高分子材料科学与工程
POLYMER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING

http://pmse.scu.edu.cn

双向拉伸工艺对聚乳酸中间相含量和尺寸及薄膜光学性能的影响

李美，林耿濠，刘嘉欣，龚建超，张子垣，陈锶婕，林嘉定
（广东轻工职业技术大学 材料学院，广东 广州 510300）

摘要：为探究双向拉伸工艺对聚乳酸（PLA）薄膜微观结构演变及光学性能的影响规律，特别是中间相结构与珠光效果的内在联系，本文通过熔融挤出流延制备无定形流延片，采用不同拉伸工艺对铸片进行同步双向拉伸以制得聚乳酸薄膜，并以未拉伸流延片作为对照。采用红外光谱、二维广角X射线衍射、偏光显微镜、扫描电镜及透光/雾度测试仪，系统研究了拉伸温度、拉伸倍率与拉伸速率对聚乳酸薄膜中球形中间相含量、形貌、平均尺寸、透光率/雾度及珠光效果的影响。结果表明，在拉伸温度高于玻璃化转变温度但低于85 ℃时，随着拉伸倍率与拉伸速率的提高，薄膜透光率逐渐下降，雾度上升，并呈现珠光效果。当拉伸温度为70~80 ℃，拉伸速率为200~300 mm/s，拉伸倍率为3×3~3.8×3.8时，球形中间相分布最均匀，平均尺寸为0.44~0.83 μm，聚乳酸薄膜的遮光性与珠光效果达到最佳平衡。研究证实，球形中间相含量越高，平均尺寸越大，薄膜的珠光效果越显著。

关键词：聚乳酸；双向拉伸；中间相；光学性能；珠光效果

聚乳酸作为最成熟的生物可降解树脂，具有良好的生物相容性和环境友好性，可广泛应用于医疗、包装、农业等领域。聚乳酸在不同结晶条件下形成包括 α、α'、β、λ、γ 和 ε 在内的多种结晶变体[1]。除了这些明确界定的晶型之外，研究人员还发现了一种介于非晶态与结晶态之间、具有一定结构有序性的中间相[2]。根据 Strobl 提出的多步结晶模型[3]，聚合物结晶是一个从熔体成核后形成中间相，再发展为初生晶体并最终形成稳定晶体相的多步骤过程。中间相作为亚稳态结构，存在于晶体生长的前沿。因此，中间相的研究对于调控聚乳酸结晶行为和形貌进而控制其物理性能至关重要。

当前形成中间相结构的方法包括熔体淬火、拉伸诱导取向、退火处理、CO_2诱导相分离，以及加入提高链迁移性的添加剂（如弹性体、增塑剂）[4-8]。其中，拉伸诱导的方法在技术上与工业上制备聚乳酸薄膜最为紧密。然而，现有的研究主要聚焦于单轴拉伸或低频稳态拉伸条件下的结构演变[6,9-11]，对于工业上更为普遍的同步双向拉伸工艺涉及较少。尤其是在双向拉伸的高拉伸速率非平衡条件下，受限的应力松弛和链取向会显著改变结晶动力学，进而决定最终的晶体形态。目前的文献对于双向拉伸过程中工艺参数如何精准调控中间相的含量与尺寸，以及这种微观结构如何具体影响薄膜的宏观光学性能（如透光率、雾度及特殊的珠光效应），尚缺乏系统性的研究与明确的构效关系描述。

针对以上问题，本文在前期工作的基础上[12-14]，旨在探究同步双向拉伸工艺中“工艺参数-中间相结构-光学性能”的内在关联。 通过系统改变拉伸温度、拉伸倍率和拉伸速率，深入分析了非平衡拉伸条件下球形中间相的形成规律及其尺寸效应，并揭示了中间相结构对聚乳酸薄膜光学性能的调控机制。本研究不仅有助于阐明双向拉伸诱导结晶的动力学机理，也为开发具有特殊光学性能（如珠光膜）的聚乳酸薄膜提供了新的理论依据和工艺指导。

1. 实验部分

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0121
收稿日期：2025-08-12
基金项目：广东省自然科学基金资助项目（2022A1515110258）；广东省教育厅重点专项（2022ZDZX3049）
通讯联系人：李美，主要从事生物可降解薄膜研究，E-mail: 2016103058@gdip.edu.cn

1.1 实验原料

聚乳酸（PLLA）：牌号 4032，美国 NatureWorks 公司生产，其成分为 98% L-乳酸与 2% D-乳酸。经凝胶渗透色谱法（GPC）测定，该材料的重均分子量为 2.12×10^5 g/mol，分子量分布指数为 1.74。

1.2 双向拉伸膜的制备

实验前将聚乳酸（PLA）颗粒置于 80 ℃真空烘箱中干燥 12 h 以上。将干燥后的颗粒投入流延挤出机（螺杆直径 25 mm，长径比 28）进行熔融挤出。挤出物经骤冷辊与冷却辊双重控温系统冷却后，由牵引辊传送至收卷辊制成流延基片。挤出机从喂料段至模头的 11 个温控区均设置为 180 ℃。冷辊温度设定为 50 ℃，冷却辊与牵引辊线速度比设置为 1：1， 流延片的厚度控制在 430 μm，命名为 B0 。将未拉伸 PLLA 基片（B0）裁切成 100 mm×100 mm（长×宽）试样，置于静态精密双向拉伸设备进行同步双向拉伸。实验流程如下：预热阶段：在 65-85 ℃拉伸烘箱内预热 60 s；在 65-75 ℃温度环境下，以 200 mm/s 拉伸速率同时进行纵向（MD）与横向（TD）的双向拉伸，设定拉伸比 3.0×3.0，65 ℃，70 ℃，75 ℃，80 ℃，85 ℃不同温度同步拉伸聚乳酸双向拉伸膜分别标记为 T65, T70，T75，T80 和 T85；固定拉伸温度为 70 ℃，拉伸速率 200 mm/s，同步拉伸倍数分别为 1.5×1.5, 2×2, 3×3，3.5×3.5，3.8×3.8 的聚乳酸双向拉伸膜分别标记为 B1.5，B2，B3，B3.5 和 B3.8；固定拉伸温度为 70℃，拉伸倍率为 3×3，同步双向拉伸速率分别为 1mm/s, 10 mm/s, 50 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/s, 300 mm/s 聚乳酸双向拉伸膜分别标记为 V1，V10，V50，V100，V200 和 V300。以上薄膜同步双向拉伸后快速降到室温 25 ℃定型备用。

1.3 测试与表征

1.3.1 红外光谱分析：采用美国 Nicolet 公司 Nexus 6700 型傅里叶变换红外光谱仪（FTIR），在衰减全反射（ATR）模式下进行测试。光谱分辨率为 4 cm^{-1}，扫描范围 400-4000 cm^{-1}，累加扫描次数 32 次。

1.3.2 广角 X 射线衍射分析：采用德国布鲁克 Rigaku HomeLab Discover 型 X 射线衍射仪（X 射线波长 0.154 nm，Cu-Kα辐射）进行聚集态结构分析。二维 WAXD 图像由 Hypix-6000 探测器（像素尺寸 100 μm × 100 μm）采集存储，一维 WAXD 曲线通过 FIT2D 软件对二维图像进行径向积分获得。非晶峰与中间相峰存在部分重叠，分峰结果具有一定的不确定性，文中提供的中间相含量主要为相对比较值。

1.3.2 偏光显微镜表征：采用德国蔡司 Axio Scope A1 型偏光显微镜（POM），在 1000 倍放大倍数下观察聚左旋乳酸（PLLA）样品的形态。

1.3.4 扫描电镜表征：采用日本日立 S4800 型扫描电子显微镜（SEM），在 1kV 加速电压下观察聚左旋乳酸（PLLA）流延基片及双向拉伸聚乳酸（BOPLA）薄膜的断面形貌特征。样品经高真空溅射镀金处理。扫描后的中间相的尺寸通过 NANO MEASURER 软件进行统计，再拟合计算求出平均粒径。

1.3.5 透光率和雾度测试：采用的透光率/雾度测试仪（广州标际包装设备公司，型号为 WGT-S ），参照国标 GB/T 2410-2008《透明塑料透光率和雾度的测定》，将双向拉伸薄膜裁成 50 mm×50 mm 的方片，平行置于入口窗前，并完全遮盖入口窗，表征聚乳酸双向拉伸膜的雾度及透光率，每个样品平行测试 5 次，求平均值。

2. 结果与讨论

2.1 不同拉伸条件下聚乳酸双向拉伸膜中间相的含量

傅里叶变换红外光谱是表征聚合物分子链内链段聚集态的有效方法。大量研究表明[4-5]，聚乳酸在 956 cm^{-1}处的吸收峰是其非晶相的特征峰；而 921 cm^{-1} 处的吸收峰对应 PLA 的 10/3 螺旋链构象（α及α′晶型），918 cm^{-1} 处的吸收峰则与中间相特征峰相关联。Fig.1(a)~(c)分别展示了不同拉伸温度、拉伸倍率和拉伸速率条件下制备的聚乳酸双向拉伸膜的红外光谱，可以明显的观察到 918 cm^{-1}

处的吸收峰强度和与 956 cm^{-1} 处吸收峰强度呈负相关性, 因此可以根据式（1）进行定量计算不同拉伸条件下聚乳酸薄膜中间相的相对含量[15]：

$$X_{meso}= A_{918}/(A_{918}+A_{956}) \quad (1)$$

式中，A_{918} 和 A_{956} 分别为原始光谱中 918 cm^{-1}和 956 cm^{-1}特征峰的强度。计算结果如 Tab.1 所示。

未拉伸的流延片（B0）几乎无中间相生成，Fig.1(a)所示为玻璃化转变温度（T_g）~85 ℃温度范围内同步双向拉伸聚乳酸红外光谱图，随着拉伸温度的升高，中间相的含量先升高后降低，当拉伸温度为 70 ℃时，中间相的相对含量达到最大值，高达 61.3 %，这远远高于目前文献报道的可以形成中间相的含量。当拉伸温度超过 70 ℃时，中间相相对含量逐渐减少，拉伸温度达到 85 ℃时，中间相红外吸收峰几乎消失。这与 Stoclet 等报道的单轴拉伸聚乳酸的温度超过 70 ℃，几乎无中间相产生不同[6]。这可能与拉伸模式有关，同步双向拉伸的模式更有利于分子链的解缠结，形成局部有序的中间相结构。当固定拉伸温度 70 ℃，不同倍率同步双向拉伸无定形聚乳酸流延片，制备的薄膜红外光谱如 Fig.1(b)所示，聚乳酸薄膜中间相的相对含量先增加后减少。当同步拉伸倍率为 3×3 时，中间相含量达到最大值。这表明随着应变的提高，分子链解缠结，在应力诱导到下克服分子链的内摩擦阻力，构象重新排列，形成局部有序的中间相[16]。当拉伸倍率大于 3×3 时，中间相含量减少，这可能与过度拉伸有关。高倍率拉伸虽然有利于分子链解缠结，但不利于分子链进行有序重排和取向以形成规整结构。研究表明，当分子链内羰基官能团间距小等于 2.7 Å时，才能形成局部有序的中间相结构[16]。Fig.1(c)为固定拉伸温度 70 ℃，拉伸倍率 3×3，不同拉伸速率同步双向拉伸无定形聚乳酸流延片制备的薄膜红外光谱图，随着拉伸速率的提高，中间相含量先增加后减少。当拉伸速率为 200 mm/s 时，中间相含量达到最大值。笔者前期流变研究表明，提高拉伸速率，有利于分子链的解缠结，会出现拉伸变稀的现象。当拉伸速率超过 200 mm/s, 这种拉伸变稀效应减弱，中间相的含量下降。为了进一步定量分析聚乳酸双向拉伸膜中结晶情况和中间相含量，采用二维广角衍射分析了聚乳酸膜的二维衍射情况，如 Fig.2(a_1)~(a_4)，Fig.2(b_1)~(b_4)和 Fig.2(c_1)~(c_4)分别为不同拉伸温度、拉伸倍率和拉伸速率工艺条件下制备的聚乳酸膜只呈现均匀的宽晕环，表明样品均为各向同性的非晶态。Fig.3(a_1)~(a_4)，Fig.3(b_1)~(b_4)和 Fig.3(c_1)~(c_4)分别为不同拉伸温度、拉伸倍率和拉伸速率工艺条件下制备的聚乳酸膜一维广角 X 射线衍射（1D-WAXS）曲线，仅能观察到一个宽而大的衍射峰，未发现任何明显尖锐的衍射峰，这表明样品中缺乏明确的晶体结构[12]。这可以理解为：聚乳酸（PLA）是一种缓慢结晶的热塑性聚合物，因此在高拉伸速度和快速冷却速率下难以通过拉伸诱导实现完全结晶。此外，与未拉伸样品(如 Fig.3(b_1))对比发现， 主衍射峰位置从 2θ=15.5°偏移至 2θ=16.2°，接近 PLA 中α晶相的衍射峰位置（2θ=16.7°）。该结果表明，双向拉伸样品中存在一个新相，其衍射峰可能被宽的非晶峰所掩盖。为评估这一点，使用峰拟合软件 Fit2D 对一维 WAXS 曲线进行了分析。如 Fig.3(b_1)所示，主衍射峰位置从 2θ=15.5°偏移至 2θ=16.2°，接近 PLA 中α晶相的衍射峰位所示，对于未拉伸样品，在 2θ≈15.5°、21.7°和 32.4°附近发现了归属于非晶相的三个峰。有趣的是，对于 T65 及其他样品，除了上述衍射峰外，还在 2θ≈16.2°附近检测到一个衍射峰，这可归因于中间相的形成[6]。相应的，定量计算得出的中间相相对含量如 Tab.1 所示。显然，中间相相对含量随着拉伸温度、拉伸倍率和拉伸速率的变化与傅里叶变化红外光谱积分结果基本一致。由此可见，同步双向拉伸聚乳酸形成的中间相同时受热力学（温度）和动力学（倍率和速率）的控制。这与通过蒙特卡洛模型模拟双向拉伸聚乳酸结晶过程主要受动力学控制不同[11]。笔者认为这归结于蒙特卡洛模拟中自由能是相对简化和固定的，中间相没有被明确定义或其能垒被设置过低，模拟的动力学路径会直接跳过模型中的中间态，直接从无序态演变为稳定的晶态。

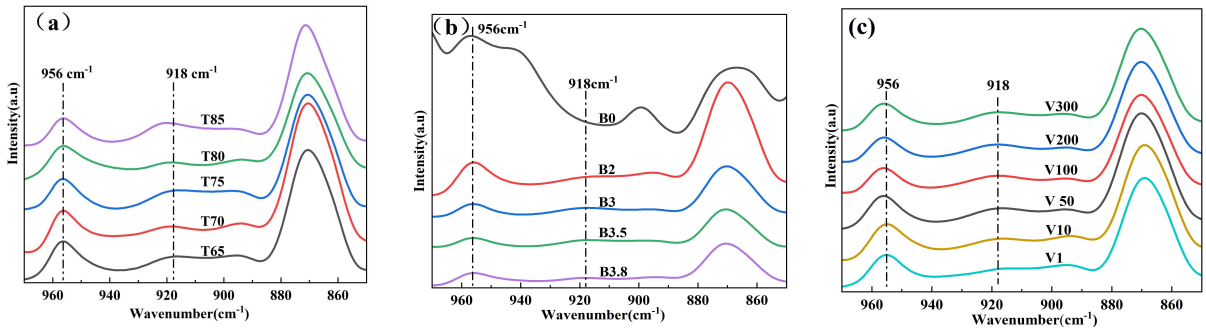


Fig. 1 Infrared spectra in the region of 850~970 cm^{-1} for polylactic acid films prepared under various conditions of (a) bidirectional stretching temperature, (b) stretch ratio, and (c) stretching rate

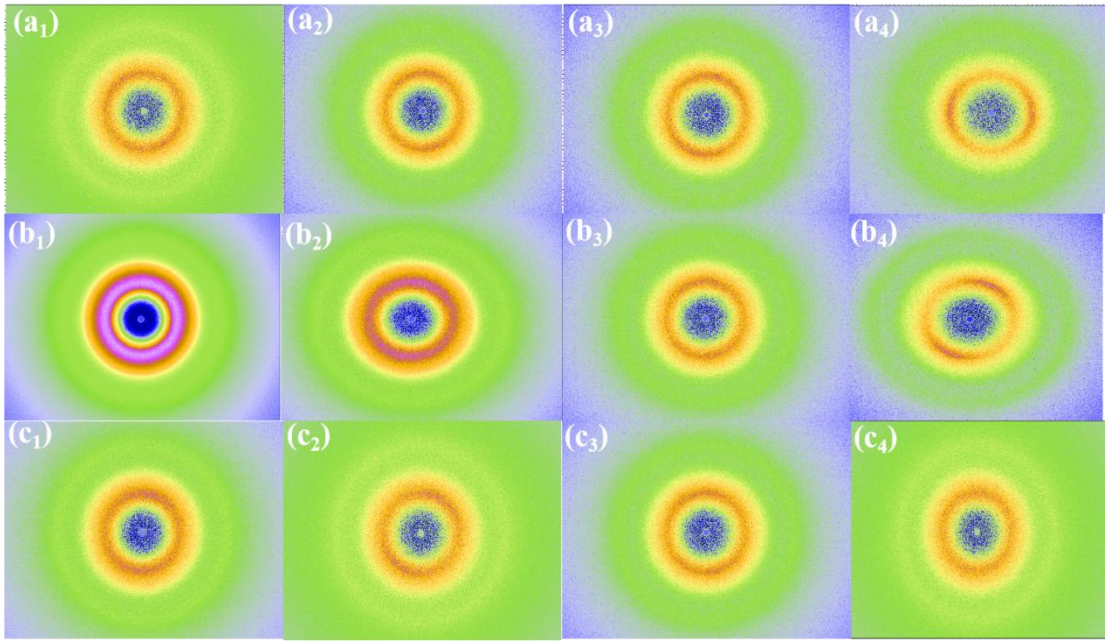


Fig. 2 Two-dimensional WAXD patterns of PLA films (a_1~a_4 represent T65, T70, T75, T80; b_1~b_4 represent B0, B2, B3, B3.5; c_1~c_4 represent V10, V100, V200, V300, respectively)

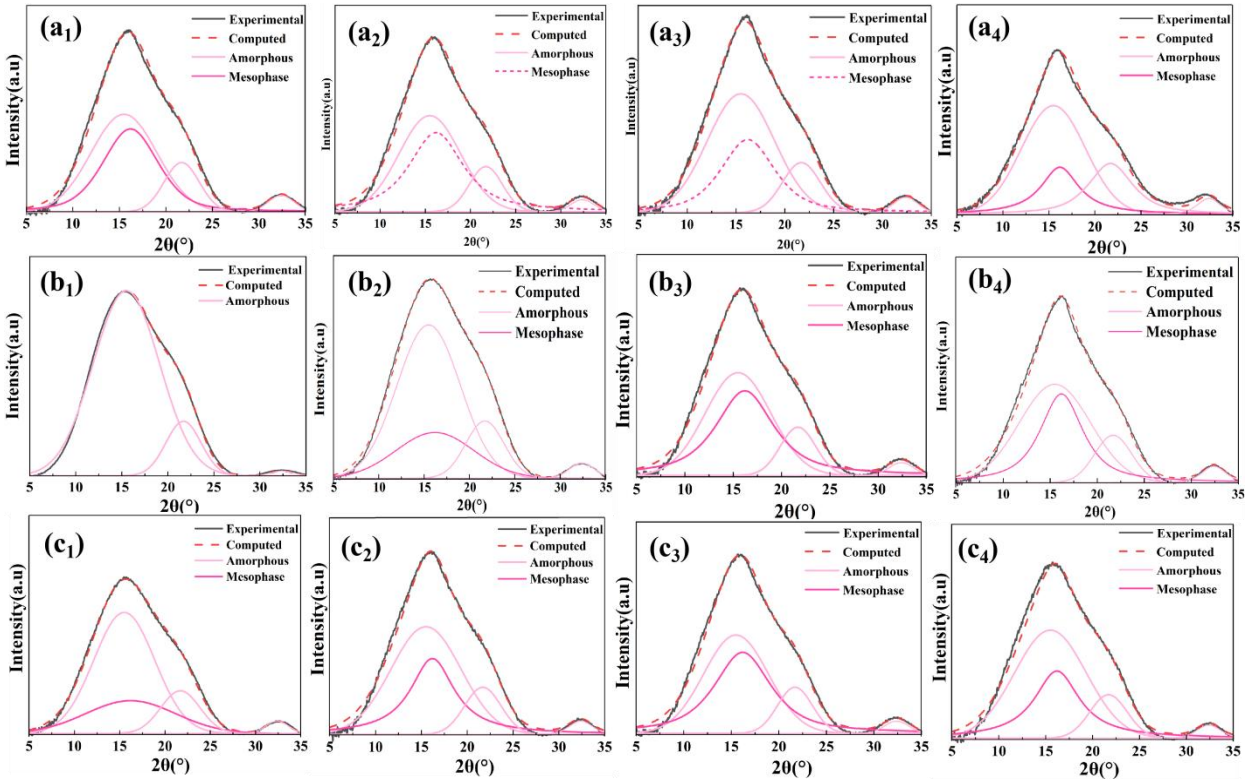


Fig. 3 One-dimensional WAXD diffraction patterns and peak fit treatment of azimuth-integrated WAXD profiles of PLA drawn under different conditions (a_1~a_4 represent T65, T70, T75, T80; b_1~b_4 represent B0, B2, B3, B3.5; c_1~c_4 represent V10, V100, V200, V300, respectively)

Tab. 1 Data of biaxial stretched PLA under various conditions

Sample	Content of mesophase(%) FTIR	Content of mesophase(%) WAXD	Average diameter of mesophase(μm)	Transparency(%)	Haze	Pearlescent
B0	0	0	-	79.5±0.6	0.14±0.10	No
T65	44.4	36.9	0.29	62.0±5.9	60.6±7.4	Yes
T70	61.3	40.1	0.44	64.7±2.0	69.0±1.8	Yes
T75	21.1	30.8	0.56	71.5±2.5	57.1±4.3	Yes
T80	10.1	19.5	0.22	81.2±0.2	3.4±0.6	No
T85	0	0	-	82.4±0.2	1.8±1.8	No
B1.5	7.6	7.6	0.11	87.2 ±0.1	1.9 ±1.3	No
B2	18.4	18.4	0.12	87.5 ±0.1	1.9 ±1.3	No
B3	48.3	40.1	0.44	64.7 ±2.0	69.0± 1.8	Yes
B3.5	30.5	33.9	0.47	44.5 ±3.3	78.4±1.3	Yes
B3.8	32.0	36.0	0.58	54.7±5.9	82.9±4.4	Yes
V1	2.52	20.7	0.11	94.3±0.1	0.5±0.02	No
V10	11.1	23.8	0.14	94.13±0.1	0.9±0.02	No
V50	23.5	29.8	0.21	95.5 ±0.2	0.9± 0.01	No

V100	33.8	31.5	0.50	91.5 ±1.6	22.8+1.8	Yes
V200	48.3	40.1	0.74	64.7±2.0	69.0±1.8	Yes
V300	23.4	29.2	0.83	89.0±1.8	33.3±1.3	Yes

2.2 不同拉伸条件下聚乳酸双向拉伸膜中间相形貌和平均尺寸

为进一步获得不同拉伸条件制备的聚乳酸双向拉伸膜的微观形貌，同时采用 POM 和 SEM 观察聚乳酸双向拉伸膜的微观形貌。Fig.4 是采用 POM 观察不同拉伸条件制备的聚乳酸双向拉伸膜的微观形貌。如 Fig.4(b_1)所示，未拉伸的聚乳酸流延片表面十分光滑平整，而经过双向拉伸的聚乳酸流延片形成了大量规整的球形结构。前面的研究表明，这种球形结构正是双向拉伸形成的中间相。随着拉伸温度的提高，形成球形中间相越来越规整，尺寸先增大后减小，如 Fig.4(a_1)~(a_4)所示。如 Fig.4(b_1)~(b_4)和 Fig.4(c_1)~(c_4)，随着拉伸倍率和拉伸速率的提高，形成的球形中间相越来越规整，尺寸逐渐增大。但过快和过度拉伸也会导致形成的球形中间相均匀度下降，容易聚集成大的球形结构。为了定量分析球形中间相平均尺寸，通过 Nano measuer 软件对中间相 SEM 图（Fig.5）进行统计分析，不同拉伸条件形成球形中间相的平均尺寸见表 1。如表 1 所示，当拉伸温度为 65 ℃时，球形中间的平均尺寸为 0.29 μm，随着拉伸温度的提高，形成球形中间相平均尺寸增大，如 Fig.5(a_1)~(a_4)所示。当拉伸温度为 75℃时，球形中间相平均尺寸达到最大，为 0.56 μm。当拉伸温度超过 75℃时，球形中间相平均尺寸减小。这归结于中间相热稳定温度较低，当拉伸温度超过 75℃时，部分中间相熔融[6]。如 Fig.5(b_1)~(b_4)，固定拉伸温度和拉伸倍率分别为 70 ℃和 3×3，球形中间相的平均尺寸随着拉伸速率的提高而增大。当拉伸倍率为 3.8 时，球形中间的平均尺寸达到 0.58 μm。如果固定拉伸温度为 70℃，拉伸速率为 200 mm/s, 随着拉伸倍率的提高，形成球形中间相尺寸增大，如 Fig.5(c_1)~(c_4)所示。当拉伸速率为 300 mm/s 时，形成球形中间的平均尺寸达到 0.83 μm。因此，双向拉伸形成的球形中间相尺寸同时受拉伸温度、拉伸速率和拉伸倍率的多重因素影响，温度和速率的提升均能增大粒径，但超过一定阈值后粒径反而减小。研究证实分子链构象的调整是形成球形中间相的关键因素，分子链在拉伸过程中发生取向和重排，从而导致球形中间相的形成和尺寸变化[13]。

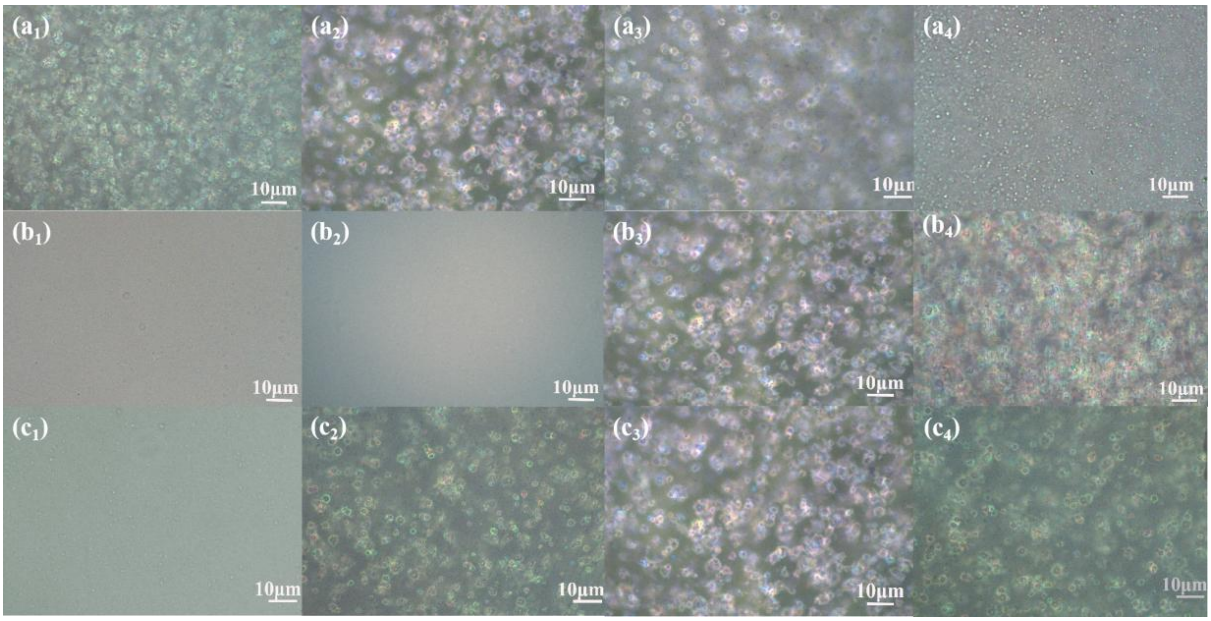


Fig. 4 POM morphology of PLA films (a_1~a_4 represent T65, T70, T75, T80; b_1~b_4 represent B0, B2, B3, B3.5; c_1~c_4 represent V10, V100, V200, V300, respectively)

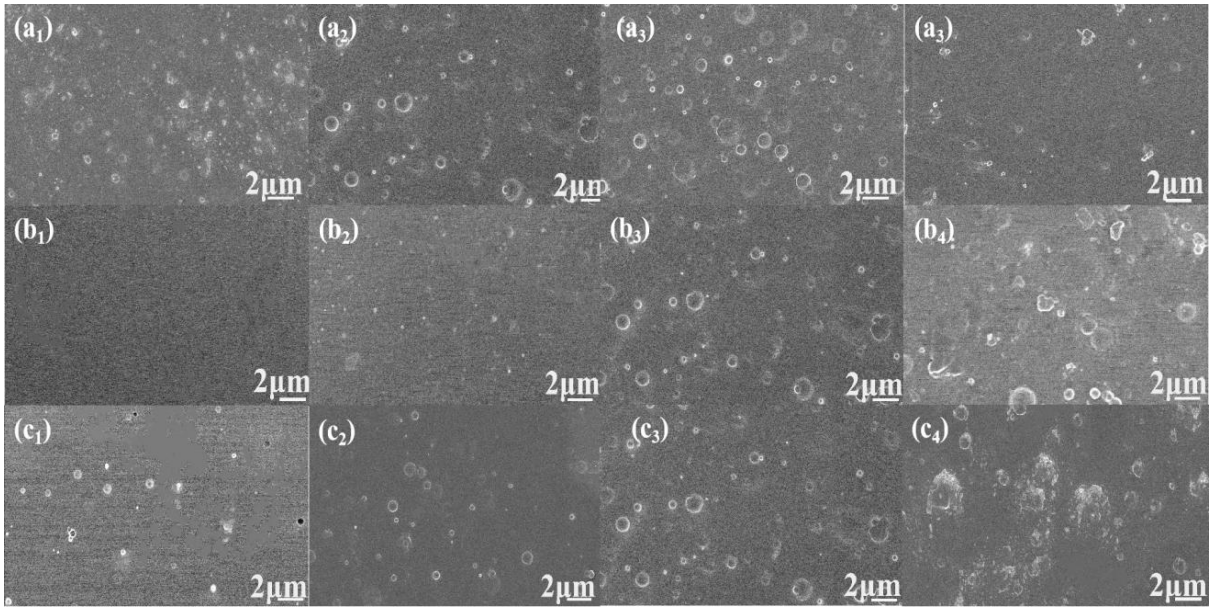


Fig. 5 SEM morphology of PLA films (a_1~a_4 represent T65, T70, T75, T80; b_1~b_4 represent T0, B2, B3, B3.5; c_1~c_4 represent V10, V100, V200, V300, respectively)

2.3 中间相对聚乳酸双向拉伸膜光学性能的影响

聚乳酸的中间相的含量和平均尺寸对薄膜的光学性能具有重要影响。不同拉伸条件制备聚乳酸双向拉伸薄膜的外观如 Fig.6 所示。如 Fig.6(a_1)~(a_4)和 Tab.1 所示，当固定拉伸速 200 mm/s，拉伸倍率为 3×3，随着拉伸温度提高，透明度提高，雾度降低，当拉伸温度小于等于 75℃时制备的薄膜具有珠光效果。当固定拉伸温度为 70℃，随着拉伸速率和拉伸倍率的提高，聚乳酸双向拉伸膜透明度下降，雾度增大，如 Fig.6(b_1)~(b_4)和 Fig.6(c_1)~(c_4)。当中间相尺寸大于 0.22 μm 时，才具有珠光效应。同时，随着中介相平均尺寸增大，含量提高，珠光效果越明显。因此，当拉伸温度大于等于 65 ℃小于 85 ℃，拉伸速率大于等于 1 mm/s，同步双向拉伸几乎不结晶，但均可以形成球形中介相；当拉伸工艺为大于等于 65 ℃小于 85 ℃，拉伸速率大于等于 100 mm/s, 拉伸倍率等于 3×3，双向拉伸聚乳酸流延片才能形成珠光效果。

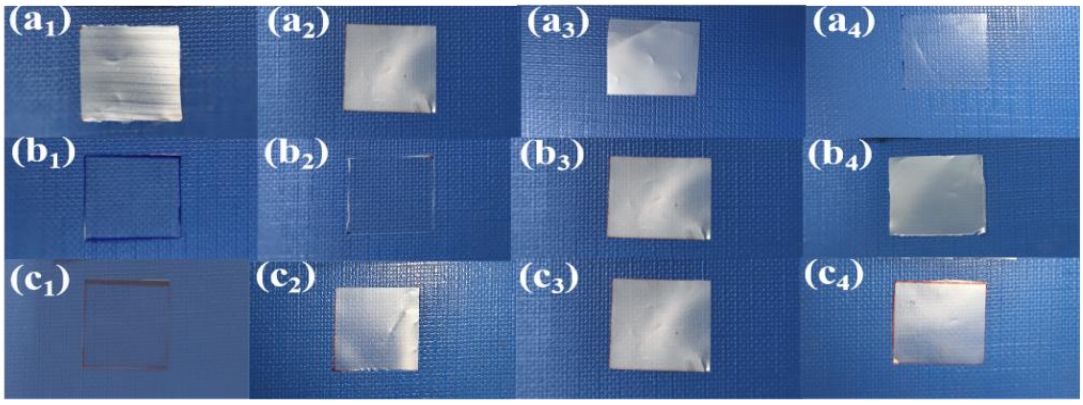


Fig. 6 Appearance of PLA films (a_1~a_4 represent T65, T70, T75, T80; b_1~b_4 represent T0, B2, B3, B3.5; c_1~c_4 represent V10, V100, V200, V300, respectively)

3. 结论

本文通过同步双向拉伸工艺制备了聚乳酸双向拉伸膜，研究了拉伸温度、拉伸倍率和拉伸速率对制备薄膜的中间相含量、形貌、平均尺寸和光学性能的影响规律。研究表明：聚乳酸球形中间相的形成同时受到拉伸温度、拉伸速率和拉伸倍率等多重工艺条件影响，中间相含量与平均尺寸直接影响薄膜的透光率和珠光效果，优化工艺参数可实现薄膜从高透明到显著珠光效果的转变。本文首

次制备出微纳尺寸球形中间相结构，为中间相结构调控聚乳酸光学性能提供了全新的方法，丰富了聚乳酸在中间相改善性能方面的实践依据。

参考文献：

[1] Xiao W, Wu J, Liu X, et al. Developing an efficient biobased nucleating agent with antimicrobial properties by controlling the conformation of poly(lactic acid) based on intermolecular forces[J]. Macromolecules, 2024, 57: 7398-7408.
[2] Baptista C, Azagury A, Baker C M, et al. The characterization and quantification of the induced mesophases of poly-L-lactic acid[J]. Polymer, 2021, 226: 123822-123836.
[3] Strobl G. Colloquium: laws controlling crystallization and melting in bulk polymers[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81: 1287-1300.
[4] Lan Q, Li Y. Mesophase-mediated crystallization of poly(L-lactide): deterministic pathways to nanostructured morphology and superstructure control[J]. Macromolecules, 2016, 49: 7387-7399.
[5] Zhang T, Hu J, Duan Y, et al. Physical aging enhanced mesomorphic structure in melt-quenched poly(L-lactic acid)[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2011, 115: 13835-13841.
[6] Stoclet G, Seguela R, Lefebvre J M, et al. New Insights on the strain-Induced mesophase of poly(D, L-lactide): in situ WAXS and DSC study of the thermo-mechanical stability[J]. Macromolecules, 2010, 43: 7228-7237.
[7] Lv R, Na B, Tian N, et al. Mesophase formation and its thermal transition in the stretched glassy polylactide revealed by infrared spectroscopy[J]. Polymer, 2011, 52: 4979-4984.
[8] Liang Y, Tang H, Zhong G, et al. Formation of poly(L-lactide) mesophase and its chain mobility dependent kinetics[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2014, 32: 1176-1187.
[9] Stoclet G, Seguela R, Lefebvre J M, et al. Strain-induced molecular ordering in polylactide upon uniaxial stretching[J]. Macromolecules, 2010, 43: 1488-1498.
[10] Chen Y, Han L, Ju D, et al. Disentanglement induced by uniaxial pre-stretching as a key factor for toughening poly(-lactic acid) sheets[J]. Polymer, 2018, 140: 47-55.
[11] Luo W, Mi R, Wei Y, et al. Biaxially strain-induced polymer crystallization studied by dynamic Monte Carlo simulations[J]. Polymer, 2024, 300: 126983-126989.
[12] Li M, Chen J, Gong J, et al. Biaxial stretching inducing formation of spherical mesophase of poly(lactic acid) with highly improved strength and toughness[J]. ACS Omega, 2026, 11(6): 10121-10131.
[13] Li M, Chen S, Qiu Y, et al. Tailoring polylactide toughness: synergistic effect of D-isomer content and biaxial stretching on mesophase evolution and toughening mechanism[J]. Materials Today Communications, 2026, 50: 114512.
[14] Li M, Sun W, Chen S, et al. High strain rate biaxial stretching of poly(L-lactide) induces spherical mesophase formation[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2026, 227: e00496.
[15] Cai Y, Liu S, Fang C, et al. Strengthening-toughening pure poly(lactic acid) with ultra-transparency through increasing mesophase promoted by elongational flow field[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 125091-125102.
[16] Ge W, Huang W, Zhang X, et al. Studies on molecular origin of polylactide mesophase and its thermal stability[J]. Polymer, 2025, 14: 128025.

Effects of Biaxial Stretching Process on Mesophase Content and Size as well as Optical Properties of Polylactic Acid Films

Mei Li, Genghao Lin, Jiaxin Liu, Jianchao Gong, Ziyuan Zhang, Sijie Chen, Jiading Lin
(School of Materials, Guangdong Industry Polytechnic University, Guangzhou 510300, China)

ABSTRACT: To investigate the influence of biaxial stretching process on the microstructural evolution and optical properties of polylactic acid (PLA) films, particularly the intrinsic correlation between the mesophase structure and the pearlescent effect, amorphous polylactic acid (PLA) cast sheets were prepared by melt extrusion casting, and biaxially stretched under different conditions to produce PLA films, with unstretched sheets used as controls. The effects of stretching temperature, ratio and rate on the content, morphology, average size, transmittance/haze, and pearlescence of spherical mesophases in PLA films were systematically investigated by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), two-dimension wide-angle diffraction (2D-WAXD), polarized optical

microscopy (POM), scanning electron microscopy (SEM), and light transmittance/haze meters. Results show that when stretched above the glass transition temperature but below 85 °C, increasing the stretch ratio and speed lead to decreased transmittance, increased haze, and the development of a pearlescent effect. Optimal balance between opacity and pearlescence is achieved at 70~80 °C, 200~300 mm/s, and a stretch ratio of 3×3~3.8×3.8, where spherical mesophases are most uniformly distributed with an average size of 0.44~0.83 μm. Higher content and larger average size of the mesophases enhance the pearlescent appearance of the films.

Keywords: polylactic acid; biaxial stretching; mesophase; optical properties; pearlescent effect