محصولات عایق میکرومتخلخل دما بالا، نسل نوین عایق‌های حرارتی کوره

غلامرضا کریمی اقدم، سوگند اصولی
شرکت مهندسی سپهر آریا آزما

انتقال حرارت به سه طریق رسانش (جامد و گاز)، همرفت و تابش انجـام می‌گیرد. معمولا یک فرآیند انتقال حرارت شـامل مجموعه‌ای از این سـه روش اسـت. نیروی محرکه این فرآینـد وجود اختلاف یا همان شیب دمایی است.

محدود کردن فرآیندهـای فیزیکی انتقال حرارت و به واسـطه آن حبس حرارت در منبع آن، اسـاس کار عایق‌هـای حرارتی اسـت و تکنولـوژی و مواد میکرومتخلـل در این زمینه بهترین کارایی را دارند. دلیـل این‌که محصـولات میکرومتخلخـل بهترین راندمـان را ارائه می‌کنند را با توجه به اصول سـاده فیزیکی می‌توان توضیح داد.

رسانش در جامدات (هدایت):

در یک جامد، یک مایع، یا یک گاز مولکول‌ها وقتی گرم می‌شوند تحرک‌شان بیشـتر و بیشتر می‌شود. در رسـانش جامدات انرژی حرارتی به‌وسیله همین تحـرکات از مولکولی به مولکـول مجاورش منتقل می‌شـود. نرخ انتقال به جرم یا دانسیته ماده بستگی دارد. جرم بیشـتر، رسـانش بالاتری دارد. رسانش هم‌چنین بستگی به طول و سطح مقطع مسیر انتقال حرارت دارد. نـرخ انتقال حرارت در جامدات ارتباط مسـتقیم با سـطح مقطع مسیر رسـانش و ارتباط معکوس با طول مسیر رسانش دارد.

جـزء اصلی بیشـتر محصـولات میکرومتخلخل سـیلیکای آذریـن (SiO_2) اسـت. ذرات سـازنده محصولات میکرومتخلخل تماس بسـیار محدودی با یکدیگر دارند که باعث می‌شـود مسیر عبور حرارت محدود باشـد (مقـدار حرارت منتقل شـده ارتباط مستقیمی با سطح مقطع مسیر هدایت دارد).

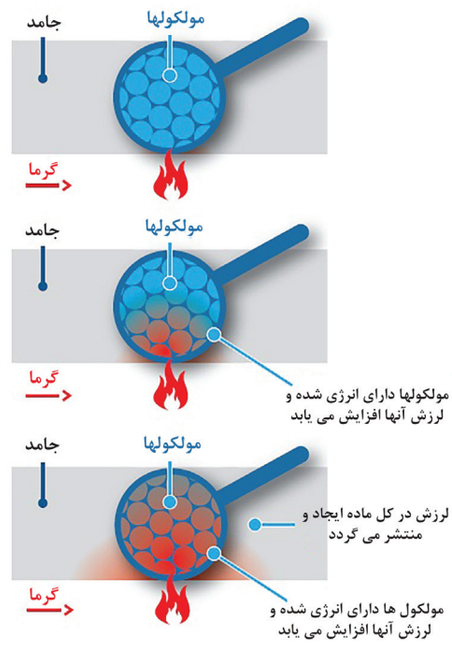
مسـیر عبور حرارت در جامدات مستقیم نیست و در نتیجه طولانی اسـت. این امر نرخ حرارتی را که می تواند در در جامد انتقال پیدا کند کاهش می‌دهد. مقدار حرارت منتقل شـده ارتباط معکوس با طول مسیر هدایت دارد.

رسانش در گازها:

تمام مواد اعم از جامـدات، مایعات و گازها دارای جـرم و یک هدایـت حرارتی هسـتند و در نتیجه می‌توانند حرارت را منتقل کنند. وقتی مولکول‌های گاز گرم می‌شـوند انرژی حرارتی به انرژی جنبشی تبدیل می‌شـود و آن‌ها شـروع به حرکت سریع‌تر می‌کنند. رسـانش گازهـا وقتی اتفـاق می‌افتد که مولکول‌های گاز مجاور به هم برخورد کرده و انرژی جنبشی خود را منتقل می‌کنند.

فاصله آزاد میانگین (Mean free path) یـک مولکـول گاز، میانگین فاصله طی شـده توسط یک مولکول بدون برخورد به مولکول دیگر است.

روش‌های انتقال حرارت: هدایت، همرفت و تابش

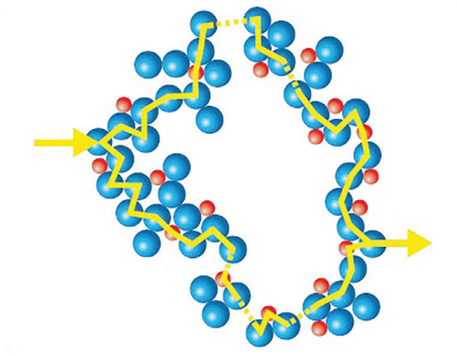


پدیده رسانش در جامدات

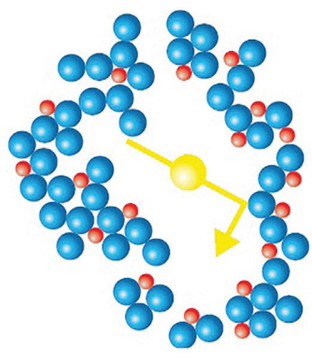
مسـیر آزاد میانگین برای یک مولکول هوا در شرایط استاندارد فشار و دما حدود ۹۳ نانومتر ($۳/۶۶ \times ۱۰^{-۶}$ اینچ) است.

هدایت حرارتی یک عایق میکرومتخلخل وابسته به دانسیته آن است. وقتی که زنجیره مواد میکرومتخلخل تا یک دانسیته اپتیمم متراکم گردد، هدایت حرارتی گاز از طریق جابجایی به حداقل می‌رسـد. دلیل این امر این اسـت که آزادی حرکت مولکول‌ها و برخورد بین مولکول‌های محبوس شده هوا محدود می شود چرا که جاهای خالی موجود بین ذرات ماده کوچکتر از مسـیر ازاد میانگین مولکول‌های هوا می‌گردد. این امـر باعث از بین رفتن توانایی گاز برای انتقال انرژی حرارتی می‌شود.

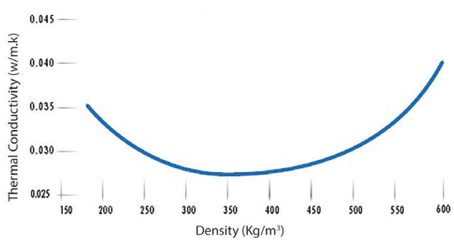
به عبارت سـاده مـی توان گفت دانسـیته بالاتر مترادف با تعـداد ذرات بیشـتر و در نتیجه هدایت حرارتـی بالاتـر (هدایت حرارتی بـه طریق هدایت جامد) اسـت. هم‌چنین، دانسـیته کمتر مترادف با



مقدار حرارت منتقل شـده ارتباط معکوس با طول مسیر هدایت دارد.



هدایت حرارتی یـک میکروتخلخل وابسـته به دانسیته آن است.

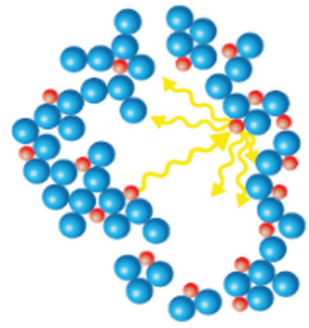


هدایت حرارتی عایق میکرومتخلل به عنوان تابعی از دانسیته در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

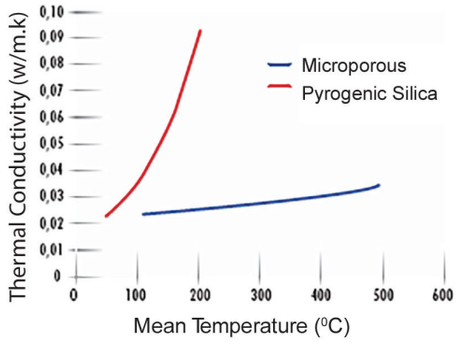
بسته‌ها یا توده‌های هوای بزرگ‌تر و در نتیجه هدایت حرارتی بیشتر است (هدایت حرارتی گازها). بنابراین با برقراری تعادل بین هدایت گاز و جامد، یک هدایت حرارتـی بهینه جهت راندمان مناسـب هر محصول میکرومتخلخل حاصل می‌گردد.

تابش یا تشعشع:

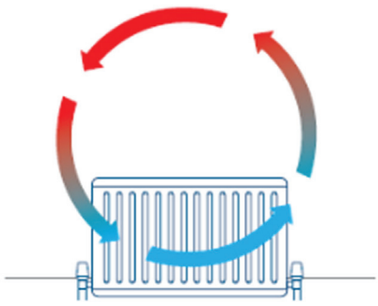
تمام اشـیاء تشعشـع حرارتی را دریافت و منتشر می‌کنند. همچنین حرارت به وسـیله انتشـار امواج الکترومغناطیسـی که تشعشـع مادون قرمز نامیده می‌شود، منتقل می‌شود.



در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تابش دلیل اصلی از دست رفتن حرارت است.



مقایسه عملکرد محصولات میکرو متخلخل با سیلیکای معمولی در دمای بالا.



همرفت، انتقال حرارت به وسیله حرکت توده‌ای درون یک محیط سیال مثل گاز یا مایع است.

در این نوع انتقال حرارت ذرات برخلاف فرآیند رسانش و همرفتی، دخیل در فرآیند نیستند. در نتیجه تابش می‌تواند حتی در خلاء هم رخ دهد. به همین خاطر است که ما می‌توانیم حرارت خورشید را با وجود فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری از زمین حس کنیم. هرچه جسم گرم‌تر باشد میزان تابش اشعه مادون قرمز آن بیشتر خواهد بود.

نرخ تابش متناسب با توان چهارم دماست در نتیجه سرعت از دست رفتن حرارت با افزایش دما به شدت افزایش می‌یابد. این مساله به خوبی توجیه کننده این حقیقت است که در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تابش دلیل اصلی از دست رفتن حرارت است. برخی سطوح در تابش (تشعشع) و جذب اشعه مادون قرمز بهتر از بقیه عمل می‌کنند.

دومین جزء اصلی یک عایق میکرومتخلخل وجود یک ماده مات کننده (Opacifier) پایدار حرارتی با اندازه و توزیع ذرات کنترل شده در آن است.

این ذرات مات‌کننده که در درون و هسته ماده گنجانده شده‌اند، تا ۹۵ درصد اشعه مادون قرمز را پخش می‌کنند و لذا انتقال حرارت به طریق تابش را به پایین‌ترین حد ممکن می‌رسانند. با مقایسه عملکرد محصولات میکرومتخلخل با سیلیکای معمولی در دمای بالا، اثر مات‌کننده‌ها به روشنی مشخص می‌شود.

همرفت

همرفت، انتقال حرارت به وسیله حرکت توده‌ای درون یک محیط سیال مثل گاز یا مایع است.

همرفت آزاد در نتیجه انبساط گاز یا مایع هنگام گرم شدن آن اتفاق می‌افتد که باعث می‌گردد از تراکم ناحیه گرم کاسته شده، سیال فوق شناور شده و بالا می‌رود. چرخش به این صورت انجام می‌شود که سیال گرم، مجددا سرد شده و دوباره پایین می‌آید. سیستم‌های همرفت آزاد می‌تواند بسیار وسیع بوده و مقدار وسیعی از حرارت را جابجا کند که از این جمله می‌توان سیستم‌هایی هوایی یا جابجایی گدازه‌های داغ داخل زمین را نام برد.

ذرات گاز یا مایع می‌توانند در هنگام عبور از کنار یا داخل یک جسم جامد گرم‌تر، انرژی دریافت کنند. یک رادیاتور معمولی خانگی بهترین مثال از این حیث است که در آن هوا گرم شده، به قسمت‌های بالای محیط حرکت می‌کند و در نهایت سرد شده و مجدد پایین می‌آید.

از فرآیند انتقال حرارت به روش همرفت به واسطه جلوگیری از جریان داشتن مولکول‌های هوا در داخل ساختار میکرومتخلخل جلوگیری می‌شود. از آنجا که یک عایق میکرومتخلخل به میزان زیادی عاری از هوای محبوس است (بیش از ۹۵ درصد)، نمی‌تواند به عنوان یک ماده واسط جامد عمل کند و اجازه همرفت را به هوای اطراف بدهد.

ذرات اصلی عایق‌های میکرومتخلخل (سیلیکای آذرین و مات کننده) به وسیله فیلمان‌های شیشه‌ای در کنار هم نگه داشته شده‌اند. اندازه این فیلمان‌های شیشه‌ای حین عملیات شکل‌دهی پالتروژن به دقت کنترل می‌شود. قطر فیلمان‌های شیشه‌ای به اندازه‌ای است که از جذب شدن در ریه‌ها به وسیله تنفس جلوگیری می‌کنند. محصولات عایق میکرومتخلخل دارای استاندارد EC/۶۹/۹۷ اتحادیه اروپا پیرامون "عاری از فایبر" بودن مواد خطرناک هستند.

زمینه تقویت شده غیرآلی این مواد، استحکام بالا جهت حمل و نقل و قابلیت ماشینکاری را به این ترکیبات می‌دهد. هم‌چنین مزیت عمده دیگری را نیز نسبت به نمونه آلی از حیث امکان سوختن یا اکسیدشدن ایجاد می‌کند. عمر مواد میکرومتخلخل در صورت استفاده صحیح بسیار طولانی خواهد بود.

نتیجه نهایی یک محصول قابل اعتماد با هدایت حرارتی (λ) بسیار پایین، در حد مینیمم مقدار حرارتی ممکن در قوانین فیزیک است.

یک عایق میکرومتخلخل در استاندارد ASTM C۱۶۸ اینطور تعریف شده است: "ماده‌ای به شکل پودر فشرده یا فیبر با اندازه منافذی برابر یا کوچکتر از فاصله آزاد میانگین حرکت مولکول‌های هوا در فشار استاندارد و یا کم‌تر از آن. عایق‌های میکرومتخلخل ممکن است حاوی مات‌کننده‌هایی برای کاهش تشعشع حرارتی باشند."

خواص و ویژگی‌ها

هدایت حرارتی

تمامی اطلاعات منتشر شده در مراجع پیرامون مقدار هدایت حرارتی بر مبنای تست‌های صورت گرفته مطابق استاندارد ISO ۸۳۰۲ و هم‌چنین ASTM C۱۷۷ است. این تست‌ها مقادیر دقیقی از هدایت حرارتی را در محدوده وسیع دمایی تا دمای میانگین ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌کنند.

اتمسفرمعمولی

محصولات میکرومتخلخل به خاطر هدایت حرارتی (λ) بسیار پایین‌شان در محدوده وسیعی از دما شناخته شده هستند. با افزایش دما، اختلاف مقدار λ بین عایق‌های میکرومتخلخل و عایق‌های معمولی بسیار زیاد می‌شود که دلیل آن عدم توانایی بسیاری از عایق‌های معمولی در ممانعت از انتقال حرارت به روش تابش است. یکنواختی و پیوستگی هدایت پایین حرارتی عایق‌های میکرومتخلخل در تمامی دماهای کاری، به خوبی دلیل استفاده از این عایق‌ها را در دماهای بالا توجیح می‌کند.

محیط گازهای مختلف و اتمسفر احیایی

هدایت حرارتی مواد عایق به میزان زیادی متاثر از گاز درون منافذ آن‌ها می‌باشد. معمولا این گاز هواست ولی اغلب ممکن است این عایق‌ها در محیط‌هایی استفاده گردند که حاوی گازهای دیگری مانند هلیم، نیتروژن، هیدروژن، آرگون یا کریپتون باشد.

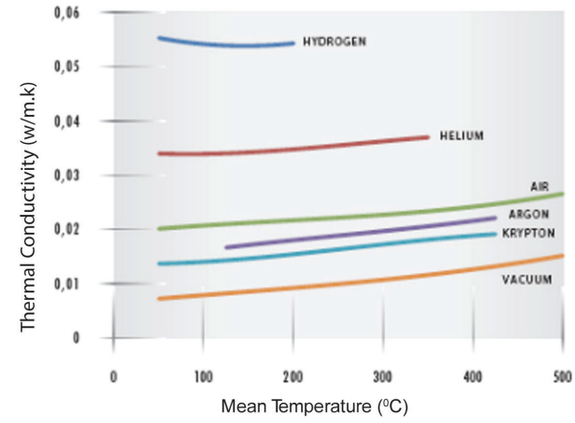
رفتار هرکدام از این گازها روی هدایت حرارتی محصول عایق میکرومتخلخل تاثیر می‌گذارد و این تاثیر نه فقط به خاطر میزان هدایت حرارتی گاز، بلکه هم‌چنین به خاطر مسیر آزاد گاز (فاصله متوسط حرکت یک مولکول گاز مابین برخورد آن‌ها با هم) و اثر متقابل آن با منافذ عایق نیز هست.

به‌طور معمول مقدار هدایت حرارتی (λ) گازهای خالص بالاتر از مقدار هدایت حرارتی (λ) مواد میکرومتخلخل محتوی گازها است. در مواد عایق میکرومتخلخل گازهای مختلف می‌توانند اثرات متفاوتی داشته باشند:

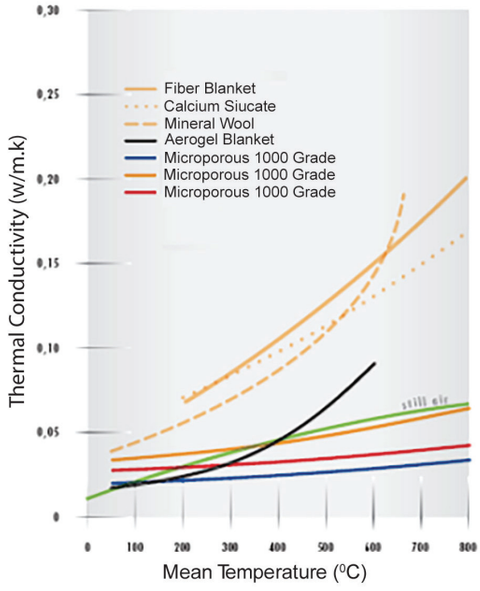
- ذرات بزرگ‌تر و آرام‌تر مانند کریپتون و آرگون کم‌تر به هم برخورد می‌کنند و در نتیجه هدایت حرارتی پایین‌تری دارند.
- ذرات کوچک‌تر و سریع‌تر مثل هلیم و هیدروژن بیش‌تر با هم در مقایسه با دیواره‌های حفرات برخورد می‌کنند و درنتیجه باعث افزایش سرعت انتقال حرارت می‌شوند.

با وجود این‌که تمام مواد عایق تحت تاثیر گازهایی مانند هیدروژن هستند، مواد میکرومتخلخل در مقایسه با مواد معمولی کاملا خوب عمل می‌کنند.

همان‌طور که قبلا اشاره شد، هدایت حرارتی محصولات میکرومتخلخل تلفیقی از مکانیزم‌های



هدایت حرارتی محصولات میکرومتخلخل در حضور گازهای گوناگون.



هدایت حرارتی محصولات عایق میکرومتخلخل در مقایسه با محصولات عایق متداول.

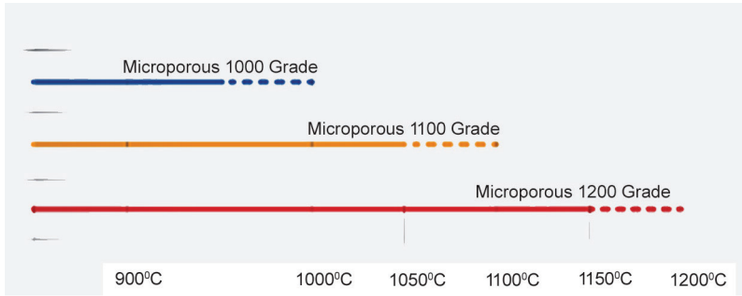
انتقال حرارت جامد/گاز به طریق رسانش و تابش است. مکانیزم رسانش در اتمسفر احیایی وابسته به نوع و مقدار گاز داخل ساختار است. در مقادیر فشار احیایی کم، هدایت حرارتی بیشتر وابسته به رسانش جامد و تابش است و کم‌تر به رسانش گاز داخل ساختار بستگی دارد. بنابراین هدایت حرارتی پایین‌تری به دست می‌آید. یک افزایش معمولی فشار، منجر به افزایش رسانش گاز و در نتیجه افزایش هدایت حرارتی می‌شود.

طبقه‌بندی دماها

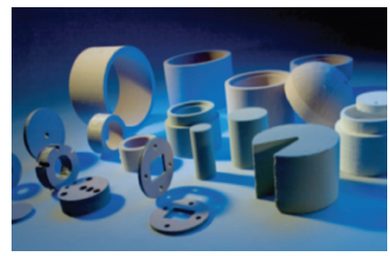
با تغییر دادن نسبت‌ها و مشخصات مواد تشکیل‌دهنده در محصولات میکرومتخلخل می‌توان بسیاری از مشخصات کلیدی این محصولات را به منظور دستیابی به محدوده وسیعی از فاکتورهای موردنیاز تغییر داد. مشخصه‌هایی مانند دمای کاری، مقاومت در برابر جذب آب و مقاومت فشاری این مواد می‌توانند در صورت نیاز تغییر کنند. این متغیرها با انتخاب محصولات متناسب انعطاف‌پذیر، سخت و یا پودری میکرومتخلخل به منظور دستیابی به بهترین محصول برای کاربرد خاص انتخاب می‌شود.

استحکام فشاری

استحکام فشاری محصولات میکرومتخلخل بستگی به نوع ماده و دانسیته آن دارد. این محصولات در کاربردهایی با تنش‌های فشاری بالا مثل عایق پشت کار در پاتیل فولاد به خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نمودار زیر مقادیر معمول برای محصولات مختلف نشان داده شده است:



طبقه‌بندی دمایی محصولات میکرومتخلخل



قابلیت ماشین‌کاری عایق‌های حرارتی

مقاومت در برابر آب عایق‌های حرارتی

انقباض:

مثل هر ماده عایق دیگری، مقدار کمی انقباض غیرقابل برگشت عرضی حین قرار گرفتن این محصولات در معرض بالاترین دمای کاری آنها ایجاد می‌شود. با افزایش دما ذرات سیلیکا زینتر شده و بهم می‌چسبند که این باعث تغییر ساختار مواد شده و افزایش نقش مکانیزم هدایت حرارتی به‌طریق رسانش جامد نسبت به سایر مکانیزم‌های هدایت حرارتی را باعث می‌شود. در عایق‌های میکرومتخلخل این انقباض بسیار کم بوده و اثر آن‌چنانی روی ویژگی‌های کاری آن ندارد.

محصولات میکرومتخلخل می‌توانند به طور مداوم در ماکزیمم درجه حرارت‌شان استفاده شوند. به خاطر خصلت غیرآلی مواد تشکیل دهنده، انقباض حرارتی آن‌ها بسیار اندک و عمر مفید آنها بسیار زیاد است.

مقوله انقباض یک نیاز بسیار مهم برای یک محصول عایق است. در بیشتر کاربردها که در آن یک طرف محصولات عایق میکرومتخلخل در معرض حرارت قرار می‌گیرند، این محصولات می‌توانند تا دماهای بالاتری نیز تحمل حرارتی داشته باشند.

قابلیت ماشین‌کاری

فرمولاسیون و خواص بردهای میکرومتخلخل قابلیت ماشین‌کاری فوق‌العاده‌ای را به آن‌ها می‌بخشد و امکان برش آسان و شکل‌دهی و ساخت قطعات پیچیده سفارشی مشتری را در محل کارگاه فراهم می‌سازد.

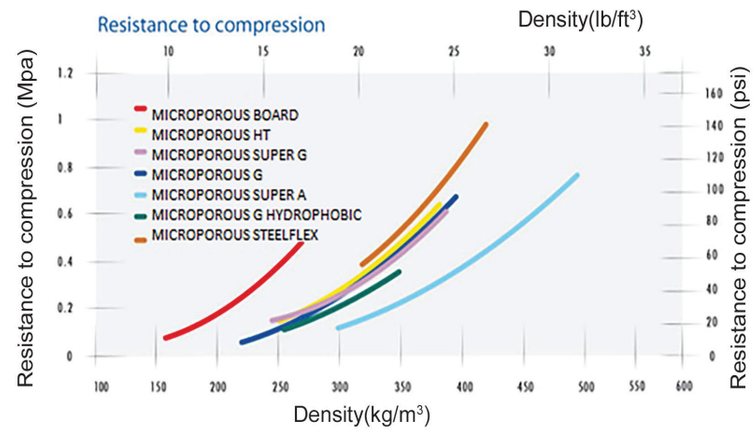
عدم اشتعال

عایق‌های میکرومتخلخل الزامات استانداردهای DIN۴۱۰۲، BS۴۷۶ و UL۹۴V-۰ را از حیث عدم اشتعال‌پذیری برآورده می‌کنند. با ترکیب رسانش حرارتی بسیار پایین و عدم اشتعال‌پذیری بسیار عالی، عایق‌های میکرومتخلخل یک مانع موثر در برابر آتش برای حفاظت از فولاد، آلومینیم یا ساختارهای کامپوزیتی است. ضخامت و وزن پایین، آن را یک گزینه مناسب ضد حریق (PFP) برای صنایع حمل و نقل ریلی و دریایی می‌کند.

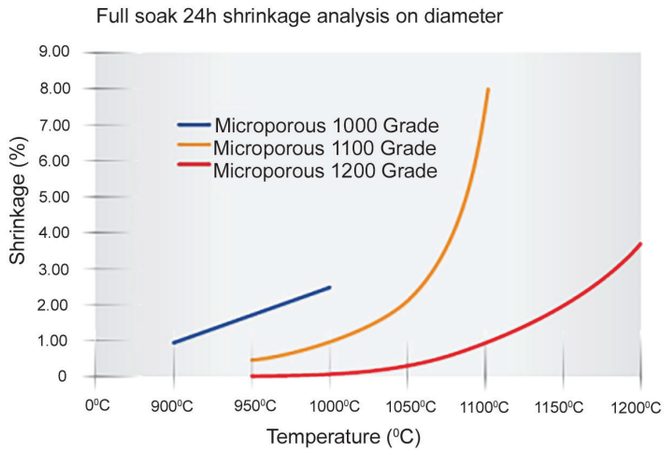
محصولات عایق میکرومتخلخل هم‌چنین در کاربردهای ساختمانی و همچنین صنعتی که بحث عدم اشتعال‌پذیری حائز اهمیت باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

آب و رطوبت- مقاومت در برابر مایعات

خواص مکانیکی و حرارتی عایق‌های میکرومتخلخل با تغییرات شدید رطوبتی،



میزان استحکام فشاری نمونه‌های میکرومتخلخل



درصد انقباض حرارتی نمونه‌های میکرومتخلخل پس از مدت ۲۴ ساعت (کل نمونه در معرض حرارت)

زیاد تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. بخار و دود از میان ساختار عایق میکرومتخلخل عبور می‌کند بدون اینکه به آن آسیبی برساند. عایق‌های میکرومتخلخل به طور طبیعی ۱ تا ۳ درصد وزنی رطوبت دارند. وجود مقدار کم آب جذب شده، عملکرد آن را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. حین نصب (به عنوان مثال با یک جرم ریختنی مرطوب) یا هنگامی که چگالش در حین کار اتفاق بیافتد (نقطه شبنم)، تماس با آب یا مایعات دیگر محتمل است. در این حالت بهتر است از محصولات عایق رطوبت و یا محصولاتی با یک پوشش بیرونی عایق مانند PE یا آلومینیم استفاده کرد.

محصولات عایق رطوبت میکرومتخلخل این‌گونه نیستند که به سادگی تنها یک پوشش خارجی داده شده باشند. در آن‌ها ماده بر اساس ذرات سیلیکایی است که به طور ویژه دافع رطوبت هستند و در نتیجه تمام ضخامت عایق، دافع آب می‌باشد. این بدین معنی است که حتی برش وشکل‌دهی عایق، روی طبیعت عایق رطوبت بودن آن تاثیری نخواهد گذاشت. هروقت حضور آب در یک عایق اجتناب‌ناپذیر باشد، توضیحات قبلی نشان می‌دهد که محصولات میکرومتخلخل در هر شرایطی عملکرد بهینه دارند.

مقاومت شیمیایی

عایق میکرومتخلخل از مواد خنثایی ساخته شده که درمقابل بیشتر مواد شیمیایی بی‌اثر است. از تماس آن‌ها با بیشتر مایعات باید ممانعت گردد. مواد شیمیایی مایع ممکن است مثل آب به ساختار فیزیکی آن‌ها آسیب بزنند.

مقاومت به لرزش

مقاومت به لرزش مواد عایق میکرومتخلخل عمدتا به روش نصب آنها بستگی دارد. تا زمانی که ماده به طور مناسبی در محل مورد استفاده بی‌حرکت نگاه داشته شود، لرزش آسیبی به آن وارد نخواهد کرد.

بهتر است عایق به گونه‌ای استفاده شود که از هر گونه حرکت آن نسبت به سطوح لرزان ممانعت به عمل آید.

اگر نصب به درستی صورت بگیرد، لرزش ماده با فرکانسی مشابه اجزای دربرگیرنده آن صورت می‌گیرد و این خطر آسیب دیدن آن را در اثر لرزش از بین می‌برد.

خواص آکوستیک

عایق‌های میکرومتخلخل دارای ساختار سلولی داخلی پیوسته بسیار متخلخلی هستند؛ ولی سلول‌ها در آن‌ها بسیار کوچک هستند. از این رو مقاومت به جریان هوا در طی ساختار آن‌ها بسیار بالاست و در نتیجه عایق‌های حرارتی میکروترم جذب کننده صدای خوبی نیستند.

مواد پوشش‌دهنده

از مواد مختلفی برای پوشش‌دهی محصولات میکرومتخلخل با توجه به دمای کاری آن‌ها، شرایط حمل و استفاده آنها استفاده می‌گردد. برای بردهای سخت این پوشش می‌تواند فویل نایلون، آلومینیم، و یا غیره باشد و در آن‌ها همچنین میکای تقویت شده بصورت آپشن نیز قابل اضافه شدن است. برای طیف محصولات پانلی (یعنی محصولاتی که عملا داخل مواد پوشش پرس می‌شوند)، از موادی مانند پلی‌استرهای بدون بافت یا بیشتر موارد پوشش‌های E-glass استفاده می‌شود. این پوشش‌ها امکان حصول یک محصول تمیز، بدون گرد و غبار و دارای قابلیت نصب آسان را فراهم می‌کنند.

در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، پوشش E-glass ترد شده و کارایی خود را از دست می‌دهد. اما چون محصولات میکرومتخلخل معمولاً در یک سیستم مابین مواد دیگر مثلا فلزات یا دیرگدازها استفاده می‌شوند، این موضوع زیاد مهم نیست و کارایی عایق زیاد تغییری نمی‌کند. در حقیقت، در چنین مواردی پوشش فقط در مرحله نصب حائز اهمیت است.

برای برخی کاربردها یک پوشش کامل یک‌پارچه مورد نیاز است که پوشش کوارتز (مقاوم در برابر برخورد مستقیم شعله) و فولاد زنگ نزن (مقاومت بالای مکانیکی) از آن دسته هستند.

مزایا در یک نگاه:

- کم‌ترین هدایت حرارتی در محدوده وسیعی از دماهای کاری (۱۰۰۰-۱۲۰۰°C)
- بهترین عایق حرارتی برای محدوده‌های دمایی مختلف تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد
- انقباض کم
- مقاومت به شوک حرارتی در دمای بالا
- ضد حریق
- دارای انواع مقاوم در برابر رطوبت
- مقاومت شیمیایی بالا
- عاری از چسب‌های آلی و سازگار با محیط زیست
- عاری از فیبرهای مضر برای تنفس
- دارای محصولات با اشکال و انواع گوناگون
- دارای محدوده وسیعی از محصولات و پوشش‌های مختلف
- تمیز و امکان نصب آسان
- قابلیت آسان شکل‌دهی و برش