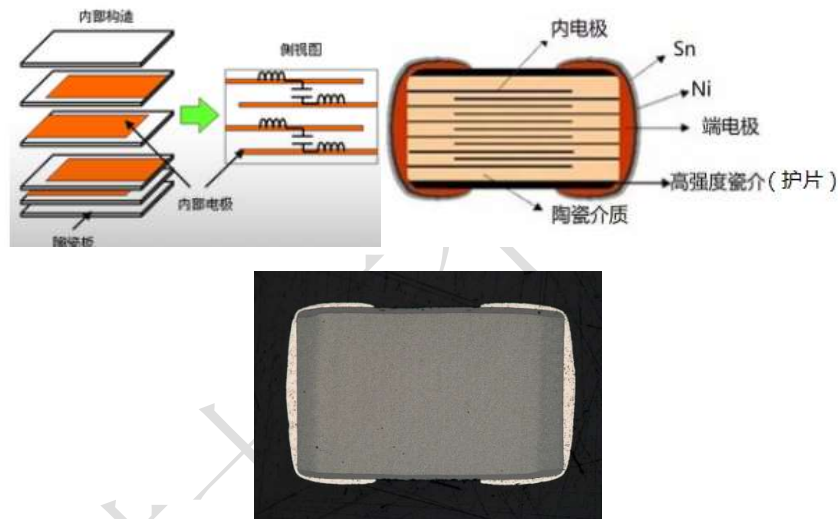


# 1 MLCC 电应力击穿机理研究

## 1.1 MLCC 结构简介

片式多层陶瓷电容器的结构主要包括三大部分:陶瓷介质,金属内电极,金属外电极。在其内部,金属电极层与陶瓷介质层交替堆叠;金属内电极一端与外电极相连的话,则另一端必定被埋在陶瓷介质内不与另一侧外电极相连;每两个相邻的金属内电极与其中间的陶瓷介质一起,构成了多个并联平板电容器。这种巧妙的结构设计特别适宜于连续的自动化生产,并能够显著提高单位体积的电容量。但也正是由于这种结构,造成了在 MLCC 内部的边缘电场发生畸变,同时也使内部的金属电极之间电流分布不均匀。如果在 MLCC 内部无材料和加工方面的缺陷,则 MLCC 的击穿容易发生在这些部位上,造成 MLCC 的失效。片式多层陶瓷电容器原理图、结构示意图和实物切片图如下图所示。



## 1.2 MLCC 击穿类型

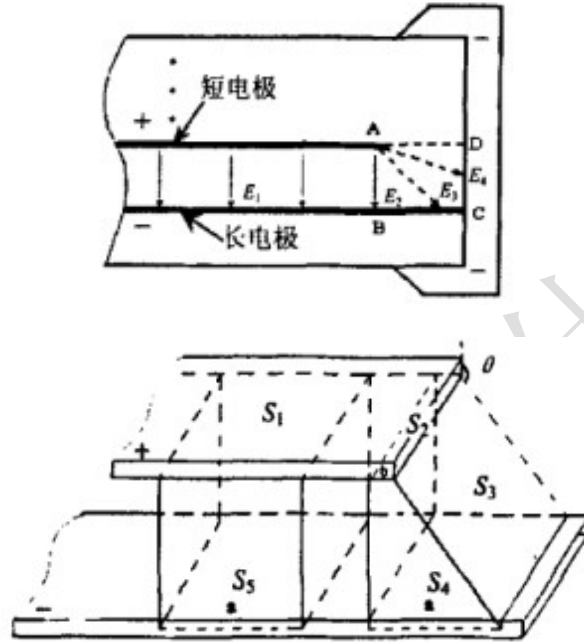
对 MLCC 来说,主要有两种击穿失效模式:一种是电压击穿,或者称为电击穿;另一种是电流击穿,属于热击穿。这两种击穿规律不同,物理过程也不同,存在着较大的差异。另外还有一些其他类型的击穿,如电应力击穿等,电应力击穿一般发生在介质层很薄、大容量的 MLCC 中,击穿机理同电压击穿。

本次失效模式为电压击穿,对电压击穿机理详细展开进行分析:

电容器在电场作用下,瞬时发生的击穿为电压击穿。其机理是电容器介质中的自由电子在强电场作用下,碰撞中性分子,使之电离产生正离子和新的自由电子,这种电离过程的急剧进行,形成雪崩式的电子流,导致介质击穿。这类击穿通常发生在环境温度不高的情况下,击穿的发生与施加电压的时间和环境温度无关,主要取决于介质的微观结构,也和介质厚度、电极面积等因素有关。

对于 MLCC 来说,发生电击穿除了与上述提到的因素有关外,还与其内部电极的边缘电场畸变有更为直接的关系。在 MLCC 的内部,电场分布情况见下左图所示。在 A、B 两点的

左侧，邻近的两个金属电极平行相对，是典型的平板电容器结构，内部分布着均匀电场  $E_1$ ；在 A、B 两点的右侧，上面一层是短电极，金属电极层在 A 点被陶瓷介质阻断，与相邻外电极 CD 不相连，下面一层金属长电极与外电极在 C 点紧密连接，这种长短不齐的结构造成了电场畸变，使之在 ABCD 区域内为非均匀电场。在陶瓷介质中取两个柱形高斯闭合面，详见下右图。



两个柱状高斯闭合面一个是在均匀电场内的长方形柱体，另一个是在非均匀电场但与均匀电场交界的梯形柱体。两个柱体的上下底面均与金属电极平行，下底  $S_4$ 、 $S_5$  取在金属电极层内，上底  $S_1$ 、 $S_2$  取在陶瓷介质中并靠近金属电极层。设金属电极层内的电荷密度均为  $\sigma$ 。

对于均匀电场内的长方体柱体，在金属下电极层内  $E=0$ 、 $D=0$ （注： $D$  代表电位移矢量），故  $S_5$  上无通量；侧壁可视作电力管，与电力线平行，也无通量，唯一有通量的是在  $S_1$  面。则包围在此闭合高斯面内的自由电荷  $Q_1=\sigma*S_5$ ，它分布在短电极下侧的表面上，按照有介质时的高斯定理：

$$\Phi_{SD1dS}=Q_1=\sigma*S_5=D_1S_1 \quad (1)$$

式中  $D_1$  为均匀电场  $E_1$  中的电位移矢量。

同理，对于非均匀电场内的梯形柱体，在金属下电极层内  $E=0$ 、 $D=0$ ，故  $S_4$  上无通量；侧壁亦可视作电力管，与电力线平行，也无通量，只有在  $S_2$  面上有通量，包围在此闭合高斯面内的自由电荷  $Q_2=\sigma*S_4$ ：

$$\Phi_{SD3dS}=Q_2=\sigma*S_4 \quad (2)$$

式中  $D_3$  为均匀电场  $E_3$  中的电位移矢量，当  $S_2$  中的边长  $b$  取足够小，则  $D_3$  可近似为均匀，同时考虑到  $D_3$  与  $S_2$  的外法线方向存在夹角  $\theta$ ，则有：

$$\Phi_{SD3dS}=D_3S_2\cos\theta=Q_2=\sigma*S_4 \quad (3)$$

如令  $S_4=S_5$ ，由于金属电极内的电荷密度  $\sigma$  处处相等，则  $Q_1=Q_2$ ，则有：

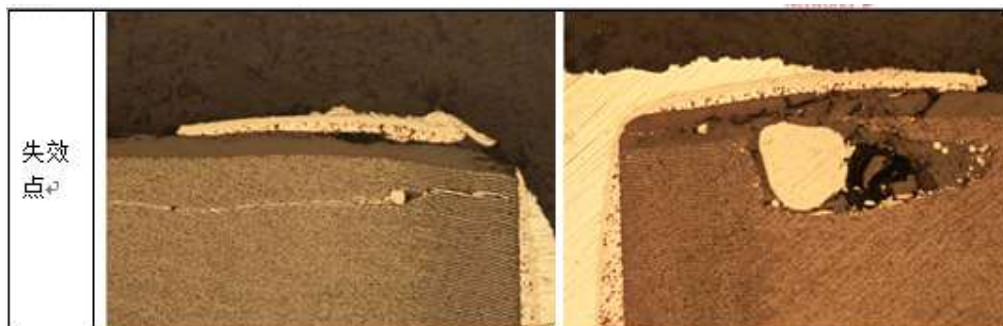
$$D_1S_1= D_3S_2\cos\theta \quad (4)$$

根据电位移矢量公式  $D=\epsilon E$ ，则有：

$$E_1S_1= E_3S_2\cos\theta \rightarrow S_1/S_2= E_3*\cos\theta /E_1= E_2/E_1 \quad (5)$$

因为  $b$  足够小,  $S_2$  很小, 因此  $S_1/S_2 \gg 1$ , 可得出  $E_2 \gg E_1$ 。说明在 A 点的电场强度  $E_2$  远大于均匀电场  $E_1$ 。上述分析仅针对下电极 BC 段, 其实外电极 CD 段的  $E_4$  对  $E_2$  方向上的电场强度也有贡献, 所以 A 点的实际电场强度比所分析的  $E_2$  还要强。

过压试验故障品击穿点基本也在该位置, 与理论研究吻合。

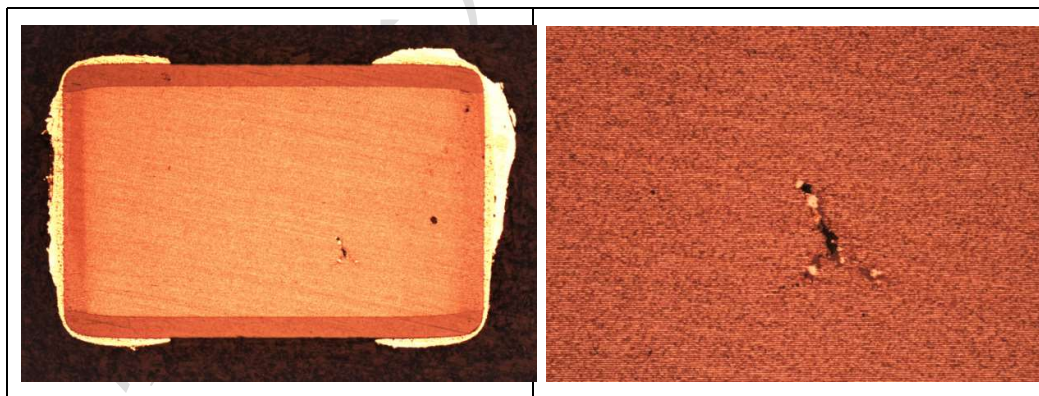


### 1.3 结论

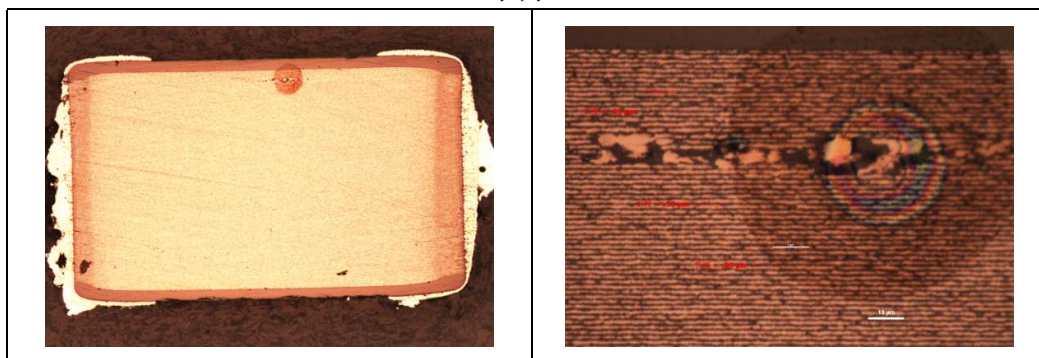
假设在 MLCC 内部陶瓷介质均匀、介质层无任何缺陷, 电极层完整、厚薄一致和层叠整齐的情况下, 可以得出以下结论: 对 MLCC 施加高电压, 如果超过了其所承受的能力, MLCC 会发生电压击穿。由于 MLCC 内部存在畸变电场, 则 A 点的场强最高, 击穿易发生在 AB 两点附近。电压击穿的发生与施加电压的时间和环境温度无关, 但长时间施加高电压会介质性能退化, 导致击穿的发生。

由于 MLCC 生产工艺多, 在流延、印刷、叠层和层压均有可能引入缺陷, 如流延介质厚度偏下限会导致介质变窄, 则也会出现在其他位置发生电压击穿的情况, 详见下图。

示例 1



示例 2



---

硬件十五个为什么