

脉冲等离子体推力器羽流沉积薄膜的结构 与光学性质研究*

张锐[†] 张代贤 张帆 何振 吴建军[‡]

(国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙 410073)

(2012年6月15日收到; 2012年8月23日收到修改稿)

为了研究脉冲等离子体推力器羽流污染特性, 把握脉冲等离子体推力器羽流沉积薄膜性质, 利用质谱仪对推力器羽流残余气体成分进行了分析, 利用红外傅里叶光谱、光电子能谱及紫外可见光分光光度计对推力器羽流区阴极侧不同方位角处沉积薄膜的结构及光学性质进行了诊断. 研究表明, 推力器羽流中主要存在 C, F, CF, CF₂ 和 CF₃ 气体分子; 在各方位角处脉冲等离子体推力器羽流沉积生成了低氟碳比碳氟薄膜; 沉积薄膜微观结构以 30° 角为界在羽流不同区域中具有不同的变化趋势; 羽流沉积薄膜具有对波长小于 500 nm 的光低透射率及增强反射率的光学特性, 受薄膜性质的影响, 其光学特性具有极大的角度依赖性.

关键词: 脉冲等离子体推力器, 羽流, X 射线光电子能谱, 红外傅里叶光谱

PACS: 52.75.Di, 82.80.Pv, 78.30.-j

DOI: 10.7498/aps.62.025207

1 引言

随着微小卫星技术的迅速发展, 迫切需要发展与之相适应的航天器姿轨控技术. 固体烧蚀型脉冲等离子体推力器 (ablative pulsed plasma thruster, APPT) 是以固体为工质的脉冲等离子体推力器, 具备比冲高、冲量小、平均耗电功率低、结构简单等优点, 十分适用于微小卫星的空间应用, 适合执行控制精度高的推进任务^[1].

聚四氟乙烯 (PTFE) 是一种性质优良的绝缘体, 具有优良的介电性, 良好的热稳定性, 较低的脱气性, 可在 -190 °C—260 °C 较宽温度范围内使用, 其独一无二的优良特性使其十分适用于 APPT 作为工质使用^[2]. 但是 APPT 工作时, PTFE 烧蚀电离形成的由离子、电子及中性气体分子组成的混合流体被喷出并沉积在航天器、太阳帆板及星载光学器件表面形成薄膜物质, 薄膜自身的光学、介电及热物性会对其附着基体产生影响, 造成太阳帆板发电能力下降, 星载精密光学系统观测失真, 航天器

表面充电等不良影响^[3,4].

充分掌握 APPT 羽流沉积物的成分及分布, 对于研究 APPT 羽流与航天器直接相互作用具有重要的意义. 1978 年, Guman 等人^[5] 利用红外傅里叶光谱 (FTIR) 对 APPT 羽流沉积薄膜的化学结构进行分析, 但是由于沉积基底未经良好清洁, 未能对羽流沉积物的结构成分得到清晰的认识. 1979 年, Rudolph 等人^[6] 首次利用光电子能谱 (XPS) 对 APPT 羽流沉积物的成分进行了分析, 但受使用仪器的限制, 其只能诊断出沉积物中含有 F 的成分, 并推测沉积物为 PTFE. 2000 年, Arrington 等人^[7] 利用俄歇电子能谱对 APPT 羽流沉积物进行分析, 诊断出沉积物成分主要包括 C, F 及少量的 O, N, Fe, Si 等元素, 通过对比石英晶体基底沉积前后光学特性的变化, 得出与推力器喷口平行的 70° 及 90° 方位角度处, 羽流污染对于光学仪器的危害可以近似忽略的推断, 但是该研究并未对不同方位角度处沉积物成分结构及光学特性变化的深层原因进行探究. 之后的针对 APPT 羽流污染研究的重点

* 国家自然科学基金 (批准号: 11172327) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: nudzhang@163.com

[‡] 通讯作者. E-mail: jjwu@nudt.edu

均放在了羽流沉积物中性粒子分布及其对工质利用率影响的探讨之上^[3,4],未对 APPT 羽流沉积污染特性展开进一步深入研究.在 2007 年与 2011 年,Hamajima 与 Kimura 等人^[8]分别利用 APPT 沉积得到了类金刚石碳膜及非晶态碳氟膜,但是由于研究方向与重点的不同,其研究结果对揭示 APPT 羽流污染特性无本质上的指导意义.

据以上相关研究可见,到目前为止基本未见有关 APPT 羽流沉积薄膜结构成分空间分布特性的研究报道.APPT 放电过程中存在着复杂的等离子体化学反应,并形成多种反应基团,不同方位处羽流沉积薄膜的结构成分是 APPT 羽流区中反应基团种类及其分布的间接反映;沉积薄膜的光学、介电及热性能等特性均与薄膜的结构及性质密切相关,沉积薄膜的性质对航天器及星载设备具有直接的影响.因而,对 APPT 羽流沉积薄膜结构及其分布的研究对于揭示其对航天器及星载设备性能的影响,指导 APPT 在航天器上的集成安装,挖掘 APPT 工作机理,建立完善的羽流模型均具有十分重要的意义.

本文针对 APPT 羽流在垂直推力器极板平面内偏向阴极侧污染严重的特点,利用 FTIR, XPS 研究了 APPT 羽流在该平面内阴极侧不同角度处沉积所得薄膜的结构成分,并利用紫外可见分光光度计对沉积薄膜的光学特性进行了诊断研究.

2 实验设备及分析方法

本实验室研发的尾部馈送式 APPT 实验样机采用 4 个单电容容量 3 μF ,耐压 2000 V 的低内阻电感聚酯薄膜电容器并联作为推力器储能装置,实验中电容充电至 1500 V,系统初始能量 E_0 为 13.5 J,推力器以 1 Hz 频率工作,平均等效功率 13.5 W;推力器极板采用无氧铜材料,极板长 35 mm,宽 15 mm,厚 4 mm,极板间距 45 mm;以自制立方体 PTFE 作为工质,其烧蚀暴露端面尺寸为 45 mm \times 15 mm.羽流污染沉积架由两个直径 1.5 m,中心角 240° 的圆环组成,沉积样品支撑杆长度可根据研究需要调整,以便于对 APPT 羽流区内不同位置处沉积物进行收集.

实验中,推力器喷口朝下安装在真空舱顶部位置,以消除重力及真空舱壁羽流回流对实验结果的影响.极限真空度 4×10^{-4} Pa,直径 2.5 m、长 3 m 的真空舱为推力器提供高空模拟工作环境,推力器

工作时真空舱压力为 3×10^{-3} Pa.实验中分别采用 6051-T6 铝合金圆片(直径 1.5 cm)及方形玻片(2 cm \times 2 cm \times 1 cm)作为基片,用于羽流沉积物的收集,如图 1 所示,基片被安装在 APPT 喷口下游距离工质端面中心点 15 cm 半径的圆上,以推力器喷口中心线为 0° 位置,从 0° 到 90° 每隔 15° 置有一个基片.为消除材料表面污染物对测量结果的影响,基片在使用前先后经过 20 min 丙酮、无水乙醇及去离子水超声波清洗,并置于 70° 干燥箱中烘干后安装使用,沉积过程中,推力器放电工作 54000 次.

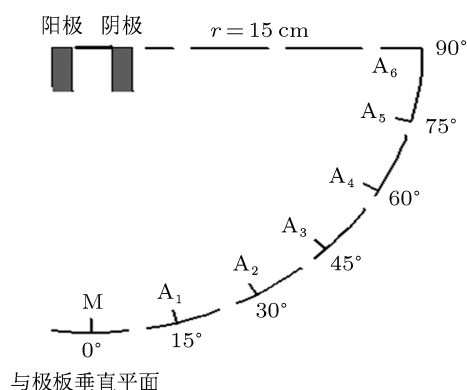


图 1 基片分布位置

采用 HAL 201-RC 四极杆质谱仪,对 APPT 放电工作 30 min 后羽流残余气体成分进行分析.质谱仪测量探头置于推力器通道中心平面距推力器极板 1 m 位置处,扫描质量数范围 0—90 amu,分辨率 0.1 amu.采用 FTIR 及 XPS 对 APPT 羽流沉积物的结构进行分析.实验中将铝合金基底上沉积薄膜刮下,与烘干的溴化钾混合压片制样,采用 Bruker Vertex-70 型傅里叶变换红外光谱仪测量各样品的红外透射光谱,扫描波数范围 400—4000 cm^{-1} ,扫描步长 4 cm^{-1} ,扫描次数 32 次.采用 $K\alpha 1063$ 光电子谱仪测量各角度处沉积薄膜的 X 射线光电子能谱,该仪器采用 $\text{AlK}\alpha$ 为 X 射线源,测量所得数据利用 thermo advantage 4.8 软件处理,利用 C—C (284.7 eV) 对扫描所得 XPS 光谱进行电荷补偿校准,通过对 C1s 峰的分峰拟合得到沉积薄膜化学结构及其含量.根据下式可计算得到薄膜中氟碳比 $K_{\text{F/C}}$:

$$K_{\text{F/C}} = \frac{A_{\text{F}}/S_{\text{F}}}{A_{\text{C}}/S_{\text{C}}}, \quad (1)$$

其中, A_{F} , A_{C} 分别为 F1s, C1s 谱峰面积, S_{F} , S_{C} 分别为 F, C 元素灵敏度因子,其值分别为 4.43, 1.00.

采用 NT-MDT TS-150 扫描探针显微镜以半接触模式观测了沉积薄膜表面形貌, 扫描范围 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 每个样品表面取四个扫描样本, 利用 NOVA 软件对获得的形貌数据进行分析, 取四个样本的均方根表面粗糙度值的平均值作为该角度处沉积薄膜均方根表面粗糙度值 R_{rms} ; 采用 HITACHI S-4800 场发射扫描电子显微镜对喷金处理后玻璃基沉积薄膜截面形貌进行分析, 得到了各角度处沉积薄膜厚度; 采用 U-4100 型紫外-可见分光光谱仪获得玻璃基沉积薄膜的透射光谱及反射光谱, 波长范围 300—1500 nm.

3 实验结果及讨论

3.1 APPT 羽流残余气体成分分析

由图 2 所示为 APPT 羽流残余气体质谱图, 出现在 31, 50 及 69 amu 处的较高谱峰分别对应 CF , CF_2 及 CF_3 分子, 在 12, 19 amu 处的谱峰则分别对应着 C, F, 这些成分均来自于 PTFE 工质烧蚀产物; 在 1, 16, 18, 28, 32, 44 amu 处的谱峰则分别对应真空舱内残余空气及推力器本体材料脱附气体中的 H, O, H_2O , N_2 , O_2 及 CO_2 成分; 而 63 amu 及其他位置处幅值很低的信号主要对应于铜极板烧蚀及推力器本体材料溅射产物.

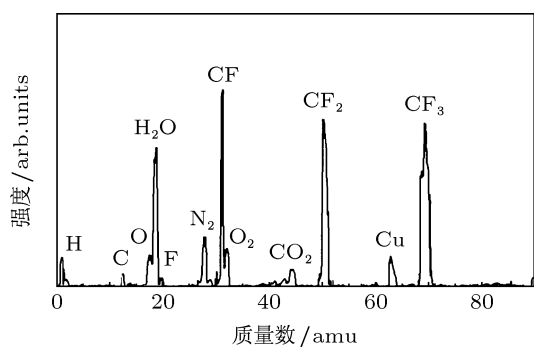


图 2 APPT 羽流残余气体质谱图

3.2 沉积薄膜的 FTIR 分析

图 3 为中心 M 位置处沉积薄膜的傅里叶变换红外透射谱图. 由图可见, APPT 羽流沉积薄膜具有复杂的光谱谱峰结构, 其大致可分为以下几个红外吸收区: $850\text{--}1500 \text{ cm}^{-1}$ 的 $\text{C}-\text{F}_x$ ($x=1,2,3$) 和 $\text{C}-\text{H}$ 振动区; $1500\text{--}1800 \text{ cm}^{-1}$ 的 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动区; $2700\text{--}3000 \text{ cm}^{-1}$ 的 $\text{C}-\text{H}$ 振动区以及 $3300\text{--}4000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内存在的 $\text{O}-\text{H}$ 吸收峰 [9-11].

具体峰位识别如下 [12-14]: 在 $850\text{--}1500 \text{ cm}^{-1}$ 的 $\text{C}-\text{F}_x$ 和 $\text{C}-\text{H}$ 振动区, 主要峰位有 CF 伸缩振动 (1030 cm^{-1} , 1070 cm^{-1}), CF_2 伸缩振动 (1050 cm^{-1} , 1160 cm^{-1} , 1220 cm^{-1}) 和 CF_3 (980 cm^{-1} , 1340 cm^{-1}), 以及在 1380 cm^{-1} 和 1458 cm^{-1} 附近存在的 CH_3 对称伸缩振动峰; 在 $1500\text{--}1800 \text{ cm}^{-1}$ 范围的 $\text{C}=\text{C}$ 振动模式, 其两个主峰分别对应 1630 cm^{-1} 附近位置的 $\text{HFC}=\text{C}$ 振动模式、 1720 cm^{-1} 附近位置的 $\text{C}=\text{CF}_2$ 反对称振动模式; 在 $2800\text{--}3000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的 $\text{C}-\text{H}$ 振动模式明显包含三个峰: 2865 cm^{-1} 位置的 $\text{sp}_3\text{-CH}_3$ 的对称伸缩振动、 2925 cm^{-1} 位置的 $\text{sp}_3\text{-CH}_2$ 不对称伸缩振动和 2956 cm^{-1} 位置的 $\text{sp}_2\text{-CH}_2$ 的反对称伸缩振动. 纯 PTFE 工质中并不含有 H 及 $\text{O}-\text{H}$, 由图 1 可见, 真空背底中残留空气中的 H_2 及 H_2O 的成分可能是其中 H 的主要来源; 而薄膜中存在的位于 3400 cm^{-1} 吸收峰则可能是由 APPT 放电工作过程中, 真空背底气体中的 H_2O 及由于吸湿性而存在于 PTFE 中的 H_2O 离解产生的 $\text{O}-\text{H}$, 及薄膜在测试前暴露在空气中吸收空气中水分所致.

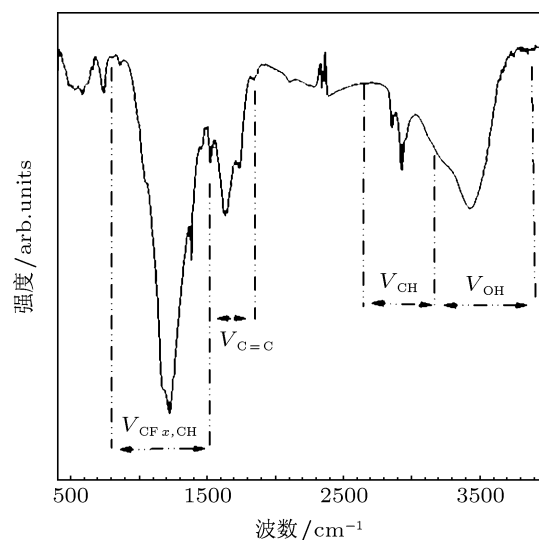


图 3 M 处沉积薄膜红外吸收谱

如图 4 所示为各角度位置处 APPT 羽流沉积薄膜红外傅里叶吸收谱图, 由图可见 CF_x 吸收谱带的峰位及形状随着分布角度的增大发生了较大的变化. 随着沉积角度由 0° 增大到 30° , CF_x 振动模式随之向低波数方向漂移, 而当角度由 45° 增大到 90° 时, CF_x 振动模式则向高波数方向略微偏移. 薄膜中 F 的强电负性使其具有较强的吸收电子的能力, CF_x 振动波数的漂移方向定性反应了薄膜中 F 含量的变化趋势 [15]. 由此可见, 在 $0\text{--}30^\circ$ 及 $45^\circ\text{--}90^\circ$

的不同角度范围内沉积薄膜中 F 的含量具有不同的变化趋势.

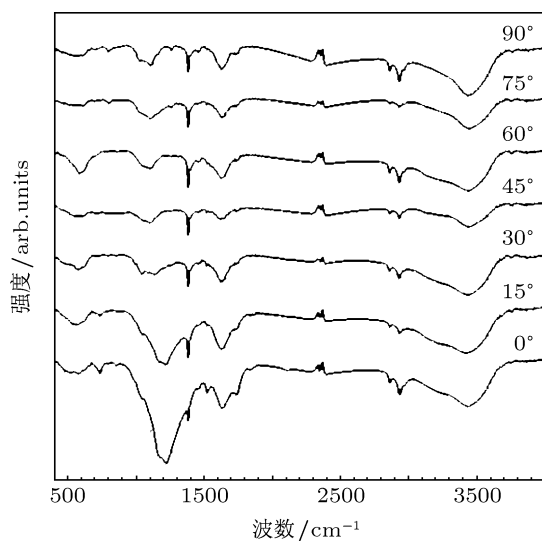


图4 各角度位置处沉积薄膜红外吸收谱

3.3 沉积薄膜的 XPS 分析

为了进一步研究 APPT 羽流沉积薄膜的组成,对沉积薄膜作了 XPS 分析.图 5 给出了以铝合金为基底 M 位置处沉积薄膜 XPS 全谱图,由图可见 APPT 羽流沉积薄膜中主要含有 C, F 及少量的 Cu, O, N 元素.其中铜主要来自于推力器极板烧蚀产物; PTFE 中并不含有氧的成分,根据 XPS 光谱图可得到各样品中氧的含量在 5.46—5.92 at.% 之间,在经过高能 Ar 离子轰击后,薄膜样品中氧的含量明显减少,薄膜中氧的成分可能来自于沉积过程中 C 与真空背景气体中残存氧的结合,及在暴露空气后沉积薄膜中的不饱和键及自由基与空气中氧的结合.由于离子的选择性溅射会使得薄膜中氟的含量减少,因此本实验中均采用未经溅射的样品进行分析.

如图 6 所示为各角度处沉积薄膜 XPS 谱的 C1s 峰,图中直观显现了不同角度处沉积薄膜中不同组分的变化趋势.通过对 C1s 谱峰的分峰拟合,以 M 点处沉积薄膜为例,如图 7 所示 APPT 羽流沉积薄膜中含有 C—C (C—H), C—CF_x, C—F, C—F₂ 和 C—F₃ 键态^[16,17].由于 C—O 及 C—CF_x 键很难加以区分,在结合能 286.7 eV 位置处的谱峰有可能为 C—O 及 C—CF_x 产生的复合峰,由于沉积薄膜中氧主要来自于后期的氧化,因而将该处谱峰归为主要由 C—CF_x 引起.根据各拟合峰的面积得到各键态相对含量随薄膜沉积角度的变化关系如图 8

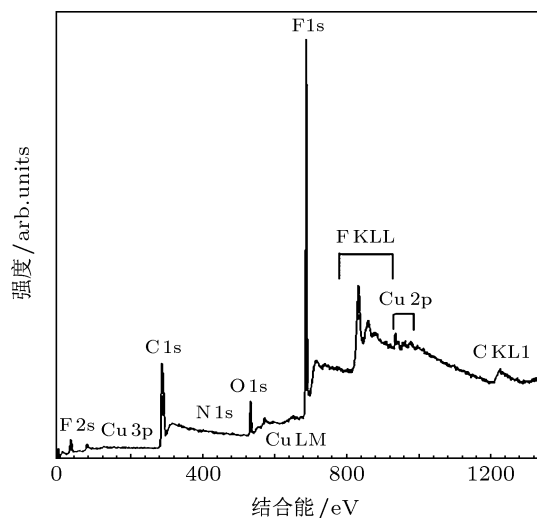


图5 M 位置处沉积薄膜 XPS 全谱图

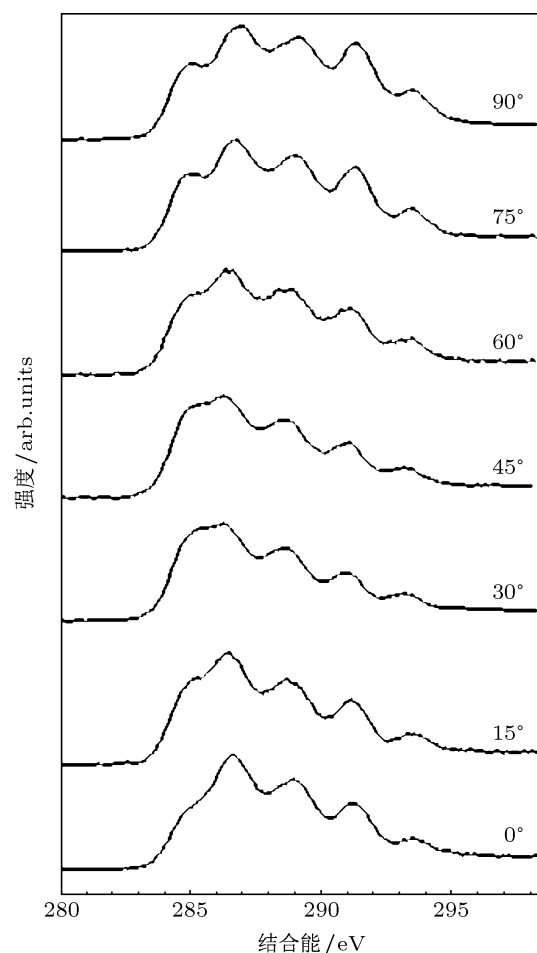


图6 各位置处沉积薄膜 XPS 的 C1s 谱峰

所示,由图可见, APPT 羽流沉积薄膜的结构组分随沉积角度发生了复杂的变化,薄膜中 C—CF_x 及 C—F 基团相对含量最多, C—F₃ 基团含量最低. C—F₃ 基团在各个角度相对含量变化很小,

在 7%—11% 之间; C—C 及 C—F₂ 基团的相对含量以 45° 角为界具有不同的变化趋势: 在 0—45° 沉积角度范围内随着角度的增大, C—C 基团相对含量从 10.95% 增加到 18.08%, C—F₂ 基团相对含量则从 14.34% 减小到 10.91%; 而在 45°—90° 分布角范围内, 随着角度的增大, C—C 基团相对含量从 18.08% 减小到 12.08%, C—F₂ 基团相对含量从 10.91% 增加到 16.44%.

由 (1) 式可计算得到 $K_{F/C}$, 其随沉积角度的变化如图 9 所示, 各角度处 APPT 沉积薄膜均表现出缺氟特性, $K_{F/C}$ 值在 0.6852 到 0.8691 之间, 远小于 PTFE 的 $K_{F/C}$ 值 2, 由此可见 APPT 羽流沉积形成了一种低 F/C 比 C:F 薄膜. $K_{F/C}$ 以 30° 沉积角为界, 在 0—30° 角范围内, $K_{F/C}$ 随着沉积角度的增大由 0° 时的 0.7928 减小到 30° 时的 0.6852; 在 45°—90° 角范围内, $K_{F/C}$ 随着沉积角度的增大由 45° 时的 0.7189 增大到 90° 时的最大值 0.8692.

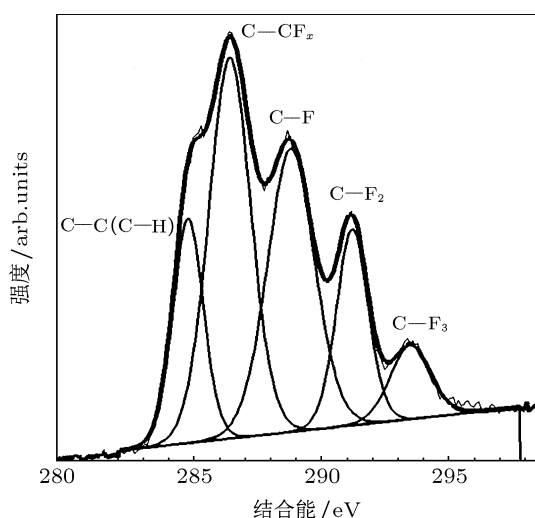


图 7 M 位置处沉积薄膜 Cls 分峰拟合图

研究表明 [18—20], APPT 羽流存在着 40° 发散半角, 在小于发散角范围内存在着高密度、高速度等离子体, 且等离子体密度及速度随着角度的增大逐渐减小, 而在大于发散角范围内, 等离子体密度及速度则随着角度的增加迅速减小. 沉积薄膜的形成是刻蚀与薄膜生长并存的过程, 高速高密度的离子轰击会使得沉积薄膜中 F 的含量降低 [21], 但是值得注意的是在 0—30° 范围内, $K_{F/C}$ 值却呈现出与等离子体密度及速度相反的变化趋势.

经分析可知, 在 APPT 脉冲放电工作过程中, PTFE 烧蚀电离产生的粒子基团在羽流区不同方位处具有不同的分布; 在 APPT 单次脉冲放电结束后,

由于滞后烧蚀使得 PTFE 仍会受热分解产生大量中性气体及熔融喷溅颗粒, 其中 C₂F₄ 是 PTFE 分解的主要产物, 这部分粒子的分布密度随着偏离中心轴线角度的增大而减小 [3,4], 由图 3 也可见, 在中心 0° 及 15° 角处沉积薄膜红外傅里叶光谱图上 740 cm⁻¹ 附近存在着明显的非晶态 PTFE 峰, 这部分粒子的存在造成了中心区域 CF₂ 基团增多及薄膜结构的改变. 在中心 0° 到 45° 附近区域是 APPT 羽流喷射出的等离子体及烧蚀电离产物主要分布区域, 该区域内基片表面发生了剧烈的离子轰击及复杂的气相聚合反应过程. 由此可见, 不同的等离子体特性及 PTFE 烧蚀电离粒子基团的分布特性是造成 APPT 羽流区不同区域范围内沉积所得薄膜结构改变的原因.

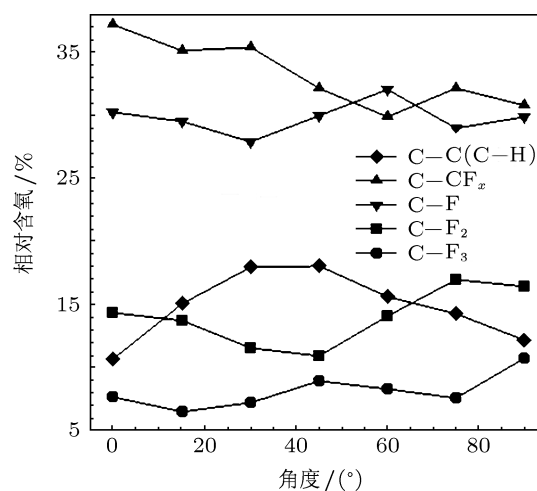


图 8 各键态相对含量随沉积角度的变化

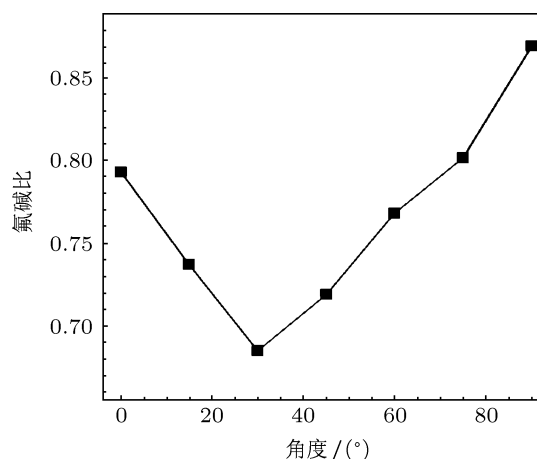


图 9 薄膜氟碳比随沉积角度的变化

3.4 沉积薄膜表面形态

如图 10(a)—(g) 所示为 0° 到 90° 位置处沉积

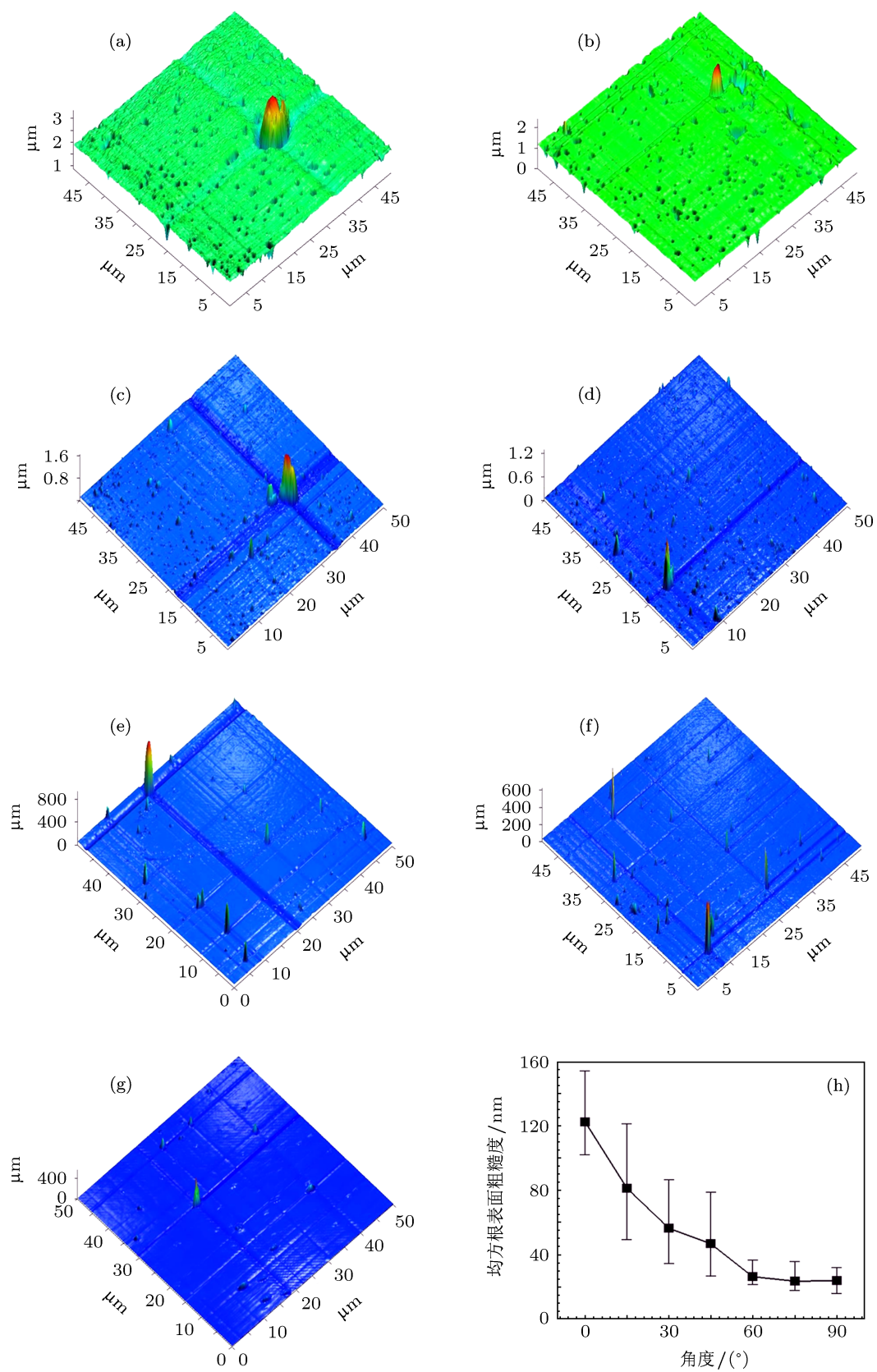


图 10 角度处沉积薄膜表面形态及均方根表面粗糙度 (a) 0° 位置; (b) 15° 位置; (c) 30° 位置; (d) 45° 位置; (e) 60° 位置; (f) 75° 位置; (g) 90° 位置; (h) 薄膜均方根表面粗糙度

薄膜表面三维形貌, 由图可见, 各角度处沉积薄膜表面均存在着锥状颗粒物质, 这些直径微米量级颗粒状物质主要来源于 APPT 滞后烧蚀过程中 PTFE 熔融喷溅颗粒^[3,4].

在 APPT 羽流区 0—45° 范围内存在着高密度高速等离子体, 高能入射离子对薄膜表面存在着较强的溅射破坏作用, 在 0°, 15° 沉积薄膜表面, 明显存在着由于离子轰击而产生的溅射坑状结构; 由图 10(h) 可见, 随着角度的增大, 沉积薄膜均方根表面粗糙度值 R_{rms} 由中心 0° 处的 122.5 nm 逐步减小到 45° 位置处的 46.7 nm; 在 60—90° 范围内等离子体密度及速度低, 入射离子能量低, 对薄膜表面破

坏作用弱, 该范围内薄膜的生长为主要过程, 沉积薄膜均方根表面粗糙度值较低; 但是由于该范围内沉积薄膜表面颗粒状物质的存在, 因而其均方根粗糙度值相比于沉积玻璃基底 $R_{\text{rms}} = 7.9 \text{ nm}$ 仍具有较大值.

3.5 沉积样品光学性能

如图 11 所示为空间各角度处玻璃基沉积薄膜在波长 300—1500 nm 范围内的透射及反射光谱曲线, 沉积样品光学特性以 30° 角为界在羽流不同区域中具有不同的变化趋势.

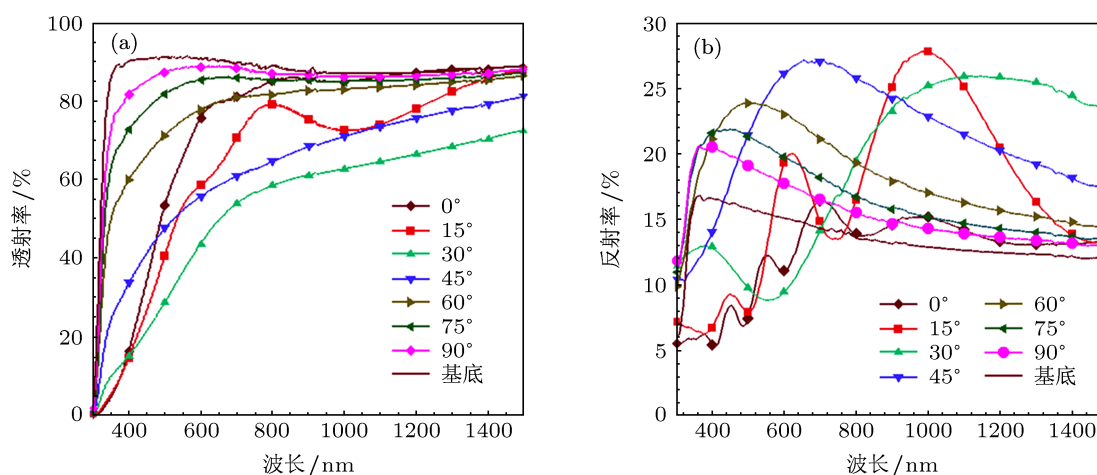


图 11 各角度处沉积薄膜透射及反射光谱 (a) 透射光谱; (b) 反射光谱

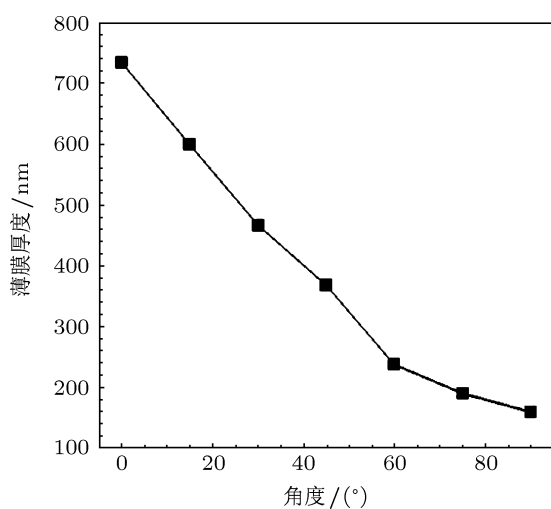


图 12 各角度处沉积薄膜厚度

如图 12 所示, 沉积薄膜厚度随着角度的增大

由 0° 位置处 733 nm 逐渐减小到 90° 位置处 159 nm. 在 0°—45° 角范围内沉积薄膜厚度明显大于 60°—90° 位置处沉积薄膜厚度, 在该范围内沉积样品在紫外、可见光及红外光范围内均具有较低的透射率; 结合图 9 可见, 沉积薄膜键结构是影响沉积样品的光学特性的重要因素^[22], 该范围内各角度处沉积样品光学特性对薄膜结构的变化有着较好的反映, 样品透射率随着 F/C 比的减小而降低, 且在 30° 角位置处样品具有最小透射率. 相比于对透射率的影响, 沉积薄膜对反射率的影响则相对较小, 其最大变化只有 10% 左右. 0°—30° 范围内沉积样品表现出的复杂反射特性, 可能主要是由该范围内基底的强烈刻蚀及形成薄膜的复杂表面形貌特征所引起的.

与 0°—45° 范围内沉积样品相比, 60°—90° 范围内各样品薄膜厚度及薄膜均方根表面粗糙度值

相对较小且差别不大,在该角度范围内沉积样品具有相对较高的透射率及增强反射的光学特性,样品在紫外区间内的最大吸收及最大反射随着 F/C 比的增大存在向紫外低波数方向移动的趋势;样品透射率随着 F/C 比的增大而增大,样品反射率则随着 F/C 比的增大不断降低,在 90° 位置处沉积样品透射率仅在波长小于 500 nm 才出现明显的减小,且此处样品反射率最小。

4 结论

本文利用质谱仪对 APPT 羽流残余气体成分进行了测量,利用 FTIR, XPS, UV-Vis 分光光度计对垂直于 APPT 极板平面内阴极侧不同方位角处沉积薄膜的成分结构及光学性质进行了诊断研究。研究结果表明:

1. APPT 羽流残余气体中主要存在 C, F, CF, CF₂ 和 CF₃ 气体分子及少量的推力器极板及本体材料的烧蚀溅射产物。

2. APPT 羽流在各方位角处沉积生成了低 F/C

比碳氟薄膜,其 F/C 比分布在 0.6852—0.8691 之间。

3. APPT 羽流区中不同区域等离子体特性及 PTFE 烧蚀电离产生基团的分布特性影响着沉积薄膜中原子间的键合方式及各种键态的比例,各键态比例随羽流沉积分布角度以 30° 为界表现出不同的变化趋势,并影响到不同区域沉积薄膜的结构;由于碳氟膜的光学、介电、热性能等特性均与薄膜的结构,特别是与薄膜的 F/C 比及碳、氟原子间的化学键态有关,因而该研究为进一步开展全方位 APPT 羽流沉积污染及其对航天器及其星载设备的光学特性、介电特性及热物性影响的研究奠定了基础。

4. APPT 羽流沉积薄膜具有对波长小于 500 nm 的光低透射率及增强反射率的光学特性;受薄膜结构、薄膜表面形貌及薄膜厚度的影响,薄膜光学特性具有极大的角度依赖性,在 0°—45° 角范围内沉积薄膜具有较低的透射率及复杂的反射特性,在远离中心高角度范围 APPT 羽流对基底光学特性的影响则近似可以忽略。

- [1] Burton R L, Turchi P J 1998 *J. Propul Power* **14** 716
- [2] Stechmann D P 2007 *M.S. Dissertation* (Worcester: Worcester Polytechnic Institute)
- [3] Debevec J H 2006 *M.S. Dissertation* (Ohio: Air Force Institute of Technology)
- [4] Kesenek C 2008 *M.S. Dissertation* (Ohio: Air Force Institute of Technology)
- [5] Guman W J, Begun M 1978 *13th international electric propulsion conference* San Diego April 25–27, 1978 AIAA-78-704
- [6] Rudolph L K, Jones R M 1979 *14th International Electric Propulsion Conference* Princeton Oct. 30–Nov.1, 1979 AIAA 79-2106
- [7] Arrington L A, Marrese C M, Blandino J J 2000 *36th Joint Propulsion Conference* Huntsville, July 17–19, 2000 AIAA-2000-3262
- [8] Kimura T, Lida M 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 08jd04-1
- [9] Jiang M F, Ning Z Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1588 (in Chinese) [江美福, 宁兆元 2004 物理学报 **53** 1588]
- [10] Jiang M F, Ning Z Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3220 (in Chinese) [江美福, 宁兆元 2004 物理学报 **53** 3220]
- [11] Zhu L, Jiang M F, Ning Z Y, Du J L, Wang P J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6430 (in Chinese) [朱丽, 江美福, 宁兆元, 杜记龙, 王培军 2009 物理学报 **58** 6430]
- [12] Xiao J R, Xu H, Zhang D H, Ma S S 2007 *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* **27** 236 (in Chinese) [肖剑荣, 徐慧, 张德恒, 马松山 2007 真空科学与技术学报 **27** 236]
- [13] Jiang A H, Xiao J R, Wang D A 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6013 (in Chinese) [蒋爱华, 肖剑荣, 王德安 2008 物理学报 **57** 6013]
- [14] Ning Z Y, Cheng S H, Ye chao 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 566 (in Chinese) [宁兆元, 程珊华, 叶超 2001 物理学报 **50** 566]
- [15] Xiao J R, Xu H, Wang H Y, Deng C S, Li M J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3004 (in Chinese) [肖建荣, 徐慧, 王焕友, 邓超, 李明君 2007 物理学报 **56** 3004]
- [16] Ahn H J, Kim J B, Hwang B H, Baik H K, Park J S, Kang D 2008 *Diam. Relat. Mater* **17** 2019
- [17] Fanelli F, Fracassi F, d'Agostino R 2010 *Surf. Coat. Tech.* **204** 1779
- [18] Li Z R 2008 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defence Technology) (in Chinese) [李自然 2008 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [19] Eckman R, Gatsonis N A, Myers R M 1997 *25th International Electric Propulsion Conference* Cleveland, Ohio, 1997, IEPC-97-126
- [20] Zwahlen 2002 *M. S. Dissertation* (Worcester: Worcester Polytechnic Institute)
- [21] Ye c, Ning Z Y, Chen S H, Kang J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 784 (in Chinese) [叶超, 宁兆元, 程珊华, 康健 2001 物理学报 **50** 784]
- [22] Biederman H, Ojha S m, Holland L 1977 *Thin Solid Films* **41** 329

Structural and optical characterization of film deposited by pulsed plasma thruster plume*

Zhang Rui[†] Zhang Dai-Xian Zhang Fan He Zhen Wu Jian-Jun[‡]

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 15 June 2012; revised manuscript received 23 August 2012)

Abstract

In order to study the characteristics of the films deposited by pulsed plasma thruster plume and assess contamination arising from the exhaust plume, the compositions of the pulsed plasma thruster plume are studied by means of mass spectrum analysis, the structural properties of the films deposited at different angles on the cathode side of the thruster are investigated by X-ray photoelectron spectroscopy, Fourier transform infrared absorption spectroscopy, and the optical properties of the films are studied by ultraviolet-visible light spectrophotometry. The results show that the plume consists primarily of C, F, CF, CF₂, CF₃, that low fluorine-carbon ratio carbon fluorine films are deposited by pulsed plasma thruster plume, and that the chemical bondings and structures of these films present different trends in different regions with 30 degree angle as the boundary. These films basically show that they have strong absorption properties for wavelengths below 500 nm and have enhanced reflective characteristics. Due to influence of the characteristics of the deposited films, the optical properties of these films present significant angular dependences.

Keywords: pulsed plasma thruster, plume, X-ray photoelectron spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy

PACS: 52.75.Di, 82.80.Pv, 78.30.-j

DOI: 10.7498/aps.62.025207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11172327).

[†] Corresponding author. E-mail: nudtzhang@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: jjwu@nudt.edu.cn