

# Parylene C 薄膜微波电路的应用可行性研究

张亚楠 孙 鹏 周 澄

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

**文 摘** 针对三防材料在微波电路中多余物防控方面的可行性、可靠性问题,提出在产品表面用真空化学气相沉积法镀 Parylene C 薄膜,结果表明该膜层可有效控制直径  $d$  小于 1 mm 的可动多余物,提高微波产品 PIND(颗粒碰撞粒子检测)测试的合格率。同时与焊接、胶粘、互联、清洗等配装工艺有良好的适配性,且满足可靠性要求。该薄膜较高的绝缘强度,对微波电路有优异的绝缘防护作用。说明 Parylene C 薄膜材料在微波产品中具有应用可行性和潜在价值。

**关键词** 微波产品, Parylene C 薄膜, 真空化学气相沉积法, 多余物, 可行性

中图分类号: TB34

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.01.009

## Application Feasibility of Parylene C Film in Microwave Circuit

ZHANG Yanan SUN Peng ZHOU Cheng

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710000)

**Abstract** The coating material feasibility and reliability in the prevention and control of remnant material in microwave circuits was studied. The vacuum chemical vapor deposition method to deposit Parylene C film on the product surface was proposed. The experimental results show that the film can effectively control the remnant material with a diameter of less than 1 mm, and improve the pass rate of particle impact noise detection test. In the meantime, the film has good compatibility with assembly processes such as welding, gluing, interconnecting, and cleaning and meets the reliability requirements. The film has high insulation strength and excellent insulation protection for microwave circuit. Consequently, the arylene C film has application feasibility and potential value in microwave products.

**Key words** Microwave circuit, Parylene C film, Vacuum chemical vapor deposition method, Remnant material, Feasibility

### 0 引言

航天混合微电路工艺是一种高可靠性的装联技术,对元器件互联精准度和可靠性要求很高。高精度组件配装中的引线厚度约几十微米,芯片线路也极其精细。而配装中的焊接工艺或多或少地残留微量的助焊剂或焊料锡珠,影响着部分引线键合的附着力和电气互联性。残留的较大尺寸可动异物(直径  $>25 \mu\text{m}$ ),在高加速测试阶段有碰撞引线、短路和损伤电路风险,易造成产品 PIND 测试不合格,甚至导致产品电性能指标超差,降低产品的成品率。

在微波组件的表面涂覆一层有机保护层是确保电子产品有效工作的重要工艺措施。目前国内外电子制造业最常见的涂覆材料是聚对二甲苯(Parylene),主要用于防护各种电子线路板<sup>[1]</sup>。该涂

覆膜通过真空化学气相沉积方法,在基板表面形成厚度为几微米到几十微米的新型保护膜,这种薄膜具有厚度均匀、致密无针孔、透明无应力等特点,对器件无损伤,有优异的电绝缘性和卓越的防护性能。在微电子、混合电路领域主要作为高纯度的钝化层和介质层,起到绝缘和隔离保护作用<sup>[2-3]</sup>。

涂覆膜材料按照分子结构可分为 N 型、C 型、D 型、HT 型四种类型,其分子结构见图 1。其中 D 型有高温下优良的物理特性、电性能和热稳定性。N 型有很高的击穿强度、低介电常数<sup>[4]</sup>。有研究表明  $5 \mu\text{m}$  厚度 N 型薄膜在 35 GHz 的滤波器和 Ka 频段放大器微波电路中应用良好<sup>[2]</sup>; C 型薄膜可提供极佳的电气和物理特性以及在潮热环境和腐蚀性气体环境下的低渗透率特性。

收稿日期: 2020-04-25

第一作者简介: 张亚楠, 1993 年出生, 硕士, 主要从事航天电子工艺技术和封装材料方面工作。E-mail: yananzhang\_zyn@163.com

国外研究发现Parylene C薄膜在MMIC电路中具有防护作用,薄膜对微毫米波电路中的差损仅损失了1.04 dB,在电路防潮防湿方面应用效果显著<sup>[5-7]</sup>。而国内对该材料的应用和涂覆技术鲜有研究,为了解决多芯片微波组件中可动多余物的防控问题,本文选用Parylene C型材料,采用气相沉积法,探究一种对微波电性能无耗损的多余物防控方法。

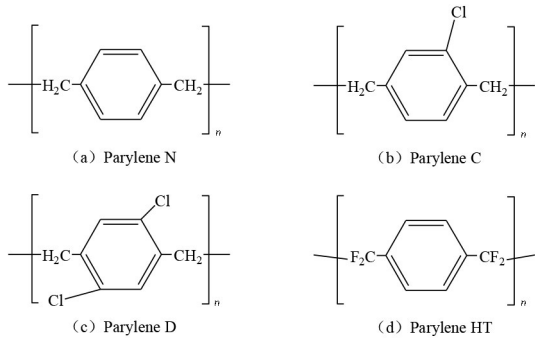


图1 Parylene材料不同型号的分子结构

Fig. 1 The chemical structure of different types of parylene materials

## 1 实验

### 1.1 材料

采用Parylene C粉粒,苏州凯瑞纳米科技有限公司;硅橡胶(GD414胶),中昊晨光化工研究有限公司。

纳米镀膜是通过真空设备,化学气相沉积技术将有机材料涂覆在产品表面:(1)待涂覆样件做烘烤除潮处理;(2)镀膜;(3)高温裂解室;(4)沉积腔;(5)保压12 h可使膜层更加均匀致密,过程如图2所示。依据Parylene C粉料的质量可推算出膜层的厚度,从而调整膜层厚度。镀膜后,样件内部全方位镀上一层透明的20 μm薄膜。

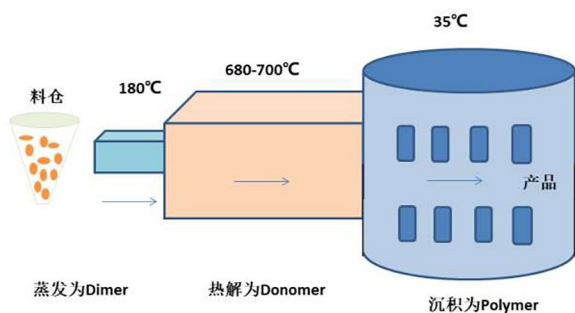


图2 Parylene真空气相沉积镀膜过程

Fi. 2 Vacuum vapor deposition coating process of parylene film

### 1.2 设备及方法

依据GJB548B—2005<sup>[8]</sup>相关方法,进行温度循环测试(-55~125 °C,高低温转换时间低于1 min,保温30 min,100个循环)、恒定加速度( $Y_1, 5\ 000\ g$ )、剪切

力和引线键合力测试。

采用PDS 2060PC型镀膜机设备进行涂覆,拉力测试仪(DAGE4000Plus型)进行键合引线测试,通过扫描电镜(QUANTA 450FEG型)观察薄膜微观形貌,模块清洗机(MSR216ATH35型)进行气相清洗、智能直流低电阻测试仪(TH2512型)进行表面绝缘电阻测试。

### 1.3 样件镀膜处理

由于微波毫米波产品多采用高度集成的MMIC裸芯片配装,且元器件的精密、电路布线的精细,肉眼难以发现。

如图3所示,在样件内部存在尺寸为几微米到几十微米之间的锡珠。锡珠分布在引线、阻容器件附近或底部,或基板表面。通常明显可见的锡珠采用精细工具或者清洗方法清除,而藏匿在元器件底部或者产品线路狭窄空间中的却无法去除。在组装、调试和转运保护等过程稍有损伤,则破坏电气互联特性。

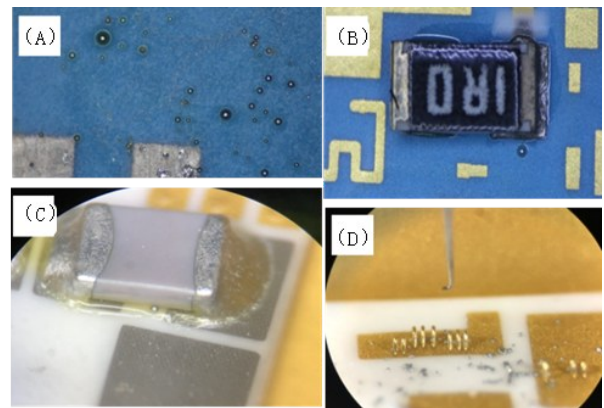


图3 某型号微波电路中锡珠可动多余物

Fig. 3 Removable excess of tin beads in a certain type of microwave circuit

基于此,镀膜前后工艺处理全流程如图4所示,其中防护过程是技术难点,既保证不影响Parylene C镀膜和膜层附着力,也满足防护的要求。采用硅橡胶GD414胶对封焊面进行保护。样件外侧绝缘子、螺纹孔及连接器采用安装插接头和3M胶带进行保护。后续去保护时便于操作,且对膜层的影响较小。

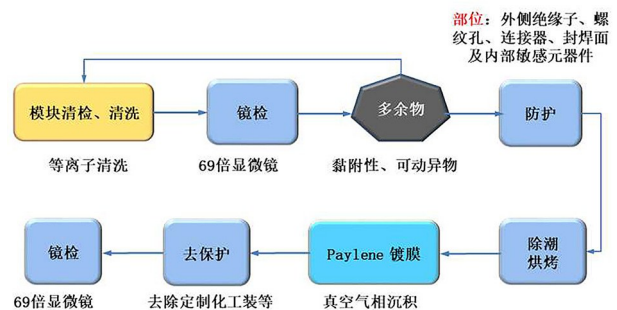


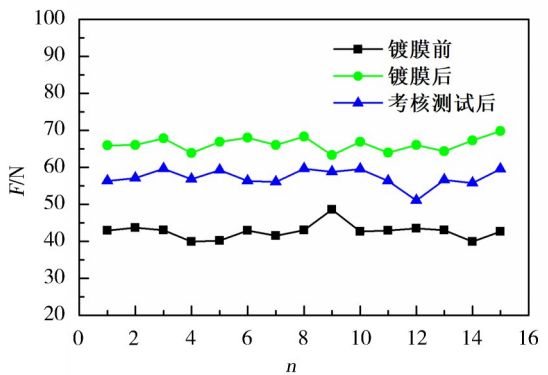
图4 微波毫米波电路Parylene C镀膜工艺流程

Fig. 4 Parylene C coating process for microwave millimeter wave circuit

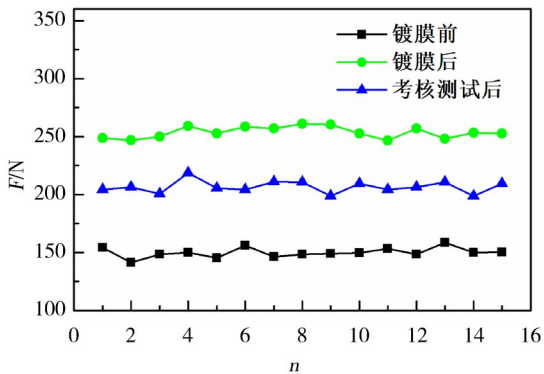
## 2 结果与结论

### 2.1 涂覆 Parylene 薄膜的微波组件 PIND 测试

由于锡珠是依靠具有一定黏附力的残留助焊剂附着在基板表面,试验选择铅锡焊接阻容后的 LTCC 基板(Dupont),通过调整焊接工艺制作了不同尺寸锡珠,如图5所示。经 Parylene C 涂覆后,再经温度循环和恒定加速度,而后对锡珠进行推切测试,研究涂覆膜对锡珠的固定作用。锡珠直径  $d < 0.5 \text{ mm}$  的样件,采用3只同型号的样件,内部含有大致相同的锡珠数量、大小。未镀膜时仅1只样件 PIND 测试合格;镀膜后3只均合格,从而明显提高样件的 PIND 测试通过率。



(a)  $0.5 \text{ mm} \leq d < 1 \text{ mm}$



(b)  $d \geq 1 \text{ mm}$

图5 微波电路中不同尺寸锡珠的推切力测试

Fig. 5 Shear force test of different size tin beads in microwave circuit

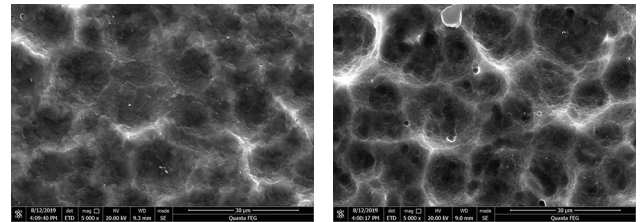
依图5得知样件镀膜后,其锡珠剪切强度增加了约83.5%,这是因为薄膜作为保护层,自身与基板的结合力较好,强化了对锡珠的包裹力,且 Parylene C 材料有较高的断裂强度、弹性模量和抗拉强度,在无尖锐工具刺破的情况下具有良好韧性和强度,可满足锁定锡珠的要求,所以镀膜后锡珠剪切强度显著增加,且提高了 PIND 测试合格率。

高低温循环和恒定加速度冲击后的锡珠剪切强度有所降低,因为 Parylene C 膜具有非等温结晶性<sup>[9]</sup>,

高低温测试较高的温度变化率(15~20 °C/min),促使薄膜异相成核进行二次结晶,结晶度提高而薄膜表现出脆性。当剪切作用在膜层上时,高分子链段因紧密排列而运动空间小,强度降低,由原有的韧性形变转变为韧性和脆性形变的结合体,故而剪切力有所降低,但是恒定加速度考核测试时仍能够完好的锁定多余物而不脱落。

以上分析,说明在微波产品中涂覆 Parylene 材料对直径  $d < 1 \text{ mm}$  以下的可动多余物的固定以及机械性具有一定可靠性。

Parylene C 薄膜是致密均一的薄膜,温度循环后部分膜层出现“凹陷”或褶皱凸起,说明膜层与元件表面有局部轻微剥离现象,如图6所示。这与产品表面未清洁彻底、烘烤除潮彻底有关。其次,是高温使得高分子链段运动而重新排布,结晶性增加,薄膜与原始状态比较局部表现出脆性,膜层均一性降低,但仍具有一定韧性可包覆多余物。



(a) 原始薄膜

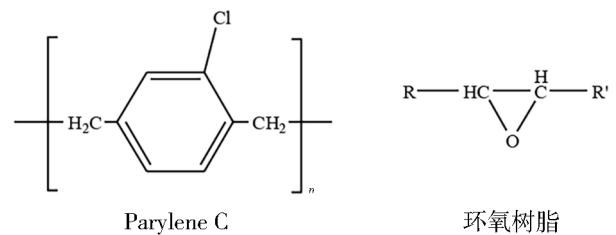
(b) 温循后

图6 Parylene C膜的SEM微观形貌

Fig. 6 SEM photographs of Parylene C film 5 000×

### 2.2 Parylene 薄膜与粘结用环氧导电胶兼容性分析

微波组件中的环氧导电胶操作温度为室温,固化温度为100~200 °C,而 Parylene C 薄膜聚合物在室温下成型,其高分子结构如图7所示。



Parylene C

环氧树脂

图7 Parylene C薄膜化学结构式和环氧树脂高分子结构

Fig. 7 Chemical structure of Parylene film and epoxy resin polymer structure

从化学结构得知两种高分子聚合物在室温下化学性质极其稳定。图7中 Parylene C 薄膜是粉料经680~700 °C高温发生 C—C 键裂解,由活性单体聚合而成,在微波产品的使用温度下,化学属性稳定。而环氧树脂中的活性基团(羟基、环氧基)在无亲电子



极性物质存在下,也保持聚合物固有属性,因此 Parylene C 薄膜和环氧导电胶不会发生化学反应,该薄膜对导电胶粘结性能无影响。

从微波组件的主要材料及其施工工艺分析可知,环氧导电胶与 Parylene C 薄膜可以兼容使用,对微波产品无质量隐患。

### 2.3 Parylene 薄膜与键合引线的匹配性分析

微波组件中的引线互联主要是金丝,硅铝丝,金丝、铝丝、Parylene C 的热胀系数(CTE)分别为  $1.46 \times 10^{-5}$ 、 $2.38 \times 10^{-5}$ 、 $3.5 \times 10^{-5}/K$ ,薄膜材料略大前两者。由于应用中膜层厚度一般控制在  $5 \sim 6 \mu m$ ,且气相沉积形成的薄膜自身无应力,自润滑性较好,高低温后的热收缩应力微乎其微,不会影响到引线弧高度。薄膜对键合强度的影响进行如下的分析。

涂覆 Parylene C 薄膜后的样件经温度循环、恒定加速度测试。键合引线 100% 非破坏性拉力测试,测试钩在两键合点中间位置。破坏性测试的失效模式为引线起弧点,测试数据见图 8~图 9。

由图 8~图 9 得知,涂覆后和温度循环、恒加测试后的破坏性键合强度远大于标准值,说明 Parylene C 薄膜适当的膜厚有助于增强金丝键合强度(提高 4~5 倍),因为通过外层薄膜对元件表面的“束缚力”,使得键合引线与基板的结合更加牢固。

目前选用厚膜电源模块、S 频段 MCM 频率综合

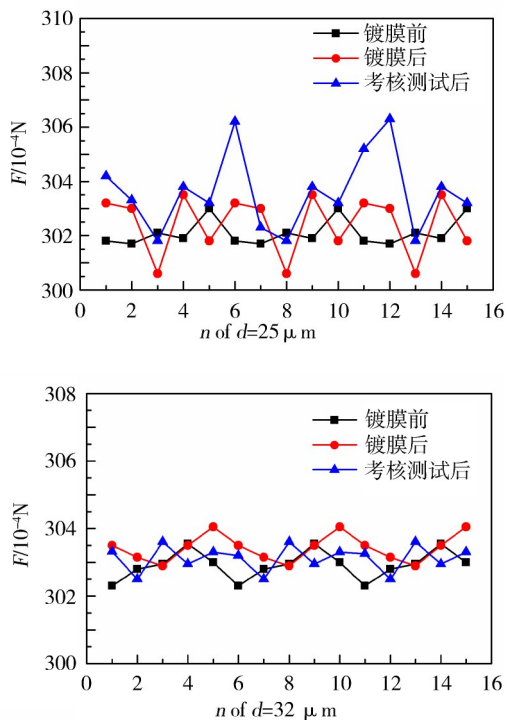


图 8 (A,B)Parylene 镀膜后非破坏性引线键合力测试  
Fig. 8 (A,B) Non-destructive wire bonding force test after parylene coating

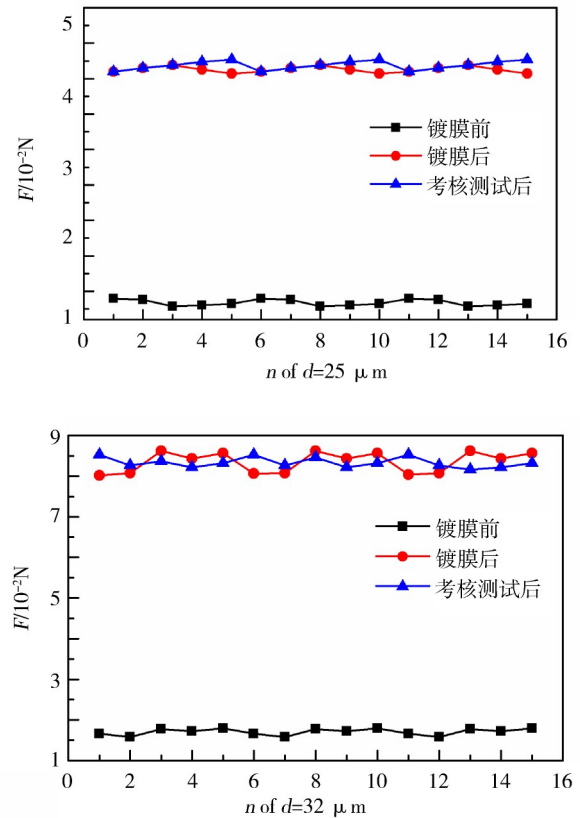


图 9 (C,D)破坏性键合力测试  
Fig. 9 (C,D) Destructive bonding force test

部件、Ku 频段放大器几类微波产品镀膜后的引线键合力均满足 GJB548 的相关要求,且对微波的电气连通性影响较小。实验结果说明 Parylene C 薄膜与键合引线具有良好的匹配性。

### 2.4 Parylene 薄膜与溴丙烷清洗剂的兼容性分析

目前多芯片微波组件为了清除芯片等元器件表面的多余物,采用溴丙烷清洗剂清除表面脏污。清洗剂与 Parylene C 材料的兼容性鲜有报道,故而进行如下的研究和分析。依据产品清洗要求将镀膜样件进行蒸洗 10 min,漂洗及超声 20 s 的膜层外观如图 10 所示。发现镀膜包覆的锡珠和元器件底部的助焊剂均锁定在膜层下方,达到良好的包覆作用,且不影响器件性能,同时保证产品 PIND 测试合格率提升,说明 Parylene 材料具有良好的防潮性,且与溴丙烷兼容性较好。

镀膜后的样件,经考核测试及溴丙烷雾化清洗

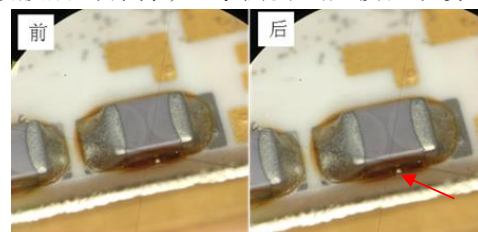


图 10 涂覆 Parylene 膜层气相清洗前后变化  
Fig. 10 Variations before and after vapor cleaning of parylene film

后,其引线的非破坏性键合力无明显差异,说明严苛的考核测试并未改变薄膜与基板的结合力和可靠性。因此,说明Parylene C薄膜与溴丙烷具有良好的兼容性,可靠性较好。

### 2.5 Parylene薄膜对微波组件的绝缘强度测试

绝缘强度是测量膜层对外加直流所呈现的电阻,依GJB 5807—2006要求<sup>[10]</sup>,一级、二级和三级电子产品的表面绝缘电阻都不应小于100 MΩ。测试Parylene C薄膜电阻为2 000 MΩ,满足测试指标。可见涂覆Parylene C后,能够对内部芯片等器件进行绝缘,与外界隔绝,对内部起到一定的电隔离保护作用。

### 3 结论

(1)Parylene C型薄膜对微波产品中直径 $d < 1$  mm锡珠多余物有良好防控作用,且提高微波组件的PIND等测试的合格率,带来较高经济效益。

(2)Parylene C薄膜材料与微波电路中的环氧型导电胶、引线键合及气相清洗等工艺和材料有良好的兼容性,且满足可靠性要求。

(3)高低温变化率的大小影响Parylene C薄膜的结晶性,对膜层强度有削弱作用。同时镀膜前的清洗、除潮干燥处理对膜层附着力至关重要。

(4)该薄膜在微波电路中有一定的绝缘强度和防护作用。但注意涂镀薄膜前对产品进行清洗和除潮处理,防止元器件表面的水汽影响电性能。

#### 参考文献

[1] 蒯永清,董昌慧,李益兵,等.微波混合集成电路射频裸芯片表面封装研究[J].电子工艺技术,2018,39(6):35-38.

KUA Yongqing, DONG Changhui, LI Yibing, et al. Research on the surface packaging of radio frequency bare chips for microwave hybrid integrated circuits [J]. Electronic Technology, 2018, 39(6): 35-38.

[2] 仝晓刚,敖辽辉,石秀锟等. Parylene在毫米波MMIC电路防护上的应用研究[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(1): 43-46.

TONG Xiaogang, AO Liaohui, SHI Xiukun, et al. Application research of Parylene in millimeter wave MMIC circuit protection [J]. Electronic Components and Materials, 2014, 33(1): 43-46.

[3] 柯曾喜. 聚对二甲苯在混合电路中应用技术研究[D]. 西安:材料物理化学, 2007.

KE Zengxi. Research on the application technology of parylene in hybrid circuits [D]. Xi'an: Physical Chemistry of Materials, 2007.

[4] KAMFELT C, TEGNANDER C, RUDNICKI J, et al. Investigation of parylene-C on the performance of millimeter-wave circuits [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(8): 3417-3425.

[5] DONG X, ZHANG M, LEI Y, et al. Parylene-MEMS technique-based flexible electronics [J]. China Science: Information Science, 2018.

[6] KAHOULI A, SYLYESTRE A, ORTEGA L, et al. Structural and dielectric study of Parylene C thin films [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(15): 179-181.

[7] MOKNI M, KAHOULI A, JOMNI F, et al. Dielectric investigation of Parylene D thin films: Relaxation and conduction mechanisms [J]. Journal of Physical Chemistry A, 2015: 150814131224001.

[8] GJB 548B—2005, 中华人民共和国国家军用标准[S].

GJB 548B—2005, National Military Standards of the People's Republic of China [S].

[9] 吉祥波,鲜晓斌,唐贤臣,等. Parylene C膜非等温结晶行为及动力学研究[J]. 现代塑料加工应用, 2007, 19(3): 42-44.

JI Xiangbo, XIAN Xiaobin, TANG Xianchen, et al. Non-isothermal crystallization behavior and kinetics of Parylene C membrane [J]. Modern Plastics Processing and Application, 2007, 19(3): 42-44.

[10] GJB GJB5807—2006, 中华人民共和国国家军用标准[S].

GJB GJB5807—2006, National Military Standards of the People's Republic of China [S].