

文章编号: 2095-4980(2020)05-0951-05

基于 A-Scan 和 C-Scan 的多层陶瓷结构介质缺陷无损检测

何志刚, 梁栋程, 龚国虎, 王晓敏*

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对多层陶瓷结构(MCS)介质缺陷的超声检测(UT)技术开展了研究。首先, 以多层瓷介电容器(MLCC)结构为例, 通过薄层反射理论计算并证明了 UT 对空洞和分层等介质缺陷检测的适用性和有效性, 即较低的频率对极薄的空隙也有很强的反射信号; 同时, 给出了 C-Scan 检测参数建议, 包括等效焦距、表面波时间、门限和增益。其次, 对 MCS 进行了实际的 UT 检测验证, 表明 50 MHz 是最佳的筛选频率。最后, 给出了 A-Scan 判别缺陷的理论依据和渡越时间定位缺陷纵深定位的方法, 并通过制样检测进行了验证。

关键词: 多层陶瓷结构; 高温共烧陶瓷; 低温共烧陶瓷; 超声检测; A 模式扫描; C 模式扫描
中图分类号: TM277 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2019052

Nondestructive testing of MCS dielectric defect based on A-Scan and C-Scan of Ultrasonic Test

HE Zhigang, LIANG Dongcheng, GONG Guohu, WANG Xiaomin*

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Ultrasonic Test(UT) technology for dielectric defects of Multilayer Ceramic Structure(MCS) is studied. Firstly, UT is proved to be applicable and effective to voids and delamination through thin layer reflections theoretical calculating on Multi-Layer Ceramic Capacitors(MLCC) structure, as low UT frequency can get very strong reflection signal at extremely thin aperture. Simultaneously, suggestion of C-Scan testing parameters including equivalent focal length, surface wave time, data gate and gain is given. Then, the practical UT test of MCS indicates that 50 MHz is the optimum screening frequency. Finally, defect determining and locating is accomplished via A-Scan and transit time respectively, the conclusion is also verified by sectioned UT sample preparation and detection.

Keywords: Multilayer Ceramic Structure; High Temperature Co-fired Ceramic; Low Temperature Co-fired Ceramic; Ultrasonic Test; A-Scan; C-Scan

多层陶瓷结构(MCS)符合电路向小型化、高密度、多功能性、高可靠性、高速度及大功率化的发展要求, 广泛用于军事领域^[1-4]。根据烧结温度 MCS 可分为高温共烧陶瓷(High Temperature Co-fired Ceramics, HTCC)和低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)两类^[5-6]。HTCC 最主要的应用是多层陶瓷电容器(MLCC), 其目前已成为世界上用量最大、发展最快的一种片式元件^[7-8]。LTCC 主要集中在高频通信(如滤波器、巴伦、双工器、天线、天线模块、耦合器、共模扼流圈等)、T/R 组件、卫星控制模块、频率综合器等^[9]。然而, MCS 装配电路后的早期失效时有发生, 由此导致的板级电路缺陷定位和重做是十分困难和昂贵的^[10]。这些短路失效通常与内部介质层击穿有关系, 其根源是器件内部制造过程产生的缺陷或异常导致的介质退化^[11-13]。这些介质缺陷和异常主要是介质空洞和介质分层。

器件级和板级的测试和筛选均无法剔除以上介质层缺陷产品。同时国内 MCS 产品内部缺陷的筛选检测未能普遍开展, 产品批次性缺陷往往通过抽样进行破坏性检测, 如磨片制样。部分 MLCC 生产厂家尽管开展了超声检测, 但仅停留在缺陷有无的检测, 而无法完成缺陷定位和测量。反观美国, 在 MIL-PRF-123(高可靠性(恒温

收稿日期: 2019-02-23; 修回日期: 2019-05-23

作者简介: 何志刚(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电子元器件 DPA 技术研究。email:ZHIGANGHE@139.com

*通信作者: 王晓敏 email:wangxm005@sina.com

通用)陶瓷介质固定电容器通用规范)中规定电容器需 100%开展超声或其他无损检测^[14]。所以研究 MCS 的介质缺陷超声检测(UT)方法是十分有必要的,以避免其早期失效所导致的返修和重做。

以 MLCC 结构为例,从理论上论证 UT 用于多层陶瓷结构检测的可行性;明确了 C-Scan 聚焦深度计算和扫描范围的选取;通过试验比对不同频率探头检测效果得到最佳检测频率;用 A-Scan 完成了缺陷定位和测量;最后通过磨片制样检验了无损检测效果。

1 理论分析

图 1 为 MLCC 内部结构示意图,其中介质层多为钛酸钡(BaTiO₃)基铁电陶瓷,厚度约为 20~50 μm;内电极为 Ag/Pd 或 Ni,Cu,厚度小于 2 μm。现代 MLCC 介质层通常有数百层,介质层印刷内电极后叠压经高温烧结致密结构。

UT 由特定的声学组件发射和接收超声脉冲、声波,与被测样品作用后,反射波被接收并转换为图像信号。要实现超声检测必须保证声波能完全穿透样品,但声波在两种物质的界面会同时发生反射和透射,MLCC 的多层结构必定对声波进行多次反射。图 2 为 MLCC 介质中内电极薄层的声波反射和透射示意图,其中 $Z_1=Z_3 \neq Z_2$ 为材料的声阻抗, P_0 为入射声压, P_r 为反射声压, P_t 为透射声压, d 为薄层厚度。这时超声在薄层介质两侧界面多次反射和透射,其声压发射率见式(1)^[15]。

$$r = \frac{\frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2 f}{c_2}}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2 f}{c_2}} \quad (1)$$

式中: d_2 为薄层厚度; c_2 为薄层材料中声波速度; f 为声波频率; m 为两种介质声阻抗之比, $m=Z_1/Z_2$ 。

实际的 MLCC 结构,介质层为 BaTiO₃,声阻 $Z_1=Z_3=2.41 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,薄层可以是银钯合金(无缺陷),也可以是空气(缺陷),声阻分别为 $3.98 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.0004 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 3 为 MLCC 结构银钯电极和气体薄层的反射率,图 3(a)为银钯电极薄层,图 3(b)为空气薄层。图 3(a)显示,当超声频率 $f=50 \text{ MHz}$,内电极厚度 $d_2=2 \text{ μm}$ 时,声波反射率约为 8.19%,声波几乎全透射,表明超声检测对内电极不敏感;图 3(b)显示,超声频率 $f=1 \text{ MHz}$,气隙 $d_2=0.01 \text{ μm}$ 时,声波反射率约为 97.84%,几乎为全反射,且随着频率增加其反射率会随之增加,表明超声对气体薄层灵敏度很高。

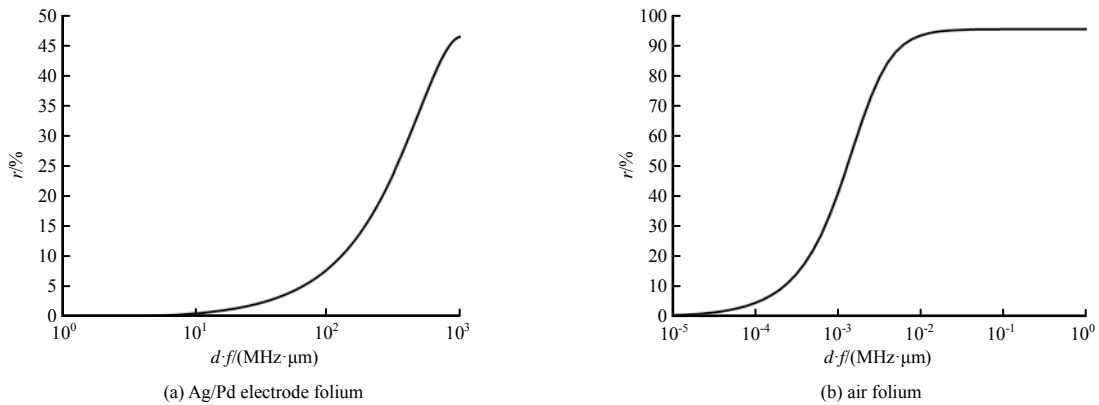


Fig.3 Ultrasound pressure reflection rate of Ag-Pd inner conductor, air delamination in MLCC dielectric
图 3 MLCC 介质中内银钯电极、气隙声压反射率

通过以上分析,可以得出两个结论:第一,超声在内电极中几乎全透射,MCS 的多层结构不对检测造成影响;第二,若器件内部出现空气层(分层或空洞),超声的检测灵敏度很高,且随着超声频率增加灵敏度也随之增加。综上所述,超声用于 MCS 器件检测完全具备理论依据。

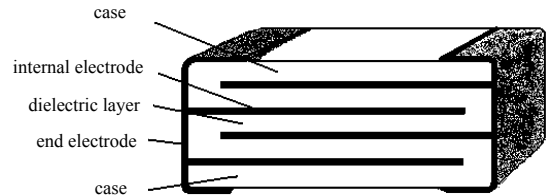


Fig.1 Inner structure schematic of MLCC
图 1 MLCC 内部结构示意图

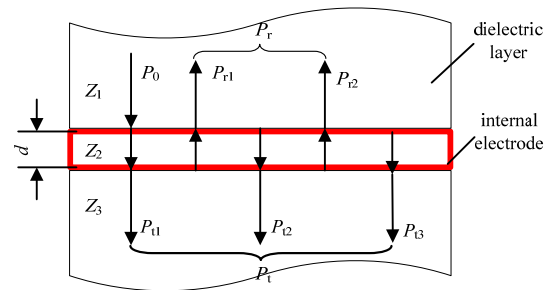


Fig.2 Reflection & transmission in thin layer of MLCC dielectric
图 2 MLCC 介质中内电极薄层的声波反射和透射

2 试验验证

2.1 试验设备及被测样品

采用德国 PVA 的 UT300 型超声显微镜对 MLCC 进行超声检测, C-Scan 需要完成等效焦距、水程等检测参数的计算, 以及对比不同频率探头的检测效果以选择最优检测频率; 通过 A-Scan 完成缺陷深度定位及测量。再采用法国 PRESI 的 MECATECH 234 自动研磨抛光机进行样品剖面制备, 验证检测及定位是否有效。被测样品为某型 MLCC 电容, 外观形貌如图 4 所示。

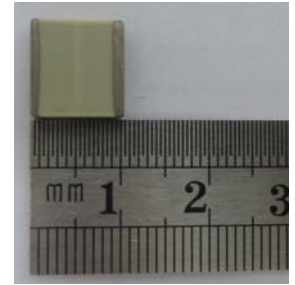


Fig.4 Appearance of test sample
图 4 待检样品外观形貌

2.2 检测参数

声波由一种物质进入另一种物质会发生折射, 并符合斯涅尔定律, 所以通过探头在水中的焦距可以算出声波在被测件中的等效焦距, 见式(2)。

$$W_p = F - MD \left(\frac{C_{tm}}{C_w} \right) \quad (2)$$

式中: W_p 为水程, 即超声探头与被测件之间的距离; MD 为声波在材料中的聚焦深度; F 为探头在水中的焦距; C_{tm} 和 C_w 分别为被测材料和水中的声速。检测时焦距应落在样品纵向深度的中点上, 即 $MD=(1/2)d=2.06 \text{ mm}$ 。各频率探头水程及表面波如表 1 所示。门限约 2 000 ns, 保证扫描覆盖整个器件深度; 增益应大于 20 dB。检测时只需将探头表面波调节到表 1 所示的位置, 用合适的增益进行 C-Scan 就能得到样品的声学形貌图。

表 1 不同频率探头的检测参数

serial	f/MHz	probe focus/mm	water path/mm	first echo time/ns
1	15	19.0	13.5	18 000
2	30	12.7	7.2	9 600
3	50	10.0	4.5	6 000
4	100	8.0	2.5	3 333

表 2 不同频率的理论分辨率

serial	f/MHz	theoretical resolution/ μm	penetration depth/mm
1	15	133	5.1
2	30	67	3.4
3	50	40	3.0
4	100	20	2.2

3 结果与讨论

3.1 最佳检测频率

C-Scan 中频率是极其关键的参数, 理论上超声频率越高, 分辨力越高, 但穿透深度越小。分辨力表征缺陷最小检测尺寸, 而穿透深度则表征检测样品厚度。表 2 为各频率理论分辨力以及各频率探头相对钢材料的穿透深度。可见 50 MHz 分辨力约为 30 MHz 的 1.7 倍, 而 100 MHz 分辨力约为 30 MHz 的 3.3 倍; 而穿透深度则随着频率增加而减小。

10 MHz,30 MHz,50 MHz 和 100 MHz 对同一样品的 C-Scan 扫描结果如图 5 所示, 其中图 5(c)方框中白色区域为介质分层缺陷。图 5(a)和图 5(b)分辨力明显较低, 导致某些小尺寸缺陷未被检测到, 如图 5(c)中的空洞缺陷。而图 5(d)画面暗黑, 是回波声压过低的表现, 说明声波被材料吸收和散射严重, 难以保证声波在整个样品纵向完成检测。而图 5(c)即有合适的分辨力, 画面整体明亮(穿透深度合适), 综合考虑 50 MHz 分辨力和穿透深度均是最优, 故 50 MHz 为最佳 UT 筛选频率。

3.2 缺陷判别及定位

空洞及分层缺陷是介质被空气填充形成的, 此处的声压反射率 $r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \approx -1$, Z_1 和 Z_2 分别为介质和空气的声阻抗。表面空气在介质中几乎全反射, 且相位发生反转(正弦波变为余弦), 这两个特征是作为判别缺陷的重要依据。图 6 为图 5(c)中十字所指位置的 A-Scan 结果, 方框中的波为缺陷的回波波形。该回波为明显的余弦且幅度很高。所以图 5(c)中方框内白色条状为介质分层缺陷形貌。

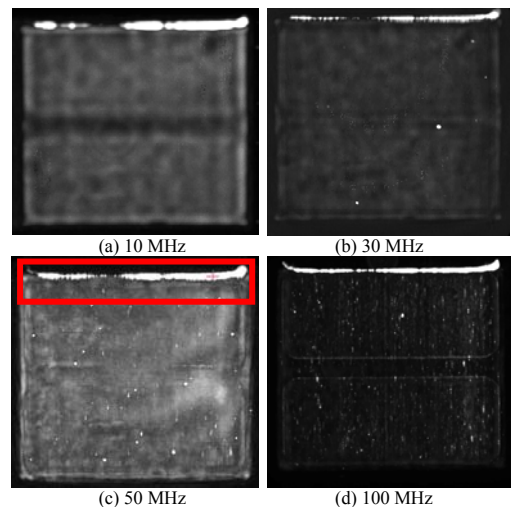


Fig.5 C-Scan results of series frequently probe
图 5 各频率探头 C-Scan 结果

所以图 5(c)中方框内白色条状为介质分层缺陷形貌。

声波从探头发射进入耦合介质水中,遇到样品表面发生第一次反射,反射波沿耦合介质传播并被接收器接收并显示出来。入射波在样品表面亦发生入射并进入样品内部,声波在样品内部传播,当遇到缺陷时发生第二次反射,第二次反射波通过样品及耦合介质到达接收器被接收并被显示出来。可以看出第一次反射波和第二次反射波之间存在时间差。这个时间差叫做渡越时间 t_{tr} , $t_{tr}=t_2-t_1$, t_1 和 t_2 分别为表面波和缺陷回波时间,如图 6 所示。则缺陷距样品表面的深度计算公式如下:

$$d_d = C_{um} t_{tr} / 2 \quad (3)$$

由式(3)可计算出图 5 中缺陷距样品表面的深度 d_d 约为 1.2 mm。缺陷大小的定量测试可通过设备自带测量功能实现。其原理是根据扫描范围与扫描范围内的像素点之间对应关系计算得出。

3.3 验证

将样品沿 X 轴方向制样,其目检结果如图 7 所示。方框内为介质分层缺陷,与图 5 检测结果一致,缺陷与样品表面的距离约为 1.3 mm,与理论计算相差 0.1 mm。这是由于制样过程中样品会在不同程度上偏离中轴线导致检测面不是垂直面,从而导致制样的量测值偏大。所以声学显微镜检测可以有效地检测出介质分层和空洞缺陷,同时也能较为精确地完成缺陷的定位测量。

4 结论

- 1) 通过薄层反射理论证明了 UT 检测对 MCS 多层结构的适用性:即声波在 MCS 内电极层薄层几乎全部透射,保障了超声有足够的穿透深度;另一方面声波对介质中的空气间隙则十分灵敏,即使是超声频率为 1 MHz 的情况下,0.01 μm 的气隙也能形成很强的回波信号;
- 2) 通过理论计算得到 C-Scan 的最佳检测参数:包括表面波时间、门限和增益。根据斯涅尔定律计算出探头的等效焦距,由此得出水程和表面波时间,根据被测件厚度计算出门限,同时给出了建议的增益区间;
- 3) 通过试验比对和理论计算得到了 MCS 的最佳检测频率为 50 MHz;
- 4) 给出了 A-Scan 判别缺陷的理论依据,并通过渡越时间检测给出了缺陷纵深方向定位的计算方法;
- 5) 通过制样方式验证了检测和定位是有效的。

参考文献:

- [1] 余芬芬. 高温共烧陶瓷(HTGC)用丝网印刷浆料的制备工艺与特性研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2014. (YU Fenfen. Study on preparation and characterization of High-Temperature Co-fired Ceramic(HTCC) screen printing paste[D]. Wuhan, China: Central China Normal University, 2014.)
- [2] 沈磊, 鲍恒伟. 多层瓷介电容器在混合集成电路中的应用可靠性研究[J]. 混合微电子技术, 2015, 26(2): 62-64. (SHEN Lei, BAO Hengwei. Reliability research on multilayer ceramic capacitors applied in hybrid integrated circuit[J]. Hybrid Microelectronics Technology, 2015, 26(2): 62-64.)
- [3] 杨邦朝, 胡永达. LTCC 技术的现状和发展[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(11): 3-7. (YANG Bangchao, HU Yongda. Overview on LTCC technology and its development[J]. Electronic Components & Materials, 2014, 33(11): 3-7.)
- [4] 汪庆, 黄振卫, 杜涛. CT47 型脉冲功率高压陶瓷电容器性能[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(3): 457-460. (WANG Qing, HUANG Zhenwei, DU Tao. Performance of CT47 type pulse power high-voltage ceramic capacitor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(3): 457-460.)
- [5] 余雷, 揭海, 王安劳. 基于高温共烧陶瓷基板的三维互连技术[J]. 电子科技, 2013, 26(7): 157-159, 163. (YU Lei, JIE Hai, WANG Anlao. Three-dimensional interconnection technology based on high temperature co-fired ceramics substrate[J].

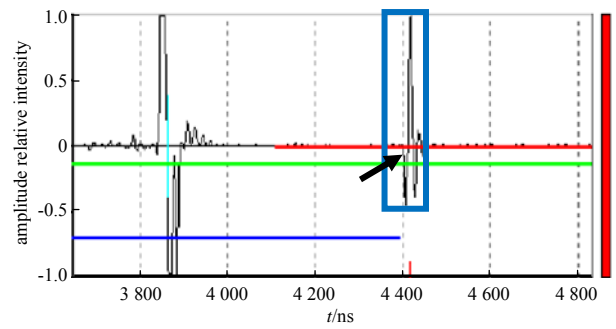


Fig.6 A-Scan results of dielectric delamination defect
图 6 介质分层缺陷的 A-Scan 结果

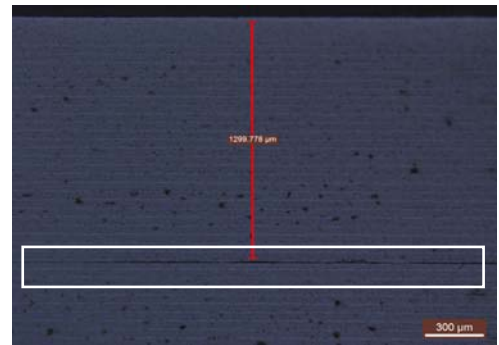


Fig.7 Dielectric delamination morphology and depth of sample
图 7 样品介质分层形貌及深度

Electronic Science & Technology, 2013,26(7):157-159,163.)

- [6] 王瑞庭. 低温共烧陶瓷技术的现状和走向[J]. 真空电子技术, 2015(5):6-10. (WANG Ruiting. Present situation and developing trends of low temperature co-fired ceramic technology[J]. Vacuum Electronics, 2015(5):6-10.)
- [7] KISHI H, MIZUNO Y, CHAZONO H. Base-metal electrode-multilayer ceramic capacitors: past, present and future perspectives[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003(42):1-15.
- [8] 邓湘云, 李建保, 王晓慧, 等. MLCC 的发展趋势及在军用电子设备中的应用[J]. 电子元件与材料, 2006,5(5):1-6. (DENG Xiangyun, LI Jianbao, WANG Xiaohui, et al. Development tendency of MLCC and its application in high technology military electronic equipment[J]. Electronic Components & Materials, 2006,5(5):1-6.)
- [9] 纪建华, 郭敏, 许明, 等. C 波段 LTCC 高频前端模块的研究与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):72-75. (JI Jianhua, GUO Min, XU Ming, et al. Development and implementation of C band front-end module based on Low Temperature Co-fired Ceramic technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):72-75.)
- [10] KOSTIC A D, SCHWARTZ S W. Optimized acoustic microscopy screening for multilayer ceramic capacitors[C]// 2011 Proceedings—Annual Reliability and Maintainability Symposium. Lake Buena Vista, FL, USA: IEEE, 2011.
- [11] 张尹, 赖永雄, 肖培义, 等. MLCC 制造中产生内部开裂的研究[J]. 电子元件与材料, 2005,24(5):52-54. (ZHANG Yin, LAI Yongxiong, XIAO Peiyi, et al. Study on the inner crack of MLCC caused in MLCC manufacturing process[J]. Electronic Components & Materials, 2005,24(5):52-54.)
- [12] 李世岚, 包生祥, 彭晶, 等. 导致 MLCC 失效的常见微观机理[J]. 电子元件与材料, 2007,26(5):58-61. (LI Shilan, BAO Shengxiang, PENG Jing, et al. Microcosmic mechanism of causing failure of MLCC[J]. Electronic Components & Materials, 2007,26(5):58-61.)
- [13] JIANG Wei, HU Yongda, BAO Shengxiang, et al. Analysis on the causes of decline of MLCC insulation resistance[C]// 2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Changsha, China: IEEE, 2015.
- [14] Department of Defense. General specification for capacitors, fixed, ceramic dielectric (Temperature Stable and General Purpose), high reliability: MIL-PRF-123D[S]. 2006-03-17.
- [15] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2012:36-37. (ZHENG Hui, LIN Shuqing. Ultrasonics for testing[M]. 2nd ed. Beijing: China Labor Social Security Publishing House, 2012:36-37.)