

بررسی روش‌های پراکنش نانولوله‌های کربنی در پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمری

مهرداد قراگزلو^{۱*}، بهزاد شیرکوند هداوند^۲، کیمیا مهدوی جاوید^۳

۱- استادیار، گروه پژوهشی نانوفناوری و نانومواد، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- استادیار، گروه پژوهشی رزین و افزودنی‌ها، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۳- دانشجوی کارشناس ارشد، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

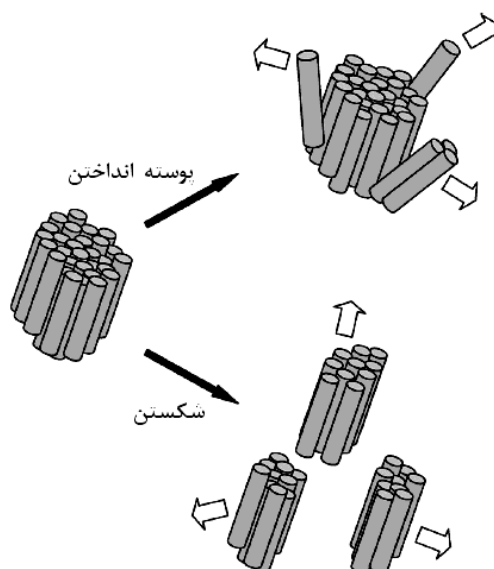
تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۵ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۲/۱۰/۴ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۷ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۲/۱۱/۱۳

چکیده

پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی دارای خواص بی نظیری می‌باشند که سبب کاربرد آنها در زمینه‌های مختلف الکترونیک، نور، سلول‌های خورشیدی، حسگرهای زیستی، کاتالیزورها و سایر زمینه‌های دیگر می‌گردد. این ترکیبات خواص استحکامی و الکتریکی بسیار عالی و ضریب هدایت گرمایی مطلوبی دارند. یکی از مراحل تهیه پوشش‌های پلیمر نانوکامپوزیتی کربنی پراکنش نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های پلیمری می‌باشد که این مرحله تعیین‌کننده خواص نهایی محصول است. پراکنش مناسب سبب توزیع یکنواخت نانولوله‌ها در پلیمر شده و تأثیر چشمگیری در بهبود خواص نهایی خواهد داشت. از آنجا که در پراکنش نانولوله‌های کربنی مشکلات عمده‌ای وجود دارد در این تحقیق روش‌های پراکنش نانولوله‌های کربنی در پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمری که شامل روش مخلوط کردن فیزیکی، روش پلیمریزاسیون درجا و روش عامل‌دهی شیمیایی است بررسی می‌شود. انتخاب روش پراکنش مناسب بر حسب کاربرد نهایی پوشش‌های نانوکامپوزیتی و در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی آن، یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد تحقیق در تهیه پوشش‌های پلیمر نانوکامپوزیتی کربنی است.

واژه‌های کلیدی

پراکنش، پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمری، نانولوله‌های کربنی، یکنواختی.



*Corresponding author: gharagozlou@icrc.ac.ir

Investigation of dispersion methods of carbon nanotubes in polymeric nanocomposite coatings, M. Gharagozlou, B. Shirkevand Hadavand, K. Mahdavi Javid

۱- مقدمه

از طرفی نانولوله‌های کربنی دارای هدایت جریان الکتریکی بالایی می‌باشند. از لحاظ خواص مکانیکی، سفتی و استحکام محوری بالایی دارند که ناشی از پیوند کربن-کربن sp^2 می‌باشد. نانولوله‌ها جزء محکم‌ترین رشته‌های شناخته شده با مدول ینگ ۱/۴ تراپاسکال هستند. آنها همچنین دارای درصد ازدیاد طول تا پارگی ۳۰٪-۲۰ بوده که موادی سخت با استحکام کششی بالای ۱۰۰ گیگاپاسکال (بلکه بالاتر) تشکیل می‌دهند [۳].

به عنوان مقایسه مدول ینگ فولاد استحکام بالا حدود ۲۰۰ گیگا پاسکال و استحکام کششی آن ۱ تا ۲ گیگا پاسکال است. همچنین نانولوله‌های کربنی دارای هدایت گرمایی حداقل دو برابر الماس می‌باشند. بنابر خواص گفته شده نانولوله‌های کربنی جایگزین مناسبی برای کربن بلک در زمینه‌های پلیمری خواهند بود که در جدول ۱ برخی کاربردهای پلیمر نانوکامپوزیت‌های کربنی آورده شده است [۴].

۲- تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمر - نانولوله‌های کربنی

مراحل تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمر- نانولوله‌های کربنی به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود:

۱- آمایش پرکننده‌های نانولوله کربنی

۲- پراکنش نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های پلیمری

۳- تهیه و پخت نانوکامپوزیت

از میان مراحل فوق مرحله تعیین‌کننده خواص نهایی محصول، مرحله دوم یعنی پراکنش نانولوله‌ها در زمینه موردنظر می‌باشد. پراکنش مناسب سبب توزیع یکنواخت این ذرات در پلیمر شده و تأثیر چشمگیری در بهبود خواص نهایی نانوکامپوزیت خواهد داشت [۵]. در پراکنش نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های پلیمری دو مسئله عمده وجود دارد:

۱- روش‌های مقدماتی رایج برای پراکنش نانولوله‌های کربنی، مخلوط‌های ناهمگونی که در طول، قطر و نوع خواص الکتریکی (نیمه‌هادی، نیمه‌فلزی و فلزی) متفاوتند تولید می‌کند. این ناهمگونی کاربرد نانوکامپوزیت نهایی را محدود می‌نماید.

۲- نانولوله‌های کربنی اصلاح نشده بسیار آب‌گریز بوده و به راحتی تجمع می‌کنند. بنابراین برهم‌کنش آنها با مواد آلی و بیولوژیکی مشکل است.

نانوکامپوزیت ماده جامد چند فازی است که یکی از فازها دارای یک، دو یا سه بعد کمتر از ۱۰۰ nm بوده و یا ساختاری است که فواصل بین فازهای مختلف آن در محدوده ابعاد نانومتری باشد. نانوکامپوزیت می‌تواند شامل محیط‌های متخلخل، کلوئیدها، ژل‌ها و کولیمرها باشد، اما معمولاً به ترکیب جامد یک توده زمینه و فازهای نانو که به دلیل عدم تجانس در ساختار فیزیکی و شیمیایی خود خواص متفاوتی دارند اطلاق می‌گردد. خواص مکانیکی، الکتریکی، حرارتی، نوری و الکتروشیمیایی نانوکامپوزیت به‌طور قابل ملاحظه‌ای با خواص کامپوزیت موردنظر تفاوت خواهد داشت [۱].

نانوکامپوزیت‌ها بر اساس نوع زمینه خود به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱- نانوکامپوزیت‌های با زمینه سرامیکی

۲- نانوکامپوزیت‌های با زمینه فلزی

۳- نانوکامپوزیت‌های با زمینه پلیمری

خواص بهبود یافته نانوکامپوزیت‌ها ناشی از نسبت بالای طول به قطر و سطح تماس بالای پرکننده‌ها در صورت داشتن پراکنش مناسب می‌باشد. در حقیقت عوامل تعیین‌کننده خواص نانوکامپوزیت، پراکنش نانوذرات در زمینه آن می‌باشد [۱].

نانوکامپوزیت‌های با زمینه پلیمری بر حسب نوع پرکننده آنها به سه دسته تقسیم می‌گردند:

۱- نانوکامپوزیت‌های پلیمر- فلز

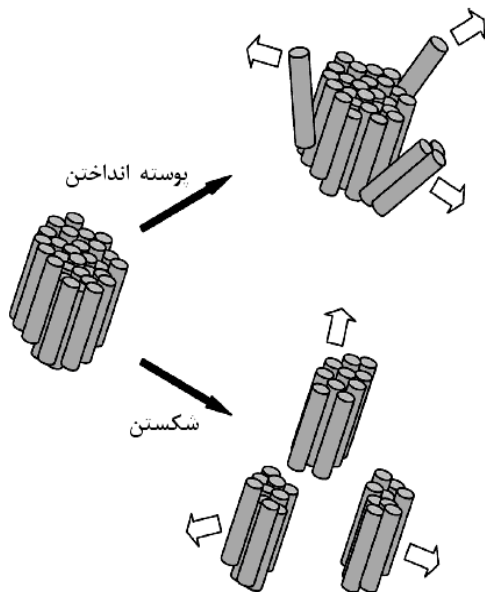
۲- نانوکامپوزیت‌های پلیمر- غیر فلز

۳- نانوکامپوزیت‌های پلیمر- نانولوله‌های کربنی

نانوکامپوزیت‌های پلیمر- نانولوله‌های کربنی دارای پرکننده‌های کربنی سیلندری شکل هستند که نسبت طول به قطر آنها بیش از ۱۳۲۰۰۰۰۰ می‌باشد. این مولکول‌های کربنی سیلندری خواص بی‌نظیری به پلیمر نانوکامپوزیت‌های کربنی می‌دهند که سبب کاربرد آنها در بخش‌های مختلف الکترونیک، نور، سلول‌های خورشیدی، حسگرهای زیستی، کاتالیزورها و سایر صنایع دیگر می‌گردد. این ترکیبات خواص استحکامی و الکتریکی بسیار عالی و ضریب هدایت گرمایی بالایی دارند [۲].

جدول ۱- برخی کاربردهای پوشش‌های نانوکامپوزیت‌های پلیمر- نانولوله‌های کربنی [۴].

نوع نانولوله	نوع پلیمر	کاربردها
SWNT	Poly (3- octylthiophene)	ابزارهای فتوولتایی
MWNT:SWNT	Polyaniline, polypyrrole, poly-(3, 4- ethylenedioxythiophene), poly (3- methyl-thiophene)	ابرخازن‌ها
SWNT	Nafion	سلول خورشیدی
MWNT	Poly (vinyl alcohol), poly (2- acrylamido-2- methyl-1-propanesulfonic acid)	
MWNT	Nafion	حسگر زیستی
MWNT-functional	Sulfonated poly (arylene sulfone)	فیلم‌های کاتالیزور زیستی
SWNT: MWNT	Polypyrrole	
SWNT	Poly (methyl methacrylate)	انتقال ژن
SWNT- functional, MWNT- functional	DNA (polynucleotide)	



شکل ۱- طرح‌واره نحوه عملکرد ذرات در روش استفاده از امواج فراصوت.

۳-۱-۲- استفاده از هم‌زن‌های با سرعت بالا

هم‌زن‌های با سرعت بالا، یک فاز یا یک جزء (جامد، مایع، گاز) را در یک فاز مایع پیوسته که معمولاً مخلوط‌نشده می‌باشند، پراکنده می‌کنند. این ابزار در صنایع شیمیایی، چسب، آرایشی، بهداشتی، غذایی و صنایع پلاستیک به منظور امولسیون‌سازی، یکنواخت کردن، کاهش اندازه ذرات و پراکنش استفاده می‌گردد. روش کار این دستگاه به این صورت است که زمانی که بخشی از مایع با سرعت متفاوتی نسبت به بخش مجاور دیگر جابجا می‌شود، برشی را تحمل می‌کند [۹]. مخلوط‌کن سرعت بالا نیز شامل یک پروانه چرخان یا روتور^۱ سرعت بالا یا یک سری از پروانه‌ها یا روتورها می‌باشد که توسط یک موتور الکتریکی نیرو می‌گیرد و تولید جریان و برش می‌نماید. سرعت مایع در قطر بیرونی روتور بزرگ‌تر از سرعت در مرکز روتور است و این عمل سبب ایجاد برش می‌گردد. عوامل اصلی در طراحی این دستگاه شامل قطر روتور و سرعت چرخش آن، فاصله بین روتور و استاتور، زمان مخلوط کردن و تعداد مولدها در سری می‌باشد. متغیرها شامل تعداد ردیف دندانه‌ها، زاویه آنها و فاصله بین دندانه‌ها است.

۳-۱-۳- استفاده از مواد فعال سطحی

مواد فعال سطحی مولکول‌های دو خصلتی هستند که شامل یک سر قطبی و آب دوست و یک زنجیره هیدروکربنی بلند که غیرقطبی و آب‌گریز است. وجود دو قسمت با خصوصیت‌های متضاد بر روی مولکول‌های ماده فعال سطحی [۱۰] به آنها خواصی نظیر کاهش کشش سطحی، تشکیل میسل و انحلال مواد غیرقطبی را می‌دهد. تغییر شرایط محیطی از قبیل دما، قدرت یونی، pH و غیره به دلیل آنکه میزان آب‌گریزی را تغییر می‌دهد، باعث تغییر فعالیت سطحی ماده فعال

این تجمع ناشی از نیروهای بین ذره‌ای است که به دو دسته تقسیم می‌گردند:

(الف) نیروهای فیزیکی مانند برهم‌کنش‌های واندروالس، الکتروستاتیک و مغناطیسی که پیوندهای شیمیایی تشکیل نمی‌دهند.

(ب) نیروهای ناشی از پیوندهای شیمیایی که سبب ایجاد اتصال در بخش‌های مختلف می‌گردد.

مطالعات نشان داده است که جهت دستیابی به یک پراکنش مناسب، غلبه بر این نیروها قدم اساسی می‌باشد [۶].

۳- روش‌های پراکنش نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های

پلیمری

به طور کلی روش‌های پراکنش نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های پلیمری [۷] مخلوط کردن فیزیکی، پلیمریزاسیون درجا و عامل‌دهی شیمیایی تقسیم می‌شود.

که هر یک از روش‌ها در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- مخلوط کردن فیزیکی

این روش خود به پنج گروه طبقه‌بندی می‌گردد [۷]:

(الف) استفاده از امواج فراصوت صوت

(ب) هم‌زن‌های با سرعت بالا

(ج) استفاده از مواد فعال سطحی

(د) استفاده از مواد سازگارکننده

(ه) استفاده از پلیمرهای کمکی در فرآیند مخلوط کردن مذاب

۳-۱-۱- استفاده از امواج فراصوت

در این روش با به‌کارگیری انرژی امواج فراصوت، ذرات تجمع یافته از یکدیگر جدا می‌گردند [۸]. امواج فراصوت به دو شکل می‌تواند استفاده شود: امواج فراصوت ملایم در یک حمام - فراصوت انرژی بالا با پروب دارای سر نوک تیز. دو مسیر کلی، بیان‌کننده نحوه عملکرد ذرات در روش استفاده از امواج فراصوت است که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است:

(الف) مسیر پوسته انداختن: در این روش بسته‌های تجمع یافته نانولوله‌های کربنی در اثر امواج دریافتی، به صورت تک تک یا دسته‌های بسیار کوچک از یکدیگر جدا می‌گردند.

(ب) مسیر شکستن: در این روش بسته‌های تجمع یافته بزرگ، به بسته‌های کوچکتر که خود شامل چندین نانولوله می‌باشند شکسته می‌شوند.

هرچه جداسازی نانولوله‌های تجمع یافته به سمت مسیر اول سوق داده شود پراکنش یکنواخت‌تری حاصل خواهد شد.

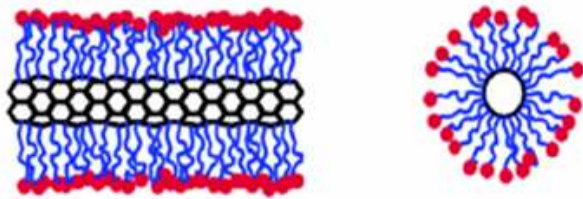
¹ Rotor

سطحی می‌شود. سر آب‌گریز مواد فعال سطحی توانایی ایجاد برهم‌کنش‌های واندروالس با سطح ذرات نانولوله را داشته و سر آب‌دوست توانایی برقراری پیوندهای هیدروژنی با زمینه پلیمری را دارد. نظریه‌های گوناگونی برای چگونگی حالت‌های قرار گرفتن ماده فعال سطحی در زمینه پلیمری وجود دارد.

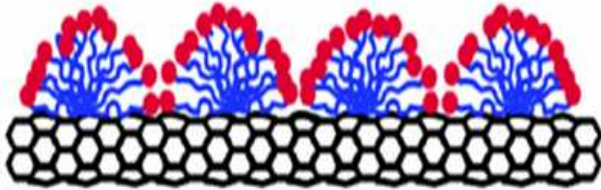
حالت اول: در این حالت نانولوله‌های کربنی تک جداره مرکز میسل‌های سیلندری شکل مواد فعال سطحی یونی را تشکیل داده است (شکل ۲).

حالت دوم: نانولوله‌های تک جداره می‌توانند توسط مواد فعال سطحی نیمه میسلی جذب شده پوشش داده شوند. این نوع جذب نیمه میسلی مواد فعال سطحی روی سطوح با انحنا بالای نانولوله‌های تک جداره می‌تواند از نظر انرژی نامطلوب باشد (شکل ۳).

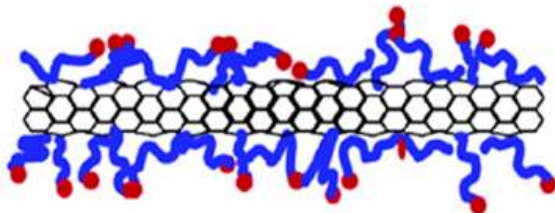
حالت سوم: نشان داده شده است که نظریه تشکیل میسل سیلندری در پراکنش‌های مایع سدیم‌دودسیل سولفات رد شده و پیشنهاد جذب اتفاقی بدون ساختار و آرایش یافتگی ترجیحی سر و دمی ماده فعال سطحی مطرح است که برای پایداری پراکنش بسیار قابل قبول می‌باشد [۱۲] (شکل ۴). مواد فعال سطحی مختلفی برای پراکنش نانولوله‌ها در زمینه‌های پلیمری بررسی شده است [۳]، مانند سدیم‌دودسیل بنزن سولفونات (SDBS)^۱، دودسیل‌تری‌متیل‌آمونیم‌بروماید (DTAB)^۲، هگزادسیل‌تری‌متیل‌آمونیم‌بروماید (CTAB)^۳، اکتیل‌فنل‌اتوکسیلات (Triton X-100)^۴، سدیم‌دودسیل سولفات (SDS)^۵ و غیره که با در نظر گرفتن نوع نانوکامپوزیت، شرایط واکنش و جنبه‌های اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳].



شکل ۲- طرح‌واره میسل‌های سیلندری متشکل از نانولوله و مواد فعال سطحی [۱۱].



شکل ۳- طرح‌واره نیمه میسل‌های متشکل از نانولوله و مواد فعال سطحی [۱۱].

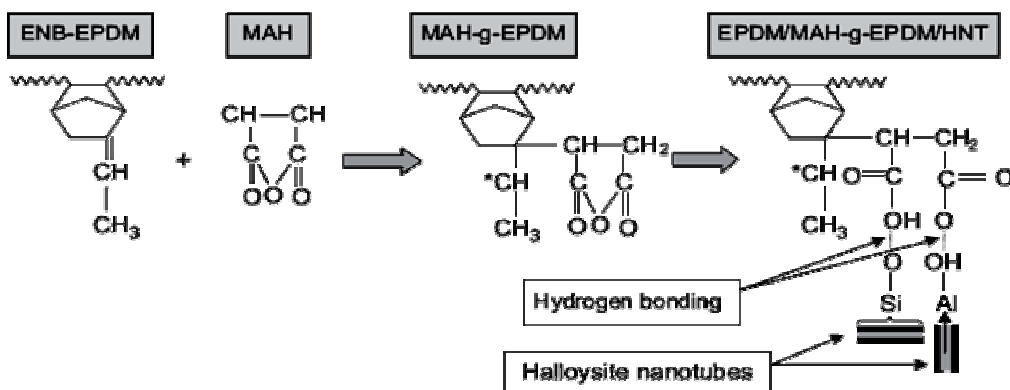


شکل ۴- طرح‌واره جذب اتفاقی بدون ساختار در دیسپرسیون‌های مایع سدیم‌دودسیل سولفات [۱۱].

۳-۱-۴- استفاده از مواد سازگارکننده

مواد سازگارکننده مانند مالئیک انیدرید در ترکیب با زمینه پلیمری نانوکامپوزیت سبب فعال شدن پلیمر در واکنش با نانولوله‌های کربنی [۱۴] می‌گردد. شکل ۵ مثالی از نحوه عملکرد یک نوع سازگارکننده (مالئیک انیدرید) را نشان می‌دهد که با استفاده از تشکیل پیوندهای هیدروژنی اتصال‌های سازگارکننده برقرار شده است.

- ¹ Sodium dodecylbenzenesulfonate
- ² Dodecyl trimethyl ammonium bromide
- ³ Hexadecyl trimethyl ammonium bromide
- ⁴ Octylphenol ethoxylate
- ⁵ Sodium dodecyl sulfate



شکل ۵- نحوه عملکرد یک نوع سازگارکننده مالئیک انیدرید [۱۴]

۳-۳- روش عامل‌دار کردن شیمیایی

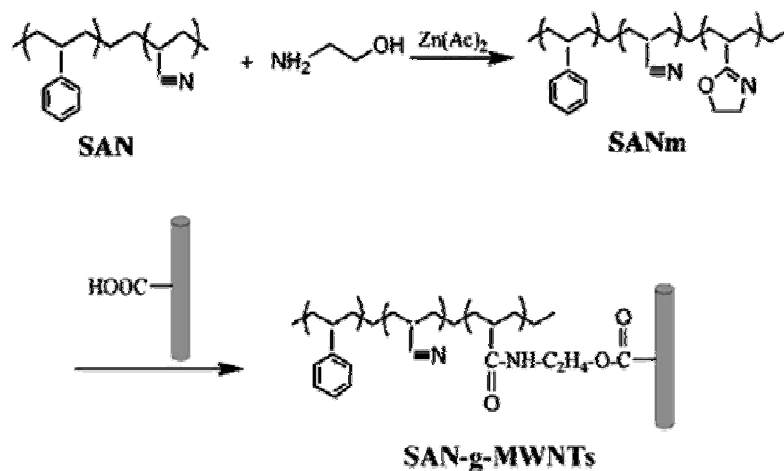
این روش شامل برقراری اتصالات کوالانسی و غیرکوالانسی به منظور افزایش حلالیت و فرآیندپذیری نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های پلیمری است. استفاده از آسیاب در اتمسفر مخصوص، اجازه وارد نمودن گروه‌های عاملی مانند تیول، آمین، آمید، کلرید، کربونیل، تیومتوکسی و آسیل کلراید به نانولوله‌های کربنی را می‌دهد. عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی تک جداره از طریق کاهش الکتروشیمیایی یک سری از نمک‌های آریل دی‌آزونیوم انجام شده است. همچنین عامل‌دار کردن از طریق اکسیداسیون نانولوله‌ها جهت تشکیل گروه‌های کربوکسیلیک، کربونیل یا هیدروکسیل در دیواره‌های نانولوله‌ها انجام می‌شود. این عامل‌ها سبب فعال‌تر نمودن ساختار نانولوله جهت واکنش‌های بیشتر و انحلال‌پذیری آن در زمینه‌های آلی می‌گردد. به عنوان مثال نانولوله‌های عامل‌دار شده توسط اکسیداسیون اسیدی می‌تواند آماده فلئوریزاسیون و واکنش‌های دیگر مانند واکنش آمین با گروه‌های آلکیل کربوکسیل متصل به نانولوله‌ها شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این روش‌ها در سنتز زمینه اپوکسی که از طریق گروه‌های عاملی آمین متصل به نانولوله با نانوذرات برهم‌کنش داده و تولید نانوکامپوزیت را تسهیل می‌کند بسیار موفق بوده است [۱۷].

۳-۱-۵- پلیمرهای کمکی در فرآیند مخلوط مذاب

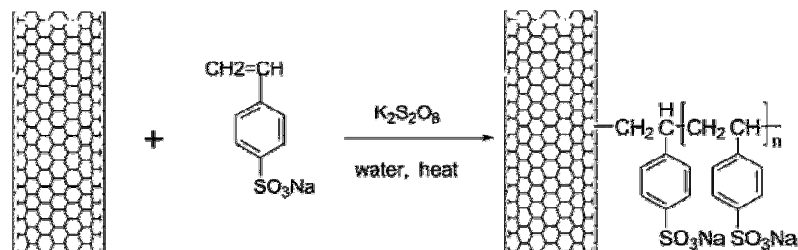
در این روش از پلیمرهای کمکی برای فعال نمودن سطح نانولوله‌ها [۱۵] جهت آمادگی برای واکنش با زمینه پلیمر طی فرآیند مخلوط کردن در حالت مذاب استفاده می‌گردد که در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود ابتدا استات روی به کوپلیمر استایرن-اکریلونیتریل افزوده شده و پس از انجام عملیات، کوپلیمر اصلاح شده توسط اگزازولین حاصل می‌شود. سپس این کوپلیمر اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی عامل‌دار شده توسط کربوکسیلیک اسید تحت حالت مذاب ترکیب شده و به این صورت نانولوله‌ها آماده واکنش با زمینه پلیمری می‌باشند.

۳-۲- پلیمریزاسیون درجا

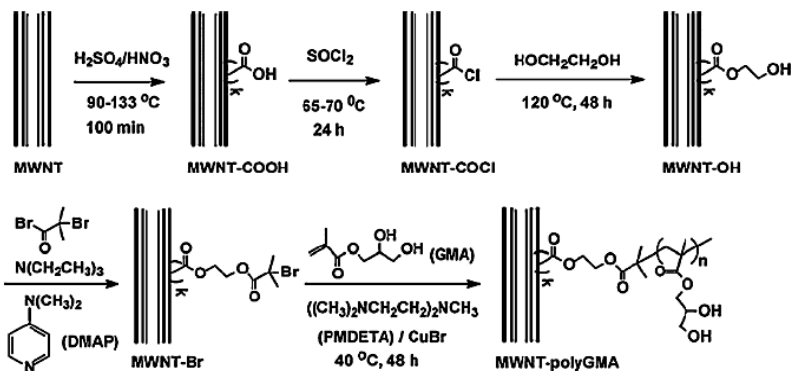
در این روش ذرات نانولوله در حین پلیمریزاسیون به پیش‌ماده پلیمر مربوطه افزوده می‌گردند. استفاده از این روش به دلیل ورود هم‌زمان نانولوله‌ها در کنار انجام فرآیند تشکیل زمینه پلیمر سبب پراکنش بسیار مناسب این ذرات در زمینه مربوطه می‌گردد که در شکل ۷ نشان داده شده است. نانولوله‌ها در حین انجام پلیمریزاسیون رادیکالی پلی استایرن به صورت درجا با آن ترکیب می‌گردند [۱۶].



شکل ۶- نحوه عملکرد پلیمرهای کمکی در فرآیند مخلوط مذاب [۱۵].



شکل ۷- روش پلیمریزاسیون درجا پلی استایرن با پلیمریزاسیون رادیکالی [۱۶].



شکل ۸- نحوه عامل‌دهی شیمیایی توسط پلیمریزاسیون رادیکالی انتقال اتم [۱۸].

۴- نتیجه‌گیری

به دلیل مشکلات موجود در پراکنش نانولوله‌های کربنی شامل ناهمگونی مخلوط‌های تولید شده به روش‌های مقدماتی رایج، آب‌گریزی شدید نانولوله‌های کربنی اصلاح نشده که مانع تجمع آنها می‌شود و همچنین اهمیت پراکنش مطلوب این ترکیبات در تهیه پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمری، در این تحقیق روش‌های پراکنش نانولوله‌های کربنی در نانوکامپوزیت‌های پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های پراکنش نانولوله‌ها شامل مخلوط کردن فیزیکی، پلیمریزاسیون درجا و عامل‌دهی شیمیایی است که معمولاً ترکیبی از این روش‌ها به منظور دستیابی به بازده بالاتر استفاده می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که روش امواج فراصوت همواره در کنار سایر روش‌ها بازده پراکنش خوبی را نشان می‌دهد. در عوض در روش مخلوط کردن مذاب، پراکنش نانولوله‌ها در زمینه پلیمری نسبت به پراکنش در مخلوط مایع ضعیف‌تر است. به علاوه به دلیل گرانروی بالاتر در این روش، درصد نانولوله کمتری در کامپوزیت استفاده می‌شود. روش پلیمریزاسیون درجا بازده مطلوبی را جهت پراکنش و توزیع نانولوله‌ها در زمینه پلیمری، در بین سایر روش‌ها از خود نشان می‌دهد. روش عامل‌دهی شیمیایی با وارد نمودن گروه‌های فعال در ساختار نانولوله‌ها سبب بهبود واکنش پذیری آنها با زمینه پلیمری می‌گردد. روش عامل‌دهی شیمیایی اساساً برگشت‌ناپذیر است مگر تحت شرایط سخت گرمایی و شیمیایی. انتخاب روش پراکنش مناسب بر حسب کاربرد نهایی نانوکامپوزیت و در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، در اختیار محققین می‌باشد.

عامل‌دار کردن از طریق فرآیندهای مختلف اکسیداسیون، در ادامه منجر به تشکیل پیوندهای کووالانسی می‌شود که با ایجاد برخی عیوب در ساختار نانولوله همراه است. به این صورت که هیبریداسیون sp^2 به sp^3 تبدیل می‌شود که می‌تواند سبب تغییراتی در خواص ذاتی نانولوله گردد. اصلاح الکتروشیمی سطح که سبب می‌شود زنجیره‌های پلیمری به صورت کووالانسی به سطح نانولوله اتصال یابند، به منظور حداقل کردن این عیوب استفاده شده است. از طرفی در این روش مشکلاتی نظیر کوتاه شدن و آسیب‌های مکانیکی از قبیل پیچش، خمش و جابجایی در ساختارهای کربنی که در روش‌های فراصوت برای پراکنش نانولوله‌ها مشاهده می‌شود رخ نمی‌دهد. کوتاه شدن نانولوله‌ها می‌تواند از این جهت زیان‌آور باشد که نسبت طول به قطر نانولوله‌ها که یکی از ویژگی‌های مهم آنها به عنوان رشته‌های تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری است را کاهش می‌دهد [۱۷]. در شکل ۸ عامل‌دهی شیمیایی توسط پلیمریزاسیون رادیکالی انتقال اتم نشان داده شده است. نانولوله‌ها ابتدا در دمای بالا توسط محلول اسید سولفوریک و اسید نیتریک دارای گروه های COOH شده، سپس در اثر واکنش با تیونیل کلراید دارای گروه COCl شده و پس از قرار گرفتن در محلول اتانول دارای گروه‌های OH می‌شوند. در مرحله بعد گروه Br جایگزین OH می‌شود و عامل‌دهی توسط مونومر گلیسیرول منومتاکریلات (GMA) و کاتالیست از این نقطه شروع می‌شود.

⁶ Glycerol methacrylate

۵- مراجع

1. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, Ph. Avouris (Eds.), "Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties and applications", Topics Appl. Phys. 80, 1, 2001.
2. Z. Han, A. Fina, "Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review", Prog. Polym. Sci. 36, 914, 2011.
3. W. A. Curtin, B. Sheldon, "CNT-reinforced ceramics and metals", Mater. Today 7 11, 44, 2004.
4. O. Meincke, D. Kaempfer, H. Weickmanna, C. Friedrich, M. Vathauer, H. Warth, "Echanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene", Polymer 45, 739, 2004.

5. C. Hepburn, "Polyurethanes Elastomers", Elsevier Applied Science, London, **1993**.
6. H. Koerner, W. Liu, M. Alexander, P. Mirau, H. Dowty, R. Vaia, "Deformation -morphology correlations in electrically conductive carbon nanotube-thermoplastic polyurethane nanocomposites", *Polymer* 46, 4405, **2005**.
7. J. W. Cho, J. W. Kim, Y.C. Jung, N. S. Goo, "Electroactive shape-memory polyurethane composites incorporating carbon nanotubes", *Macromol. Rapid Commun.* 26, 412, **2005**.
8. K. Y. Park, S. E. Lee, C. G. Kim, J. H. Han, "Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures", *Comp. Sci. Technol.* 66, 576, **2006**.
9. M. J. Schulz, A. D. Kelkar, M. J. Sundaresan, "Nanoengineering of Structural Functional, and Smart Materials", CRC, Taylor & Francis, New York, 285, **2006**.
10. T. Szymborski, "Dispersion of carbon nanotubes in polyol", M. Sc. Thesis, Warsaw, **2005**.
11. <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=955.php>
12. E. T. Thostensen, Z. Ren, T. W. Chou, "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites", *Compos. Sci. Technol.* 61, 1899, **2001**.
13. H. Xia, G. Qiu, Q. Wang, "Polymer/carbon nanotube composite emulsion prepared through ultrasonically assisted in situ emulsion polymerization", *Appl. Polym. Sci.* 100, 3123, **2006**.
14. F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, B. Fiedler, K. Schulte, "Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites", *Compos. Sci. Technol.* 45, 2300, **2005**.
15. M. Okamoto, T. Fujigaya, N. Nakashima, "Individual dissolution of single-walled carbon nanotubes by using polybenzimidazole and highly effective reinforcement of their composite films", *Adv. Funct. Mater.* 18, 1776, **2008**.
16. Z. Spitalsky, "Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties", *Prog. Polym. Sci.* 35, 357, **2010**.
17. N. J. Chen, J. Morikawa, A. Kishi, T. Hashimoto, "Thermal diffusivity of eutectic of alkali chloride and ice in the freezing-thawing process by temperature wave analysis", *Thermochim. Acta* 429, 73, **2005**.
18. L. Bokobza, "Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: a review", *Polymer* 48, 4907, **2007**.