

航空发动机控制系统电子器件纳米涂层应用研究

Research on the Application of Nano Coating for Aero Engine Control System

■ 袁伟 赵奎 许国福 / 中国航发控制系统研究所

电子装联行业中三防（防潮、防霉菌、防盐雾）防护具有极其重要的意义，不仅可以保护电子设备免受外界环境因素的损害，还可以提高设备的稳定性和可靠性，延长使用寿命。航空发动机电子设备的工作环境恶劣，在产品设计和生产过程中更应充分考虑三防防护的需求，并采取有效措施加以实现。

航空发动机数字控制系统的电子控制器面临低温、高温、低气压、振动等恶劣环境，而其中的印制电路板在这种恶劣的环境条件下需要具备很长的工作寿命。三防漆作为电路板的保护膜，产生绝缘保护，防止异物、潮湿、水汽等因素引起短路，能够增加电路板可靠性，增加其安全系数，有效地保护电路，防氧化，防腐蚀，免遭化学品、潮湿和其他污物的侵蚀。然而，传统三防漆目前仍然具有一些局限性，从而产生隐患，可能导致控制系统在应用中出现故障。新型的纳米涂层技术已经在电子装联领域展露头角，有望在未来代替传统三防漆成为新型的三防防护材料^[1]。

三防漆的作用及原理

一是隔离作用。三防漆涂覆在电子设备的表面后，会迅速形成一层坚韧且光泽的保护膜。这层薄膜能够有效地隔离水分、空气和其他可能对设备造成损害的物质。膜层可以阻止金属部件的氧化和腐蚀，以及防止电路短路的发生^[2]。

二是化学防护。三防漆通常具

有良好的耐化学腐蚀性能，能够抵抗酸、碱和其他化学物质的侵蚀。这使得它能够保护电子设备免受这些有害物质的侵害^[3]。

三是物理防护。除了化学防护外，三防漆还能提供一定的物理保护。例如，它可以防止尘土、杂质等进入电子设备的内部，从而避免影响设备的正常工作。

四是电气绝缘。三防漆具有较高的绝缘性能，涂覆后可以增强电子设备的电气绝缘能力。这有助于防止漏电、电弧放电等现象的发生，提高设备的安全性。

此外，部分三防漆还具有抗紫外线的特性，能够减少因长时间暴露在阳光下而导致的漆膜老化和褪色；三防漆还具备耐高温的性能，保护膜在100℃开始软化，到120℃变黏但不会滴落，阻燃型三防漆甚至可以耐200℃的高温，这意味着它可以在高温环境下保持稳定的防护效果^[4]。

现有三防漆的问题与挑战

现有三防漆按照材料类型分类，主要有丙烯酸三防漆、聚氨酯三防漆、有机硅三防漆，以及紫外线光固化

和湿气双重固化三防漆^[5]等。当前三防漆主要应用在如家用电器、计算机及办公设备、汽车工业、航海、医疗，以及航空航天控制系统等领域。随着电子设备的广泛应用，三防漆在各行各业中的重要性日益凸显，为电子产品的可靠性提供了有利保障^[6]。

现有的溶剂型三防漆涂覆时为手工刷涂，膜厚不均匀，一致性很难保证，器件边缘、死角部分难以有涂覆，无法防护；而且固化时间较长，为了加速固化，需要烘烤工序，这样会对一些元器件造成损害。此外，在固化过程中会收缩产生内应力，拉扯元器件。在可靠性方面，现有三防漆在使用中存在鼓包、起皮的问题（见图1），并且在长期温度循环测试后三防漆会开裂（见图2）；在结冰试验发现的焊点腐蚀问题中，元器件管脚表面涂覆的三防防护材料厚度为30~75μm，且受限于涂覆工艺，只能保证外表面完全涂覆，管脚内侧无法保证完全涂覆，当有水长期附着在元器件管脚间时，水中的杂质形成导体，使元器件管脚间阻抗异常，进而导致控制器功能性能测试异常，如图3所示。

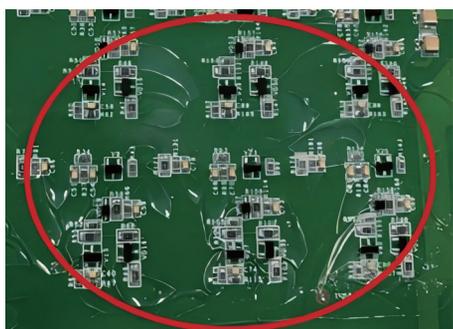


图1 现有三防漆在使用中存在鼓包、起皮

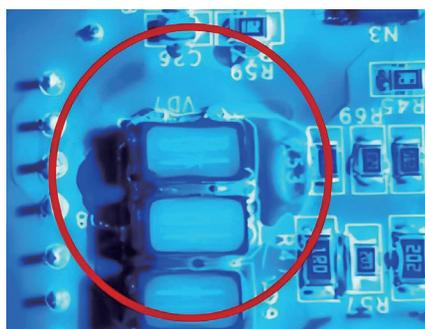


图2 现有三防漆在长期温循试验后开裂

安全方面，现有的溶剂性三防漆含有有机挥发物，如二甲苯等成分，长期接触会影响健康；另外，现有三防漆为易燃材料，储存和涂覆都必须远离火源，容易造成安全隐患，对储存、使用过程要求较高。

当前需要一款新型的三防防护材料，以解决三防漆在生产过程、可靠性，以及安全方面遇到的问题，主要用于实现以下目标：降低三防材料在生产过程中对元器件的损伤；减少三防材料在可靠性方面出现的开裂、防护变差等问题；杜绝三防材料在安全方面出现的隐患。

纳米涂层的可行性及优势

新型的纳米涂层作为三防防护材料无毒无害，燃点高，固化迅速，可以极大地降低人员、设备和器件所

遇到的风险。而且新型纳米涂层膜层均匀，膜厚很薄，透光性好，不会改变产品性质，不影响散热。纳米涂层使用气相沉积法(CVD)镀膜，只要气体可以渗透的地方都可以被膜层涂覆。此外，纳米涂层不会产生内应力导致膜层开裂，也不会因为应力拉扯元器件。

纳米涂层具体采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)镀膜技术(见图4)，其技术原理为：等离子体放电对产品表面进行清洁活化，并为镀膜原料分子打开化学键提供能量，推动聚合反应持续进行；放电过程同时产生的激发电子使单体分子电离，单体分子分裂产生自由电子、离子、激发态的分子和自由基；真空环境下，自由基在激活的基材表面上发生吸附、缩合和聚合反应，电

子和离子交联并与已经沉积的分子产生化学键，不断聚合、生长，形成结构强度高、致密的纳米防护层。

纳米涂层的技术优点主要包括以下几个方面。

一是膜层性能。传统三防漆的膜层对基材要求高，结合力较差，需要在专门的设备上做表面处理。而纳米涂层的膜层结合力优异，适用于多种基材。且纳米涂层由于使用气相沉积的方式镀膜，膜厚的一致性较好。传统三防漆在维修时需要全部铲除并重新涂抹，过程繁琐；而新型纳米涂层则无须除胶，可直接重涂，减少了返修时对元器件和印制板的影响。

二是防护性能。耐腐蚀性方面，传统三防漆的耐盐雾性能一般，难以承受长时间的盐雾测试；而新型

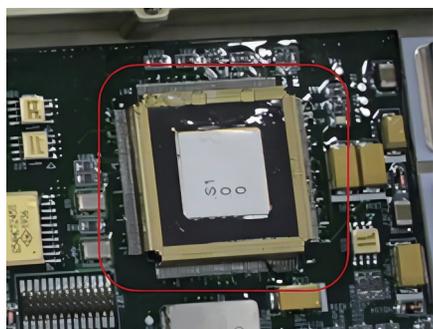


图3 结冰试验中中央处理器(CPU)器件管脚上有水珠导致阻抗异常

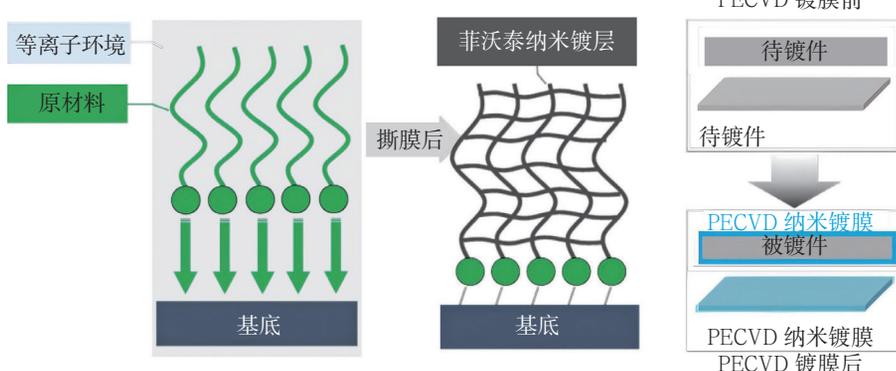


图4 PECVD镀膜技术

纳米涂层具有高耐腐蚀性，能够经受长达500h的耐盐雾测试，为设备提供更持久的保护。耐高低温性方面，新型纳米涂层能在-40 ~ 270°C的温度范围内保持稳定，适用于极端温度变化的环境。

三是安全性能。新型纳米涂层通常具有极低的挥发性有机化合物(VOC)排放，对环境友好，满足国际市场对电子产品环保性的严格要求。

纳米涂层应用试验验证

本文以市场主流的纳米涂层为研究对象，制作试验板，验证纳米涂层自身的各项理化性能，以及涂层在实际应用场景中环境适应性和可返修性。试验验证的主要维度包括以下几个方面。理化特性：涂层厚度、涂层附着力、绝缘电阻、介质耐电压、介电常数、损耗角正切，验证方法和结果见表1，均满足相应的标准要求。

环境适应性：温度冲击、湿热试验、酸性盐雾试验、中性盐雾试验、酸性大气试验、霉菌试验1、霉菌试验2，验证方法和结果见表2，均满足相应的标准要求。可返修性：采用有机溶剂去除涂层，未伤及元器件和素材，均满足相应的标准要求。

经过3个维度共14项的试验验证，纳米涂层材料验证结果符合验证要求，证明新型纳米涂层材料从可行性来看达到现有三防漆的使用标准。

结束语

传统三防漆所带来的工艺、材料、安全等方面的问题和挑战，给新材料在电子装联三防领域提供了应用的机会。当前，大部分电子装联行业使用的是传统三防漆防护，而在纳米材料飞速发展的今天，纳米涂层作为新型的三防防护材料也走上了电子装联的舞台。新型纳米涂层

材料不仅可以满足基本的三防要求，还具有遮蔽性能优秀、对环境友好、对器件和印制板的影响小等优势。理化性质、环境适应性及维修性的验证，纳米涂层材料在三防防护方面均满足要求，具有广阔的应用前景，可用于航空发动机控制系统的电子器件。

航空动力

(袁伟，中国航发控制系统研究所，工程师，主要从事电子装联中SMT技术优化以及新型辅材优化)

参考文献

- [1] 王有亮. 三防漆及其去除技术的研究综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014,32(4):6.
- [2] 黄力涛. 新型“三防漆”的研制[J]. 现代涂料与涂装, 2009,6:3.
- [3] 何燕春, 王超明, 刘鑫, 等. 印制电路组件三防涂层性能及返修工艺技术[J]. 航空计算技术, 2018,48(5):4.
- [4] ABBAS A F, GREENE C M,

表1 纳米涂层理化特性的验证方法及试验结果

序号	验证项目	验证方法	结果的符合性
1	涂层厚度	GB/T 13452.2《色漆和清漆漆膜厚度的测定》	符合 实际涂层总厚度应在10 ~ 50 μm
2	涂层附着力	GB/T 9286—2021《色漆和清漆漆膜的划格试验》，间距1mm	合格 测试结果为“0级”
3	绝缘电阻	根据标准SJ 20671《印制板组件涂覆用电绝缘化合物》及GJB 360A《电子及电气元件试验方法——介质耐电压试验》进行测试	符合 绝缘电阻≥1.5 × 10 ¹² Ω
4	介质耐电压	根据标准SJ 20671《印制板组件涂覆用电绝缘化合物》及GJB 360A《电子及电气元件试验方法——介质耐电压试验》进行，对样品施加1500V的交变电流电压，测试时间1min	符合 在温度冲击、耐湿热试验前后测试，所有样件均正常
5	介电常数	根据GB/T 1409—2006《测量电气绝缘材料在工频、音频、高频（包括米波波长存内）下电容率和介电损耗因数的推荐方法》进行，测试频率1MHz	符合
6	损耗角正切	根据GB/T 1409—2006《测量电气绝缘材料在工频、音频、高频（包括米波波长存内）下电容率和介电损耗因数的推荐方法》进行，测试频率1MHz	符合

表2 纳米涂层环境适应性的验证方法及试验结果

序号	验证项目	验证方法	结果的符合性
1	温度冲击	高温125℃, 低温-55℃; 高低温各保持时间1h; 温变速率不大于10℃/min; 循环次数20次	符合 试验后样件无开裂、剥落、腐蚀、起泡和变色等现象
2	湿热试验	试验条件: 30 ~ 60℃交变湿热; 试验周期: 24h; 时间: 10个循环; 试验程序: 按GJB 150.9A《军用设备环境试验方法湿热试验》进行	符合 试验后应无变色、无腐蚀, 不应出现软、发白、起泡、裂缝、发黏、失去结合力或液化等表面涂层材料发生变化的现象
3	酸性盐雾试验	盐溶液浓度: 5% ± 1%NaCl, PH值3.5 ± 0.5 (通过化学纯稀硫酸或氢氧化钠调整pH值); 温度: 35℃ ± 2℃; 盐雾沉降率: 1 ~ 3mL / (80cm ² · h); 喷雾方式: 24h喷雾+24h干燥; 干燥阶段温度: 15 ~ 35℃, 相对湿度 ≤ 50%; 试验时间: 96h (2个喷雾湿润阶段+2个干燥阶段); 试验程序: 按GJB 150.11A《军用设备环境试验方法盐雾试验》进行	符合 样品表面无发白、腐蚀、开裂等现象
4	中性盐雾试验	盐溶液浓度: 5% ± 1%NaCl, pH值6.5 ~ 7.2 (通过化学纯稀硫酸或氢氧化钠调整pH值); 温度: 35℃ ± 2℃; 盐雾沉降率: 1.0 ~ 3.0mL / (80cm ² · h); 喷雾方式: 24h喷雾+24h干燥; 干燥阶段温度: 15 ~ 35℃, 相对湿度 ≤ 50%; 试验时间: 96h (2个喷雾湿润阶段+2个干燥阶段); 试验程序: 按GJB 150.11A《军用设备环境试验方法盐雾试验》进行	符合 样品表面无发白、腐蚀、开裂等现象
5	酸性大气试验	试验温度: 35℃ ± 2℃; 相对湿度: 大于85%; 试验溶液: 采用硫酸和硝酸混合水溶液 (每4L溶液中添加11.9mg 95% ~ 98%的硫酸和8.8mg68% ~ 71%的硝酸); pH值为3.5 ± 0.5 (通过稀盐酸或氢氧化钠溶液调整pH值); 试验溶液沉降率: 1.0 ~ 3.0mL / (80cm ² · h); 试验时间: 喷雾2h、储存7d为一个循环, 共计4个循环; 试验程序: 按GJB 150.28《军用设备环境试验方法酸性大气试验》进行	符合 样品表面无发白、腐蚀、开裂等现象
6	霉菌试验 1	菌种: 菌种组1; 试验湿度: 95%RH; 试验时间: 84d; 试验程序: 按GJB 150.10A《军用设备环境试验方法霉菌试验》进行	符合 不劣于“0级”为合格
7	霉菌试验 2	菌种: 菌种组2+短柄帚菌; 试验湿度: 95%RH; 试验时间: 84d; 试验程序: 按GJB 150.10A《军用设备环境试验方法霉菌试验》进行	符合 不劣于“0级”为合格

SRIHARI K, et al. Impact of conformal coating material on the long-term reliability of ball grid array solder joints[J]. Procedia Manu

facturing, 2019, 38: 1138-1142.
[5] 杨根林. 光固化三防涂层的性能优势与应用工艺解析 [C]// 四川省电子学会 SMT 专委会. 2016 中国高端 SMT

学术会议论文集, 2016.

[6] 郝栋. 高分子材料三防技术研究 [J]. 商品与质量·建筑与发展, 2014, 5: 971-971.