶瓷体完好无裂纹,为陶瓷介质滤波器的安装使用提供了解决方案。

1 产品介绍

图1为本文研究的陶瓷介质滤波器结构示意图。其由印制电路板、金属屏蔽罩和陶瓷介质本体

收稿日期:2023-12-11
作者简介:李亚飞(1992-),男,河南省商丘市人,工程师,硕士生。

焊接结构组成，由钙镁钛系微波介质陶瓷粉料经压力成型和高温烧结制成，内含多个贯通式的级联谐振腔，其表面涂覆银层进行金属化。屏蔽罩为镀镍可伐合金冲压弯折而成。印制板基材为罗杰斯RO4350B。陶瓷介质本体通过回流焊接方式实现与印制板和屏蔽罩的装配。

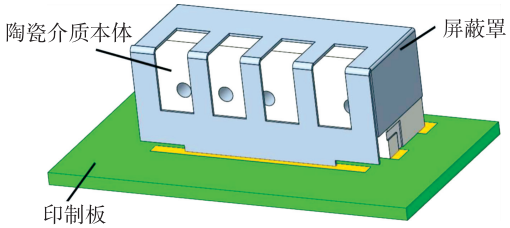


图 1 陶瓷介质滤波器结构示意图

2 工艺设计

本文中，陶瓷介质本体在烧结成型和金属化工序后检验测试合格，但在印制板和金属屏蔽罩装配过程中陶瓷本体有开裂现象，对装配完成的滤波器进行温度和力学实验，有新裂纹萌发或原有裂纹进一步扩展。典型的焊接或试验裂纹形貌如图 2 所示，其中，裂纹 1 萌发于屏蔽罩与介质本体交接处，裂纹 2 出现在输入、输出电极端处。

图 2 典型的裂纹扩展形貌

通过对裂纹萌发走向进行观察，通过印制板的焊盘设计和印刷焊锡膏的锡量与位置分布减缓了陶瓷介质本体、印制板基材和屏蔽罩间的膨胀系数不匹配对介质胚体的应力，通过回流曲线的优化调整保证了焊接过程中介质胚体各处受热的均匀性，解决了屏蔽罩和端电极处的焊接裂纹问题。

2.1 金属屏蔽罩装接

金属屏蔽罩可降低电子设备受外部辐射干扰，同时还可降低模块电路间的相互串扰[10]。对屏蔽罩处有裂纹萌发的介质滤波器进行观察发现，存在裂纹的介质滤波器屏蔽罩与介质本体侧面均有焊锡溢出填充，使屏蔽罩左右侧端与介质本体形成非必需的焊接关系，介质本体侧端揭开屏蔽罩外溢焊锡形貌如图 3 所示。

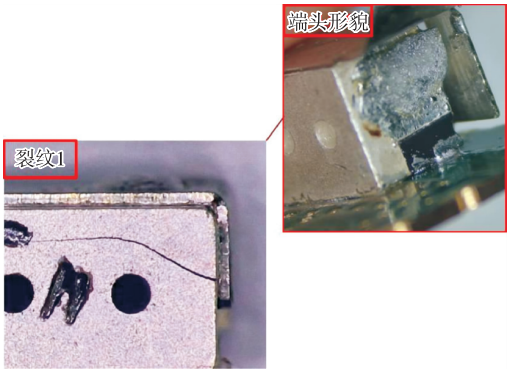


图 3 介质本体侧边形貌

对产品结构进行分析，焊锡的存在会使金属屏蔽罩与介质胚体从原来的顶面接触变成 U 型包裹接触，在介质本体与屏蔽罩端头形成斜向外侧的拉应力，在焊接冷却和温度试验过程中拉裂陶瓷介质本体。故需控制焊接过程中焊锡膏状态，避免焊锡侧边溢出介质本体。

焊接介质滤波器屏蔽罩时，施加焊锡膏的方式由点胶机点涂改为钢网印刷，通过钢网厚度和开孔设计有效控制焊锡膏施加量和分布位置。本文选择的钢网厚度为 0.13 mm，开孔矩形阵列面积占比 70%，如图 4 所示。通过合理的钢网设计，并适当控制屏蔽罩贴装压力，能有效地解决屏蔽罩焊接过程中焊锡侧边溢出问题，避免后续焊接和试验过程中陶瓷介质本体裂纹 1 的产生。

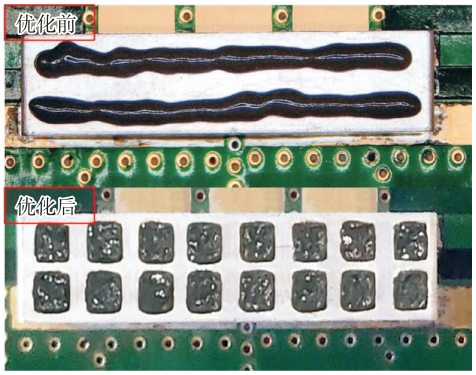


图 4 焊锡膏施加形貌

2.2 印制板焊盘设计

陶瓷介质本体和屏蔽罩通过焊接方式与印制板形成电气连接，所以材料间的热匹配性能在工艺设计中较重要[11]。查阅相关材料手册，陶瓷介质本体、焊锡和印制板基材罗杰斯 RO4350B 的热膨胀系数如表 1 所示。

表 1　材料热膨胀系数

材料名称		热膨胀系数/(10^{-6} · ℃$^{-1}$)
陶瓷介质		8.6
焊锡材料		23
印制板基材	x 方向	10
	y 方向	12
	z 方向	32

与 FR4、RT5580 等常用印制板基材相比,罗杰斯 RO4350B 与陶瓷介质胚体二者的热膨胀系数更接近,但与陶瓷材料在 z 向的热膨胀系数可能有一定的热失配。观察电极端处的裂纹 2 形貌发现,裂纹 2 大多萌生于电极端焊锡与接介质本体交接处,呈斜下方扩展走向,如图 5 所示。由图可看出,在焊接和温度试验过程中,因陶瓷介质材料和印制板基材的热膨胀系数差异较大,致使介质本体受 z 向的拉伸切向应力超过陶瓷材料的承受强度,导致介质本体发生开裂。

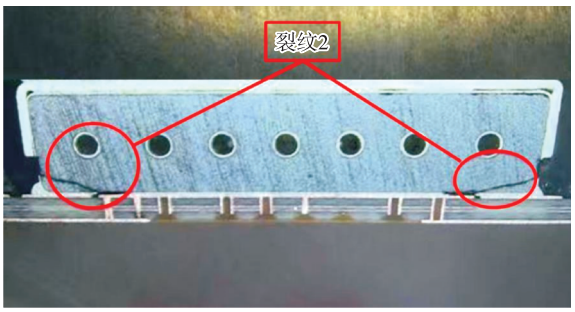
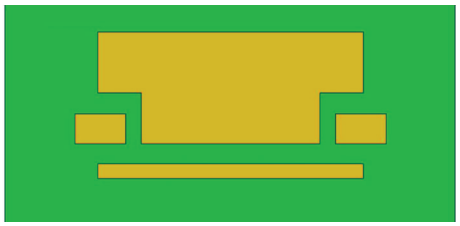


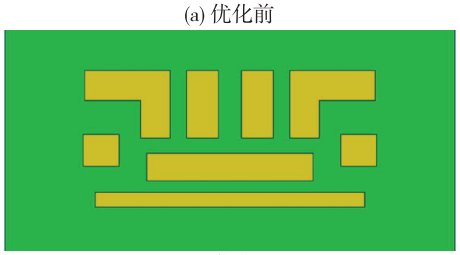
图 5　电极端裂纹形貌

通过上述理论分析,结合介质本体电极端处的焊接情况可以发现,开裂的介质滤波器端电极焊盘相对于端电极均有外延,焊锡在外延焊盘上堆积浸润,与介质滤波器的端电极侧面形成焊接关系,而裂纹 2 多萌生于焊锡与端电极的攀爬交界面。因此,将现有基板端电极适量内缩能减缓印制板基材与陶瓷介质本体在 z 向的热适配现象,避免 z 向热应力拉裂介质本体。

同时,对介质本体的大面积接地焊盘进行适当分割设计,避免与印制板焊盘面积悬殊过大,对于减小介质滤波器输入、输出端电极的 z 向有利。因此,对印制板焊盘进行优化设计,将输入、输出端电极焊盘适量内缩,分隔大面积接电焊盘阻焊,能减小焊接和温度试验过程中介质本体所承受的 z 向应力,如图 6 所示。



(a) 优化前



(b) 优化后

图 6　优化前后焊盘对比

焊料的热膨胀系数介于陶瓷介质本体和罗杰斯 RO4350B 印制板基材的热膨胀系数之间。因此,适当增加焊料厚度可缓冲陶瓷介质本体和印制板基材在温度变化情况下的热适配现象。回流过程中,自重较大的介质胚体会挤压熔融的焊锡膏致使其外溢塌陷,可考虑在介质本体底部或外侧点涂贴片红胶,固化后红胶形成支撑点以保证陶瓷介质本体底部形成足够的焊料垫层厚度。

2.3　回流焊接工艺

回流焊作为表面贴装工艺中的关键工序,其工艺参数设置直接影响印制板(PCB)组件的可靠性[12]。本文采用的回流炉为八温区链式炉,工艺参数(焊接温度、链速等)根据待焊产品的热容、焊锡膏种类及元器件特性等因素进行设置。

一般温度曲线分为预热区、恒温区、回流区和冷却区 4 个温区,根据待焊接产品进行不同设置。预热区、恒温区和回流区的合理设置主要体现在焊料的熔融状态,而冷却区决定了产品焊点形成后的降温情况。降温速率过快会导致陶瓷介质本体和印制板的热适配应力急剧加大,从而导致产品在焊后冷却过程中胚体开裂。同时会产生较大的焊后残余应力,致使温度试验和后续安装使用过程中产品的可靠性降低。因此,合理的回流曲线设计是陶瓷介质滤波器焊接工艺的关键环节。

本文中适当减缓链速、增加焊后冷却时间有助于减少焊接过程中的热应力产生。建议至少预留 3 个温区作为焊接冷却区,通过适当减慢链速和合理

分配前 5 个温区来保证焊锡膏熔融，形成良好的合金焊点。一般要求回流区温度超过焊锡膏熔点（20～50 ℃），停留时间通常为 60～90 s，控制焊接后产品出炉温度低于 120 ℃。

基于上述理论，设置回流温度曲线如图 7 所示，峰值温度为 255 ℃，链速为 50 cm/min。

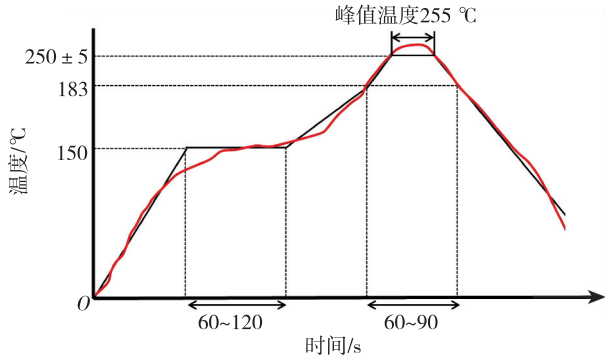


图 7 回流焊接曲线

3 可靠性验证

在完成上述工艺设计方案的基础上，重新选取检验合格的陶瓷介质本体进行印制板和屏蔽罩装配焊接，并开展了可靠性试验验证。

对陶瓷介质滤波器焊接工艺进行固化，采用钢网在介质本体表面和印制板焊盘上进行印刷焊锡膏，将屏蔽罩轻压贴装在陶瓷介质本体顶面上，然后将装有屏蔽罩的介质本体贴装在印制板对应焊盘上。介质本体应保证贴装水平，输入输出端电极与印制板焊盘对准，不能错位。回流过程中，未完成焊接的介质滤波器保持平稳，避免介质本体与印制板发生相对位移，防止输入输出端电极错位及焊锡外溢、不均等情况出现。

3.1 焊锡形貌与分布

焊料的熔融状态直接取决于回流曲线的设置是否合理，而熔化后焊锡的分布决定陶瓷介质滤波器材料间热失陪应力的大小与分布情况，直接影响制成产品的可靠性。因此，装配焊接后陶瓷介质滤波器的焊料形貌分布是本文研究中印刷钢网和回流曲线设计合理的有效依据。

装配焊接后陶瓷介质滤波器的开盖形貌如图 8 所示。由图可看出，介质本体顶面和底部焊锡熔融良好，铺展润湿。金属屏蔽罩撕开过程中，介质本体表面有大量的金属化银层附着撕落，呈现灰黑色形貌，表明屏蔽罩与介质本体的焊接强度较好。介质本体端面无焊料溢出附着，表明钢网印刷可有效控制焊料量及分布。介质本体端电极处无焊锡侧爬，证实印制板焊盘内缩能较好地解决焊锡的 z 轴爬升，减弱了材料间热失配应力对介质胚体带来的损伤。

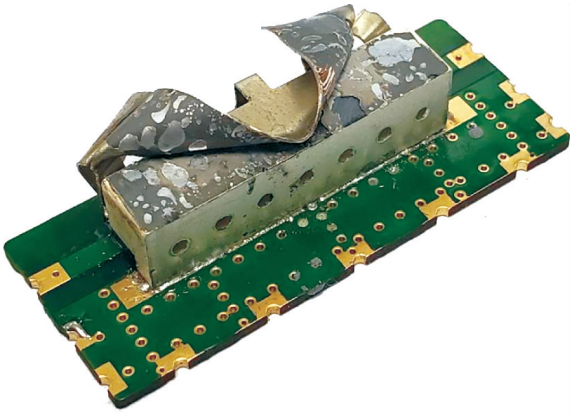


图 8 介质滤波器开盖形貌

3.2 可靠性试验

温度和力学试验可提前暴露产品潜在缺陷，是考察产品可靠性的有效手段[13]。表 2 为产品可靠性试验条件及试验结果。试验前后，基于本文焊接工艺方案制成的陶瓷介质滤波器电指标稳定，测试合格率为 100%，达到了较高的可靠应用评价标准。

表 2 可靠性试验项目

序号	试验项目	技术要求或执行标准	样本数/只	合格率/%
1	高温贮存	按 GJB360B-2009 方法 108，温度：125 ℃±3℃；时间：96 h。	60	100
2	温度冲击	按 GJB 360B-2009 方法 107 试验条件 A：-55^{0}_{-3} ℃～125^{-3}_{0} ℃；循环：50 次。		
3	随机振动	按 GJB 360B-2009 方法 214-I 试验条件 B；x、y、z 方向，每个方向时间：5 min；频率范围：50～12000 Hz。		
4	冲击试验	按 GJB 360B-2009 方法 213 试验条件 A：六向；每方向冲击 3 次。		
5	模拟回流焊	按照 J-STD-020D 标准温度曲线，满足 3 次回流焊器件无损坏。		
6	电性能测试	GJB 150.3A-2009 第 2.2 条、－55 ℃、＋25 ℃和＋85℃电性能指标满足要求。		

3.4　介质胚体剖样

随机抽取 5 只上述试验后的陶瓷介质滤波器,按 GJB4027A《军用电子元器件破坏性物理分析方法》对其进行 DPA 试验,典型金相形貌如图 9 所示。试验后介质滤波器焊点完整,介质本体完好无裂纹,表明优化后工艺方案制成的陶瓷滤波器能耐受严苛的试验条件,无介质本体开裂或微裂纹的失效隐患,可靠性较高。

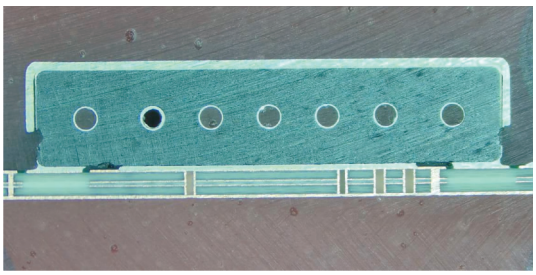


图 9　介质滤波器 DPA 金相

综上所述,本文工艺制成的陶瓷介质滤波器的焊接工艺成熟稳定,生产操作一致性高,能够满足批量生产要求,制成产品具有较高的可靠性,可应用于要求严格的环境中。

4　结束语

本文通过屏蔽罩锡膏印刷、印制板焊盘设计和回流焊工艺等途径完成了陶瓷介质滤波器焊接工艺开发,产品可靠性试验后测试合格率为 100%,DPA 剖样观察到试验后介质滤波器本体不存在开裂或微裂纹的失效隐患。本文工艺方案解决了陶瓷介质滤波器焊接裂纹问题,能够保证较高的产品可靠性,满足于产品的批量化生产需求。

参考文献:

[1]　郭倩. 小型化宽阻带波导滤波器的研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

[2]　张冬英. 新型微波通讯技术的发展及应用[J]. 信息化建设,2016,12(7):281-283.

[3]　贺艺,胡江,徐锐敏. 交叉耦合介质滤波器的设计[C]//上海:2020 年全国微波毫米波会议论文集(下册),2020:881-883.

[4]　蒋洪平,刘光聪,周毅. 介质滤波器银层厚度与附着力对耐焊接热影响[J]. 压电与声光,2015,37(4):717-720.
JIANG Hongping, LIU Guangcong, ZHOU Yi. Influence of the thickness and adhesive force of silver layer on the soldering heat-resistance in the dielectric filter [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37 (4): 717-720.

[5]　谭可,宋涛,沈涛,等. 低介电常数微波介质陶瓷的研究进展[J]. 现代技术陶瓷,2022,43(1):11-29.
TAN Ke, SONG Tao, SHEN Tao, et al. Research progress of low permittivity microwave dielectric ceramics[J]. Advanced Ceramics,2022,43(1):11-29.

[6]　张龙,陈世钗,刘光聪,等. 结构参数对微波介质滤波器电性能的影响[J]. 压电与声光,2011,33(5):742-745.
ZHANG Long, CHEN Shichai, LIU Guangcong, et al. Effect of structure parameters on electric properties of microwave dielectric filter [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2011,33(5):742-745.

[7]　曹良足,高瑞平,殷丽霞. 源与负载感性交叉耦合的小型介质滤波器[J]. 压电与声光,2018,40(4):496-499.
CAO Liangzu,GAO Ruiping,YIN Lixia. Compact dielectric filters with inductive cross-coupling between load and source[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018,40 (4):496-499.

[8]　赵明,刘进,郭亮,等. 某型相位一致性介质滤波器失效分析及对策[J]. 通讯世界,2019,26(7):295-296.

[9]　张艳征. 陶瓷介质滤波器故障分析与解决[J]. 电子质量,2020,403(10):49-52.
ZHANG Yanzheng. Fault analysis and solution of ceramic dielectric filter[J]. Electronics Quality,2020,403 (10):49-52.

[10]　罗显云. 材料电磁屏蔽性能测试技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.

[11]　王杰,万维财,王宗元,等. 陶瓷/金属焊接技术与残余应力研究现状[J]. 工具技术,2022,56(4):3-11.
WANG Jie, WAN Weicai, WANG Zongyuan, et al. Review of metal and welding technology and numerical simulation[J]. Tool Engineering,2022,56(4):3-11.

[12]　张雨婷. 回流焊中 PCB 组件的回流温度分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.

[13]　徐静,李海波,洪亮,等. 可靠性强化试验及在航天产品中的应用研究[J]. 强度与环境,2018,45(6):43-50.
XU Jing, LI Haibo, HONG Liang, et al. Study on reliability enhancement testing and application in aerospace products [J]. Structure & Environment Engineering,2018,45(6):43-50.