http://pmse.scu.edu.cn

双向拉伸聚丙烯/钛白粉复合薄膜的力学与遮盖性能同步增强

杜全佳，郭少云，李春海

（先进高分子材料全国重点实验室（四川大学）四川大学高分子研究所 四川省橡塑材料复合成型技术工程实验室，四川 成都 610065）

摘要：传统聚合物合成纸内部存在大量孔隙结构，导致遮盖性能和力学性能难以兼顾，文中以聚丙烯（PP）和钛白粉（TiO_2）为原料，采用熔融共混结合同步双向拉伸工艺制备了无孔双向拉伸PP/TiO_2复合薄膜，实现了PP/TiO_2复合薄膜力学和遮盖性能的同步提升。结果表明，双向拉伸可有效改善TiO_2的分散，小粒径和高折射率的TiO_2在PP基体内部能有效散射可见光，同时可促进PP结晶进而提高PP/TiO_2复合薄膜的模量。经过3×3双向拉伸，与纯PP相比，TiO_2质量分数为5%的PP/TiO_2复合薄膜的遮光率由9.2%提升至87.5%；模量由1531 MPa提升至1971 MPa，提升幅度为29%。此外，适当增大双向拉伸倍率，可显著提高PP/TiO_2复合薄膜的拉伸强度、撕裂强度和模量。为兼具高力学性能和高遮盖性能的薄膜型合成纸的开发研制提供了理论依据与实践参考。

关键词：聚丙烯；钛白粉；双向拉伸；遮盖性能；力学性能

中图分类号：TB383 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）06-0069-08

合成纸是一种主要由聚合物制成的新型材料，其结合了纸和塑料的优点，具有质量轻、强度高、抗撕裂、尺寸稳定性好等特点[1]。合成纸可分为纤维型合成纸和薄膜型合成纸2种，纤维型合成纸是通过熔融、抽丝、成网、挤压等工艺制得，复杂的工艺和较高的成本限制了其生产和应用；相比之下，薄膜型合成纸通过将热塑性聚合物与$CaCO_3$[2]、硅灰石[3]、滑石粉[4]等填料熔融挤出的工艺路线制得，可实现大规模连续化生产，有效降低生产成本，是合成纸领域未来发展的重要趋势。然而，与传统纤维纸相比，由于材料性质和内部结构的差异，聚合物薄膜型合成纸通常表现出刚度和遮盖性能不足的问题，因此需对其进行遮盖和增强改性以满足更高的应用需求。

合成纸的遮盖性能是极其重要的指标，这决定了其在印刷时是否会出现透印现象。传统纤维纸内部由植物纤维交织构成，存在大量纤维-空气界面及微观散射体，这些结构能够有效地对可见光进行散射，从而呈现出良好的遮盖性[5]。对于未改性的高分子聚合物，仅有晶区与非晶区之间的折射率微弱差异，宏观上表现为透明或半透明。现有研究通常采用引入$CaCO_3$作为致孔剂在PP基体内成孔[6]或引入高遮盖性涂层[7]等方法提高薄膜的遮光性，然而前者形成的薄膜内部微孔结构会对薄膜的力学性能造成较大损伤，后者会导致工艺复杂化和不环保性。基于此，在聚合物中引入高折射率的散射体，解决其分散问题，是提升合成纸遮盖性能的有效手段。

如今，已有多种热塑性聚合物用于制备薄膜型合成纸，包括聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）、聚氯乙烯（PVC）和聚酯（PET）等[8]。其中，PP具有高模量、低密度、优异的耐热性和耐化学性及可回收性等优点[9]，特别是其优异的双向拉伸成膜性使其最适合作为薄膜型合成纸原料[10]。双向拉伸可促使聚合物分子链发生高度取向排列，这种微观结构的有序化转变可显著提升薄膜的力学性能[11,12]。同时，PP分子链的取向可带动纳米填料移动，进而改善其分散情况，提高填料的作用效率。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0097
收稿日期：2025-02-19
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目（52203044）；四川省科技计划（2023ZHJY0017）
通讯联系人：李春海，主要从事生物降解膜材料、薄膜光学超材料、模具设计及高分子加工新技术与装备研究，E-mail: lpolymer@scu.edu.cn

本文选用表面改性的金红石型纳米TiO_2（折射率2.7）作为散射体，通过熔融共混挤出结合同步双向拉伸的技术路线将其均匀分散在PP基体内，系统研究了TiO_2含量与双向拉伸对PP/TiO_2复合薄膜结晶行为与力学性能及遮光性的调控规律。研究结果表明，双向拉伸聚丙烯/钛白粉复合薄膜具有优异的力学与遮盖性能，为兼具高力学性能与遮盖性能的合成纸研制开发提供了理论依据和数据支撑。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP：牌号2020s，台塑股份有限公司，熔融指数为3.0 g/10 min（210 ℃, 2.160 kg）；钛白粉TiO_2：Ti-Pure R-104，金红石型，美国杜邦公司，平均粒径为300 nm。

1.2 样品制备

1.2.1 熔融共混：在190~205 ℃的温度范围内使用同向旋转螺杆挤出机（SHJ20B，南京杰恩特机电有限公司）进行混合造粒，PP和TiO_2的质量比分别为100:0，99:1，97:3，95:5和93:7。然后通过平板式硫化机（Ky3201s型，开研精密机械设备厂）将混合物料模制成长宽高分别为10 cm，10 cm，0.14 cm的方形片材（215 ℃，15 MPa）。

1.2.2 双向拉伸薄膜的制备：将上述薄片放入双向拉伸试验机（KARO IV，德国布鲁克纳公司）中进行同步双向拉伸制得PP/TiO_2复合双向拉伸薄膜，双向拉伸的主要工艺参数为：预热温度160 ℃，预热时间3 min，拉伸速率为10 %/s，拉伸倍率3×3，5×5，7×7。将样品命名为T-X-Y×，其中T代表TiO_2，X代表TiO_2的质量分数，Y×代表同步双向拉伸倍率。



Fig. 1 Photograph of biaxially stretched PP/TiO_2 films

1.3 测试与表征

1.3.1 拉伸性能测试：根据国标GB/T 1040.3-2006，用裁刀将试样制成哑铃型样条，采用SANS微机控制电子万能材料试验机在23 ℃进行拉伸试验，拉伸速度为100 mm/min。每组测试8个平行样品，对结果取平均值。

1.3.2 撕裂性能测试：根据国标GB/T 1130－1991，用裁刀将试样制成直角撕裂型样条，采用SANS微机控制电子万能材料试验机在23 ℃进行撕裂实验，记录描述载荷和位移之间关系的曲线。撕裂强度通过式(1)进行计算

$$T_s = \frac{F}{d} \tag{1}$$

式中：T_s——撕裂强度，kN/m；F——最大力，N；d——试样厚度，mm。每组测试8个平行样本，对结果取平均值。此外，对载荷-位移曲线进行积分计算，以确定失效前吸收的能量，表示为撕裂能量，然后除以样品的厚度，以消除样品厚度不同造成的影响。

1.3.3 动态力学热分析：将制备的样品沿双向拉伸方向裁成长20 mm，宽5 mm的样条，采用动态力学分析（Q800，美国TA公司）测试不同样品的储能模量。每组测试5个平行样品，对结果取平均值。测试条件如下：采用拉伸模式，在1 Hz频率和20 μm振幅下，以3 ℃/min的升温速率从－50 ℃升温至150 ℃。

1.3.4 透光率测试：按照国标GB/T 2410-2008，采用透光率/雾度仪（WGT-S，上海精密科学仪器有限公司）测试PP/TiO_2复合薄膜的透光率。每组测试5个平行样品，对结果取平均值。

1.3.5 扫描电子显微镜分析：将样品预制缺口后放入液氮中冷冻8 h，取出后在缺口处快速脆断（断面沿拉伸方向）。利用受控的真空环境在每个样品的表面沉积一层薄薄的金，采用加速电压为10 kV的SEM（JEOL JSM-5900LV）观测样品的形貌。

1.3.6 差示扫描量热分析：采用DSC（Q20，TA仪器）测试分析样品在氮气气氛下的结晶行为和熔融行为。用电子天平称量6~10 mg样品，先在－40 ℃平衡，然后以10 ℃/min的升温速率从－40 ℃升至230 ℃，保温3 min后，将样品以10 ℃/min的冷却速率从230 ℃冷却至－40 ℃，保温3 min，再以10 ℃/min的速率从－40 ℃至230 ℃。

1.3.7 X射线衍射分析：采用Ultima IV型XRD（Rigaku，日本）表征样品的晶体结构。管电压为40

kV，管电流为40 mA，靶材为Cu-Ka放射线，波长0.15418 nm。测试过程中，扫描角度范围为10°~30°，扫描速度为2(°)/min，步长为0.02°。

2　结果与讨论

2.1　TiO_2含量与双向拉伸倍率对PP/TiO_2复合薄膜遮光率的影响

Fig.2是不同TiO_2含量的样品经过不同倍率的同步双向拉伸后的遮光率测试结果。可以看到，随着TiO_2含量增加，PP/TiO_2材料的遮光率逐渐提高，但提高速率逐渐变缓。对于未经双向拉伸的PP/TiO_2复合材料，随着TiO_2质量分数由0逐步增大至7%，遮光率分别为13.6%，70.0%，82.9%，97.5%和99.5%。与纯PP相比，单位质量分数的TiO_2提高幅度依次为414.7%，18.4%，17.0%和2.6%，呈逐渐下降的趋势。这是由于TiO_2含量过高，会在PP基体内部团聚，导致比表面积降低，使其单位质量分数的TiO_2对光线的散射能力下降。再对双向拉伸3×3的PP/TiO_2复合薄膜进行分析，随着TiO_2质量分数由0逐步增大至7%，材料的遮光率分别为9.2%，57.0%，75.0%，87.5%和93.8%，单位质量分数的TiO_2对遮光率的提高幅度依次为519.6%，238.4%，170.2%和131.4%，远大于未经双向拉伸的样品，这表明双向拉伸改善了TiO_2的分散，削弱了团聚效应，提高了其对可见光的散射效率。

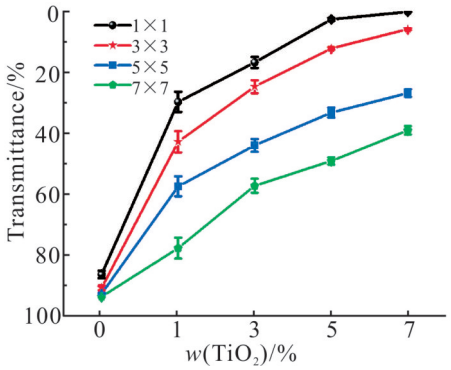


Fig. 2　Transmittance of the unstretched and biaxially stretched samples at different stretching ratios and different TiO_2 contents

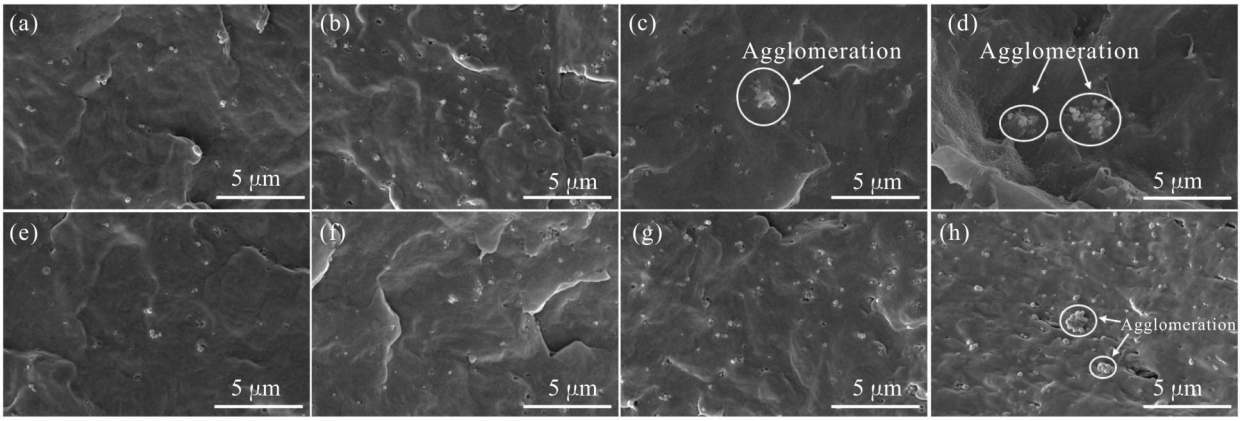


Fig. 3　SEM images of (a~d) unstretched samples with TiO_2 mass fractions of 1%, 3%, 5% and 7%, respectively; (e~h) biaxially stretched samples at the stretch ratio of 3×3 with TiO_2 mass fractions of 1%, 3%, 5% and 7%, respectively

2.2　TiO_2在PP基体内的分散情况

对于添加无机纳米粒子的聚合物复合材料，其性能与填料在聚合物基体中的分散情况密切相关。针对双向拉伸PP/TiO_2复合薄膜体系，为了直观地探究不同TiO_2含量下填料在PP基体中的分散情况，采用扫描电子显微镜（SEM）分别对未拉伸样品以及拉伸比为3×3的样品在特定方向的断面进行了微观形貌分析，结果见Fig.3。TiO_2质量分数为1%时，无论双向拉伸与否，TiO_2纳米颗粒在PP基体内均得到了均匀分散。TiO_2质量分数增加至3%时，未经双向拉伸的样品表现出部分纳米颗粒重叠的现象，但无明显团聚体，经过双向拉伸后，纳米颗粒重叠现象有所改善。当TiO_2质量分数进一步增加至5%时，未经双向拉伸的样品出现了轻微的团聚现象，经过双向拉伸后，团聚现象消失，说明在双向拉伸过程中TiO_2的分散得到了改善。这是因为双向拉伸是在160 °C预热充分后进行的，此时PP处于高弹态，在外力作用下PP分子链高度取向的同时带动了TiO_2纳米颗粒

的移动，进而消除了团聚现象。然而，当TiO_2质量分数增加至7%时，团聚体的数量增多，尺寸增大，即使经过双向拉伸，团聚现象仍没有消失。

2.3 TiO_2含量与双向拉伸倍率对PP/TiO_2复合薄膜力学性能的影响

2.3.1 模量：合成纸的刚度是一项关键指标，其与材料模量及尺寸紧密相关。在本文中，由于原料组分和双向拉伸倍率的差异，各组样品厚度不一致，因此将模量作为刚度的评价标准。Fig.4是PP/TiO_2复合薄膜的DMA储能模量测试结果。在未经双向拉伸的样品中，当TiO_2质量分数为1%时，样品的模量高于纯PP。这一现象归因于适量的TiO_2纳米粒子均匀分散于PP基体中，与PP形成了有效的界面相互作用，提高了分子作用力，宏观上表现为模量的提升。然而，随着TiO_2质量分数进一步提高，材料的储能模量呈现出缓慢下降的趋势。这是由于TiO_2填料在PP基体中逐渐出现纳米颗粒重叠及团聚现象，这些团聚体破坏了材料内部结构的均匀性，在受力过程中成为应力集中点，阻碍了应力在材料内部的有效传递，从而导致模量降低。对样品进行双向拉伸后，模量展示出不同的变化规律。以3×3双向拉伸倍率的样品为例，随着TiO_2质量分数从0升至5%，PP/TiO_2复合薄膜的模量由1531 MPa提升至1971 MPa，提升幅度为29%；然而，当TiO_2质量分数增至7%时，模量下降至1931 MPa。这是因为双向拉伸过程中的高温场赋予PP分子链运动能力，通过拉伸力场带动了TiO_2纳米颗粒的分散，一定程度上改善了TiO_2的团聚，但改善程度有限，对TiO_2质量分数为7%的样品没有明显效果。与未经双向拉伸的样品相比，经过双向拉伸的样品的模量有明显的提升，且随着拉伸倍率的提高而提高。这是由于双向拉伸过程中，PP分子链在高温场和拉伸力场的共同作用下，逐渐从无序状态转变为高度取向和规则排列的状态。这种分子链的有序排列促进了PP的结晶，降低了无定形非晶区的占比，分子间相互作用力得到增强，从而提升了材料抵抗外力变形的能力，在宏观上表现为模量的显著提高。随着拉伸倍率的增大，分子链的取向程度进一步加深，结晶过程更加充分，晶体结构更加完善，使模量得到进一步提升。

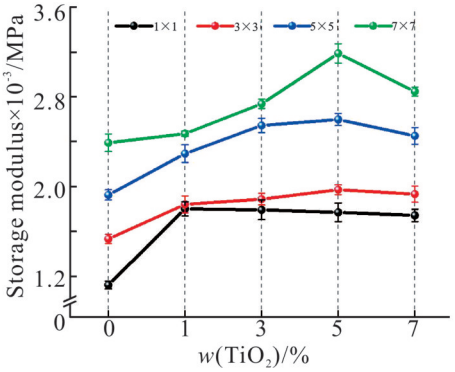


Fig. 4 Storage modulus at 25 ℃ (obtained from thermal mechanical curves) of the unstretched and biaxially stretched samples at different stretching ratios and different TiO_2 mass fractions

2.3.2 拉伸性能：拉伸性能也是合成纸的重要力学性能之一，本文对PP/TiO_2复合薄膜的拉伸性能进行了测试，结果见Fig.5。Fig.5(a)展示了不同TiO_2含量及不同双向拉伸倍率对PP/TiO_2复合薄膜拉伸强度的影响。可以看出，与纯PP相比，加入TiO_2后，PP/TiO_2复合薄膜的拉伸强度有所下降，且下降幅度与双向拉伸倍率呈明显的正相关关系，具体而言，对于未经双向拉伸的样品，随着TiO_2质量分数从0逐步增

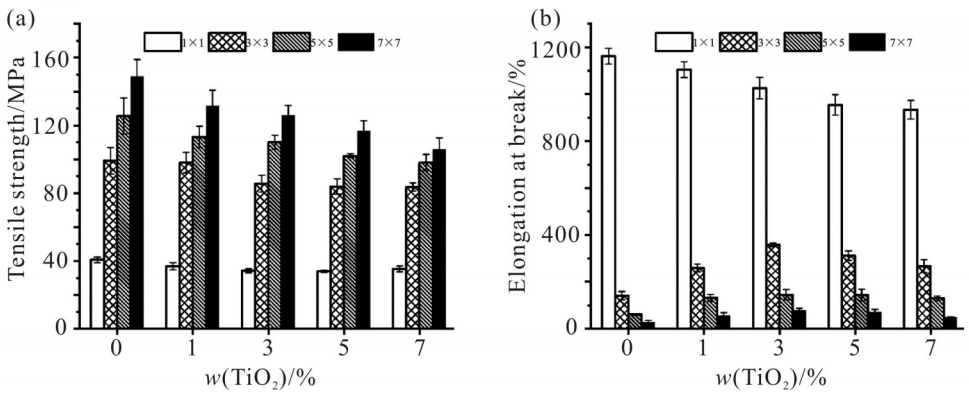


Fig. 5 (a) Tensile strength and (b) elongation at break of the unstretched and biaxially stretched samples at different stretching ratios and different TiO_2 mass fractions

加至7%,材料的拉伸强度由40.6 MPa降低至34.3 MPa,降幅达到18.1%;经过3×3的双向拉伸后,在与前者相同的TiO_2质量分数变化区间内,拉伸强度从99.1 MPa降至83.6 MPa,降低幅度为15.6 %。进一步增大双向拉伸倍率至5×5和7×7时,随着TiO_2含量从0增加至7%,拉伸强度分别从125.5 MPa和149.0 MPa降低至98.0 MPa和106.1 MPa,降幅分别达到21.9%和28.9%。这种现象的产生主要归因于TiO_2填料与PP基体之间形成了弱界面。在双向拉伸过程中,弱界面易发生界面脱粘,随着拉伸倍率的增大,材料所承受的拉伸应力相应增加,弱界面的脱粘程度愈发严重。界面脱粘导致材料内部形成微观缺陷,这些缺陷在拉伸载荷作用下成为应力集中源,阻碍了应力在材料内部的均匀传递,从而引发材料的破坏。有趣的是,在3×3倍率时发现拉伸强度下降幅度略小于未拉伸样品,这是由于低倍率的双向拉伸改善了TiO_2的分散,减弱了团聚程度,一定程度上缓解了拉伸强度下降的趋势。

Fig.5(b)为不同TiO_2含量及不同双向拉伸倍率对PP/TiO_2复合薄膜断裂伸长率的影响。观察发现,未经双向拉伸和经过双向拉伸的样品表现出不同的趋势。对于未经双向拉伸的样品,随着TiO_2质量分数由0增加至7%,材料的断裂伸长率由1161.4%逐渐降低至933.6%;经双向拉伸后,随着TiO_2含量的增加,材料的断裂伸长率呈现先增大后降低的趋势,例如,经过3×3双向拉伸的样品,TiO_2质量分数从0增加至7%,断裂伸长率由140.7%先提升至357.3%,后降低至266.5%。这一现象的内在机制在于双向拉伸能够一定程度上改善TiO_2在PP基体中的分散状态。在双向拉伸的温度场和力场耦合作用下,原本团聚的TiO_2纳米颗粒分散开来,这些均匀分散的TiO_2纳米颗粒在PP基体中作为刚性粒子,能有效地吸收和耗散拉伸过程中的能量,延缓微裂纹的产生和扩展,从而提高PP/TiO_2复合薄膜的断裂伸长率。但当TiO_2含量过高时,双向拉伸对TiO_2分散状态的改善效果不足以消除团聚,应力集中效应主导材料的形变过程,导致断裂伸长率降低。

2.3.3　撕裂性能:为更加全面地评估PP/TiO_2复合薄膜的力学性能,对各组样品进行撕裂性能测试,结果如Fig.6所示。其中Fig.6(a)为撕裂强度。首先从TiO_2含量的角度进行分析,撕裂强度所展现出的变化趋势与拉伸强度类似。以未经双向拉伸的样品为例,随着TiO_2质量分数由0逐步增加至7%,材料的撕裂强度由271.2 kN/m逐步下降至224.7 kN/m。这一现象主要归因于TiO_2填料与PP基体相容性较差,在复合薄膜体系中形成了弱界面,受到撕裂载荷时,裂纹优先在此处萌生并迅速扩展,从而降低了材料的撕裂强度。从双向拉伸的角度分析,所有样品均随着双向拉伸倍率的增加先增加后降低,具体而言,以TiO_2质量分数为1%的PP/TiO_2复合薄膜为例,在双向拉伸倍率从1×1逐步增加至5×5的过程中,撕裂强度由264.3 kN/m逐步提升至444.7 kN/m。然而,进一步将双向拉伸倍率提升至7×7时,撕裂强度下降至413.5 kN/m。这反映了双向拉伸过程中材料微观结构的演变机制,在双向拉伸初期,材料内部的晶片率先带动非晶区发生位移,促使分子链沿着拉伸方向实现高度取向和规整排列。这种微观结构的有序化转变增强了材料内部的分子间作用力,从而提高了

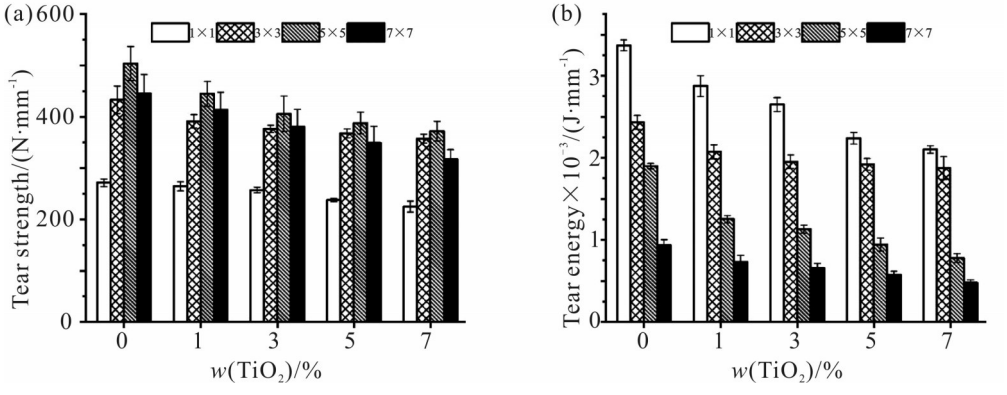


Fig. 6 (a) Tear strength and (b) tear energy of the unstretched and biaxially stretched samples at different stretching ratios and different TiO_2 mass fractions

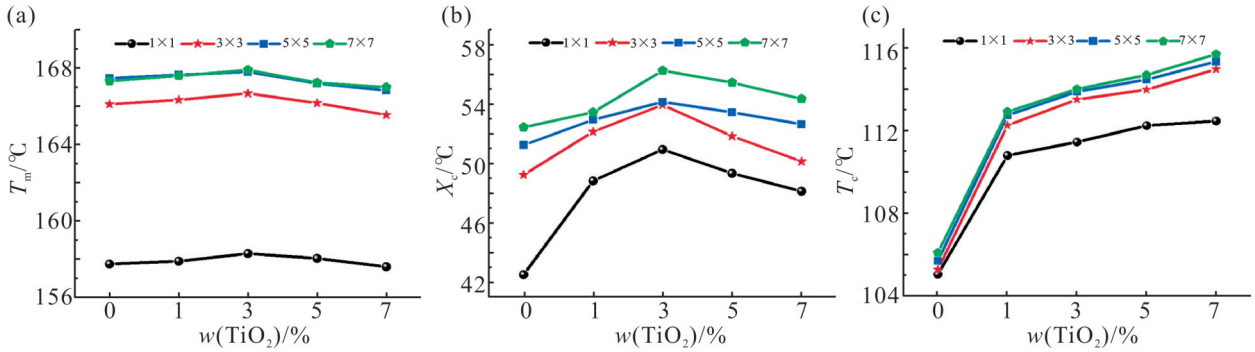


Fig. 7 DSC results of the unstretched and biaxially stretched samples at different stretching ratios and different TiO_2 mass fractions: (a) T_m; (b) X_c; (c) T_c

撕裂强度。随着拉伸倍率不断增大，晶片自身也受到拉伸取向，当达到晶片的变形极限时，晶体结构内部可能会出现诸如晶体破碎、晶界滑移等微观缺陷，在撕裂载荷作用下，裂纹更容易在缺陷处快速扩展，进而导致撕裂强度下降。

Fig.6(b)展示了各组样品的撕裂吸收能，可以观察到，随着TiO_2含量和双向拉伸倍率的增加，材料的撕裂吸收能均呈下降的趋势。以未经双向拉伸的TiO_2含量为0的纯PP样品为例，随着TiO_2含量增大至7%，撕裂吸收能由3369.5 J/m降低至2100.5 J/m；随着双向拉伸倍率从1×1增大至7×7，撕裂吸收能又降低至933.9 J/m。这一趋势同样可以归因于在撕裂过程中，应力传递至PP和TiO_2的弱界面处时无法终止，反而加剧了应力传递；此外，在双向拉伸过程中，分子链的高度取向虽然在一定程度上增强了材料内部的分子间作用力，但同时也限制了分子链的自由运动。这导致材料在承受载荷时，能够发生的最大位移减小，使得材料在撕裂过程中吸收的能量减少。

2.4 PP/TiO_2复合薄膜的结晶行为

2.4.1 DSC分析：通过DSC表征了双向拉伸PP/TiO_2复合薄膜的结晶性能，结果如Fig.7所示。Fig.7(a~c)分别展示了双向拉伸PP/TiO_2复合薄膜的熔点、结晶度和结晶温度随TiO_2含量及双向拉伸倍率变化的变化趋势。从TiO_2含量分析，熔点和结晶度均随着TiO_2含量的增大呈现先提高后降低的趋势。以经3×3双向拉伸的PP/TiO_2复合薄膜为例，随着TiO_2质量分数从0增大至3%，熔点和结晶度分别由166.1 ℃和49.2%提高至166.7 ℃和53.9%，但随着TiO_2质量分数继续增大至7%，熔点和结晶度分别降低至165.6 ℃和50.1%。这是因为TiO_2作为异相成核位点诱导了PP结晶，随着含量的增加，TiO_2与PP接触面积增大，异相成核作用更加显著，然而当TiO_2质量分数过高时则易出现纳米颗粒重叠和团聚现象，比表面积降低，与PP的有效接触面积减少，从而抑制了异相成核效果。从双向拉伸倍率分析，经过双向拉伸的样品熔点和结晶度均明显高于未经双向拉伸的样品，以TiO_2含量为1%的样品为例，未经双向拉伸时熔点和结晶度分别为157.9 ℃和48.8%，经过3×3的双向拉伸后，熔点和结晶度分别提高至166.3 ℃和52.1%。这是由于双向拉伸工艺使分子链规整排列和取向，有序的分子链排列方式使其更容易排入晶格，从而促进了结晶。随着双向拉伸倍率增大，分子链的取向程度增加，PP/TiO_2复合薄膜的结晶结构更加完善，熔点和结晶度进一步提高。然而，当拉伸倍率过大时，分子链的取向和结晶结构的完善程度逐渐趋近于极限，此时继续增大拉伸倍率对熔点的影响较小；由于双向拉伸对TiO_2的分散有改善作用，结晶度继续随着双向拉伸倍率的提升而增大。在结晶温度方面，TiO_2含量和双向拉伸倍率的增大同步使材料的冷结晶温度提升，意味着结晶行为可在更高的温度进行，TiO_2和双向拉伸工艺均可促进PP结晶。

2.4.2 XRD分析：对样品进行了X射线衍射分析，结果如Fig.8所示。所有样品薄膜在2θ=5°~30°的测量角度范围内均出现5个明显的衍射峰，分别为14.1°((110)晶面)、16.8°((040)晶面)、18.6°((130)晶面)、21.1°((111)晶面)和21.7°((041)和(131)晶面)，这些衍射峰均属于聚丙烯α晶型的晶面衍射峰，这表明，无论是纯PP样品还是添加TiO_2的PP/TiO_2复合薄膜样品，在结晶过程中均主要形成了力学性能最优的α晶型结构。此外，不同于纯PP，添加了TiO_2的样品在

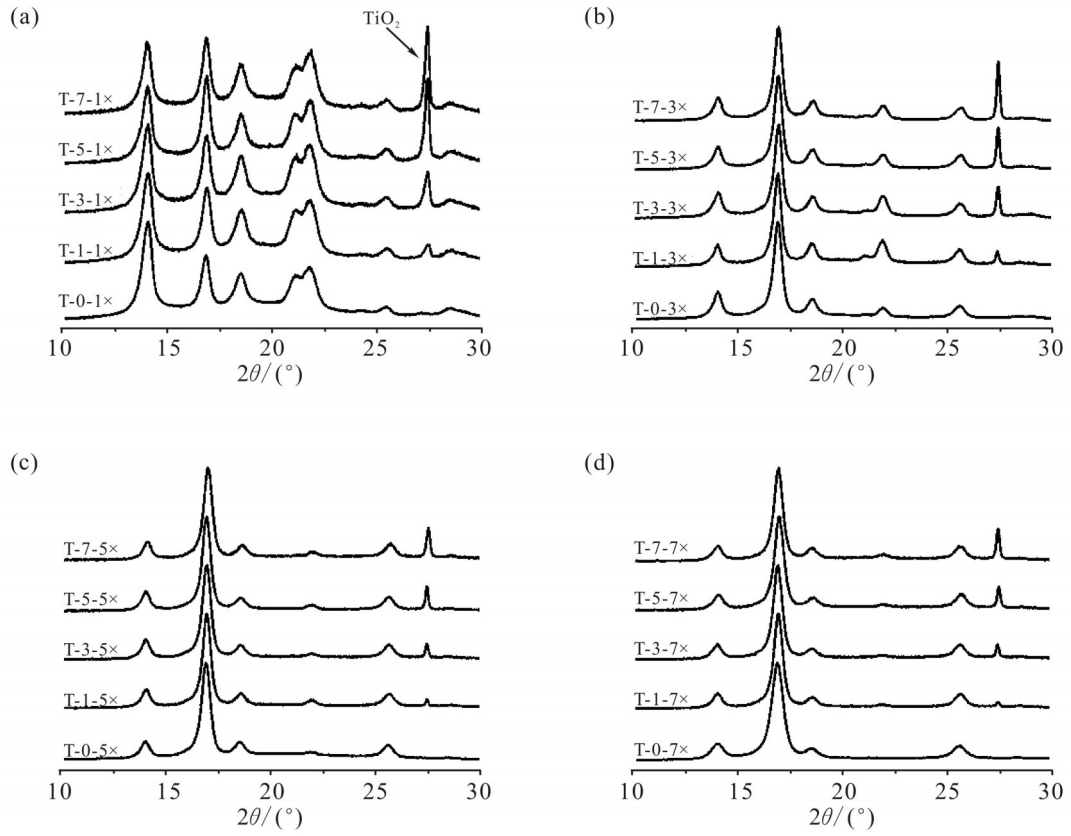


Fig. 8 XRD patterns of the unstretched and biaxially stretched samples at different stretching ratios and different TiO_2 mass fractions: (a) unstretched samples; (b~d) biaxially stretched samples at stretch ratios of 3×3, 5×5 and 7×7, respectively

2θ=27.5°出现了衍射峰，这是金红石型TiO_2的特征峰，且该峰的强度随着TiO_2含量的增大而增大[11]。

3　结论

本文通过熔融共混结合双向拉伸工艺制备了兼具力学性能和遮盖性能的PP/TiO_2复合薄膜，并探究了TiO_2含量与双向拉伸倍率对PP/TiO_2复合薄膜性能的影响，得到以下主要结论。

（1）TiO_2均匀分散在PP基体中，一方面通过自身小粒径高折射率的特性对可见光进行散射；另一方面起到异相成核作用促进PP结晶，增加了PP晶区与非晶区的界面，进一步耗散光线，从而提高了PP/TiO_2复合薄膜的遮光率。随着TiO_2含量的增大，PP/TiO_2复合薄膜的遮光率逐渐增加，但增速逐渐变缓，对于经过3×3双向拉伸的样品，与纯PP相比，TiO_2质量分数为5%的PP/TiO_2复合薄膜的遮光率由9.2%提升至87.5%。

（2）对PP/TiO_2复合薄膜进行双向拉伸，一方面通过拉伸力场可以改善TiO_2的分散，抑制其团聚，从而提高其对遮光率与模量的改善效果。对于经过3×3双向拉伸的样品，与纯PP相比，TiO_2质量分数为5%的PP/TiO_2复合薄膜的模量由1531 MPa提升至1971 MPa，提升幅度为29%；另一方面，双向拉伸可诱导分子链高度取向和规则排列，显著提高PP/TiO_2复合薄膜的拉伸强度，撕裂强度及模量。随着拉伸倍率的增大，力学性能的增强效果愈加显著。

综上所述，本文通过改变TiO_2含量与双向拉伸倍率同步调控TiO_2的分散状态以及PP基体的结晶行为，实现了力学性能和遮盖性能的同步提升，为兼具高力学性能和高遮盖性能的薄膜型合成纸的开发研制提供了一种可行的思路。

参考文献：

[1] Cheng D, Zan Y, Du J, *et al*. Recycling of ultrahigh molecular weight polyethylene waste used for preparing high performance synthetic paper[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133: e44159.

[2] Kang D S, Han J S, Choi J S, *et al*. Development of deformable calcium carbonate for high filler paper[J]. ACS Omega, 2020, 5: 15202-15209.

[3] Putfak N, Larpkasemsuk A. Wollastonite and talc reinforced polypropylene hybrid composites: mechanical, morphological and thermal properties[J]. Journal of Metals, Materials and Minerals, 2021, 31: 92-99.

[4] Teldjoun M, Mendas M, Mzali S, *et al*. Reciprocating sliding wear behavior of talc- filled polypropylene: effect of talc proportion[J]. Tribology International, 2024, 200: 110074.

[5] 张美云, 聂景怡, 刘馨茗, 等. 高分子科学视角下“以纸代塑”面临的挑战及应对策略[J]. 中国造纸, 2023, 42(7): 102-117.
Zhang M Y, Nie J Y, Liu X M, *et al*. Challenges and countermeasures of replacing plastic with paper: from the perspective of polymer science [J]. China Pulp and Paper, 2023, 42(7): 102-117.

[6] Gómez Álvarez- Arenas T E, Soto D A. Characterization of mineral paper by air- coupled ultrasonic spectroscopy[J]. Ultrasonics, 2012, 52: 794-801.

[7] Yilmaz U. Optical- physical and inkjet printing properties of created hybrid $CaCO_3$ coated papers[J]. Coloration Technology, 2023, 139: 654-666.

[8] He W, Cheng D, Du J, *et al*. High performance synthetic paper used for color printing based on ultrahigh molecular weight polyethylene/SiO_2 by using TIPS method[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132: e41529.

[9] Chen X, Zhang T, Sun P, *et al*. Study on the performance and mechanism of modified mica for improving polypropylene composites[J]. International Journal of Low- Carbon Technologies, 2022, 17: 176-184.

[10] Chen X, Xiang D, Zhou Z, *et al*. Biaxial stretching of polymer nanocomposites: a mini- review[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 725422.

[11] 李政奥, 李姜, 郭少云. 双向拉伸聚对苯二甲酸乙二醇酯/聚己二酰间苯二胺 的形态结构与阻隔及力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(8): 125-130.
Li Z A, Li J, Guo S Y. Morphology, barrier and mechanical properties of biaxially stretched poly(ethylene terephthalate)/ poly (m- xylene adipamide) [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(8): 125-130.

[12] Sun F, Li T-T, Ren H, *et al*. PP/TiO_2 melt-blown membranes for oil/water separation and photocatalysis: manufacturing techniques and property evaluations[J]. Polymers, 2019, 11: 775.

Simultaneous Enhancement of Mechanical and Optical Properties of Biaxially Stretched Polypropylene/Titanium Dioxide Composite Films

Quanjia Du, Shaoyun Guo, Chunhai Li

(*National Key Laboratory of Advanced Polymer Materials, Polymer Research Institute of Sichuan University, Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Plastic/Rubber Complex Processing Technology, Chengdu 610065, China*)

ABSTRACT: Traditional polymer synthetic papers contain numerous internal porous structures, making it difficult to balance optical and mechanical properties. In this study, polypropylene (PP) and titanium dioxide (TiO_2) were used as raw materials to prepare a non-porous biaxially stretched PP/TiO_2 composite film through melt blending and simultaneous biaxial stretching. This approach achieved a simultaneous enhancement of both mechanical and optical properties. Light transmittance tests indicate that biaxial stretching can effectively improve the dispersion of TiO_2. TiO_2 with small particle size and high refractive index can efficiently scatter visible light within the PP matrix, while promoting PP crystallization, thereby enhancing the modulus of PP/TiO_2 composite films. For samples subjected to 3×3 biaxial stretching, compared to pure PP, the light-blocking rate of the PP/TiO_2 composite film with a TiO_2 content of 5% increases from 9.2% to 87.5%, and the modulus rises from 1531 MPa to 1971 MPa, representing a 29% improvement. Additionally, appropriately increasing the biaxial stretching ratio can significantly enhance the tensile strength, tear strength, and modulus of PP/TiO_2 composite films. This study provides theoretical basis and practical insights for the development of high-performance, high-opacity film-type synthetic papers.

Keywords: polypropylene; titanium dioxide; biaxial stretching; optical property; mechanical property