

Polymerization
Quarterly, 2021
Volume 11, Number 1
Pages 3-15
ISSN: 2252-0449

A Brief Review on Thermal Conductive Polymeric Aerogel Composites

Narges Nazari and Ahmad Reza Bahramian*

Polymer Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box 14115-114, Tehran, Iran

Received: 9 March 2020, Accepted: 21 July 2020

Abstract

Aerogels have many applications in industry due to their very low density, high porosity, high specific surface area, and other unique properties. Thermal conductive polymer aerogels are widely used due to the high demand of industry for low density and high thermal conductive composites. The main application of thermal conductive polymer aerogels is shape stable template for thermal energy storage systems in phase change composites. Phase change materials (PCMs) are crystalline or semi-crystalline materials that have the ability to store or release thermal energy during the phase change from solid to liquid and vice versa. The amount of thermal energy storage/release strongly depends on melting/crystallization enthalpy and mass/volume fraction of phase change material in the system. The porous structure of the aerogel can appropriately store the molten phase change material and prevents its release. Increasing the loading capacity of PCMs due to the high thermal conductivity and porosity of thermal conductive aerogels result in fusion latent heat preserving and ensure their high efficiency in thermal energy storage. In this article, the most important thermal conductive polymer aerogels that researchers have studied in recent years, are reviewed. It has also been tried to introduce and investigate the appropriate conductive aerogels for thermal energy storage based on phase change material systems.

Key Words

aerogel,
nano-porosity,
thermal conductive,
phase change material composites,
thermal energy storage

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: abahramian@modares.ac.ir

مروری کوتاه بر کامپوزیت‌های ابروژل پلیمری رسانای گرما

نرگس نظری، احمد رضا بهرامیان*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۱۵

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۳۱

ایروژل‌ها به دلیل چگالی بسیار کم، تخلخل و مساحت سطح ویژه زیاد و سایر خواص منحصر به فرد کاربردهای فراوانی در صنعت دارند. ابروژل‌های پلیمری رسانای گرما با توجه به نیاز عمده صنعت به کامپوزیت‌های رسانای گرما و چگالی کم، پرکاربرد هستند. مهم‌ترین کاربرد ابروژل‌های پلیمری رسانای گرما در کامپوزیت‌های تغییر فاز (PCCs) به عنوان قالب پایدارکننده شکل برای ذخیره انرژی گرمایی است. مواد تغییر فاز (PCMs) به مواد بلوری یا نیمه بلوری گفته می‌شود که در خلال تغییر فاز از جامد به مایع و برعکس، دارای قابلیت ذخیره و دفع انرژی گرمایی هستند. میزان ذخیره یا دفع انرژی گرمایی بستگی به مقدار ماده تغییر فاز در سامانه و آنتالپی ذوب-بلورینی آن دارد. ساختار متخلخل ابروژل‌ها، مواد تغییر فاز مذاب را به خوبی در خود جای می‌دهد و از نشت آن‌ها جلوگیری می‌کند. افزایش ظرفیت بارگیری PCM‌ها به دلیل تخلخل زیاد ابروژل‌ها و نیز رسانندگی گرمایی زیاد ابروژل‌های رسانای گرما، حفظ گرمای نهان انجماد PCC‌ها را در پی دارد و بازده زیاد آن‌ها را در ذخیره انرژی تضمین می‌کند. در این مقاله، مهم‌ترین ابروژل‌های پلیمری رسانای گرما مرور شده‌اند که پژوهشگران در سال‌های اخیر آن‌ها را بررسی کرده‌اند. همچنین سعی شده است، ابروژل‌های رسانای مطلوب کاربرد ذخیره گرمایی با منطق استفاده از سامانه‌های تغییر فاز معرفی و تحلیل شود.

چکیده



نرگس نظری



احمد رضا بهرامیان

واژگان کلیدی

ایروژل،
نانومتخلخل،
رسانای گرمایی،
کامپوزیت‌های ماده تغییر فاز،
ذخیره انرژی گرمایی

مقدمه

با توسعه سریع دستگاه‌های الکترونیکی، مدیریت اتلاف گرما به چالش بزرگی تبدیل شده است. کامپوزیت‌های رسانای گرما با خواص مکانیکی خوب، نه فقط به‌خاطر بازده زیاد در اتلاف-جذب گرما، بلکه به‌دلیل وزن سبک، ضد خوردگی و ویژگی‌های فرایندپذیری آسان، توجه زیادی را جلب کرده‌اند. کامپوزیت‌های پلیمری رسانای گرما اغلب با ترکیب پلیمرها با پرکننده‌های رسانای گرما شامل ذرات فلزی Cu ، Ag ، نانولوله‌های کربنی، گرافن و سرامیک‌های شش‌وجهی بور نیتريد (BN) تهیه می‌شوند [۱]. کاهش جرم نانوکامپوزیت‌ها، به‌دلیل ذخیره انرژی و مصرف مواد بهینه، به مسئله مهمی در بیشتر کاربردها تبدیل شده است. روش بسیار مؤثری برای کاهش جرم و چگالی مواد، ایجاد تخلخل در خلال سنتز و تهیه ابروزل است [۲]. ولی بیشتر ابروزل‌ها، به‌دلیل تخلخل زیاد، استحکام مکانیکی کمی دارند. این استحکام کم، هنگامی که از ابروزل‌ها برای پرکردن اطراف ساختارهای سخت استفاده می‌شود، مشکلی ایجاد نمی‌کند. اما، هنگامی که به‌عنوان عناصر ساختاری اصلی استفاده می‌شوند، استحکام بیشتری نیاز است. بدین دلیل، از ترکیب و ساختارهای مختلف پلیمری برای افزایش استحکام ابروزل استفاده می‌شود [۳]. در این صورت، سطح ویژه زیاد و زنجیرهای پلیمری می‌توانند درون منافذ نانومتری ابروزل‌ها حبس شده و موجب افزایش برهم‌کنش بین پلیمر و پرکننده شوند [۲]. ابروزل‌ها ضمن دارا بودن خواص منحصر به‌فردی چون چگالی کم و تخلخل فراوان، رسانندگی گرمایی، ثابت دی‌الکتریک، ضریب شکست و سرعت صوت کمی دارند [۴-۲]. افزایش رسانندگی گرمایی ابروزل‌ها همواره مورد توجه بوده و سعی شده است تا رسانندگی گرمایی آن‌ها به‌منظور اتلاف-جذب گرما و کاربردهای خاص مانند کامپوزیت‌های تغییر فاز بهبود یابد. زیرا در سامانه‌های تغییر فاز، گرما باید از دیواره جامد ابروزل نگه‌دارنده به‌خوبی به مواد تغییر فاز منتقل شود.

مواد تغییر فاز به مواد بلوری گفته می‌شود که در خلال تغییر فاز از جامد به مایع و برعکس، قابلیت ذخیره و دفع انرژی گرمایی را دارند. میزان ذخیره یا دفع انرژی گرمایی بستگی به مقدار ماده تغییر فاز در سامانه و آنتالپی ذوب-بلورینگی آن دارد [۵]. PCM‌ها رسانندگی گرمایی کم و ثبات ابعادی ضعیفی دارند که به‌ترتیب موجب کاهش بازده انتقال گرما و نشت مذاب آن می‌شود. تلاش‌های زیادی برای بهبود رسانندگی گرمایی و پایداری شکلی PCM‌ها انجام شده که به‌طور کلی بر ساخت کامپوزیت‌های تغییر فاز با پرکننده‌های رسانای گرما تمرکز شده است [۶]. ساختار

متخلخل ابروزل‌ها، مواد تغییر فاز مذاب را به‌خوبی جای داده و از نشت مذاب آن‌ها جلوگیری می‌کند. افزایش ظرفیت بارگیری PCM به‌دلیل تخلخل زیاد ابروزل‌ها و نیز رسانندگی گرمایی زیاد ابروزل‌های رسانای گرما، حفظ گرمای نهان انجماد PCCs‌ها را در پی دارد و بازده زیاد آن‌ها در ذخیره انرژی را تضمین می‌کند [۵]. بنابراین لازم است، رسانندگی گرمایی ابروزل‌ها هرچه بیشتر افزایش یابد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری بدین منظور انجام گرفته و موجب افزایش درخور توجه رسانندگی گرمایی در ابروزل‌ها و کامپوزیت‌های آن‌ها شده است. در مقاله مروری حاضر، برترین کامپوزیت‌های پلیمری رسانای گرما طی سالیان اخیر بررسی شده است که به‌منظور مدیریت اتلاف-جذب گرما و به‌طور ویژه در کامپوزیت‌های تغییر فاز کاربرد دارد.

طبقه‌بندی ابروزل‌ها

روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی ابروزل‌ها مانند طبقه‌بندی براساس پیدایش، روش تهیه و ویژگی‌های ساختاری شامل اندازه و توزیع منافذ وجود دارد. اما روش قابل قبول که همه ابروزل‌ها را شامل می‌شود، طبقه‌بندی براساس ترکیب آن‌هاست. از این نظر ابروزل‌ها به دو نوع اصلی تقسیم می‌شوند، ابروزل‌های تک‌جزئی و کامپوزیت ابروزل‌ها. ابروزل‌های تک‌جزئی شامل ابروزل‌های غیرآلی و آلی و سنتزی هستند. نوع اصلی کامپوزیت ابروزل‌ها، ابروزل‌های هیبرید آلی و غیرآلی هستند. دلیل اصلی ترکیب ابروزل‌ها با گروه‌های آلی، اصلاح خواص ابروزل‌ها با حفظ خواص مثبت آن‌هاست.

کامپوزیت‌های ابروزل-فاز آلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- ابروزل‌های کامپوزیت هیبرید که در آن گروه‌های آلی و اسکلت ابروزل به‌طور کلی مستقل هستند و کامپوزیت حاصل شامل برهم‌کنش ضعیف مانند نیروی واندروالسی، نیروی الکتروستاتیکی یا پیوند هیدروژنی است.

۲- ابروزل‌های کامپوزیت هیبرید که در آن پیوند بین سطحی میان فاز آلی و جزء غیرآلی، پیوند کووالانسی است [۲].

سنتز کامپوزیت ابروزل‌ها

قدم اصلی در تهیه ابروزل، تشکیل شبکه سه‌بعدی بسیار متخلخل است که پارامترهای شیمیایی، نوع پیش‌ماده و شرایط واکنش روی آن اثر می‌گذارد [۳]. منافذ ابروزل‌ها می‌توانند به‌طور منظم آرایش یابند یا به‌طور نامنظم با کلوخه‌های ذرات کوچک‌تر یا ایجاد اتصال عرضی در زنجیرهای پلیمری ایجاد شوند. نوع، شکل و اندازه منافذ

گاز و خشک کردن انجمادی با منجمد کردن در دمای کمتر از 0°C ، حلال از ساختار جامد حذف می‌شود [۴]. سپس، کامپوزیت‌های ابروژل-پلیمر اغلب با اشباع ابروژل تهیه شده با مخلوط رزین پلیمر، ماده تغییر فاز، عامل پخت و شتاب‌دهنده تحت خلأ و گرمادهی آن برای مدت زمان مشخص به دست می‌آیند [۱].

نظریه‌های انتقال گرما در ابروژل

رسانندگی گرمایی کل در ابروژل‌ها مطابق معادله (۱) به صورت مجموع رسانندگی گرمایی گاز (λ_g)، رسانندگی گرمایی جامد (λ_s) و رسانندگی گرمایی تابشی (λ_r) تعریف می‌شود:

$$\lambda_t = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_r \quad (1)$$

رسانندگی گرمایی گاز ابروژل‌های پر شده با هوا با معادله Knudsen (معادله (۲)) بیان می‌شود:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{g0} \pi}{(1 + \beta k_n)} k_n = \frac{l_g}{\varphi} \quad (2)$$

با توجه به اندازه منافذ ابروژل ($1-100 \text{ nm}$) و مسیر آزاد مولکول‌های گاز در فشار 1 bar (70 nm) رسانندگی گاز تا حدودی در فشار اتمسفر محدود می‌شود. رابطه بین قطر منافذ و چگالی ابروژل از معادله (۳) به دست می‌آید:

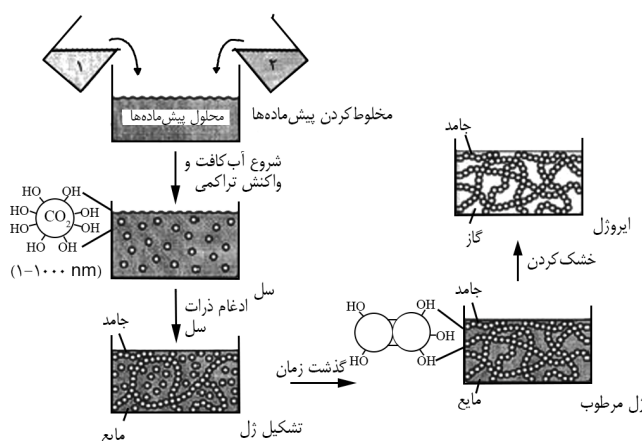
$$\varphi \propto \frac{1}{\rho^{\gamma}} \quad (3)$$

اندازه منافذ کوچک‌تر باعث افزایش k_n و کاهش رسانندگی گرمایی گاز می‌شود. رسانندگی گرمایی تابشی با معادله (۴) توصیف می‌شود:

$$\lambda_r = \frac{\left(\frac{16}{3}\right) n^2 \sigma T^3}{e(T) \rho} \quad (4)$$

در ابروژل‌های آلی، مسیر آزاد فوتون‌های زیرقرمز در مقایسه با اندازه نمونه کوچک است و در دمای کاربردی اصولاً رسانندگی گرمایی تابشی درخور توجه نخواهد بود. رسانندگی گرمایی جامد در ابروژل‌های متخلخل در مقایسه با مواد غیرمتخلخل با توجه به محدودیت تحرک زنجیرها به دلیل فراوانی منافذ، به شدت کم‌تر است. ارتباط رسانندگی گرمایی جامد با چگالی به صورت معادله (۵) است:

$$\lambda_s = C \rho^{\alpha} \quad (5)$$



شکل ۱- نمایی از ساخت ابروژل با پلیمر شدن سل-ژل [۴].

روی ویژگی‌های فیزیکی مواد متخلخل اثرگذارند [۲]. شکل ۱ نمایی از ساخت ابروژل را با فرایند سل-ژل نشان می‌دهد. فرایند ساخت ابروژل مطابق این شکل شامل سه مرحله اصلی است:

۱- انتقال محلول-سل (solvent-sol transition)، سل تعلیق کلوئیدی ذرات جامد در یک مایع بوده که فاز پراکنده در آن بسیار کوچک است. ذرات سل از پیش ماده مولکولی حل شده به صورت خودبه‌خود یا با واکنش شیمیایی شتاب‌یافته تشکیل می‌شوند. سپس، آب‌کافت و واکنش تراکمی با تغییر pH یا دمای واکنش آغاز می‌شود.

۲- انتقال سل-ژل (sol-gel transition)، تشکیل ژل فرایندی بوده که در آن یک سل پراکنده آزاد به شبکه جامد سه‌بعدی تبدیل می‌شود که با حلال احاطه شده است. وقتی سل به نقطه ژل شدن می‌رسد، فرض می‌شود که آب‌کافت و واکنش تراکمی به‌طور کامل انجام گرفته است. تغییرات از محلول مایع به مرحله جامد به اصطلاح سل-ژل نامیده می‌شود. در طول این رخداد، ذرات ابتدایی تشکیل و سپس به شکل خوشه جمع می‌شوند و اتصال درونی نهایی ایجاد می‌شود.

۳- انتقال ژل-ابر ژل (gel-aerogel transition)، در تهیه ابروژل فرایند نهایی و بحرانی‌ترین آن، خشک کردن است. طی این فرایند مایع در طول هیدروژل بدون آسیب جدی به ساختار ژل، خارج می‌شود. چند روش برای خشک کردن ژل وجود دارد، وقتی ماده با اعمال گرما و فشار معمولی در بازه محدود زمانی خشک می‌شود، مقدار تنش‌های مویینگی بسیار زیاد خواهد بود که باعث جمع شدن ماده می‌شود. برای جلوگیری از این رخداد، به کمک دو روش خشک کردن ابربحرانی (supercritical drying, SCD) که ماده را با گرما و فشار زیاد در شرایط ابربحرانی خشک می‌کند، یا انتقال مستقیم جامد-

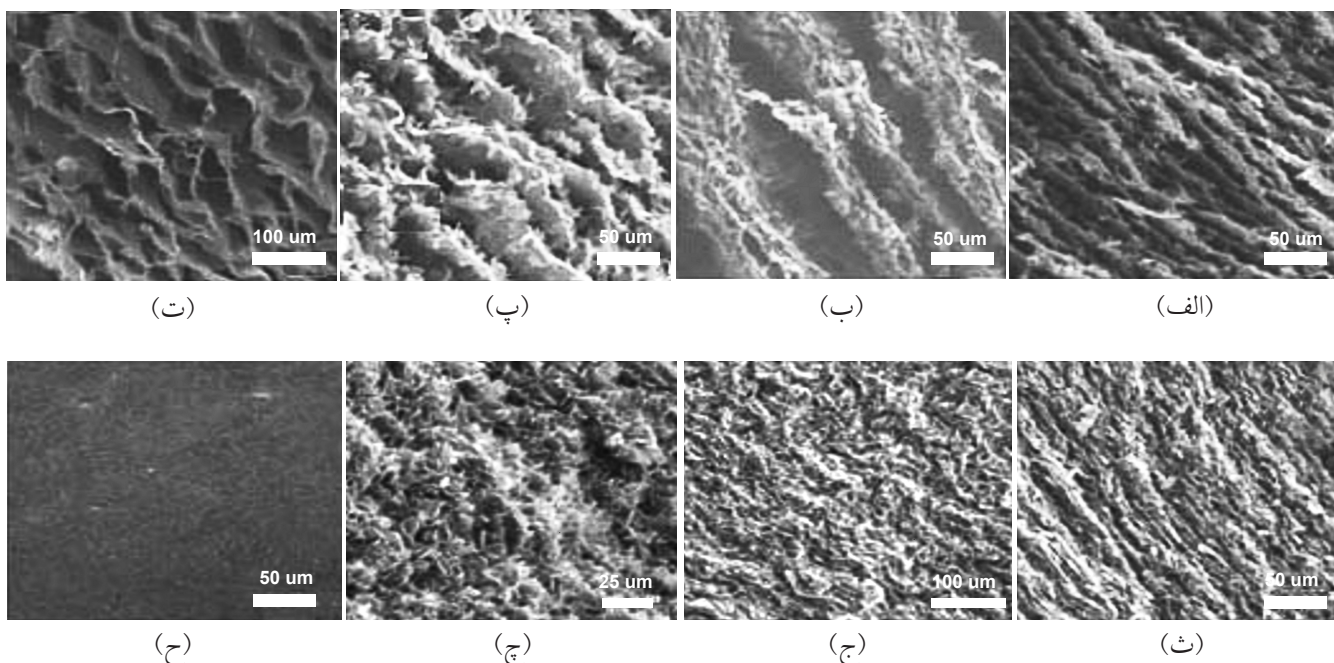
ایروژل گرافن-BN یک ساختار منظم پیازمانند شبیه به ساختار گرافن خالص با توزیع یکنواخت صفحه‌های GO و BN دارد. این موضوع نشان می‌دهد، افزودن BN ساختار منظم گرافن را به علت مشابه بودن و برهم کنش واندروالسی بین صفحه‌های GO و BN برهم نمی‌زند. شکاف‌های بزرگ در ابروژل سنتز شده باعث کاهش چگالی و رسانندگی گرمایی آن می‌شود. در واقع، به خاطر شکاف‌های بزرگ ($20\text{ }\mu\text{m}$) بین لایه‌هاست که کاهش حجم ابروژل در جهت شعاعی خیلی بیشتر از جهت محوری است (شکل ۲-الف و ت). در ظرفیت کم BN، چگالی GBA به خاطر نیروهای موئینگی زیاد است که باعث تماس صفحه‌ها با یکدیگر می‌شود. اما در ظرفیت زیاد BN، چگالی کاهش می‌یابد و ساختار لایه‌ای متمایز تر می‌شود (شکل ۲-الف تا پ).

وجود نانوصفحه‌های بسیار رسانای BN به طور مؤثر از کاهش حجم هیدروژل BN-گرافن اکسید کاهش یافته (RGO) در شرایط محیط جلوگیری کرده و به حفظ ساختار متخلخل بسیار منظم ابروژل کمک می‌کند. به طوری که در ابروژل خشک شده با روش محیطی نیز همچنان مسیرهای پیوسته انتقال گرما و منافذ نانومتری آن حفظ شده است (شکل ۲-ت تا و). افزون بر این، چگالی ابروژل‌های BN-RGO می‌تواند به آسانی با تغییر نسبت جرم اولیه جزء BN:GO تنظیم شود. به علت اینکه ابروژل گرافن-BN ساختاری

به طور کلی، ساختار متخلخل ابروژل‌ها باعث حذف رسانندگی و جابه جایی گاز و کاهش شدید رسانندگی گرمایی می‌شود. اتصال میان ذرات و چگالی، رسانندگی جامد را تعیین می‌کند. اندازه منافذ، رسانندگی گاز را کنترل می‌کند و انتقال تابشی، وابسته به جذب زیرقرمز ساختار ابروژل است [۷].

ایروژل‌های گرافن-بور نیتريد (BN)

در میان پرکننده‌های رسانای گرما، گرافن به علت رسانندگی گرمایی ذاتی زیاد و خواص مکانیکی خوب، برتری دارد. اگر چه کامپوزیت‌های ابروژل پلیمری گرافن معمولاً رسانندگی گرمایی متوسطی دارند، ولی در مقابل صفحه‌های بسیار منظم گرافن می‌توانند با استفاده از رسانندگی گرمایی زیاد صفحه‌ها به طور کامل، یک شبکه سه بعدی رسانای گرمایی بسیار باکیفیت تشکیل دهند [۱]. علت متوسط رسانندگی گرمایی این کامپوزیت‌ها را می‌توان توزیع تصادفی صفحه‌های گرافن یا مقاومت گرمایی بین سطحی میان صفحه‌های گرافن در سطح مشترک پلیمر-گرافن نسبت داد. Fei و همکاران [۱] ابروژل هیبرید گرافن-بور نیتريد (GBA) را با چگالی متوسط و رسانندگی گرمایی زیاد بررسی کردند. شکل ۲ تصاویر SEM ابروژل گرافن و ابروژل گرافن-بور نیتريد را در نسبت‌های مختلف نشان می‌دهد. بر این اساس،



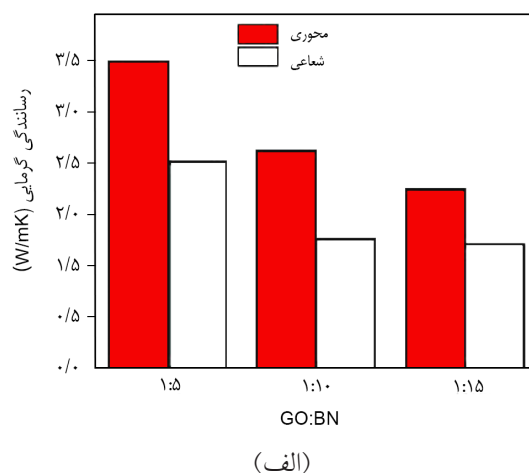
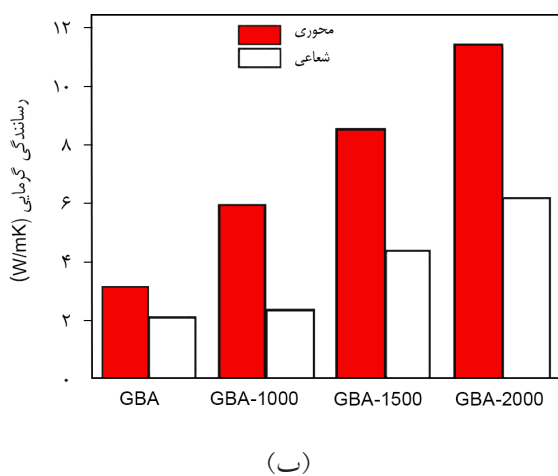
شکل ۲- تصاویر SEM ابروژل تهیه شده با خشک کردن: GBA با نسبت (الف) $\text{GO:BN}=1:15$ ، (ب) $\text{GO:BN}=1:10$ و (پ) $\text{GO:BN}=1:5$ و (ت) گرافن با روش انجماد و GBA با نسبت (ث) $\text{GO:BN}=1:15$ ، (ج) $\text{GO:BN}=1:10$ و (چ) $\text{GO:BN}=1:5$ و (ح) ابروژل گرافن با روش محیطی [۱].

نمی‌کند، اما عملکرد رسانندگی گرمایی شبکه‌های گرافن به‌طور فوق‌العاده افزایش می‌یابد. تنش‌زدایی در دمای 2000°C باعث دستیابی به رسانندگی زیاد $11/01\text{ W/mK}$ و بازده 277% شده است که می‌توان به اهمیت تنش‌زدایی برای ازبین بردن نقص‌های صفحه‌های گرافن پی برد.

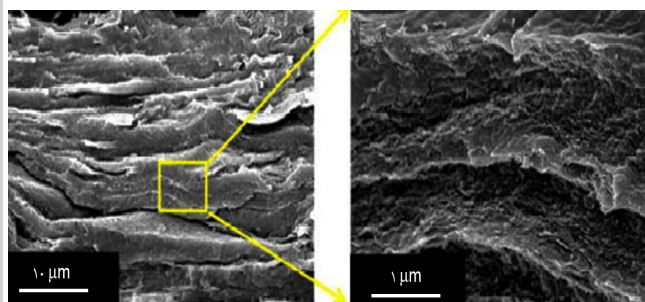
ایروزل‌های گرافن-سلولوز

سلولوز با رسانندگی گرمایی زیاد، از زمان توسعه مواد الکترونیکی که در زمینه مدیریت گرما تقاضای افزون‌تری داشته، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. همان‌طور که گفته شد، یک روش افزایش رسانندگی گرمایی (λ)، افزودن پرکننده‌های رسانا مانند گرافن به ماتریس پلیمری است. صفحه‌های دوبعدی گرافن با یکدیگر اتصال درونی دارند که باعث جریان‌یافتن شار گرمایی در طول صفحه‌های گرافن می‌شوند و به‌عنوان شبکه سه‌بعدی پیوسته و رسانای گرما عمل می‌کنند. پرکننده‌های معدنی با نسبت منظر زیاد به آرایش در جهت صفحه‌ای تمایل دارند که باعث افزایش رسانندگی گرمایی ناهمسانگرد کامپوزیت و رسانندگی زیاد در جهت صفحه‌ها (λ_1) می‌شود [6]. به‌عنوان مثال، Zhu و همکاران [8] کاغذ کامپوزیتی BN را با صاف کردن تعلیق‌های نانوصفحه‌های BN و سلولوز نانولیفچه‌ای شده (NFC) ساختند. آن‌ها مقدار $26/2\text{ W/mK}$ را برای رسانندگی گرمایی کامپوزیت در جهت محوری (λ_1) فقط با 5% وزنی BN به‌دست آوردند. آرایش‌یافتگی الیاف سلولوز باعث رسانندگی گرمایی بیشتر در جهت صفحه‌ای نسبت به جهت عمودی می‌شود. با افزودن پرکننده‌های رسانا مانند

ناهمسانگرد دارد، کامپوزیت‌های اپوکسی آن نیز رسانندگی گرمایی متفاوتی در جهت شعاعی و محوری دارند. به‌خاطر وجود مسیر پیوسته انتقال گرما، رسانندگی گرمایی اپوکسی-GBA در جهت محوری $3/06\text{ W/mK}$ است. ولی در جهت شعاعی، به‌علت شکاف بین لایه‌های گرافن که با رزین اپوکسی پر شده است، رسانندگی گرمایی $2/05\text{ W/mK}$ حاصل می‌شود. این موضوع افزایش درخور توجه رسانندگی گرمایی آن را نسبت به کامپوزیت پر شده با BN با رسانندگی گرمایی $0/87\text{ W/mK}$ و اپوکسی خالص با رسانندگی گرمایی $0/15\text{ W/mK}$ در پی دارد. دلیل آن را می‌توان وجود صفحه‌های بسیار رسانای گرافن دانست. شکل ۳ نمودار رسانندگی گرمایی کامپوزیت اپوکسی-GBA برحسب نسبت GO:BN و مقایسه رسانندگی گرمایی کامپوزیت اپوکسی-GBA با و بدون تنش‌زدایی را نشان می‌دهد. در شکل ۳-الف با افزایش ظرفیت BN در GBA، کامپوزیت‌ها کاهش رسانندگی گرمایی را نشان می‌دهند. علت این است که با افزایش ظرفیت BN، شکاف بین BN و BN بیشتر شده و باعث کاهش رسانندگی گرمایی می‌شود. ولی در GBA بدون BN کافی، کاهش حجم افزایش یافته است. بنابراین، باید به مقدار بهینه نسبت جرم GO:BN دست یافت که مقدار آن $1:5$ به‌دست آمده است. مطابق شکل ۳-ب با افزایش دمای تنش‌زدایی گرمایی، رسانندگی گرمایی کامپوزیت اپوکسی-GBA افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است، اگرچه ظرفیت BN ($39/8\%$ وزنی) خیلی بیشتر از ظرفیت گرافن ($4/2\%$ وزنی) در کامپوزیت است، ولی شبکه گرافن به‌عنوان شبکه اصلی رسانای گرما عمل می‌کند. پس از تنش‌زدایی، رسانندگی گرمایی شبکه‌های BN تغییر



شکل ۳- نمودار رسانندگی گرمایی کامپوزیت اپوکسی-GBA: (الف) برحسب نسبت GO:BN و (ب) با نسبت GO:BN=5 با و بدون تنش‌زدایی [1].



شکل ۴- تصاویر SEM سلولوز-GA [۶].

بهبود مؤثر رسانندگی گرمایی در PCCs باشند. افزون بر رسانندگی گرمایی، پایداری شکلی PCMs نیز بسیار مورد توجه بوده است. پایداری شکلی ضعیف معمولاً باعث نشت جزء تغییر فازدهنده آلی در طول چرخه مایع و جامد شدن می‌شود. روش‌های زیادی برای بهبود پایداری شکلی PCMs شامل میکروکپسول‌سازی، پیوند شیمیایی و آلیاژ فیزیکی با مواد پوشش‌دهنده برای تولید PCCs انجام شده است. میکروکپسول‌سازی با خطر آسیب دیدن پوشش در هنگام ذوب PCM‌ها روبه‌روست. PCM‌های جامد-جامد نیز که با پیوند شیمیایی به دست می‌آیند، اغلب دمای انتقال زیادی نشان می‌دهند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. اگرچه از آلیاژ فیزیکی برای تهیه PCCs با پایداری شکلی شامل کامپوزیت‌های سلولوز-PEG، ابروزل-PEG و کیتوسان-PEG [۱۰] استفاده شده، اما پوشش آن‌ها هیچ اثر مثبتی بر رسانندگی گرمایی PCCs نداشته است. بنابراین، ترکیب پرکننده‌ها با رسانندگی گرمایی زیاد نظیر گرافن و مواد پوشش‌دهنده نظیر سلولوز، نقص‌های PEG را می‌پوشاند. ابروزل‌های سلولوز-گرافن دوست‌دار محیط زیست هستند و به‌عنوان یک شبکه پوششی بسیار سبک برای PCCs شامل پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) به‌خاطر ساختار بسیار متخلخل و خواص مکانیکی زیاد به کار می‌روند. افزون بر این، شبکه‌های سه‌بعدی یک ساختار کپسولی مناسب برای جلوگیری از نشت PEG مذاب، به‌خاطر برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی PEG و سلولوز، مهیا می‌کنند. حقیقت این است که گرافن به سلولوز رسانندگی گرمایی زیاد می‌دهد و در عوض سلولوز به گرافن شکننده، استحکام می‌بخشد و خواص مکانیکی آن را بهبود می‌دهد [۱۱]. ترکیب ویژگی‌های گرمایی و مکانیکی، کامپوزیتی مناسب برای مدیریت گرما می‌سازد. رسانندگی گرمایی کامپوزیت‌های گرافن-سلولوز-PEG (PCGX) با درصد‌های مختلف گرافن در جدول ۱ نشان داده شده است. با افزایش مقدار گرافن، رسانندگی گرمایی بهبود می‌یابد. کامپوزیت حاصل با فقط ۵/۳٪ وزنی گرافن، رسانندگی گرمایی ۱/۳۵ W/mK

گرافن، صفحه‌های آن نیز در جهت جانبی آرایش یافته و مقدار λ_p سلولوز می‌تواند به‌طرز چشمگیری بهبود یابد. اما، مشکل افزایش رسانندگی گرمایی در جهت عمود (λ_p) به علت مقاومت گرمایی زیاد بین سطوح سلولوز و سطح مشترک ماتریس-پرکننده همچنان باید رفع شود [۶].

Chen و همکاران [۶] نوعی زیست‌پلاستیک سلولوز را تولید کرده‌اند که خواص گرمایی آن با ابروزل‌های گرافن (GA) دارای اتصال درونی سه‌بعدی افزایش یافته است. رسانندگی گرمایی کامپوزیت حاصل در جهت عمود ۰/۶۷ W/mK یعنی ۲۱۹٪ افزایش و در جهت موازی ۰/۷۲ W/mK یعنی ۴۴٪ افزایش داشته است. در حالی که λ_p زیست‌پلاستیک سلولوز خالص ۰/۲۱ W/mK بوده که درست معادل پلاستیک‌های معمولی است. سختی کامپوزیت سلولوز-GA نیز مقدار ۱۴۸ MPa و مدول یانگ آن ۲/۳ GPa به‌دست‌آمده که بیش از تمام پلاستیک‌های رایج مانند نایلون و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) است.

عملکرد مناسب کامپوزیت سلولوز-گرافن را می‌توان به تشکیل شبکه مؤثر رسانای گرما و چسبندگی خوب بین دیواره‌های سلول گرافن با سلولوز نسبت داد. ساختار GA نقش مهمی در بهبود نفوذ گرمایی ابروزل گرافن-سلولوز بازی می‌کند. شکل ۴ تصاویر SEM سلولوز-GA را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل می‌توان دید، کامپوزیت سلولوز-GA ساختاری لایه‌ای دارد و سلولوز میان دیواره‌های سلولی گرافنی درهم تنیده است. پس از پرس گرم، دیواره‌های سلولی گرافن و سلولوز به‌هم فشرده‌تر شده و ساختارهای سه‌بعدی را تشکیل داده‌اند که هنوز هم حفظ شده‌اند. چسبندگی بین‌سطحی خوب میان سلول‌های گرافن و سلولوز، انتقال گرما را آسان می‌کند. عملکرد گرمایی خوب GA تا حد زیادی به لایه‌های انباشته گرافن بستگی دارد که مسیر رسانندگی گرمایی محوری را ایجاد می‌کند. صفحه‌های گرافن با یکدیگر برای ایجاد مسیر پیوسته انتقال گرما، اتصال دارند. شار گرما از میان صفحه‌های آن جریان یافته و پس از جمع شدن در نقطه اتصال، به صفحه‌های گرافن مجاور انتقال می‌یابد. گروه‌های عاملی در GA با سلولوز اثر متقابل دارند و مقاومت گرمایی بین‌سطحی را کاهش می‌دهند. افزون بر این وجود سلولوز، منافذ GA را اشغال و کامپوزیت را جامد می‌کند.

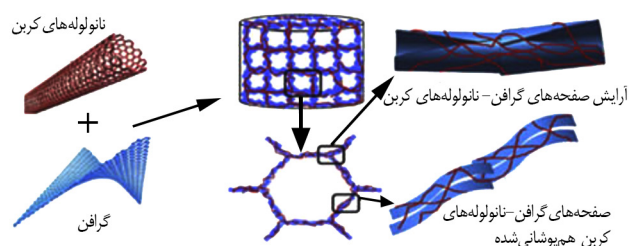
Yang و همکاران [۹] نوعی کامپوزیت‌های تغییر فاز را با استفاده از ابروزل سلولوز-گرافن با رسانندگی گرمایی زیاد و پایداری ابعادی مطلوب تولید کردند. نانوصفحه‌های دوبعدی گرافن (GNPs) با رسانندگی گرمایی زیاد می‌توانند مورد مناسبی برای

جدول ۱- رسانندگی گرمایی کامپوزیت‌های PCG_x با ظرفیت‌های مختلف گرافن [۹].

نمونه	PCG_0	PCG_1	PCG_2	PCG_3	PCG_4	PCG_5	PCG_6
PEG (%)	۹۳/۱	۹۲/۱	۹۱/۵	۹۱/۳	۹۰/۶	۹۰/۱	۸۹/۲
سلولوز+ECH (%)	۶/۹	۶/۴	۶/۱	۵/۸	۵/۹	۵/۵	۵/۵
گرافن (%)	۰	۱/۵	۲/۴	۲/۹	۳/۵	۴/۴	۵/۳
رسانندگی گرمایی در $30^{\circ}C$ (W/mK)	۰/۲۴	۰/۴۰	۰/۵۶	۰/۷۴	۰/۹۶	۱/۱۶	۱/۳۵
رسانندگی گرمایی در $70^{\circ}C$ (W/mK)	۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۶۶	۰/۸۱	۱/۰۲	۱/۲۹	۱/۶۰

خواص انتقال گرمای زیاد ساختند. شکل ۵ نمایی از ساختار ابروزل گرافن-CNT را نشان می‌دهد. در این شکل، وجود CNT موجب می‌شود که با صفحه‌های گرافن پیوند دهد، از لغزش آن‌ها تحت فشار جلوگیری کند و با افزایش زیاد سختی کشسانی دیواره‌های سلولی، باعث کشسانی زیاد ابروزل شود. در این صورت، ابروزل گرافن-CNT تحت کرنش فشاری زیاد ۸۰٪ باز هم مسیر انتقال گرمای پیوسته را حفظ می‌کند و به علت افزایش مقدار گرافن در واحد حجم، رسانندگی گرمایی ابروزل نهایی زیاد می‌شود. همچنین، می‌توان با افزایش چگالی ابروزل ابتدایی، رسانندگی گرمایی را زیاد کرد.

اندازه‌گیری مقاومت گرمایی براساس استاندارد ASTM D5470 انجام می‌شود که در آن نمونه بین دو صفحه مسی قرار می‌گیرد و با کرنش فشاری به شکل فیلم درمی‌آید. مقاومت بین سطحی گرمایی R_{TIM} ها با معادله (۶) و ضریب رسانندگی گرمایی (K) TIM و مقاومت تماس گرمایی (R_c) در طول سطح TIM/Cu با معادله خطی (۷) برای ضخامت‌های مختلف TIM به دست می‌آید:



شکل ۵- نمایی از ساخت ابروزل‌های Gr/CNT و مدل‌های CNT گره‌خورده که از سرخوردن صفحه‌های هم‌پوشانی شده گرافن جلوگیری می‌کند و مانع ایجاد شکاف در صفحه‌های گرافن هم‌پوشانی نشده نیز می‌شود [۱۱].

یعنی ۴۶۳٪ بیش از کامپوزیت بدون گرافن، دارد [۹].

پایداری شکلی کامپوزیت‌های PCG_x و PEG نیز بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است، پس از $61^{\circ}C$ ، PEG خالص ذوب می‌شود و نمی‌تواند شکل خود را حفظ کند. ولی در مقابل کامپوزیت‌های PCG_x ، حتی در دمای $100^{\circ}C$ نیز شکل خود را بدون هیچ نشی حفظ می‌کنند که دلیل آن وجود شبکه‌های سه‌بعدی سلولوز است.

ایروزل‌های گرافن-نانولوله کربن (CNT)

براساس مطالب بیان‌شده، توسعه دستگاه‌های الکترونیکی با هدف اتلاف-جذب انرژی گرمایی مسئله مهمی برای طول عمر دستگاه‌ها و سرعت کار آن‌هاست. اما شکاف بین سطح تماس موجب مقاومت بین سطحی گرمایی زیادی می‌شود. مواد سطح مشترک گرمایی (thermal interface material, TIMs) می‌توانند بین سطح‌های جفت‌شده قرار گیرند، به‌خوبی سطح را کاهش دهند و گرادیان دما را در طول سطح مشترک به حداقل برسانند [۱۲]. همچنین، انعطاف‌پذیری زیاد آن‌ها برای تماس خوب با سطح جفت‌شونده لازم است. برای این منظور، گرافن به دلیل رسانندگی گرمایی مناسب و انعطاف‌پذیری کافی، مناسب است. با وجود این، چگالی کم و تخلخل زیاد گرافن موجب می‌شود تا رسانندگی گرمایی آن به‌تنهایی مطلوب نباشد و لازم شود باز هم رسانندگی گرمایی گرافن افزایش یابد [۱۳]. بدین منظور، می‌توان درصد حجمی گرافن را با اعمال فشار مکانیکی افزایش داد، ولی گرافن خالص سه‌بعدی تحت فشار مکانیکی از بین می‌رود و نمی‌تواند شکل خود را حفظ کند [۱۱].

Peng و همکاران [۱۱] ابروزل گرافن-CNT بسیار کشسان را با

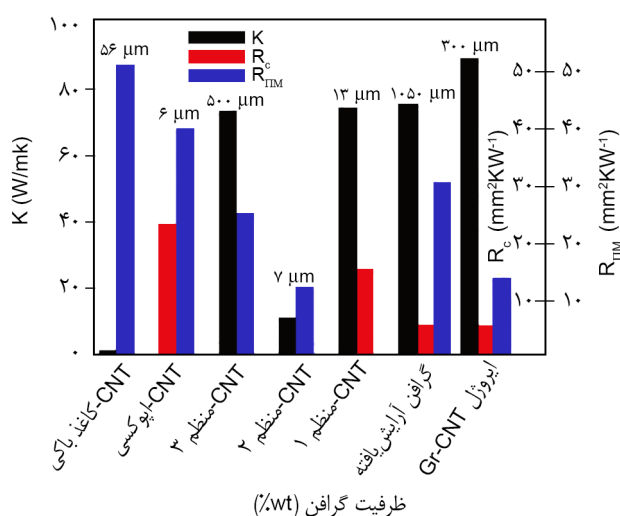
جدول ۲- مقادیر چگالی‌های ابتدایی و تحت فشردگی، رسانندگی گرمایی و مقاومت‌های تماس و بین سطحی گرمایی برای ابروزل‌های Gr/CNT تحت کرنش فشردگی ۸۰٪ [۱۱].

نمونه	ρ_i (mg/cm ³)	ρ_c (mg/cm ³)	K (W/mK)	R_c (mm ² K/W)	R_{TIM} (mm ² K/W)
Gr/CNT-2	۲۳	۱۲۹	۴۲/۳	۶/۲	۱۹/۵
Gr/CNT-3	۴۶	۲۳۱	۶۳/۹	۵/۷	۱۶/۱
Gr/CNT-4	۶۱	۳۰۵	۷۷/۵	۵/۵	۱۴/۸
Gr/CNT-5	۸۵	۴۲۴	۸۸/۵	۵/۱	۱۳/۶

Zhang و همکاران [۱۴] نیز با استفاده از CNT و قراردادن آن در ماتریس پلیمری پلی ۴،۳-اتیلن دی‌اکسی تیوفن و پلی‌استیرن سولفونات و در مجاورت مقدار کمی پلی‌وینیل الکل (PVA) موفق به ساخت ابروزل‌های ابرسبک پلیمر-CNT با چگالی $0.04-0.07 \text{ g/cm}^3$ شده‌اند. نانولوله‌های کربنی به‌کاررفته در این کار به‌صورت نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) دست‌نخورده یا اصلاح‌شده با اسید بودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، افزودن CNT موجب بهبود پایداری گرمایی، رسانندگی الکتریکی و افزایش سطح ویژه پلیمر شده است.

ابروزل‌های گرافن (GAs)

افزایش رسانندگی گرمایی در کامپوزیت‌های برپایه گرافن هنوز به‌علت کلوخه‌شدن، نقص در طول نانوصفحه‌های گرافن و برهم‌کنش این نانوصفحه‌ها و ماتریس پلیمری، محدود است.



شکل ۶- مقایسه خواص انتقال گرمایی TIM‌های گزارش‌شده با ابروزل Gr/CNT-5 [۱۱].

$$R_{TIM} = \frac{\Delta T \cdot A_{sample}}{Q} \quad (6)$$

$$R_{TIM} = 2R_c + \frac{1}{k} \quad (7)$$

که در آن، A_{sample} ناحیه مقطع عرضی نمونه، Q شار گرمایی میان نمونه و ΔT گرادیان دما در طول نمونه است. مقادیر چگالی ابتدایی (ρ_i)، چگالی تحت فشردگی نمونه (ρ_c)، رسانندگی گرمایی آن (K)، مقاومت تماس گرمایی (R_c) و مقاومت بین سطحی گرمایی (R_{TIM}) در کرنش فشردگی ۸۰٪ برای ابروزل‌های مختلف Gr/CNT در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲ نشان می‌دهد، با افزایش غلظت GO/CNT ساختار متخلخل چگال‌تر، میانگین اندازه منافذ کوچک‌تر و استحکام فشردگی بیشتر می‌شود. با افزایش چگالی ابتدایی، رسانندگی گرمایی افزایش و مقاومت گرمایی اندکی کاهش می‌یابد. بیشینه رسانندگی گرمایی $88/5 \text{ W/mK}$ و کمینه مقاومت گرمایی بین سطحی $13/6 \text{ mm}^2\text{K/W}$ برای ابروزل Gr/CNT-5 با چگالی ابتدایی 85 mg/cm^3 به‌دست آمد.

شکل ۶ مقایسه خواص انتقال گرمایی TIM‌های گزارش‌شده براساس کربن را با ابروزل Gr/CNT-5 نشان می‌دهد که بیانگر بیشترین رسانندگی گرمایی ابروزل Gr/CNT نسبت به سایر TIM‌هاست. زیرا، کربن بیشتری در واحد حجم برای انتقال گرما شرکت می‌کند. مقاومت گرمایی بین سطحی کم ابروزل Gr/CNT ناشی از انعطاف‌پذیری زیاد صفحه‌های گرافن و CNT است که باعث جفت شدن سطح مشترک آن‌ها می‌شود. براساس معادله (۷)، TIM با ضخامت بیشتر، مقاومت گرمایی بین سطحی زیادتری دارد. ولی مقاومت گرمایی بین سطحی ابروزل Gr/CNT-5 با ضخامت فشردگی $300 \mu\text{m}$ حتی کمتر از کاغذ باکی CNT با ضخامت $56 \mu\text{m}$ بوده که دلیلی بر ارجحیت این ابروزل است.

گرمایی میان نانوصفحه‌های گرافن $12/2 \text{ W/mK}$ پیش‌بینی می‌کند. روش EMT با معادله (۹) رسانندگی گرمایی k_{GA} را تخمین می‌زند:

$$k_{GA} = k_G \frac{3k_{air} + 2f(k_G - k_{air})}{(3-f)k_G + k_{air}f + \frac{R_B k_{air} k_G f}{H}} \quad (9)$$

که در آن، R_B ضریب مقاومت گرمایی میان RGO و هوا و برابر $10^{-5} \text{ Km}^2/\text{W}$ بوده و H ضخامت نانوصفحه‌های گرافن است. ضریب R_B در این معادله بیانگر ارتباط نانوصفحه‌ها نیست، بلکه مقاومت میان هوا و نانوصفحه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار $k_G = 30/2 \text{ W/mK}$ از مدل EMT و از حد زیاد رسانندگی گرمایی محاسبه شده است. تخمین قانون مخلوط‌ها و نظریه میانگین مؤثر (EMT) تحت تأثیر ریزساختار GA و انتقال گرمایی رسانشی میان منافذ نیست، اما هر دو آن‌ها تخمین مناسبی از رسانندگی گرمایی GA هستند.

Yang و همکاران [۵] ابروزل گرافن باکیفیت (high quality graphene aerogel, HGA) را نیز برای کامپوزیت‌های تغییر فاز رسانای گرما، شامل ۱-اکتادکانول با پایداری شکلی عالی تولید کردند. آن‌ها دریافتند، به علت شبکه به هم پیوسته و تخلخل زیاد ابروزل گرافن، HGAs حاصل موجب بهبود رسانندگی گرمایی PCM حتی در مقدارهای کم گرافن می‌شود. زیرا HGA با شبکه مؤثر و چگال، کانال انتقال مؤثری را برای فونون فراهم می‌کند، ساختار متخلخل HGA، PCM‌های مذاب را به خوبی در خود جای می‌دهد و از نشت آن‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین، تخلخل زیاد آن موجب افزایش ظرفیت PCM می‌شود، بنابراین گرمای نهان زیاد انجماد PCCs را تضمین می‌کند.

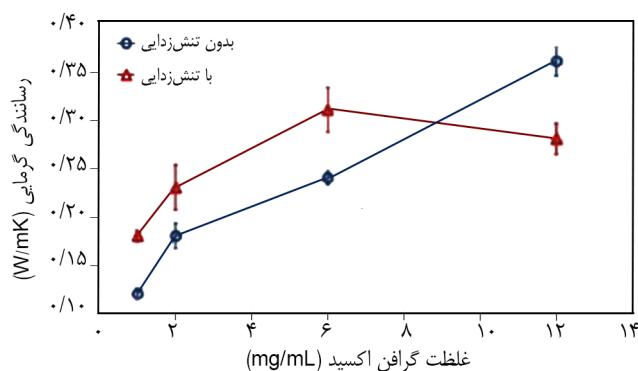
تغییرات رسانندگی گرمایی کامپوزیت‌های اکتادکانول- HGA (OHGA) و اکتادکانول-GA (OGA) که در شرایط خلأ و اکتادکانول- HGA (OHG) که در شرایط معمولی با اکتادکانول آغشته شده است، برحسب ظرفیت گرافن در شکل ۸ آورده شده است. بر این اساس، رسانندگی گرمایی کامپوزیت‌ها با افزایش ظرفیت گرافن افزایش می‌یابد. OHGA بازده بسیار زیادی را در افزایش رسانندگی گرمایی PCM نشان می‌دهد. GA تنش‌زدایی شده که در تهیه کامپوزیت OGA به کار می‌رود، به علت اینکه هنوز گروه‌های حاوی اکسیژن به طور کامل در خلال تنش‌زدایی در دمای 1300°C از بین نرفته‌اند، رسانندگی گرمایی کمی دارد. کامپوزیت‌های OHGA که در دمای 2800°C تنش‌زدایی شده است، به علت حذف کامل نقص‌ها و بهبود شبکه مؤثر انتقال گرما، رسانندگی

بنابراین، گرافن مشتق شده شیمیایی (graphene chemically-driven) تهیه شده از گرافیت ایده بسیار مناسبی برای تولید گرافن با قابلیت پراکنش مطلوب است. انبوهش نانوصفحه‌های گرافن مشتق شده شیمیایی در ساختار سه‌بعدی، شبکه‌ای از صفحه‌های گرافن با اتصالات درونی می‌سازد. این روش کم‌هزینه بوده و برای بحث مدیریت گرما در مقیاس صنعتی مناسب است، ولی مطالعه انتقال گرما در GAs هنوز بسیار محدود است [۱۵]. براساس پژوهش‌های Fan [۱۵] درباره ابروزل‌های گرافن (GA)، غلظت تعلیق آبی GO و تنش‌زدایی بر ریزساختار و رسانندگی گرمایی GA اثر می‌گذارد. شکل ۷ رسانندگی گرمایی نمونه‌های GA را برحسب ظرفیت GO نشان می‌دهد. پژوهش‌ها نمایانگر آن هستند، در GAهایی که از غلظت بیشتر GO ساخته می‌شوند، رسانندگی الکتریکی افزون‌تری حاصل می‌شود. به علت اینکه تحرک الکترون بهتری با اتصال بیشتر صفحه‌های گرافن اتفاق می‌افتد، با تنش‌زدایی رسانندگی گرمایی ابروزل‌های گرافن به علت حذف نقص‌های صفحه‌های گرافن اکسید بهبود می‌یابد.

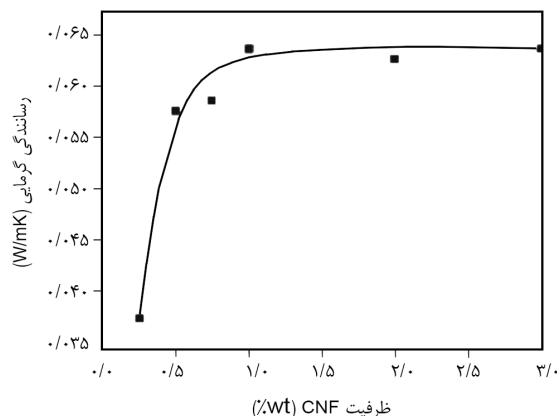
Fan و همکاران [۱۵] به کمک قانون مخلوط‌ها و نظریه میانگین مؤثر (effective medium theory) محدوده رسانندگی گرمایی نانوصفحه‌های گرافن اکسید کاهش یافته را پیش‌بینی کردند. GA شامل دو جزء RGO و هواست که رسانندگی گرمایی آن‌ها به ترتیب $k_{air} = 0/026 \text{ W/mK}$ و k_G است. آن‌ها ابتدا با قانون مخلوط‌ها براساس معادله (۸) رسانندگی گرمایی GA را تخمین زدند:

$$k_{GA} = f k_G + (1 - f) k_{air} \quad (8)$$

که در آن، f درصد حجمی گرافن است. این مدل، رسانندگی گرمایی RGO یا همان k_G را با توجه به اثرهای مقاومت مرزی



شکل ۷- اثر غلظت GO و تنش‌زدایی بر رسانندگی گرمایی ابروزل گرافن [۱۵].

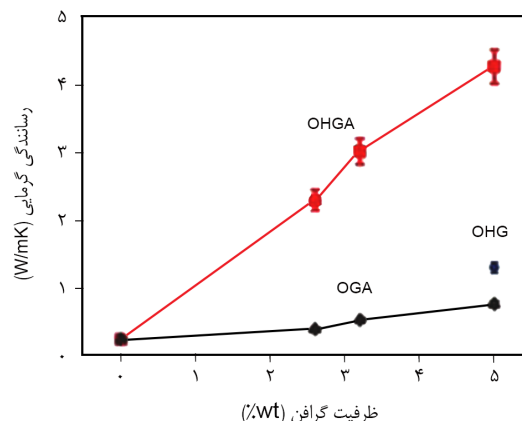


شکل ۹- رسانندگی گرمایی ابروزل‌های پلیمری تقویت‌شده با CNF در ظرفیت‌های مختلف CNF [۱۶].

Victor و همکاران دریافتند، ابروزل PVA تهیه‌شده با آب به‌عنوان حلال، چگالی بیشتری نسبت به سنتز آن با حلال‌هایی نظیر استون، بوتانول، بوتانول نوع سوم یا اتانول ایجاد می‌کند و نمونه تهیه‌شده با استون، سبک‌ترین ابروزل پلیمری تقویت‌شده با CNF است (۸۹/۰ g/L). با افزایش مقدار CNF در ابروزل‌های پلیمری تقویت‌شده با CNF، چگالی ابروزل کم می‌شود. شایان ذکر است، برای مقدار CNF بیش از ۲٪ وزنی نوعی ثبات حاصل می‌شود. همچنین مقدار بیشتر CNF در ابروزل‌ها، تخلخل بیشتری را نتیجه می‌دهد. البته دوباره ثباتی در منحنی تخلخل برای مقدار CNF بیش از ۲٪ وزنی قابل مشاهده است. شکل ۹ منحنی رسانندگی گرمایی ابروزل‌های پلیمری تقویت‌شده با CNF را نشان می‌دهد. مطابق این شکل هرچه مقدار CNF زیادتر باشد، رسانندگی گرمایی بیشتر است، ولی باز هم ثباتی برای ظرفیت CNF بیش از ۱٪ وزنی دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

براساس مطالب پیش گفته، با گسترش مواد الکترونیکی و به‌منظور صرفه‌جویی در انرژی و هزینه، استفاده از ابروزل در کامپوزیت‌های پلیمری رسانای گرما بسیار مفید واقع شده است. ولی ابروزل‌ها به علت ساختار نانومتری و متخلخل آن‌ها ذاتاً عایق گرما هستند. کاهش اندازه منافذ در ابروزل موجب کاهش رسانندگی گاز و افزایش تخلخل می‌شود که افت رسانندگی جامد را در پی دارد. در این صورت، استفاده از پرکننده‌های رسانا نظیر گرافن، نانولوله‌های کربنی و نانوالیاف کربن به‌طور مؤثر می‌تواند رسانندگی گرمایی ابروزل‌ها را افزایش دهد. تا زمانی که مسیر پیوسته انتقال گرما



شکل ۸- رسانندگی گرمایی کامپوزیت‌های OHGA، OGA و کامپوزیت OHG پر شده با پودر گرافن باکیفیت [۵].

گرمایی رضایت‌بخشی را نشان می‌دهند. کامپوزیت OHGA فقط با ۵٪ وزنی گرافن، رسانندگی گرمایی ۴/۲۸ W/mK و گرمای نهان انجماد ۲۲۵/۳۵ J/g دارد که در مقایسه با ۱-اکتادکانول خالص، افزایش ۱۸ برابری رسانندگی گرمایی و حفظ ۹۴/۵٪ گرمای نهان انجماد را نشان می‌دهد. این کامپوزیت‌های برپایه گرافن بیشترین مقدارهای رسانندگی گرمایی را در مقایسه با کامپوزیت‌های با ظرفیت پرکننده مشابه دارند.

ابروزل‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوالیاف کربن (CNF)

نانوالیاف کربن خواص الکتریکی، فیزیکی و مکانیکی درخور توجهی از قبیل ناحیه سطح به حجم و مدول ینگ زیاد، ضریب انبساط گرمایی کم و ساختاری گره‌خورده دارند [۱۶-۱۸]. وجود نانومواد کربن دار خواص مکانیکی، رسانایی گرمایی و الکتریکی و استحکام شبکه ابروزل را افزایش و در مقابل ضریب انبساط گرمایی را کاهش می‌دهد [۱۹]. بنابراین، توسعه ابروزل‌های پلیمری تقویت‌شده با CNF به‌عنوان ساختاری بسیار سبک مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۲۰]. Victor و همکاران [۱۶] ابروزل‌های پلیمری تقویت‌شده با CNF را با استفاده از پلی‌وینیل‌الکل (PVA) ساختند و تأثیر ظرفیت CNF و استفاده از حلال‌های مختلف را بر خواص فیزیکی، مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت نهایی بررسی کردند. مطابق نتایج آن‌ها، رسانندگی گرمایی و تخلخل ابروزل‌های پلیمری تقویت‌شده با CNF با افزایش مقدار CNF افزایش می‌یابد. ولی وقتی مقدار CNF به ۸۷/۵ g/L افزایش می‌یابد، چگالی ابروزل‌های حاصل کم می‌شود. مطابق تجزیه دینامیکی مکانیکی، وجود CNF در ماتریس PVA خواص مکانیکی، دمای انتقال شیشه‌ای و سطح ویژه ابروزل‌های PVA را افزایش می‌دهد.

هیدروژل هنگام خشک کردن آن در شرایط دما و فشار معمولی، جلوگیری کند. در نهایت، ابروژل‌های رسانای گرما با تخلخل زیاد گزینه مناسبی برای نگه‌داری و پایداری شکلی مواد تغییر فاز مذاب در کاربردهای ذخیره-اتلاف انرژی گرمایی هستند. رسانندگی گرمایی زیاد دیواره جامد ابروژل رسانای گرما عامل انتقال گرما به مواد تغییر فاز موجود در حفره‌های سامانه بوده و با ذوب حداکثری آن کارایی سامانه جاذب گرما افزایش می‌یابد.

مراجع

1. An F., Li X., Min P., Li H., Dai Z., and Yu Z., Highly Anisotropic Graphene/Boron Nitride Hybrid Aerogels with Long-Range Ordered Architecture and Moderate Density for Highly Thermally Conductive Composites, *Carbon*, **126**, 119-127, 2018.
2. Salimian S., Zadhoush A., Naeimirad M., Kotek R., and Ramakrishna S., A Review on Aerogel: 3D Nanoporous Structured Fillers in Polymer-based Nanocomposites, *Polym. Compos.*, **39**, 3383-3408, 2017.
3. Hostler S.R., Abramson A.R., Gawryla M.D., Bandi S.A., and Schiraldi D.A., Thermal Conductivity of a Clay-based Aerogel, *Heat Mass Transfer*, **52**, 665-669, 2009.
4. He W. and Zhang X., Conducting Polymer Aerogels, in *Conducting Polymers*, IntchOpen, 49-72, 2016. doi 10.5772/63397
5. Manuscript A., High Quality Graphene Aerogels for Thermally Conductive Phase Change Composites with Excellent Shape Stability, *J. Mater. Chem. A*, **6**, 5880-5886, 2018.
6. Chen L., Hou X., Song N., Shi L., and Ding P., Cellulose/Graphene Bioplastic for Thermal Management: Enhanced Isotropic Thermally Conductive Property by Three-Dimensional Interconnected Graphene Aerogel, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **107**, 189-196, 2018.
7. Lu X., Caps R., Fricke J., Alviso C.T., and Pekala R.W., Correlation between Structure and Thermal Conductivity of Organic Aerogels, *J. Non-Cryst. Solids*, **188**, 226-234, 1995.
8. Zhu H., Li Y., Fang Z., Xu J., Cao F., Wan J., and Preston C., Highly Thermally Conductive Papers with Percolative Layered Boron Nitride, *ACS Nano*, **4**, 3606-3613, 2014.
9. Yang J., Zhang E., Li X., Zhang Y., Qu J., and Yu Z., Cellulose/Graphene Aerogel Supported Phase Change Composites with High Thermal Conductivity and Good Shape Stability for Thermal Energy Storage, *Carbon*, **98**, 50-57, 2016.
10. Kahraman D. and Alkan C., Biodegradable PEG/Cellulose, PEG/Agarose and PEG/Chitosan Blends as Shape Stabilized Phase Change Materials for Latent Heat Energy Storage, *Carbohydr. Polym.*, **84**, 141-144, 2011.
11. Lv P., Tan X., Yu K., Zheng R., Zheng J., and Wei W., Super-elastic Graphene/Carbon Nanotube Aerogel: A Novel Thermal Interface Material with Highly Thermal Transport Properties, *Carbon*, **99**, 222-228, 2016.
12. Liao H., Chen W., Liu Y., and Wang Q., A Phase Change Material Encapsulated in a Mechanically Strong Graphene Aerogel with High Thermal Conductivity and Excellent Shape Stability, *Compos. Sci. Tech.*, **189**, 108010, 2020.
13. Liu M., Wang H., Wu S., Wang Y., Qiu S., Zhang S., and Bao C., Preparation of Castable Phase Change Materials Beads Based on Millimeter-Sized Nano Carbon Aerogels for Thermal Energy Storage, *Appl. Therm. Eng.*, **174**, 115319, 2020.
14. Zhang X., Ultralight Conducting Polymer/Carbon Nanotube Composite Aerogels, *Carbon*, **49**, 1884-1893, 2011.
15. Fan Z., Marconnet A., Nguyen S.T., Lim C.Y.H., and Duong H.M., Effects of Heat Treatment on the Thermal Properties of Highly Nanoporous Graphene Aerogels Using the Infrared Microscopy Technique, *Int. J. Heat. Mass. Transf.*, **76**, 122-127, 2014.
16. Víctor-román S., Simón-herrero C., Romero A., Gracia I., Valverde J.L., and Sánchez-Silva L., CNF-Reinforced Polymer Aerogels: Influence of the Synthesis Variables and Economic Evaluation, *Chem. Eng. J.*, **262**, 691-701, 2015.

17. Wu J., Li H., Lai X., Chen Z., and Zeng X., Conductive and Superhydrophobic F-rGO and CNTs/Chitosan Aerogel for Piezoresistive Pressure Sensor, *Chem. Eng. J.*, **386**, 123998, 2020.
18. Wi S., Berardi U., DiLoreto S., and Kim S., Microstructure and Thermal Characterization of Aerogel-graphite Polyurethane Spray-foam Composite for High Efficiency Thermal Energy Utilization, *J. Hazard. Mater.*, **397**, 122656, 2020.
19. Turner S., Shevitski B., Long H., Lorenzo M., Marquez J., Aloni S., Altoe V. et al., Self-assembly and Metal-Directed Assembly of Organic Semiconductor Aerogels and Conductive Carbon Nanofiber Aerogels with Controllable Nanoscale Morphologies, *Carbon*, **153**, 648-656, 2019.
20. Zhang Z., Tan J., Gu W., Zhao H., Zheng J., Zhang B., and Ji G., Cellulose-chitosan Framework/Polyaniline Hybrid Aerogel Toward Thermal Insulation and Microwave Absorbing Application, *Chem. Eng. J.*, **395**, 125-190, 2020.