

منشاء رفتار اتلافی انرژی‌های دینامیکی-مکانیکی در مواد لاستیکی

T

The origin of damping behavior of dynamic-mechanical energies in rubber materials

چکیده

انرژی‌های ناخواسته معمولاً مضر، عامل صدمه و کاهش عمر مفید سیستم‌ها در صنایع هستند. بنابراین لازم است این ارتعاشات جذب یا کنترل شوند. یک عامل مهم در مطالعه سیستم‌های دینامیکی-مکانیکی، رفتار اتلاف یا میرایش انرژی است. اتلاف به عنوان توانایی یک ماده در جذب انرژی و تبدیل آن به گرما تعریف می‌شود. اتلاف انرژی در یک سیستم دارای دو بخش اتلاف ساختاری و اتلاف موادی است. اتلاف ساختاری وابسته به خواص هندسی ساختار و اجزای آن و اتلاف موادی ناشی از اصطکاک درونی و وابسته به خواص ذاتی ماده است. در میان مواد، لاستیک‌ها به دلیل داشتن رفتار ویسکوالاستیک به عنوان بهترین جاذب‌های انرژی شناخته می‌شوند. ویژگی که رفتار ویژه لاستیک‌ها در برابر جذب انرژی را از سایر پلیمرها جدا می‌کند، دارا بودن ساختاری آمورف (داشتن فضای آزاد میکروسکوپی برای تحرک) و زنجیرهای منعطف است. اصطکاک بین زنجیره‌های پلیمری مکانیسم مهمی در اتلاف انرژی مواد لاستیکی است که وابسته به انعطاف‌پذیری زنجیر و فضای آزاد است. در این پژوهش به بررسی نقش طبیعت ماده در اتلاف انرژی لاستیک‌ها پرداخته می‌شود.

واژگان کلیدی: اتلاف داخلی انرژی، اصطکاک زنجیره، فضای آزاد، انعطاف‌پذیری زنجیر، DMTA.

نوع مقاله: مروری

جواد طولابی^۱، محمدرضا پورحسینی^{۲*}، محمود رضوی‌زاده^۳، میلاد سعادت تقروودی^۴

۱- کارشناسی ارشد دانشگاه مالک اشتر، پژوهشکده کامپوزیت، تهران، ایران

۲- دکترای تخصصی، استادیار، عضو هیئت علمی پژوهشکده کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دکترای تخصصی، استادیار، عضو هیئت علمی پژوهشکده کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد دانشگاه مالک اشتر، پژوهشکده کامپوزیت، تهران، ایران

1-*mr_pourhossainy@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰-۱۱-۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱-۰۲-۰۶

مقدمه

و آن‌ها را از مقدار اندازه‌گیری شده به منظور بدست آوردن مقدار میرایی ساختاری کم کنیم. میرایی ساختاری بسیار بزرگ‌تر از میرایی داخلی است و نشان‌دهنده بخش بزرگی از اتلاف انرژی در سازه‌های مکانیکی است [۳]

اتلاف داخلی مواد

این نوع اتلاف وابسته به ماهیت طبیعی ماده است و ناشی از نقص‌های ریزساختاری، ناخالصی، مرزخانه‌ها، اثرات ترموالاستیک، اثر جریان گردابی در مواد مغناطیسی، حرکت جابجایی در فلزات و حرکت زنجیره در پلیمرها است. پلیمر را می‌توان به عنوان مواد جاذب انرژی مورد استفاده قرار داد زیرا انرژی جذب‌شده توسط آن در نهایت به عنوان حرارت از بین خواهد رفت [۱، ۲]. وقتی پلیمرها در حال انتقال شیشه‌ای خود هستند تبدیل انرژی مکانیکی به گرما به بالاترین مقدار خود می‌رسد. پلیمرها به عنوان مواد با قابلیت اتلاف انرژی بالا، قابلیت جذب انرژی در محدوده دمایی وسیعی را دارند. مشخص شده است که ویژگی‌های اتلافی پلیمرها مربوط به حرکت بخش‌های زنجیره هستند. بنابراین مطالعات خواص حجم آزاد میکروسکوپی در مقیاس‌های مولکولی و اتمی می‌تواند درک اساسی مکانیزم اتلاف انرژی یک پلیمر را فراهم کند

اتلاف انرژی در پلیمرها

مواد ویسکوالاستیک دارای ویژگی الاستیک و ویژگی ویسکوز، باهم هستند. این مواد در برابر نیروهای خارجی، واکنش‌هایی بین رفتار مواد جامد الاستیک و سیال ویسکوز دارند. کرنش مواد الاستیک به صورت آنی بوده و هنگامی که در معرض کشش قرار می‌گیرند، بلافاصله پس از برداشتن بار به حالت اولیه قبل از بارگذاری باز می‌گردند. در مقابل، مواد ویسکوز در مقابل جریان برشی

شکی نیست که درک عمیق مکانیزم میرایی، زمان، هزینه تحقیقات و مواد را به شدت کاهش خواهد داد. دانشمندان هرگز مطالعه مکانیزم میرایی را در طول ۲۰ سال گذشته متوقف نکرده‌اند چرا که ارتعاشات بیش از حد و یا صداهای بلند سبب ناشنوایی و یا کاهش کارایی افراد، هدر رفتن انرژی و کاهش طول عمر سازه‌ها می‌شود. بنابراین لازم است ارتعاشات ناخواسته کنترل شوند [۱]. یک پارامتر مهم در مطالعه سیستم‌های دینامیکی، اتلاف یا میرایش انرژی است. اتلاف به عنوان توانایی یک ماده در جذب انرژی و تبدیل آن به گرما تعریف می‌شود. مکانیزم اتلاف انرژی در یک سیستم به طور کلی ناشی از دو بخش است [۲].

اتلاف ساختاری (وابسته به خواص هندسی ساختار و اجزای آن)
اتلاف موادی (ناشی از اصطکاک درونی و وابسته به خواص ذاتی ماده)

اتلاف ساختاری

میرایی ساختاری از اتلاف انرژی مکانیکی ناشی از حرکت نسبی بین اجزا در یک ساختار مکانیکی است که دارای نقاط اتصال، مفاصل، نقص‌ها و ترک‌ها است. اصطکاک و یا تماس بین عناصر مختلف در یک سیستم مکانیکی باعث اتلاف انرژی می‌شود. از آنجا که اتلاف انرژی به ویژگی‌های خاص سیستم مکانیکی وابسته است، تعریف مدلی که نشان‌دهنده میرایی ساختاری باشد بسیار دشوار است. مدل اصطکاک کولمب به عنوان یک قاعده مورد استفاده برای توصیف اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک است. میرایی ساختاری معمولاً از طریق اندازه‌گیری تخمین زده می‌شود، اما مقادیر اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده میرایی کلی در سیستم مکانیکی است. در نتیجه لازم است که مقادیر برای انواع دیگر میرایی را محاسبه کرده

1 Structural Damping 2 Material Damping 3 Coulomb

مدل‌های ویسکوالاستیک شامل ترکیباتی از فنر و دسپات است، فنر بیانگر رفتار الاستیک و دسپات رفتار ویسکوز است. این مدل‌ها هر کدام توصیف کننده رفتار ویسکوالاستیک در شرایط خاصی هستند و هیچ مدلی تاکنون رفتار ویسکوالاستیک را به طور کامل نشان نمی‌دهد. بنابراین پلیمرها به دلیل داشتن رفتار ویسکوالاستیک بهترین مواد برای کاربردهای اتلاف انرژی هستند.

اتلاف در لاستیک‌ها

در مواد لاستیکی، انتقال شیشه‌ای آسان‌تر است و در دماهای بسیار پایین‌تر در مقایسه با پلاستیک اتفاق می‌افتد که به خاطر حجم آزاد بزرگ، طبیعت آمورف و انعطاف‌پذیری بالای مولکول‌های لاستیکی است. به طور کلی تمام لاستیک‌ها دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) زیر دمای اتاق دارند. وقتی که نیروی ارتعاشی به لاستیک وارد می‌شود، می‌تواند به شکل‌های فضایی جدیدی تبدیل شود و انرژی ارتعاش را تلف کند. میرایی پلیمر در دمای T_g آن ماکزیمم است. بنابراین دمای انتقال شیشه‌ای در میرایی بسیار مهم است [۱] به طور کلی اتلاف بالای لاستیک‌ها ناشی از این موارد است [۱] زنجیرهای با طول بلند نیاز به انرژی بیشتری دارد تا نوسان کند.

حجم آزاد بزرگ، چگالی پایین، ساختار آمورف و نیروی بین مولکولی ضعیف، انتقال لرزشی را در لاستیک به تعویق می‌اندازد.

مولکول‌های با انعطاف‌پذیری بالا می‌توانند انرژی ارتعاشی را تحمل کنند و به راحتی شکل فضایی جدید تشکیل دهند. دمای انتقال شیشه‌ای پایین سبب نرم بودن لاستیک در دمای اتاق است.

لاستیک رفتار ویسکوالاستیک دارد و بخشی از انرژی ارتعاشی به صورت گرما تلف می‌شود.

مقاومت می‌کنند و در هنگام اعمال بار، کرنش آن‌ها با زمان تغییر می‌کند. مواد ویسکوالاستیک ترکیبی از خواص بالا را دارند و کرنش آن‌ها وابسته به زمان هست. رفتار مواد ویسکوالاستیک در حالت کلی وابسته به زمان هست و این مواد تغییر شکل دائم دارند یعنی بعد از برداشتن نیروهایی که سبب تغییر شکل می‌شوند، به شکل هندسی اولیه بر نمی‌گردند. خاصیت الاستیسیته معمولاً از نتایج قدرت پیوندی میان بلورهای کریستالی مرتب‌شده میان صفحات جامد ایجاد می‌شود، در حالی که خاصیت ویسکوالاستیسیته، نتیجه تراوش و پخش‌شدگی اتم‌ها به داخل مواد بی‌شکل و غیر متبلور هست. ویژگی‌های مواد ویسکوالاستیک اغلب به سه روش تعیین می‌شود: (الف) آزمایش خزش (ب) آزمایش آسودگی از تنش (ج) پاسخ دینامیکی به بارهای متغیر سینوسی وابسته به زمان. رفتار ویسکوالاستیک خطی در سرعت‌های تغییر شکل یا کرنش کم اتفاق می‌افتد و از اصل برهم‌نهدش بولتزمن پیروی می‌کند. طبق این اصل، عکس‌العمل ماده در برابر هر تغییر شکل، از تغییر شکل‌های قبلی مستقل است و تنش‌های مربوط به کرنش‌های مختلف با یکدیگر جمع‌پذیرند. زنجیرهای پلیمری به علت انعطاف‌پذیری بالا، دارای آزادی و آرایش فضایی زیادی هستند. بنابراین، این زنجیرها توزیعی از حالت‌های آسودگی از تنش را نشان می‌دهند. پس می‌توان مدول برشی ($G(t)$) را به صورت مجموع گسسته مدل ماکسول عمومی یا پیوسته از زمان‌های مشخصه آسودگی، τ_i با مدول g_i نشان داد

$$G(t) = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) d \ln \tau$$

توزیع پیوسته $H(\tau)$ اصطلاحاً طیف آسودگی نامیده می‌شود.

جدول ۱: آلیاژ کردن و افزایش فضای خالی [۱۶].

Sample	τ_3 (ns) ^a	I_3 (%) ^a	V_{f3} (Å) ^{3a}	F_{vr} (%) ^a
PP ₀	1.690 ± 0.032	4.7 ± 0.2	69.7 ± 2.2	3.28
PP ₁₀	1.682 ± 0.024	5.2 ± 0.2	69.0 ± 1.7	3.59
PP ₂₀	1.713 ± 0.023	7.1 ± 0.2	71.6 ± 1.7	5.08
PP ₃₀	1.782 ± 0.018	7.0 ± 0.2	77.7 ± 1.3	5.44
PP ₅₀	1.776 ± 0.013	8.3 ± 0.2	77.2 ± 1.0	6.41
PP ₇₀	1.765 ± 0.012	11.9 ± 0.2	76.2 ± 0.9	9.08
PP ₁₀₀	1.703 ± 0.010	20.0 ± 0.2	70.8 ± 0.7	14.16

مکانیزم اتلاف انرژی در پلیمرها

میرایش انرژی یک پارامتر مهم برای طراحی سازه‌های مختلف است. در پلیمرها، توانایی جذب انرژی به تحرک زنجیره‌ها وابسته است. هر زنجیر پلیمر دارای یک انرژی حرارتی است در نتیجه انرژی مورد نیاز برای چرخش زنجیر با انرژی حرارتی (KT) تأمین می‌شود [۱۱]. زنجیرهای مجاور نیز به‌عنوان گروه‌های ممانعت کننده چرخش و حرکت زنجیر را محدود می‌کنند. بنابراین برای حرکت در دماهای پایین برای حرکت زنجیر نیروی مکانیکی مورد نیاز است. انرژی مورد نیاز = انرژی حرارتی (KT + W) کاری است که روی سیستم انجام می‌شود و با تبدیل به گرما هدر می‌رود.

$$W + KT = \text{energy Required}$$

$$d.F = W$$

F: نیروی اعمالی

d: فاصله از زنجیر اصلی (بدنه)

انرژی حرارتی، انرژی موجود در مدهای حرکتی است.

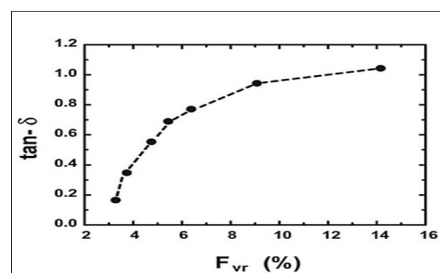
روی سیستم انجام می‌شود و با تبدیل به گرما هدر می‌رود.

انعطاف پذیری زنجیره‌های پلیمر وابسته به ساختار مولکولی آنها است. دیگر متغیری که موجب ویژه شدن رفتار لاستیک‌ها شده است دارا بودن ساختاری آمورف و به تبع آن دانسیته پایین و داشتن فضای خالی (میکرو حفره) در توده لاستیک است که موجب تحرک بهتر زنجیره و اتلاف بالاتر است. روشی که برای اندازه‌گیری فضای خالی پلیمرها استفاده می‌شود. آزمون طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون (PALS) است در این روش با توجه به زمان نابودی پوزیترون در حفرات، شعاع حفره توسط معادله زیر تعیین می‌شود [۱، ۴، ۵].

$$\tau_3 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R}\right) \right]^{-1}$$

τ : طول عمر پوزیترون $\Delta R = 1.656 \text{ \AA}$ R: شعاع حفره

حجم آزاد محاسبه شده با آزمون PALS برای لاستیک نئوپرن ۰/۱۲۱۷ نانو متر مکعب (۱/۹۱ درصد)، لاستیک اتیلن پروپیلن ۰/۱۴۷۸ نانومتر مکعب (۵/۳۱ درصد) و لاستیک نیتریل ۰/۱۲۱۶ نانومتر مکعب (۲/۶۳ درصد) است [۶-۸]. روش‌های متفاوتی برای افزایش فضای خالی در توده و افزایش قابلیت اتلاف انرژی در لاستیک‌ها وجود دارد، نظیر آلیاژ کردن. آلیاژ کردن پلی اترایمید (PEI) به پلی اتراکتون (PEEK) در درصد‌های مختلف سبب افزایش فضای خالی و در نتیجه فاکتور اتلاف می‌شود [۵، ۹، ۱۰].

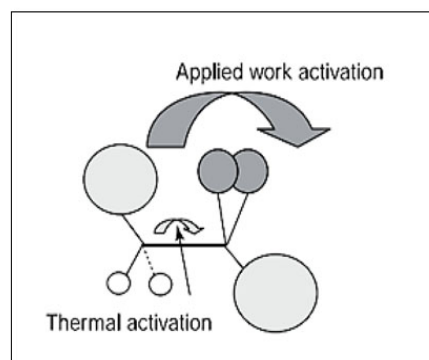


شکل ۱: افزایش فضای خالی با آلیاژ کردن [۱۶].

کوچک و بلند، نمایان می‌شود. در این ناحیه حدوداً ۵۰-۱۰ اتم زنجیر اصلی شروع به حرکت می‌کنند. با افزایش دمای بیشتر زنجیره‌های پلیمر روی هم لیز می‌خورند و به ناحیه ذوب می‌رسد که پلیمر خواص مکانیکی خود را از دست می‌دهد. بنابراین بیشترین میزان جذب انرژی مواد در ناحیه انتقال شیشه‌ای آنها حاصل می‌شود.

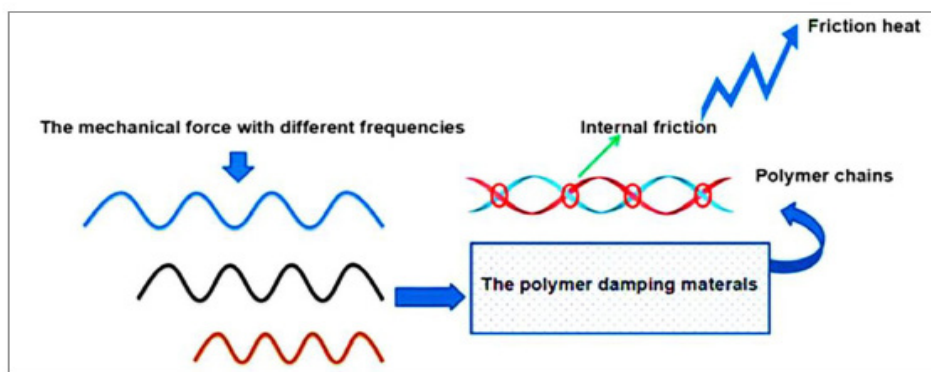
اصطکاک بین زنجیره‌های پلیمر

هنگامی که دمای خارجی به T_g مواد نزدیک می‌شود، اتلاف انرژی به بیشترین مقدار خود میرسد. به عنوان یک قاعده، خواص میرایی مواد پلیمری ناشی از اصطکاک داخلی در اثر حرکت زنجیره‌های مولکولی، تخریب و بازسازی پیوندهای فیزیکی بین مولکول‌ها است. در این حالت پلیمر توسط گرما ناشی از اصطکاک بین زنجیره‌ها بر نیروهای متناوب خارجی غلبه می‌کند [۱۲]



شکل ۲: طرح کلی عوامل اثرگذار بر فشردگی مولکولی. [۵]

در دماهای پایین یا فرکانس‌های بالا، تنها تغییر در زوایای پیوندی در مولکول‌های پلیمر رخ می‌دهد. این به خاطر انرژی گرمایی کم و کمبود زمان کافی برای تغییر شکل دائم است. بنابراین پلیمر رفتار الاستیک یا شیشه‌ای تحت بار از خود نشان می‌دهد این ناحیه از رفتار پلیمر، ناحیه شیشه‌ای است. با افزایش دما ناحیه لاستیکی به دلیل حرکت زنجیره‌های



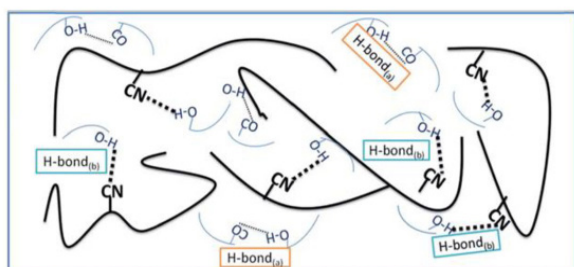
شکل ۳: مکانیسم اتلاف مولکولی [۶].

موجب افزایش جذب انرژی می‌شود یکی از این روش‌ها افزوده گروه‌های آویزان به زنجیر اصلی است که تحرک آنها موجب اتلاف بیشتر می‌شود [۱۳، ۱۴]

اتلاف گروه‌های آویزان

به طور کلی اتلاف انرژی در پلیمرها به دلیل اصطکاک بین زنجیره‌ها است بنابراین هر دلیلی که اصطکاک را بیشتر کند

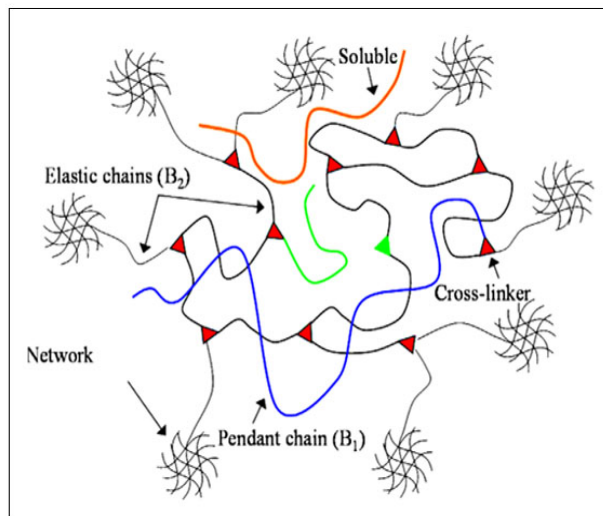
پیوند هیدروژنی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. علاوه بر این، محققان بر این باورند که زنجیره مولکولی به خاطر پیوند هیدروژنی، اصطکاک بیشتری ایجاد می‌کنند که نتیجه آن اتلاف بیشتر است. پیوند هیدروژنی با استفاده از آزمون‌هایی مثل طیف سنجی مادون قرمز و رزونانس مغناطیس هسته‌ای تعیین می‌شود [۱۶،۱۵]



شکل ۵: پیوند هیدروژنی در ساختار مولکولی [۱۰].

پرکننده (فیلر)

تقویت‌کنندگی با استفاده از پرکننده‌ها، بخش مهمی از تحقیقات در زمینه ساخت ترکیبات لاستیکی است. از پرکننده‌های متفاوت برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شود و میزان تقویت‌کنندگی آنها به مقدار، اندازه و نسبت سطح فیلر بستگی دارد. همچنین نانوکامپوزیت لاستیکی اخیراً به خاطر گستره وسیعی از کاربردهای بالقوه در بسیاری از مناطق اهمیت زیادی کسب کرده است. لاستیک‌های تقویت‌شده با فیلر زمانی که در معرض تغییر شکل سیکی قرار می‌گیرند، بسیاری از اثرات غیر خطی جالب مانند اثر پین، اثر مولینز و اتلاف انرژی را نشان می‌دهند. اثر پین وابسته به مدول دینامیکی برهمکنش فیلر-فیلر است. زمانی که تغییر شکل سیکی به لاستیک پر شده وارد می‌شود، نیرو سبب شکست خوشه‌های پرکننده می‌شود، این شکست سبب اتلاف انرژی می‌شود سپس زمانی که نیرو روی لاستیک برداشته شود دوباره خوشه پرکننده تشکیل شده و آماده اتلاف انرژی



شکل ۴: نمای شماتیکی از انواع گروه‌های آویزان و متحرک [۷].

برای این سیستم‌ها مدول آسایش در زمان‌های طولانی رفتار مشابهی نسبت به شبکه‌های تصادفی دارد، که در آن مدول برشی می‌تواند به خوبی با معادله تجربی ارائه‌شده توسط چست تریون توصیف شود.

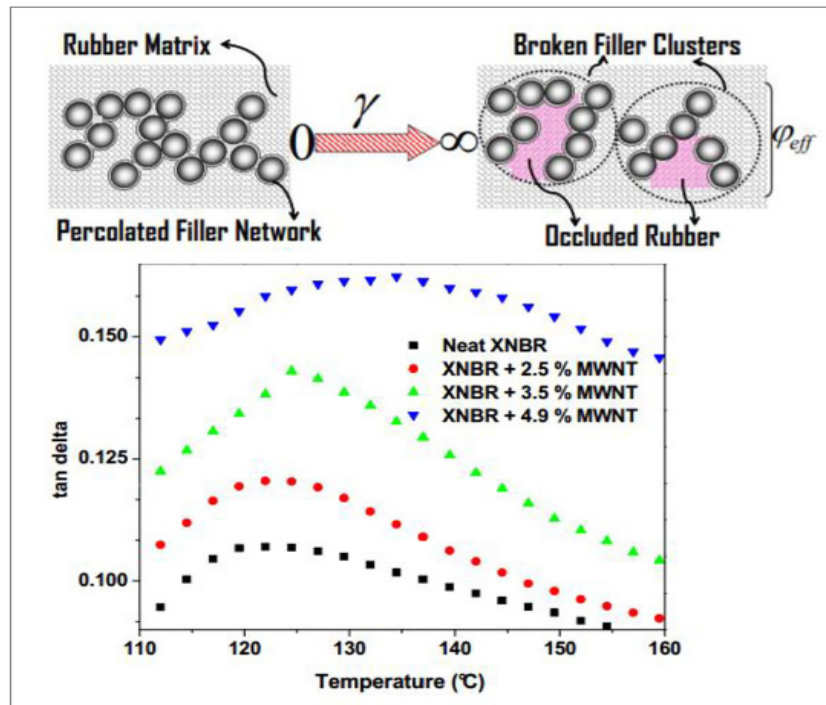
$$G(t) = G_{\infty} \left[1 + \left(\frac{\tau_c}{t} \right)^m \right]$$

$G(t)$: مدول آسایش

m و τ_c : پارامترهای شبکه

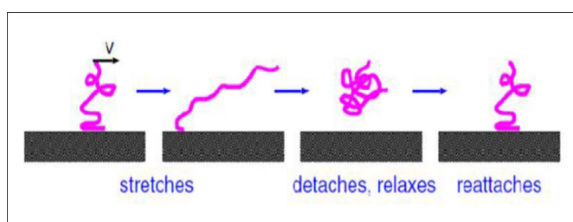
پیوند هیدروژنی

مکانیسم‌های جداسازی میکرو، آلیاژ و پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های کوچک و پلیمرها، پیشنهاد شده‌اند تا ظرفیت میرایی بالا چنین موادی را توضیح دهند. در بین این مطالعات میرایی، تئوری پیوند هیدروژنی بطور گسترده پذیرفته شده‌است. پیوندهای هیدروژنی (HBS) بین مولکول‌های کوچک و پلیمرها، فعل و انفعالات قابل‌بازگشت با انرژی‌های پیوندی پایین هستند. در طی فرآیندهای دینامیکی، انرژی مکانیکی خارجی به طور پیوسته از طریق تخریب و بازسازی



شکل ۶: اثر پرکننده بر اتلاف انرژی [۱۱، ۱۲].

این چرخه را تکرار نماید [۱۹] خوشه‌های پرکننده می‌شود، این شکست سبب اتلاف انرژی می‌شود سپس زمانی که نیرو روی لاستیک برداشته شود دوباره خوشه پرکننده تشکیل شده و آماده اتلاف انرژی



شکل ۷: مکانیسم جدایش و چسبندگی زنجیر از سطح [۱۴].

آمینو و همکارانش نیز رفتار ویسکوالاستیک آمیزه لاستیکی را با تغییر میزان گوگرد، دوده یا روغن تغییر دادند و اثر تغییر

اصطکاک زنجیر و پرکننده

مکانیسم اتلاف تغییر شکلی حین لغزش لاستیک با سرعت‌های کم بر سطوح صاف و تمیز ناشی از اتصال و کنده-شدن زنجیره‌ها از سطح است. چنین شرایطی امکان چسبندگی در مقیاس مولکولی بر پایه نیروهای الکترواستاتیکی یا تشکیل پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی در سطح تماس دو جسم می‌افزاید تا این اتصالات فیزیکی به‌طور متناوب تشکیل و شکسته شود که عامل تغییر مداوم انرژی در سطح تماس است. در دهه هفتاد مکانیسم مولکولی اتصال - لغزش محلی مشابه شکل ۷ را پیشنهاد شد که زنجیره پلیمری لاستیک به سطح تماس مقابل چسبیده و حرکت نموده و همراه آن کشیده می‌شود. سپس زنجیره سطح را رها نموده و پس از آسودگی از تنش دوباره به سطح مقابل می‌چسبد تا

سوی حلال) و نیروهای براونی، معادله موقعیت گوی‌ها با زمان به دست می‌آید.

$$\tau_R = \frac{\xi_0 a^2 N^2}{6\pi^2 K_B T}$$

گره‌خوردگی‌ها و مدل تیوب

در مذاب‌ها و محلول‌های غلیظ با وزن مولکولی زیاد، مولکول‌های پلیمری انعطاف‌پذیر، به‌اجبار دچار گره‌خوردگی می‌شوند. اگرچه تعریف دقیقی از گره‌خوردگی وجود ندارد، اما گره‌خوردگی را می‌توان برهم‌کنش فضایی بین یک زنجیر پلیمر و مولکول‌های اطراف دانست که به‌شدت از حرکت زنجیر و در نتیجه توانایی آن برای آسودگی از تنش، ممانعت می‌کند. بارزترین اثر گره‌خوردگی‌ها بر خواص ویسکوالاستیک ماده، تغییر رابطه خطی η_0 و وزن مولکولی به حدود $3/4$ در وزن‌های مولکولی بالاتر از M_c (جرم مولکولی مورد نیاز برای آغاز گره‌خوردگی) است [۲۱] در حال حاضر راه‌حل متداول در برخورد با سیالات پلیمری حاوی گره‌خوردگی، استفاده از مدل تیوب است. این مدل در سال ۱۹۷۱ توسط دی جن مطرح و سپس در سال ۱۹۷۸ توسط دوی و ادوارد توسعه یافت. در این مدل از نظریه میدان متوسط برای حل مسئله، با در نظر گرفتن تک زنجیره، استفاده می‌شود. مطابق شکل ۸، برهم‌کنش‌های فضایی (گره‌خوردگی‌ها) به‌صورت مجموعه‌ای از موانع که یک زنجیر راز را در فضایی به شکل تیوب محبوس می‌کنند، در نظر گرفته شده‌اند. تیوب از حرکت زنجیر در راستای عمود بر مسیر اصلی ممانعت می‌کند. مسیر اصلی زنجیر در امتداد تیوب به‌صورت کوتاه‌ترین مسیر از یکسر زنجیر تا سر دیگر آن است. از آنجایی که زنجیر واقعی، نقاط خمش به‌مراتب بیشتری از مسیر اصلی دارد، طول کانتور

رفتار ویسکوالاستیک را بر اصطکاک توسط آزمون سرش مطالعه کردند. از این بررسی‌ها معادله تجربی زیر حاصل شد که در واقع مدل اصطکاک کولمب را نمایش داده است

$$\mu = a + b * \frac{\tan \delta}{E'}$$

عبارت اول (a) نمایشگر جزء چسبندگی اصطکاک و عبارت دود $(b * \frac{\tan \delta}{E'})$ نمایشگر جزء اتلافی اصطکاک است. لذا ضریب اصطکاک اتلافی توسط $\frac{\tan \delta}{E'}$ با رفتار ویسکوالاستیک و بسامد مرتبط است [۲۰] دو پارامتر مهم در بررسی رفتار مولکولی اتلاف در پلیمرها زمان آسایش زنجیره و ضریب اصطکاک آن با دیگر زنجیره‌ها است بنابراین در این بخش به دو تئوری مولکولی رز و مدل لوله پرداخته می‌شود.

نظریه مولکولی رز

این نظریه برای اولین بار توسط رز در سال ۱۹۵۳ پیشنهاد شد و هنوز پایه بسیاری از نظریه‌های جدید است. در این نظریه بخش‌های حاوی g مونومر به‌صورت گوی‌های اتصال یافته با فنرهایی با ثابت فنر $\frac{3KT}{b^2}$ ، محیطی گرانبه در نظر گرفته شده‌اند. جرم زنجیر پلیمر در گوی‌ها تمرکز یافته است [۲۱]. مطابق قانون استوکس نیروی بازدارنده وارد بر هر گوی از سوی حلال اطراف، متناسب با سرعت نسبی گوی در حلال است. مقدار این نیرو با ضریب اصطکاک به ازای هر مونومر ξ_0 متناسب است. در این نظریه فرض بر این است که برهم‌کنش بین گوی‌ها، توسط حلال خنثی می‌شود و به‌عبارت‌دیگر اثرات هیدرودینامیک در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین، از برهم‌کنش‌های بین بخش‌های زنجیر نیز صرف‌نظر شده است. بنابراین ممانعتی برای عبور زنجیرها از یکدیگر وجود ندارد. به‌طور خلاصه، در این نظریه از برآیند نیروهای الاستیک (ناشی از فنرها)، گرانبه (نیروی بازدارنده وارد بر هر گوی از

اندازه‌گیری میزان اتلاف در پلیمرها

روش‌های مورد استفاده برای تعیین میرایی پلیمرها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: روش‌های مستقیم (اندازه‌گیری اتلاف انرژی به طور مستقیم) و روش‌های غیر مستقیم (دامنه و فرکانس اندازه‌گیری که مربوط به انرژی اتلاف شده هستند). مثال‌هایی برای روش‌های مستقیم عبارتند از روش انرژی، روش حرارتی، روش حلقه هیستریسیس. در روش ارتعاش، کاهش لگاریتمی اندازه‌گیری می‌شود، که به عنوان لگاریتم طبیعی نسبت دامنه‌های متوالی تعریف می‌شود

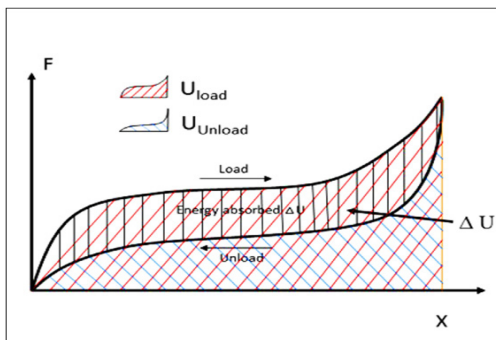
حلقه هیستریسیس

مقدار میرایی در یک ماده پلیمری با روش حلقه هیستریسیس (به روش آزمون مولینز انجام می‌شود) با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود [۲۱]

$$\% \text{damping} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \times 100$$

U_1 : سطح زیر منحنی رفت تا زمان اعمال نیرو

U_2 : سطح زیر منحنی برگشت بعد از برداشتن نیرو مقدار اختلاف این دو سطح هیستریسیس را نشان می‌دهد.

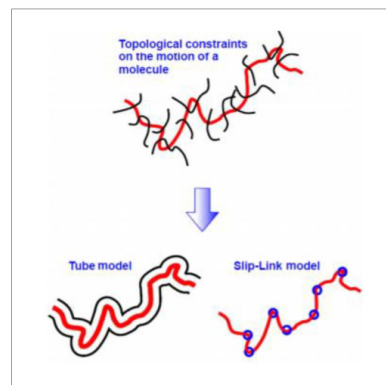


شکل ۹: حلقه هیستریسیس [۲۲].

تیوب بسیار کوتاه‌تر از طول کانتور خود زنجیر است. برای اینکه بتوان این نظریه را به صورت کمی درآورد، مذاب پلیمری باید با یک مقیاس طولی شناخته شود. این مقیاس طولی به صورت قطر تیوب، a ، در نظر گرفته شده است و فرض بر این است که برهم‌کنش با زنجیرهای اطراف در مقیاس‌هایی بزرگ‌تر از این طول انجام می‌شود. در حقیقت برای مولکول‌های پلیمری انعطاف‌پذیر، قطر تیوب معادل یک گام حرکت اتفاقی طول تیوب در نظر گرفته می‌شود و طول این گام، بخش تیوب نامیده می‌شود. اگر تعداد مونومرها در هر قطعه با N_e نشان داده شود، روابط زیر بین کمیت‌های مختلف برقرار است.

$$a^2 = N_e b^2 ; \xi = N_e \xi_0 ; Z = \frac{m}{N_e} ; L_{eq} = Za = mb^2$$

Z ، ξ و L_{eq} به ترتیب نشان‌دهنده درجه پلیمر شدن، تعداد گره خوردگی‌ها در هر زنجیر، ضریب اصطکاک به ازای هر مونومر و طول تعادلی تیوب یا طول کانتور زنجیر در حالت تعادل هستند. پس از اعمال تغییر شکل، زنجیر محبوس در تیوب سعی دارد برای رهايش از تنش، از تیوب خارج شود. مکانیسم پیشنهادی غالب برای خارج شدن زنجیر از تیوب، حرکت مار گونه است.



شکل ۸: گره خوردگی و مدل تیوب [۴].

آزمون دینامیکی مکانیکی

یک روش بسیار رایج برای اندازه‌گیری میرایی پلیمرها، آزمون دینامیکی مکانیکی (DMA) است. این آزمون مدول (سفتی) و ویژگی‌های میرایی (اتلاف انرژی) مواد را اندازه‌گیری می‌کند. پلیمر که در معرض کرنش نوسانی قرار دارد و تنش ناشی از آن به طور مداوم ثبت می‌شود. نسبت تنش نوسانی به کرنش نوسانی، مدول مرکب، یا نسبت مدول

اتلاف G'' به مدول ذخیره G' ، مدول مرکب G^* است. مدول ذخیره توانایی یک ماده برای ذخیره انرژی برای هر نوسان را نشان می‌دهد و مرتبط با سفتی ماده است و مدول اتلاف مرتبط با حرارت ناشی از تحرکات مولکولی و این نشان‌دهنده ویژگی‌های میرایی پلیمر است [۲۳]. روش محاسبه اتلاف در آزمون دینامیکی مکانیکی (DMA) به شرح زیر است:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{j(\omega t + \delta)} \quad (8)$$

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega \delta} \quad (9)$$

$$\sigma(t) = \sigma^* e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$\sigma(t) = \frac{\sigma^*}{\varepsilon_0} \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \delta + i \sin \delta) \varepsilon(t) \quad (11)$$

$$\Delta W = \int_0^t \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt \quad (12)$$

E' : مدول ذخیره

E'' : مدول اتلاف

$$G' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (13)$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (14)$$

$$\sigma = (G' + iG'') \varepsilon = G^* \varepsilon \quad (15)$$

$$|G^*| = (G'^2 + G''^2)^{0.5} \quad (16)$$

$$\mu = \tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (17)$$

$$\Delta W = \pi \varepsilon_0^2 G'' \quad (18)$$

σ : تنش دینامیکی

ε : کرنش دینامیکی

ΔW : انرژی اتلاف شده

$\tan \delta$: فاکتور اتلاف

μ : فاکتور اتلاف

نتیجه‌گیری

از جمله نوع و جنس مواد است. مکانیزم غالب اتلاف انرژی در پلیمرها به دلیل داشتن رفتار ویسکوالاستیک، اتلاف موادی است؛ رفتار ویسکوالاستیک دارای رفتار ویسکوز و الاستیک با هم هستند که بخش ویسکوز اتلاف انرژی را سبب می‌شود. انعطاف‌پذیری زنجیر و داشتن فضای آزاد در پلیمرها موجب تحرک، اصطکاک بین زنجیرها و اتلاف انرژی می‌شود. انعطاف‌پذیری زنجیر و فضای آزاد زیاد بدلیل ساختار

قابلیت اتلاف انرژی یک پارامتر مهم طراحی سازه‌ها در شرایط بارگذاری دینامیکی است. به طور کلی مکانیزم‌های اتلاف ساختاری و اتلاف موادی رفتار اتلاfi سیستم‌ها را کنترل می‌کنند. اتلاف ساختاری وابسته به هندسه سیستم و ناشی از اصطکاک بیرونی اجزا، مفاصل، گیره‌ها، نقص‌ها، ترک‌ها و... است. اتلاف موادی مربوط به طبیعت و ذات ماده

آمورف مواد لاستیکی سبب کاربرد گسترده این مواد به عنوان جاذب‌های انرژی شده است.

سپاسگزاری IRM

مراجع

- [1]Geethamma, V. G., R. Asaletha, Nandakumar Kalarikkal, and Sabu Thomas. "Vibration and sound damping in polymers." *Resonance* 19, no. 9 (2014): 821-833.
- [2]Rodriguez, Manuel Martinez. "Analysis of structural damping." Lulea University of Technology (2006).
- [3]Chevalier, Yvon. "Damping in Materials and Structures: An Overview." In *Generalized Models and Non-classical Approaches in Complex Materials 2*, pp. 1-27. Springer, Cham, (2018).
- [4]Anthamatten, Mitchell, et al. "Tunability of Free Volume and Viscoelastic Damping of Thiol–Ene Networks Deep in the Glassy State." *Macromolecules* 51.7 (2018): 2564-2571.
- [5]Ramani, Ramasubbu, and Sarfaraz Alam. "Free volume and damping in a miscible high performance polymer blend: Positron annihilation lifetime and dynamic mechanical thermal analysis studies." *Journal of Applied Polymer Science* 133.6 (2016).
- [6]Kim, Yongmin, Jungki Shin, and Junhyun Kwon. "Effects of gamma-ray irradiation on free volume in polymers by positron annihilation lifetime spectroscopy." *Nuclear Science and Techniques* 25.S1 (2014): 10502-S010502.
- [7]Gomaa, E., et al. "Correlation between free-volume parameters and physical properties of polyethylene-nitrile rubber blend." *Journal of materials engineering and performance* 13.5 (2004): 583-587.
- [8]Kim, Yongmin, Jungki Shin, and Junhyun Kwon. "Study on the Free Volume in Polymer by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS)." *Journal of the Korean Society of Radiology* 6.6 (2012): 489-493.
- [9]Zhu, Yu Chan, Bo Wang, Wei Zhou, Jin Rong Wu, and Guang Su Huang. "Influence of free volume on damping properties for CIIR and CIIR/PEA investigated by positron." In *Materials Science Forum*, vol. 607, pp. 91-93. Trans Tech Publications, (2009).
- [10]Zhu, Yuchan, et al. "Study on damping mechanism based on the free volume for CIIR by PALS." *The Journal of Physical Chemistry B* 111.39 (2007): 11388-11392.
- [11]Pethrick, Richard Arthur, Taweechai Amornsakchai, and Alastair M. North. *Introduction to molecular motion in polymers*. Whittles, 2011.
- [12]Xie, Hao, et al. "Inner relationship between the damping property and the sand-fixing durability of polymer materials." *Journal of Applied Polymer Science* (2018): 47208.
- [13]Agudelo, Diana C., et al. "Dynamic response of transiently trapped entanglements in polymer networks." *Polymer* 55.4 (2014): 1061-1069.
- [14]Zhou, Jiahui, Hanmo Li, and Xun Lu. "Damping elastomer with broad temperature range based on irregular networks containing hyperbranched polyester and dangling chains." *Polymers for Advanced Technologies* 29, no. 8 (2018): 2308-2316.
- [15]Zhu, Jing, et al. "Thermodynamic analyses of the hydrogen bond dissociation reaction and their effects on damping

- and compatibility capacities of polar small molecule/nitrile-butadiene rubber systems: Molecular simulation and experimental study." *Polymer* 155 (2018): 152-167.
- [16] Qiao, Bo, et al. "A combined experiment and molecular dynamics simulation study of hydrogen bonds and free volume in nitrile-butadiene rubber/hindered phenol damping mixtures." *Journal of Materials Chemistry* 22.24 (2012): 12339-12348.
- [17] Sasikumar, K., et al. "Hysteretic damping in xnbr-mwnt nanocomposites at low and high compressive strains." *Composites Part B: Engineering* 92 (2016): 74-83.
- [18] Mujtaba, Anas. "Viscoelasticity of Filled Elastomers: Determination of Surface-Immobilized Components and their Role in the Reinforcement of SBR-Silica Nanocomposites." PhD diss., Universitäts-und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt, (2014.)
- [19] Persson B. N. J., Volokitin A. I., Rubber Friction on Smooth Surfaces, *European Physics Journal E*, 21, 69-80, (2006.)
- [20] Amino N., Uchiyama, Relation between the Friction and Viscoelastic Properties of Rubber, *Tire Science and Technology*, 28, 3, 178-195, (2000).
- [21] Shaw, Montgomery T., and William J. MacKnight. "Introduction to polymer viscoelasticity. Hoboken." (2005).
- [22] Ge, Changfeng, and Brian Rice. "Impact damping ratio of a nonlinear viscoelastic foam." *Polymer Testing* 72 (2018): 187-195.
- [23] Menrad, K. P. "Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction." (2008).

T

The origin of damping behavior of dynamic-mechanical energies in rubber materials

A.Jaali M.Bayat Jozani J. Toulabi¹, MR. Pourhossainy^{2,*}, M. Razavi Zadeh³, M. Saadat Tagharoodi⁴

1. Master of Malek Ashtar University, Composite Research Institute, Tehran, Iran
2. PhD, Assistant Professor, Faculty Member of the Composite Research Institute of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
3. PhD, Assistant Professor, Faculty Member of the Composite Research Institute of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
4. Master of Malek Ashtar University, Composite Research Institute, Tehran, Iran

*Corresponding author Email: mr_pourhossainy@yahoo.com

Abstract

Junk energy is usually harmful, causing damage and reducing the useful life of systems. Therefore, this vibrations are required to be absorbed or controlled. One important factor in the study of dynamic systems is damping energy or loss of energy. Damping of energy is defined as the capability of a material in absorbing energy and converting it into heat. Damping in a system consists of two parts: structural damping and material damping. Structural damping depends on the geometrical properties of the structure and its components, and the material damping is due to internal friction and is dependent on the intrinsic properties of the material. In general, rubber is considered as the best energy absorption due to viscoelastic behavior. The characteristic which that separates the special behavior of rubbers to the energy absorption from other polymers is their amorphous structure (with microscopic free volume for mobility) and flexible chains. Internal friction between polymer chains is an important mechanism in damping of rubber material, depending on the flexibility of the chain and the free volume. In this study, the role of the nature of material in damping energy is investigated.