



宇航用瓷介电容表面处理工艺优化研究与实践

刘富品¹ 田智文¹ 李小鹏²

(1. 航天标准化研究所, 北京 100071;

2. 北京元六鸿远电子有限公司, 北京 102600)



摘要: 系统研究了宇航用瓷介电容表面处理工艺存在的问题, 分析了工艺影响因素及机理, 并由此开展了工艺优化路线研究, 从四个方面进行了优化实践, 实现了宇航工艺控制目标。对今后开展宇航产品工艺优化研究及过程控制体系完善, 具有参考意义。

关键词: 瓷介电容; 表面处理; 电镀; 工艺优化

Research and Practice of Surface Treatment Technics for Aerospace Ceramic Capacitor

Liu Fupin¹ Tian Zhiwen¹ Li Xiaopeng²

(1. China Astronautics Standards Institute, Beijing 100071;

2. Beijing Yuanliu Hongyuan Electronic Technology Co.,Ltd., Beijing 102600)

Abstract: This thesis systematically studies the existing problems in surface treatment technics for aerospace ceramic capacitor. Based on the analysis of influence factors and mechanism of technics, process optimization is carries out from four aspects, resulting in achievements in astronavigation technologic control. These explorations will definitely have reference significance to future researches into aerospace product process optimization as well as process control system.

Key words: ceramic capacitor; surface treatment; plating; technologic optimization

1 引言

表面处理是宇航用多层瓷介电容器生产线上的最后一道生产工艺, 即端电极镀镍和镀锡铅, 也是一道特殊工序, 其工艺质量对电容器外观、电绝缘性能、电容量、损耗以及可焊性等方面均有影响。相对于其它工艺, 表面处理工艺在人员、设备、原材料、环境、方法方面综合要求较高, 其中以形成镀层的电镀液系统的管理维护最为重要。

2 工艺存在问题及原因分析

为研究并优化表面处理工艺, 统计分析了近 300 个合格批次的监测数据, 总的产品合格率约为 93.05% (不包括 DPA 的取样), 统计发现表面处理质量有较大的波动, 表面质量出现的问题主要包括以下几个方面:

- 镍镀层和锡铅层厚度波动性大, 导致统计过程中的 Cpk 值较低, 第三季度镀镍层 Cpk 值最低为 0.68, 锡铅层 Cpk 值为 0.74;
- 锡铅镀层颜色不同时期有一定波动;
- 锡铅层镀层结晶的粗糙度有变化;
- 瓷体表面有水波纹;
- 瓷体表面上有锡铅痕迹;
- 产品表面有烧伤迹象。

作者简介: 刘富品 (1970-), 硕士, 电子工程专业; 研究方向: 电子元器件产品认证、质量保证技术研究, 型号用元器件产品质量问题分析和应用技术研究。

收稿日期: 2015-05-15

在分析问题排查生产过程因素中,还发现以下几个方面的不足和隐患:

a. 电镀液的配制程序和维护方法参照镀液供应厂家说明书,没有根据生产情况转化为公司内部受控文件;

b. 表面处理分析用试剂及指示剂的配制方法没有固化为文件,没有可追溯性、重复性;

c. 电镀工序中所使用的去离子水电导率规定的范围太宽;

d. 时间未能很好地遵守工艺文件规定的处理槽中停滞;

e. 使用磁铁吸附导电媒介进行产品分选的操作效率低下。

综合分析以上隐患,导致该工序质量不佳的原因可以归结为4大类:工艺方法设计不先进,作业文件规定内容不完善,操作者执行不到位,生产工艺设备不健全。其中工艺设计问题,应经工艺调试进行改进和优化,并逐渐固化到操作指导文件中;作业文件欠缺内容,可以通过过程控制文件建设来修订完善;同时,通过细化生产操作步骤,加强生产过程的控制,减少人为因素干扰;对于较难遵守的工艺操作和生产效率低下的工步,通过引入新设备、新仪器,在提高生产率的同时改进过程质量。

3 工艺优化路线研究

3.1 工艺优化方法

工艺设计和开发是产品实现过程的关键环节,工艺的先进性、可操作性和稳定性,直接影响产品制造质量与可靠性。宇航产品工艺要求还具有以下特点:

- 长寿命,高可靠性,高安全性,高稳定性;
- 良好的可靠性、保障性、测试性、环境适应性;
- 装配复杂、结构复杂、精度要求高;
- 质量一致性要求高、工艺过程控制难度大。

基于宇航产品的特点和要求,工艺设计和开发策划,需要确保以下环节和内容得到落实:

a. 全面识别制约产品工艺设计和开发的关键因素和薄弱环节,确定相应的措施;

b. 开展关键工艺分析,重点针对技术难度大、工艺方法不成熟、工艺要素不稳定、质量难以保证、严重影响工艺质量等环节,开展攻关;

c. 充分识别材料、技术、设备、环境、人员以及软件、外协等方面的风险,制定控制措施和验证要求;

d. 确定监视、测量要求,在过程检查确认的基础上,进行工艺优化。

在上述系统策划原则基础上,针对表面处理工艺开展工艺优化研究。应用霍尔三维结构理论,从工艺实现方法、工艺影响要素、干扰因子及引入途径几个方面入手,开展了全面工艺质量影响分析。

3.2 工艺优化途径

拆解表面处理工艺的具体工步,其流程图如图1所示,其中“镀镍”、“镀锡铅”是关键工步,其它为辅助工步。

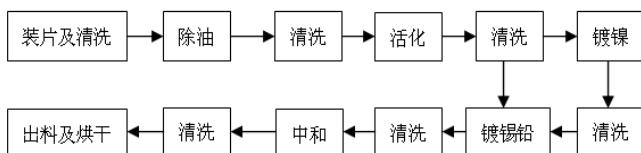


图1 表面处理工艺流程图

从人、机、料、法、环、测六个方面针对每个工步进行工艺影响要素分析,同时根据工艺基线和现实工况,提取出各环节可能引入的干扰因子及引入途径。

实际工作中,由于镍镀层和锡铅镀层的厚度波动性大,不仅会影响到产品批次间的质量稳定性,还会造成人员、时间及材料成本上的浪费。这是表面处理工艺的一个难题。为了挖掘出导致多层瓷介电容器镍镀层和锡铅镀层厚度波动性大的因素,以此为例重点对生产现场的这两个工步进一步展开剖析,对各项影响因素逐一梳理,并绘制镀层厚度波动性大的特性要因图,如图2所示。

通过图2分析,结合质量问题现象和发生机理研究,从中找到主要的影响因素及可能引入途径,并通过“复现”手段进行落实,逐步排查发现,以下要因与镀层厚度波动性大直接相关:电镀液材料体系,电镀液PH值,电镀液温度,电镀电流大小和电镀时间,电镀导电媒介,电镀导电媒介的数量和待镀产品的数量,电镀液成分分析及成分补充维护,滚镀筛,镀层厚度测量。

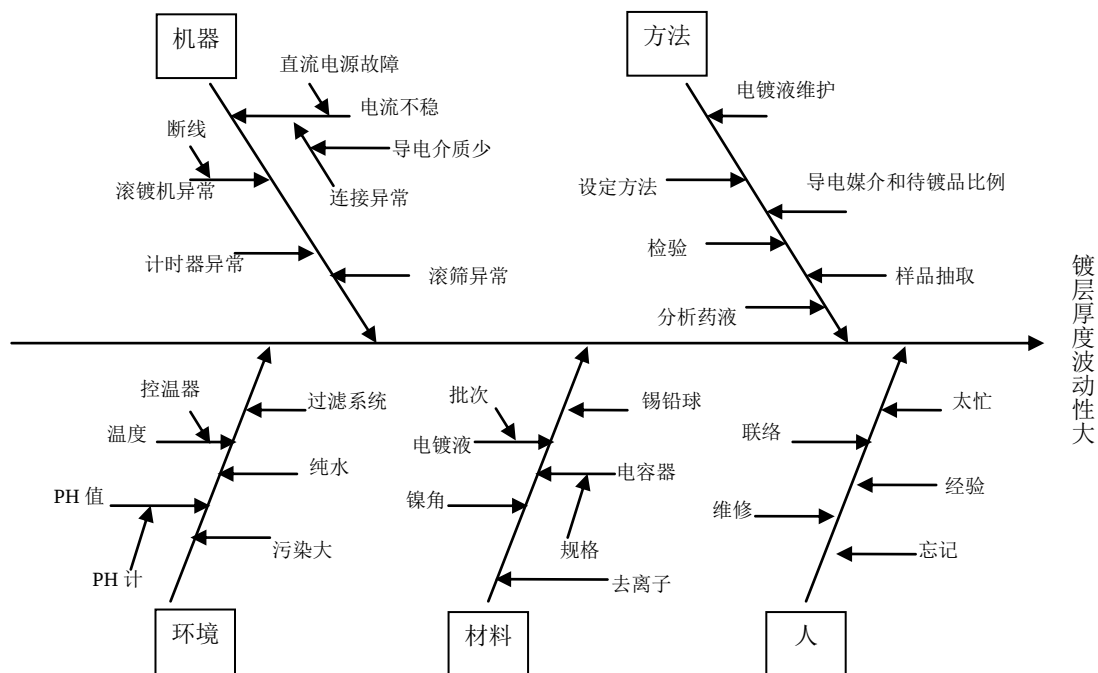


图2 表面处理工艺影响因素分析图

前8种因素是电镀生产过程中影响镀层膜厚的主要因素，镀层厚度测量是生产过程中的一种监测手段，使镀层膜厚进一步得到优化控制。在前8个影响因素中，电镀液材料体系是选定且经过验证的电镀液体系，适合片式多层瓷介电容器的端头电镀。通过工艺实验确认电镀液PH值、温度、电流大小、电镀时间、导电媒介的数量、待镀产品的数量以及滚镀筛。在具体实施过程中有相应的工艺文件、工艺流程卡和质量记录进行保证和维持，使生产过程能够安全稳定地进行。导电媒介的种类和尺寸这一因素是容易被现场作业者忽视的一个环节，随着电镀生产过程的进行，导电媒介表面的镀层会逐渐加厚，导电媒介的尺寸一点点变大，最终会影响到部分小尺寸产品镀层的厚度。

因此，基于对生产过程数据的搜集和分析，展开了工艺改善攻关。

4 工艺改进实践

4.1 镀液体系稳定性改进

为逐步改进镀层质量，提升表面处理工艺过程能力指数和不同批次间的一致性，从稳定镀液体系着手，细化过程控制文件（PID）体系，通过相应操作文件的建立和细化，进一步规范指导操作者进行电镀

液的维护和管理。

为建立镀槽药液的配置方法、维护方法，避免因缺少药液配置和维护作业类文件，导致实际操作过程引入误差的情况，工艺员依据药液配置资料、结合表面处理工艺实际电镀线的工况，拟制了《镀槽药液配制作业指导书》（镀锡铅生产设备），规范电镀作业者配置、监测、更换药液的操作，完善了镀液生产线的操作和维护，有效避免了镀液指标波动，保障了电镀生产的稳定性和持续性。

同时，分析药液的标准配制方法，确保电镀药液成分分析准确性，保证了镀液适时添加和补充。基于行业标准分析方法规定要求，拟制了《分析药液配制作业指导书》，指导工艺人员进行分析药液的配制，保证配制批次的稳定性和可靠性，且有记录可查便于追溯。

规范镀液配、分析液配置操作之后，如图3所示，是镍镀槽镍离子含量和锡镀槽锡离子含量的变化情况，由图可以看出离子含量的变化幅度变小，说明加强药液管理起到了一定的效果。

结合上述的工艺攻关、PID文件建设，工艺改进后统计了数十个生产批次的镀镍、镀锡铅层厚度，数据显示工序Cpk值即生产过程控制能力有一定程度的提升。

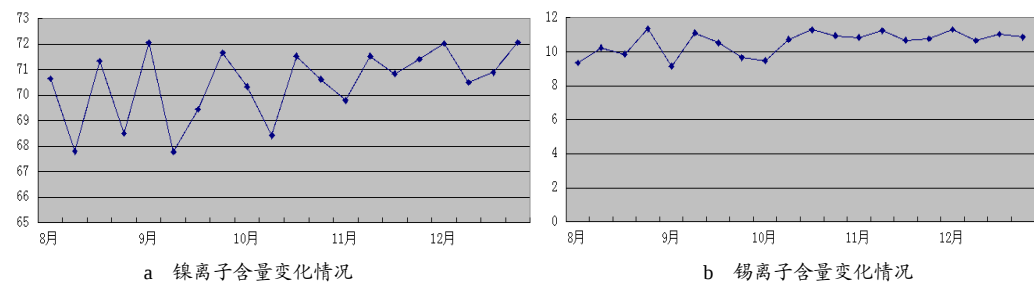


图 3 镍镀槽镍离子含量和锡镀槽锡离子含量

镀镍厚度，共 44 组数据，过程能力 $C_{pk}=1.13$ 。过程能力分析图见图 4：

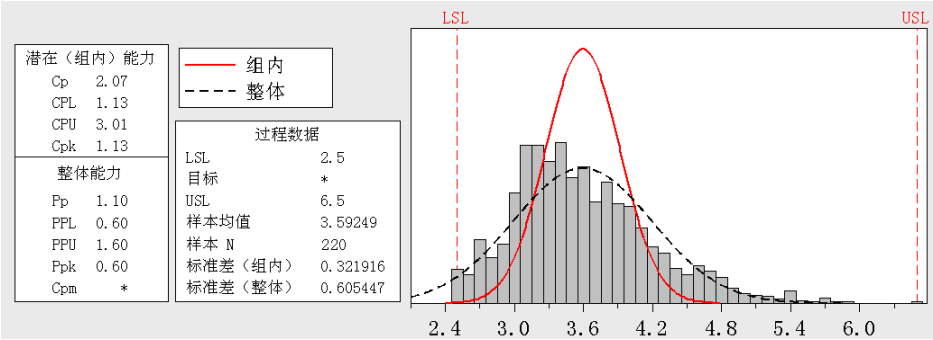


图 4 镍层 C_{pk}

镀锡铅厚度，共 44 组数据，过程能力 $C_{pk}=1.27$ 。过程能力分析图见图 5：

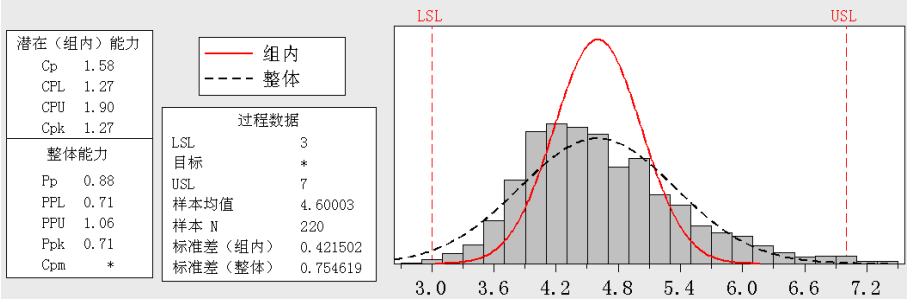


图 5 锡铅层 C_{pk}

4.2 导电媒介匹配工艺改进

针对导电媒介的种类和尺寸这一容易被现场作业者忽视的环节，开展工艺优化研究。通过对 4 种规格的产品进行工艺试验，包括对导电媒介钢珠的装载

量、钢珠尺寸、上镍时间、上锡铅时间的控制，经过多次试验得到了较佳的控制效果。工艺试验条件见表 1 所示，试验数据如表 2、表 3 所示。

表 1 工艺试验条件

规格	上镍		上锡铅		钢珠 装载量	钢珠尺寸
	电流/A	时间/min	电流/A	时间/min		
0805	A-1	120	B-1	100	250	ϕC
1206	A-2	120	B-2	100	250	ϕC
1210	A-2	120	B-2	100	250	ϕD
1812	A-2	105	B-2	80	250	ϕD

表 2 试验结果镍层厚度								
批号	规格	数量	镍层厚度 (4.5±2) μm					镍层 平均值
			1	2	3	4	5	
T-1	0805	5000	4.1	3.5	3.6	3.9	3.9	3.8
T-2	1206	2300	3.8	3.7	3.9	3.5	3.5	3.7
T-3	1210	1800	3.5	3.6	3.5	4.2	3.3	3.6
T-4	1812	1000	3.2	3.9	3.3	4.1	3.7	3.6

表 3 试验结果锡铅层厚度及其他性能									
批号	锡铅层厚度 (5±2) μm					锡铅层 平均值	外观	IR 性能	可焊性
	1	2	3	4	5				
T-1	4.1	4.7	4.8	5.1	4.6	4.7	合格	合格	合格
T-2	3.9	4.5	5	4.9	4.7	4.6	合格	合格	合格
T-3	4.7	4.9	4.9	5	4.9	4.9	合格	合格	合格
T-4	5	4.4	4.3	5.2	4.4	4.7	合格	合格	合格

通过上述试验结果，确定合适尺寸的钢珠作为导电媒介。优化后的工艺方法经过多个生产批的工艺验证确认，验证结果均达到了规定的要求，验证产品电性能、外观、绝缘、可焊性均合格，镀层均匀性、一致性很高，同时还电镀时间缩短，提高了生产效率。试验结果详见表 4、表 5，较好地解决了镀层厚度波动大的技术难题。

表 4 镍层厚度									
序号	批号	规格	数量	镍层厚度 (4.5±2) μm					镍层 平均值
				1	2	3	4	5	
1	P20130729-265CD	1206	2736	3.7	3.4	4.3	4.2	4.1	3.9
2	P20130828-326CD	0805	5800	3.9	3.9	4	3.3	3.5	3.7
3	P20130910-409CC	0805	5800	3.4	3.2	4.4	3.6	3.4	3.6
4	P20130726-255CC	1206	7140	3.5	3.4	3.1	4.2	4.1	3.7

表 5 试验结果锡铅层厚度及其他性能									
批号	锡铅层厚度 (5±2) μm					锡铅层 平均值	外观	IR 性能	可焊性
	1	2	3	4	5				
P20130729-265CD	4.5	4.6	5.1	4.3	5	4.7	合格	合格	合格
P20130828-326CD	4.4	4.4	4.5	4.9	4.3	4.5	合格	合格	合格
P20130910-409CC	4.8	4.1	4.4	5	4.7	4.6	合格	合格	合格
P20130726-255CC	4.9	5	4.7	4.1	4.8	4.7	合格	合格	合格

- 4.3 生产设备补充完善
- a. 在生产线体各处理槽位置安装定时器

通过在生产线体的各个处理槽位置上增加计时器进行时间设定，保证了所规定的工艺时间，避免延长或缩短滚镀机在处理槽中的时间。在《表面处理作业指导书》中明确了定时器的设置方法，正确地使用和操作定时器进行工艺时间的设定，稳定了生产过程和产品质量。
- b. 引入了振动分选机进行导电介质球的分选

借助磁铁手工分选产品和导电媒介钢珠，生产效率较低，特别是小尺寸规格的产品更显得困难，由此引入振动分选机来解决这一难题。工艺人员进行了多个规格的试验验证，在既兼顾产品质量又重视分选效率的原则下，确定了振动分选机运行过程中适宜的条件参数，经过多次重复性验证，最终确定了分选调节参数（7~8）和送料调节的参数（1~2）为较佳的振动分选机的参数设置。
- c. 纯水机的引入，确保表面处理工艺所使用的去离子水的质量

依据优化后设置的参数分别对 0402~1210 等 5 种规格的产品进行了分选作业验证，结果表明，小规格产品分选经防护处理后能够得到较好的防护效果。

由于去离子水一直是外购，导致电导率不稳定，引进了去离子水制造设备后，加严了去离子水的电导率控制范围，使其保持小于 $1\mu\text{S}/\text{cm}$ ，远远小于 $20\mu\text{S}/\text{cm}$ 的工艺允许值，有效保证了表面清洗质量。

4.4 在线监测手段改进

表面处理工艺中一直使用制样抛磨端面、金相显微镜量厚度的方式测量镀层厚度, 该方式存在滞后性且精度一般, 不能及时发现工艺波动, 造成生产资源的浪费和生产成本的增加。

X射线荧光测厚方法是一种非破坏性的镀层测厚方法,可以实现在线监控,且能保证精度在工艺的规定范围内,同时还可以对单层、双层、三层镀层以及合金镀层的厚度进行精确测量,适用于公司目前的

Ag/Pd、Cu 端头的陶瓷电容器外镀层及合金镀层的厚度测量。

经过深入调研,选取了 X 荧光射线测厚仪,并同期开展了以下几项工艺细化工作:确定 X 射线荧光测厚仪对多层瓷介电容器的测量方法,对仪器的镀层厚度测量的准确性做工艺验证工作,编制 X 射线荧光测厚仪作业指导书,对现场作业者操作培训。

通过 10 个批次产品的剖面结构确认,端头正面的镀层厚度小于侧面的镀层厚度,发生原因为电流密度分布不均匀导致,侧面电流密度比正面电流密度大,是电流的边缘效应。因此,为保证产品表面处理质量,操作文件规定:镀层厚度测试位置定为端头的中心位置,测试数量为 5 只。该测定方法见表 6。

表 6 表面处理工艺数据采集点

检验项目	是否有损	结果性质	数据采集	检验频次及方法
镀层厚度测量	无损	定量	手工	每批抽取 5 只, 采用 X 射线荧光分析法, 测量端头中心位置

另外,分析镍层厚度测量数据还发现,使用 X 射线荧光测厚仪测量,在镀镍后测定的厚度值大于镀完锡铅后再测量的厚度值,且测量结果差异较大。对此,反复取证了 10 个批次,其结果均相同。从质量控制的角度出发,最终决定在镀镍后取样品做镀镍层厚度的测量。其次,是对仪器的镀层厚度测量准确性做工艺验证,针对 20 个批次不同规格产品,每批抽取 5 只样品,比对 DPA 测试法和 X 荧光仪测试法数据得出,前者测试数据偏高,而膜厚的下限基本一致,在上限方面存在小于 $0.5\mu\text{m}$ 的差异,从比对测量结果可以看出,X 射线荧光测厚仪可以保证陶瓷电容器的在镍层、锡铅层最小厚度上的准确性,从而能够保证产品的品质。

5 结束语

开展工艺优化，全方位地对整个生产过程进行梳理和分析，从细节方面着手、全员性参与，充分发挥各环节的积极性和主动性，使得工艺优化来源于生产现场、服务于过程控制，深入落实到每一个具体环节中，并持续迭代不断优化提升。

参考文献

- 1 张红旗. 宇航用元器件 PID 建设和管理要求研究[R]. 研究报告编号 CASS1101, 2007: 21~23
- 2 Q/QJA 20020-2012 宇航用元器件 PID 管理程序及要求
- 3 ESCC 22700 过程确认文件 (PID) 的要求和指南

(上接第 55 页)

立集成接口框架,解决了集成环境初始化、Patran 窗口动态控制等关键技术,充分利用 C#、C++ 等编程语言的优势,实现了 Patran 与数据管理系统之间的数据融合共享。本集成方法提出的是一种通用的解决方案,支持多种客户端应用程序之间的集成,具有广泛的适用性。

参考文献

- 1 许林, 郭忠全. 基于 PCL 的高超飞行器结构参数化建模[J]. 计算机工程, 2008, 34(22): 1~6
- 2 周明刚, 丁律辉. VC++实现 MSC.Patran 二次开发的方法研究[J]. 机电工程技术, 2009, 38(11): 66~68
- 3 陈毅东, 李绍滋. 利用 Windows 消息实现应用程序控制[J]. 计算机应用研究, 2010, 18(4): 98~101
- 4 龚力柱, 蒋泽军. 基于 Windows 消息机制的软件本地化[J]. 计算机工程, 2005, 31(21): 87~89