

利安隆是一家全球领先的生物化学平台型公司，公司秉承以创新驱动发展的经营理念，通过全球化布局实现生产与运营的高效协同，聚焦化学和生物领域前瞻、高效、成熟的新技术，为客户提供高品质的产品和服务，做细分行业的领导者。

为实现百年利安隆品牌的愿景，公司规划布局了第一生命曲线——高分子材料抗老化业务、第二生命曲线——润滑油添加剂业务、第三生命曲线——生命科学业务，基于三条业务曲线扎实的基本盘，公司持续扩展新业务的管理能力、实体经济运营能力和全球营销能力，我们又拓展布局了新兴业务——聚酰亚胺 (PI) 等新材料领域，持续推动公司高质量发展。

利安隆坚持以“客户至上、奋斗为本，创新驱动、追求卓越，简单高效、开放包容”的核心价值观，践行“用化学和生物创造多彩生活”的企业使命，力争成为客户信赖、员工自豪、社会尊重、可持续发展的世界一流企业。



天津汉沽基地 TIANJIN HANGU



宁夏中卫基地 NINGXIA ZHONGWEI



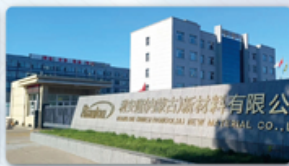
浙江常山基地 ZHEJIANG CHANGSHAN



河北衡水基地 HEBEI HENGSHUI



广东珠海基地 GUANGDONG ZHUHAI



内蒙古赤峰基地 NEIMENGGU CHIFENG



辽宁锦州基地 LIAONING JINZHOU

## 全球认证



## 全球客户

通过近三十年的积累和发展，公司客户遍及全球，几乎涵盖所有高分子材料及各个应用领域全球著名的高分子材料公司。



全球化工50强



TFS 57家



全球涂料10强

天津利安隆新材料股份有限公司

地址:天津华苑产业区开华道20号智慧山西塔20层 邮编:300384

电话:022-83718769

邮箱:market@rianlon.com

公司网址:www.rianlon.com



# 抗菌超疏水结构生色织物的制备及性能

陶伟晗, 方寅春\*

(安徽工程大学 纺织服装学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 以甲基丙烯酸甲酯 (MMA)、丙烯酸叔丁酯 (*t*-BA) 和丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵 (DAC) 为聚合单体, 采用无皂乳液聚合方法合成了 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球; 然后, 将 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球通过雾化沉积法在黑色涤纶上构建结构色制备了 P(MMA/*t*-BA/DAC) 结构色织物; 最后, 采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 处理 P(MMA/*t*-BA/DAC) 结构色织物。对 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球及结构色织物进行了 FTIR、SEM、粒径分布、反射光谱、静态水接触角和抗菌性能测试, 考察了单体 *t*-BA 用量对上述性能指标的影响。结果表明, 在保持  $n(\text{MMA}) : n(\text{DAC}) = 4 : 1$ 、MMA 8.000 g 的条件下, 通过调整单体 *t*-BA 的用量, 制备了 5 种不同平均粒径 (258~455 nm) 的 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球, 并成功构建 5 种不同结构色 (蓝色、紫色、蓝紫色、绿色和红色) 的 P(MMA/*t*-BA/DAC) 结构色织物。P(MMA/*t*-BA/DAC) 结构色织物对大肠杆菌 (*E. coli*) 和金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 的抑菌率均 >99%, 表现出优异的抗菌性能。经 PDMS 处理后的结构色织物, 其水接触角均 >150°, 表现出超疏水性能, 可对常见液体 (牛奶、可乐、茶水、果汁、咖啡) 具备自清洁的功能。

**关键词:** 结构色; 聚合物微球; 抗菌性能; 超疏水; 涤纶织物; 功能材料

中图分类号: TS195.5 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2025) 08-1739-06

## Preparation and properties of structural color fabrics with antibacterial and superhydrophobic functions

TAO Weihan, FANG Yinchun\*

(School of Textile and Garment, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

**Abstract:** P(MMA/*t*-BA/DAC) polymer microspheres were synthesized from soap-free emulsion polymerization of methyl methacrylate (MMA), *tert*-butyl acrylate (*t*-BA) and acryloxyethyl trimethylammonium chloride (DAC), and then deposited on black polyester *via* atomization to obtain P(MMA/*t*-BA/DAC) structural color fabrics, which was further treated with polydimethylsiloxane (PDMS). The P(MMA/*t*-BA/DAC) polymer microspheres and structural color fabrics were analyzed by FTIR, SEM, particle size distribution measurement, reflection spectrum analysis, static water contact angle tester and antibacterial tests to evaluate the influence of *t*-BA monomer dosage. The results showed that under the condition of maintaining  $n(\text{MMA}) : n(\text{DAC}) = 4 : 1$ , MMA 8.000 g, five kinds of P(MMA/*t*-BA/DAC) polymer microspheres with different average particle sizes (258~455 nm) were obtained by adjusting the dosage of *t*-BA, while P(MMA/*t*-BA/DAC) structural color fabrics with five different structural colors (blue, purple, blue purple, green, and red) were successfully constructed. The antibacterial rates against both *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) of P(MMA/*t*-BA/DAC) structural color fabrics reached over 99%, showing excellent antibacterial properties. The water contact angle of structural color fabrics after treatment with PDMS were over 150°, showing superhydrophobic properties and capable

收稿日期: 2024-07-12; 定用日期: 2024-08-12; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240560

基金项目: 聚合物分子工程国家重点实验室 (复旦大学) 开放基金项目 (K2024-12); 安徽工程大学校级科研项目 (Xjky2022061)

作者简介: 陶伟晗 (1999—), 男, 硕士生, E-mail: 1278933496@qq.com。联系人: 方寅春 (1986—), 男, 副教授, E-mail: fangyinchun86@163.com。

of common liquids self-cleaning such as milk, cola, tea, juice, and coffee.

**Key words:** structural color; polymer microspheres; antibacterial properties; superhydrophobicity; polyester fabrics; functional materials

在纺织领域,传统的纺织品染色过程存在能耗高、污染严重、用水量等问题<sup>[1]</sup>。因此,寻求更为环保和可持续的染色工艺已成为业界的迫切需求<sup>[2]</sup>。结构色作为一种新型的着色途径,因色彩鲜艳、不易褪色以及对环境友好等特点,逐渐引起人们的广泛关注<sup>[3]</sup>。在纺织材料表面构建结构色可以降低水资源的消耗,从而有效减少环境污染,实现纺织品绿色、低碳、环保着色。

近年来,科研人员积极探索利用二氧化硅<sup>[4-5]</sup>、苯乙烯<sup>[6]</sup>、甲基丙烯酸甲酯<sup>[7-8]</sup>等材料来构建结构色,已经成功将其应用于纺织领域,获得了具有艳丽颜色的结构色纺织品。在此基础上,功能性结构色受到人们的进一步关注。功能性结构色在纺织品表面构建结构色的同时,又可赋予其特殊的功能性,如疏水<sup>[9]</sup>、抗紫外线<sup>[10]</sup>、抗细菌<sup>[11-13]</sup>和自清洁<sup>[14]</sup>等。ZENG 等<sup>[15]</sup>通过喷涂乳胶球乳液、聚丙烯酸酯溶液和炭黑纳米颗粒,获得了具有非彩虹色结构色的超疏水织物。SHI 等<sup>[16]</sup>将乳胶球和吡咯烷酮锌共同组装在聚多巴胺改性织物上,制备出颜色明亮且性能优异的抗菌织物。因此,开发兼具艳丽颜色和多种功能的功能性结构色纺织品可以拓展功能性结构色应用领域。

本文拟以丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)为抗菌季铵盐单体,与甲基丙烯酸甲酯(MMA)和丙烯酸叔丁酯(*t*-BA)合成具有抗菌性能的聚合物微球,通过雾化沉积制备结构色织物,并在结构色织物上处理聚二甲基硅氧烷(PDMS),考察结构色织物的颜色性能、抗菌和超疏水性能。以期为研发具备抗菌、超疏水功能的结构色织物提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 材料、试剂与仪器

黑色涤纶(纱支 75 D×75 D,经、纬密度分别为 540、320 根/10 cm,面密度 72 g/m<sup>2</sup>,平纹),苏州东艾纺织有限公司;大肠杆菌(*E. coli*, ATCC 8739)、金黄色葡萄球菌(*S. aureus*, ATCC 6538),上海维塔化学试剂有限公司。

MMA(分析纯)、DAC(质量分数 80%),上海泰坦科技股份有限公司;*t*-BA、过硫酸钾、碳酸氢钠、正己烷,分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;聚二甲基硅氧烷预聚体(Sylgard 184A)、

固化剂(Sylgard 184B),工业品,美国 Dow Corning 公司;去离子水,自制。

Zetasizer Nano ZS90 型纳米粒度及 Zeta 电位仪,英国马尔文仪器有限公司;S-4800 型场发射扫描电子显微镜(SEM),日本 Hitachi 公司;SDC-200S 型接触角测试仪,昆山讯采仪器科技有限公司;Datacolor 1050 型测色配色仪,美国 Datacolor 公司;IRPrestige-21 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),日本 Shimadzu 公司;佳能 R10 型数码相机,佳能(中国)有限公司;Cence H1850 型医用离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;403T 型压缩空气式雾化器,江苏鱼跃医疗设备股份有限公司;YG(B)022E 型全自动织物硬挺度仪,温州市大荣纺织仪器有限公司;YK-FZ66 型全自动织物透气性测试仪,东莞市耀科仪器有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 纳米微球的制备

按照  $n(\text{MMA}) : n(\text{t-BA}) : n(\text{DAC}) = 4 : 2 : 1$ ,将 MMA(8.000 g)、*t*-BA(5.120 g)和 DAC(3.870 g)加入到含 45 mL 去离水的烧瓶中,再加入 0.025 g 碳酸氢钠作为缓冲剂,向烧瓶中通入 N<sub>2</sub> 持续 15 min,保护反应体系。然后,在水浴中加热至 85 °C,恒温磁力搅拌 30 min。将引发剂(0.036 g 过硫酸钾加入到 10 mL 去离子水中充分溶解)加入到上述反应溶液,引发聚合反应。保持 85 °C 恒温磁力搅拌反应 4 h。最后,将反应溶液离心 40 min(11000 r/min)得到沉淀物。通过水洗、离心处理 2~3 次得到乳白色固体产物 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球,记为 PMBD-A。

采用上述方法步骤,只调整 *t*-BA 的用量,保持  $n(\text{MMA}) : n(\text{t-BA}) : n(\text{DAC}) = 4 : 6 : 1, 4 : 7 : 1, 4 : 8 : 1, 4 : 10 : 1$ 。将制备的 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球分别记为 PMBD-B、PMBD-C、PMBD-D、PMBD-E。

#### 1.2.2 微球结构色织物的制备

将 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球(PMBD-A~PMBD-E)(10~13 g)加入到烧杯中,并加入其质量 2.5 倍的去离子水,磁力搅拌 12 h,制备均匀的微球分散液。将半径 4 cm 圆形涤纶织物放置在大小为 30 cm×20 cm×10 cm(长×宽×高)的密闭箱中,取微球分散液加入到雾化器中雾化处理 15 min;然后,在 60 °C 电热恒温鼓风干燥箱中干燥 10 min,得到 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物,分别记为

PMBD-At~PMBD-Et。

### 1.2.3 结构色织物的疏水处理

将 1.0 g PDMS 预聚体、0.1 g 固化剂和 20 mL 正己烷加入到 50 mL 烧杯中, 磁力搅拌 30 min。取搅拌溶液 3 mL, 采用喷枪在距离织物约 15 cm 的高度将混合溶液全部均匀喷涂在 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物 (PMBD-At~PMBD-Et) 上。在 65 °C 电热恒温鼓风干燥箱中干燥 15 min, 完成疏水处理, 处理后的织物分别记为 PMBD-Ath~PMBD-Eth。

## 1.3 表征与测试

### 1.3.1 FTIR 测试

将 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球经去离子水多次离心洗涤后, 在 30 °C 电热恒温鼓风干燥箱中干燥 24 h, 然后取出研磨成固体粉末。KBr 压片法, 波数范围 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数 32 次。

### 1.3.2 粒径测试

将 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球分散在去离子水中, 制成质量浓度为 0.01 g/L 的单分散微球乳液, 利用纳米粒度及 Zeta 电位仪对纳米微球的粒径及其分布进行测定。

### 1.3.3 SEM 测试

低位二次电子 (LEI) 模式, 工作电流 20  $\mu\text{A}$ , 电子加速电压 5.0 kV, 观察 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物上聚合物微球的外观形貌。

### 1.3.4 结构色颜色的测试

通过测色配色仪测定 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物在波长 360~700 nm 的反射光谱, 并测量其  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值数次, 取算数平均值。 $L^*$ 值表示色彩的亮度, 其值为 0~100;  $+a^*$ 值表示红色,  $-a^*$ 值表示绿色;  $+b^*$ 值表示黄色,  $-b^*$ 值表示蓝色<sup>[17]</sup>。

### 1.3.5 透气性能测试

按照 GB/T 24218.15—2018, 使用全自动织物透气性测试仪测试通过试样的平均气流量, 每个试样测试 3 次, 结果取算数平均值。

### 1.3.6 硬挺度测试

按照 GB/T 18318—2001, 采用全自动织物硬挺度仪测试试样的伸出长度和抗弯长度, 每个试样测试 3 次, 结果取算数平均值。

### 1.3.7 抗菌性能测试

采用 GB/T 20944.2—2007 对结构色涤纶织物进行抗菌测试, 通过平板计数法计算对大肠杆菌 (*E. coli*) 和金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 的抗菌效果, 按照式 (1) 计算抑菌率:

$$A/\% = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $A$  为抑菌率, %;  $N_0$  为初始细菌数量, 个;  $N$  为抗菌后的细菌数量, 个。

### 1.3.8 接触角测试

采用接触角测试仪对织物表面的水接触角进行测定, 在样品表面的 3 个不同的位置滴加 2  $\mu\text{L}$  的去离子水, 并对液滴图像进行拍摄和分析, 计算样品的静态接触角, 测试结果取测量平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表征分析

图 1 为单体 DAC、MMA、*t*-BA 和产物 PMBD-A 的 FTIR 谱图。

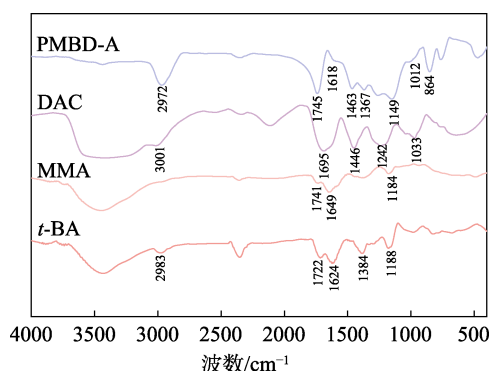


图 1 DAC、MMA、*t*-BA 和 PMBD-A 的 FTIR 谱图  
Fig. 1 FTIR spectra of DAC, MMA, *t*-BA and PMBD-A

从图 1 可以看出, *t*-BA 在 2983  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为  $-\text{CH}_3$  的伸缩振动, 1722  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为  $\text{C}=\text{O}$  键的伸缩振动, 1624  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于  $\text{C}=\text{C}$  键的伸缩振动, 1384  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为  $\text{C}-\text{H}$  的伸缩振动, 1188  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  键的伸缩振动。MMA 在 1741、1649 和 1184  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰分别对应于  $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}=\text{C}$  和  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  键的伸缩振动。DAC 在 3001 和 1446  $\text{cm}^{-1}$  处为  $-\text{CH}_3$  和  $-\text{CH}$  的特征峰, 1695 和 1242  $\text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}=\text{C}$  和  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  键的特征峰, 1033  $\text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}-\text{N}$  键的伸缩振动吸收峰。而 PMBD-A 在 2972  $\text{cm}^{-1}$  处为  $-\text{CH}_3$  的特征峰、1745  $\text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}=\text{O}$  键的特征峰、1618  $\text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}=\text{C}$  键的特征峰和 1149  $\text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  键特征峰, 其中, 1012  $\text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}-\text{N}$  键的特征峰, 1463、1367 和 864  $\text{cm}^{-1}$  处为  $-\text{CH}$  新的特征峰, 这是在聚合过程中双键的断裂所导致的。结果表明, 成功合成了 PMBD-A。

表 1 为 P(MMA/*t*-BA/DAC)的平均粒径及多分散性指数 (PDI), 图 2 为聚合物微球粒径分布曲线。

一般认为,  $\text{PDI} < 0.05$  的微球具有良好的单分散性,  $\text{PDI}$  越小表明微球粒径分布越窄, 单分散性也

越好<sup>[18]</sup>。从图 2 可以看出, 5 种 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球粒径分布均较窄, PDI<0.05 (表 1), 表明其具有较好的单分散性。经测定, PMBD-A、PMBD-B、PMBD-C、PMBD-D、PMBD-E 的平均粒径分别为 347、312、258、400、455 nm。表明聚合反应时, 通过调整 *t*-BA 的用量可以调控 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球的粒径。

表 1 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球平均粒径及其 PDI  
Table 1 Average particle size and PDI of P(MMA/*t*-BA/DAC) microspheres

指标	P(MMA/ <i>t</i> -BA/DAC) 聚合物微球				
	PMBD-A	PMBD-B	PMBD-C	PMBD-D	PMBD-E
平均粒径/nm	347	312	258	400	455
PDI	0.012	0.006	0.025	0.003	0.008

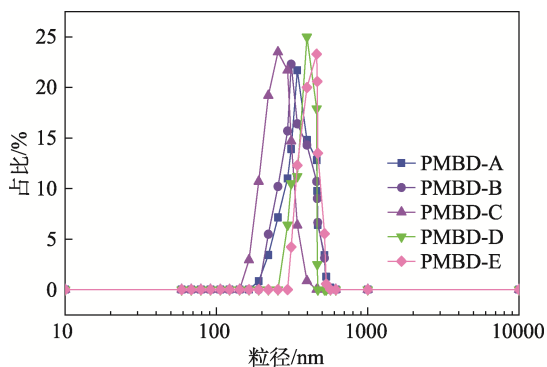


图 2 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球粒径分布曲线  
Fig. 2 Particle size distribution curves of microspheres with different particle sizes P(MMA/*t*-BA/DAC)

图 3 为 PMBD-At 的 SEM 图。

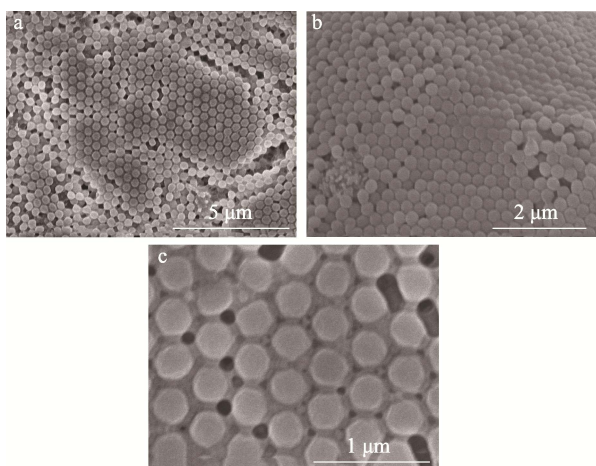


图 3 PMBD-At 在不同放大倍数下的 SEM 图  
Fig. 3 SEM images of PMBD-At at different magnifications

从图 3 可以看出, PMBD-At 外观近似圆球状, 形状规整、大小均匀, 且分散性良好, 无大量团聚, 微球相互之间紧密连接; 聚合微球附着在涤纶织物表面, 并在涤纶织物表面自组装形成短程有序、长

程无序的结构。

## 2.2 结构色织物的颜色和物理性能分析

图 4 为 5 种 P(MMA/*t*-BA/DAC) 结构色织物的数码照片。

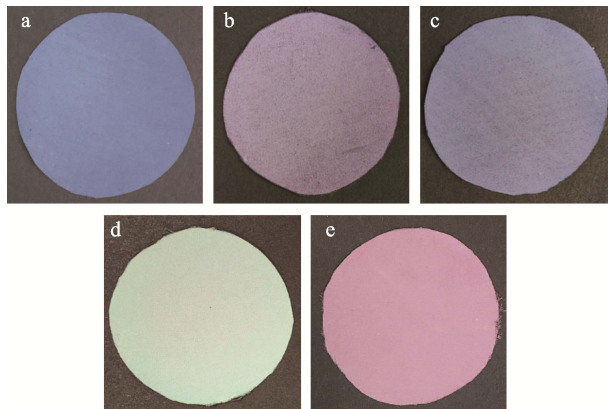
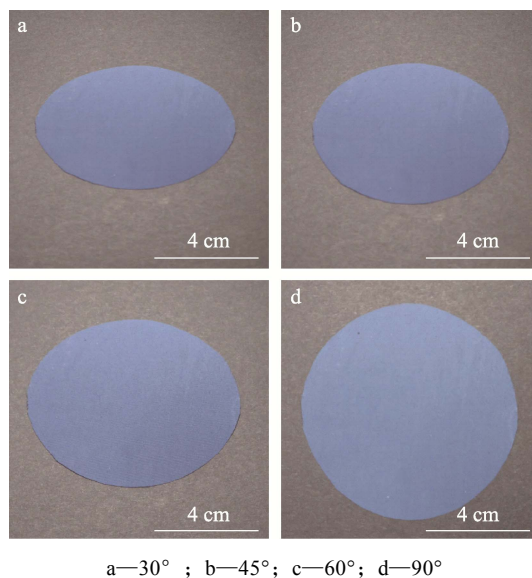


图 4 PMBD-At (a)、PMBD-Bt (b)、PMBD-Ct (c)、PMBD-Dt (d)、PMBD-Et (e) 的数码照片  
Fig. 4 Digital photographs of PMBD-At (a), PMBD-Bt (b), PMBD-Ct (c), PMBD-Dt (d), PMBD-Et (e)

从图 4 可以可看出, PMBD-At、PMBD-Bt、PMBD-Ct、PMBD-Dt、PMBD-Et 分别呈现蓝色、紫色、蓝紫色、绿色和红色 5 种结构色。表明不同粒径的 P(MMA/*t*-BA/DAC) 聚合物微球可以在织物上形成不同颜色的结构色。

图 5 为不同角度观察 PMBD-At 的数码照片。



a—30° ; b—45° ; c—60° ; d—90°  
图 5 不同角度观察的 PMBD-At 的数码照片  
Fig. 5 Digital photographs of PMBD-At observed from different angles

从图 5 可以看出, 在 30°、45°、60°和 90°下观察 PMBD-At, 其结构色没有随着观察角度变化而变化, 表明 PMBD-A 构建的结构色具有非虹彩效应, 属于非晶光子晶体结构色。

图 6 为 5 种 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物的反射光谱, 表 2 为其颜色特征值。

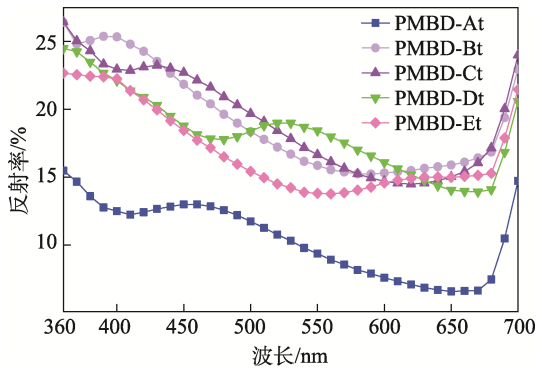


图 6 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物的反射光谱  
Fig. 6 Reflection spectra of P(MMA/*t*-BA/DAC) structural color fabrics

表 2 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物的颜色特征值  
Table 2 Color characteristic values of P(MMA/*t*-BA/DAC) structural color fabrics

结构色织物	颜色特征值		
	<i>L*</i> 值	<i>a*</i> 值	<i>b*</i> 值
PMBD-At	37.56	-2.58	-6.69
PMBD-Bt	45.01	1.73	-10.02
PMBD-Ct	44.19	-1.63	-9.40
PMBD-Dt	43.30	-2.90	-2.71
PMBD-Et	42.97	3.57	-8.37

从图 6 可以看出, 不同 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物存在特有反射率峰值。蓝色结构色织物 (PMBD-At) 反射率峰值在 450 nm 处, 其最大反射率为 13%; 紫色结构色织物 (PMBD-Bt) 在 390 nm 处存在反射率峰值, 为 25.39%; 蓝紫色结构色织物 (PMBD-Ct) 在 430 nm 处存在反射率峰值, 为 23.25%; 绿色结构色织物 (PMBD-Dt) 在 530 nm 处存在反射率峰值, 为 18.99%; 红色结构色织物 (PMBD-Et) 在 640 nm 处存在反射率峰值, 为 15.20%。

从表 2 可以看出, PMBD-At 的 *L\** 值最低 (37.56), 与其最大反射率峰值 (13%) 最低结果一致; 其他样品 *L\** 值相近 (42.97~45.01), 与图 6 结构色反射率曲线结果一致。且各颜色的 *a\**、*b\** 的正负数值所反映的颜色与反射光谱曲线中最大反射率峰值一致, 表明通过改变合成过程中的单体 (*t*-BA) 用量, 可以得到不同粒径的微球, 进而在涤纶织物上形成不同的颜色。

表 3 为涤纶和 PMBD-Ath 的硬挺度和透气性数据。

从表 3 可以看出, PMBD-Ath 的伸出长度和抗弯长度比涤纶提升了约 2 mm, 但其柔软性能略有降低<sup>[19]</sup>, 其透气性有所下降, 从 40.5 mm/s 下降到 28.0 mm/s。这是因为, 一方面, 相互之间紧密连接的聚合物微球的层层堆积对纤维的孔洞进行填补, 堵塞了透气孔道; 另一方面, PDMS 的喷涂赋予其低的表面能, 在其表面形成疏水涂层导致其透气性能的降低。

表 3 织物处理前后的硬挺度和透气性

Table 3 AStiffness and breathability of fabrics before and after treatment

样品	硬挺度 (径向)		硬挺度 (纬向)		透气性/(mm/s)
	伸出长度/mm	抗弯长度/mm	伸出长度/mm	抗弯长度/mm	
涤纶	45.5±1.6	22.1±0.8	51.1±1.7	24.9±0.5	40.5±1.7
PMBD-Ath	48.7±1.2	23.7±0.5	53.4±1.5	26.0±0.6	28.0±0.2

### 2.3 结构色织物的抗菌性能分析

图 7 为 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物的 1 h 抑菌效果, 表 4 为抑菌率数据。

从图 7 可以看出, 经 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色

织物处理后的抗菌刮板图中几乎无细菌, 与原菌对照组的菌落数形成鲜明的反差, 表明 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物具有优异的抗菌性能, 可以有效地抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长。

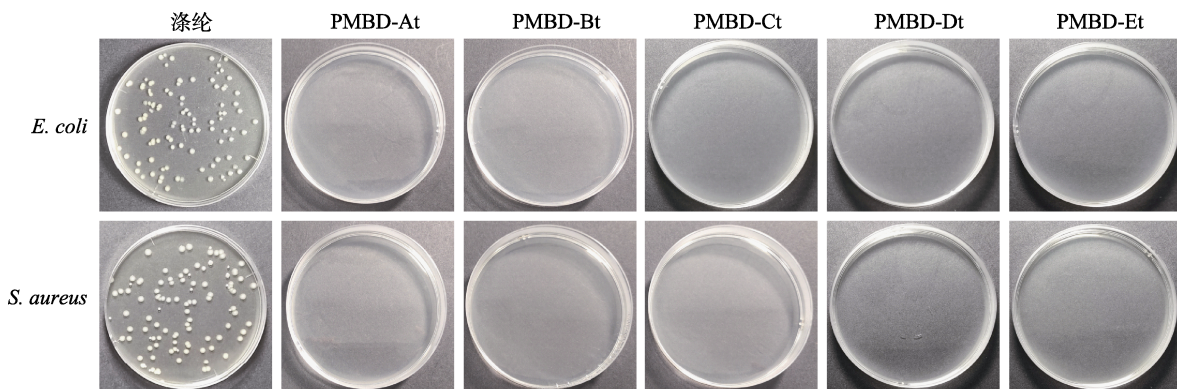


图 7 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物的 1 h 抑菌效果

Fig. 7 Antibacterial effect of P(MMA/*t*-BA/DAC) structural color fabric for 1 h

表 4 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物的 1 h 抑菌率  
Table 4 Antibacterial rate of P(MMA/*t*-BA/DAC) structural color fabrics for 1 h

细菌	抑菌率/%				
	PMBD-At	PMBD-Bt	PMBD-Ct	PMBD-Dt	PMBD-Et
<i>E. coli</i>	99.9	99.9	99.9	99.4	99.9
<i>S. aureus</i>	99.3	99.6	99.8	99.9	99.6

从表 4 可以看出, P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物对大肠杆菌以及金黄色葡萄球菌的 1 h 抑菌率均 >99%。这是因为, 制备 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球的单体 DAC 是带正电的季铵盐, 可以通过静电作用吸附在带负电的细菌表面, 从而破坏细胞壁的完整性, 改变细胞膜的通透性, 引起细菌细胞质外露, 最终导致细菌死亡<sup>[20]</sup>。

### 2.4 结构色织物的疏水性和自清洁性能分析

图 8 为经疏水处理后的 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物水接触角测试结果。

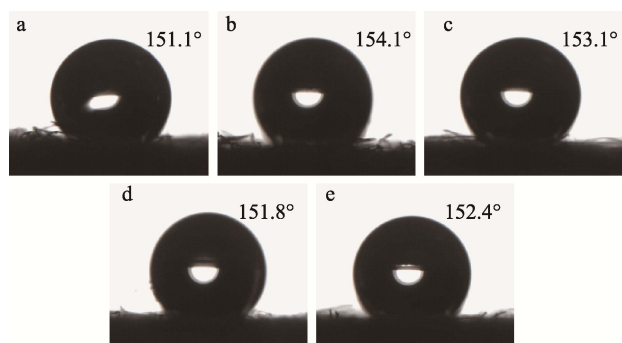


图 8 PMBD-Ath (a)、PMBD-Bth (b)、PMBD-Cth (c)、PMBD-Dth (d)、PMBD-Eth (e) 的水接触角  
Fig. 8 Water contact angle of PMBD-Ath (a), PMBD-Bth (b), PMBD-Cth (c), PMBD-Dth (d), PMBD-Eth (e)

从图 8 可以看出, PMBD-Ath~PMBD-Eth 的水接触角均 >150°, PMBD-Bth 的水接触角最大为 154.1°, 表明 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物经疏水处理后具有超疏水的性能。这是因为, 通过在 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物表面喷涂 PDMS, 经高温固化后, 纳米尺度的聚合物微球和微米尺度的纤维构成的微米、纳米粗糙度以及 PDMS 赋予织物低的表面能。

图 9 为不同液体滴落在 PMBD-Dth 表面实物图。

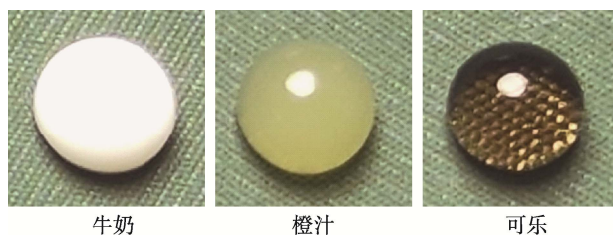
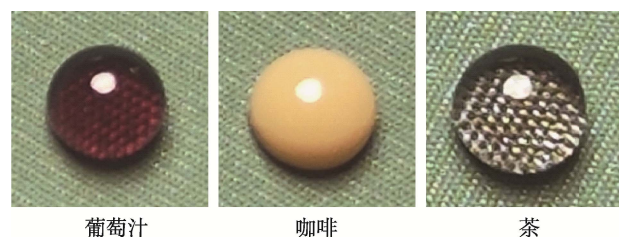


图 9 不同液体在 PMBD-Dth 上的防污测试结果  
Fig. 9 Anti fouling test results of different liquids on PMBD-Dth

从图 9 可以看出, 所有液体均可在织物表面呈现出球状液滴, 表明 PMBD-Dth 具有优异的疏水效果, 可以实现自清洁效果。

### 3 结论

本文以 MMA、*t*-BA 和 DAC 为原料, 通过无皂乳液聚合成功合成了 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球。

(1) 通过调整单体 *t*-BA 的用量可以合成不同粒径的 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球。

(2) 经不同粒径的 P(MMA/*t*-BA/DAC)聚合物微球雾化处理的 5 种 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物可以呈现蓝色、紫色、蓝紫色、绿色和红色 5 种不同颜色的结构色。

(3) P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物对大肠杆菌以及金黄色葡萄球菌的抑菌率均 >99%。

(4) 在 P(MMA/*t*-BA/DAC)结构色织物表面通过喷涂 PDMS, 可在织物表面形成超疏水涂层, 其水接触角均 >150°, 表现出优异的超疏水性能。但处理后织物的硬挺度 (伸出长度和抗弯长度) 平均提升约 2 mm, 透气性从 40.5 mm/s 下降到 28.0 mm/s, 其柔软性和透气性能有所下降。

本文在纺织品上形成结构色的同时, 可以赋予其抗菌、超疏水和自清洁功能, 可进一步拓展结构色纺织品的应用领域。

### 参考文献:

- [1] UDDIN F. Environmental hazard in textile dyeing wastewater from local textile industry[J]. Cellulose, 2021, 28(17): 10715-10739.
- [2] YE L H (叶丽华), DU W Q (杜文琴). Optical properties of fabric with multiple structural colors[J]. Journal of Textile Research (纺织学报), 2016, 37(8): 83-88.
- [3] CHEN H H (陈欢欢), GAO W H (高伟洪), CHEN K K (陈凯凯), et al. Research progress on the fabrication and application of textile materials with photonic crystal structural colors[J]. Chemical Industry and Engineering Progress (化工进展), 2022, 41(8): 4327-4340.
- [4] GE D T, YANG X M, CHEN Z, et al. Colloidal inks from bumpy colloidal nanoparticles for the assembly of ultrasmooth and uniform structural colors[J]. Nanoscale, 2017, 9(44): 17357-17363.