

doi: 10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.009

# GPTMS 涂层与等离子体处理复合改性聚合物 微流控通道

孙明凯, 魏娟, 张振兴, 孙腾飞, 亓东锋, 吴永玲, 郑宏宇

(山东理工大学激光高端制造研究中心, 山东淄博 255000)

**摘要:** 为了提升聚合物材料的表面改性效果, 采用  $\gamma$ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(GPTMS)涂层与等离子体处理相结合的方法, 对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚苯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚丙烯和聚碳酸酯 5 种常见聚合物材料的表面改性效果进行了研究。通过分析表面润湿性(接触角)、化学成分、粗糙度以及微流控通道中的流体流动性能及其时效性, 探讨了该改性方法的机制和效果。结果表明, GPTMS 涂层与等离子体处理(GP-Plasma)复合改性相较于等离子体处理能够显著提高这 5 种聚合物材料的表面亲水性和时效性, 复合改性后聚合物材料表面接触角可降至接近  $0^\circ$ , 并在  $-15^\circ\text{C}$  储存 28 d 后仍保持接触角低于  $20^\circ$ 。X 射线光电子能谱和傅里叶变换红外光谱分析表明, 复合改性后 PMMA 材料的 O/C 原子比提升了约 140%, 并形成了 Si—O—Si 键。原子力显微镜结果表明 GP-Plasma 复合改性后 PMMA 材料的表面粗糙度相较于等离子体处理提升 95%, 进一步提升了表面润湿性。在微流控通道流动测试中, 复合改性后 PMMA 样品的流体流动时间平均缩短 64%, 并实现了稳定的液体流动, 显示出该复合改性技术在实际应用中的潜力。

**关键词:** 硅烷涂层与等离子体处理复合改性; 润湿性; 聚合物; 微流控通道; 时效性

**中图分类号:** TQ316.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0058-08

## Surface modification technology for polymer microfluidic channels combining GPTMS coating and plasma treatment

SUN Mingkai, WEI Juan, ZHANG Zhenxing, SUN Tengfei, QI Dongfeng, WU Yongling, ZHENG Hongyu

(Centre for Advanced Laser Manufacturing, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract :** To enhance the surface modification effectiveness of polymer materials, a combined treatment approach using 3-glycidyloxypropyltrimethoxysilane (GPTMS) coating and plasma treatment was used for investigating the surface modification effects of five common polymers, including polymethyl methacrylate (PMMA), polystyrene, polyethylene terephthalate, polypropylene, and polycarbonate. The mechanism and effectiveness of this modification were examined by analyzing surface wettability (contact angle), chemical composition, roughness, fluid flow performance in microfluidic channels, and their durability. The results indicate that the combined GPTMS coating and plasma treatment, referred to as GP-Plasma modification, significantly improves the surface hydrophilicity and durability of the five polymer materials compared to plasma treatment alone. The contact angles of the modified polymers surfaces are reduced to nearly  $0^\circ$ , and remained below  $20^\circ$  after 28 days storage at  $-15^\circ\text{C}$ . X-ray photoelectron spectroscopy and Fourier-transform infrared spectroscopy analyses confirm an approximate 140% increase in the O/C atomic ratio of PMMA and the formation of Si—O—Si bonds following the GP-Plasma modification. The atomic force microscopy results indicate that the surface roughness of PMMA is increased by 95% after GP-Plasma modification compared to plasma treatment, further enhancing surface wettability. In microfluidic channels tests, the fluid flow time of the modified PMMA sample is reduced by an average of 64%, achieving stable liquid flow, demonstrating the potential of this modification technology for practical applications.

**Keywords :** combined silane coating and plasma treatment modification ; wettability ; polymer ; microfluidic channels ; durability

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目(ZR2021QE130, ZR2021QF007, ZR2021MF030), 国家重点研发计划项目(2022YFB4600402, 2022YFE0199100), 山东省泰山学者基金项目(tsqn202306192)

**通信作者:** 魏娟, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为聚合物微流控芯片设计、制备与应用

**收稿日期:** 2024-10-13

**引用格式:** 孙明凯, 魏娟, 张振兴, 等. GPTMS 涂层与等离子体处理复合改性聚合物微流控通道[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 58-65.

SUN Mingkai, WEI Juan, ZHANG Zhenxing, et al. Surface modification technology for polymer microfluidic channels combining GPTMS coating and plasma treatment[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 58-65.

聚合物材料因其优异的力学性能、化学稳定性和易于加工的特点,广泛应用于微流控芯片、生物医学器械等领域<sup>[1-2]</sup>。然而,这些材料固有的疏水性限制了其应用,高接触角会降低表面润湿性能,从而影响液体流动和操控<sup>[3-5]</sup>。因此,提高聚合物表面的亲水性是解决这一问题的关键,已成为材料科学领域的重要研究方向之一<sup>[6-7]</sup>。

目前,微流控通道中常用的聚合物材料表面改性方法包括紫外照射、化学处理和等离子体处理等<sup>[8-10]</sup>。等离子体处理作为一种绿色高效的表面改性方法,通过引入极性官能团并增加表面粗糙度,显著提升了聚合物的亲水性<sup>[11-12]</sup>。然而,等离子体处理的改性效果时效性差,随着时间推移,聚合物表面的亲水性会下降,接触角逐渐增大<sup>[13-14]</sup>。为延长改性效果的时效性,研究者们提出了多种方法,例如使用不同种类的气体(如氧气、氮气、氩气、CF<sub>4</sub>等)进行等离子体处理,以及改变储藏条件<sup>[15-16]</sup>。同时一些试剂也被使用在材料表面改性中<sup>[17]</sup>。近年来,等离子体处理与 $\gamma$ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(GPTMS)涂层结合的复合改性技术在多种材料表面改性中的应用备受关注。研究表明,这种复合改性技术能够显著提高玻璃和金属材料的耐磨性和强度,同时增强其表面耐划伤性和附着性能<sup>[18-19]</sup>。此外,在柔性电子器件制造中,等离子体处理结合GPTMS还被用于改善聚合物电介质层的介电特性,提升其介电常数和击穿场强<sup>[20]</sup>。这些研究表明,等离子体处理与GPTMS涂层结合的复合改性技术在不同材料的表面性能优化和应用领域中具有广泛的适应性和潜力。

笔者研究了基于GPTMS涂层与等离子体处理(GP-Plasma)相结合的复合表面改性方法在提高聚合物微流控通道润湿性方面的作用机制。通过在聚合物材料表面涂覆GPTMS并进行等离子体处理,进一步增强其表面亲水性并延长改性效果的时效性。系统评估了该复合改性方法对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚丙烯(PP)、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)、聚苯乙烯(PS)和聚碳酸酯(PC)等不同聚合物表面润湿性、改性效果时效性,以及微流控芯片内流速和流动状态的影响,并通过多种表征手段验证了该复合改性方法的改性机制。结果表明,GPTMS涂层与等离子体处理结合显著提高了聚合物表面的亲水性和时效性,并显著增强了微流控通道内流

体流动的速度与稳定性。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

GPTMS:97%,上海麦克林生化科技股份有限公司;

PMMA:MR200W,1 mm厚板材,深圳市万塑源橡塑有限公司;

PP:1 mm厚透明板材,广州创穗科技有限公司;

PET:1 mm厚透明板材,广州创穗科技有限公司;

PC:1 mm厚透明板材,中亿诚科技(苏州)有限公司;

PS:1 mm厚板材,深圳优景益精密有限公司;

PET双面胶:20 mm宽、100  $\mu$ m厚,深圳市东盛德意胶粘科技有限公司;

红色染料:红墨水,上海英雄(集团)有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

射频柜式激光打标机:LZ-RF40W,功率40 W,山东镭泽智能科技有限公司;

超声波清洗机:F-060,360 W,深圳福洋科技集团有限公司;

真空干燥箱:DZF-6050,上海一恒科学仪器公司;

等离子清洗机:PDC-MG,400 W,成都铭恒科技发展有限公司;

台式匀胶机:KW-4T,中国科学院微电子研究院;

接触角测量仪:JC2000D1,上海中晨数字技术设备有限公司;

X射线光电子能谱(XPS)仪:K-Alpha,美国Thermo Fisher Scientific公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet 5700,美国Thermo Fisher Scientific公司;

原子力显微镜(AFM):Dimension Icon,美国Bruker公司。

### 1.3 试样制备

GP-Plasma复合改性过程如图1所示(图中CA为接触角)。针对所有样品,均使用射频柜式激光打标机以100 mm/s速度、100%功率、20 Hz频率加工30次将样品切割成厚度为1 mm的20 mm $\times$ 20 mm薄片。将切割后的样品在超声波清洗器中以360 W功率清洗10 min,然后置于60  $^{\circ}$ C预热的真空干燥箱中烘干30 min,以获得未处理样品,此时未处理样品表面接触角大于75 $^{\circ}$ (如图1中步骤1所示)。首先在等离子清洗机中以空气作为处理气体将样品在200

W功率下处理30 s(如图1中步骤2所示),等离子体处理后的样品表面接触角较未处理时降低至 $25^{\circ}\sim 60^{\circ}$ (如图1中步骤3所示)。随后,使用台式匀胶机以1 200 r/min的速度在样品表面旋涂GPTMS溶液10 s,然后在 $60^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥1 h,得到均匀的GPTMS涂层样品(如图1中步骤4所示)。最后,将附着有GPTMS涂层的样品进行第二次等离子体处理,处理时以空气为处理气体在200 W功率下处理300 s(如图1中步骤5所示),完成GP-Plasma复合改性,此时样品表面接触角小于 $5^{\circ}$ (如图1中步骤6所示)。

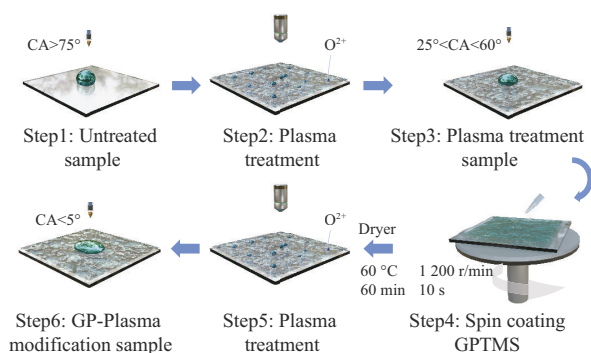


图1 GP-Plasma复合改性过程示意图

Fig. 1 Schematics of GP-Plasma modification process

## 1.4 测试与表征

### 1.4.1 接触角测量

采用接触角测量仪测量聚合物材料样品表面接触角,用注射器滴加 $1\mu\text{L}$ 的去离子水于被测样品表面,采用量角法测量表面接触角大小。为减小测量误差,对每一片样品都取其不同位置的5个点进行接触角测量,并记录平均值。通过材料表面的接触角,以研究等离子体处理和GP-Plasma复合改性对材料表面润湿性的影响。

### 1.4.2 XPS分析

采用XPS仪对聚合物材料样品的表面元素进行分析。XPS分析使用了Al K $\alpha$ 作为X射线源,斑点尺寸设置为500;分析模式采用恒定分析能量(CAE),能量设定为100.0 eV。测试过程中的能量步长为1.000 eV,总能量步数为1 361步。

### 1.4.3 FTIR分析

采用FTIR仪检测样品表面涂层的特征吸收峰并分析涂层的化学结构。对于XPS的相同样品进行FTIR分析,以帮助验证XPS结果。采用衰减全反射(ATR)法,波数范围为 $3\ 500\sim 500\text{ cm}^{-1}$ ,光谱分辨率为 $0.01\text{ cm}^{-1}$ 。

### 1.4.4 AFM分析

采用AFM对材料的表面形貌和粗糙度进行分析,评估涂层和等离子体处理对材料表面物理性能的影响,扫描区域为 $5.0\ \mu\text{m}$ 。

### 1.4.5 时效性测试

将实验样品干燥并储存在 $25, 0, -15^{\circ}\text{C}$ 温度条件下的密封袋中。选择等离子体处理30 s的样品和GP-Plasma复合改性的样品在7个时间点(0, 1, 2, 4, 7, 14, 28 d)进行接触角测量,以评估在不同储存温度下表面润湿性的持久性。

### 1.4.6 微流控通道流动测试

微流控芯片由上片和下片构成,每片厚度均为10 mm。上片材料分别为PMMA, PP, PET, PC和PS,并进一步分为未处理、等离子体处理和GP-Plasma复合改性处理3种类型;下片统一为PMMA。使用射频柜式激光打标机以100 mm/s的速度、100%功率、20 Hz频率加工30次,将各材料切割成 $20\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 的片。下片通过激光器扫描加工微流通道,设计为长61 mm、宽2 mm的矩形通道和两侧直径为20 mm的进样口和废液区。扫描加工宽度为0.05 mm,速度为500 mm/s,功率为50%,频率为20 Hz,扫描3次。上片根据加样区和废液区的位置开口。上下片通过PET双面胶进行粘合。激光器以75 mm/s速度、100%功率、20 Hz频率扫描3次将上片切割为和下片对应的镂空结构后将上下两片对应粘合。使用移液枪向加样区加入 $100\ \mu\text{L}$ 含红色染料的纯水,开始录像记录,统计液体进入微流通道至流出的时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面润湿性分析

对5种聚合物材料(PMMA, PS, PC, PET, PP)经表面改性后的接触角进行了测量,结果如图2所示。未经处理的PMMA接触角为 $84^{\circ}$ ,随着等离子体处理时间的增加,接触角迅速下降并稳定在 $44^{\circ}$ ;GPTMS涂层的PMMA初始接触角为 $72^{\circ}$ ,随着等离子体处理时间的延长,接触角逐渐降低至接近 $0^{\circ}$ (图2a)。未经处理的PS接触角为 $89.5^{\circ}$ ,等离子体处理后降至 $58^{\circ}$ ;GPTMS涂层的PS接触角为 $83.5^{\circ}$ ,等离子体处理后降至接近 $0^{\circ}$ (图2b)。未经处理的PET接触角为 $75^{\circ}$ ,等离子体处理后降至 $25^{\circ}$ ;GPTMS涂层的PET接触角为 $69^{\circ}$ ,处理后降至接近 $0^{\circ}$ (图2c)。未经处理的PP接触角为 $83^{\circ}$ ,等离子体处理后降至

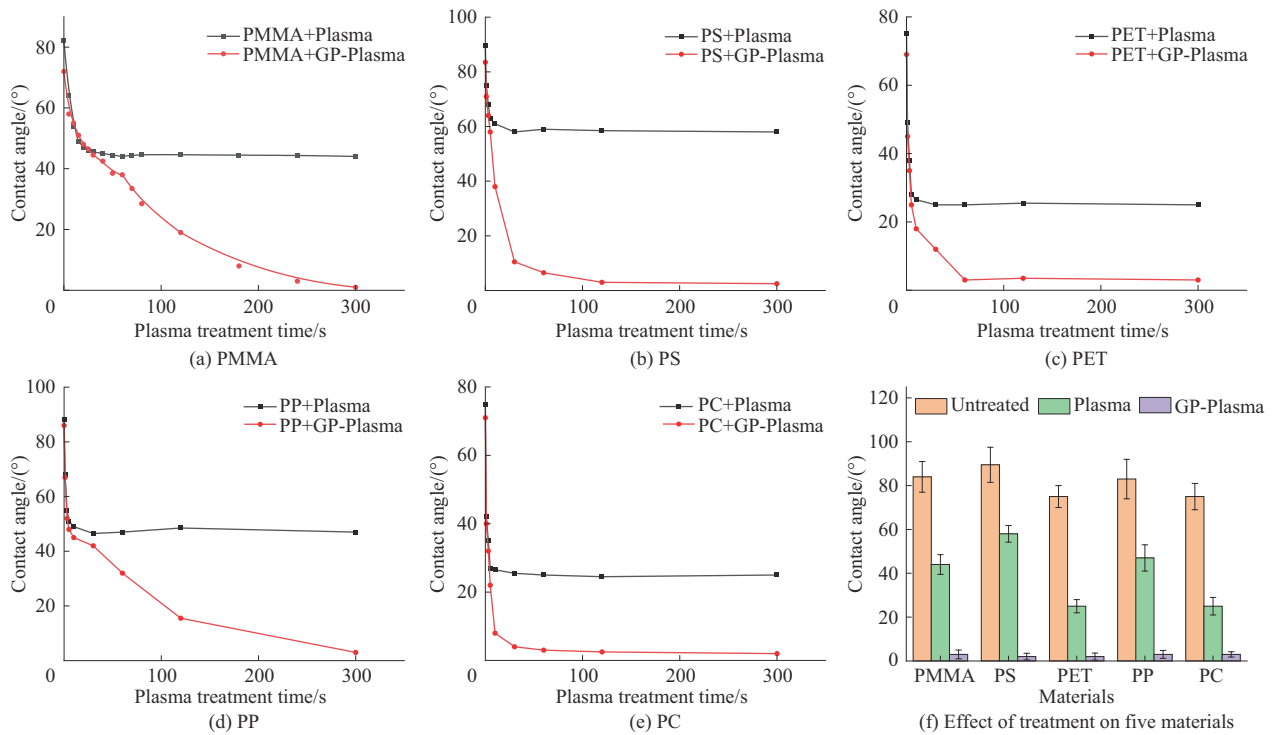


图2 等离子体处理和GP-Plasma复合改性对5种聚合物表面润湿性的影响

Fig. 2 Effects of plasma treatment and GP-Plasma modification on surface wettability of five polymers

47°;GPTMS涂层的PP接触角为81°,等离子体处理后降至接近0°(图2d)。未经处理的PC接触角为75°,等离子体处理后降至25°;GPTMS涂层的PC接触角为71°,等离子体处理后降至接近0°(图2e)。

涂覆GPTMS的5种聚合物在等离子体处理后,接触角均显著小于单独等离子体处理的接触角(如图2f所示),表明GP-Plasma复合改性方法具有广泛的适用性和显著的效果。

### 2.2 表面化学成分分析

以PMMA为例,对其在不同处理方式下的表面进行XPS分析和FTIR分析,结果如图3所示,PMMA的原子组成和O/C原子比见表1。表1的XPS分析结果表明,与未处理的PMMA样品相比,涂覆GPTMS和经过30 s等离子体处理的样品表面O/C原子比从0.18分别上升至0.31和0.39。这表明GPTMS涂层增加了材料表面的氧含量,从而改善了润湿性,这与接触角测量结果一致。

由图3a看出,在PMMA样品中,涂覆GPTMS并经过60 s等离子体处理的样品在Si 2p (100.1 eV)和Si 2s (150.5 eV)区域检测到明显的峰,而仅涂覆GPTMS并进行30 s等离子体处理的样品中没有检测到此类峰。此外,与仅进行30 s等离子体处理的样品相比,经过GPTMS涂覆并60 s等离子体处理

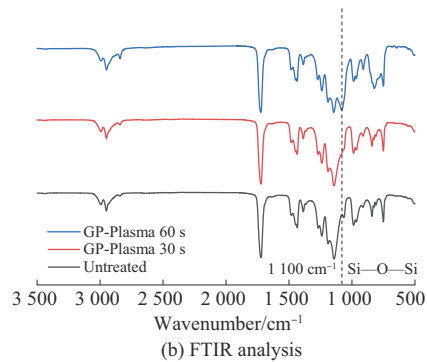
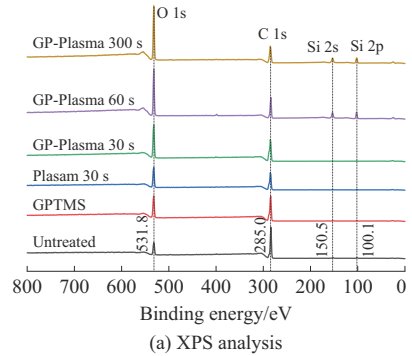


图3 不同处理方式下PMMA表面的XPS分析和FTIR分析

Fig. 3 XPS analysis and FTIR analysis of PMMA surfaces under different treatment methods

的样品中碳(C 1s)含量减少,而氧(O 1s)含量显著增加,O/C原子比从0.39上升至0.94,提升约140%(见表1)。

表1 PMMA的原子组成和O/C原子比

Tab. 1 Atomic composition and O/C ratios of PMMA				
Treatment methods	C 1s	O 1s	Si 2p/Si 2s	O/C
	content/%	content/%	content/%	ratio
Untreated	82.57	15.16	2.25	0.18
GPTMS	75.79	23.54	1.12	0.31
Plasma 30 s	71.20	27.89	1.19	0.39
GP-Plasma 30 s	67.07	32.31	0.63	0.48
GP-Plasma 60 s	45.39	42.60	12.96	0.94
GP-Plasma 300 s	44.10	40.64	16.25	0.92

结合图3b的FTIR分析,涂覆GPTMS并经过60 s等离子体处理的样品在 $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 处显示出显著的峰,该峰通常与Si—O—Si键的伸缩振动相关,而对于未处理样品或涂覆GPTMS并进行30 s等离子体处理的样品,没有在该位置检测到任何峰。因此,结合XPS和FTIR的分析结果,在涂覆GPTMS并经过60 s等离子体处理的PMMA表面,高能粒子轰击暴露了更多的Si元素。随着极性官能团的形成,Si元素的氧化态逐渐增加,导致Si—O—Si网络结构的形成。该结构为氧官能团提供了更多的附着点,从而增强了表面润湿性并放大了XPS信号。

对于涂覆GPTMS的样品,当等离子体处理时间延长至300 s时,与60 s处理后的样品相比,O/C原子比几乎没有变化(见表1)。这表明在经过60 s等离子体处理后,PMMA样品的表面已经在极性官能团方面达到饱和状态。接触角的变化可以通过进一步研究表面形貌来解释。

### 2.3 表面形貌分析

在等离子体处理过程中,高能粒子轰击材料表面,导致表面形貌和粗糙度发生变化,从而影响材料表面的润湿性。AFM分析进一步揭示了涂层和等离子体处理对PMMA表面形貌的影响,如图4所示。由此得到的不同处理方式下PMMA的粗糙度见表2。

由表2看出,未处理的PMMA表面具有较低的平均粗糙度( $R_a$ ),但均方根粗糙度( $R_q$ )相对较高,表明表面存在一些较大的凸起,这可能是材料加工造成的,进而导致较差的润湿性(图4a)。涂覆GPTMS后,PMMA表面变得更为平滑, $R_a$ 降至0.35 nm, $R_q$ 降至0.45 nm,均显著低于未处理的PMMA。结合图像和表面粗糙度值可发现,GPTMS涂层消除了材料表面较大的凸起,并在原本粗糙度较低的部位形成密集的柱状结构,这些结构提高了局部的粗糙度从而改善了表面润湿性(图4b)。经过30 s的等离子

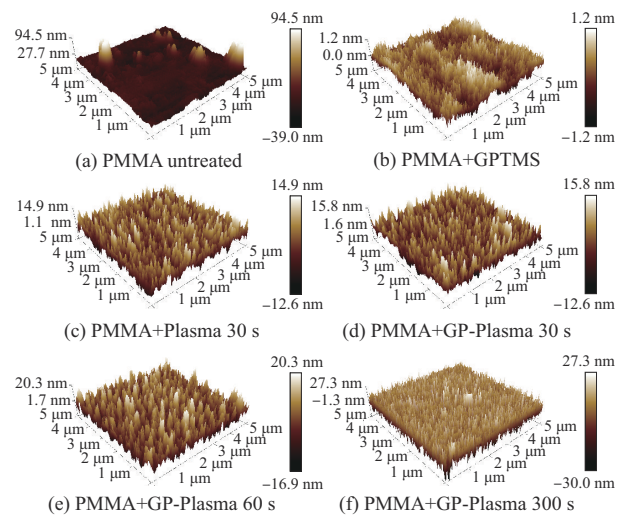


图4 不同处理方式下PMMA的AFM图像

Fig. 4 AFM images of PMMA under different treatment conditions

表2 不同处理方式下PMMA的粗糙度

Tab. 2 Roughness of PMMA under different treatment conditions

Treatment conditions	$R_a$ /nm	$R_q$ /nm
PMMA Untreated	0.78	13.00
PMMA+GPTMS	0.35	0.45
PMMA+Plasma 30 s	3.14	3.95
PMMA+GPTMS-Plasma 30 s	3.21	4.06
PMMA+GPTMS-Plasma 60 s	4.45	5.52
PMMA+GPTMS-Plasma 300 s	6.11	7.87

Notes:  $R_a$  is average roughness;  $R_q$  is root mean square roughness.

体处理后,PMMA表面的粗糙度显著增加(图4c), $R_a$ 为3.14 nm, $R_q$ 为3.95 nm。粗糙度的增加有助于提高润湿性,因为粗糙的表面更容易与水滴接触,导致接触角减小。涂覆GPTMS并经过30 s等离子体处理的PMMA表面粗糙度进一步增加, $R_a$ 为3.21 nm, $R_q$ 为4.06 nm,略高于仅经过等离子体处理的样品。这表明在等离子体处理过程中,涂层中可能发生了额外的结构变化或交联反应,导致粗糙度增加(图4d)。涂覆GPTMS并经过60 s等离子体处理的PMMA表面粗糙度进一步增加, $R_a$ 为4.45 nm, $R_q$ 为5.52 nm。根据XPS和FTIR分析结果,这可归因于Si—O—Si键的形成,这些键结合了更多的极性官能团到表面,形成了更加复杂的微观结构(图4e)。经过300 s等离子体处理的GPTMS涂层PMMA表面显示出最高的粗糙度值, $R_a$ 为6.11 nm, $R_q$ 为7.87 nm,较仅进行30 s等离子体处理的样品 $R_a$ 提升约95%,表明延长等离子体处理时间对GPTMS涂层表面产生了显著的改性作用,形成了更密集且更加突出的粗糙结构(图4f)。这种显著的表面改性导致了极高的润湿性和接近零的接触角(图2a)。

#### 2.4 不同温度下的时效性分析

系统地分析了在不同温度(25, 0, -15 °C)储存条件下,处理样品的接触角变化,如图5所示。由图5看出,经过28 d储存后,GP-Plasma复合改性PMMA样品的接触角分别为37°(25 °C),28°(0 °C)和10°(-15 °C)。相比之下,等离子体处理的PMMA样品的接触角分别为73°,68°和61°(图5a)。GP-Plasma复合改性PS样品在28 d储存后的接触角分别为40°(25 °C),32°(0 °C)和12°(-15 °C),而等离子体处理的PS样品在相同条件下的接触角分别为77°,72°和67°(图5b)。GP-Plasma复合改性PET样品的接触角分别为32°(25 °C),23°(0 °C)和10°

(-15 °C),相比之下,等离子体处理的PET样品在相同条件下的接触角分别为70°,63°和57°(图5c)。GP-Plasma复合改性PP样品在28 d储存后的接触角分别为32°(25 °C),25°(0 °C)和15°(-15 °C),而等离子体处理的PP样品在相同条件下的接触角分别为74°,70°和66°(图5d)。GP-Plasma复合改性PC样品在28 d储存后的接触角分别为33°(25 °C),23.5°(0 °C)和12°(-15 °C),相比之下,等离子体处理的PC样品在相同条件下的接触角分别为67°,62°和56°(图5e)。

结果表明,经过GP-Plasma复合改性的样品表现出优异的润湿性和持久的稳定性(图5f)。

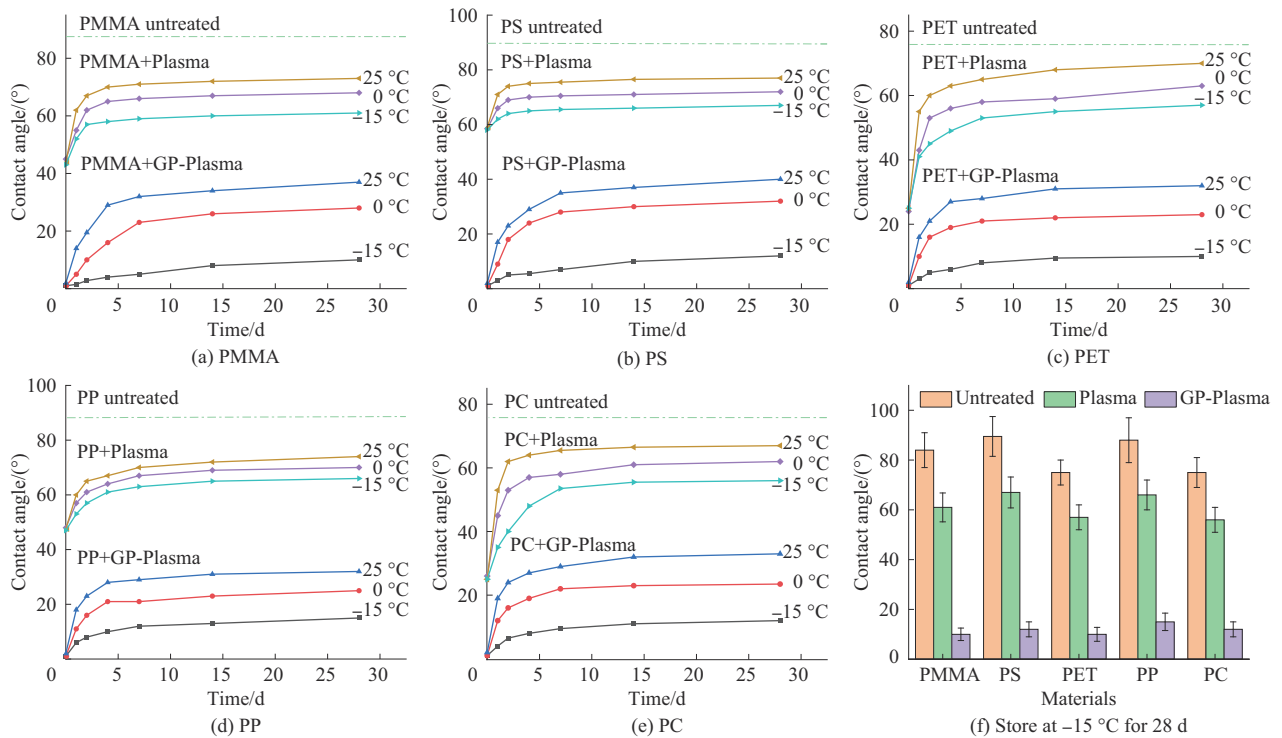


图5 聚合物样品在不同温度条件下的表面改性时效性

Fig. 5 Surface modification durable stability of polymer samples under different temperature conditions

#### 2.5 微流控通道中的流动测试

以PMMA为例,在经GP-Plasma复合改性处理的PMMA微流控通道中进行流体流动时间测试,如图6a所示。可以发现,经GP-Plasma复合改性处理的样品表现出微流控通道的快速填充,流动高效且稳定,表明该表面处理方式有效提升了流体传输性能。

记录了不同处理方式(未处理、等离子体处理和GP-Plasma复合改性)下PMMA及其他材料微流控通道中的流体流动时间,如图6b所示。结果表明,与仅使用等离子体处理相比,GP-Plasma复合改性

使PMMA微流控芯片中流体的流动时间平均缩短了约64%,其他材料流体的流动时间也大幅缩短。这表明增强的表面亲水性与改进的流体传输性能密切相关。更高的润湿性不仅降低了通道表面的流体阻力,还有效防止了气泡的形成,保持了连续且稳定的流动,验证了GPTMS涂层在微流控领域中的广泛适应性和实际应用价值。

#### 3 结论

(1) GP-Plasma复合改性相较于单独的等离子体处理,显著提升了聚合物表面的改性效果,复合改性后的PMMA,PS,PET,PP和PC等聚合物材料

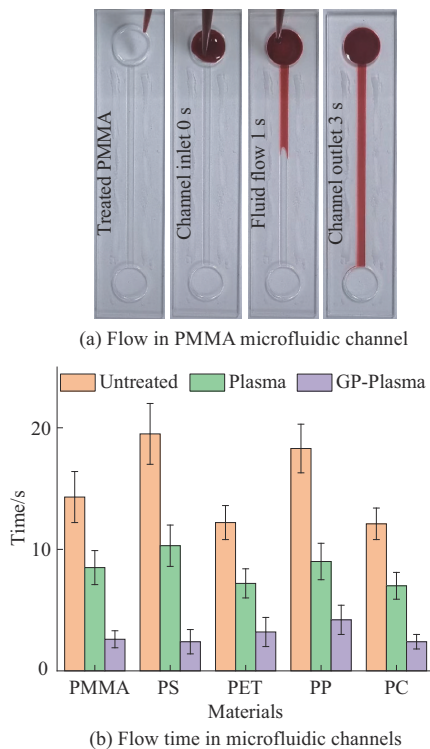


图6 不同处理方式下PMMA及其他材料微流控通道的流体流动时间测试

Fig. 6 Fluid flow time test of PMMA and other material microfluidic channels under different treatment conditions

的接触角接近 $0^\circ$ ,表明其表面亲水性得到了极大的增强。

(2) GP-Plasma复合改性通过引入Si—O—Si键,为氧元素提供了额外的结合点,O/C原子比相较于等离子体处理提高了约140%,同时使材料的表面粗糙度增加了约95%,进一步提升了亲水性。

(3) GP-Plasma复合改性使微流控芯片中PMMA流体的流动时间平均缩短了约64%,对流体运输效率的提升具有显著作用。

(4) GP-Plasma复合改性有效延长了等离子体处理的时效性。在 $-15^\circ\text{C}$ 储存28 d后,接触角仍保持在 $20^\circ$ 以下,展现出优异的时效性。这表明,该技术在微流控器件、药物输送系统等需要长期稳定表面润湿性的领域具有重要应用前景。

#### 参考文献

[1] DAMATI L A, EL-YAAGAOUBI M, DAMATI S A, et al. Role of polymers in microfluidic devices[J]. *Polymers*, 2022, 14(23). DOI: 10.3390/polym14235132.

[2] 马秀清,孙凯欣,李瑞,等. PMMA微流控芯片最佳注射成型工艺的实验研究[J]. *中国塑料*, 2021, 35(4):47-52.

MA Xiuqing, SUN Kaixin, LI Rui, et al. Experimental study on optimal injection-molding process of PMMA microfluidic chip[J].

*China Plastics*, 2021, 35(4):47-52.

- [3] 叶雄英,李子尚,冯金扬,等. 基于二氧化硅溅射的PMMA和PDMS亲水改性[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8):2 096-2 102.
- YE Xiongying, LI Zishang, FENG Jinyang, et al. Hydrophilic modification of PMMA and PDMS based on silicon dioxide sputtering[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8):2 096-2 102.
- [4] MALISZEWSKA I, GAZIŃSKA M, ŁOJKOWSKI M, et al. On the effect of non-thermal atmospheric pressure plasma treatment on the properties of PET film[J]. *Polymers*, 2023, 15(21). DOI: 10.3390/polym15214289.
- [5] SAUERBIER P, KÖHLER R, RENNER G, et al. Plasma treatment of polypropylene-based wood - plastic composites (WPC): Influences of working gas[J]. *Polymers*, 2020, 12(9). DOI: 10.3390/polym12091933.
- [6] DUFOUR T. From basics to frontiers: A Comprehensive review of plasma-modified and plasma-synthesized polymer films[J]. *Polymers*, 2023, 15(17). DOI: 10.3390/polym15173607.
- [7] 崔黎,李志涛,魏无际,等. 水射流用塑料磨料的表面亲水性研究及应用[J]. *工程塑料应用*, 2009, 37(5):50-53.
- CUI Li, LI Zhitao, WEI Wuji, et al. Study on surface hydrophilicity and application of plastics abrasives in water jet technique[J]. *Engineering Plastics Application*, 2009, 37(5):50-53.
- [8] 张雅雅,崔建国. 基于紫外臭氧光照技术的PDMS表面改性参数研究[J]. *表面技术*, 2016, 45(3):89-95.
- ZHANG Yaya, CUI Jianguo. PDMS surface modification parameters based on UVO irradiation[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(3):89-95.
- [9] 夏艳平,郑康,纪波印,等. 聚甲基丙烯酸甲酯/聚乙二醇单甲醚接枝共聚物的制备及对聚偏氟乙烯微孔膜的亲水改性[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(7):49-55.
- XIA Yanping, ZHENG Kang, JI Boyin, et al. Preparation of methyl methacrylate/polyethylene glycol monomethyl ether copolymer and effect on hydrophilic modification of polyvinylidene fluoride microporous membrane[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35(7):49-55.
- [10] 王贵美. 低温等离子体在塑料聚合物材料表面改性中的应用[J]. *塑料科技*, 2020, 48(5):125-128.
- WANG Guimei. Application of low temperature plasma in surface modification of plastic polymer materials[J]. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(5):125-128.
- [11] MOZETIČ M. Plasma-stimulated super-hydrophilic surface finish of polymers[J]. *Polymers*, 2020, 12(11). DOI: 10.3390/polym12112498.
- [12] 徐洁. 低温等离子体技术在塑料表面改性中的应用[J]. *塑料包装*, 2011, 21(3):26-27, 18.
- XU Jie. Application of low-temperature plasma technology in

- surface modification of plastics[J]. *Plastic Packaging*, 2011, 21(3): 26–27, 18.
- [13] 刘杨, 邸明伟. 聚合物等离子体表面改性时效性的研究进展[J]. 粘接, 2011, 32(3):79–83.  
LIU Yang, DI Mingwei. Research progress of ageing effect of plasma surface modification for polymer materials[J]. *Adhesion*, 2011, 32(3):79–83.
- [14] 任煜, 邱夷平. 低温等离子体对高聚物材料表面改性处理时效性的研究进展[J]. 材料导报, 2007(1):56–59.  
REN Yu, QIU Yiping. Research development of aging effect of low temperature plasma treatment on surface modification of polymer materials[J]. *Materials Review*, 2007(1):56–59.
- [15] DE GEYTER N, MORENT R, LEYS C. Influence of ambient conditions on the ageing behaviour of plasma-treated PET surfaces [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2008, 266(12-13): 3 086–3 090.
- [16] MORENT R, DE GEYTER N, LEYS C, et al. Study of the ageing behaviour of polymer films treated with a dielectric barrier discharge in air, helium and argon at medium pressure[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(18):7 847–7 854.
- [17] SHI Y, YE P, WANG C, et al. Surface hydrophilic modification for chip of centrifugal microfluidic immunoassay system[J]. *Micromachines*, 2022, 13(6). DOI:10.3390/mi13060831.
- [18] KIOMARSIPOUR K, ESHAGHI A. Preparation and evaluation of high-transparent scratch-resistant thin films on plasma treated polycarbonate substrate[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, 16(5). DOI:10.1016/j.arabjc.2023.104667.
- [19] MEN X, SHI X, GE B, et al. Novel transparent, liquid-repellent smooth surfaces with mechanical durability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 296:458–465.
- [20] MEZA-ARROYO J, SYAMALA RAO M G, CHANDRA SEKHAR REDDY K, et al. Ultra-dry air plasma treatment for enhancing the dielectric properties of  $Al_2O_3$ -GPTMS-PMMA hybrid dielectric gate layers in a-IGZO TFT applications[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32. DOI:10.1088/1361-6528/abd277.