

# MAPbBr<sub>3</sub>/TPU复合材料制备及稳定性探究

丁伯颖

天津理工大学理学院, 天津市量子光学与智能光子学重点实验室, 天津

收稿日期: 2025年5月29日; 录用日期: 2025年7月8日; 发布日期: 2025年7月17日

## 摘要

利用超声辅助微乳液两步法, 将CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> QDs (MAPbBr<sub>3</sub> QDs)掺杂到具有高弹性、高透光性以及优异稳定性的热塑性聚氨酯(TPU)材料中, 并利用静电纺丝技术将其制备成高发光且可拉伸的MAPbBr<sub>3</sub>/TPU纤维薄膜。通过光学性能测试发现, 相比于本征的量子点, MAPbBr<sub>3</sub>/TPU薄膜的PLQY提高至65.43%, 瞬态荧光寿命增加到47.2 ns, 在水中浸泡12 h后, 薄膜依旧能保持65%的荧光强度。在TPU的保护下, 复合薄膜在溶剂、高温等不同环境条件下均展现出良好的光学特性和环境稳定性。

## 关键词

MAPbBr<sub>3</sub> QDs, 热塑性聚氨酯, 光致发光, 稳定性

# Research on Preparation and Stability of MAPbBr<sub>3</sub>/TPU Composites

Boying Ding

Tianjin Key Laboratory of Quantum Optics and Intelligent Photonics, School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin

Received: May 29<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 17<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> QDs (MAPbBr<sub>3</sub> QDs) were incorporated into thermoplastic polyurethane (TPU) with high elasticity, high transmittance and excellent environmental stability via an ultrasound-assisted micro-emulsion two-step method. Through electrospinning, a highly luminescent and stretchable MAPbBr<sub>3</sub>/TPU fiber film was prepared. Optical performance tests revealed that compared with the intrinsic quantum dots, the MAPbBr<sub>3</sub>/TPU film exhibited a high PLQY of 65.43% with an increased fluorescence lifetime of 47.2 ns and retained 65% of its initial fluorescence intensity after 12 h of water immersion. Together with the protection of TPU, the composite films exhibit excellent optical properties

**and stability under different environmental conditions, such as solvents and high temperatures.**

## Keywords

**MAPbBr<sub>3</sub> QDs, Thermoplastic Polyurethane, Photoluminescence, Stability**

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

聚合物材料凭借出色的稳定性以及优异的力学性能，成为柔性电子器件的理想载体，被广泛应用于传感领域[1]。将钙钛矿量子点掺杂到聚合物材料中，聚合物的致密包覆能够有效隔绝外界环境(如水分和氧气)对钙钛矿量子点的侵蚀，从而显著提高量子点稳定性。这种复合材料不仅展现了钙钛矿量子点优异的光学性能，还具备了聚合物材料良好的物理化学特性，使其在生物传感、柔性显示等领域展现出巨大的应用潜力[2]-[4]。目前已有研究报道，利用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚偏二氟乙烯(PVDF)以及聚乙稀醇(PVA)等聚合物材料来提高量子点稳定性[5]-[7]。然而，大多数聚合物材料具有较少的官能团，缺乏与量子点之间的相互作用，导致量子点分布不均易发生团聚，进而使其光学性能下降。

热塑性聚氨酯(TPU)是一种具有显著热塑性特征的高分子聚合物材料，它在加热时会软化并变得可塑，冷却后又恢复硬度。这种独特的热致形变特性使得 TPU 能够通过简单的加热和冷却过程实现反复加工，使其成为快速成型技术的理想材料[8] [9]。此外，TPU 还具备高弹性、高透光性、良好的耐热性和易加工性等优异性能，这使得 TPU 在众多研究领域中备受关注。TPU 的分子结构通常由柔性链段和硬段交替排列组成，其中柔性链段提供了材料的弹性和柔韧性，而硬段则赋予了材料一定的强度和耐热性。通过引入功能化基团(如羧基、羟基、氨基等)，来调控 TPU 的表面性质、相容性以及与其他材料的相互作用，从而拓展其应用范围[10]-[12]。因此，将钙钛矿量子点掺杂到 TPU 材料中，既提高了量子点稳定性，又保持了其优异的光学性能，有望推动钙钛矿量子点在荧光传感领域中的发展。

在本文中，利用超声辅助微乳液两步法合成了 MAPbBr<sub>3</sub> QDs/TPU 混合溶液，随后，利用静电纺丝技术将其制备成具有可拉伸且高发光特点的 MAPbBr<sub>3</sub> QDs/TPU 复合纤维薄膜。对复合薄膜进行了形貌结构表征。得益于 TPU 自身优异的化学稳定性、疏水性、耐热性以及柔韧性，使其在溶剂、高温和大气条件下的稳定性均得到提升。

## 2. 实验部分

### 2.1. MAPbBr<sub>3</sub> QDs 合成

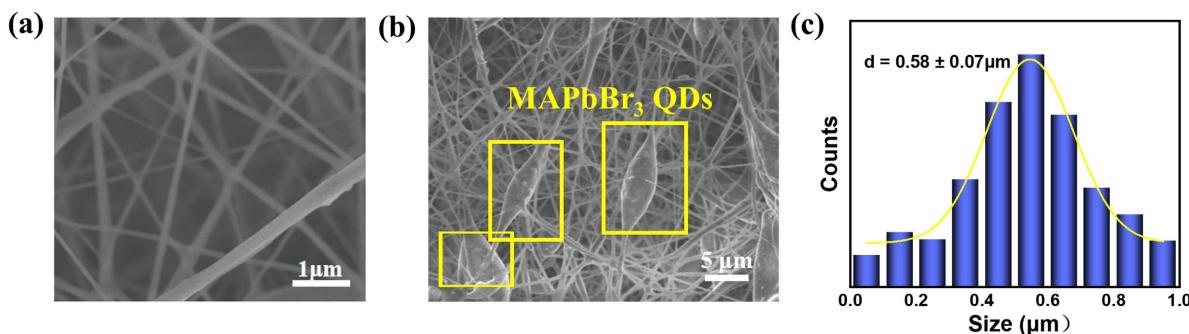
采用超声辅助微乳液法合成 MAPbBr<sub>3</sub> QDs [13]，具体过程如下：称取 0.16 mmol MABr 分散到 0.3 mL DMF (溶液 A)中，将 0.2 mmol PbBr<sub>2</sub> 分散在 0.5 mL DMF (溶液 B)中，将两溶液超声至完全溶解。随后，向 50 mL 离心管中依次加入溶液 B、10 mL 正己烷、0.5 mL OA、20 μL 正辛胺以及溶液 A，超声 10 分钟，此时溶液颜色为乳白色。随后加入 5 mL TBA，溶液颜色随着 TBA 的加入逐渐由乳白色变为橙黄色悬浊液，在紫外灯照射下发出明亮绿光，表明 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 的成功合成。接着利用正己烷和乙酸乙酯对量子点进行洗涤离心。最后，用真空干燥箱在 60℃的温度下干燥 8 小时，研磨后获得 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 粉末。

## 2.2. MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜合成

采用静电纺丝技术制备 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合薄膜，具体合成过程如下：称取适量的 TPU 颗粒溶解于 THF 溶剂中，在室温下将其在磁力搅拌机上搅拌 6 小时，获得质量分数为 20 wt% 的混合溶液[14] [15]。同时配制浓度为 4 mg/mL 的 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 的 THF 混合溶液，室温搅拌至溶解。随后取两者混合溶液，按 1:2 的体积比移至烧杯中，搅拌至完全溶解到一起。将制备好的纺丝液吸入 10 mL 注射器中，固定在静电纺丝机的注射泵上。制备条件为：外加电压为 15 kV (+)/1.5 kV (-)、针管和接收鼓之间工作距离为 20 cm，滚筒速度为 400 rpm/min，针管中液体供应率为 3 mL/h。静电纺丝 3.5 小时后，将得到的 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 纤维膜，放在通风橱里干燥 12 小时，等待残留的溶剂完全挥发。干燥完毕的复合薄膜在 365 nm 紫外灯照射下发出强烈的绿光。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 形貌结构表征



**Figure 1.** SEM images of (a) TPU fibre film and (b) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU composite fibre film; (c) Particle size distribution of MAPbBr<sub>3</sub>/TPU

**图 1.** (a) TPU 纤维薄膜和(b) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合纤维薄膜的 SEM 图像；(c) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 粒径分布

对 TPU 纤维薄膜和 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合薄膜进行了形貌表征。图 1(a)展示了纯 TPU 纤维膜在扫描电子显微镜(SEM)下的微观形貌，从图中可以观察到，纤维表面光滑，呈棒状结构，且纤维之间相互交错，形成网状结构，体现了 TPU 材料良好的力学性能和柔性特征。图 1(b)为 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合薄膜的微观形貌图，在图中可以清晰地观察复合薄膜保留了 TPU 的形貌特征，但部分纤维变粗，这是由于 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 成功掺入到 TPU 材料中，导致纤维结构变得更为粗大。如图 1(c)所示，MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 纤维平均直径为 0.58 μm。

### 3.2. 光学性能测试

图 2(a)为 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合薄膜吸收光谱(UV-VIS)和光致发光(PL)光谱。可以看出，其第一激子吸收峰位于 489 nm，PL 峰在 523 nm，半峰宽为 29 nm，该光谱较窄且具有对称性，表明量子点与 TPU 复合后尺寸分布均匀，保持良好的单分散性。插图展示了薄膜在 365 nm 紫外灯照射下发出的强烈绿色荧光。为进一步研究复合薄膜的发光特性，测试了其瞬态 PL 光谱，如图 2(b)所示。其 PL 衰减曲线可通过如下所示的双指数函数进行拟合[16]：

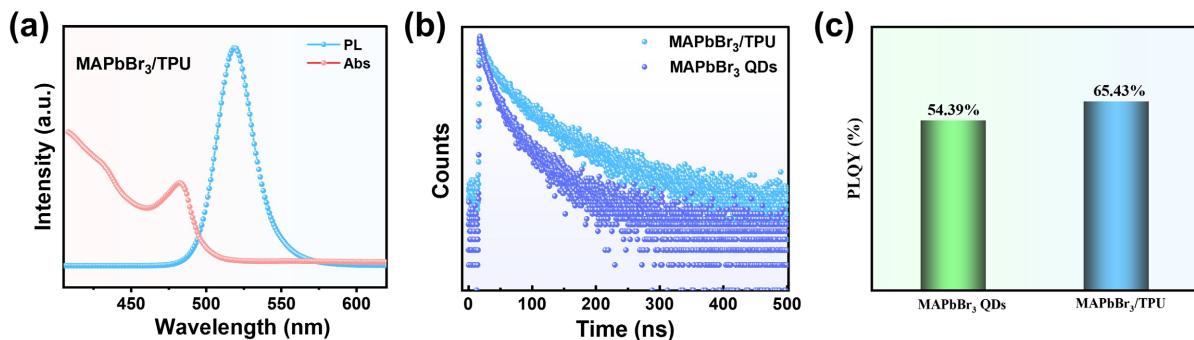
$$Y_{(t)} = A_1 \exp(-\tau/\tau_1) + A_2 \exp(-\tau/\tau_2) \quad (1)$$

其中， $A_1$  和  $A_2$  分别表示两个不同寿命组分的相对振幅。短寿命( $\tau_1$ )归因于表面和晶粒边界陷阱产生的光

生激子的非辐射复合，而长寿命( $\tau_2$ )则归因于激子的辐射复合过程。平均寿命( $\tau_{avg}$ )可通过以下公式计算得出[17]：

$$\tau_{avg} = \frac{A_1\tau_1^2 + A_2\tau_2^2}{A_1\tau_1 + A_2\tau_2} \quad (2)$$

其中，MAPbBr<sub>3</sub> QDs 的平均荧光寿命为 22.3 ns，而 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合薄膜的平均寿命增加到 47.2 ns。



**Figure 2.** (a) PL and UV-VIS spectra of MAPbBr<sub>3</sub>/TPU film; (b) TRPL spectra and (c) PLQYs of MAPbBr<sub>3</sub> QDs and MAPbBr<sub>3</sub>/TPU films

**图 2.** (a) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜的 PL 和 UV-VIS 光谱; MAPbBr<sub>3</sub> QDs 和 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜的(b) TRPL 光谱和(c) PLQYs

此外，荧光量子产率的结果也进一步验证了光学性能的提升。如图 2(c)所示，其中 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 的 PLQY 为 54.39%，而 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 的 PLQY 提高到 65.43%。结果表明，将量子点掺杂到 TPU 材料中可以有效减少非辐射复合，从而提升复合材料的光学性能。

### 3.3. 稳定性测试

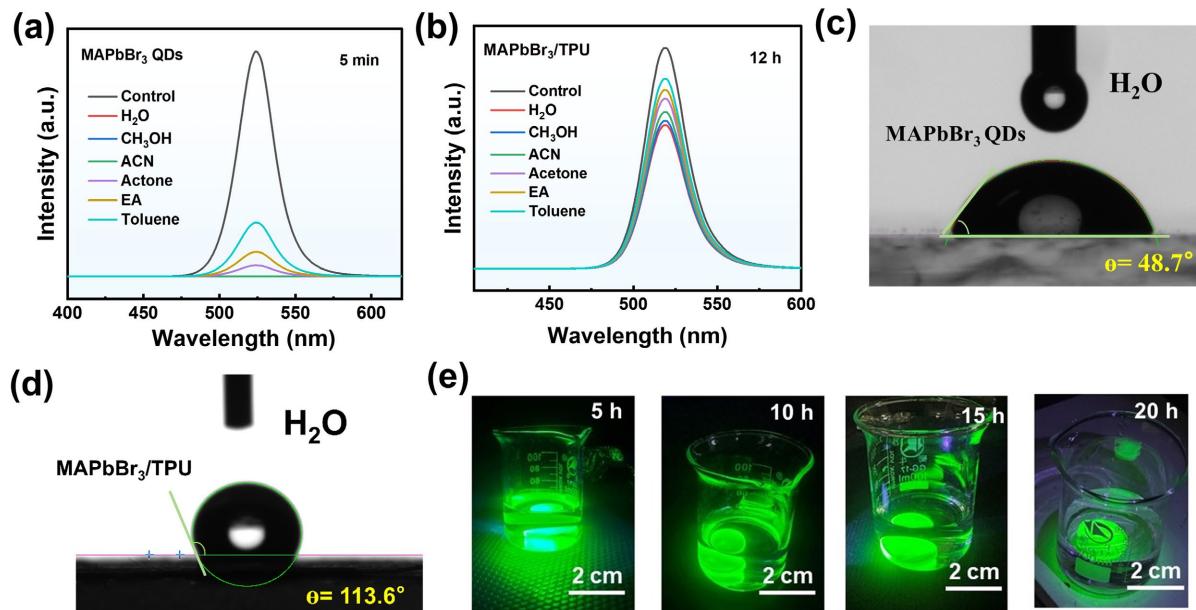
考虑到 TPU 高分子聚合物对 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 的保护，可以有效阻止氧气、水分等环境因素侵蚀。对复合薄膜进行了溶剂、高温和在大气条件中长期储存的稳定性测试。

#### 1) 溶剂稳定性

分别将 5 mL 的去离子水(H<sub>2</sub>O)、甲醇(CH<sub>3</sub>OH)、乙腈(ACN)、丙酮(Acetone)、乙酸乙酯(EA)以及甲苯(Toluene)加入到 4 mg MAPbBr<sub>3</sub> QDs 粉末中，浸泡 5 min，观察不同溶剂对量子点荧光强度的影响，并测试荧光强度变化。如图 3(a)所示，在 Acetone、EA 以及 Toluene 中量子点分别保留了 3%、8% 和 12% 的荧光强度，而在强极性溶剂 H<sub>2</sub>O、CH<sub>3</sub>OH 和 ACN 中，量子点发生了明显的荧光淬灭现象。这一淬灭现象可归因于量子点表面配体脱落，导致表面存在大量的缺陷，极性溶剂会与这些缺陷态发生相互作用，导致更多的电子或空穴产生非辐射复合，从而引起荧光淬灭[18]。随后，以同样的实验条件，将 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜分别浸泡于上述的溶剂中 12 小时，并测试了其荧光 PL 变化。如图 3(b)所示，与纯 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 相比，复合薄膜的荧光强度总体有了明显的提升，分别能保持初始 PL 强度的 35% (H<sub>2</sub>O)、47% (CH<sub>3</sub>OH)、51% (ACN)、67% (Acetone)、71% (EA) 以及 76% (Toluene)。结果表明，由于 TPU 具有优异的溶剂稳定性使得掺杂后复合材料的溶剂稳定性提升。

此外，将 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 溶液和 TPU 掺杂后的混合溶剂旋涂到 ITO 表面，并对两种薄膜进行了疏水性测试。接触角的大小与表面张力、重力和分子间相互作用力等物理因素密切相关，较小的接触角说明水滴在薄膜表面上疏水性较差。相反，接触角越大则表示水滴在薄膜表面的疏水性较强。如图 3(c)、图 3(d)所示，水滴在 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 表面上的接触角为 48.7°，而在 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 表面上的接触角为 113.6°，这表明复合材料具有较强的疏水能力。此外，记录了复合薄膜在水中浸泡 20 小时的荧光图片，如图 3(e)所示。

示，可以看出薄膜在水中浸泡 20 小时后依旧能发出明亮的绿色荧光。这表明在 TPU 的保护下，MAPbBr<sub>3</sub> QDs 的水稳定性得到了显著提升。



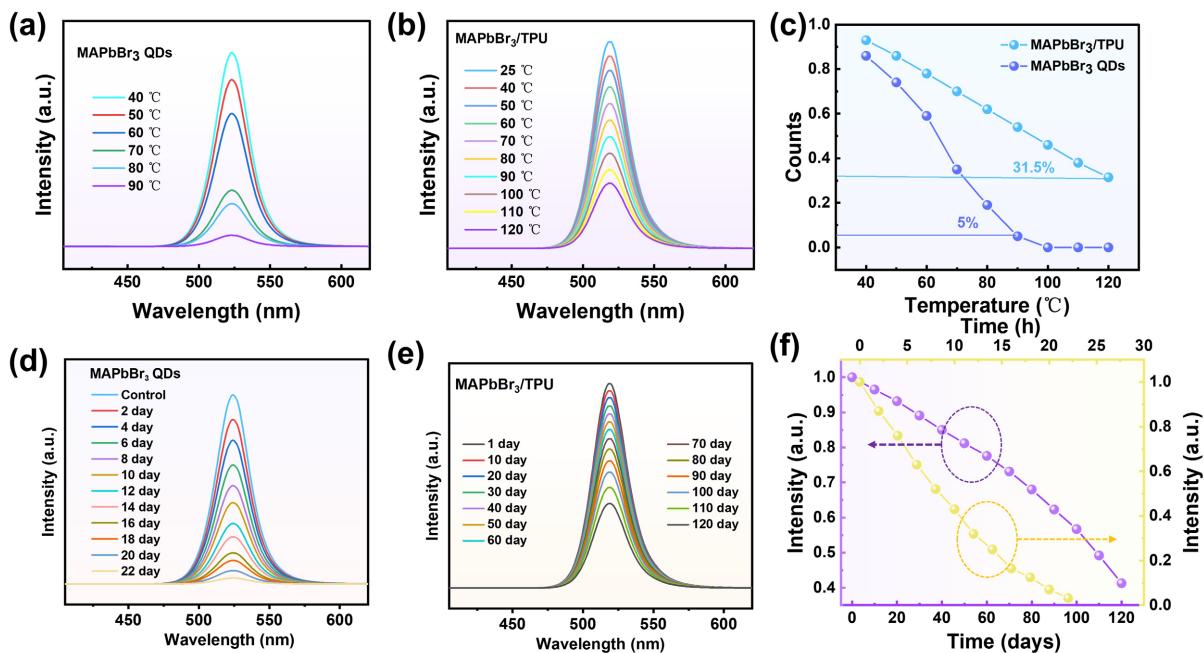
**Figure 3.** PL changes of (a) MAPbBr<sub>3</sub> QDs and (b) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU in different polar solvents; Contact angle tests of (c) MAPbBr<sub>3</sub> QDs and (d) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU films; (e) Photographs of PL intensity of MAPbBr<sub>3</sub>/TPU films with different immersion times

**图 3.** (a) MAPbBr<sub>3</sub> QDs 和(b) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 在不同溶剂中的荧光强度变化；(c) MAPbBr<sub>3</sub> QDs 和(d) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜接触角测试；(e) 不同浸泡时间下 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜荧光强度照片

## 2) 热稳定性与长期稳定性

图 4(a)~(c)展示了 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 及其与 TPU 复合薄膜的热稳定性测试结果。如图 4(a)所示，在 90℃ 时，MAPbBr<sub>3</sub> QDs 的荧光强度衰减到初始的 5%，并且随着温度的升高，量子点发生明显荧光淬灭现象，这主要归因于钙钛矿量子点的晶体结构在高温下易发生相变或晶格膨胀。这种结构的不稳定性会破坏量子限域效应，进而导致能带结构改变，使辐射复合效率下降。同时，高温会加速离子的迁移，增加缺陷形成，这些缺陷促进了非辐射复合，进一步降低了荧光效率[19]。相比之下，MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合材料表现出显著提高的热稳定性，如图 4(b)和图 4(c)所示。在温度升高至 120℃ 时，MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 荧光强度仍能保持 31.5%。这一显著的热稳定性提升，有力地证明了 TPU 聚合物优异的包覆保护作用。TPU 不仅物理隔绝了钙钛矿量子点与高温环境的直接接触，更可能在界面处形成一层“热障”，有效延缓了量子点内部离子迁移和相变的进程，从而显著抑制了其热降解。同时，TPU 的柔性链段和三维网络结构能够缓冲因温度升高引起的晶格热膨胀应力，维持了钙钛矿晶格的相对完整性和结构有序度。正是这种多层次的协同保护机制——热阻隔、离子迁移抑制和应力缓冲——共同作用，赋予了复合材料远超纯钙钛矿量子点的热稳定性。

进一步测试两种材料在环境条件下(25℃，相对湿度 60%)的长期稳定性，结果如图 4(d)~(f)所示。MAPbBr<sub>3</sub> QDs 暴露于环境中储存 22 天后，荧光强度仅保留 3.2%，这是由于空气中的水分、氧气等会导致量子点发生降解，从而降低其荧光性能。相比之下，MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 在相同环境条件下储存 120 天后，荧光强度依旧能保持 41.3%，这得益于 TPU 自身优异的环境稳定性，且不易发生降解，有效防止水分和氧气对量子点的侵蚀，从而显著提高量子点的长期稳定性。



**Figure 4.** PL intensity of (a) MAPbBr<sub>3</sub> QDs and (b) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU at different temperatures; (c) Changes in PL intensity of two samples at different temperatures; PL intensity spectra of (d) MAPbBr<sub>3</sub> QDs and (e) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU exposed for different times in air conditions; (f) Changes in PL intensity of two samples

**图4.**(a) MAPbBr<sub>3</sub> QDs 和(b) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 在不同温度下的荧光强度;(c) 两种样品不同温度下的荧光强度趋势变化图;(d) MAPbBr<sub>3</sub> QDs 和(e) MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 在空气条件中暴露不同时间的荧光强度谱图; (f) 两种样品的荧光强度变化图

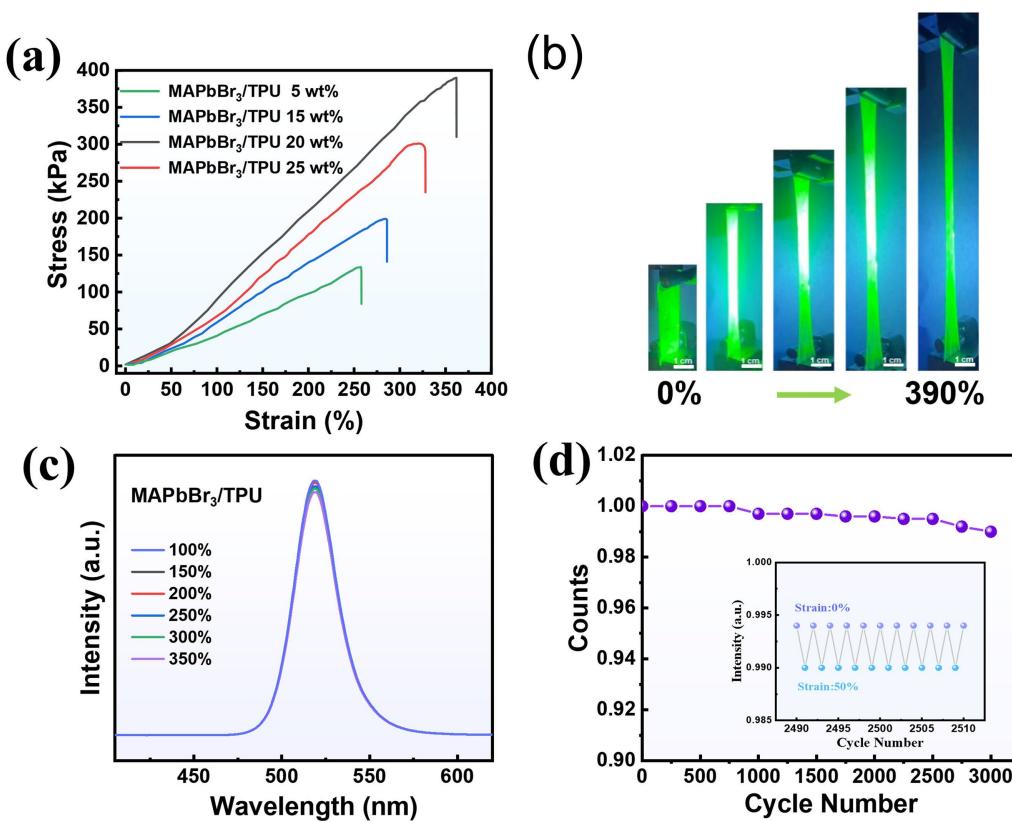
### 3) 拉伸稳定性

由于 TPU 基质具有高弹性、高透光性等优点, 进一步对可拉伸的 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜(长: 31.2 mm, 宽: 12.3 mm, 厚: 1.5 mm)进行了力学性能测试, 伸长率方程如下:

$$Y = \frac{L_h - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

其中,  $L_h$  和  $L_0$  分别是拉伸后的最终长度和未拉伸时的初始长度。如图 5(a)展示了不同质量分数的 TPU 与 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 复合形成的薄膜的力学性能。力学性能测试结果表明, 当 TPU 的质量分数为 20 wt% 时, 复合薄膜的应变达到最大值 354.2%, 此时的应力为 384.5 kPa, 并且在此条件下, 薄膜能够稳定发光。这一结果表明, 含量为 20 wt% 的 TPU 复合薄膜具有最佳的力学性能。然而, 当 TPU 含量增加到 25 wt% 时, 过多的 TPU 可能导致量子点在聚合物基质中的分散性下降, 减少两者之间的相互作用, 进而导致材料的可拉伸性降低[20]。

图 5(b)展示了薄膜在不同应变状态下的荧光照片, 清晰地表明在拉伸应变范围为 0%~390% 时, 薄膜依旧能持续稳定地发光。如图 5(c)所示, 通过对不同应变下的荧光强度测试, 发现 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜的发光性能并未受到显著影响, 而且即使在不同的拉伸条件下, 薄膜的 PL 峰位并未发生移动, 表明在 TPU 的保护下, MAPbBr<sub>3</sub> QDs 展现出优异的光学性能。在图 5(d)中, 经过 3000 次重复拉伸后, 薄膜发光强度依然能保持在 98.6%, 表明该薄膜具有优异的抗疲劳性以及发光稳定性。以上结果表明, 良好的力学性能意味着 TPU 与量子点形成了更紧密、更均匀的复合结构。因此, 在具有耐热性、疏水性、高弹性以及优异化学稳定性的 TPU 基质保护下, 制备的 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 具有优异的稳定性的同时, 保持了出色的光学性能。



**Figure 5.** (a) Stress-strain curves of MAPbBr<sub>3</sub>/TPU films containing different TPU mass fractions; (b) Photographs of fluorescent films at different strains; (c) PL intensity at different tensile strains; (d) Changes of PL intensity of film after 3000 times stretching

**图 5.** (a) 不同质量分数 TPU 的 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 薄膜应力 - 应变曲线; (b) 不同应变下的薄膜荧光照片; (c) 不同拉伸应变下的荧光强度变化; (d) 拉伸 3000 次薄膜的荧光强度变化

#### 4. 结论

利用超声辅助微乳液两步合成法，将 MAPbBr<sub>3</sub> QDs 掺杂到具有高弹性、高透光性以及优异化学稳定性的 TPU 聚合物材料中，并通过静电纺丝技术制备了 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合薄膜。该复合薄膜具有 65.43% 的高荧光量子产率，荧光寿命延长到 47.2 ns。此外，将 MAPbBr<sub>3</sub>/TPU 复合薄膜在水中浸泡 12 小时后，依旧能保持 65% 的荧光强度，在空气条件下储存 120 天后，荧光强度仅衰减到 41.3%，在循环拉伸 3000 次后，发光强度依旧能保持 98.6%。同时，得益于 TPU 的保护作用，复合薄膜在高温和不同溶剂中也表现出优异的稳定性。由于 TPU 自身具有优异的化学稳定性、疏水性、耐热性和高弹性，从而提高了量子点的光学性能和稳定性。

#### 参考文献

- [1] He, Z., Zhou, G., Byun, J., Lee, S., Um, M., Park, B., et al. (2019) Highly Stretchable Multi-Walled Carbon Nanotube/Thermoplastic Polyurethane Composite Fibers for Ultrasensitive, Wearable Strain Sensors. *Nanoscale*, **11**, 5884-5890. <https://doi.org/10.1039/c9nr01005j>
- [2] Arenas, J.P., Castaño, J.L., Troncoso, L. and Auad, M.L. (2019) Thermoplastic Polyurethane/Laponite Nanocomposite for Reducing Impact Sound in a Floating Floor. *Applied Acoustics*, **155**, 401-406. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.06.012>
- [3] Liu, X., Zou, L., Yang, C., Zhao, W., Li, X., Sun, B., et al. (2020) Fluorescence Lifetime-Tunable Water-Resistant Perovskite

- Quantum Dots for Multidimensional Encryption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 43073-43082. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c10869>
- [4] Fan, Y., Dong, X., Guo, Y., Xing, H., Xia, H., Li, J., et al. (2022) Facile Uniaxial Electrospinning Strategy to Embed CsPbBr<sub>3</sub> Nanocrystals with Enhanced Water/Thermal Stabilities for Reversible Fluorescence Switches. *Analytical Chemistry*, **94**, 11360-11367. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c02137>
- [5] Chen, L., Tien, C., Tseng, Z., Dong, Y. and Yang, S. (2019) Influence of PMMA on All-Inorganic Halide Perovskite CsPbBr<sub>3</sub> Quantum Dots Combined with Polymer Matrix. *Materials*, **12**, Article 985. <https://doi.org/10.3390/ma12060985>
- [6] Zhang, S., Xiao, K., Zhang, Y., Ji, Y., Wang, J. and Chen, J. (2022) Polarization Improvement of Perovskite Nanowire Composite Films by Mechanical Stretching Method. *Nanotechnology*, **33**, Article ID: 485602. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac8aa1>
- [7] Nie, L., Yu, X., Ge, Y., He, D., Zhu, X., Liu, H., et al. (2022) Highly Stable and Controllable Lasing Actions from PVDF Encapsulated CsPbBr<sub>3</sub> Perovskite Microcrystals. *Journal of Materials Chemistry C*, **10**, 16301-16308. <https://doi.org/10.1039/d2tc03148e>
- [8] Grønborg, F., Pedersen, D.B., Spangenberg, J., Daugaard, A.E. and Susoff, M.L. (2024) Optimizing TPU Performance: The Role of Mold Temperature on Injection Molding of TPU. *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, e55521. <https://doi.org/10.1002/app.55521>
- [9] Li, W., Lu, L., Yan, F., Palasantzas, G., Loos, K. and Pei, Y. (2023) High-Performance Triboelectric Nanogenerators Based on TPU/Mica Nanofiber with Enhanced Tribo-Positivity. *Nano Energy*, **114**, Article ID: 108629. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108629>
- [10] Pourmand, A., Shaegh, S.A.M., Ghavifekr, H.B., Najafi Aghdam, E., Dokmeci, M.R., Khademhosseini, A., et al. (2018) Fabrication of Whole-Thermoplastic Normally Closed Microvalve, Micro Check Valve, and Micropump. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **262**, 625-636. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.12.132>
- [11] Tian, Z., Qin, W., Wang, Y., Li, X., Gu, C., Chen, J., et al. (2023) Ultra-Stable Strain/Humidity Dual-Functional Flexible Wearable Sensor Based on Brush-Like AgNPs@CNTs@TPU Heterogeneous Structure. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, **670**, Article ID: 131398. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131398>
- [12] Yang, H., Huang, C., Lin, H., Chen, Y., Tsai, H. and Lee, K. (2024) Zwitterionic Carbon Quantum Dots Incorporated Ultrafiltration Membrane for Efficient Removal of Copper Ion. *Separation and Purification Technology*, **331**, Article ID: 125709. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125709>
- [13] Huang, H., Zhao, F., Liu, L., Zhang, F., Wu, X., Shi, L., et al. (2015) Emulsion Synthesis of Size-Tunable CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> Quantum Dots: An Alternative Route toward Efficient Light-Emitting Diodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 28128-28133. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b10373>
- [14] Jiang, J., Liu, F., Yang, X., Xiong, Z., Liu, H., Xu, D., et al. (2021) Evolution of Ordered Structure of TPU in High-Elastic State and Their Influences on the Autoclave Foaming of TPU and Inter-Bead Bonding of Expanded TPU Beads. *Polymer*, **228**, Article ID: 123872. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123872>
- [15] Jiao, C., Zhang, Y., Li, S. and Chen, X. (2020) Flame Retardant Effect of 1-Aminoethyl-3-Methylimidazolium Hexafluorophosphate in Thermoplastic Polyurethane Elastomer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **145**, 173-184. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09671-2>
- [16] Zhang, L., Yang, X., Jiang, Q., Wang, P., Yin, Z., Zhang, X., et al. (2017) Ultra-Bright and Highly Efficient Inorganic Based Perovskite Light-Emitting Diodes. *Nature Communications*, **8**, Article No. 15640. <https://doi.org/10.1038/ncomms15640>
- [17] Rui, H., Wu, X., Qiu, Y., Liu, X., Bu, S., Cao, H., et al. (2023) Bifunctional Bidentate Organic Additive toward High Brightness Pure Red Quasi-2D Perovskite Light-Emitting Diodes. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article ID: 2308147. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308147>
- [18] Kumar, S., Gupta, T.K. and Varadarajan, K.M. (2019) Strong, Stretchable and Ultrasensitive MWCNT/TPU Nanocomposites for Piezoresistive Strain Sensing. *Composites Part B: Engineering*, **177**, Article ID: 107285. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107285>
- [19] Tang, Y., Wang, P., Wang, R., Yuan, H., Xin, Y., Ren, X., et al. (2022) MOF-Triggered Formation of MaPbBr<sub>3</sub>@PbBr(OH) with Enhanced Stability. *Journal of Materials Chemistry C*, **10**, 616-625. <https://doi.org/10.1039/d1tc04552k>
- [20] Li, X., Chen, L., Yuan, S., Tong, H., Cheng, Q., Zeng, H., et al. (2023) Stretchable Luminescent Perovskite-Polymer Hydrogels for Visual-Digital Wearable Strain Sensor Textiles. *Advanced Fiber Materials*, **5**, 1671-1684. <https://doi.org/10.1007/s42765-023-00302-7>