

叠层片式电感器过载电流下热应力对开路的影响

李秀山^{1,2}, 施威², 阮天新², 朱建华², 陆松杰², 张岩¹

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东深圳 518055;

2. 深圳振华富电子有限公司, 广东深圳 518109)

摘要: 为了降低叠层片式电感器(MLCI)在过载电流下的开路失效几率, 提高MLCI的可靠性, 研究了MLCI过载电流条件下热应力对内电极开路的影响。将同等型号的MLCI样品分为三组, 分别放置于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三种不同温度的环境中, 通过调节电流, 使得内电极电阻都达到 $0.57\ \Omega$ 且能够稳定 5 min , 电阻与温度的关系表明内电极温度相同, 环境温度不同, 热应力不同。保持加载电流的大小, 直到电感器发生开路。实验结果显示: 低温环境中的MLCI比高温环境中开路时间短, 是因为MLCI粗细不均匀的内电极在热应力的作用下, 电极较细部位发生形变, 致使电阻增大, 焦耳热增多, 温度升高, 温度达到熔点后, 电极开路。

关键词: 叠层片式电感器(MLCI); 过载电流; 热应力; 内电极; 温度; 开路

中图分类号: TM55

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0022-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.006

Influence of thermal stress on the open circuit of multilayer chip inductor (MLCI) under overload current

LI Xiu-shan^{1,2}, SHI Wei², RUAN Tian-xin², ZHU Jian-hua², LU Song-jie², ZHANG Yan¹

1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Zhenhua Fu Electronics Co, Ltd, Shenzhen 518109, China

Abstract: In order to reduce the failure rate of open circuit of multilayer chip inductor (MLCI) under overload current and improve the reliability of MLCI, we investigated the influence of thermal stress on the open circuit property of the inner electrode under the overload current condition. The MLCIs were divided into three groups, which were placed in $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ environment. The resistance of inner electrodes in the three groups of MLCIs reached $0.57\ \Omega$ and kept for 5 minutes via adjusting the injected current. The relationship of the resistance value and the temperature indicates that the inner electrode suffered from varies thermal stress under same inner electrode temperature and different environment temperature. Keep the injection current till the inductor opens. The results show that the open time of MLCI in low environment temperature is shorter than the one in high environment temperature. The difference of open circuit time in different environment results from the thick and thin irregularity of the MLCI inner electrodes under thermal stress condition. The thinner part of the inner electrode was easier to be deformed and suffered from higher resistance value and increased joule heat. Eventually, the temperature of the inner electrode was heated up to the melting point of electrode and further caused the open circuit of MLCI.

Key words: multilayer chip inductor (MLCI); overload current; thermal stress; inner electrode; temperature; open circuit

1 引言

叠层片式电感器(MLCI)具有可靠性高、体积小、适宜于高密度表面贴装、磁路屏蔽及元器件之间无相互干扰的优点, 广泛应用于电子电路中, 起到抑制和吸收高频电磁信号的作用, 达到抗电磁干扰的

目的^[1-5]。叠层片式电感器是电子设备中的基板元器件之一, 广泛应用于电路中, 其高可靠性是保证电路稳定工作的必备条件^[6-8]。电感器的失效模式包括参数漂移、功能失效、开路、短路等^[9-11]。

MLCI的工作电流超过额定电流时, 容易造成电感器烧焦甚至燃烧, 使其发生开路失效。导致MLCI

收稿日期: 2018-11-01 修回日期: 2019-05-21

通讯作者: 李秀山 E-mail: jinglexiushan@163.com

失效的原因是内电极在过流时产生的焦耳热积累导致 MLCI 温度升高,当温度超过内电极熔点后,引起 MLCI 的陶瓷体或电极烧毁,因此,MLCI 在注入相同电流的过载条件下,环境温度越高,内电极温度越高,越容易开路^[12-13],但是环境温度不同,内电极和 MLCI 瓷体的热膨胀不同,两者之间会产生一定的热应力,关于热应力对电感器开路的影响至今未见相关研究。

为了研究过载条件下热应力对 MLCI 开路的影响,将同等型号的 MLCI 分为三组,放置于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三种不同温度的环境中注入电流。通过考察电阻与温度的关系,以电阻为参考量,调节注入电流使得三种环境下的内电极电阻相等,实现三组 MLCI 的内电极温度相等,通过对比 MLCI 的开路时间及开路后电感器的内电极形貌研究热应力对 MLCI 的开路影响。

2 MLCI 结构及实验方法

MLCI 的基本结构如图 1 所示,由交互叠加的陶瓷生瓷带包裹金属浆料在高温下共烧形成陶瓷包裹金属线圈结构^[14],端头外接电极,端头电极从内到外由烧结的银层、电镀的镍层、锡铅层构成三层结构,最终构成端面可焊、结构稳定的独石结构。

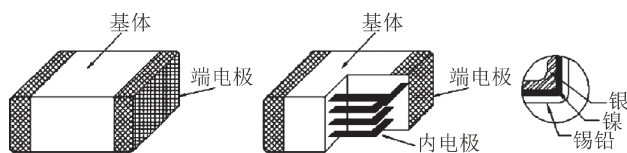


图 1 MLCI 基本结构

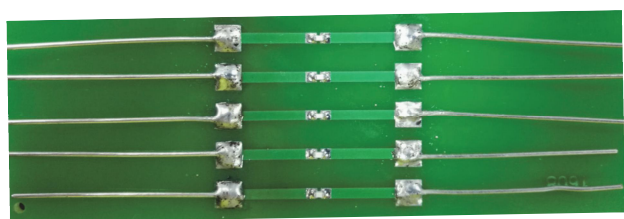


图 2 回流焊后的 MLCI 电路板图

选取 15 只容差较小的型号为 MLCH2B2012H22N 的 MLCI,分成三组(分别记为 A 组、B 组和 C 组),任意选取其中一组(如 A 组)采用阻抗分析仪测试 MLCI 的 Q 值、 L 值、自谐频率,将测试完毕后的 MLCI 通过回流焊的方式焊接在 PCB 电路试验基板表面,如图 2 所示。通过引线分别连接到欧姆表上,由于引线的电阻值很小,测试

得到的电阻值对 MLCI 电阻值引入的误差忽略不计。由于样品的选取具有随机性,因此,A 组的结果代表了另外两组样品在常温下的测试结果。将 A 组电感器通过引线连接电压表和电流表,放置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室温环境中,为了增大 MLCI 内电极与瓷体之间的热应力,增大注入电流,但是要避免 MLCI 突然烧毁,以至于对数据记录结果造成较大的误差。将 MLCI 的电阻值维持在一定值时进行记录,作为 B 组 MLCI 和 C 组 MLCI 电阻值的参考值。将 B 组和 C 组 MLCI 分别放置于室温 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温箱和 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温箱中,以 A 组 MLCI 的电阻值为参考值,调节注入电流,使得电阻值和 A 组的电阻值相同,观察电感器的开路时间及开路后电感器的内电极变化。

采用安捷伦型号为 4991 阻抗分析仪连接测试夹具两端,测试系统校准后,将样品放置于测试夹具,通过读取阻抗分析仪的参数,得到测试频率为 100 MHz 时样品的 Q 值、 L 值、自谐频率。

3 实验结果及分析

室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下,MLCI 样品的电感值 L 、直流电阻、 Q 值、自谐频率测量值如表 1 所示,表明其偏差分布在 5% 以内,具有较好的一致性。

表 1 MLCI 电性参数测试结果

序号	直流电阻/ Ω	自谐频率/GHz	L /nH	Q
1	0.23	2.701	21.91	13.75
2	0.22	2.703	22.201	13.82
3	0.23	2.757	21.742	14.04
4	0.23	2.667	21.962	13.89
5	0.23	2.707	21.981	13.78
平均	0.228	2.707	21.9592	13.856

将 A 组的电感器样品放置于室温下,逐渐增大施加电流,加快 MLCI 失效,测试得到电感器两端的电压、电阻的平均值随电流的变化如图 3 所示,当内电极电阻达到 $0.57\text{ }\Omega$ 时,内电极温度升高,电感器表面出现烧灼现象,如图 4 所示,选取 $0.57\text{ }\Omega$ 作为内电阻的参考值,微调 MLCI 的注入电流,保持其内电极电阻不变直到 MLCI 发生开路。A 组样品的电阻值保持 $0.57\text{ }\Omega$ 时间平均为 60 min 后,电感器两端电压瞬间增大,电感器表面烧红,发生开路。可能是因为器件的电极在热应力的作用下,电阻电极发生形变,局部电极在热应力的作用下线宽逐渐变细,电阻增大,但是电极发生形变的部位长度较

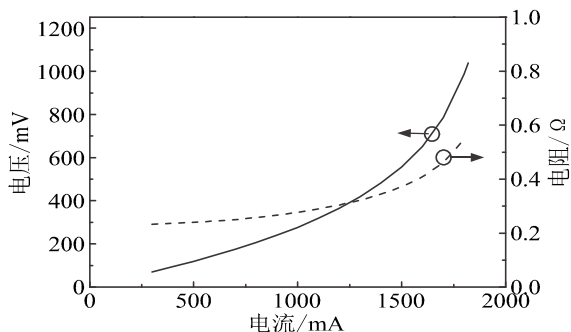


图 3 常温下电感器电压、电阻平均值随电流的变化

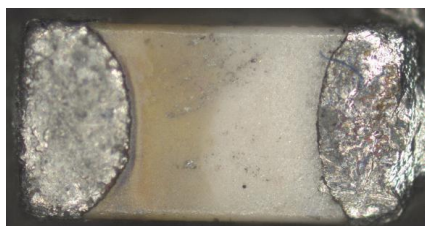


图 4 电感器表面烧灼

短，线宽的形变对电阻的影响较小。当电极在形变发生到一定值时，温度接近电极的熔点，电极形变速率急剧增大，电阻表现为急剧增大，电压瞬间增大，温度瞬间增高，表面发生烧红现象，在电阻达到熔点后，电阻熔断，发生开路。

按照 A 组的测试方法，将 B 组和 C 组样品分别放置于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高低温箱中，测试得到其两端的电压、电阻的平均值随电流的变化如图 5 所示，在电阻为 $0.57\text{ }\Omega$ 时，B 组和 C 组样品表面都出现同 A 组类似的表面烧灼现象(图 4)。持续平均时间 38 min 后，B 组样品发生开路，持续平均时间 80 min 后，C 组样品发生开路。

三组样品实验测试的环境温度不同，电感器的电流电压电阻曲线也不同，图 3、图 5 的测试结果有共同点，即随着电流的增大，电阻也逐渐增大，是因为注入电流时电感器的内电极产生焦耳热，内电极温度升高，电极的电阻率随温度的升高而增大，导致内电极电阻增大。图 3、图 5 显示，对于样品注入电流相同时，环境温度越高，其电阻越大，是因为相同电流下，环境温度越高，器件内电极温度和环境温度温度差越小，散热性越差，导致内电极温度越高，电阻越大。

$120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下的样品在 1.525 A 时内电极电阻达到 $0.57\text{ }\Omega$ ，而 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下的内电极在 2.040 A 达到 $0.57\text{ }\Omega$ 。高温环境下电阻增速比低温环境下的高，是因为环境温度高的样品内电极和外表

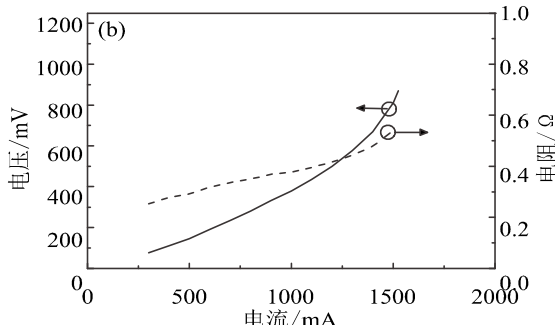
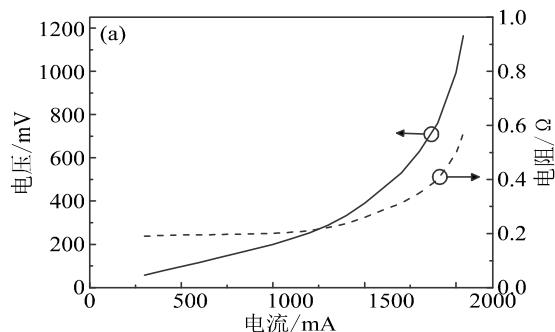


图 5 不同环境温度样品电压、电阻平均值随电流的变化：(a) $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，(b) $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

面的温度差小，电极的散热速率低，导致电极温度升高速率增大，电极的电阻率增速快，因此， $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下内电极电阻达到 $0.57\text{ }\Omega$ 时所对应的电流低。

电阻值的大小只与温度有关，不受环境温度的影响，器件的内电极电阻相同时，内电极温度相同。高温环境中的样品比低温环境中的开路所用时间长，是因为内电极与瓷体之间具有温度差，温度差越大，热应力越大，电极发生形变的速率也越大，电极形变后线宽较窄的部位进一步加速了温度的升高，导致热应力增大，电极形变速率增大。在电极温度和形变之间形成正向反馈，最终导致电极发生开路。

将开路前的电感器样品用 X 射线观察其内部结构，结果如图 6 所示，电极形状不同是因为在进行 X 光照射时样品观察角度不同，其电极呈现不同的成像。红圈处样品内电极发生开路。将失效样品磨抛后露出烧灼部位，并在 50 倍的金相显微镜下观察样品内部状态，发现内部局部地方出现明显的发黄现象，如图 7 所示，可以清晰地看到发黄区域的电极线厚度比相邻电极要薄，部分内电极已经融化消失。表明在热应力作用下，局部电极尺寸变小，导致电极电阻增大，温度升高，当温度超过电极的熔点时，金属电极融化断开，形成开路，过高的电极温

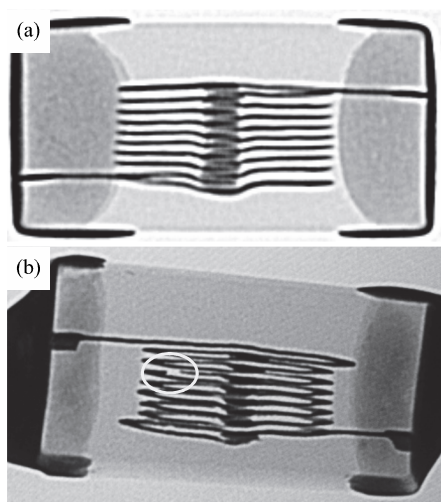


图 6 样品内部结构：(a) 试验前，(b) 试验后

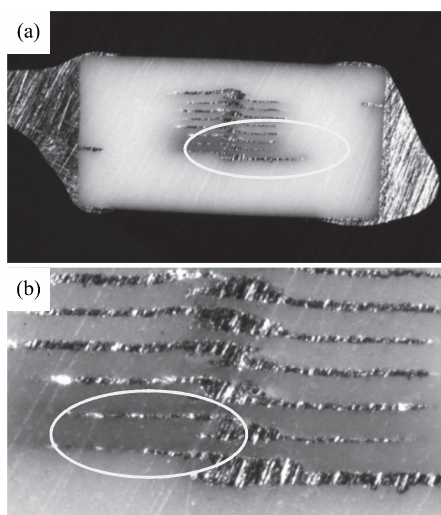


图 7 失效样品磨片内部的金相照片：(a)整体情况，(b)局部放大

度会导致瓷体的晶体结构发生变化，呈现烧灼发黄的现象。受测试设备的制约，未测试电感器内部的温度分布和开路过程，仿真和测试电感器内部温度的变化是下一阶段的研究重点。

4 结论

研究了过载电流条件不同环境温度下热应力对MLCI开路的影响，发现内电极和环境温度之间的温

度差越大，MLCI越容易开路，表明电极和瓷体之间的热应力是电极开路的一个重要原因。对开路后的MLCI的内电极进行的X射线观察和磨片分析，进一步证实热应力越大，内电极越容易开路。

参考文献：

- [1] 周京华, 龚绍文 译. 变压器与电感器设计手册(第四册) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 苏宏, 杨邦朝, 杜晓松, 等. 叠层式 LTCC 低通滤波器设计 [J]. 电子元件与材料, 2006, 25(7): 72-74.
- [3] 胡春元, 蒋胜勇. Maxwell 有限元仿真分析在差共模电感一体化磁心设计中的应用[J]. 磁性材料及器件, 2017, 48(5): 53-55.
- [4] Topfer J, Murbe J, Angermann A, et al. Soft ferrite materials for multilayer inductors [J]. Int J Appl Ceram Technol, 2006, 3(6): 455-462.
- [5] Tsay C Y, Liu K S, Lin T F, et al. Microwave sintering of NiCuZn ferrites and multilayer chip inductors [J]. J Magn Mater, 2000, 209(1/2/3): 189-192.
- [6] 韩志全. LTCC 铁氧体叠层片式器件及材料的国内外发展动态[J]. 磁性材料及器件, 2009, 40(6): 1-11.
- [7] 张晓涛, 张怀武, 杜昌雷, 等. 电感和电容传感器在磁悬浮陀螺检测中的应用[J]. 磁性材料及器件, 2011, 42(3): 60-63.
- [8] 周平章, 刘凯, 陈学平. 宽带电源滤波器设计及可靠性改进[J]. 磁性材料及器件, 2018, 49(1): 55-57+63.
- [9] 韩志全. 叠层片式电感器中的内应力来源及其缓解措施 [J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(1): 11-13.
- [10] 刘燕芳, 郭海波, 潘启智, 等. 多层陶瓷电容器的失效分析[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(11): 72-74.
- [11] 丁晓鸿, 樊应县, 施威, 等. 引出结构对片式电感器可靠性影响的研究[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(2): 61-63.
- [12] 韩志全. 叠层片式电感及低温烧结铁氧体的研发进展[J]. 磁性材料及器件, 2004, 35(6): 6-10.
- [13] 曹恩荣. 片式电感器制造工艺发展评述[J]. 磁性材料及器件, 2000, 31(2): 32-39+57.
- [14] 陈晖, 李红兵, 季幼章. 片式电感器的技术发展趋势[J]. 电源世界, 2012, (11): 113-117

作者简介：李秀山(1986-), 男, 山西静乐人, 博士, 研究方向为电子元器件。