

ISAV2023

سیزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران

۲۹ و ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲



مروری بر فرامواد آکوستیک برای کاهش نویز

محمد حمیسی^{آ*}، مهدی باقری^ب

^آایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مکانیک و انرژی، دکترای تخصصی مهندسی مکانیک

^بایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) دانشکده مهندسی شیمی، دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mohamadhamisi@gmail.com

چکیده

آلودگی صوتی در سال های اخیر به یک معضل مهم جهانی تبدیل شده است. متأسفانه، مواد آکوستیک معمولی نمی توانند پیشرفت های قابل توجهی در کاهش نویز ارائه دهند. با این حال، فرامواد آکوستیک راه حل های جدیدی برای کنترل امواج صوتی ارائه می کنند و پتانسیل زیادی برای کاهش انتشار نویز دارند. اخیراً با توجه به توسعه سریع فرامواد آکوستیک، متامواد برای کاهش نویز صوتی توجه محققان در سراسر جهان را به خود جلب کرده است. این فرامواد اغلب هم سبک و هم فشرده هستند و در کاهش نویز فرکانس پایین بسیار عالی هستند که کنترل آن با مواد آکوستیک معمولی دشوار است. پیشرفت های اخیر نشان داده است که فرامواد صوتی به طور موثر امواج صوتی را کنترل می کنند و بهینه سازی ساختار آنها می تواند عملکرد بر اساس پدیده های فیزیکی جدید را فعال کند. این بررسی توسعه فرامواد آکوستیک را معرفی می کند و طبقه بندی اساسی، مکانیسم فیزیکی زیربنایی، سناریوهای کاربردی و روندهای تحقیقاتی در حال ظهور را برای فرامواد کاهش نویز غیرفعال و فعال خلاصه می کند. با تمرکز بر کاهش نویز، کاستی های فن آوری های فعلی مورد بحث قرار می گیرد و روند توسعه آینده پیش بینی می شود. همانطور که دانش ما در این زمینه همچنان در حال گسترش است، انتظار می رود که فرامواد آکوستیک به پیشرفت خود ادامه دهند و در آینده کاربردهای عملی بیشتری در زمینه های نوظهور پیدا کنند.

کلمات کلیدی: فرامواد صوتی؛ جذب صدا؛ فرامواد آکوستیک؛ عایق صدا

اصطلاح «فرامواد»^۱ عموماً برای توصیف مواد کامپوزیتی مصنوعی که از آرایش‌های دوره‌ای یا تصادفی ساختارهای زیرموج مصنوعی تشکیل شده‌اند، استفاده می‌شود. در اوایل سال ۱۹۹۲، مطالعات بر روی بلورهای آوایی نشان داد که طراحی ریزساختارهای مصنوعی می‌تواند انتشار امواج الاستیک^۲ را در محیط‌های ترکیبی الاستیک تنظیم کند.^[۱] جالب توجه است که میدان‌های الکترومغناطیسی نقش اصلی را در تحقق اولین فرامواد ایفا کردند که از ضریب‌ها و نفوذپذیری‌های معادل منفی در آزمایش‌ها استفاده کردند^[۲] و به درک نظری ما از این میدان افزودند. مفاهیم مشابهی برای انتقال حرارت،^[۳] مکانیک،^[۴] و اپتیک،^[۵،۶] استفاده شده است که هم‌ظهور و هم‌توسعه سریع فرامواد آکوستیک را به موازات تحقیقات در مورد کریستال‌های آوایی و فرامواد الکترومغناطیسی ترویج کرده است.

مطالعات فرامواد آکوستیک زیر آب دیرتر از موارد موجود در محیط‌های هوایی آغاز شد، و زمینه تحقیقاتی کوچک باقی می‌ماند، عمدتاً به این دلیل که امیدانس آب بیشتر از هوا است و باید عوارض جفت شدن سیال-ساختار مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، تضعیف امواج صوتی در آب کم است، بنابراین استفاده از مکانیسم تلفات برای کنترل امواج صوتی دشوار است. پیدایش فرامواد آکوستیک زیر آب را می‌توان به یک ماده پنتامود پیشنهادی با خواص کشسانی شبیه به یک مایع ردیابی کرد.^[۷] در سال ۲۰۱۷، تئوری مخفی کاری آکوستیک مبتنی بر ماده پنج‌مود و تئوری آکوستیک تبدیل ارائه شد،^[۸] که پایه و اساس استفاده از مواد پنج‌مود برای مدولاسیون آکوستیک را ایجاد کرد. این همچنین باعث افزایش تحقیقات در مورد خود ماده پنتامود^۳ و کاربرد آن در کنترل صوتی زیر آب شد.^[۸-۱۲]

در مورد فوکوس صوتی زیر آب، لی و چان^[۹] ابتدا با استفاده از یک آرایه گوی لاستیکی نرم که در آب قرار داده شده بود، یک محیط صوتی منفی دوگانه زیر آب را درک کرد و اشاره کرد که مدول^۴ و چگالی موثر منفی به ترتیب از تشدید تک قطبی و دوقطبی همان ساختار ناشی می‌شود. ضریب شکست منفی و فوکوس صوتی زیر طول موج را می‌توان با استفاده از رسانه‌های منفی دوگانه متوجه شد. ژانگ و همکاران به طور تجربی تمرکز اولتراسونیک زیر آب را با استفاده از یک آرایه زیر صفحه رزونانس^۵ هلمهولتز با طول موج زیر با مدول موثر منفی مشاهده کرد.^[۱۴] ژو و همکاران از یک ضریب شکست منفی^۶ و حالت سطحی که توسط حرکت نسبی یک تشدیدگر هیبریدی ایجاد می‌شود برای تمرکز موج انتشار و موج محو کننده به ترتیب استفاده کرد و فوکوس فراصوت زیر آب را متوجه شد که حد پراش را شکست.^[۱۵]

در حال حاضر، تحقیقات بر روی فرامواد آکوستیک زیر آب^۷ بر روی جذب صوتی^۸ زیر آب متمرکز شده است و توسعه در جهت همه جانبه، مقیاس بزرگ، ضخامت زیر طول موج، وزن سبک، مقاومت در برابر فشار بالا و کامپوزیت‌های چند منظوره در حال پیشرفت است. ظهور فرامواد آکوستیک^[۱۶] کمک زیادی به توسعه آکوستیک کرده است. مواد متعارف از نظر کنترل امواج صوتی محدودیت‌های زیادی دارند. به عنوان مثال، آنها نمی‌توانند طول موج‌های بلند را با ساختارهای کوچک کنترل کنند. همانطور که در بالا نشان داده شد، فرامواد آکوستیک به روش‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند و عملکردهای متفاوتی دارند.^[۱۷-۱۸] این بررسی بر روی فرامواد صوتی تمرکز دارد که به طور خاص برای کاهش نویز از منظر کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند. بر اساس روش‌های کنترل مختلف مورد استفاده، ما پیشرفت تحقیقاتی فرامواد صوتی غیرفعال و فعال برای عایق‌سازی و جذب صدا را بررسی می‌کنیم، تحقیقات فعلی را خلاصه می‌کنیم و روند توسعه آینده را ارزیابی می‌کنیم.

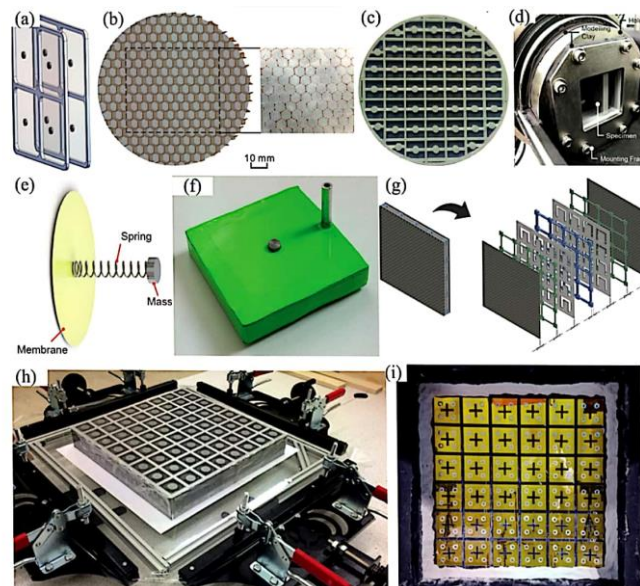
^۱ Metamaterial^۲ Elastic waves^۳ Pentamode^۴ Module^۵ Resonance^۶ Negative refractive index^۷ Underwater acoustics^۸ Sound absorption

۲- فرامواد غیرفعال آکوستیک

روش‌های رایج کنترل نویز شامل سرکوب نویز در منبع، محدود کردن انتشار نویز در طول مسیر انتقال آن، و سرکوب نویز در نقطه دریافت است. در عمل نمی‌توان از اکثر نویزها اجتناب کرد و کنترل نویز در نقطه دریافت می‌تواند مشکلات بالقوه‌ای مانند نسبت سیگنال به نویز پایین و آسیب به اجزای الکتروآکوستیک برای گیرنده صدا ایجاد کند. بنابراین کنترل نویز با تغییر مسیر انتقال بسیار مهم است. به دلیل طول موج بلند نویز با فرکانس پایین، طبق قانون کیفیت، اندازه یک سازه آکوستیک باید به اندازه طول موج عملیاتی باشد. فرامواد آکوستیک به دلیل خواص فیزیکی غیرمعمولشان در سرکوب نویز فرکانس پایین برتری دارند. در بخش‌های بعدی، خواص عایق صدا و جذب فرامواد مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۲ فرامواد غیرفعال عایق صدا

فرامواد آکوستیک از قانون جرم تبعیت نمی‌کنند و عایق صوتی بسیار بالاتری نسبت به پیش‌بینی شده توسط قانون جرم به دلیل خواص آکوستیک منحصر به فردشان تولید می‌کنند. در اوایل سال ۲۰۰۸، اولین زیر کلاس از نوع غشایی از فرامواد صوتی پیشنهاد شد. [۱۹] مواد مورد بررسی شامل یک غشای الاستیک کششی با یک جرم اضافی بر روی یک قاب حمایتی بود. این غشاء، با ضخامت تنها ۰/۲۸ میلی‌متر، می‌تواند در ۱۴۶ هرتز طنین انداز شود. عایق صوتی حاصل بسیار بالاتر از آن چیزی بود که توسط قانون جرم پیش‌بینی شده بود. فرامواد آکوستیک غشایی به دلیل ساختار ساده، ساخت آسان و غشاهای نرم نازک مورد توجه قرار گرفته‌اند. محققان مجموعه‌ای از مدل‌های صوتی تحلیلی را برای تجزیه و تحلیل خواص عایق صدا و مکانیسم‌های فرامواد آکوستیک نوع غشایی پیشنهاد کرده‌اند، و تأیید تجربی [۲۰، ۲۱] را در لوله‌های امپدانس صوتی انجام داده‌اند. با توجه به تفاوت قابل توجه بین چگالی جرم اضافه شده و غشاء، کل فراماده آکوستیک نوع غشاء دارای دو حالت ویژه مستقل است: (۱) یکی از موارد ناشی از تشدید محلی سیستم فنر-جرم که از جرم و غشاء تشکیل شده است. و (۲) دیگری ناشی از خود رزونانس غشاء بین جرم و مرز ثابت است. هنگامی که فرکانس موج صوتی فرودی از فرکانس اولین حالت ذاتی بیشتر شود، ارتعاش سیستم فنر-جرم معکوس می‌شود. در نتیجه، عایق صوتی کل سازه به طور قابل توجهی بهبود یافت. علاوه بر فرامواد آکوستیک غشایی یا صفحه نازک، فرامواد آکوستیک از نوع لایبرنت توجه محققان در سراسر جهان را به خود جلب کرده است.



شکل ۱. فرامواد عایق صدا از نوع غشایی. (a) شماتیک یک فراماده صوتی سبک از نوع لانه زنبوری. (c) نمونه فراماده آکوستیک از نوع غشایی محدود. (d) نمونه غشایی بدون کشش بدون هیچ جرم اضافی. (e) شماتیک یک فراسطح صوتی متشکل از یک غشای نازک. (f) فراماده آکوستیک از نوع غشایی قابل تنظیم. (g) فراماده آکوستیک لایه‌ای چند رزونانسی. (h) فراماده از نوع غشایی دولاویه. (i) نوع غشای فراماده آکوستیک با فرکانس پایین.

در سال ۲۰۱۵، یک فراماده صوتی با لوله‌های لایبرنتی که در امتداد یک طرف لوله اصلی چیده شده بودند، پیشنهاد شد، [۲۲] که خواص عایق صوتی با فرکانس پایین و پهنای باند عالی را نشان داد. در سال ۲۰۱۹، لیو و همکاران. فرامواد جدید صوتی با استفاده از یک فضای پیچ در پیچ برای تولید عایق صوتی باند پهن ساخته شد. بر اساس رزونانس فانو، یک مانع صوتی فوق پهن باند توسط فرامواد فضای سیم پیچ جمع آوری شد، که توسط یک مدل ساده از ویژگی‌های انتقال صدا فرامواد-پیچ فضایی تحت تابش عمودی توصیف شد. [۲۳] تلفات انتقال صدا در یک سد صوتی آزمایشی با ضخامت ۲۲۰ میلی‌متر از ۱۰ دسی بل در محدوده فرکانس ۰/۴۴ تا ۳/۸۵ کیلوهرتز فراتر رفت که به طور کامل نه باند اکتاو یک سوم را پوشش می‌دهد.

برای برنامه‌های کاهش نویز که نیاز به تهویه دارند، فرامواد صوتی راه حل‌های غیر متعارفی را ارائه می‌دهند. در واقع، سیستم‌های نما آکوستیک در اوایل ایجاد شدند و به طور مداوم برای چندین دهه توسعه یافتند، از اولین نمای دو پوسته تا پنجره پلنوم با عملکرد کاهش نویز. به عنوان یک ساختار آکوستیک کلاسیک، رزوناتورهای هلمهولتز دارای پتانسیل کاربردی زیادی در تهویه و فرامواد عایق صدا هستند که توسط گلوبی در ساختار آن فعال می‌شود. هنگامی که یک موج صوتی وارد گلوبی می‌شود، هوای بیرون را با گلوبی جایگزین می‌کند و در نتیجه هوای داخل حفره فشرده می‌شود. در فرکانس تشدید f_h ، هوای فشرده در حفره، موج صوتی فرودی (معادل جابجایی فنر در سیستم فنر-جرم) را فشرده می‌کند تا به پاسخ دینامیکی سیستم، یعنی مدول توده منفی موثر دست یابد. f_h و مدول معادل $E_{eff}(\omega)$ تشدید کننده هلمهولتز به شرح زیر است: [۲۴]

$$f_h = \sqrt{\frac{A}{V \cdot L_{eff}}} \quad (1)$$

$$E_{eff}(\omega) = E_0 \left[1 - \frac{F\omega_h^2}{\omega^2 - \omega_h^2 + i\eta\omega} \right]^{-1} \quad (2)$$

که در آن A سطح مقطع گلوبی، L_{eff} طول گلوبی اصلاح شده، V حجم حفره، E مدول حجمی هوا، F ضریب هندسی، η

ضریب اتلاف و $\omega_h = 2\pi f_h$ فرکانس زاویه ای تشدید حفره هلمهولتز است.

به طور خلاصه، سه نوع متامواد عایق صوتی غیرفعال عبارتند از: (۱) غشاهای پیش تنیده و قاب‌های صلب. (۲) صفحات نازک و ساختارهای اضافی، از جمله صفحات سیاه چاله صوتی. و (۳) فرامواد لایبرنت یا مارپیچ مهر و موم شده و تهویه شده. برای غلبه بر قانون جرم، توسعه فرامواد صوتی برای عایق صدا منجر به ساختارهای متنوعی شده است و بینش‌های زیادی را در مورد پدیده‌های فیزیکی آنها آشکار کرده است. برای پیشرفت به سمت کاربردهای عملی، توسعه فرامواد آکوستیک عایق صوتی غیرفعال بر دستیابی به دستگاه‌های باربر سبک با استحکام و دوام بالا تمرکز دارد.

۲-۲ فرامواد غیرفعال جذب صدا

برای به حداکثر رساندن کنترل صدا، تنها استفاده از ساختار عایق صدا کافی نیست و ترکیب سازه‌های عایق صدا با جذب صدا مطلوب است. یافتن راه‌هایی برای کنترل امواج صوتی با فرکانس پایین با فرامواد به هدف اصلی در زمینه کنترل نویز تبدیل شده است. ضریب جذب صدا-انرژی A به شرح زیر است: [۲۵]

$$A = E_{diss}/E_{inc} \quad (3)$$

در اینجا E_{inc} انرژی موج صوتی فرودی است و E_{diss} انرژی صوتی استهلاک شده است که کسر حجمی حاصلضرب انرژی صوتی محلی $D(x)$ و ضریب اتلاف ψ را نشان می‌دهد. بنابراین، برای افزایش E_{diss} مواد، ψ یا $D(x)$ باید افزایش یابد. برای مواد متخلخل جذب صدا معمولی، سطح تماس بین موج صوتی و مواد را می‌توان با ایجاد منافذ متعدد برای افزایش α افزایش داد. از سوی دیگر، برای مواد جذب صدا تشدید کننده، E_{diss} را می‌توان با افزایش چگالی انرژی صوتی محلی از طریق رزونانس افزایش داد. از آنجایی که جذب‌های کامل در الکترومغناطیس و اپتیک مهم هستند، فرامواد آکوستیک به دلیل ویژگی‌های تشدید زیرموج عمیق خود نقش مهمی در توسعه جذب‌های کامل ایفا می‌کنند. هنگامی که ضریب نشتی Q_{leak-1} سیستم با ضریب تلفات Q_{loss-1} برابر است، سیستم به شرایط جفت بحرانی می‌رسد. بنابراین، جذب کامل موج صوتی فرودی را ممکن می‌سازد. اگر امپدانس سطحی سیستم با محیط

انتقال صدا مطابقت داشته باشد، سیستم می تواند صدا را به خوبی جذب کند. بر اساس تئوری آکوستیک، ضریب جذب α یک سازه با امیدانس معادل Z_s برابر است با: [۲۶]

$$\alpha = \frac{4x_s}{(1+x_s)^2 + y_s^2} \quad (۴)$$

در اینجا x_s مقاومت آکوستیک، y_s مقاومت^۹ صوتی و امیدانس معادل سازه $Z_s = x_s + iy_s$ است. معادله (۴) نشان می دهد که ساختار جذب کامل صدا را زمانی که هر دو $x_s = 1$ و $y_s = 0$ راضی باشند را قادر می سازد.

از توسعه ده سال اخیر، فراماده آکوستیک غشایی، به عنوان نماینده معمولی ساختارهای سبک وزن، زودتر وارد میدان دید شده است. در سال ۲۰۱۲، می و همکاران. برای اولین بار از یک غشای الاستیک با جرمی نیمه استوانه ای متصل به سطح استفاده کرد. یک سیاهچاله زیرموج عمیق به صورت تجربی بدست آمد. موج صوتی فرودی به طور موثر در محدوده فرکانس ۱۰۰-۱۰۰۰ هرتز جذب شد و چگالی انرژی کل در غشا تقریباً دو تا سه مرتبه بزرگتر از موج فرودی در فرکانس‌های پایین بود. چن و همکاران یک مدل صفحه صوتی ارتعاشی نظری را برای بررسی مکانیسم جذب انرژی صوت در فرامواد صوتی غشایی در شرایط معمولی سطحی ایجاد کرد. عملکرد جذب صدا فراماده آکوستیک غشایی به صورت کمی اندازه‌گیری شد.

در سال‌های اخیر روش‌های زیادی برای طراحی فرامواد صوتی با هدف جذب موثر امواج صوتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۱۸، اورگان و همکاران. یک جاذب صوتی با ضخامت $1/201$ طول موج با استفاده از یک بلوک جرمی گیره دار با غشاء ساخته شد و به جذب تقریباً کامل دست یافت. در این ساختار، جرم مانند یک پیستون حرکت می کند و هوای فشرده به عنوان فنری عمل می کند تا انرژی موج صوتی فرودی را مصرف کند، در حالی که غشاء فقط برای جلوگیری از نشت گاز عمل می کند. در همان سال، وانگ و همکاران. یک فراماده آکوستیک لایه ای را نشان داد که از یک ماده متخلخل و یک غشاء تشکیل شده بود. جذب صوتی عالی و عایق باند پهن برای یک میدان آزاد صوتی به دست آمد. پس از آن، یک ساختار جذب صدا بر اساس یک فراماده صوتی غشایی با یک غشای ژل سیلیکا و ورق آلومینیوم ایجاد شد، که میانگین ضریب جذب صدا α بیشتر از $0/8$ و حداکثر مقدار نزدیک به $1/0$ را در محدوده فرکانس ۶۵۰-۴۰۰ هرتز نشان داد. [۲۷]

حفظ یک پیش تنش غشا در آزمایش های مکرر دشوار است، جاذب های صدا بر اساس مواد سفت و سخت برای کاربردهای عملی مفیدتر هستند. در سال ۲۰۱۴، یک تشدید کننده هلمهولتز همسطح ارائه شد که از نظر تئوری جذب تقریباً کامل زیر موج عمیق با ضخامت $1/5$ برابر طول موج جذب کامل را به دست آورد. در سال ۲۰۱۶، گارسیا و همکاران. جاذب های باند باریک زیر موج کامل و جاذب های باند پهن کامل بر اساس تشدید کننده های صوتی هلمهولتز ساخته شده است. جایی که ضریب پراکندگی با استفاده از یک صفحه مختلط برای اولین بار برای توضیح جذب صوتی کامل با استفاده از شرایط جفت بحرانی بیان شد. در سال ۲۰۱۷، یک ساختار کامپوزیت لانه زنبوری موجدار سوراخ‌دار با افزودن سوراخ‌هایی به پانل بالایی و کامپوزیت موجدار شکل (۲-۲) برای دستیابی به عملکرد جذب صدا با باند فوق‌العاده و فرکانس پایین ساخته شد. در سال ۲۰۱۹، هوانگ و همکاران. یک سیستم صوتی متشکل از یک تشدید کننده هلمهولتز و یک دیافراگم تعبیه شده شکل (۲-۲) ایجاد کرد و به طور تجربی نشان داد که سازه زمانی که ضخامت آن تنها $1/5$ برابر طول موج عملیاتی بود، به جذب کامل صدا دست یافت. علاوه بر این، یک سطح فوق‌العاده با جفت کردن دو تشدید کننده هلمهولتز با فرکانس های تشدید متفاوت ساخته شد شکل (۲-۲). نویسندگان پیشنهاد کردند که فرکانس ویژه‌ای بین فرکانس‌های تشدید دو تشدیدگر هلمهولتز وجود داشته باشد که در آن هر دو تشدیدکننده برانگیخته می‌شوند، اما با فازهای مخالف؛ این امر منجر به فروپاشی موج صوتی به سرعت در جهت وقوع صوت می‌شود و در نتیجه جذب کامل به دست می‌آید. در سال ۲۰۲۰، هوانگ و همکاران. با کنترل اثر جفت منسجم بین اجزاء، به یک فراسطح ترکیبی برای جذب صدا دست یافت، [۲۸] که ضریب جذب متوسط α تا $0/957$ در محدوده فرکانس ۳۲۲۴-۸۷۰ هرتز، با ضخامت ساختار تنها $3/9$ سانتی متر به دست آورد.

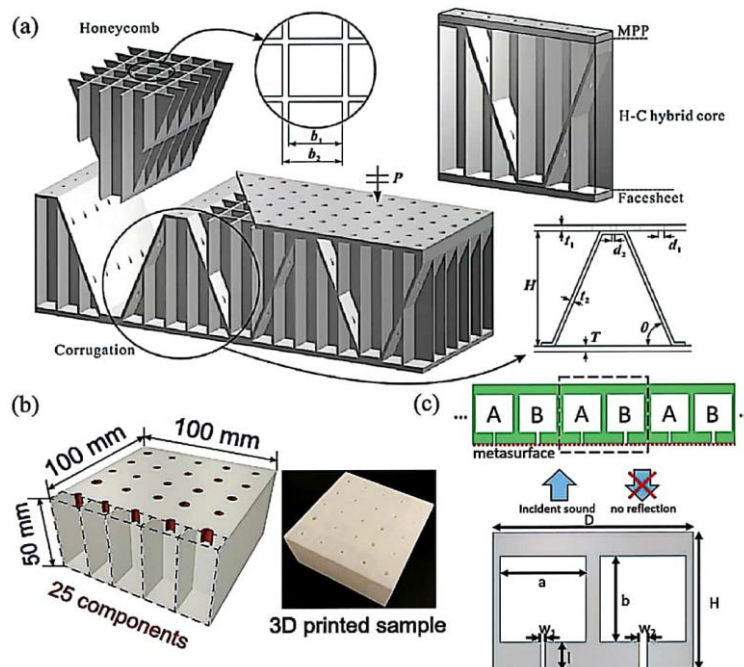
طبق قانون اسنل، هنگامی که یک موج صوت یا نور به سطح مشترک دو رسانه مختلف برخورد می کند، زاویه تابش برابر با زاویه بازتاب است. در سال ۲۰۱۱، کاپاسو و همکاران. تعمیم قانون اسنل را پیشنهاد کرد. [۲۹] با وارد کردن یک عنصر تشدید در رابط

^۹ Reactance

برای ایجاد تغییر فاز در رابط، می‌توان بازتاب یا انتقال امواج الکترومغناطیسی را کنترل کرد. به دلیل تغییر فاز $\Phi(x)$ در سطح مشترک به دلیل تغییر فاز $\Phi(x)$ در سطح مشترک، رابطه بین زاویه برخورد و زاویه بازتاب به صورت زیر است:

$$\sin \theta_r = \sin \theta_i + \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi(x)}{dx} \quad (5)$$

در اینجا θ_r زاویه انعکاس، θ_i زاویه تابش، λ_0 طول موج صوتی در محیط پس‌زمینه، و $d\Phi(x)/dx$ گرادیان فاز در امتداد مماس رابط است. از رابطه (۳) می‌توان دریافت که θ_r را می‌توان به طور دلخواه با تغییر $\Phi(x)$ تنظیم کرد. با استفاده از قانون اسنل تعمیم یافته فوق، سطح روبنای موج الکترومغناطیسی بر اساس خواص مشخصه تشدید پلاسمون طراحی شد. از آنجا که امواج صوتی امواج اسکالر هستند و چنین تشدید وجود ندارد و واحدهای ساختاری مبتنی بر تاشوی فضایی برای تنظیم میدان صوتی منعکس شده استفاده می‌شوند. "فضای تا شده"^{۱۱۰} یک مفهوم ساختاری مهم در آکوستیک است زیرا دارای ضریب شکست معادل بالایی است که سرعت صوت را کاهش می‌دهد. [۳۰] از این رو می‌توان سرعتی معادل که کمتر از سرعت صوت در هوا باشد به دست آورد. تأخیر فاز یک موج صوتی در حال انتشار $\varphi = k \cdot l$ است که k بردار موج صوتی هوا و l فاصله انتشار موج صوتی است. بنابراین، می‌توان φ را با تنظیم l کنترل کرد.



شکل ۲. شماتیک هایی که انواع مختلفی از فرامواد جذب صدا را بر اساس تشدیدگرهای هلمهولتز نشان می‌دهد. (a) ساختار کامپوزیتی لانه زنبوری سوراخ دار. (b) ساختار آکوستیک با تشدید کننده هلمهولتز با روزنه های تعبیه شده. (c) دو تشدید کننده هلمهولتز با فرکانس های تشدید متفاوت را می‌توان برای ایجاد یک متاماده آکوستیک جفت کرد.

۳- فرامواد فعال آکوستیک

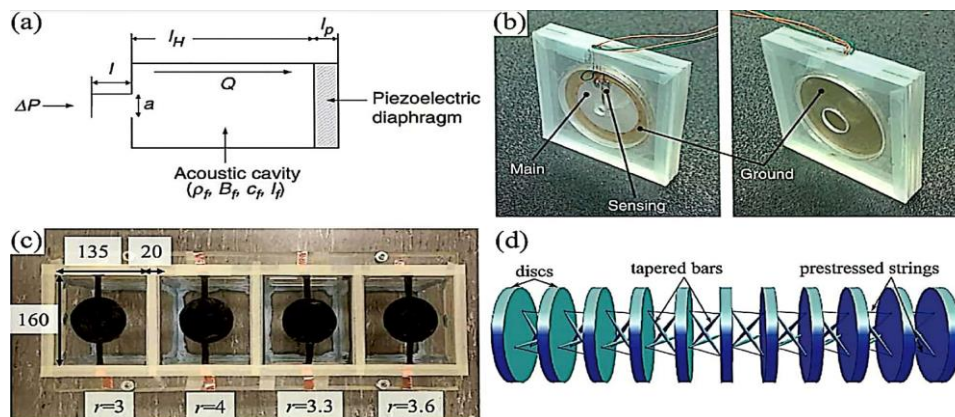
محیط های نویز واقعی اغلب پیچیده هستند و در طول زمان تغییر می‌کنند. هنگامی که یک فراماده آکوستیک غیرفعال تولید می‌شود، تنظیم خواص آن دشوار است. این یک محدودیت جدی در مواجهه با محیط‌های آکوستیک پویا پیچیده است. با فرامواد فعال آکوستیک، تنظیم و کنترل پارامترهای صوتی با استفاده از محرک های خارجی (مانند پیزوالکتریک، فشار مکانیکی، پر شدن با سیال و

^{۱۰} Folded space

تنظیم دما) ممکن می‌شود. از نظر کنترل نویز، فرامواد آکوستیک فعال پتانسیل توسعه بالایی دارند. مشابه تمام مواد آکوستیک غیرفعال، می‌توان آنها را با توجه به عملکرد اصلی آنها به تمام مواد جذب صدا و عایق تقسیم کرد.

۱-۳ فرامواد عایق صوتی فعال

در سال ۱۹۳۴، Pual مفهوم کنترل نویز فعال را معرفی کرد. [۳۱] این مفهوم شامل تداخل است، جایی که لغو دو موج صوتی با تعدیل فشار صوتی یک منبع صوتی ثانویه از منبع اصلی اتفاق می‌افتد. در نتیجه، امواج صوتی با فازهای مخالف تولید می‌شوند و لغو متقابل رخ می‌دهد که به طور موثری نویز کلی را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۰۹، مفهوم فرامواد آکوستیک فعال برای اولین بار ارائه شد، و روش‌های کنترل فعال برای فرامواد صوتی برای کنترل امواج صوتی ارائه شد. آنها گروهی از ساختارها را طراحی کردند که از حفره‌های مایع تشکیل شده بود که توسط غشاهای پیزوالکتریک چند لایه جدا شده بودند شکل (۳-۳). حالت ارتعاش غشاهای پیزوالکتریک با استفاده از ولتاژ اعمال شده کنترل شد. چگالی جرمی معادل بدون تغییر ساختار آن تولید شد. علاوه بر این، انتقال موج صوتی کنترل شد و باند فرکانس کاری آن گسترش یافت. متعاقباً، حسگرهای پیزوالکتریک با تشدیدگرهای هلمهولتز ترکیب شدند تا یک متاماده آکوستیک مخفی قابل تنظیم تولید کنند شکل (۳-۳). یک سنسور پیزوالکتریک برای اندازه‌گیری فشار موج فرودی استفاده شد و سیگنال الکتریکی تولید شده توسط یک مدار داخلی، ارتعاشات غشایی را ایجاد می‌کرد. بنابراین، امکان کنترل فعال خواص صوتی مواد وجود دارد. در سال ۲۰۱۷، چن و همکاران. یک کریستال صوتی تطبیقی با صفحات پیزوالکتریک موازی ساخت که می‌تواند از طریق یک مدار الکترونیکی کنترل شود تا مکانیزم عایق صدا قابل تنظیم را فعال کند. [۳۲] یو و همکاران یک فراماده متشکل از یک تشدید کننده مرکب در دیواره جانبی یک لوله صلب را پیشنهاد کرد شکل (۳-۳). [۳۳] علاوه بر این، تنظیم ویژگی‌های صوتی هر تشدید کننده با استفاده از یک غشای الاستیک دی الکتریک از پیش کشیده شده امکان پذیر بود. در سال ۲۰۱۹، لی و همکاران. فرامواد آکوستیک نوع غشایی را با استفاده از غشاهای نانوکامپوزیت پلی وینیل الکل/گرافن تهیه کرد، که در آن خواص عایق صدا با اعمال میدان الکتریکی خارجی تنظیم می‌شد. [۳۴] در سال ۲۰۱۶، شیبا و همکاران. اثر دمایی آب بر شکاف باند^{۱۱} تشدید محلی و پارامترهای صوتی معادل فرامواد صوتی را با رزوناتورهای هلمهولتز مطالعه کرد. [۳۵] در همان سال، لانگفلد و همکاران. دو متاماده آکوستیک از نوع غشایی را با یک جرم اضافه روی هم قرار داد و یک سوراخ در فضایی که توسط دو متاماده آکوستیک غشایی تشکیل شده بود نگه داشت تا عایق صوتی مواد را از طریق فشار هوای خارجی کنترل کند. در سال ۲۰۱۸، یک ساختار آکاردئونی مانند شکل (۳-۳) پیشنهاد شد، که در آن فاصله باند تضعیف آن با استفاده از کشش برای تولید عایق صوتی با فرکانس پایین تنظیم شد. [۳۶]



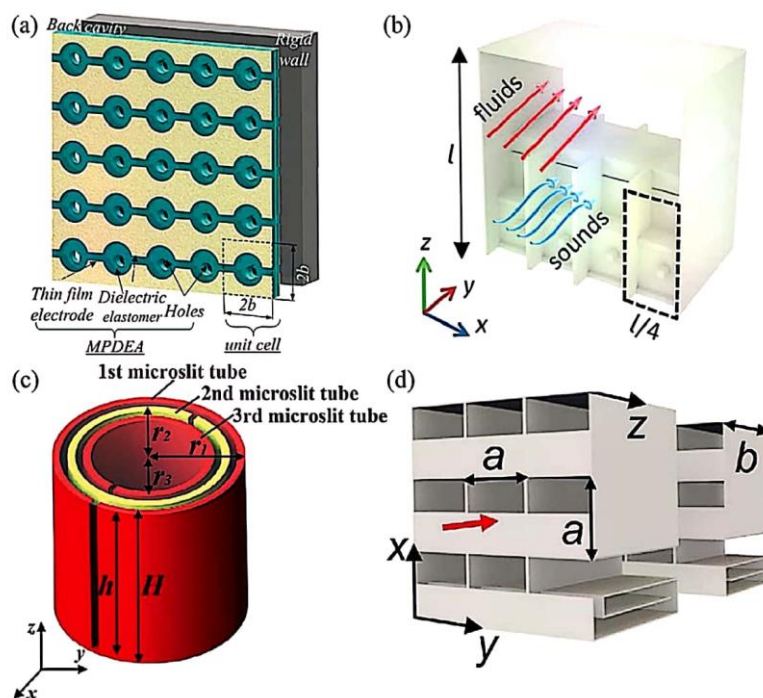
شکل ۳. فرامواد آکوستیک عایق صوتی فعال. (a) فراماده آکوستیک قابل تنظیم. (b) ساختار پنهان آکوستیک فعال. (c) فراماده صوتی

یک تشدید کننده که روی دیواره جانبی یک لوله صلب ترکیب شده است، جایی که پارامترهای صوتی ماده توسط غشای الاستومری دی الکتریک کنترل می‌شود. (d) فراماده آکوستیک فعال آکاردئونی شکل، متشکل از صفحات دایره‌ای، میله‌های مخروطی، و رشته‌های پیش تنیده.

^{۱۱} Bond gap

۲-۳ فرامواد جذب - صدا فعال

به طور مشابه، کنترل فعال در زمینه جذب صدا پیشرفت‌هایی داشته است. به عنوان یک نمونه اولیه از یک فراماده فعال جذب صدا، یک جاذب غشایی متشکل از آهنربا و غشاء ساخته شد و یک مدل تئوریتیک بر اساس مدل مدار معادل توسعه یافت. یک تشدید کننده کوچک با سفتی منفی توانست امپدانس صوتی یک تشدیدگر بزرگ را به دست آورد و پیک جذب صدا به فرکانس پایین منتقل شد. لی و همکاران یک متاماده آکوستیک یکنواخت را معرفی کرد که پتانسیل دستیابی به جذب صدای پهن باند فرکانس پایین را دارد. فراماده پیشنهادی با قرار دادن یک پانل ضد مغناطیسی انعطاف پذیر در یک میدان مغناطیسی متقارن محقق شد. پهنای باند جذب صوت نسبی متاماده با افزایش قدرت میدان مغناطیسی افزایش یافت، زیرا با فرکانس پیک جذب نسبت معکوس دارد. لو و همکاران یک ساختار الاستیک دی الکتریک با سوراخ ریز پیشنهاد کرد شکل (۳-۳۷). [۳۷] در سال ۲۰۲۱، شیانگ و همکاران. یک ساختار جذب صدا موثر بر اساس تشدید کننده هلمهولتز شکل (۴-۳۸) پیشنهاد کرد، [۳۸] که در آن فرکانس جذب صدا به سادگی با حرکت دادن موقعیت تشدید کننده هلمهولتز تنظیم می شود. دیافراگم و کشش غشاء الاستیک از طریق یک ولتاژ خارجی برای بهینه سازی نوار جذب صدا از سازه کنترل شد. خو و همکاران یک جاذب صدا با فرکانس پایین با استفاده از یک لوله حلقوی چند لایه با ضخامت زیر طول موج عمیق ساخته شد شکل (۳-۳۹). [۳۹] باند فرکانس جذب صدا را می توان با تنظیم زاویه لوله میکرو شکاف تغییر داد. دو و همکاران یک فراماده آکوستیک از نوع هزارتوی دولایه پیشنهاد شده است شکل (۳-۳۸d)، که در آن پهنای باند جذب نسبی سازه را می توان با تغییر نسبت باز شدن سازه تنظیم کرد. علاوه بر این، یک فراماده صوتی تشدید مبتنی بر یک الاستومر مغناطیسی قابل تنظیم مجدد برای تنظیم عملکرد جذب صدا، تلفات انتقال، و چگالی موثر توسعه داده شد. شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها نشان داد که این سازه می‌تواند طول موج صوتی موجود در هوا را که ۱۳۱۷۰ برابر بزرگ‌تر از ضخامت آن است، تغییر دهد. در مقایسه با توسعه سریع فرامواد غیرفعال جاذب صدا، مطالعات کمی در مورد فرامواد جذب کننده صدا فعال وجود دارد. در حال حاضر، هزینه بسیار بالا است، و طراحی‌ها برای تغییر واقعی رفتار دستگاه از طریق کنترل فعال بسیار پیچیده هستند. ما مشتاقانه منتظر ظهور روش‌های کنترل فعال تر و محصولات تجاری فرامواد جذب کننده صدا فعال تر در آینده هستیم.



شکل ۴. فرامواد آکوستیک جذب صدا فعال (a) جاذب پهن باند با دی الکتریک الاستیک میکرو سوراخ. (b) جاذب قابل تنظیم بر اساس تشدید کننده هلمهولتز. (c) ساختار لوله ریز شکاف حلقوی چند لایه. (d) فراماده آکوستیک از نوع لایرننت دو لایه.

۴- خلاصه و چشم انداز

در مقایسه با مواد آکوستیک معمولی، مطالعات فرامواد آکوستیک پیشرفت‌های قابل توجهی را در کنترل نویز فرکانس پایین ممکن کرده است و یک سری مدل‌های نظری را توسعه داده و بینش‌هایی را برای کنترل بهتر امواج صوتی ارائه کرده است. با این حال، هنوز موانعی در رابطه با باند فرکانس عملیاتی، آزمایش نمونه، استحکام ساختاری و کامپوزیت‌های فعال/غیرفعال وجود دارد که نیاز به مطالعه عمیق‌تری دارند.

(۱) باند فرکانس کاری فرامواد صوتی باید بیشتر گسترش یابد. اگرچه فرامواد آکوستیک کاهش‌دهنده نویز فعلی، جداسازی یا جذب صدای عالی را در محدوده‌های فرکانس متوسط و پایین ارائه می‌کنند، باند فرکانس کاری اغلب باریک است، که نمی‌تواند به طور کامل نیازهای پردازش نویز باند پهن را برآورده کند.

(۲) در حالی که حجم نمونه به طور کلی کوچک است، چند نمونه بزرگ در مطالعات قبلی گزارش شده است. نمونه‌های کوچک فقط برای مطالعه امواج صوتی عمودی برخوردار می‌کنند، که در آن فقدان نمونه‌های بزرگ داده‌های ناکافی را برای مطالعه اثربخشی فرامواد صوتی بر امواج صوتی مورب ارائه می‌دهد. خواص فرامواد آکوستیک در محیط‌های نویز واقعی هنوز باید با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار گیرد.

(۳) سازه‌های پیشنهادی اغلب بین وزن کم و استحکام سازه ای تعادل دارند. در حال حاضر، بسیاری از فرامواد صوتی پیشنهادی سبک وزن با ضخامت زیر موج هستند، اما جذب صدای پهن باند محدود یا عملکرد عایق صدا دارند. استحکام ساختاری چنین فرامواد آکوستیک پیشنهادی به خوبی مورد توجه قرار نگرفته است و بیشتر مواد را نمی‌توان به راحتی برای کاربردهای مهندسی عملی استفاده کرد.

(۴) مطالعات بر روی فرامواد آکوستیک مرکب فعال/غیرفعال باید تشدید شود. هنگامی که یک فراماده آکوستیک غیرفعال ساخته می‌شود، دیگر نمی‌توان خواص آکوستیک آن را تغییر داد. اگرچه باند فرکانس کاری یک فراماده آکوستیک فعال را می‌توان در محدوده خاصی تنظیم کرد، این باند باریک است و هزینه تولید بالا است.

در حال حاضر، سازه‌های مرکب با اجزای فعال و غیرفعال دارای چندین مزیت هستند. دستگاه‌های عملکردی آکوستیک، که بر پایه فرامواد ساخته شده‌اند، برای کنترل نویز عالی هستند و چشم‌انداز کاربردی بسیار خوبی دارند. با تحقیقات بیشتر، خواص فرامواد آکوستیک را می‌توان برای برآورده کردن الزامات کنترل امواج صوتی در طول انتشار نویز تنظیم کرد. علاوه بر این، تلاش‌هایی برای تحقق بخشیدن به تمام‌مواد سبک وزن با ضخامت زیر طول موج، ظرفیت باربری بالا، جذب صدا بالا و رفتار عایق صدا انجام شد.

مراجع

1. M. M. Sigalas, E. N. Economou, J. Sound. Vib. 1992, 158, 377.
2. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz, Phys. Rev. Lett. 2000, 84, 4184.
3. X. L. Liu, T. Tyler, T. Starr, A. F. Starr, N. M. Jokerst, W. J. Padilla, Phys. Rev. Lett. 2011, 107, 045901.
4. X. Y. Zheng, H. Lee, T. H. Weisgraber, M. Shusteff, J. DeOtte, E. B. Duoss, J. D. Kuntz, M. M. Biener, Q. Ge, J. A. Jackson, S. O. Kucheyev, N. X. Fang, C. M. Spadaccini, Science 2014, 344, 1373.
5. K. H. Dou, X. Xie, M. B. Pu, X. Li, X. L. Ma, C. T. Wang, X. G. Luo, Opto-Electron. Adv. 2020, 3, 190005F. Young, M. K. Cheng, S. M. Weng and K. L. Lee, "Nonlinear vibration analysis of a FGM plate with viscoelastic core", *Proceedings of the 10th International Conference on Vibration Problems*, Prague, Czech Republic, September 5-8 (2011).

6. J. M. Hao, J. Wang, X. L. Liu, W. J. Padilla, L. Zhou, M. Qiu, *Appl.Phys.Lett.*2010, 96, 251104.
7. G. W. Milton, A. V. Cherkaev, *J. Eng. Mater. Tech.* 1995, 117, 483.
8. X. S. Su, A. N. Norris, C. W. Cushing, M. R. Haberman, P. S. Wilson, *J. Acoust. Soc. Am.* 2017, 141, 4408.
9. J. Li, C. T. Chan, *Phys. Rev. E.* 2004, 70, 055602.
10. Y. Tian, Q. Wei, Y. Cheng, Z. Xu, X. J. Liu, *Appl. Phys. Lett.* 2015, 107, 221906.
11. Z. Sun, H. Jia, Y. Chen, Z. Wang, J. Yang, *J. Acoust. Soc. Am.* 2018, 143, 1029.
12. Q. Li, J. S. Vipperman, *J. Acoust. Soc. Am.* 2019, 145, 1372.
13. Y. Zhang, J. Pan, *J. Acoust. Soc. Am.* 2013, 133, 2082.
14. S. Zhang, L. Yin, N. Fang, *Phys. Rev. Lett.* 2009, 102, 194301.
15. X. Zhou, M. B. Assouar, M. Oudich, *Appl. Phys. Lett.* 2014, 105, 233506.
16. G. X. Liao, C. C. Luan, Z. W. Wang, J. P. Liu, X. H. Yao, J. Z. Fu, *Adv Mater Technol.* 2021, 6, 2000787.
17. J. Par, H. M. Kim, J. R. Youn, Y. S. Song, *Adv. Mater. Technol.* 2019, 4, 1800410.
18. Y. C. Luo, Y. R. Jia, J. Yao, D. J. Wu, X. J. Liu, *Adv. Mater. Technol.* 2020, 5, 2000356.
19. G. H. Du, Z. M. Zhu, X. F. Gong, *Acoustic Foundation*, 3rd ed. (in Chinese), Nanjing University Press, Nanjing 2017.
20. N. S. Gao, H. Hou, Y. H. Mu, *Theor. Appl. Mech. Lett.* 2017, 7, 252.
21. N. S. Gao, H. Hou, J. H. Wu, *Int. J. Mod. Phys. B.* 2018, 32, 1850204.
22. Z. Chen, L. Fan, S. Y. Zhang, H. Zhang, X. J. Li, J. Ding, *Appl. Phys. Express.* 2015, 8, 107301.
23. H. Q. Nguyen, Q. Wu, H. Chen, J. J. Chen, Y. K. Yu, S. Tracy, G. L. Huang, *Proc. R. Soc. A.* 2021, 477, 20210024.
24. N. Fang, D. J. Xi, J. Y. Xu, M. Ambati, W. Srituravanich, C. Sun, X. Zhang, *Nat. Mater.* 2006, 5, 452.
25. G. H. Du, Z. M. Zhu, X. F. Gong, *Acoustic Foundation*, 3rd ed. (in Chinese), Nanjing University Press, Nanjing 2017.
26. L. Fok, M. Ambati M, X. Zhang, *Mrs. Bull.* 2008, 33, 931.
27. C. R. Liu, J. H. Wu, K. Lu, Z. T. Zhao, Z. Huang, *Appl. Acoust.* 2019, 148, 1.
28. S. B. Huang, Z. L. Zhou, D. T. Li, T. Liu, X. Wang, J. Zhu, Y. Li, *Sci. Bull.* 2020, 65, 373.
29. N. F. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, Z. Gaburro, *Science* 2011, 334, 333.
30. Y. Cheng, C. Zhou, B. G. Yuan, D. J. Wu, Q. Wei, X. J. Liu, *Nat. Mater.* 2015, 14, 1013.
31. L. Paul, (Kirchstrasse) US. 2043416, 1936.
32. Y. Y. Chen, G. K. Hu, G. L. Huang, *J. Mech. Phys. Solids.* 2017, 105, 179.
33. X. Yu, Z. B. Lu, F. S. Cui, L. Cheng, Y. D. Cui, *Extreme. Mech. Lett.* 2017, 12, 37.
34. Y. Li, S. S. Wang, Q. Y. Peng, Z. W. Zhou, Z. Y. Yang, X. D. He, Y. B. Li, *Nanoscale.* 2019, 11, 16384.
35. B. Z. Xia, N. Chen, L. X. Xie, Y. Qin, D. J. Yu, *Appl. Acoust.* 2016, 112, 1.
36. A. O. Krushynska, A. Amendola, F. Bosia, C. Daraio, N. M. Pugno, F. Fraternali, *New. J. Phys.* 2018, 20, 073051.
37. X. H. Li, T. Xing, J. J. Zhao, X. L. Gai, *J. Acoust. Soc. Am.* 2020, 147, 113.
38. X. Xiang, H. X. Tian, Y. Z. Huang, X. X. Wu, W. J. Wen, *Appl. Phys. Lett.* 2021, 118, 053504.
39. Z. X. Xu, H. Y. Meng, A. Chen, J. Yang, B. Liang, J. C. Cheng, *J.Appl.Phys.* 2021, 129, 094502.