

# 新型涂敷材料 Parylene AF<sub>4</sub> 的研究进展

赵宗峰, 鲜晓斌, 唐贤臣, 帅茂兵, 吉祥波  
(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** Parylene AF<sub>4</sub> 是一种新型的高分子敷型材料, 除了拥有 Parylene 同系列产品的共同性能外, 还具有更优异的抗紫外和抗老化性能。系统介绍了 Parylene AF<sub>4</sub> 环二体的合成方法、薄膜制备原理和性能参数, 并对其研究的热点领域及应用前景进行了展望。

**关键词:** Parylene AF<sub>4</sub>; 涂敷材料; 化学气相沉积; 沉积动力学

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)06-0023-05

## Overview of Parylene AF<sub>4</sub>, a new-type conformal polymer coating material

ZHAO Zong-feng, XIAN Xiao-bin, TANG Xian-chen, SHUAI Mao-bing, JI Xiang-bo  
(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Parylene AF<sub>4</sub> is a new type of conformal polymer coating materials, its film has not only the common properties of parylene series, but also the excellent anti-ultraviolet and anti-aging characteristics. The methods for Parylene AF<sub>4</sub> preparation, deposition process for film and the characteristic parameter of Parylene AF<sub>4</sub> are introduced. At the same time, the research focal domain and the future of application of Parylene AF<sub>4</sub> are reviewed.

**Key words:** Parylene AF<sub>4</sub>; conformal polymer coating material; chemical vapor phase deposition; kinetics of deposition

1947 年, Szwarc 在真空热裂解对二甲苯环二体时, 发现了该过程有聚对二甲苯生成<sup>[1]</sup>。Gorham 对该过程进行进一步研究, 发明了制备 Parylene 薄膜的有效途径——化学气相沉积法<sup>[2]</sup>。20 世纪 60 年代美国联合碳化物公司(Union Carbide Corporation)基于化学气相沉积法推出了 Parylene 系列新型高分子敷型涂层材料, 该产品系列主要包括 Parylene N、C、D<sup>[3-5]</sup>。此类薄膜材料采用真空化学气相沉积方式进行合成和涂敷, 无需使用溶剂, 不会产生很大的环境污染, 可使被涂敷的对象获得连续、均匀、致密的膜层。由于 Parylene 系列产品具有稳定性好、机械强度较高、介电常数低、电绝缘性能好以及优异的防水、防毒、防盐雾性能而被广泛应用于电子工业、汽车工业和文物保护等方面, 成为一类高防护性能化学气相沉积涂敷材料。

当前主要使用的 Parylene N、C、D 系列产品具有众多的优异性能, 但其抗紫外线、抗氧化性能较差, 易老化<sup>[6]</sup>, 这些不足在某种程度上限制了其应用。为改善上述缺陷, 在亚甲基上引入 F 原子, 可有效改善其抗紫外线和抗老化性能, 因此 Parylene AF<sub>4</sub> 应运而生, 成为一种新型的涂敷材料<sup>[7]</sup>。本文从 Parylene AF<sub>4</sub> 环二体的合成、薄膜制备过程及特性、热点研究领域和应用前景等几方面对该种新型材料进行综述。

## 1 环二体的合成方法

尽管 Parylene AF<sub>4</sub> 具有优异的性能, 但其单体 AF<sub>4</sub> 环二体合成困难, 限制了 Parylene AF<sub>4</sub> 的广泛应用。从 20 世纪 60 年代至今, 很多人致力于探索 AF<sub>4</sub> 的合成方法。1969 年, 美国联合碳化物公司采用高温裂解还原的方法<sup>[8]</sup>首次合成了 AF<sub>4</sub>, 合成反应式如图 1 所示。但是该方法获得的产品纯度差、收率低, 因此未能大规模生产。

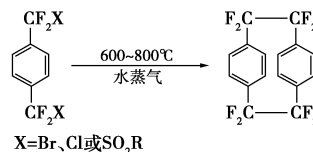


图 1 高温裂解还原法制备 Parylene AF<sub>4</sub> 单体

1993 年, Dolbier 研究小组采用低价态的 Ti 化合物作为还原剂脱溴<sup>[9]</sup>合成 AF<sub>4</sub>, 反应方程如图 2。该方法比第一种方法相对容易实现, AF<sub>4</sub> 收率达 32%。

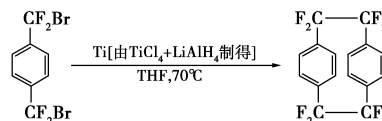


图 2 Ti 化合物作还原剂制备 Parylene AF<sub>4</sub> 单体

但是在该过程中需要较高的稀释倍数。浓度的增大会导致低聚合物含量的增加,因此限制了放大实验的可行性。

上述 2 种方法只能用于实验室合成,每次合成数量限定在克量级,无法实现批量生产。

1998 年, Dolbier 研究小组<sup>[10]</sup>采用廉价易得的 1,4-二(氯二氟甲基)苯为原料, Zn 作还原剂, 在非高稀释的条件下合成了 AF<sub>4</sub>, 如图 3, 收率可达 60%。美国 SCS 公司用此方法进行了放大实验, 从此实现了 AF<sub>4</sub> 工业化生产。

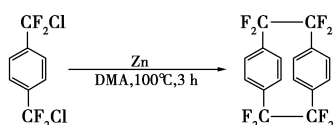


图 3 可放大的 Parylene AF<sub>4</sub> 单体合成方法

研究人员对 AF<sub>4</sub> 合成方法的研究一直未间断, 还有很多其他合成方法<sup>[11]</sup>, 如在高氟烷基卤化物或者  $\alpha, \omega$ -二卤代高氟烷烃的霍夫曼降解反应中采用 PbBr<sub>2</sub>/Al 氧化还原体系来制备 AF<sub>4</sub> 单体<sup>[12]</sup> 等。目前国内仅有少数公司从事该产品的研制与开发, 国外 SCS 公司已经有小批量生产和销售。

## 2 薄膜性能及制备工艺

### 2.1 制备原理及沉积工艺

Parylene AF<sub>4</sub> 薄膜的制备同样采用化学气相沉

积法<sup>[13]</sup>, 其化学反应方程式如图 4 所示。与 Parylene 系列的其他涂敷型材料所不同的是 Parylene AF<sub>4</sub> 所需的沉积温度较低<sup>[14]</sup>, 要求基体温度低于 0℃, 这是由亚甲基上 F 取代基所造成的。亚甲基上取代基团不同, 由于空间位阻效应和电子效应的差异导致单体自由基的活性不同, 进而使得沉积温度也略有不同<sup>[15]</sup>。Parylene N 的沉积温度小于 30℃, Parylene C 的沉积温度小于 90℃, Parylene D 的沉积温度小于 50℃。

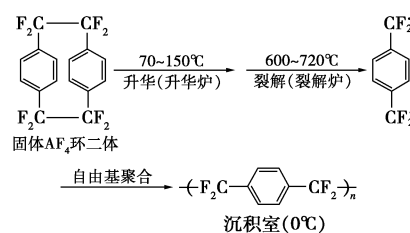


图 4 Parylene AF<sub>4</sub> 薄膜制备原理

Parylene 涂敷过程是在专用的沉积设备中完成的: 固体环二体在升华炉内气化, 进入裂解炉后在高温下裂解为单体自由基, 接着进入沉积室进行自由基聚合生成 Parylene 薄膜。真空泵用来确保整个薄膜制备过程反应体系的真空度, 冷阱收集未反应完全的残余气体。现有的沉积设备和已知的沉积参数对沉积 Parylene N、C、D 是很有效的<sup>[16-17]</sup>。

但是由于 Parylene AF<sub>4</sub> 单体分子的特殊性, 使得现有的设备不能够提供有效的沉积控制和较高的

(上接第 22 页)

- [25] Tang P, Raper J A. Modelling the settling behaviour of fractal aggregates—a review[J]. Powder Technology, 2002, 123(2/3): 114 - 125.
- [26] Muthunayagam A E, Ramamurthi K, Paden J R. Modelling and experiments on vaporization of saline water at low temperatures and reduced pressures[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5/6): 941 - 952.
- [27] El-Fiqi A K, Ali N H, El-Dessouky H T, et al. Flash evaporation in a superheated water liquid jet [J]. Desalination, 2007, 206(1/2/3): 311 - 321.
- [28] Aguilar G, Majaron B, Verkruysse W, et al. Theoretical and experimental analysis of droplet diameter, temperature, and evaporation rate evolution in cryogenic sprays [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(17): 3201 - 3211.
- [29] Belarbi R, Ghiaus C, Allard F. Modeling of water spray evaporation: Application to passive cooling of buildings [J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1540 - 1552.
- [30] Yanniotis S, Xerodemas K. Air humidification for seawater desalination [J]. Desalination, 2003, 158(1/2/3): 313 - 319.
- [31] Heitzer M, Staat M, Reiners H, et al. Shakedown and ratcheting under tension-torsion loadings: Analysis and experiments [J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 225(1): 11 - 26.
- [32] 周兴东, 马学虎, 张宇, 等. 含有不凝气体的蒸汽滴状冷凝传热实验研究[J]. 工程热物理论, 2004, 25(6): 1001 - 1003.
- [33] Sparrow E M, Lin S H. Condensation heat transfer in the presence of a noncondensable gas[J]. Journal of Heat Transfer, 1964, 76(8): 430 - 436.
- [34] Zhu A M, Wang S C, Sun J X, et al. Effect of high fractional noncondensable gas on condensation of dewaporation desalination process[J]. Desalination, 2007, 214(1/2/3): 128 - 137.
- [35] Cheng H G, Wang S C. Modelling and experimental investigation of humidification-dehumidification desalination using a carbon-filled-plastic shell-tube column[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 15(4): 478 - 485.
- [36] Canbolat S, Akin S, Kovscek A R. Noncondensable gas steam-assisted gravity drainage [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 45(1/2): 83 - 96.
- [37] Oh S, Revankar S T. Effect of noncondensable gas in a vertical tube condenser [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(16): 1699 - 1712.
- [38] Younos T, Tulou K E. Overview of desalination techniques [J]. Journal of Contemporary Water Research and Education, 2005, 132: 3 - 10. ■

原料利用率及所需的涂层速率。美国 Specialty Coating Systems 公司等<sup>[18]</sup>在原有设备的基础上在沉积室内增加了基体控温装置和沉积室壁的加热装置(防止腔室壁上沉积),有效地提高了原料利用率并成功实现了 Parylene AF<sub>4</sub> 在硅基体上的涂敷。Sutcliffe 等<sup>[14]</sup>给出了 Parylene AF<sub>4</sub> 的沉积工艺参数:气化室压力控制在 13.30 Pa 左右,裂解温度 650℃;沉积室压力控制在 2.66~5.32 Pa,基体温度为 0℃,沉积速率约为  $1.5 \times 10^{-8}$  cm/min。

## 2.2 性能

Parylene C 是该系列产品中性能较优、应用最广泛的物质。表 1 给出了 Parylene AF<sub>4</sub> 与 Parylene C 各种性能参数的比较。

表 1 Parylene AF<sub>4</sub> 与 Parylene C 各种性能参数对比

性能	Parylene AF <sub>4</sub>	Parylene C	测试方法
摩擦系数			
静态	0.145	0.290	ASTM D1894
动态	0.130	0.275	
热稳定性 <sup>①</sup>	> 450℃	< 300℃	ASTM E1131
屏蔽性能			
吸水性(%)	< 0.01	< 0.1	ASTM D570
透湿性 <sup>①</sup> / $10^{-4}$ g·(cm <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup>	8.84	10.54	ASTM F1249
气体渗透性 <sup>①</sup> /(cc·mm)/(m <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup>			
N <sub>2</sub>	4.8	5.6	Mocon MULTI-TRAN 400
O <sub>2</sub>	23.5	27.3	
CO <sub>2</sub>	95.4	112.4	
耐候性			
紫外线稳定性/h	> 2000	< 300	ASTM G154
电气性能			
介电强度/V·μm <sup>-1</sup>	212.6	196.9	ASTM D149, RT
介电常数			
60 Hz	2.21	3.15	ASTM D150, RT
1 kHz	2.20	3.10	
1 MHz	2.17	2.95	
介质损耗因子			
60 Hz	0.0002	0.0200	ASTM D150, RT
1 kHz	0.0020	0.0190	
1 MHz	0.0010	0.0130	

注:①为笔者所在课题组测试结果。

通过对比可以看出, Parylene AF<sub>4</sub> 除具有 Parylene C 产品的各种优异性能外, 在热稳定性和抗紫

外线性能方面远远超过 Parylene C。从化学键的理论分析可知, 氟原子的范德华半径只比氢原子的大 10%, 因此氟取代不会导致较大的空间结构变化, 有利于提高薄膜的致密性; F—C 键是已知最强的共价键, 键能高达 445 kJ/mol, 仅次于 C—H 键, 但是键能却比 C—H 键强得多, 因而能抵抗紫外线对它的破坏, 改善抗紫外线能力; 氟原子取代亚甲基上的氢原子也极大地改变化学键的极性, 进而提高了其热稳定性和抗老化性能<sup>[19-21]</sup>。

## 3 研究领域

由于 Parylene AF<sub>4</sub> 是 Parylene 系列涂敷型材料中的新产品, 有待于进一步的深入研究。从近年的文献来看, 主要研究领域集中在单体合成、沉积动力学、改善薄膜与基体结合力(等离子体处理和硅烷偶联剂)、表面改性等几个方面。

### 3.1 单体合成

Parylene AF<sub>4</sub> 单体的合成难度较大, 成为限制该材料研究进展的瓶颈。自 20 世纪 60 年代初就有很多人致力于合成方法的研究, 前面已经给出了较为详细的概括, 这里就不再赘述。

### 3.2 沉积动力学

Parylene 系列涂敷型材料的制备过程均为化学气相沉积过程, 很多人致力于动力学模型研究<sup>[22-24]</sup>。典型的动力学控制的化学气相沉积反应表现为沉积速率随着温度的增加而增大(有利于克服反应活化能), 而实验数据表明 Parylene 的反应速率随温度的增加而降低, 这种行为显然与之不符, 可见 Parylene 的沉积动力学是由单体的表面吸附控制的。目前的动力学模型可概括为基于物理吸附和基于化学吸附 2 类。

基于物理吸附的动力学模型研究较多, 分别采用 Flory 吸附、Langmuir 吸附及 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 吸附来定义生长薄膜表面的单体浓度, 模型方程表达为包括表面反应或者表面和聚集态反应(假定在薄膜生长过程中单体扩散进入薄膜的聚集态中)的形式, 用单体压力和基体温度的函数来描述沉积速率。这些模型均建立在动力学控制的基础上, 方程中包含动力学速率常数和覆盖率, 例如速率方程形式为: 速率 =  $(K_i K_p D)^{1/2} (\theta)^2$ , 其中  $K_i$ 、 $K_p$  和  $D$  是引发、增长和扩散速率常数,  $\theta$  是覆盖率。上述 3 种基于物理吸附的模型中, 表面覆盖率(表面浓度)随着温度的降低和压力的增加而增加, 覆盖率主导着方程使得模型在一定范围内近似地符合实验

数据。

基于化学吸附的动力学模型是由美国的 Fortin 等<sup>[25]</sup>建立的,他们采用实验数据充分说明了该模型能够较为准确地预测稳态沉积时 Parylene N 的沉积速率,是目前较为合理的一种动力学模型,该模型也能适用于 Parylene 系列的其他产品,包括 Parylene AF<sub>4</sub>,但是需要实验来确定该方程中的某些参数,这方面的研究未见报道。

### 3.3 改善薄膜与基体结合力

Parylene AF<sub>4</sub> 是典型的含氟聚合物,由于其表面的相对惰性而导致在界面上缺少一定的化学相互作用力,使其与大多数具有光滑或非多孔表面的基体结合力相对较差。Parylene 系列的其他产品也存在类似问题,这个缺点在很大程度上限制了其应用<sup>[26-27]</sup>。改善薄膜与基体结合力的途径研究主要集中在等离子体增强沉积<sup>[28-30]</sup>和硅烷偶联剂的使用<sup>[31-32]</sup>。等离子体对基体处理能够实现表面对表面的清洗,并对表面具有活化作用,从而能增强薄膜与基体的结合力;在基体表面采用等离子体增强沉积的方法引入聚合物中间层(如聚甲烷等),该中间层对基体和薄膜都有较好的结合力,成为增强结合力的纽带;沉积过程中采用射频等离子,除能改善结合力外,还能够起到加快沉积速率、增强薄膜性能的作用。改善薄膜与基体结合力的另一种途径是采用硅烷偶联剂,对 Parylene 薄膜较为有效的是 KH 系列(如 KH-560、KH-570 等)。采用蒸镀的方法在基体表面敷上薄薄的一层偶联剂(约几十个 nm),然后再进行 Parylene AF<sub>4</sub> 的薄膜涂敷,可以起到增强薄膜与基体结合力的作用。

### 3.4 表面改性

Parylene AF<sub>4</sub> 薄膜表面改性也是一个研究热点,主要是改善薄膜表面的浸润性。归结起来有如下几种方法:引入官能团、接枝改性和酸溶液表面处理。Martini 等<sup>[27]</sup>将水蒸气通过加热的钨丝对 Parylene AF<sub>4</sub> 薄膜表面进行处理,X 射线光电子能谱(XPS)分析结果表明,在薄膜表面引入了氧官能团。Goda 等<sup>[33]</sup>用苯甲酮作引发剂紫外光引发成功地在薄膜表面接枝了聚 2-异丙酰基乙氧基磷酸胆碱,并用原子力显微镜证实了接枝物的存在。Pimanpang 等<sup>[34]</sup>采用硫酸和磷酸溶液对薄膜表面进行处理,浸润角略有改变。表面改性的研究有助于拓展 Parylene 在生物医学领域中的应用。

### 3.5 离子束辅助沉积

离子束辅助沉积过程中,单体分子在离子束的

作用下成为带电粒子,从而既加快沉积速率,又能改善薄膜与基体的结合力。Khabari 等<sup>[35]</sup>采用离子束辅助沉积制备薄膜,该研究表明 Parylene 单体分子被离子化,加速了薄膜在基体上的生长速率;同时原子力显微镜的结果表明薄膜表面粗糙度增大,结合力得到改善。Seong 等<sup>[36]</sup>在氧气存在的条件下用 Ar 离子处理薄膜表面,研究发现处理过的薄膜表面接触角减小表面能增加,XPS 分析结果显示有亲水基团的生成,并且证实了薄膜在金表面结合力的增加与离子剂量成函数关系。

### 3.6 薄膜复合材料的制备

薄膜复合材料也是一个研究领域,Sutcliffe 等<sup>[14]</sup>将铝的氧化物薄膜以碳铝键的形式与 Parylene AF<sub>4</sub> 复合,制备了高稳定性的复合材料。另外,关于 SiN<sub>x</sub> 与 Parylene 的复合层也有较多研究<sup>[37-38]</sup>。总之,Parylene AF<sub>4</sub> 涂敷材料的研究将是一个很有潜力的研究领域。

笔者所在课题组近年来主要做了如下工作:①沉积工艺的研究,包括沉积压力、沉积温度等条件对成膜质量的影响;②结合力的研究,基体表面特性及成膜工艺对结合力的影响;③老化方面的研究,主要是自然老化、辐照老化等方面;④热处理对薄膜质量的影响;⑤薄膜微观结构的研究及结晶状况研究。由于 Parylene C 存在抗紫外性差、易老化等不足,笔者所在课题组寻找了新的替代材料——Parylene AF<sub>4</sub>,目前将对该领域进行深入地研究。

## 4 应用前景与展望

据美国专利局统计数据显示,2002 年有 267 项被授予的专利提到了 Parylene 的某种应用。相比而言,1995 年只有 43 项。目前,从普通领域到鲜为人知的领域,Parylene 都有应用<sup>[7,32,39]</sup>,其所涵盖的应用市场从太空深处的飞行器、汽车发动机一直到心脏调搏器、微流体控制装置的制造、图像制作设备及军事电子产品等。在每种应用中,选择 Parylene 都是基于其一种或几种基本特性。

可见,随着自动化沉积设备的出现及涂敷效率的不断改进,不同技术领域对这种聚合物的日益熟悉以及对 Parylene AF<sub>4</sub> 深入研究和认识的加深,其应用广度将进一步得到拓宽。

### 参考文献

- [1] Szwarc M. The C—H bond energy in toluene and xylenes[J]. Journal of Chemical Physics, 1948, 16: 128 - 136.

- [2] Gorham W F. A new, general synthetic method for the preparation of linear poly-*p*-xylylenes [J]. *Journal of Polymer Science*, 1966, 4 (12): 3027 - 3039.
- [3] 何轶, 周倍, 吴抗震, 等. 聚-氟对二甲苯的合成及膜性能研究 [J]. *复旦大学学报: 自然科学版*, 2004, 43(4): 668 - 671.
- [4] 浦鸿汀, 孙霞容. 聚对苯撑二甲苯系列涂层的制备及其应用进展 [J]. *高分子通报*, 2004(2): 78 - 84.
- [5] 吉祥波, 鲜晓斌, 唐贤臣, 等. 热处理对 Parylene C 薄膜性能的影响 [J]. *现代塑料加工应用*, 2007, 19(4): 9 - 11.
- [6] 李小龙, 褚明福, 帅茂兵, 等. 聚对二甲苯膜老化的研究进展 [J]. *材料导报*, 2006, 20(5): 54 - 58.
- [7] Dolbier Jr W R. Parylene-AF<sub>4</sub>: A polymer with exceptional dielectric and thermal properties [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2003, 122: 97 - 104.
- [8] Chow S W, Pilato L A, Wellwright W L. The synthesis of 1, 1, 2, 2, 9, 9, 10, 10, -octafluoro [2, 2] paracyclophane [J]. *Journal of Organic Chemistry*, 1970, 35: 20 - 22.
- [9] Union Carbide Chemicals & Plastics Technology Corporation. Processes for the preparation of octafluoro-[2, 2] paracyclophane: US, 5210341 [P]. 1993 - 05 - 11.
- [10] Dolbier Jr W R, Duan J-X, Roche A J. Parylene AF<sub>4</sub> Synthesis: US, 5841005 [P]. 1998 - 11 - 24.
- [11] Dolbier Jr W R. A new and practical synthesis of octafluoro[2, 2]paracyclophane [J]. *Journal of Organic Chemistry*, 1997, 62: 7500 - 7502.
- [12] Zhu Shi-zheng, Mao Yun-yu, Jin Gui-fang. A convenient preparation of octafluoro[2, 2]paracyclophane and dodecafluoro[2, 2]paracyclophane [J]. *Tetrahedron Letters*, 2002, 43: 669 - 671.
- [13] Wu P K, Yang G-R, You L. Deposition of high purity parylene-F using low pressure low temperature chemical vapor deposition [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1997, 26(8): 949 - 953.
- [14] Sutcliffe R, Lee W W. Characterization and aluminum metallization of a parylene AF-4 surface [J]. *Applied Surface Science*, 1998, 126: 43 - 56.
- [15] Kramer P, Sharma A K, Hennecke E E, *et al.* Polymerization of para-xylylene derivatives (parylene polymerization): I. Deposition kinetics for Parylene N and Parylene C [J]. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 1984, 22: 475 - 491.
- [16] 王永刚. Parylene: 一种新型机载设备敷型防护涂层材料 [J]. *航空精密制造技术*, 2002, 138(1): 16 - 18.
- [17] 吴礼群. Parylene 敷型涂层 [J]. *电子机械工程*, 2004, 20(6): 51 - 53.
- [18] Specialty Coating Systems Inc. Method and apparatus for the deposition of parylene AF<sub>4</sub> onto semiconductor wafers: US, 5538758 [P]. 1996 - 06 - 23.
- [19] Zhai Yian. The chemistry of 1, 1, 2, 2, 9, 9, 10, 10-octafluoro[2, 2]paracyclophanes [D]. Florida: University of Florida, 2005.
- [20] 张伟, 徐杰, 孙志强, 等. 芳香族含氟化合物的特性及合成 [J]. *精细与专用化学品*, 2005, 13(16): 1 - 4.
- [21] 彭顺金, 吴伟卿, 李建宗, 等. 氟烯烃共聚合的研究进展 [J]. *现代化工*, 2005, 25(9): 5 - 10.
- [22] Beach W F. A model for the vapor deposition polymerization of *p*-xylylene [J]. *Macromolecules*, 1978, 11(1): 72 - 86.
- [23] Rogojevic S, Moores J A, Gill W N J. Modeling vapor deposition of low-k polymers: Parylene and polynaphthalene [J]. *The Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1999, 17(1): 266 - 274.
- [24] Fortin J B. Poly-para-xylylene thin films: A study of the deposition chemistry, kinetics, film properties, and film stability [D]. NY: Rensselaer Polytechnic Institute, 2001.
- [25] Fortin J B, Lu T-M. A model for the chemical vapor deposition of poly (para-xylylene) (parylene) thin films [J]. *Chemistry of Materials*, 2002, 14: 1945 - 1949.
- [26] Sharma A, Yasuda H. Effect of glow discharge treatment of substrates on parylene-substrate adhesion [J]. *The Journal of Vacuum Science and Technology*, 1982, 21(4): 994 - 998.
- [27] Martini D, Shepherd K, Sutcliffe R. Modification of Parylene AF<sub>4</sub> surfaces using activated water vapor [J]. *Applied Surface Science*, 1999, 141: 89 - 100.
- [28] Sharma A, Yasuda H. Effect of surface energetics of substrates on adhesion characteristics of poly(*p*-xylylenes) [J]. *The Journal of Adhesion*, 1982, 13: 201 - 214.
- [29] Yu Qingsong, Deffeyes J, Yasuda H. Engineering the surface and interface of parylene C coatings by low-temperature plasmas [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2001, 41: 247 - 253.
- [30] Yamagishi F G. Investigations of plasma-polymerized films as primers for Parylene C coatings on neural prosthesis materials [J]. *Thin Solid Films*, 1991, 202(1): 39 - 50.
- [31] Fortin J B, Lu T M. Chemical vapor deposition polymerization: The growth and properties of parylene thin films [M]. US: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [32] 顾丽云. 聚对二甲苯的制备及其应用 [J]. *南化科技*, 1993, 14(3): 18 - 22.
- [33] Goda T, Konno T. Photoinduced phospholipid polymer grafting on Parylene film: Advanced lubrication and antibiofouling properties [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 54: 67 - 73.
- [34] Pimanpang S, Wang P I, Senkevich J J. Effect of hydrophilic group on water droplet contact angles on surfaces of acid modified SiLK and Parylene polymers [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects*, 2006, 278: 53 - 59.
- [35] Khabari A, Urban F K. Partially ionized beam deposition of parylene [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2005, 351: 3536 - 3541.
- [36] Seong J W, Kim K W, Beag Y W. Effects of ion bombardment with reactive gas environment on adhesion of Au films to Parylene C film [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 476: 386 - 390.
- [37] Beche E, Berjoan R, Viard J. XPS and AES characterization of SiN<sub>x</sub>: H layer deposited by PECVD on Parylene C [J]. *Thin Solid Films*, 1995, 258: 143 - 150.
- [38] Chiang C C, Wu D S, Lin H B. Deposition and permeation properties of SiN<sub>x</sub>/parylene multilayers on polymeric substrates [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200: 5843 - 5848.
- [39] 胡国贞, 陈梦雪, 肖湘竹. 薄膜涂层材料: 聚对二甲苯 [J]. *成都教育学院学报*, 2005, 19(1): 43 - 44. ■