نانو تکنولوژی

مروری بر الیاف تغییر فازدهنده فوق العاده ظریف الکتروریسی شده برای ذخیره انرژی گرمایی

مترجمین: محسن محمدی[1] | زهرا یوسفی[2]

چکیده

در طی ۳۰ سال گذشته، الیاف تغییر فازدهنده PCFها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند و به عنوان پارچه‌های غیربافتنی و پوشش‌های با کیفیت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان یک ماده تمیز و تجدیدپذیر موثر در آینده، PCFها در مقیاس میکرو به‌وسیله ریسندگی مذاب/مرطوب برای استفاده در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) و تنظیم دما به طور موفقیت آمیزی تهیه شده‌اند. با توسعه فناوری‌های تولید الیاف، به عنوان مثال الکتروریسی، PCFهای فوق‌العاده ظریف در دهه گذشته مورد استفاده و بررسی قرار گرفته‌اند. این مقاله وضعیت تحقیقات و تحولات PCFها در مقیاس زیر میکرو را از سال ۲۰۰۶ به روش الکتروریسی بررسی می‌کند.

PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده به صورت جداگانه‌ای با استفاده از هیدروکربن‌های آلیفاتیک بلند (و واکس‌های پارافین)، پلی اتیلن گلیکول، اسیدهای چرب (و اوتکتیک آنها) و سایر مواد جامد-مایع تغییر فازدهنده (PCM) به عنوان جزء ذخیره‌سازی گرمای نهان (LHS) بررسی شده است. ارتباط بین مورفولوژی، ترکیب درصد و خواص حرارتی برای ارائه راهنمایی برای ساخت PCF فوق‌العاده مناسب با خواص ترموفیزیکی مورد نظر برای کاربردهای مختلف مورد بحث قرار گرفته است. چالش‌ها و دست یافت‌های بیشتر PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده برای ذخیرهٔ انرژی گرمایی (TES) و کاربردهای دیگر نیز مورد بحث قرار گرفته است.

معرفی

انرژی گرمایی یکی از موثرترین انرژی‌های تمیز و تجدیدپذیر در آینده است زیرا هر روز از گازهای اتلافی صنعتی و تابش خورشیدی به طور آزاد در دسترس است. با افزایش مصرف انرژی جهانی، نیاز به تحقیق در مورد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) در مناطق بحرانی وجود دارد. TES یک فناوری است که انرژی حرارتی مازاد را به‌وسیله‌ی یک محیط مناسب حفظ می‌کند تا انرژی ذخیره شده را بتوان در آینده و در یک عملیات معین دوباره استفاده کرد. TES نه تنها برای رفع عدم تناسب بین عرضه و تقاضای انرژی در فضا و زمان مفید است، بلکه عمدتاً بهره‌وری انرژی در تولیدات صنعتی و گسترش منابع انرژی از طبیعت را افزایش می‌دهد.

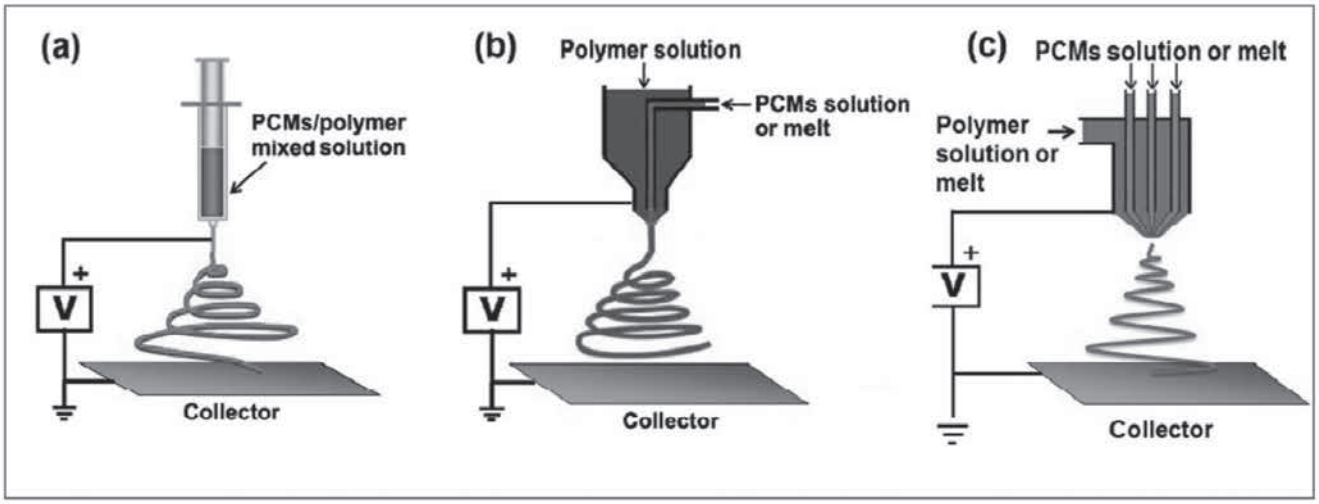
به‌طور کلی، انرژی حرارتی را می‌توان در انواع مختلف درجه حرارت با سه طریق اصلی ذخیره کرد؛ ذخیره گرمای محسوس (SHS) به‌وسیله‌ی گرم کردن یک رسانای مایع یا جامد (به عنوان مثال، آب، روغن معدنی، نمک‌های مذاب، شن و ماسه، سنگ‌ها و بتن)، ذخیره‌سازی گرمای نهان (LHS) با استفاده از PCMها و ذخیره گرمای ترموشیمیایی به‌وسیله‌ی واکنش‌های شیمیایی.

در این میان، فناوری LHS با استفاده از مواد تغییر فازدهنده PCMها رقابتی‌ترین شکل به علت مزایای آن از جمله چگالی زیاد ذخیره انرژی، نوسان دمایی اندک در طی فرایند ذخیره‌سازی حرارت، هزینه کم، پایداری شیمیایی و غیرخورندگی است.

PCMها همچنین به عنوان مواد LHS نامیده می‌شوند، زیرا می‌توانند در طول فرآیند ذوب، انرژی گرمایی را به صورت «گرمای نهان ذوب» جذب کنند. انواع PCMهای جامد-مایع معدنی (مانند هیدرات‌های نمکی، فلزات و آلیاژهای فلزی و غیره) و PCMهای جامد- مایع آلی (مانند هیدروکربن‌های آلیفاتیک بلند و واکس‌های پارافین، اسیدهای چرب/ الکل‌ها/ استرها و اوتکتیک‌های آن‌ها، پلی‌ال‌ها و غیره) به طور گسترده‌ای موردمطالعه قرار گرفته و برای TES برای چندین دهه مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور جلوگیری از جریان و نشت PCMهای مذاب، PCMهای شکل-پایدار به‌خاطر مزایای جذابشان مانند استفاده مستقیم بدون کپسوله سازی، مقرون به صرفه بودن و راحتی تهیه شدن در ابعاد مطلوب، توسعه یافته‌اند. به طور کلی، PCM شکل-پایدار معمولی، از ماده پشتیبانی‌کننده (مواد معدنی یا پلیمرهای متخلخل /لایه‌ای) و جزء ذخیره‌سازی گرمای نهان (از جمله PCM های جامد-مایع) تشکیل شده است.

PCMهای پایدار لیفی شکل، فیبرهای تغییر فازدهنده (PCFs) در سه دهه گذشته، برای علاقه‌مندان به استفاده از پارچه‌ها و لباس‌های هوشمند، علائق



شکل ۱: شبیه‌سازی تنظیم برای (a) الکتروریسی یک‌طرفه، (b) الکتروریسی متحدالمرکز و (c) الکتروریسی چندسیالی با چندین رشته‌ساز

علمی و صنعتی را به خود جلب کرده‌اند. PCFهای سنتی چند میکرومتری به‌وسیله‌ی چندین روش از قبیل پرکردن، پوشش‌دهی و ریسندگی تر/ مذاب آماده می‌شوند.

در دو دهه گذشته، الکتروریسی به طور گسترده‌ای به عنوان یک روش نسبتا ساده، راحت و تطبیق‌پذیر برای تولید الیاف فوق‌العاده ظریف مورد مطالعه قرار گرفته است.

از سال ۲۰۰۶، الکتروریسی برای ساخت PCFهای فوق‌العاده ظریف به عنوان پارچه‌هایی با کارایی بالا برای TES معرفی شده است. سپس با استفاده از روش الکتروریسی، PCFهای مختلف فوق‌العاده ظریف (زیر مقیاس میکرو) با مورفولوژی، ساختار و خواص قابل کنترل، گزارش شده است.

در حالی که مقالات مروری بسیاری راجع به PCMهای شکل–پایدار در دسترس هستند، اما هیچ مروری در خصوص PCF فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده در منابع تا به امروز وجود ندارد. مرور حاضر، مطالعات اصلی PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده از سال ۲۰۰۶ را خلاصه می‌کند و هدف آن ارائه راهنمایی به هنگام برای سنتز PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده با مورفولوژی مورد نظر و خواص حرارتی است.

در این مرور، ابتدا روش‌های مختلف الکتروریسی برای به دست آوردن PCFهای بسیار ظریف به طور خلاصه در بخش ۲ بحث شده است. سپس، مورفولوژی الیاف، خواص حرارتی، از جمله دما و آنتالپی انتقال فاز و وابستگی آن‌ها به ترکیبات الیاف مورد بررسی قرار می‌گیرند و در بخش‌های ۳ تا ۶ برای هر یک از انواع مختلف PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده ارزیابی می‌شوند. در نهایت، در بخش ۷، چالش‌های آینده و فرصت‌های استفاده گسترده‌تر از PCF های بسیار ظریف الکتروریسی شده برای TES و سایر برنامه‌های کاربردی مورد بحث قرار می‌گیرد.

الکتروریسی؛ روشی برای به دست آوردن PCFهای فوق‌العاده ظریف

الکتروریسی در حال حاضر تنها روشی است که قادر به تولید الیاف فوق‌العاده ظریف پیوسته با قطر بین چند میکرومتر تا ده نانومتر است. به تازگی، الکتروریسی با توجه به توانایی منحصربه‌فردش در ساخت الیاف بسیار ریز از مواد مختلف (از جمله پلیمرهای طبیعی و مصنوعی، آلیاژهای پلیمری و پلیمرهای پرشده با نانوذرات، دارو و یا عوامل فعال) علاقه‌ی چشمگیری را هم در دانشگاه و هم در صنعت، در تولیدات لیفی متنوع جلب کرده است. الیاف الکتروریسی شده را با توجه به اندازه بسیار ریز، مورفولوژی قابل کنترل و مساحت سطح ویژه بزرگشان، می‌توان در زمینه‌های متعددی مثل مهندسی نساجی، انتقال دارو، اپتوالکترونیک، سنسور، کاتالیز، فیلتراسیون، مهندسی محیط زیست، سلول‌های خورشیدی و باتری‌های لیتیومی به کار گرفت.

مورفولوژی‌ها و ساختارهای مطلوب الیاف الکتروریسی شده می‌توانند به‌وسیله‌ی روش‌های ساخت (یا دستگاه و تنظیمات الکتروریسی) تحت تأثیر قرار گیرند. به طور کلی، سه نوع تنظیم الکتروریسی مورد استفاده در ساخت PCFها وجود دارد (نشان داده شده در شکل ۱): الکتروریسی تک محوره، الکتروریسی هم محور محلول–محلول یا محلول–مذاب و الکتروریسی جت–آمیزه چند سیالی. مزایا و معایب سه روش الکتروریسی در جدول ۱ خلاصه شده است.

الکتروریسی تک محوره رایج‌ترین روش برای ساخت PCFهای فوق‌العاده ظریف به علت تنظیمات ساده الکتروریسی و شرایط عملیاتی بسیار قابل کنترل است (شکل 1a). معمولا یک محلول همگن از پلیمر/PCMهای مخلوط شده را با نسبت مناسب در ابتدا به‌وسیله‌ی پلیمر و PCMهای جامد–مایع تهیه می‌کنند که همزمان در یک سیستم حلال یکسان حل می‌شوند. پس از آن، PCF های فوق‌العاده ظریف حاوی انواع و مقادیر مختلف از PCMها با الکتروریسی تک محوره به دست می‌آیند. وقتی که PCMها و پلیمرها نمی‌توانند در یک سیستم حلال حل شوند، الکتروریسی امولسیونی تک نازل برای تهیه PCF های فوق‌العاده ظریف، نیز استفاده می‌شود. سیستم حلال و نسبت جرمی پلیمر/ PCMها عوامل کلیدی برای تأثیر مورفولوژی و خواص حرارتی PCFهای فوق‌العاده ظریف هستند.

ساختن الکتروریسی هم–محور به‌وسیله‌ی یک لوله مویین داخلی برای بارگیری

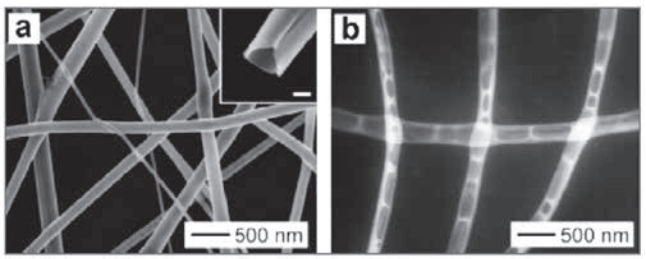
جدول ۱- مزایا و معایب سه روش الکتروریسی

فرآیند الکتروریسی	مزایا	معایب
الکتروریسی تک محوره	■دارای نصب بسیار ساده و فرآیند الکتروریسی پایدار است. ■قادر به دریافت PCFهایی با مقادیر زیاد PCM است. ■قابل‌استفاده برای PCMهایی با درجه حرارت ذوب متفاوت است. ■کنترل مقادیر PCM راحت است.	■کپسوله کردن PCMها کامل نیست به علت اینکه برخی از PCMها روی سطح PCFها توزیع می‌شوند.
الکتروریسی هم محور	■دارای امکان کپسول کردن کامل PCMها در PCFها ■قادر به به‌دست آوردن PCFهایی که در آن‌ها، پلیمرها و PCMها در یک حلال یکسان حل نمی‌شوند.	■مقدار PCMها در PCFها بسیار کم است. ■فرآیند الکتروریسی گاهی اوقات ناپایدار است.
الکتروریسی چندمنظوره	■دارای امکان کپسول کردن کامل PCMها در PCFها ■قادر به به‌دست آوردن PCFهایی با نقاط انتقال فازی مختلف.	■دارای تنظیم نسبتاً پیچیده و فرآیند الکتروریسی ناپایدار است. ■مقدار PCMها در PCFها بسیار کم است.

محلول یا مذاب (PCMs) هسته و یک نخ‌ریس خارجی برای بارگیری محلول پوسته یا پوشش[۱۰] (پلیمر) (شکل 1b و c بنا می‌شود. یکی از ویژگی‌های برجسته PCFهای فوق‌العاده ظریف به‌وسیله‌ی الکتروریسی هم محور این است که آن‌ها ساختاری هسته–پوسته دارند. در مقایسه با الکتروریسی تک محوره، PCMها می‌توانند در داخل PCFها به طور کامل از طریق الکتروریسی هم محور، کپسوله شوند. علاوه‌بر این، محلول/مذاب PCMهای هسته و پوسته محلول پلیمر به‌طور جداگانه تهیه می‌شوند، بنابراین ترکیب PCMها و پلیمرها هیچ محدودیت سختی در PCFهای کامپوزیتی ندارند. الکتروریسی چندسیالی با نخ‌ریس‌های چندگانه عموماً به عنوان ترقی الکتروریسی هم‌محور دیده می‌شود. ویژگی این روش این است که دو یا چند محلول PCMهای جامد–مایع به عنوان محلول هسته مورد استفاده قرار می‌گیرند.

دو ضعف رایج برای الکتروریسی هم‌محور و الکتروریسی چندسیالی وجود دارد: الف) تنظیمات و فرایند فناورانه آن‌ها در مقایسه با الکتروریسی تک محوره بسیار پیچیده است که این منجر به مورفولوژی و خصوصیات حرارتی ناپایدار PCFها می‌شود؛ (ب) محتوای PCMهای جامد–مایع که در PCFها کپسوله شده‌اند بسیار کم است، که باعث ایجاد آنتالپی‌های انتقال فازی کم PCFها می‌شود.

همانند بسیاری از PCMهای شکل پایدار، تمام PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده به طور عمده متشکل از دو بخش گزارش شده‌اند: PCM جامد–مایع به عنوان یک جزء LHS و پلیمرهای قابل الکتروریسی به عنوان یک الگوی فیبردار و ماتریس پشتیبان. بیشتر مطالعات نشان دادند که خواص



شکل ۲. نانوالیاف اکتادکان/ TiO_2- PVP الکتروریسی شده به‌وسیله یک نخ‌ریس هم محور مذاب: (a) تصویر SEM ازنانوالیاف اکتادکان/ TiO_2-PVP با ۴۵ درصد وزنی از مواد اکتادکان. (b) تصویر TEM از این الیاف پس از حذف اکتادکان به‌وسیله غوطه‌ورشدن در هگزان برای ۲۴ ساعت. نوار مقیاس در شکل، ۱۰۰ نانومتر است.

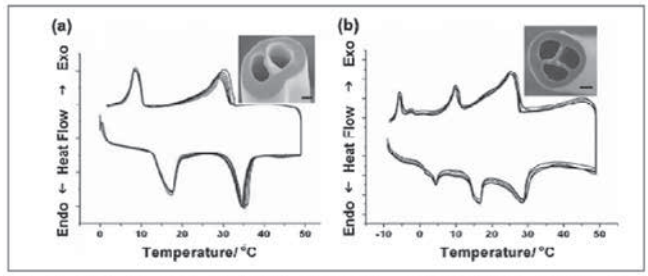
حرارتی مانند آنتالپی‌های انتقال فاز (ΔH_m و ΔH_c) و دماهای انتقال فاز (T_m و T_c) PCFهای فوق‌العاده ظریف به شدت به انواع و کسر وزنی PCM های مورد استفاده بستگی دارند. بنابراین، در این مقاله، PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده بر اساس انواع PCMهای جامد–مایع درون PCFها طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین، مورفولوژی و ویژگی‌های حرارتی هر نوع PCF فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده مورد بحث قرار گرفته است.

PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده بر اساس هیدروکربن‌های آلیفاتیک بلند و واکس‌های پارافینی به عنوان جزء LHS

هیدروکربن‌های آلیفاتیک زنجیره‌بلند (مانند دودکان، تترادکان، هگزادکان، اکتادیکن و ایکوزان) و واکس‌های پارافینی یکی از مهم‌ترین PCMهای جامد–مایع برای TES هستند که به علت گرمای نهان بالا، پایداری شیمیایی و حرارتی خوب، بدون خورندگی و هزینه کم، اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که پیدا کردن سیستم حلال مناسب برای تهیه محلول همگنی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک زنجیره‌بلند (یا واکس‌های پارافینی) /پلیمر دشوار است، الکتروریسی هم محور اغلب برای ساخت PCFهای فوق‌العاده ظریف که حاوی هیدروکربن‌های آلیفاتیک زنجیره‌بلند (یا واکس‌های پارافین) هستند، استفاده می‌شود.

گروه Xia در ابتدا نانوفیبرهای تغییر فازدهنده با ساختارهای هسته–پوسته را به‌وسیله‌ی الکتروریسی هم محور محلول–مذاب در سال ۲۰۰۶ گزارش کردند. هگزادکان، اکتادکان و ایکوزان به عنوان ماده PCM و هسته به صورت جداگانه انتخاب شده و کامپوزیت TiO_2/PVP به عنوان مواد پوسته پشتیبان در PCF های الکتروریسی شده استفاده شد. نتایج نشان داده است که قطر متوسط PCF ها برابر ۱۵۰ نانومتر است و PCM نواحی کشیده شده‌ای را در امتداد محور طولی لیف تشکیل دادند (نشان داده شده در شکل ۲). حداکثر مقدار PCM در PCFهای الکتروریسی شده، ۴۵ درصد وزنی (برای اکتادکان) و ΔH_m مربوطه ۱۱۴ J/g است.

پس از آن، وانگ و همکاران PCFهای فوق‌العاده ظریف با هیدروکربن‌های آلیفاتیک زنجیره‌بلند چندمولفه‌ای را به‌وسیله‌ی روش الکتروریسی چندسیالی



شکل ۳. اندازه‌گیری‌های DSC از الیاف تغییرفازدهنده: (a) میکروالیاف تغییرفازی دوجزئی که از دو نوع مایع درونی، هگزادکان و ایکوزان برای پنج دوره ساخته شده است؛ (b) میکروالیاف تغییرفازدهنده سه‌جزئی که از سه نوع مایع درونی تشکیل شده است که عبارتند از نتارادکان، هگزادکان واکتادکان برای پنج دوره. تصویر درج شده، SEM نمای نیمرخ الیاف در جایی که PCMهای داخلی حذف شده است را نشان می‌دهد. نوارمقیاس ۵۰۰ نانومتراست.

کنترل دمای تک مرحله‌ای بافتند. میکروساختار لوله‌ای ویژه چند کاناله می‌تواند به طور قابل کنترل انواع و مقادیر مختلف PCM را داخل کانال‌های PVP به طور مستقل کپسوله نماید. منحنی‌های DSC و تصاویر نمای جانبی SEM از PCFهای چند مولفه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که PCMها به‌طور ثابت و مستقل بدون مخلوط شدن یا نشت، کپسوله شده‌اند. ظاهراً بیشترین مزیت PCFها از طریق الکتروریسی چندسیالی، این است که آن‌ها دارای نقاط ذوب/انجماد متناظر با انواع مختلف PCM هستند.

PVP، به عنوان یک پلیمر آب‌دوست قوی، هنگامی که PCFها در معرض محیط آب/رطوبت قرار می‌گیرند، یک ماده پوسته ایده‌ال نیست. دیگر پلیمرهای آبگریز مانند PU،PVDF و PVB به صورت موفق به عنوان مواد پوسته و قالب لیف از PCFهای الکتروریسی شده انتخاب شدند.

هو و همکاران PCFهای فوق‌العاده ظریف پلی یورتان/موم سویای طبیعی را از طریق روش الکتروریسی هم محور گزارش کردند. غلظت موم از ۱۰ تا ۶۰ درصد وزنی متغیر بود تا اثر حرارتی (محدوده از ۹/۲۴ J/g تا ۳۶/۴۷ J/g) موم در غشاهای کامپوزیتی را بررسی کنند. PCFهای Eicosane/PVDF نیز به‌وسیله‌ی الکتروریسی هم محور محلول/مذاب تهیه شدند. از آنجایی که Tm و Tc ایکوزان در محدوده دمای آسایش جسم [۱۱] است، کاندیدای خوبی از PCM در منسوجات هوشمند به شمار می‌رود. حصیر (mat) های PCF دارای توانایی تعدیل حرارت موثر، مقاومت مکانیکی بالا و پایداری حرارتی خوب بودند. سان و همکاران PCFهای اکتادکان/PVB را به‌وسیله‌ی الکتروریسی هم‌محور با استفاده از حلال غیرسمی ساختند. اثرات غلظت PVB در محلول اتانول و سرعت جریان مایعات هسته و پوسته بر روی مورفولوژی نانولیف‌های PCM/PVB با روش معینی بررسی می‌شود. نتایج نشان داد که غلظت PVB و سرعت جریان پوسته بالاتر، باعث مورفولوژی بهتر نانوالیاف هسته/پوسته PCM/PVB و کارائی کپسول کردن بهتر می‌شود.

نانوالیاف PCM/PVB قابلیت تعدیل حرارتی خوب تحت شرایط شبیه‌سازی شده تابش خورشیدی، ثبات و تکرارپذیری رضایت بخش در طی چرخه‌های گرمایش/سرمایش مکرر را نشان می‌دهند.

اگر چه PCMها می‌توانند به طور مؤثری در PCFها با ساختار هسته–پوسته به‌وسیله‌ی الکتروریسی هم‌محور کپسوله شوند، کنترل شرایط عملیاتی از طریق الکتروریسی هم‌محور یک مخلوط پلیمر و PCM بسیار آسان‌تر است، زیرا فقط یک نرخ خوراک دهی تنظیم می‌شود. بنابراین، محققان سعی کردند با استفاده از الکتروریسی تک محوره، PCFهای فوق‌العاده ظریف که حاوی هیدروکربن‌های آلیفاتیک بلندزنجیر (یا واکس‌های پارافین) هستند، بسازند. مهم‌ترین مسأله تعیین‌کننده برای آماده‌سازی PCFهایی با الکتروریسی تک محوره، انتخاب سیستم حلال و پراکندگی خوب هیدروکربن‌های آلیفاتیک بلندزنجیر (یا واکس‌های پارافین) در محلولِ مخلوط شده است. پرز–ماسیا و همکاران به‌وسیله‌ی الکتروریسی تک محوره به طور موفقیت آمیزی PCF های فوق‌العاده ظریف دودکان/پلی کاپرولاکتون، دودکان/پلی لاکتیک اسید و دودکان/زئین با استفاده از) w/w ۱۵ :۸۵ TCM/DMF (و wt٪ ۸۵ اتانول آبدار به عنوان حلال را ساختند. چالکو–سندوال و همکاران PCFهای الکتروریسی شده RT5 (مخلوطی از پارافین‌ها) /PS را با استفاده از مخلوط TCM/DMF (w/w ۷۰:۳۰) به عنوان سیستم حلال گزارش دادند.

نتایج نشان داد که RT5 می‌تواند به طور مناسبی در ماتریس PS با بازده کپسوله‌سازی خوب (حدود ۷۸٪) ، کپسوله شود. علاوه‌بر این، آن‌ها بهینه‌سازی حلال‌ها را نیز برای الکتروریسی RT4/PS ،RTF/PCL و RT4/HIPS PCF مورد بررسی قرار دادند. اثر حلال‌ها بر روی مورفولوژی، ظرفیت ذخیره‌سازی گرما، درجه فوق سرمایش و رفتار حرارتی PCFها مورد بررسی قرار گرفت، که نشان می‌دهد نوع حلال تأثیر آشکاری بر بازده کپسوله‌سازی PCMها در ماتریس پلیمری دارد.

PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده بر اساس پلی اتیلن گلیکول به عنوان جزء LHS

PEG یک PCM جامد– مایع با ویژگی‌های برجسته غیرسمی، مقاومت در برابر خوردگی، آنتالپی‌های نسبتا بزرگ و انتخاب پذیری گسترده‌ای از وزن مولکولی است. بنابراین PEG و مشتقات آن معمولاً به عنوان جزء ذخیره گرمای نهان در PCMهای شکل–پایدار استفاده می‌شوند. یک سری از PCFهای فوق‌العاده ظریف PEG/CA که به‌وسیله‌ی الکتروریسی تک محوره و الکتروریسی هم–محور ساخته شدند به صورت متوالی گزارش شده است. چن و همکاران در ابتدا، PCFهای فوق‌العاده ظریف PEG۱۰k/CA (۱: w/w۱) ، به‌وسیله‌ی الکتروریسی هم–محوردر سال ۲۰۰۷ گزارش دادند. تصاویر SEM و TEM (در شکل ۴ نشان داده شده است) آشکار کرد که PEG بر روی سطح و درون PCFها توزیع شده است و PCFهای الکتروریسی شده دارای قابلیت اطمینان حرارتی خوبی هستندکه به دلیل اثر محافظتی و محافظ CA است. بعدها، اثر مقادیر PEG، وزن مولکولی (شکل ۵) ، شبکه‌ای شدن در سطح [۱۲] و روش الکتروریسی بر روی مورفولوژی، خواص حرارتی و خواص کششی PCFهای PEG/CA الکتروریسی شده به طور سیستماتیک بررسی شد. نتایج نشان داد که کسر وزنی PEG تأثیر مهمی بر خواص حرارتی PCFها دارد و پایداری حرارتی و مقاومت دربرابر آب PCFها به وضوح پس از شبکه‌ای شدن در سطح، بهبود یافته است. علاوه‌بر این، رضایی و همکاران، اثر قطر لیف بر خواص حرارتی PCFهای PEG1500/CA را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که PCFهای PEG/CA با حداکثر قطر دارای کارایی آنتالپی بالاتری هستند

و اثر عایق حرارتی بالاتری دارند. در محدوده مقیاس نانو، قطرالیاف یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر خواص حرارتی PCFها است و باید برای دستیابی به بالاترین کارایی آنتالپی، کنترل و بهینه‌سازی شود.

علاوه‌بر CA، پلیمرهای دیگر نیز مانند نایلون ۶، ۶، PA6، PVDF، PLA، PAN و PVP نیز به عنوان ماتریس پشتیبان لیفی برای بسته‌بندی PEG انتخاب شدند.

گروه پارک مجموعه‌ای از حصیرهای بافته نشده کامپوزیتی PEG/PVDF را به‌وسیله‌ی الکتروریسی تک محوره و الکتروریسی هم‌محور تهیه کردند. PCهای هسته/پوسته PEG1k/PVDF می‌توانند با تنظیم نرخ تغذیه هسته و میزان تغذیه پوسته بافته شوند.

حصیرهای بافته نشده PEG1k/PVDF/SiO_2 به‌وسیله‌ی الکتروریسی تک محوره ساخته شدند و افزودن سیلیس فومی به نانوالیاف الکتروریسی شده PVDF/PEG باعث جلوگیری از نشت PEG مذاب در طول تغییر فاز جامد–مایع شد.

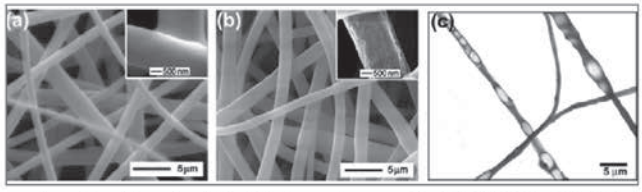
سپس مطالعه تطبیقی از PCFهای PEG/ PVDF/SiO_2 به‌وسیله‌ی الکتروریسی تک محوره و PCFهای هسته/پوسته PEG/PVDF با استفاده از الکتروریسی هم‌محور انجام شد و نتایج نشان داد که نانوالیاف هسته/پوسته PEG/PVDF دارای مقاومت در برابر آب و پایداری حرارتی بهتر از نانوالیاف کامپوزیتی PEG/PVDF/SiO_2 بودند.

علاوه‌بر این، نانوالیاف کامپوزیتی PEG/PVDF هسته/پوسته با وزن مولکولی‌های مختلف PEG (PEG1000، PEG2000 و PEG4000) با سرعت مختلف تغذیه هسته در یک سرعت ثابت تغذیه پوسته ساخته شدند. نتایج نشان داد که ساختار هسته/پوسته و قطر الیاف PCFهایPHF/PVDF بستگی به سرعت تغذیه هسته و وزن مولکولی PEG دارد. با افزایش نرخ خوراک هسته و وزن مولکولی PEG، ساختار هسته/پوسته PCFهای PEF /PVDF پایدارتر می‌شود و قطر PCFها افزایش می‌یابد. ΔH_m مربوط به PCFهایPEG/PVDF نیز با افزایش وزن مولکولی PEG افزایش یافته است.

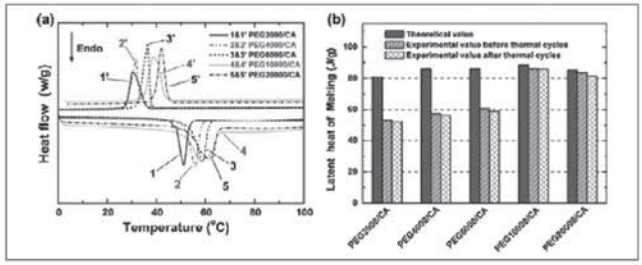
برای بهبود خواص حرارتی و خواص مکانیکیPCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده، افزودن نانوذرات مختلف غیرآلی به محلول ریسندگی، موثرترین و رایج‌ترین روش است. به عنوان مثال، MWCNTها با نسبت‌های مختلف وزنی در محلول الکتروریسی PEG/PAN اضافه شد و اثر MWCNT ها بر خواص حرارتی، فیزیکی و مکانیکی PCF حاوی PEG/PAN مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حضور MWCNTها به شدت میزان کریستالیزاسیون نانوالیاف را افزایش داده و همچنین بر اندازه متوسط کریستال و مقاومت مکانیکی نانوالیاف تأثیر گذاشته است. باباپور و همکاران PCFهای PEG1000/PA6/نانوذرات ($Fe2O_3$، Al_2O_3، SiO_2 و ZnO) را گزارش کردند و ساختار، مورفولوژی و خصوصیات حرارتی PCFهای تهیه شده، مورد شناسایی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قطر الیاف با افزایش هدایت الکتریکی محلول‌ها و بارگذاری نانوذرات کاهش می‌یابد، و حداقل قطر متوسط PCFها برای PEG/ PA6/Fe_2O_3 (حاوی ۲/۵۸ درصد وزنی Fe_2O_3 ۵۹ نانومتر بود. افزودن نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر ساختار بلوریPEG (برای Al_2O_3)، دمای شروع (برای SiO_2) ، دمای پیک (برای Al_2O_3)، دمای افست [۱۴] (برای ZnO)، نرخ انتقال حرارت و طول عمر در دمای بالای PCFها دارد.

PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده بر اساس اسیدهای چرب زنجیره‌بلند و اوتکتیک آن‌ها به عنوان جزء LHS

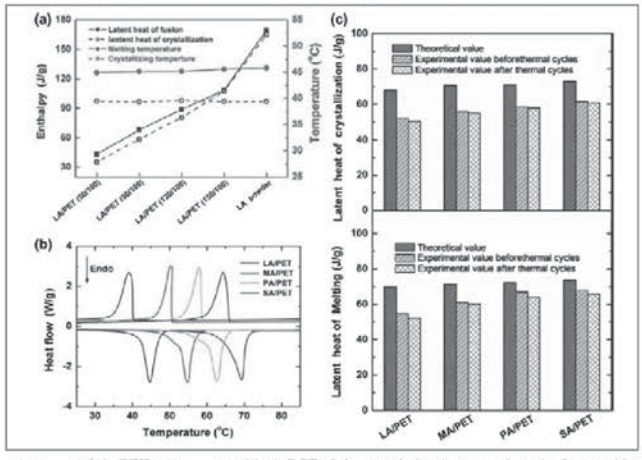
با توجه به مزایای منحصربه‌فردی نظیر درجه حرارت ذوب مناسب، گرمای نهان بالای ذوب، در دسترس بودن، غیرسمی و غیرخورنده بودن، اسیدهای چرب زنجیره– بلند (به عنوان مثال CA، LA، MA، PA، SA) و اوتکتیک [۱۵] آن‌ها به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان PCMهای جامد–مایع معمولی در زمینه‌های مختلف کاربرد دارند. چن و همکاران ابتدا مجموعه‌ای از PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده PET/FAها را به‌وسیله ترکیب محلول TFA/DCM با PET/ FAها در سال ۲۰۰۸ ساختند. نتایج نشان داد که متوسط ضخامت و ظرفیت ذخیره گرمای نهان PCFهای FA/PET با افزایش مقدار و زنجیره آلکیل FAها در PCFها افزایش می‌یابد



شکل ۴. تصاویر SEMاز PCFهای الکتروریسی شده a) :CA/ PEG، قبل و (b، بعد از شستشو؛ (c تصویر TEM از PCFهای CA/ PEG پس از شستشو.



شکل ۵. a) منحنی‌های DSC و b) مقادیر تئوری و تجربی آنتالپی‌های ذوب PCFهای الکتروریسی شده CA/ PEG با Mnهای مختلف از PEG.



شکل ۶. (a) گرمای نهان و دمای انتقال فاز بودر LA و PCFهای الکتروریسی شده LA/ PET با نسبت‌های جرمی مختلف LA؛ (b) منحنی DSC و (c) مقادیر تئوری و تجربی آنتالپی‌های چهار نوع از PCFهای الکتروریسی شده (100/ 70 PET /FA).

(همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است)

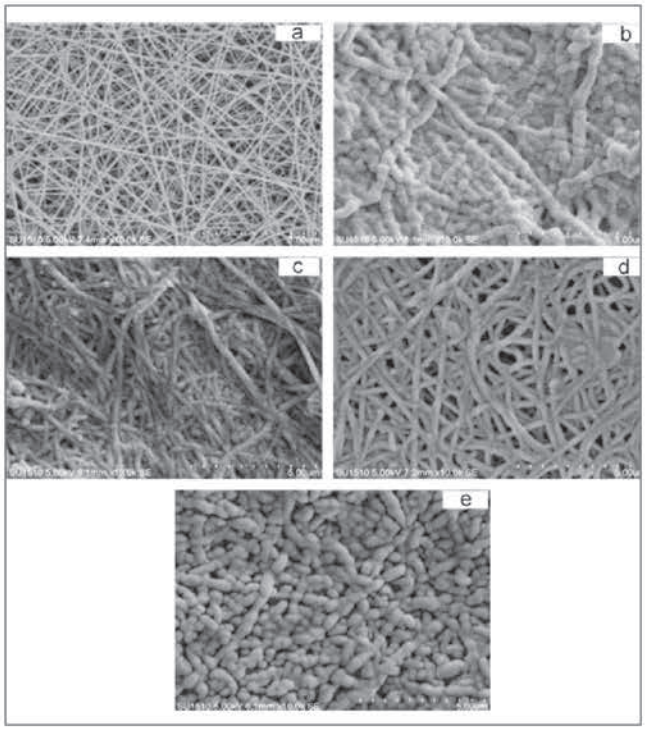
سپس کای و همکارانش تلاش زیادی در مورد PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده FA/پلیمر انجام دادند و PCFهای مختلف با FAها و اوتکتیک‌های مختلف را از طریق الکتروریسی تک محوره و شناسایی برای TES تهیه کردند PCFهای فوق‌العاده ظریف با دمای انتقال فاز و آنتالپی مختلف می‌توانند با تنظیم انواع و کسروزنی FAها و اوتکتیک‌های دوتایی، سه تایی، چهارتایی و پنج تایی در دسترس باشند.

دو روش برای آماده‌سازی حصیرهای لیفی تغییر فازدهنده حاوی FAها و ائوتکتیک‌ها مورد استفاده قرار گرفتند: الف) روش مخلوط–و– الکتروریسی، یعنی PCFهای فوق‌العاده ظریف، از محلول‌های مخلوط شده FA/پلیمر به‌طور هم محور الکتروریسی شده بودند؛ (ب) روش الکتروریسی–و–جذب. به طور دقیق، پلیمر عاری از FAها یا غشاهای لیفی فوق‌العاده ظریف نانوذرات/پلیمر در ابتدا به‌وسیله‌ی الکتروریسی تک محوره تهیه شدند و سپس غشاهای لیفی داخل اوتکتیک‌های FA مذاب به طور کامل غوطه‌ور شدند تا زمانی که جذب کاملاً اشباع شود. غشاهای لیفی الکتروریسی شده مقدار زیادی اوتکتیک‌های FA را به علت تخلخل و مساحت سطح ویژه زیاد آنها، جذب کردند.

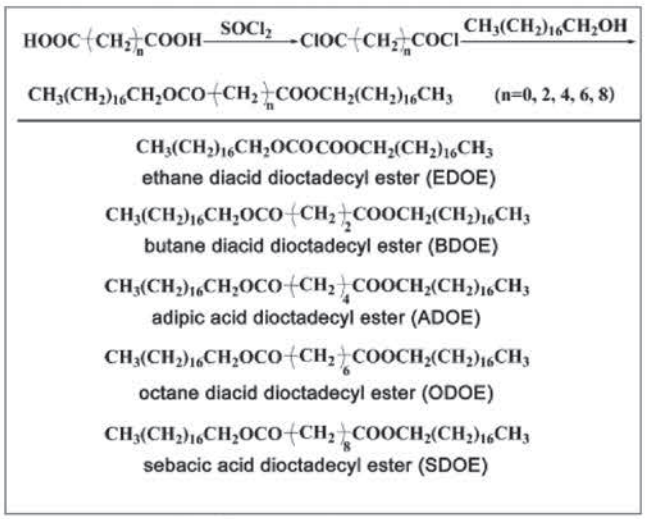
PCFهای مبتنی بر FAهای فوق‌العاده ظریف با مورفولوژی فیبری و قابلیت اطمینان حرارتی خوب را می‌توان با روش مخلوط–و– الکتروریسی به‌دست آورد، اما درصد بارگذاری FA در PCFها نسبتا کم است (حداکثر درصد وزن FA در PCها ۸۰٪ وزن است) که منجر به چگالی کمترگرمای نهان PCFها می‌شود. در مقابل، روش الکتروریسی–و–جذب می‌تواند حصیرهای فیبری تغییر فازدهنده را با بارگیری فوق‌العاده بالای FAها (بالاتر از ۸۰ درصد وزنی) فراهم کند، و حداکثر آنتالپی ذوب FAهای مبتنی بر PCFها تا ۱۶۶/۵ J/g است. به نظر می‌رسد اکثر FAها داخل فضاهای سه بعدی از حصیرهای فیبری با این روش توزیع شده‌اند (همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است) ، بنابراین قابلیت اطمینان حرارتی و قابلیت استفاده مجدد PCFها رضایت‌بخش نیست.

نانوذرات معدنی مختلف (به عنوان مثال نانوذرات CNT، SiO_2ها، Ag، EG) نیز به PCFهای الکتروریسی شده FA/PET اضافه شدند تا عملکرد (خاصیت بازدارندگی شعله، هدایت حرارتی و خاصیت مکانیکی) PCFها را بهبود دهند. اضافه کردن CNTها به PCFهای LA/PA6 می‌تواند پایداری حرارتی و هدایت حرارتی PCFها را افزایش دهد، همچنین می‌تواند خواص اشتعال‌پذیری PCFها را کاهش دهد.

در ضمن، CNTهای متخلخل می‌توانند بعنوان نوعی از مواد پشتیبان PCF ها به‌وسیله‌ی نیروی مویین [۱۷] و کشش سطحی عمل کنند. بعدها، EG به PCF های PA6 /اوتکتیک FA الکتروریسی شده به عنوان ترقی دهندگان نفوذ/انتقال حرارت، بر اساس توابعی نظیر CNTها معرفی شد و تأثیرات EG بر روی مورفولوژی الیاف و خصوصیات PCFها مورد بررسی قرار گرفت. اضافه کردن EG مقادیر ΔH_m و ΔH_c را برای PCFها افزایش داد که ممکن است به ظرفیت جذب افزایش یافته PCFها به محض افزودن EG نسبت داده شود. یکی دیگر از روش‌های ارتقاء خواص حرارتی PCF ها، بهبود خواص انتقال



شکل ۷. SEM (a) نانوالیاف PA6 (b) CA-LA/PA6 (c) CA-PA/PA6 (d) CA-SA/PA6 (e) CA/PA6



شکل ۸. راهنمای سنتز و فرمول شیمیایی DADOEها

حرارت ماتریس پشتیبان فیبری است. به عنوان مثال، غشاهای نانوالیاف کربن کربن دار شده از حصیرهای نانوالیاف الکتروریسی شده PAN) و حصیرهای نانوالیاف SiO_2 (که به‌وسیله‌ی عملیات حرارتی حصیرهای نانوالیاف الکتروریسی شده SiO_2-PVP به‌دست می‌آیند) تهیه و به عنوان مواد کپسول برای بارگذاری FAها استفاده شدند.

علاوه‌بر این، PCFهای بر پایه FAهای فوق‌العاده ظریف مشابه، مانند PCF های LA/PS، CA-LA (CA-PA)/PET LA–MA/PMIA،LA-SA/ PVA، به‌وسیله‌ی تحقیقات دیگر از طریق الکتروریسی هم–محور و تک محوره ساخته شدند.

PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده بر اساس انواع دیگر PCMهای جامد-مایع به عنوان جزء LHS

غیر از هیدروکربن‌های زنجیره‌بلند (و واکس‌های پارافین)، PEG و FAهای زنجیره‌بلند (و اوتکتیک‌های آنها)، سایر PCMهای جامد-مایع تجاری و سنتز شده نیز به عنوان جزء LHS برای PCFهای الکتروریسی شده استفاده می‌شود. چن و همکاران PCFهای فوق‌العاده ظریف SS/PET با نسبت جرمی مختلف SS/PET (۵۰/۱۰۰-۱۰/۱۰۰) به‌وسیله‌ی الکتروریسی تهیه کردند و آنتالپی ذوب آن‌ها به تدریج از ۱۴/۲۵ J/g به ۵۳/۷۷ J/g با افزایش نسبت جرمی SS/PET افزایش یافت. کی و همکاران نانوالیاف تغییر فازدهنده الکتروریسی شده بر اساس کامپوزیت GMS/PET و کامپوزیت MES/PAN/GO را ساختند. زدراوِوا و همکاران مخلوطی از روغن‌های گیاهی را به عنوان PCM انتخاب کرده و آن را با نانوالیاف الکتروریسی شده PVA با استفاده از تکنیک الکتروریسی امولسیونی ترکیب کردند. اثرات مقدار PCM و PVA در امولسیون‌ها بر روی مورفولوژی، خصوصیات گرما و پایداری تغییر فاز PCFها مورد بررسی قرار گرفت. یافت شد که بارگذاری PCM در PCFها به افزایش قطر الیاف، سطوح منقاری شده[۱۸] الیاف و آنتالپی‌های حرارت بالاتری منجر شد.

برخی از PCMهای جامد-مایع سنتز شده نیز در PCFهای الکتروریسی شده فوق‌العاده ظریف استفاده شده‌اند که دسته‌بندی‌ها PCMها را غنی می‌کنند. یک سری از DADOEها (شکل ۸) به عنوان PCMهای جامد- مایع جدید سنتز شدند و سپس PCFهای فوق‌العاده ظریف DADOE/PET با مقادیر مختلف DADOE از طریق الکتروریسی ساخته شدند.

چالش‌ها و فرصت‌های آینده PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده

از وقتی که PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده در سال ۲۰۰۶ به‌وسیله‌ی گروه شیا گزارش شد، دانشمندان بیشتری به طور فعال در این زمینه کار کرده‌اند. بدون شک PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده، موادی نویدبخش با ویژگی‌های مفید بسیاری برای کاربردهای ذخیره گرمای نهان و کاربردهای مدیریت گرما هستند. گزارش‌های منابع علمی در حال حاضر به طور عمده روی فرایند تهیه و مورفولوژی پایه/شناسایی حرارتی تمرکز دارند. با این حال، پذیرش PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده در برنامه‌های مهندسی خاص نیاز به عملکرد بهتر حرارتی و شناسایی دقیق‌تر دارد تا به طور کامل توانایی‌ها و محدودیت‌های آن‌ها درک شود. چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با مصرف PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده برای TES و سایر برنامه‌های کاربردی در بخش‌های زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

چگالی LHS

چگالی LHS همیشه شاخص کلیدی همه PCMها برای TES است. همانند بسیاری از PCMهای شکل-پایدار، ماتریس کپسوله‌کننده (یعنی پلیمر) در PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده نه تنها از فرآیند LHS خارج می‌شود، بلکه حرکت آزاد PCMها (جامد-مایع) را محدود می‌کند و ایجاد فرایند کریستالیزاسیون PCMها را متوقف می‌کند. در نتیجه، چگالی LHS برای PCF های فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده به طور کلی در مقایسه با PCM جامد-مایع در توده، کمتر است. از داده‌های ویژگی حرارتی در آثار گزارش شده، ماکزیمم آنتالپی ذوب PCFهای فوق‌العاده ظریف آماده شده با روش مخلوط-و-الکتروریسی ۱۴۴/۸ J/g است که به وضوح پایین‌تر از PCM مشابه است. بنابراین، به حداکثر رساندن چگالی LHS مربوط به PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده بدون ضعیف کردن اعتبار حرارتی آن‌ها تمرکز تحقیقات PCF های فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده است.

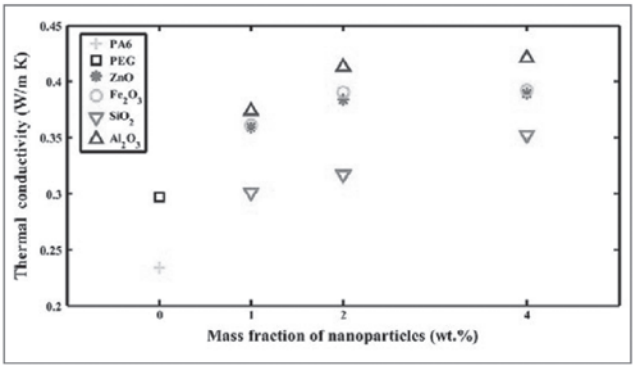
علاوه‌بر این، کشف شرایط استاندارد آزمایش چگالی LHS نمونه فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده در مناطق و محیط‌های مختلف برای کاربردهای عملی نیز مهم است. تاکنون در گزارش ها، اندازه‌گیری DSC اصلی‌ترین و حتی تنها تکنیک برای ارزیابی چگالی LHS مربوط به PCFها است، اما داده‌های ویژگی حرارتی از DSC به میزان زیادی بستگی به شرایط اندازه‌گیری (به خصوص سرعت اسکن سرمایش/گرمایش) دارد. همان طور که می‌دانیم، سرعت بالای روبش کردن گرمایش/سرمایش به طور کلی باعث افزایش آنتالپی نمونه‌ها می‌شود.

هدایت حرارتی

مشابه PCMهای جامد-مایع سنتزی آلی، PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده، به خصوص آنهایی که مبتنی بر ماتریس پلیمری لیفی هستند نیز هدایت حرارتی نسبی کمتری دارند. از دیدگاه مدیریت حرارتی، هدایت حرارتی PCFهای فوق‌العاده ظریف نقش مهمی در TES دارند زیرا تا حد زیادی بر انتقال حرارت (شارژ و تخلیه) تأثیر می‌گذارد. با این حال، مراجع گزارش شده، بر روی آنتالپی انتقال فاز و دمای انتقال فاز بسیار زیاد تأکید کرده اند، متقابلاً، هدایت حرارتی PCFهای فوق‌العاده ظریف بسیار کمتر توجه شده است.

دو روش برای افزایش هدایت حرارتی در PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده استفاده شد: (الف) افزودن نانوذرات با هدایت گرمایی بالا (به عنوان مثال، CNTها، SiO_2، EG، GO نانوذرات فلزی و اکسید فلزی به محلول ترکیبی PCM/پلیمر؛ (ب) تهیه ماتریس‌های لیفی معدنی ازحصیرهای الکتروریسی شده (به عنوان مثال ماتریس لیفی مبتنی بر کربن تکلیس شده از حصیرهای الکتروریسی شده PAN، ماتریس لیفی SiO_2 تکلیس شده از حصیرهای الکتروریسی شده PVP/SiO_2، برای بارگیری PCMها.

اضافه کردن نانوذرات به محلول ترکیبی PCM/پلیمر یک کار نسبتاً آسان است، اما چگونگی غلبه بر تجمع نانوذرات در محلول آماده شده الکتروریسی باید مورد توجه قرار گیرد. به طور کلی، وارد کردن نانوذرات باید به خوبی از الزامات رسانایی حرارتی PCFها برخوردار باشد و در عین حال باعث کاهش قابل توجهی در چگالی ذخیره‌سازی حرارت PCFها شود که می‌تواند به‌وسیله‌ی داده‌های ویژگی حرارتی و هدایت گرمای اندازه‌گیری شده PCFهای تهیه شده تعیین شود. با این حال، چنانکه ما می‌دانیم،شناسایی کمّی هدایت حرارتی PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده تنها به‌وسیله‌ی باباپور و همکاران



شکل ۹. هدایت حرارتی PA6/ PEG/ نانوذرات در مقابل درصد وزنی نانوذرات

گزارش شده است (همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است). نتایج نشان داد که نوع و کسر وزنی نانوذرات نقش مهمی در بهبود هدایت حرارتی مؤثر PCFهای فوق‌العاده ظریف دارند و افزایش نسبی در هدایت حرارتی PCF های فوق‌العاده ظریف به نظر می‌رسد با کسر وزنی نانوذرات غیرخطی شود. در آینده، اندازه‌گیری کمّی بیشتری به جای مطالعه کیفی هدایت حرارتی PCF های فوق‌العاده ظریف باید انجام شود. در مقایسه با روش اول برای افزایش هدایت حرارتی PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده، دومین روش دارای مزایای سرعت انتقال حرارت بالاتر، بارگذاری PCM بیشتر، عدم تجمع و عدم اتلاف آنتالپی است. با این حال، تکلیس با درجه حرارت بالای حصیرهای لیفی الکتروریسی شده یک فرایند پرانرژی است و هزینه‌های ساخت PCF های فوق‌العاده ظریف را افزایش می‌دهد. علاوه‌بر این، شکل غشاهای لیفی به سختی بعد از تکلیس حفظ می‌شود، که کاربردهای گسترده را محدود می‌کند.

استحکام مکانیکی

بر خلاف PCMهای شکل‌پایدار غیرلیفی، PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده دارای مزیت منحصربه‌فردی از شکل لیفی با قطر فوق‌العاده ظریف و سطح ویژه فوق‌العاده بالا هستند، که برخی از کاربردهای خاص مهندسی را به عنوان پارچه‌ها و لباس‌های هوشمند تسهیل می‌کند. بنابراین، حفظ مورفولوژی لیفی PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده در کاربردهای مهندسی درازمدت ضروری است. با این حال، مراجع حاضر اطلاعات کافی در مورد خواص مکانیکی و پایداری شکل لیفی درازمدت در دماهای مختلف تأمین نمی‌کنند. در مقایسه با PCFهای سنتی تهیه شده به‌وسیله‌ی ریسندگی مذاب/ مرطوب، PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده استحکام مکانیکی ضعیفتری را نشان می‌دهند. علاوه‌بر این، خواص مکانیکی PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده با افزایش کسر وزنی PCM در PCFها (همان طورکه شکل ۱۰ نشان می‌دهد) کاهش می‌یابد.

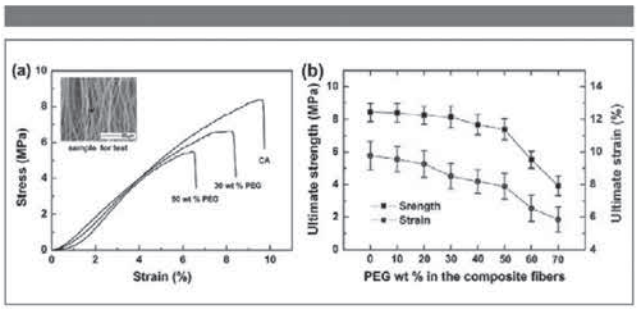
بعضی از پرکننده‌های تقویت‌کننده (به عنوان مثال CNTها) به PCFهای PCM/پلیمر اضافه شدند تا خصوصیات مکانیکی PCFها را افزایش دهند. برای برآورده ساختن نیازهای کاربردهای خاص مهندسی، روش‌های جدید دیگر برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی و پایداری شکل لیفی PCFهای الکتروریسی شده باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

فرصت‌ها

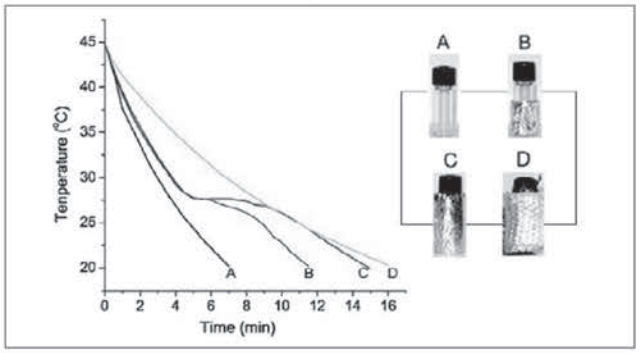
برای PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده، اگر چه چالش‌های ذکر شده وجود دارد، هنوز هم انتظار می‌رود که تحقیق در کاربردهای PCFها در آینده‌ای نزدیک اجرایی‌تر شود.

پوشش‌های تعدیل‌کننده حرارتی [۱۹] و پارچه‌های هوشمند

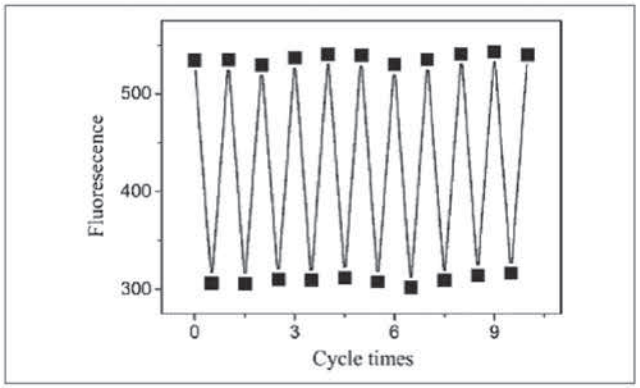
PCFهای سنتی در دهه‌های گذشته به طور گسترده‌ای در ساخت روکش بیرونی و لباس فضایی به‌وسیله‌ی شرکت فناوری‌های Outlast استفاده شده است. PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده شباهت زیادی به PCF



شکل ۱۰. خواص کششی PCFهای الکتروریسی شده PEG /CA با مقادیر مختلف PEG: (a) منحنی‌های تنش- کرنش معمولی از الیاف الکتروریسی شده؛ (b) استحکام نهایی و کرنش نهایی الیاف در مقابل مقدار PEG. درج تصویر SEM در شکل (a) نمونه‌هایی از الیاف الکتروریسی شده است که با چرخش درام برای آزمون کشش جمع شده‌اند.



شکل ۱۱. نمایش ظرفیت عایق حرارتی از نانوالیاف اکتادکان@PVP-TiO_2، جایی که ۱ سانتی‌متر مکعب از آب در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، در محیطی ۴ درجه سانتی‌گرادی در فریزرهای شیشه‌ای پوشانده شده با ژاکت‌های عایق‌بندی خنک می‌شود. نمونه A هیچ عایق‌کاری نداشت، نمونه B با ژاکت نانوفیبری PCM به‌طور نصفه پوشیده شده بود و نمونه C به‌طورکامل به‌وسیله ژاکت نانوفیبری PCM پوشیده شده بود. نمونه D به‌وسیله یک پوشش از پشم شیشه معمولی پوشیده شده است.



شکل ۱۲. نتایج یک آزمایش از سیکل برگشت‌پذیر ترموکرومیک با فیلم‌های نانوفیبری PMMA-CBT. در هر چرخه، انتشار فلورسانس نمونه‌ها در طول موج ۵۰۳ نانومتر در دمای ۱۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد.

های سنتی نشان می‌دهند، بنابراین انتظار می‌رود که آن‌ها به عنوان پوشش یا بسته‌بندی کالاهای حساس به دما در تجهیزات تبرید و مواد غذایی هوشمند یا بسته‌های پزشکی/دارویی استفاده شوند. به عنوان مثال، در مطالعه مک کان و همکاران، قابلیت این PCFها برای تثبیت (تنظیم) درجه حرارت نشان داده شد (شکل ۱۱). در آزمایش، یک بطری کوچک شیشه‌ای بوروسیلیکات با یک ژاکت عایق متفاوت دیگر پوشیده شد، و با ۱ سانتی مترمکعب آب ۶۰ درجه سانتیگراد پرشد، سپس اجازه داده شد تا در یک محیط ۴ درجه سانتیگراد خنک شود. نتیجه نشان داد که الیاف فایبر گلاس همانند PCFها در عایق‌سازی بطری شیشه‌ای مؤثر بوده اند، اگرچه ژاکت از نوع الیاف فایبرگلاس تقریبا ۴ برابر ضخیم‌تر نسبت به نوع PCF بود. مهم‌تر از همه، ژاکت مبتنی بر PCFها، باعث شد تا درجه حرارت (نزدیک به نقطه ذوب اکتادکان) در بطری شیشه‌ای برای مدت زمان زیادی ثابت باشد. در مقابل، درجه حرارت به طور مداوم برای تمام انواع دیگر ژاکت‌های عایق با زمان کاهش یافت. آزمایش مشابه نیز به‌وسیله‌ی چن و همکاران انجام شد، که قابلیت تعدیل حرارتی و پایداری حرارتی PCF های الکتروریسی شده PEG/CA پس از طی چرخه‌های سرمایش–گرمایش اثبات گردید.

کاربردهای ترموکرومیک

]لی و همکاران PCFهای الکتروریسی شده ترموکرومیک را با استفاده از یک پوسته PMMA شفاف و یک هسته PCTM CVL/بیسفنول ۱/A– تترادکانول (CBT) ازطریق الکتروریسی هم محور مذاب–محلول بررسی کردند. این سیستم دارای خواص پایدار ترموکرومیک است (شکل ۱۲) ، و درجه حرارت ترموکرومیک را می‌توان با تغییرات در الکل چرب تنظیم کرد. سیستم مخلوط CBT دارای فرآیند جذب و آزادسازی آشکاری در نقطه ذوب ۳۹–۳۷ درجه سانتیگراد است و در دمای تغییر فاز، یک تغییر فلورسنت وجود دارد. بنابراین، کپسوله کردن CBT برای کاربردهای PCTM در مواد حرارتی بدن–دما و سنسورهای پاسخده به حرارت امیدوارکننده است. با استفاده از پوسته PMMA با خواص عبور نوری خوب، این الیاف انتظار می‌رود که دارای مدیریت انرژی حرارتی بدن–دما، ترموکرومیسم[۲۲] و خواص فلورسانس باشند. این کار بینش جدیدی را برای تهیه سنسورهای دما با سیگنال‌های خوب فلورسانس و مواد گرمابخش بدن–دما با جذب، نگهداری و آزادسازی هوشمند انرژی حرارتی فراهم کرد. در حالی که بسیاری از PCMهای جامد–مایع (به ویژه اوتکتیک‌های FA) نیز تحت تغییرات فیزیکی در دمای بدن قرار می‌گیرند، PCFهای الکتروریسی شده جدید ترموکرومیک می‌توانند با استفاده از PCM های مختلف طراحی شوند. برای ارزیابی پایداری شکل لیفی دراز–مدت، قابلیت استفاده مجدد و خواص مکانیکی چنین PCFهای ترموکرومیکی در کاربردها، مطالعات بیشتری مورد نیاز است.

PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده چند منظوره

توسعه PCFهای فوق‌العاده ظریف چند منظوره الکتروریسی شده جدید و گسترش کاربردهای آن‌ها یک تحقیق جالب و امیدبخش است. و می‌تواند TES را با سایر ویژگی‌های کاربردی مفید مانند ویژگی‌های پاسخدهی تصویری، گرمایی، الکتریکی و یا مغناطیسی توأم کند تا بتواند مواد نوین هوشمند چندگانه–پاسخده نوآورانه را توسعه دهد. شی و همکاران در ابتدا نانوالیاف تغییرفاز دهنده لومینسنت را بر اساس Eu-PEG/PVP به‌وسیله‌ی الکتروریسی تهیه کردند. ماده لومینسنت تغییر فازدهنده Eu-PEG با هماهنگ‌سازی (کئوردیناسیون) یون‌های خاکی کمیاب Eu+3 با گروه‌های کربوکسیلات PEG اصلاح شده به‌وسیله‌ی دو گروه ترفتالاتیک اسید به دست آمد. مواد PVP/Eu- PEG هر دو ویژگی تغییر فاز خوب و خواص عالی لومینسنت را مطابق منحنی DSC و طیف فلورسنس دارند.

چنین مواد فیبری چندمنظوره تطابق‌پذیر می‌توانند خواص انتقال گرما و ذخیره گرمایی شان را در پاسخ به محرک‌های مختلف خارجی، خود–تعدیل نمایند که در طیف گسترده‌ای از زمینه ها، مانند ساختمان‌های صرفه جو در انرژی، هوا فضا، نظامی، منسوجات، حفاظت حرارتی دستگاه‌های الکتریکی، استفاده از انرژی خورشیدی، سیستم رهایش دارو و غیره می‌توانند به‌کار روند.

نتیجه‌گیری

این مقاله PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده را برای برنامه‌های کاربردی TES و کنترل دما، با تمرکز بر مورفولوژی و خصوصیات حرارتی (نظیر آنتالپی انتقال فاز و دمای انتقال فاز) PCFهای فوق‌العاده ظریف حاوی اجزا مختلف ذخیره گرمای نهان (PCM) که در مراجع از سال ۲۰۰۶ به چاپ رسیده است، مورد بررسی قرار داد.

روش‌های الکتروریسی برای به دست آوردن PCFهای فوق‌العاده ظریف به طور خلاصه معرفی شدند. ارتباط بین مورفولوژی الیاف، ترکیب درصد و خواص حرارتی PCFهای فوق‌العاده ظریف، خلاصه و منتقدانه مرور شدند، که راهنما برای ساخت PCFهای فوق‌العاده ظریف با خواص حرارتی مناسب را ارائه می‌دهد. چالش‌های کاربرد عملی PCFهای فوق‌العاده ظریف برای TES و مدیریت حرارت نیز مورد بحث قرار گرفت.

برای ارتقاء خواص ترموفیزیکی مختلف (به عنوان مثال، چگالی LHS، هدایت حرارتی، استحکام مکانیکی و غیره PCFهای فوق‌العاده ظریف برای کمک به خواص تجاری شان، تلاش بیشتری نیاز است. PCFهای فوق‌العاده ظریف الکتروریسی شده همچنین فرصت‌های منحصربه‌فردی برای ایجاد مواد فیبری چند منظوره نوآورانه‌ای که ترکیبی از TES با سایر ویژگی‌های کاربردی مفید هستند، ارائه می‌دهند.

منبع: سایت ستاد نانو

پی‌نوشت

۱– استادیار گروه مهندسی پلیمر دانشگاه صنعتی قم

۲– دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی پلیمر دانشگاه صنعتی قم