

الیاف پلی اتیلن با عملکرد بالا

High Performance Polyethylene Fibers

واحد نوآوری

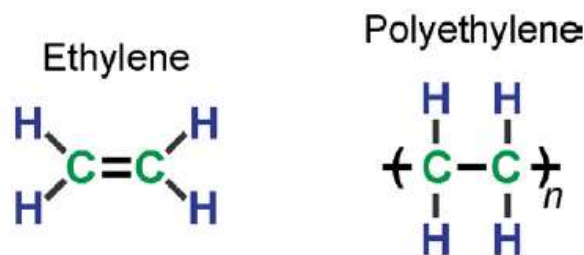
کلمات کلیدی: الیاف پلی اتیلن (PE)، UHMWPE، کشش سرد، ریسندگی سطحی، میکروفیبریل

مقدمه

تحقیقات صورت گرفته بر روی فرآیندهای رسیدن الیاف پلی اتیلن (PE) به هفتمین دهه خود وارد شده است. الیاف ابتدایی ریسیده شده از مذاب مدول الاستیسیته (مدول یانگ) 10-20 GPa و استحکام کششی کمتر از 1GPa نشان می دادند. امروزه، الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا به صورت تجاری در دسترس بوده و به ترتیب مقدار متوسط استحکام کششی و مدول الاستیسیته در حدود 3.7 GPa و 130 GPa در اختیاردارند [1].

پلی اتیلن

پلی اتیلن در دسته‌ای از مواد آلی تحت عنوان پلی‌الفین‌ها قرار می‌گیرند که خود بزرگ‌ترین دسته را در خانواده مواد پلیمری تشکیل می‌دهد. PE به وسیله پلیمریزاسیون مونومرهای اتیلن به روش‌های پلیمریزاسیون رادیکال آزاد یک پروکساید آغازگر، پلیمریزاسیون توسط کاتالیزرهای آلی فلزی، مانند نمونه‌های اولیه شناخته شده توسط زیگلر و ناتا¹ و یا کاتالیزرهای متالوسن² صورت تولید می‌شود [1]. در شکل (1) شماتیک ساختار شیمیایی اتیلن و پلی اتیلن نشان داده شده است [2]. PE های پلیمریزه شده توسط رادیکال‌های آزاد منجر به تولید پلی اتیلن با ساختار منشعب و چگالی پایین³ می‌گردد. حضور مواد بازدارنده تشکیل ساختارهای کریستالی منشعب منجر به تولید مواد با چگالی در محدوده 0.9-0.94 g/cc می‌گردد. PE تولید شده با استفاده از روش پلیمریزاسیون یونی دارای ساختار زنجیر مولکول‌های کربن خطی با سطح کریستالینیتی بالا و چگالی در محدوده 0.94-0.97g/cc هستند. از لحاظ تجاری، به طور کلی به پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE)، PE خطی اطلاق می‌شود. این نوع پلی اتیلن، بیشترین مصرف را در تولید الیاف دارد [1].



شکل 1. شماتیک ساختار شیمیایی اتیلن و پلی اتیلن [2]

با افزایش وزن مولکولی، مقدار استحکام کششی و پایداری حرارتی PE به طور مشهودی افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از افزایش درگیری بین مولکول‌ها و اشتراک گذاری مولکول‌ها در بین ساختارهای کریستالی باشد.

¹ Ziegler and Natta

² metallocene catalysts

³ low density polyethylene (LDPE)

پلی اتیل هایی با وزن مولکولی در محدوده $10^4 - 10^5$ Da¹ در طیف گسترده‌ای از کاربردهای تجاری از ظروف نوشیدنی‌ها تا مواد ساخت کف‌پوش‌ها به کار می‌روند. PE در محدوده وزن مولکولی مفروض می‌تواند در حالت‌های مذاب و جامد و به صورت‌های مختلف پوشش دهی، فیلم، قطعات قالب تزریق و البته الیاف به کار روند. الیاف PE عموماً به صورت مذاب ریخته شده و تحت کشش سرد قرار می‌گیرند تا به بالاترین خواص کششی دست یابد. این نوع الیاف در طناب‌های استحکام بالا و پوشش‌های خارجی چادرها بکار می‌روند. افزون بر این، PE را می‌توان در منسوجات بی‌بافت و اسپان باند² تولیدشده به روش دمش مذاب³ (مورد استفاده در فیلتراسیون و صنایع پوشاک پزشکی) یافت [1].

هنگامی که وزن مولکولی PE از مقدار 1 million Da عبور کند، PE تحت عنوان پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا⁴ شناخته می‌شود. این وزن مولکولی در واقع گرید مواد مصرفی در زمینه بالستیک و کاربردهای نیازمند وزن پایین و استحکام بالا می‌شود. این مواد در فرم بالک⁵ مشخصاتی همچون استحکام شکست فوق‌العاده، مقاومت سایشی خوب، ضریب اصطکاک پایین و مقاومت شیمیایی خوب را دارا هستند. فرایند تولید UHMWPE به دلیل ویسکوزیته بسیار بالای مذاب و نسبت کشش طبیعی⁶ پایین ناشی از افزایش سطح درگیری بین مولکول‌ها بسیار دشوار است. الیاف تجاری UHMWPE با استفاده از یک ژل پوشیده شده در حلال⁷ ریخته می‌شوند و دارای درجه درجه بالای کریستالینیتی و آرایش یافتگی مولکولی در راستای محور لیف‌اند [1, 3]. در این الیاف زنجیر مولکولی می‌تواند حاوی بیش از 200,000 واحد تکراری اتیلن باشد. به بیانی دیگر، هر زنجیر UHMWPE دارای 400,000 اتم کربن است [2]. در جدول (1) مقایسه‌ای بین استحکام الیاف سنتز شده UHMWPE با دیگر انواع الیاف و مواد صورت گرفته است. از اطلاعات ارائه شده می‌توان دریافت الیاف UHMWPE علاوه برداشتن چگالی 8 مرتبه کمتر از فولاد استحکام کششی بالاتری نیز برخوردار است [1].

جدول 1. خواص استحکام الیاف سنتز شده [1].

Materials	Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Density (g/cc)
Steel	~ 2	~ 200	~ 7.75
Mesophase pitch carbon fiber	3.6–3.9	520–880	2.1–2.2
PAN carbon fiber	4.9–6.4	230–294	1.7–1.8
S-Glass	~ 80	~ 4.5	~ 2.5
UHMWPE fibers	2.5–3.7	70–133	0.97
Aramid	3–3.4	70–185	1.44

¹ یکای اندازه‌گیری جرم یک مولکول در واحد اتمی. (Da or u) daltons

² spun-bonded

³ melt blowing

⁴ Ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE)

⁵ bulk

⁶ natural draw ratio

⁷ solvated gel

پلی اتیلن می تواند بر حسب وزن مولکولی و روش سنتز به صورت های پلی اتیلن با چگالی پایین^۱، با چگالی پایین خطی^۲، با چگالی بالا^۳ و پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) تقسیم نمود. نمونه های LDPE و LLDPE دارای وزن مولکولی کمتر از $50,000 \text{ g/mol}$ می باشند. در HDPE مقدار وزن مولکولی به بیش از $200,000 \text{ g/mol}$ در نهایت UHMWPE متوسط وزن مولکولی $6,000,000 \text{ g/mol}$ دارد [2]. در جدول (2) مقایسه ای بین خواص فیزیکی HDPE و UHMWPE صورت گرفته است. می توان دریافت UHMWPE استحکام (مقاومت کششی) نهایی و استحکام ضربه پذیری بالاتری نسبت به HDPE دارد [2].

جدول 2. مقدار متوسط خواص فیزیکی HDPE و UHMWPE [2]

Property	HDPE	UHMWPE
Molecular weight (10^6 g/mol)	0.05–0.25	3.5–7.5
Melting temperature ($^{\circ}\text{C}$)	130–137	132–138
Poisson's ratio	0.40	0.46
Specific gravity	0.952–0.965	0.925–0.945
Tensile modulus of elasticity ^a (GPa)	0.4–4.0	0.5–0.8
Tensile yield strength ^a (MPa)	26–33	21–28
Tensile ultimate strength ^a (MPa)	22–31	39–48
Tensile ultimate elongation ^a (%)	10–1200	350–525
Impact strength, izod ^a (J/m of notch; 3.175-mm thick specimen)	21–214	> 1070 (no break)
Degree of crystallinity (%)	60–80	39–75

^aTesting conducted at 23°C .

فرآیند پردازش UHMWPE

هدف از پردازش هر پلیمری در تبدیل آن به لیف، بهینه سازی ساختار پیش فیلامنت ها یا مورفولوژی آنها به منظور فراهم نمودن خواص مکانیکی مورد نیاز در یک زمینه کاربری خاص است. بدین منظور نیاز به دستیابی به تعادلی بین استحکام کششی، مدول کشش و کرنش شکست وجود دارد. افزون بر این، شش مشخصه کلیدی لیاف

¹ Low-density polyethylene (LDPE)

² low-density polyethylene (LLDPE)

³ High-density polyethylene (HDPE)

در بررسی خواص مکانیکی آن‌ها نیز موثر است. این شش مورد شامل درجه نظم¹، درجه استقرار حوزه‌های نظم یافته²، نسبت طول به عرض واحدهای استقرار یافته، اندازه واحدهای استقرار یافته، درجه آرایش یافتگی و مقدار گستره مولکولی³ است [1].

- درجه نظم: در مورد PE، به کریستالینیتی کلی و کامل شده در لیف اطلاق می‌شود [1].
- درجه استقرار حوزه‌های نظم یافته: نسبت طول به عرض واحدهای استقرار یافته؛ اندازه واحدهای استقرار یافته؛ تمامی این موارد متناسب به مورفولوژی (شکل) و توزیع فضایی کریستال‌ها و حوزه‌های آمورف می‌شود. این موارد در ارتباط با حوزه‌های فازهای آمورف مانند فاز شبه پایدار⁴ و حوزه‌های آمورف محدودشده⁵ نیز صدق می‌کند [1].
- درجه آرایش یافتگی: این میزان بر اساس درجه آرایش یافتگی مولکول‌ها در حوزه‌های فازی مختلف در جهت کشش تعیین می‌شود [1].
- مقدار گستره مولکولی: به مقدار درجه‌ای از مولکول‌های PE اطلاق می‌شود که در راستای محور لیف کشیده شده‌اند [1].

ریسندگی مذاب و کشش

کشش سرد

مولکول‌های PE درجه بالایی از جابجایی مولکولی در هر دو فاز کریستالی و آمورف را در زیر دمای تعادلی ذوب PE (~140°C) دارند. این امر ناشی از امکان‌پذیری القای آرایش یافتگی مولکولی و پخت⁶ در طی کشیدن فیلامنت‌ها و فیلم‌ها در دمای 60°C و یا بالای دمای محیط است [1]. بر این اساس، اولین تحقیقات جدی صورت گرفته در تولید لیاف با مدول بالا با استفاده از ریسیدن PE از مذاب پلیمر و متعاقباً کشش در زیر دمای مذاب در ابتدای دهه 70 میلادی توسط شرکت Ward صورت گرفت [1, 4]. در این فرآیند، فیلامنت‌های PE ریسیده شده و متعاقباً پیش از طی نمودن آزمون استحکام سنجی، تحت کشش در دمای محیط و دمای بالا قرار می‌گیرند. بر همین اساس محققان دریافتند افزایش نسبت کشش از 7 به 13 منجر به افزایش مدول الاستیسیته از 4 تا 20 GPa می‌گردد. این فرآیند تا نسبت کشش طبیعی⁷ ادامه می‌یابد. این نسبت معادل ماکزیمم مقدار ازدیاد طول اعمال‌شده به یک ماده در یک توزیع وزن مولکولی مشخص است. کشش اعمال‌شده حتماً باید در دمای بالا صورت گیرد [1].

کشش گرم

سیستم تولید بر اساس کشش سرد منجر به محدود شدن وزن مولکولی لیاف PE تولیدی به مقدار 10^6 Da می‌گردد. افزایش ویسکوزیته مذاب منجر به افزایش خطی وزن مولکولی می‌شود. با افزایش وزن مولکولی، نسبت

¹ degree of order

² degree of localization of ordered domains

³ molecular extent

⁴ metastable phases

⁵ constrained amorphous domains

⁶ annealing

⁷ natural draw ratio

کشش طبیعی کاهش می‌یابد. به طوری که در فیلامنت UHMWPE با وزن مولکولی بیش از 1 میلیون Da، مقدار نسبت کشش طبیعی، تنها 5 برابر فیلامنت متداول PE خواهد بود. این امر امکان فرآیند کشش سرد به منظور شکل-دهی الیاف را ناممکن می‌کند [1].

در انتهای دهه 80 میلادی، بشیر، اودل و کلر¹ تحقیقات خود را پیرامون امکان‌سنجی کشش مستقیم الیاف و فیلم‌های PE از مذاب به انجام رساندند. بر این اساس، نمونه فیلم PE در محدوده وزن مولکولی 500,000 تا 1 میلیون Da پیش از ناحیه انجماد تحت کشش قرار می‌گیرد. این امر امکان تولید محصولی با مدول الاستیسیته 60-80 GPa و استحکام کششی حدود 1.5 GPa فراهم نمود. افزون بر این، بررسی‌های صورت گرفته حاکی از حضور کریستال‌های فیبری و مورفولوژی شیش-کباب² در الیاف کشیده شده با نسبت بالا می‌باشد. باین حال، این محققین دریافتند کشش فیلم‌های قالب‌گیری و فشرده‌سازی شده در وزن مولکولی بالاتر از 10^6 Da مشکلاتی را به همراه دارد که ناشی از الاستیسیته بالای مذاب بود. درگیری بین مولکولی بسیار بالای ناشی از وزن مولکولی زیاد منجر به ممانعت از نفوذ متقابل³ مولکول‌های UHMWPE بین دانه‌های پودری و نایکنواختی در ساختار می‌شود [1].

ریسندگی از محلول پلیمر

کشش ساختار کریستالی رشد یافته از محلول

تک کریستال‌های PE را می‌توان با استفاده از یک محلول رقیق (معمولاً زایلن⁴ در دمای بالا) رشد داد. PE در یک حلال مانند زایلن و یا دکالین⁵ در دمای بالا حل شده و به طور متوالی تا دمای تعادلی زیر دمای ذوب در محلول خنک می‌شود. پس از سرد شدن، کریستال‌های لاملا PE شکل می‌گیرد و رسوب⁶ تشکیل شده از محلول خارج می‌گردد. کریستال‌های تشکیل شده عموماً نازک، مسطح و به شکل الماس‌اند و شامل چندین لایه زنجیر تاخوردده پلیمری می‌شوند که در جهت ضخامت ساختار کریستالی آرایش یافته‌اند. ضخامت تک ساختار کریستالی PE بر اساس دمای کریستالیزاسیون (T_c) اندازه‌گیری می‌شود [1].

استفاده از روش فوق در دهه 60 میلادی توسط استن و همکاران⁷ صورت گرفت. نتایج حاکی از مدول الاستیسیته برابر 10 GPa و استحکام کششی 0.67 GPa بود. توسعه این روش منجر به دستیابی الیاف UHMWPE با مدول الاستیسیته 100 برابری و معادل 160 GPa گردید. باین حال یکی از بزرگ‌ترین محدودیت‌های این روش، عدم امکان تولید در مقیاس بالا می‌باشد [1].

روش ریسندگی سطحی⁸

در انتهای دهه 60 میلادی، پنینگز و همکاران¹ دریافتند اگر محلول پلیمری پیوسته هم زده شود، کریستالیزاسیون PE می‌تواند در دمای بالاتر از دمای شکل‌گیری زنجیرهای تاخوردده تک کریستال‌های لاملا PE

¹ Bashir, Odell, and Keller

² shish-kebab

³ interdiffusion

⁴ xylene

⁵ decalin

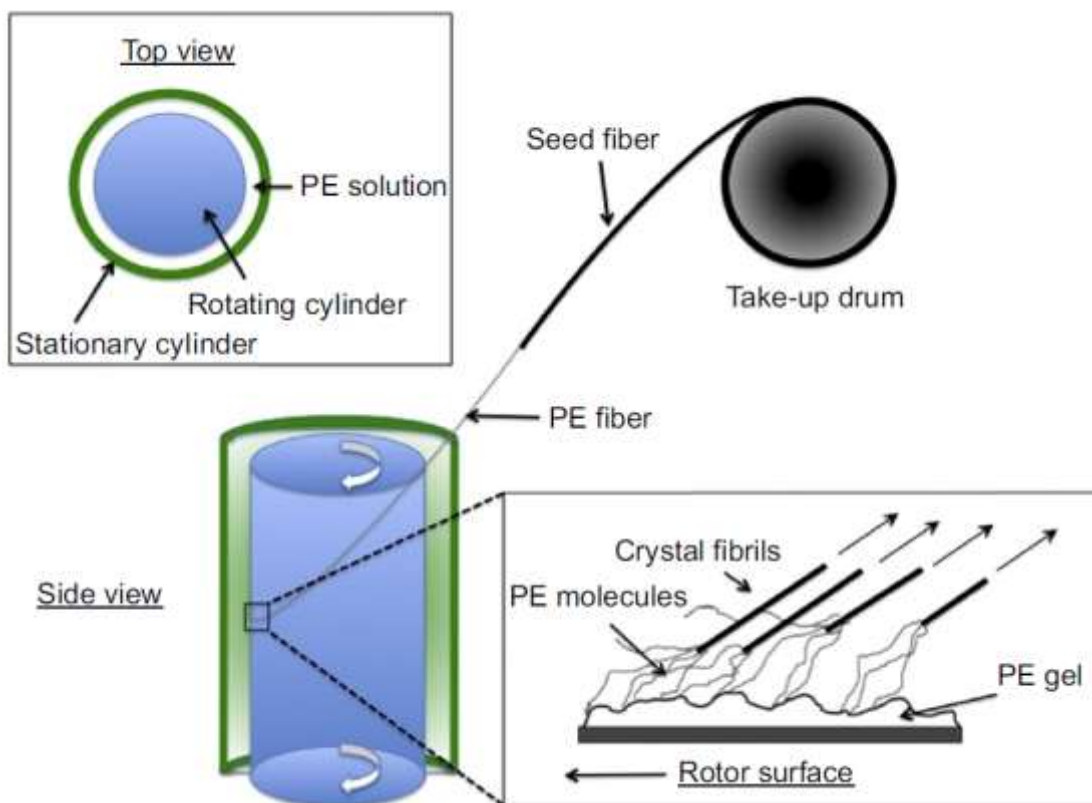
⁶ Precipitation

⁷ Statton and coworkers

⁸ Surface spinning

صورت گیرد و امکان تشکیل یک جریان کششی^۲ از پلیمر وجود خواهد داشت. هم زدن منجر به افزایش وزن مولکولی و کاهش موانع هسته گذاری کریستال‌ها می‌گردد. کریستال‌هایی که در این روش تشکیل می‌شوند دارای قطری در محدوده 100 Å تا 1 μm هستند [1].

تکنیک تولید الیاف به روش ریسندهی سطحی شامل شکل‌گیری یک جریان کششی در محلول PE در فضای خالی بین دو سیلندر متحدالمرکز است (شکل 2). به طوری که سیلندر داخلی چرخیده و سیلندر خارجی ثابت قرار می‌گیرد. یک فیلامنت به‌عنوان هسته اولیه وارد محلول شده و در خلاف جهت گردش سیلندر داخلی از محلول خارج می‌گردد. انتهای فیلامنت هسته گذار با سطح چرخان سیلندر تماس می‌یابد و در حین خروج تعدادی از کریستال‌های فیبروس^۳ PE را که در محدوده جریان رشد یافته‌اند را نیز خارج می‌کند. این روش توسط برهام و کلر^۴ توسعه یافت و امکان تولید فیلامنت پیوسته از کریستال فیبروس PE فراهم گردید. فیلامنت‌های UHMWPE تولیدی دارای مدول الاستیسیته برابر 150 GPa و استحکام کششی 4.5 GPa می‌باشند. تحقیقات برهام و کلر منجر به دستیابی به روشی گردید که امروزه تحت عنوان روش ژل ریسی شناخته می‌شود [1].



شکل 2. شماتیک تولید الیاف به روش ریسندهی سطحی. محلول پلیمری در فاصله گپ بین دو سیلندر تحت تنش برشی قرار می‌گیرد. جریان کششی در سطح سیلندر چرخان تشکیل می‌شود. این جریان منجر به شکل‌گیری یک ژل از مولکول‌های PE با سطح درگیری بین زنجیرهای مولکولی پایین می‌گردد. با ورود فیلامنت هسته گذار و تماس با سطح چرخان، دسته‌ای از فیبریل‌های کریستالی را از ژل خارج می‌کند [1].

¹ Pennings and coworkers

² extensional flow

³ fibrous

⁴ Barham and Keller

ژل ریزی الیاف UHMWPE

شکل گیری ژل ریسندگی بر اساس افزایش وزن مولکولی و غلظت پلیمر در محلول صورت می گیرد. استفاده از ژل به عنوان پیش ماده به دلیل کاهش محدودیت های توپولوژیکی (مانند درگیری بین زنجیرهای مولکولی تحت شرایط ذوب ریزی) یکی از روش های ایده آل در تولید این الیاف محسوب می شود. در این روش، حلال به عنوان روان کننده¹ در سیستم عمل می کند. ساختارهای متداول قابل رویت در ژل شامل میسل، فیروز، کریستال و کریستال های متشکل از زنجیرهای تاخورد هستند. در رابطه با ژل پلی اتیلن تنها ساختار میسل دیده نمی شود.

به منظور ریسندگی ابتدا ژل طبق روش ریسندگی سطحی اکستروود شده و با عبور از یک حمام انعقاد کشیده می شود. این گام اولیه منجر به شکل دهی به لیف و آرایش یافتگی اولیه زنجیرها تحت تنش اعمال شده در حین خروج از روزنه رشته ساز می شود. پس از خروج از حمام انعقاد، لیف متعاقباً حرارت داده شده و کشیده می شود. این مرحله به منظور توسعه ساختارهای مزو/نانو/کریستالوگرافیک بسیار مهم است. بر این اساس، ساختارهای نانو و مزو به ترتیب به طول های $10 - 100 \text{ nm}$ و $10^3 \text{ nm} - 10$ نسبت داده می شوند. دمای بهینه کشش PE معادل 110°C است. این دما به مولکول های PE اجازه می دهد در فاز کریستالی تحت فرآیند استراحت² قرار گرفته و با فراهم نمودن امکان کاهش درگیری بین زنجیرهای لاملا تاخورد در ساختارهای کریستالی، اجازه رشد مورفولوژی های فیروز را دهد. مهم ترین نکته در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، نسبت کشش است. نسبت کشش بالاتر منجر به افزایش آرایش یافتگی مولکول ها و کریستال ها می گردد [1].

ساختار سلسله مراتبی³ الیاف پلی اتیلن با عملکرد بالا

میکروفیبریل ها

یکی از عوامل تأثیرگذار بر خواص مکانیکی UHMWPE تشکیل ساختار کریستالی فیروز شیش-کباب است. کاوش و پرورسک⁴ این ساختار سلسله مراتبی حاصل از ژل ریزی الیاف UHMWPE را به عنوان ساختمان اصلی سازنده این الیاف معرفی و میکروفیبریل نام گذاری نمودند. میکروفیبریل های مجتمع شده تشکیل دسته های ماکروفیبریل می دهند، که در نهایت ساختار یک تک فیلامنت حاصل می گردد [1].

مطالعات صورت گرفته در سال 1995 توسط محققین، تصویری از نحوه تشکیل پیوندهای داخلی بین حوزه های کریستالی با مولکول های فشرده شده و نظم یافته در فاز میانی میکروفیبریل ارائه نمود. با این حال، نحوه جایگیری این میکروفیبریل ها در کنار یکدیگر در دسته های بزرگ و همچنین سازوکار انتقال نیرو در بین فیبریل ها همچنان مبهم بود. یکی از تئوری های مطرح شده توسط لیتوینوف⁵، عامل کشش در دمای بالا بود. این امر می تواند منجر به الحاق میکروفیبریل های کوچک تر در قالب یک زنجیر کریستالی بزرگ تر شود. بشیر و همکاران شواهدی را ارائه نمودند مبنی بر اینکه تحت شرایط خاص، میکروفیبریل ها با زنجیرهای کریستالی تا شده، تشکیل پیوند می دهند تا ساختاری

¹ plasticizer

² relaxation

³ Hierarchical structure

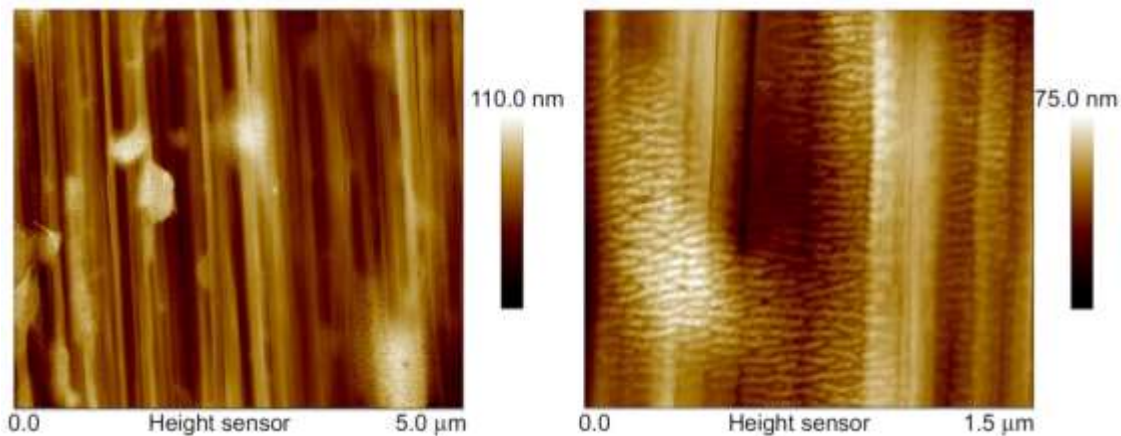
⁴ Kavesh and Prevorsek

⁵ Litvinov

به صورت شیش کباب تشکیل گردد. در نمونه دیگر، برهام و کلر بیان اظهار نمودند که در حالتی که فاصله بین میکروفیبریل (شیش)ها بسیار کم باشد تا کریستال‌های زنجیرهای تاخوردده رشد یابند، میکروفیبریل‌ها به صورت جمع شده و فشرده شده در کنار یکدیگر ظاهر می‌شوند تا ظاهری تحت عنوان 'hair dressing' به خود گیرند [1].

ساختار هم‌بافتی¹

لیف ژل ریسی شده ابتدایی از کریستال‌های لاملا حاوی زنجیرهای تاخوردده و یا کریستال‌های شیش کباب با صفحه‌های کباب بزرگ ساخته شده است. هنگامی که این فیلامنت‌ها تحت کشش در دمای بالا قرار می‌گیرند، لاملا زنجیرهای تا شده شروع به کاهش اندازه و مقدار نموده و تبدیل به میکروفیبریل‌ها و یا شیش‌ها می‌شود. با این حال، مطالعات صورت گرفته توسط مک دنیلز² و همکاران نشان از وجود ساختارهای هم‌بافتی در سطح الیاف UHMWPE تجاری تحت کشش بالا می‌داد. در شکل (3) می‌توان دسته‌های بزرگ از ساختارهای هم‌بافتی گسترش یافته در راستای طول لیف مشاهده نمود. مک دنیلز مشاهده نمود در صورت اعمال فرآیند پخت در دمای بالاتر از 130°C بر روی این الیاف، ساختارهایی هم‌بافتی ضخیم‌تری به نسبت نمونه‌های مذاب متشکل از مواد با وزن مولکولی کم تشکیل می‌شود [1].



شکل 3. ساختارهای هم‌بافتی و فیبریلی بر روی سطح یک نمونه لیف PE با عملکرد بالا (لیف S130). بزرگ‌نمایی در مقیاس 5 μm (سمت چپ) و 1.5 μm (سمت راست) نشان از حوزه‌های بزرگی از ساختارهای هم‌بافتی دارد [1].

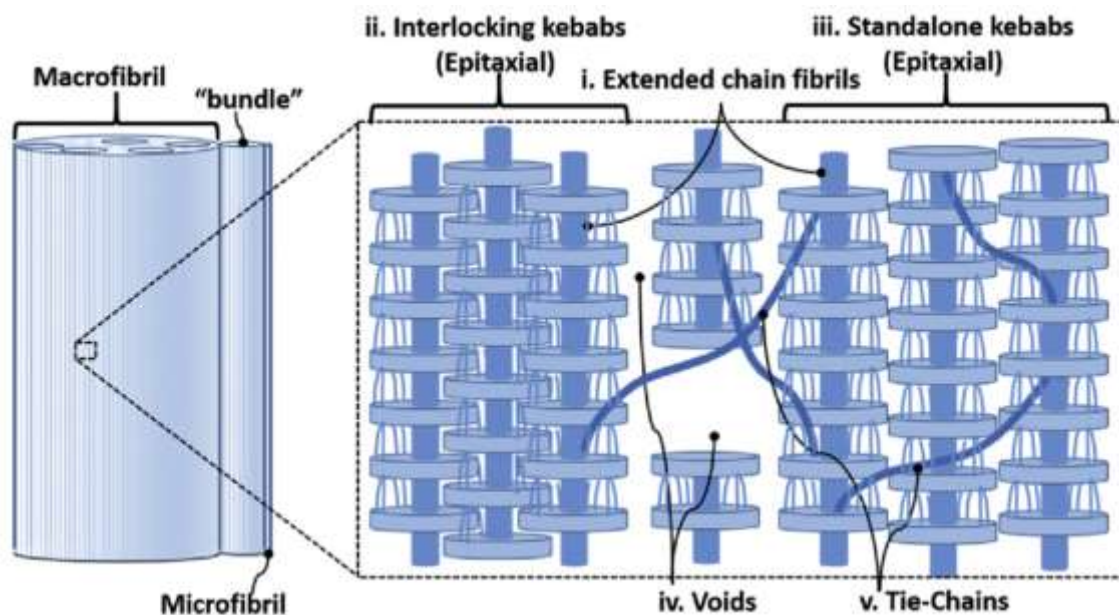
حفرات

فرآیند ژل ریسی UHMWPE مبتنی بر تبخیر حلال است حین فرآیند کشش است. این امر منجر به تشکیل تعداد قابل توجهی حفره در ساختار الیاف می‌گردد. این حفرات می‌توانند قطری در حدود 100 nm و طولی کمتر از 1 μm داشته باشند. بررسی‌های لیتوگرافی و همکاران نشان داد، در مقادیر کشش فوق‌العاده بالا نیز در اثر شکست کریستال‌های PE حفراتی در مقیاس نانو شروع به تشکیل و رشد می‌نمایند. این حفرات هتروژن در مقیاس مزو می‌توانند بر روی خواص مکانیکی الیاف تأثیر گذار باشند [1].

¹ Epitaxial structures

² McDaniels

در شکل (4) شماتیک از ساختار الیاف HHMWPE ارائه شده است. بر این اساس، بخش (i) نشانگر میکروفیبریل‌های زنجیر امتداد یافته (شیش) است که معمولاً به صورت در هم قفل شده (ii) و به صورت ساختارهای کریستالی مستقل هم‌بافتی¹ (و یا کباب) (iii) در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. کباب‌ها با موادی شبه آمورف (مولکول‌های رابط² بین شیش-کباب‌ها) به یکدیگر متصل می‌شوند. میکروفیبریل‌ها و یا کلاف‌های میکروفیبریل‌ها به وسیله حفره‌ها (iv) و یا سطح مشترک بین فیبریل‌ها و اغلب با زنجیرهای رابط (v) که از میان حفره‌ها عبور می‌کنند، از یکدیگر جدا می‌شود [5].



شکل 4. مورفولوژی UHMWPE: میکروفیبریل‌ها می‌توانند به صورت کلاف³ در کنار یکدیگر قرار گیرند (سمت چپ). جزئیات (سمت راست) شامل (i) فیبریل‌های زنجیر امتداد یافته (شیش)، (ii) در هم قفل شده و (iii) کریستال‌های هم‌بافتی مستقل (کباب)، (iv) حفره‌ها، و (v) زنجیرهای رابط اند. کریستال‌های هم‌بافتی (دیسک‌های آبی روشن) در راستای محور به فیبریل‌های زنجیر امتداد یافته (ستون‌های آبی پر رنگ) متصل‌اند و با مولکول‌های رابط بین شیش-کباب‌ها در مواد شبه آمورف (خطوط آبی و روشن بارب) نیز در ارتباط قرار دارند [5].

کاربردهای الیاف HPPE

الیاف HPPE در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های تجاری کاربرد دارند. این امر از وزن بسیار پایین، استحکام فوق‌العاده بالا، سفتی و پایداری آن‌ها نشأت می‌گیرد [1]. الیاف ژل ریزی شده PE اولین حضور خود را در بازارهای مصرف از سال 1985 آغاز نمودند. در اولین دهه، عمده مصرف آن‌ها در حفاظت بالستیک، طناب دریایی و حوزه سرگرمی اختصاص می‌یافت. با این حال، تغییر شکل و خزش این الیاف در اثر کارکرد طولانی مدت منجر به محدود شدن کاربرد آن‌ها در تولید طناب‌ها و کابل‌ها گردید [4].

¹ epitaxial crystals

² tie molecules

³ bundle

مهم‌ترین دلیل استفاده از الیاف UHMWPE ژل ریزی شده، استحکام مخصوص و مدول بالا، چگالی کم، ظرفیت جذب انرژی بالا (حفاظت بالستیک، کامپوزیت‌ها)، انتقال صدای بالا (حفاظت بالستیک و بلندگوها)، ضربه-گیر (ابزار ورزشی، کامپوزیت‌ها)، انعطاف‌پذیری (طناب‌ها، تورها، پوشاک، کفش‌ها) کشیدگی پایین (طناب‌های ماهیگیری، بادبان‌ها)، مقاومت پارگی (لباس‌های محافظ، دستکش‌ها)، خواص دی‌الکتریک (آنتن پوش¹)، خواص فوق سرد² (تانکرها) و پایداری شیمیایی آن‌ها است. در شکل (5) برخی از کاربردهای این الیاف نشان داده شده است [4].



شکل 5. الیاف UHMWPE به کاررفته در طناب‌های دریایی، تور ماهیگیری، دستکش و پوشش‌های حفاظتی [4]

منابع

- [1] Bhat, G., Structure and properties of high-performance fibers. 2016: Woodhead Publishing.
- [2] Kurtz, S.M., Ultra high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices. UHMWPE Biomaterials Handbook, 2nd edn. Academic Press, New York, 2009.
- [3] Park, J.H. and G.C. Rutledge, Ultrafine high performance polyethylene fibers. Journal of materials science, 2018. 53(4): p. 3049-3063.
- [4] Peijs, T., High Performance Polyethylene Fibers. 2017.
- [5] Strawhecker, K.E., et al., Interior morphology of high-performance polyethylene fibers revealed by modulus mapping. Polymer, 2016. 103: p. 224-232.

¹ radomes

² cryogenic