

· 研究论文 ·

## 抗菌聚合物结构色微球的制备及性能

陶伟晗 方寅春\*

(安徽工程大学纺织服装学院, 芜湖 241000)

**摘要:** 采用无皂乳液聚合方法, 以甲基丙烯酸甲酯(MMA)、苯乙烯(St)和丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC), 合成不同粒径的P(St-MMA-DAC)聚合物微球, 通过雾化沉积法在涤纶织物上制备结构色。对P(St-MMA-DAC)聚合物微球及结构色织物进行了红外光谱、扫描电镜、粒径、反射光谱和抗菌性能测试。结果表明, 通过改变合成过程中单体比例可以得到不同粒径的P(St-MMA-DAC)聚合物微球, 可在涤纶织物上形成蓝色、粉红色、绿色、青色和紫色5种不同颜色的结构色。结构色织物对大肠杆菌(*E. coli*) and金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抑菌率可达到98%以上, 表现出优异的抗菌性能。本文为功能性聚合物微球开发及在纺织、医疗卫生等领域的应用提供了研究基础。

**关键词:** 结构色; 聚合物微球; 功能性; 抗菌

## Preparation and Properties of Antibacterial Polymer Structural Color Microspheres

TAO Wei-han, FANG Yin-chun\*

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

**Abstract:** P(St-MMA-DAC) polymer microspheres with different particle sizes were synthesized by soap free emulsion polymerization using methyl methacrylate (MMA), styrene (St) and acryloxyethyl trimethylammonium chloride (DAC). The structural colors were formed on polyester fabric by atomization deposition of these P(St-MMA-DAC) polymer microspheres. Infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, particle size, reflectance spectroscopy, and antibacterial performance tests were conducted on P(St-MMA-DAC) polymer microspheres and structural color fabrics. The results indicate that P(St-MMA-DAC) polymer microspheres with different particle sizes can be obtained by changing the monomer ratios during the synthesis process, which can form five different structural colors of blue, pink, green, cyan, and purple on polyester fabrics. The antibacterial rates of structural color fabrics against *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) can reach over 98%, showing excellent antibacterial properties. This study provides a research basis for the development of functional polymer microspheres and their application in textile, medical and health fields.

**Keywords:** Structural color; Polymer microspheres; Functionality; Antibacterial

引用: 陶伟晗, 方寅春. 抗菌聚合物结构色微球的制备及性能. 高分子通报, 2025, 38(1), 109–115.

**Citation:** Tao, W. H.; Fang, Y. C. Preparation and properties of antibacterial polymer structural color microspheres. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(1), 109–115.

2024-08-14 收稿, 2024-10-07 录用, 2024-11-07 网络出版

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(基金号 K2024-12), 安徽工程大学校级科研项目(项目号 Xjky2022061).

\* 通信联系人: 方寅春, E-mail: fangyinchun86@163.com

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2024.24.234

自然界中的颜色根据产生颜色的机理一般分为化学色和结构色两大类<sup>[1]</sup>。化学色主要由含有特定基团有机化合物对可见光选择性吸收产生, 又称色素色, 如常见的染料和颜料<sup>[2]</sup>。结构色是由物体特殊的微纳结构对光的散射、干涉或衍射产生。结构色因其具有高亮度、高饱和度、永不褪色、绿色环保等优点, 正逐步成为着色领域的研究热点<sup>[3-5]</sup>。

近年来, 科研工作者们基于不同的结构色产生原理利用纤维素纳米晶体<sup>[6,7]</sup>、二氧化硅<sup>[8]</sup>、苯乙烯<sup>[9]</sup>、甲基丙烯酸甲酯<sup>[10]</sup>等材料, 通过精细调控微纳结构, 成功制备出色彩丰富的结构色。Yu等通过制备高固含量的聚(苯乙烯-丙烯酸丁酯-甲基丙烯酸)(P(St-BA-MAA))结构色涂料, 在不同的基材上成功制造出光子晶体图案<sup>[11]</sup>。Liu等在苯乙烯乳液中加入丙烯酸(AA)、甲基丙烯酸甲酯(MMA)和丙烯酸丁酯(BA)作为共聚单体进行聚合, 合成了多种聚苯乙烯(PSt)聚合物微球, 通过自组装的方式构建了结构色涂层<sup>[12]</sup>。然而, 当下单一结构色已然无法满足消费者的需求<sup>[13]</sup>, 因此, 若能在形成艳丽结构色的同时, 赋予其特殊的功能, 将能极大地拓展其应用领域, 如疏水<sup>[14]</sup>、抗紫外线<sup>[15]</sup>、抗菌<sup>[16]</sup>及自清洁<sup>[17]</sup>等方面。近年来, 受新冠疫情的影响, 具有抗菌功能的材料越来越受到人们的关注<sup>[18,19]</sup>。因此, 具有抗菌功能的结构色也被广泛研究。Gao等通过制备聚(苯乙烯-丙烯酸丁酯-甲基丙烯酸)(P(St-BA-MAA))胶体颗粒, 以黑色二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )用作黑色掺杂剂, 而掺杂的黑色 $\text{TiO}_2$ 具有很强的紫外可见光吸收和抗菌能力, 从而研发出具有紫外线防护和抗菌功能的纺织品<sup>[20]</sup>。Shi等将乳胶球和吡咯烷酮锌共同组装在聚多巴胺改性织物上, 抗菌离子吡咯烷酮锌负载到结构色染料的孔隙中, 制备出颜色艳丽且抗菌效果优异的织物<sup>[21]</sup>。然而, 目前研究报道的抗菌结构色大多通过在结构色的构筑单元中添加抗菌功能化合物共组装制备, 若构筑结构色的聚合物微球自身具有抗菌性能将可以简化工艺、降低成本, 使其更具实用性。

基于此, 本文通过将含双键的季铵盐单体丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)与甲基丙烯酸甲酯(MMA)和苯乙烯(St)共聚, 合成具有抗菌活性的聚合物微球。利用雾化沉积技术将微球均匀沉积于纺织材料表面, 形成结构色层, 制备具有抗

菌性能的结构色织物。通过深入探究聚合物结构色与抗菌功能的内在联系, 为结构色材料的功能化探索开辟全新的视野与创意路径, 促进其在多领域应用中的创新与发展。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料与仪器

实验材料: 苯乙烯(St, 97%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司), 甲基丙烯酸甲酯(MMA, 分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司), 丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC, 80%, 上海泰坦科技股份有限公司), 黑色涤纶(纱支 $75\text{D} \times 75\text{D}$ , 经、纬密分别为540、320根/(10 cm), 面密度 $72\text{ g/m}^2$ , 平纹, 苏州东艾纺织有限公司), 过硫酸钾(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司), 碳酸氢钠(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司), 大肠杆菌(*E. coli*, ATCC 8739), 金黄色葡萄球菌(*S. aureus*, ATCC 6538), 去离子水(实验室自制)。

实验仪器: Zetasizer Nano S 马尔文粒度测试仪(英国马尔文仪器有限公司), S-4800型场发射扫描电镜(日本日立公司), Datacolor 1050 测色配色仪(美国Datacolor公司), 电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科技有限公司), 红外光谱仪(日本岛津公司), 水浴搅拌锅(上海圣科仪器设备有限公司), 佳能R10数码相机(佳能(中国)有限公司), cence H1850医用离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司), 压缩空气式雾化器(江苏鱼跃医疗设备股份有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 P(St-MMA-DAC)纳米微球的制备

将St、MMA和DAC按照一定摩尔比加入到含45 mL去离子水的烧瓶中(表1), 然后加入0.025 g的碳酸氢钠作为缓冲剂, 向烧瓶中通入氮气持续15 min, 保护反应体系。然后在水浴

表1 不同单体摩尔比的P(St-MMA-DAC)聚合物微球

Table 1 P(St-MMA-DAC) polymer microspheres with different monomer molar ratios

| 样品名      | 单体摩尔比 |     |     |
|----------|-------|-----|-----|
|          | St    | MMA | DAC |
| Sample A | 3     | 4   | 1   |
| Sample B | 4     | 4   | 1   |
| Sample C | 5     | 4   | 1   |
| Sample D | 3     | 5   | 1   |
| Sample E | 3     | 3   | 1   |

中加热至 85 °C, 并在此温度下恒温磁力搅拌器 30 min。将 0.036 g 的过硫酸钾加入到 10 mL 去离子水中充分溶解后作为引发剂, 加入到上述反应溶液, 引发聚合反应(合成过程如图 1)。保持在该

温度下恒温磁力搅拌反应 4 h, 结束后将反应溶液采用离心机以  $1.1 \times 10^4$  r/min 速率离心 40 min 得到沉淀物。通过水洗、离心处理 2~3 次得到固体产物。

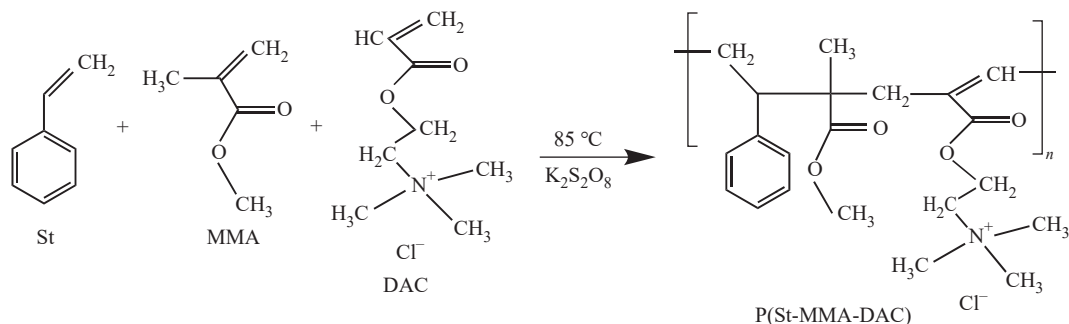


图 1 P(St-MMA-DAC) 合成示意图

Figure 1 Schematic diagram of the synthesis of P(St-MMA-DAC)

### 1.2.2 P(St-MMA-DAC) 微球结构色织物的制备

将离心后的 P(St-MMA-DAC) 固体产物加入烧杯中, 并加入 2 倍固体产物质量的去离子水, 磁力搅拌 12 h, 制备均匀的微球分散液。将分散液加入到雾化器中, 涤纶织物裁剪为半径 4 cm 的圆形织物, 放置在密闭箱中, 雾化处理 15 min。然后在 60 °C 烘箱烘 10 min, 得到 P(St-MMA-DAC) 结构色织物。

## 1.3 性能测试

### 1.3.1 红外测试

将制备的聚合物固体产物采用去离子水经多次离心洗涤后, 在 30 °C 烘箱烘干 24 h, 取出研磨成粉末。采用 KBr 压片法测试聚合物微球的红外光谱, 波数范围  $4000 \sim 400$   $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率  $4$   $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数 32 次。

### 1.3.2 微球粒径测试

将聚合物固体分散于去离子水中, 制备成浓度为 0.01 g/L 的单分散微球乳液, 利用 Zetasizer Nano S 马尔文粒度测试仪对纳米微球的粒径和粒径分布指数(PDI)进行测试。

### 1.3.3 表面形貌测试

采用 S-4800 型场发射扫描电镜在工作电流 20  $\mu\text{A}$ , 电子加速电压 5.0 kV 条件下观察结构色涤纶织物上聚合物微球的外观形貌。

### 1.3.4 反射率测试

通过 Datacolor 1050 测色仪测定结构色织物在波长 400~700 nm 的反射光谱, 测试 5 个不同位置取平均值。

### 1.3.5 抗菌性能测试

采用 GB/T 20944.2-2007 《纺织品抗菌性能的评价第二部分: 吸收法》对结构色涤纶织物进行抗菌测试, 通过平板计数法对大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抗菌效果进行计算, 得出抑菌率(%), 公式如下:

$$A = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中,  $A$  为抑菌率,  $C_0$  为初始细菌数量,  $C$  为经结构色织物处理后的细菌数量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 P(St-MMA-DAC) 微球的结构和外观形貌

对合成反应的单体 St、MMA 和 DAC 以及 P(St-MMA-DAC) 的化学结构采用傅里叶红外光谱(FTIR)测试, 如图 2 所示。曲线 a 为 St 的红外光谱曲线,  $3033$   $\text{cm}^{-1}$  的特征峰为苯环的 C—H 伸缩振动吸收峰,  $1457$   $\text{cm}^{-1}$  的特征峰由苯环内部 C=C 伸缩振动产生,  $692$   $\text{cm}^{-1}$  的特征峰是苯环的 C—H 弯曲振动吸收峰。曲线 b 为 DAC 的红外光谱曲线,  $3031$   $\text{cm}^{-1}$  的峰为  $-\text{CH}_3$  的伸缩振动,  $1718$   $\text{cm}^{-1}$  的特征峰由 C=C 的伸缩振动产生,  $1409$  和  $1203$   $\text{cm}^{-1}$  分别为  $-\text{CH}$  和 C—O—C 键的特征峰。曲线 c 为 MMA 的红外光谱曲线, 存在  $1741$ 、 $1654$  和  $1170$   $\text{cm}^{-1}$  特征峰, 分别对应于酯 C=O、C=C 和 C—O—C 键的特征峰。曲线 d 为 P(St-MMA-DAC) 的红外光谱曲线, 存在  $2981$   $\text{cm}^{-1}$  处的  $-\text{CH}_3$  特征峰、 $1743$   $\text{cm}^{-1}$  处酯 C=O 的特征峰、 $1674$   $\text{cm}^{-1}$  处的

C=C特征峰、 $1386\text{ cm}^{-1}$ 处的苯环内部C=C伸缩振动特征峰、 $1182\text{ cm}^{-1}$ 处的C—O—C特征峰,其中在 $1002\text{ cm}^{-1}$ 处同样存在着C—N的特征峰,在 $698\text{ cm}^{-1}$ 处存在着苯环的C—H弯曲振动吸收峰。以上结果表明单体之间发生了共聚反应,合成了P(St-MMA-DAC)聚合物。

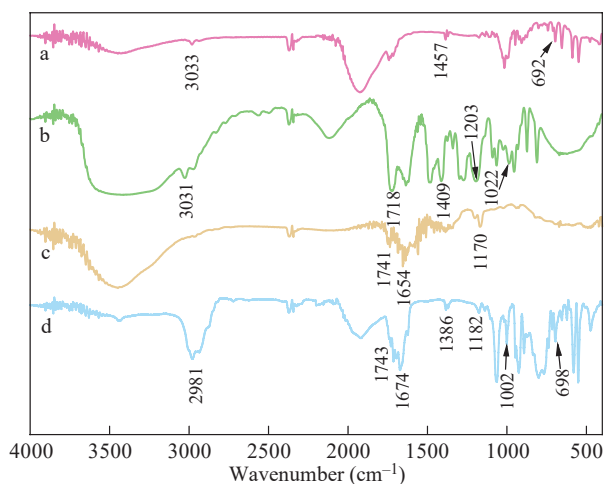


图2 (a) St, (b) DAC, (c) MMA和(d) P(St-MMA-DAC)的红外光谱图

Figure 2 Infrared spectra of (a) St, (b) DAC, (c) MMA and (d) P(St-MMA-DAC)

改变MMA、St和DAC的摩尔比例,合成了不同粒径大小的P(St-MMA-DAC)微球。不同粒径P(St-MMA-DAC)微球粒径分布及其聚合物粒径分布指数(PDI)如图3所示。通常认为当PDI小于0.05时,微球表现出良好的单分散性,即粒径分布较为均一。由图3可知,P(St-MMA-DAC)微球

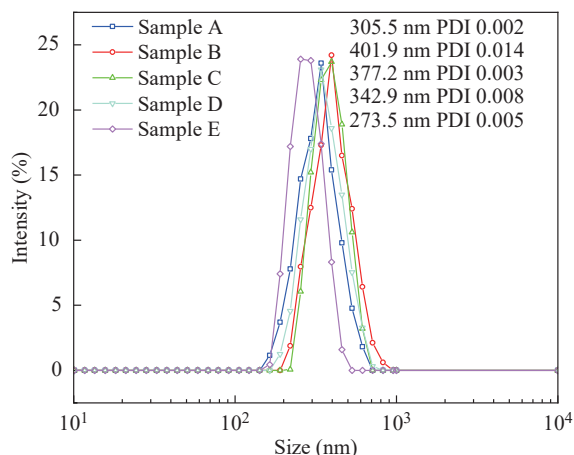


图3 不同粒径P(St-MMA-DAC)微球粒径分布图

Figure 3 Particle size distribution of P(St-MMA-DAC) microspheres with different particle sizes

的粒径分布比较集中,PDI远低于0.05,表明其单分散性优异。通过调整单体比例,本实验成功制备了五种不同粒径的聚合物微球,分别为305.5、401.9、377.2、342.9和273.5 nm。

通过场发射扫描电子显微镜(SEM)观察P(St-MMA-DAC)聚合物微球在涤纶织物上的外观形貌如图4所示。由图4可知,P(St-MMA-DAC)微球尺寸均匀、外观近似球形,粒径大小基本一致,保证了其优异的单分散性能,从而阻止团聚现象的发生;微球之间紧密连接,且可在涤纶织物表面形成短程有序、长程无序的非晶光子晶体结构。这是因为微球分散液雾化后均匀地沉积于织物表面,由于溶剂快速挥发,液滴中的微球快速自组装成微小的晶体,但剩余的溶剂量不足以使微小晶体之间进一步完成整体的规整性自组装,因此形成的微球结晶不规整、不完全,得到短程有序、长程无序的非晶光子晶体,形成非彩虹结构色<sup>[22]</sup>。

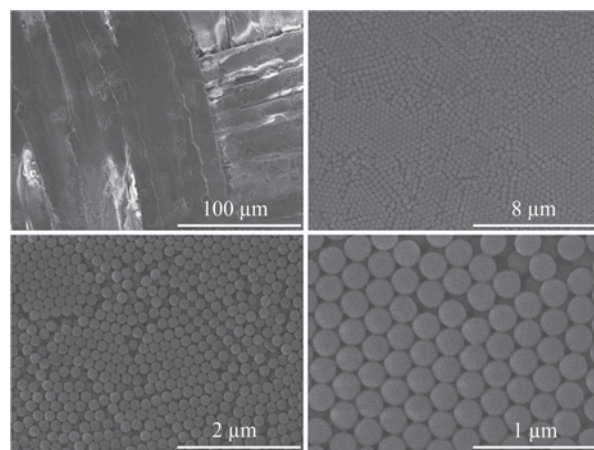


图4 P(St-MMA-DAC)微球SEM不同倍数的照片

Figure 4 SEM images of P(St-MMA-DAC) microspheres at different magnifications

## 2.2 结构色织物的颜色性能及表征

不同粒径大小的聚合物微球在涤纶织物上所形成的结构色照片如图5所示,并对结构色颜色通过Datacolor 1050测色仪测试,得到的不同结构色织物反射光谱曲线如图6所示。

由图5中可知,不同单体摩尔比例合成的P(St-MMA-DAC)微球在涤纶织物上分别形成蓝色、粉红色、绿色、青色、紫色五种不同的结构色。通过调控不同单体的摩尔比例制备出不同粒径大小的P(St-MMA-DAC)微球。结合图3和图6,粒径大小从401.9、377.2、342.9、305.5 nm递减到

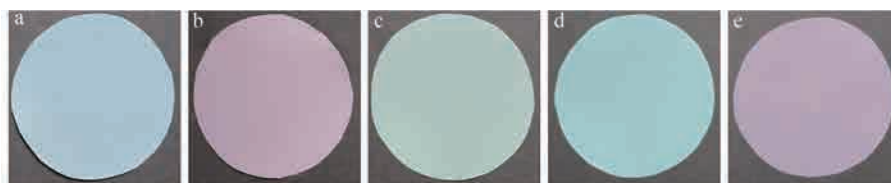


图5 不同 MMA、St、DAC 摩尔比结构色织物图片: a (Sample A), b (Sample B), c (Sample C), d (Sample D) 和 e (Sample E)  
Figure 5 Images of colored fabrics with different molar ratios of MMA, St, and DAC: a (Sample A), b (Sample B), c (Sample C), d (Sample D), and e (Sample E)

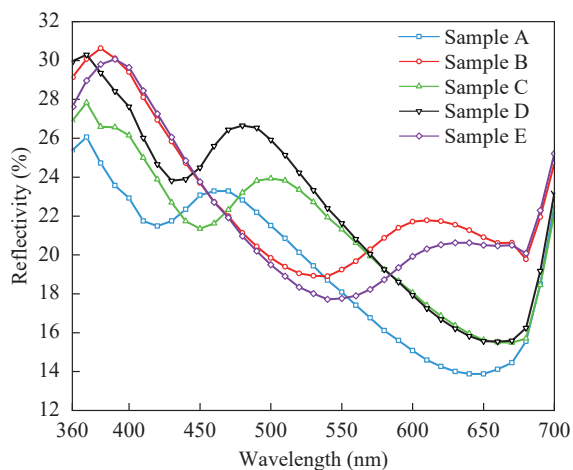


图6 不同 MMA、St、DAC 摩尔比结构色织物反射光谱  
Figure 6 Reflection spectra of colored fabrics with different molar ratios of MMA, St, and DAC

273.5 nm, 相应的不用结构色织物的最大反射率波长从 610、500、480、460 nm 下降为 390 nm, 发生明显的蓝移。

由此可知, 涤纶织物上的结构色可通过 P(St-MMA-DAC) 微球的粒径变化实现, 并符合修正的布拉格衍射方程:

$$m\lambda_{\max} = 2d_{hkl}(n_{\text{avg}}^2 - \sin^2\theta)^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  代表最大反射峰波长;  $d_{hkl}$  为面晶面间距 (与微球粒径有关);  $n_{\text{avg}}$  为微球特定环境下的平均折光指数;  $\theta$  为观察角度;  $m$  为布拉格衍射规整度。

由布拉格衍射方程可知, 结构色与微球折光指数、微球粒径、观察角度等因素有关, 在其他因素保持不变的前提下, 微球的粒径  $d_{hkl}$  减小,  $\lambda_{\max}$  也随之减小, 表明光子禁带向短波方向移动, 即光子晶体结构色发生蓝移<sup>[8]</sup>。并且在调控 St 和 MMA 比例过程中, 随着 St 摩尔比的增大, 颜色发生红移; 随着 MMA 摩尔比的增大, 颜色发生蓝移。

### 2.3 结构色织物的抗菌测试

对不同粒径微球的结构色织物采用平板抗菌法测试其 1 h 的抑菌率, 其抗菌效果如图 7 和图 8 所示。由图 7 可知, 经结构色织物处理后的抗菌刮板图中表面几乎无细菌, 与原菌对照组 E 和 S 板上显著的菌落数形成鲜明的对比, 表明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繁殖。结合图 8 柱状图可知, 结构色织物对大肠杆菌以及金黄色葡萄球菌的抑菌率均可达到 98% 以上。

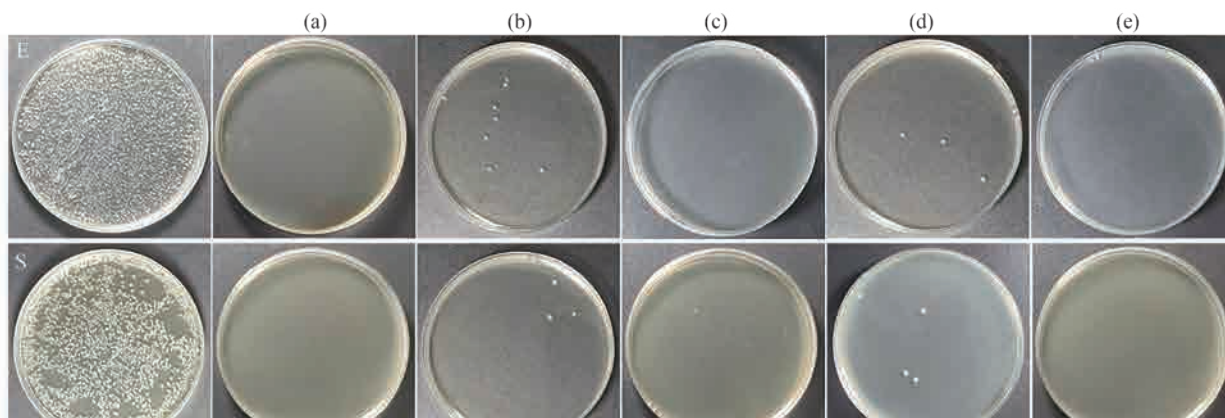


图7 结构色织物的抗菌效果图: a (Sample A), b (Sample B), c (Sample C), d (Sample D) 和 e (Sample E) (E 和 S 分别为 *E. coli* 和 *S. aureus* 的初始细菌数量)

Figure 7 Antibacterial effect of structured colored fabrics: a (Sample A), b (Sample B), c (Sample C), d (Sample D), and e (Sample E) (E and S are the initial bacterial counts of *E. coli* and *S. aureus*, respectively)

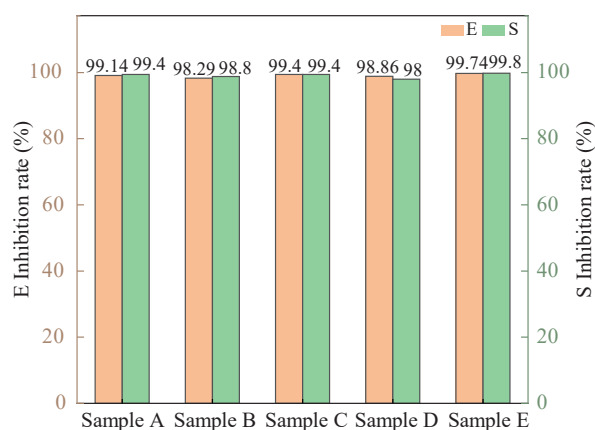


图8 结构色织物抑菌率

Figure 8 Antibacterial rate of structural color fabrics

含有季铵盐的化合物常被用于材料的抗菌功能化改性。相关研究表明,通过在材料上采用季铵盐进行功能改性可以赋予材料优异的抗菌性能,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率普遍可以达到90%以上<sup>[23,24]</sup>。本文中制备的含有季铵盐的聚合物微球抑菌率达到98%以上,表现出了优异的抗菌性能。这是由于季铵盐带正电,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,最终导致细菌失活死亡<sup>[25]</sup>。因此,合成得到的含抗菌活性的季铵盐单体的P(St-MMA-DAC)纳米微球可赋予其优异的抗菌性能。

### 3 结论

本文以St、MMA和DAC为原料通过无皂乳液聚合成功合成了P(St-MMA-DAC)微球,通过调控单体的摩尔比合成出不同粒径的聚合物微球;利用雾化沉积的手段在涤纶织物上得到蓝色、粉红色、绿色、青色和紫色5种不同颜色的结构色。结构色织物对大肠杆菌以及金黄色葡萄球菌的抑菌率均可达到98%以上。该方法不仅丰富了结构色材料的种类和应用领域,还为功能性聚合物微球的开发及应用提供了新的思路。

### 参考文献

- 1 谢京励,邓旭.基于裂纹生长的胶体颗粒自组装结构色纤维.四川轻化工大学学报(自然科学版),2020,33(3),7-12.
- 2 郭彦丽,刘建才,王艳红,徐海兵,祝颖丹,陈刚.结构色纤维的研究进展.印染,2016,42(14),47-50.
- 3 陈佳颖,辛斌杰,辛三法,杜卫平,许颖琦,高伟洪.基

于光子晶体的结构色织物研究进展.纺织学报,2020,41(4),181-187.

- 4 Hou, X. Y.; Li, F. Z.; Song, Y. L.; Li, M. Z. Recent progress in responsive structural color. *J. Phys. Chem. Lett.*, **2022**, 13(13), 2885-2900.
- 5 Liu, F. F.; Tao, C. A.; Tang, B. T. Recent advances in environmentally friendly structural colored fabrics. *Text. Res. J.*, **2023**, 93(7-8), 1861-1877.
- 6 Xu, C. L.; Huang, C. X.; Huang, H. H. Recent advances in structural color display of cellulose nanocrystal materials. *Appl. Mater. Today*, **2021**, 22, 100912.
- 7 Liu, D. G.; Wang, S.; Ma, Z. S.; Tian, D. L.; Gu, M. Y.; Lin, F. Y. Structure-color mechanism of iridescent cellulose nanocrystal films. *RSC Adv.*, **2014**, 4(74), 39322-39331.
- 8 吴玉江,刘国金,李义臣,邵建中,周岚.二氧化硅光子晶体在涤纶织物上的结构色.纺织学报,2015,36(10),62-66.
- 9 Liu, G. J.; Zhou, L.; Wang, C. C.; Wu, Y. J.; Li, Y. C.; Fan, Q. G.; Shao, J. Z. Study on the high hydrophobicity and its possible mechanism of textile fabric with structural colors of three-dimensional poly(styrene-methacrylic acid) photonic crystals. *RSC Adv.*, **2015**, 5(77), 62855-62863.
- 10 Yavuz, G.; Felgueiras, H. P.; Ribeiro, A. I.; Seventekin, N.; Zille, A.; Souto, A. P. Dyed poly(styrene-methyl methacrylate-acrylic acid) photonic nanocrystals for enhanced structural color. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, 10(27), 23285-23294.
- 11 Yu, C. Y.; Wang, X. R.; Wang, Y.; Shi, D. J.; Dong, W. F.; Zhou, L.; Liu, G. J.; Zhang, H. J. Patternable structural color prepared by using photonic crystal paints with high solid content. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **2021**, 627, 127212.
- 12 Liu, Y.; Hu, J. Investigation of polystyrene-based microspheres from different copolymers and their structural color coatings on wood surface. *Coatings*, **2020**, 11(1), 14.
- 13 张之悦,高伟洪,朱婕,杨树,辛斌杰,杜卫平.功能性结构色纳米纺织材料的研究进展.毛纺科技,2022,50(1),118-124.
- 14 Gu, Z. Z.; Uetsuka, H.; Takahashi, K.; Nakajima, R.; Onishi, H.; Fujishima, A.; Sato, O. Structural color and the lotus effect. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2003**, 42(8), 894-897.
- 15 Shi, X. D.; He, J. L.; Lu, X. H. Functional structural color dye with excellent UV protection property. *Dyes Pigm.*, **2020**, 175, 108142.
- 16 Sha, D. S.; Sun, Y. R.; Xing, L. L.; Chen, X. P.; Wang, X. Y.; Wan, B. X.; Wang, X. R.; Li, Y. C.; Chen, G. Q.;

- Zhou, S. Q.; Xing, T. L. Preparation of polyphenol-structural colored silk fabrics with bright colors. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2024**, 266, 131140.
- 17 Wang, C.; Liang, Z. H.; Song, F.; Wang, X. L.; Wang, Y. Z. Surface engineering toward self-cleaning and color-fastness photonic textiles. *J. Clean. Prod.*, **2024**, 468, 143029.
- 18 翟丽莎, 王宗垒, 周敬伊, 高冲, 陈凤翔, 徐卫林. 纺织用抗菌材料及其应用研究进展. *纺织学报*, **2021**, 42(09): 170–179.
- 19 林松, 杨荆泉, 田涛, 郝丽梅, 吴金辉, 祁建城. 高分子季铵盐抗菌材料研究进展. *高分子通报*, **2012**, (5), 55–60.
- 20 Gao, L. X.; Tang, A.; Bi, W. L.; Zhu, Z. J.; Tian, Y. Three-in-one: saturated, UV-protective and antibacterial structural colored textiles. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **2024**, 684, 133180.
- 21 Shi, X. D. Cao, X. X. Dou, R. M. Lu, X. H. Structural color modified fabrics with excellent antibacterial property. *J. Donghua Univ. (Engl. Ed.)*, **2021**, 38(5), 404–411.
- 22 王晓辉, 刘国金, 邵建中. 纺织品仿生结构生色. *纺织学报*, **2021**, 42(12), 1–14.
- 23 Wang, C. H.; Hou, G. G.; Du, Z. Z.; Cong, W.; Sun, J. F.; Xu, Y. Y.; Liu, W. S. Synthesis, characterization and antibacterial properties of polyurethane material functionalized with quaternary ammonium salt. *Polym. J.*, **2016**, 48(3), 259–265.
- 24 Wang, Y. L.; Du, J.; Guo, H. Y.; Liu, R. M.; Li, Z. Y.; Yang, T. Y.; Ai, J. Z.; Liu, C. B. The antibacterial activity and mechanism of polyurethane coating with quaternary ammonium salt. *J. Polym. Res.*, **2022**, 29(2), 47.
- 25 张智嘉, 韩晓军. 抗菌聚合物的研究进展. *高分子通报*, **2018**, (3), 1–11.