

多层陶瓷外壳的可靠性设计和失效分析

作者：汤纪南

1 引言

多层陶瓷外壳以其优良的性能被广泛应用于航天、航空、军事电子装备及民用投资类电子产品的集成电路和电子元器件的封装，常用的陶瓷外壳有集成电路陶瓷外壳，如 D 型（DIP）、F 型（FP）、G 型（PGA）、Q 型（QFP）、C 型（LCC）、BGA 型等；混合集成电路陶瓷外壳，光电器件陶瓷外壳，微波器件陶瓷外壳，声表面波器件陶瓷外壳，晶体振荡器陶瓷外壳，固体继电器陶瓷外壳及各种传感器（如霍尔传感器）用陶瓷外壳等等。

多层陶瓷外壳采用多层陶瓷金属化共烧工艺进行生产。多层陶瓷外壳分为高温共烧陶瓷外壳（HTCC）和低温共烧陶瓷外壳（LTCC）两类。本文仅对高温共烧陶瓷外壳（HTCC）进行讨论。

多层陶瓷外壳由于其体积小、导热性好、密封性好、机械强度高、引起封装可靠性高而得到广泛应用，但是，使用中仍然会出现失效。本文就多层陶瓷外壳的失效模式、失效机理和[可靠性设计](#)进行探讨。

2 多层陶瓷外壳的失效模式

多层陶瓷外壳在生产和使用中出现的失效模式通常有以下几种：

- （1）在机械试验中出现陶瓷底座断裂失效；
- （2）在使用中出现绝缘电阻小于标准规定值，出现失效；
- （3）在使用中外壳出现断、短路失效；
- （4）在使用中出现外壳外引线脱落、或无引线外壳的引出端焊盘与外电路连接失效；
- （5）使用中出现电镀层锈蚀失效；
- （6）使用中出现密封失效；
- （7）键合和芯片剪切失效；
- （8）使用不当造成失效。

3 多层陶瓷外壳的失效机理分析

3.1 陶瓷底座的断裂失效

其主要失效机理如下：

- (1) 由于所采用的陶瓷材料的抗弯强度不足；
- (2) 在生产过程中偏离了规定的工艺参数；例如：层压中未将各层生陶瓷片压成一个整体，降低了陶瓷底座的机械强度，在烧结过程中，由于烧结温度过高或过低而造成陶瓷底座过烧和生烧，从而降低了陶瓷底座的机械强度所致；
- (3) 由于结构设计错误，在设计外壳底座的底板时，底板取值太小，使底板过薄。因此，产品在机械试验时，造成外壳芯腔部应力集中，从而出现外壳底座断裂失效。

3.2 绝缘电阻失效

其主要失效机理如下：

- (1) 所采用的陶瓷材料的体积电阻率和绝缘强度不够，使产品的绝缘电阻达不到标准规定的要求；
- (2) 印刷生产过程中，偏离了规定的工艺参数，例如金属浆的黏度不符合规定或印刷机的工艺参数不对，使印刷线条之间发生短路或接近短路，导致绝缘电阻失效；
- (3) 在印刷生产过程中，由于操作者不注意工艺卫生，造成印刷线条之间发生短路或接近短路，导致绝缘电阻失效；
- (4) 在电镀后的清洗过程中，由于未充分清洗干净，残留的镀液电介质导致绝缘电阻值下降，导致绝缘电阻失效。

3.3 断、短路失效

其主要失效机理如下：

3.3.1 有引线外壳的断、短路失效

- (1) 层间互连失效造成了外壳的断路失效，例如：互连孔金属化填料不足，层压时工艺参数不符合规定，形成分层现象，造成上下层之间不能连接，造成层间互连断路失效；

(2) 印刷金属化线路时，线间短路，引起了外壳短路失效。例如：金属浆的黏度不符合规定或印刷机的工艺参数不对；操作者不注意工艺卫生，造成印刷线条之间发生短路，从而引起了外壳短路失效。

3.3.2 无引线外壳的断、短路失效

(1) 在平面印刷时，印刷线路与引出端通孔连接断路；引出端通孔孔壁金属化时，引出端通孔内壁挂浆不连续；在印刷底面引出端焊盘时，焊盘未与引出端通孔的金属浆连接，在层压时，由于层压工艺参数控制不当，使引出端通孔内分层使引出端通孔金属化产生断裂，因而造成了外壳的短路失效。

(2) 印刷金属化线路时，线间短路，引起了外壳短路失效。

3.4 外引线脱落失效或无引线外壳的引出端焊盘与外电路连接失效

其主要失效机理如下：

3.4.1 有引线外壳的外引线脱落失效

(1) 钎焊引线的金属化焊盘的金属化强度不够，而造成这一问题的原因：一是金属化配方本身的金属化强度低，二是金属化层的厚度偏薄造成金属化强度低，三是外壳陶瓷底座在烧结时温度过高或过低造成金属化强度低；

(2) 陶瓷底座在钎焊前进行化学镀镍时，镀镍层偏薄，使焊料与金属化焊盘的浸润性差，导致引线的抗拉强度差；

(3) 钎焊工艺不符合要求，造成这一问题的原因：一是钎焊装配模具不符合要求使引线的装配偏离焊盘或未与焊盘接触到位，二是钎焊温度过高造成焊料流失或温度过低焊料熔融不够，这些问题均会造成外引线的抗拉强度差；

(4) 钎焊引线的焊料量不足，造成引线不能与焊盘完全钎焊好，降低了外引线的抗拉强度。

3.4.2 无引线外壳的引出端焊盘与外电路连接失效

(1) 引出端金属化焊盘的金属化强度不够，而造成这一问题的原因：一是金属化配方本身的金属化强度低，

二是金属化层的厚度偏薄造成金属化强度低，三是外壳陶瓷底座在烧结时温度过高或过低造成金属化强度低；

（2）在电镀中，由于镀金和镀镍层偏薄，使用户在钎焊时，金和镍很快与焊料熔为合金，导致焊料与金属化焊盘的浸润性差，从而使焊盘与外电路连接失效。

3.5 电镀层锈蚀失效

其主要失效机理如下：

（1）电镀配方选择不当或所用化学药品质量差，使镀液的杂质含量高，造成镀层内的杂质含量高，镀层的孔隙率高，抗腐蚀能力差；

（2）电镀工艺或工艺控制不当，造成镀层孔隙率高或镀层的均匀性差，造成电镀层失效；

（3）电镀用纯水质量差，造成镀液中杂质含量高或清洗不干净，使电镀层质量及表面质量差，造成了电镀层失效；

（4）镀层厚度设计不合理，使镀镍层和镀金层的抗腐蚀能力差、可焊性差、可键合性不好，造成电镀层失效。

3.6 密封性失效

其主要失效机理如下：

（1）布线印刷时，金属浆厚度太厚，层压时金属浆两边不能压密实，内引线两边漏气，造成密封失效；

（2）层压前印刷好的生陶瓷片太干，使正常的层压工艺不能将产品压成一个密实的整体，层间漏气，从而造成密封失效；

（3）层压工艺参数控制不当，使产品不能压成一个密实的整体，形成层间漏气，从而造成密封失效；

（4）由于封接环表面平整度差，在采用焊料封盖时焊料不足以填满焊缝造成漏气，电镀质量差，焊料与封接环浸润性差造成漏气；

（5）平行缝焊用盖板采用的材料厚度不当，退火工艺控制不好、电镀工艺控制不当，从而造成用户平封时，采用正常的平封工艺封盖时发生密封失效。

3.7 键合和芯片剪切失效

其主要失效机理如下：

（1）由于金属化强度低，在键合时，金属化层受到破坏，导致键合点剥离失效；其次，由于内引线和腔底的金属化表面平整度差，导致键合和芯片粘结强度差，引起失效；

（2）由于外壳在电镀时，镀层厚度偏薄或镀层的均匀性差，使键合强度和芯片粘结强度差，造成键合和芯片剪切失效；

（3）由于用户在使用中，键合工艺参数不当，造成键合失效；在芯片粘结时，焊料选用不当或粘结工艺参数不当造成芯片粘结强度差，造成失效。

3.8 使用不当造成失效

其主要是机理为：用户使用过程中，由于对外壳的性能及使用要求了解不够，在储存、使用过程中工艺控制不当，在检测、实验过程中方法不当，对外壳造成破坏性失效，例如，在使用过程中，直接用手接触外壳，手上的油污沾染在外壳上，从而造成绝缘电阻、镀层等失效，在试验过程中，由于使用的夹具不当，造成外壳机械强度失效等等。

4 多层陶瓷外壳的[可靠性设计](#)

4.1 机械强度设计

为了确保陶瓷外壳通过相关规定的机械试验，如恒定加速度、机械冲击、扫频振动等试验项目，不发生陶瓷底座断裂失效，在外壳的陶瓷材料、生产工艺和结构设计上采取以下措施：

（1）为了避免由于采用的陶瓷材料的抗弯强度不够而产生陶瓷底座断裂失效，在研制的和生产陶瓷外壳所采用的陶瓷材料配方时，应采用抗弯强度高的陶瓷材料配方来研制和生产陶瓷外壳。

（2）为了避免工艺过程中，由于偏离工艺参数而造成降低陶瓷底座的机械强度，应严格规定各工艺过程中的各项参数，特别是层压和烧结工序的各项工艺参数，要求各工序在生产过程中严格遵守工艺纪律和操作规程，并对生产出来的在制品和半成品进行检验和试验，不得出现分层或"吸红"现象，从而确保陶瓷底座的机械强度满足规定要求。

(3) 为了确保外壳的机械强度，在结构设计上应适当加厚底层瓷片厚度，以加强陶瓷外壳底座的机械强度。

4.2 绝缘电阻设计

为了确保多层陶瓷外壳的绝缘，绝缘电阻要求 $\geq 2 \times 10^{10} \Omega$ ，避免外壳的绝缘电阻失效，在陶瓷外壳采用的陶瓷材料、生产工艺和工艺卫生上采取以下措施：

- (1) 采用体积电阻率和绝缘强度高的陶瓷配方；
- (2) 在印刷生产过程中，严格金属浆的配置工艺，使金属浆的黏度在规定的范围内；严格印刷操作参数的设定，严格操作规程，确保印刷线条符合要求；
- (3) 严格工艺卫生，使印刷好的产品不出现线间短路的现象，加强工序检验，剔除不合格品；
- (4) 在产品电镀完成后，应充分清洗、使残留的镀液降低到最少，确保产品的绝缘电阻符合产品标准规定的要求。

4.3 外壳通断的[可靠性设计](#)

为了确保外壳的电连接符合设计要求，在生产过程中应采取以下措施：

4.3.1 有引线外壳的断、短路[可靠性设计](#)

- (1) 严格控制小孔填料浆的黏度及小孔填料的工艺参数，使每个小孔均填满金属浆，确保互连孔连接的有效性；
- (2) 严格层压工序的各项工艺参数，要求在生产过程中严格遵守工艺纪律和操作规程，确保通过层压使各层生陶瓷片压成一个整体，使互连孔连接有效；
- (3) 严格工艺卫生，防止由于金属浆污染引起的短路；
- (4) 加强印刷后的工序检验，剔除小孔填料不足、线间短路和层压分层等不合格品。

4.3.2 无引线外壳的断、短路[可靠性设计](#)

- (1) 严格控制引出端通孔孔壁金属化浆料的黏度及引出端通孔孔壁金属化的工艺参数，使每个引出端通孔孔壁均匀地挂满金属浆，确保每个引出端通孔孔壁金属化的连续性；

(2) 严格层压工序的各项工艺参数，要求在生产过程中严格遵守工艺纪律和操作规程，确保通过层压使各层生陶瓷片压成一个整体，使引入端通孔孔壁金属化连接有效；

(3) 严格工艺卫生，防止由于金属浆污染引起的短路；

(4) 加强印刷后的工序检验，剔除内引线印刷线路和焊盘印刷与引出端通孔连接断路、引出端通孔内壁挂浆不连续、线间短路和层压分层等不合格品。

4.4 有引线外壳外引线的抗拉强度和无引线外壳的引出端焊盘[可靠性设计](#)

为了保证外壳外引线的抗拉强度及无引线外壳引出端焊盘的可焊性要求，在生产过程中应采取以下措施：

4.4.1 有引线外壳外引线抗拉强度[可靠性设计](#) [www. Kekaoxing.com](http://www.Kekaoxing.com) 中国可靠性

(1) 选用金属化强度高的金属化浆料配方作为钎焊引线的金属化焊盘金属化配方；严格控制印刷工艺，确保金属化层的厚度符合要求，严格控制陶瓷底座的烧结工艺，确保烧结温度等在规定的范围内，使金属化强度符合要求；

(2) 严格控制陶瓷底座的化学镀镍工艺，确保化学镀镍层符合要求；

(3) 严格检查外壳的钎焊装配模具，确保装配模具符合要求，装配时应保证陶瓷底座焊盘与外引线一一对应，不产生严重偏位，严格控制钎焊工艺，确保钎焊温度等参数在规定的范围内；

(4) 严格控制焊料量，确保引线钎焊符合要求。

4.4.2 无引线外壳的引出端焊盘[可靠性设计](#)

(1) 选用金属化强度高的金属化浆料配方作为金属化焊盘金属化配方；严格控制印刷工艺，确保金属化层的厚度符合要求；严格控制陶瓷底座的烧结工艺，确保烧结温度等参数在规定的范围内；使金属化强度符合要求；

(2) 严格控制陶瓷底座的电镀工艺，确保镀层厚度符合要求；

4.5 电镀层的[可靠性设计](#)

为了保证电镀层的可靠性，确保镀层通过相关规定的镀金质量考核，在外壳电镀过程中应采取以下措施：

- （1）采用无应力镀镍配方和纯金电镀金配方；要求镀层的孔隙率低、镀层的硬度低、抗腐蚀能力好、可焊性好、可键合性好；
- （2）采用合理的电镀工艺流程，确保外壳电镀后镀液的残余量尽可能小；
- （3）优化镀层的厚度设计，用最经济的镀层厚度，确保通过各项检验和试验的考核，特别是盐雾试验的考核；
- （4）电镀用纯水的电阻率应尽可能高，一般应大于 $8\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ，以确保纯水中的杂质离子尽可能少；
- （5）为了解决镀层起泡问题，在前处理过程中，应有效地去除待镀表面的杂质沾污，特别是待镀表面的碳微粒沾污，减少镀层的起泡。

4.6 密封性[可靠性设计](#)

为了确保外壳的漏率 $\leq 1\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，在生产过程中应采取以下措施：

- （1）严格控制印刷丝网的厚度和浆料的黏度，确保印刷的浆料厚度规定的范围内；
- （2）严格控制工场的温、湿度，确保生陶瓷片在层压前的柔软性，使产品在层压时能压成一个密实的整体；
- （3）严格控制层压的工艺参数，确保产品在层压时能压成一个密实的整体；
- （4）严格控制金属浆料质量和印刷工艺，确保印刷平整度；焊有封接环的外壳，在封接环磨平加工时应确保封接环的平整度；
- （5）严格控制电镀工艺，加强镀层厚度控制，确保镀层厚度及均匀性，以保证镀层质量；
- （6）确保平行缝焊用盖板的选材正确，严格控制其制造工艺，保证封盖合格率。

4.7 键合和芯片剪切[可靠性设计](#)

为了保证外壳的键合和芯片剪切通过考核，在生产中应采取以下措施：

- （1）选择金属化强度高的金属浆配方，并严格控制印刷工艺，确保金属化强度和金属浆表面的平整度；
- （2）严格控制电镀工艺和镀层厚度，确保镀层均匀性和厚度符合要求；
- （3）向用户提供陶瓷外壳使用说明书，使用户了解外壳的使用要求，防止外壳使用不当问题的出现；

4.8 使用[可靠性设计](#)

为了保证用户在外壳使用中不出现失效，用户在订购外壳前应充分了解各种外壳的存储、封装使用、检测、试验的要求，向外壳生产单位索取外壳的使用说明书；在外壳进厂后，严格按照要求使用外壳，防止在外壳的存储、封装使用、检测、试验过程中，对外壳造成破坏性失效。

5 结论

多层陶瓷外壳的主要失效模式有以下几种：陶瓷底座断裂失效，绝缘电阻失效，断、短路失效，外引线脱落失效，电镀层锈蚀失效，密封失效，键合和芯片剪切失效和使用不当失效，对这些失效模式进行[失效分析](#)的结果，使我们明确了根据其失效机理，并应在外壳的制造和使用过程中采取措施，防止多层陶瓷外壳失效的发生。

以上是三十多年来，在多次陶瓷外壳科研、生产和用户使用过程的实践中，积累起来的对于陶瓷外壳的失效模式、失效机理和[可靠性设计](#)的一点看法；我国在陶瓷外壳的研制、生产和使用中，尚未对陶瓷外壳的失效及可靠性进行过系统的研究和分析；本文是对陶瓷外壳的失效及可靠性进行系统分析和尝试，以期抛砖引玉，希望通过本文引起对多层陶瓷外壳可靠性的关注，以提高我国多层陶瓷外壳的质量和可靠性