

(علمی - ترویجی)

بررسی انواع عایق‌های چندلایه منعکس‌کننده (MLI) در مخازن کرایوژنیک

در عایق‌کاری مخزن کرایوژنیک از عایق‌های مختلفی استفاده می‌شود که عایق چندلایه یک نوع از آن‌ها است. عایق‌های چندلایه نسبت به سایر عایق‌های کرایوژنیک دارای عملکرد بالاتری است. این عایق‌ها از لایه‌های سپر تابشی و جداکننده تشکیل شده‌اند. عایق‌های چندلایه یکپارچه عایق‌هایی هستند که در آن لایه‌های جداکننده با قطعه‌های پلیمری کوچک با رسانایی حرارتی پایین جایگزین می‌شود. لایه‌های جداکننده عایق چندلایه پاسخگو به بار از ستون‌های کوچک پلیمری ساخته شده که به بارهای خارجی در هر لحظه پاسخ می‌دهد. عایق‌های چندلایه معمولی رایج توانایی بارگذاری را ندارد. برای برطرف کردن این مشکل از عایق‌های چندلایه متحمل بار استفاده می‌شود. این عایق‌ها جداکننده توری ندارند، بلکه در آن‌ها از جداکننده‌های پلیمری که توانایی تحمل بار و وزن بالایی دارند، استفاده شده است. سیستم عایق کامپوزیتی لایه‌ای، شامل لایه‌های سپر تابشی، لایه‌های پودری (آیروژل یا فیوم سیلیکا) و لایه‌های حامل (پارچه بدون بافت یا کاغذ فایبرگلاس) است. تفاوت آن‌ها با عایق چندلایه معمولی در این است که عایق کامپوزیتی لایه‌ای یک لایه اضافی پودری در ساختار خود دارد.

واژه‌های کلیدی: مخزن کرایوژنیک، عایق، عایق چندلایه، انتقال حرارت

محمدرضا بایرامعلی پور^{۱*}، دانشجوی کارشناس ارشد، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

علی صابری مقدم^۲، استاد، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

محمد مهدی بحری رشت آبادی^۳، دکتری، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*نویسنده مخاطب، آدرس: تهران، کدپستی: ۱۵۸۷۵-۱۷۷۴

Investigation of Different Types of Reflective Multilayer Insulators (MLI) in Cryogenic Tanks

In cryogenic tank insulation, different insulators are used, of which multilayer insulation is one of them. Multi-layer insulations have high performance, compared to other cryogenic insulations. These insulations include radiation shields and spacers. Integrated multilayer insulation is a kind of insulation in which the spacer networks are replaced by small polymeric pieces having low thermal conductivity. Load response multi-layer is made of small polymeric columns that respond to external loads. Common multilayer insulation do not have ability of responding to external loads. To overcome this problem, load response multilayer insulations are used. These insulations do not have spacer network, but they are made of polymeric spacers that can withstand external loads and weight. Composite layered insulation system includes radiation shield layer, powdery layers (aerogel or silica fume), and carrier layers (non-woven or fiberglass paper). The difference between composite layered insulation and conventional multilayer insulations is that the composite insulation has an additional layer of powder in its structure.

Keywords: Cryogenic Tank, Insulation, Multilayer Tnsulation, Heat Transfer

M.R. Bayram Ali Poor^{1*}, M.Sc. Student, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology (MUT)

A. Saberi Moghaddam², Professor, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology (MUT)

M.M. Bahri Rasht Abadi³, Ph.D., Department of Chemistry and Chemical Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology (MUT)

*Corresponding Author, Postal Code: 15875-1774, Tehran, IRAN
mohammadreza.bap@gmail.com

(علمی-ترویجی)

محمد رضا بایرامعلی پور، علی صابری مقدم و محمد مهدی بحری رشت آبادی

۱- مقدمه

سیستم‌های عایق حرارتی به منظور کاهش انتقال حرارت در مخازن کرایوژنیک^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها نیازمند بهینه‌سازی جهت بهبود عملکردشان می‌باشد. سیستم‌های عایق‌بندی کرایوژنیک از لحاظ فنی پیچیده هستند و باید طوری طراحی شوند که مواردی همچون الزامات مکانیکی، گرمایی، سازگاری شیمیایی، اندازه، وزن، قرارگیری در محیط عادی یا خلأ و غیره را در برگیرد [۱].

ذخیره‌سازی طولانی مدت مواد کرایوژنیک یکی از الزامات اکتشافات فضایی می‌باشد. این الزام از اوایل دهه ۱۹۷۰ مطرح شد. مسئله اصلی در ذخیره‌سازی طولانی مدت این مواد، به حداقل رساندن (حذف کردن) بار گرمایی ورودی به مخزن است [۲]. در مأموریت‌های فضایی که قرار است فضاپیما مدت زمان زیادی را در فضا باشد، پیشران‌های فضایی علاوه بر نیازهای پرتاب کوتاه‌مدت، نیازهای بلند مدت قرارگیری در مدار را نیز باید برآورده سازند [۳]. کاوش‌های فضایی در آینده به جوشش خاموش صفر^۲ پیشران‌های کرایوژنیک نیاز دارند. پیشران‌های کرایوژنیک در دمای خیلی پایینی نگه‌داری می‌شوند و انتقال حرارت به این مایعات همیشه اتفاق می‌افتد. بنابراین، به مرور زمان حرارت منتقل شده به مخزن کرایوژنیک باعث تبخیر مایع و به عبارتی جوشیدن آرام یا خاموش و تغییر فاز مایع کرایوژنیک می‌شود. در کاوش‌های فضایی که قرار است پیشران‌های کرایوژنیک مدت زیادی قابل استفاده باشند، سعی بر این است که این تغییر فاز یا جوشش خاموش با تدابیری مانند عایق‌کاری به حداقل یا صفر برسد.

عملکرد ترمودینامیکی مناسب یک سیستم عایق‌بندی پیش‌نیاز تحقق جوشش خاموش صفر است [۴]. به دلیل اهمیت بالای عایق‌های کرایوژنیک تحقیقات وسیعی در این زمینه انجام شده است. اکثر نوآوری‌های به وجود آمده در مبحث عایق‌های کرایوژنیک در ارتباط با عایق‌های چندلایه می‌باشد. عایق‌بندی چندلایه نوعی از عایق با عملکرد بالا است که از سپرهای انتقال گرمای تابشی متعددی برای جلوگیری از انتقال انرژی به مخزن نگهداری سیال کرایوژنیک استفاده می‌کند. برای جلوگیری از تماس میان صفحات و کاهش هدایت حرارتی در میان این سپرهای تابشی از صفحاتی با هدایت حرارتی پایین استفاده می‌شود. به این صفحات جداکننده^۳ می‌گویند. سپرهای تابشی معمولاً صفحات نازک فلزی یا لایه‌های نازک پلیمری با پوشش فلز روی آن‌ها در یک یا هر دو طرف هستند. این

عایق‌ها اکثراً به صورت چندین لایه مانند پتو^۴ درآمده و به دور سیستم مورد نظر پیچیده می‌شود. به طور معمول، هر سپر تابشی ۹۹-۹۰ درصد انرژی تشعشعی را منعکس می‌کند [۵].

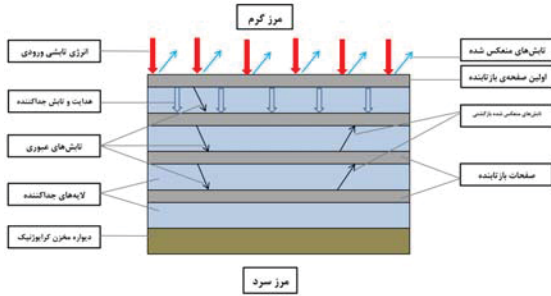
در سال ۲۰۱۰، نیومن^۵ به بررسی عملکرد عایق توده‌ای میکرو کره‌های شیشه‌ای^۶ در بین دو دمای ۷۷ و ۳۰۰ کلوین پرداخت و آن را با پرلیت مقایسه کرد. نتیجه کار این بود که میکرو کره‌های شیشه‌ای به طور میانگین ۴۰ درصد عملکرد بهتری را نسبت به پودر پرلیت داشتند [۶]. در همین سال دای^۷ و همکاران به معرفی و توسعه عایق چندلایه یکپارچه^۸ و عایق چندلایه پاسخگو به بار^۹ پرداختند [۷]. آن‌ها دریافتند که عایق چندلایه پاسخگو به بار عملکرد مناسبی در هر دو شرایط اتمسفری و خلأ دارد و با افزایش تعداد لایه‌ها عملکردش افت نمی‌کند.

در سال ۲۰۱۴، دای و همکاران به طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد عایق چندلایه متحمل بار^{۱۱} (قابل اتصال به سپر خنک شده^{۱۱} با بخار) پرداختند [۸]. آن‌ها دریافتند که عایق چندلایه قابل اتصال به سپر خنک شده با بخار عملکرد بالایی را چه از لحاظ حرارتی و چه از لحاظ توانایی مکانیکی در تحمل وزن سپر از خود نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۸، جیانگ^{۱۲} و همکاران عایق چندلایه با چگالی متغیر VDMLI^{۱۳} را مورد مطالعه قرار دادند [۹]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برای عملکرد مناسب عایق باید در نزدیکی مرز گرم تعداد لایه‌های بازتابنده و در نزدیکی مرز سرد تعداد لایه‌های جداکننده زیاد باشند. بررسی‌های متعدد و متفاوت انجام شده نشان دهنده عملکرد بالا و مناسب بودن عایق چندلایه^{۱۴} برای مصارف کرایوژنیک است.

سیستم‌های عایق چندلایه به دلیل عملکرد بالای خود به عنوان سوپر عایق^{۱۵} نیز شناخته می‌شوند. این عایق‌ها به عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین جزء عایق‌کاری در عملیات فضایی و زمینی (برای ذخیره‌سازی سوخت ماهواره‌های فضایی که قرار است مدت طولانی را در فضا سپری کنند یا نگهداری سیالات کرایوژنیک در سطح زمین) به حساب می‌آید. پیشرفت‌های جدید در زمینه عایق‌های چندلایه، به عایق‌هایی که از لحاظ ساختاری بهینه شده‌اند، مربوط می‌شود. بهینه‌سازی عایق‌های

4. Blanket
5. Neumann
6. Glass Micro Spheres
7. Dye
8. Integrated Multilayer Insulation (IMLI)
9. Load Responsive Multilayer Insulation (LRMLI)
10. Load Bearing Multilayer Insulation (LBMLI)
11. Vapor Cooled Shield
12. Jiang
13. Variable Density Multilayer Insulation (VDMLI)
14. Multilayer Insulation (MLI)
15. Super Insulation

1. Cryogenic
2. Zero Boil Off
3. Spacer



شکل (۴): نمایی کلی از ساختار عایق چندلایه معمولی و فرایند انتقال حرارت میان لایه‌های آن [۱۰].

عایق‌های چندلایه زمانی استفاده می‌شوند که نرخ‌های نفوذ گرمایی کمتری نسبت به سایر عایق‌های کرایوژنیک، مورد انتظار باشد. در مقایسه با سایر عایق‌های کرایوژنیک مانند پودر پرلیت، حباب‌های شیشه‌ای، فوم‌ها، آبروزل‌ها که می‌توانند مقادیر شار حرارتی در محدوده تقریباً $7-20 \text{ W/m}^2$ (در خلأ) برای شرایط مرزی معمولی 300 و 77 کلوین فراهم کنند، مقادیر شار حرارتی برای سیستم‌های عایق چندلایه که به‌طور مناسب طراحی شده و به خوبی ساخته شده‌اند می‌تواند کم‌تر از 1 W/m^2 در خلأ بالا تحت شرایط مشابه باشد. علاوه‌براین، وزن عایق‌های چندلایه در مقایسه با سایر عایق‌های کرایوژنیک مانند پرلیت، به‌طور قابل توجهی کمتر است [۱۱].

عایق‌های چندلایه به‌طور کلی در ذخیره‌سازی و انتقال سیالات کرایوژنیک و فرایندهای دماپایین مورد استفاده قرار می‌گیرند. در برخی از عایق‌های چندلایه با ایجاد چین و چروک^{۱۷} در سپرهای بازتابنده، سطح تماس آن‌ها را به حداقل رسانده و جداکننده را از عایق چندلایه حذف می‌کنند. در برخی دیگر از عایق‌های چندلایه از سپرهای بازتابنده‌ای که تنها یک سمت آن با فلز پوشش داده شده استفاده می‌کنند که از این طریق بخش جداکننده از ساختار عایق چندلایه حذف می‌شود [۱۲].

۳- مزایا و معایب عایق‌های چندلایه

یکی از محدودیت‌های اصلی این عایق‌ها نیاز به ایجاد خلأ بالا (کمتر از 10^{-4} torr) در محیط عایق‌کاری برای عملکرد بهینه آن می‌باشد. این عایق‌ها به افت خلأ حساس است و وقتی که خلأ کم است مقدار زیادی از عملکرد بهینه خود را از دست می‌دهد. البته تقریباً اکثر عایق‌های کرایوژنیک برای رسیدن به عملکرد بالا نیاز به قرارگیری در خلأ دارند و عایق چندلایه نیز از این قضیه مستثنا نیست.

چندلایه سبب توسعه انواع مختلف این نوع عایق‌ها با کاربردهای مختلف شده است. با توجه به اهمیت و کاربرد این نوع عایق‌ها و عدم وجود مطالعه کافی در این زمینه، در اینجا سعی شده است تا انواع این عایق‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و مزایا و معایب هر یک از آن‌ها عنوان شود.

در این مقاله به بررسی عایق چندلایه یکپارچه، عایق چندلایه پاسنگو به بار، عایق چندلایه متحمل بار و عایق کامپوزیتی لایه‌ای^{۱۶} پرداخته خواهد شد. عایق‌های ذکر شده از لحاظ شکل ظاهری شباهت زیادی به عایق‌های چندلایه معمولی دارند، اما به لحاظ ساختاری به گونه‌ای توسعه داده شده‌اند تا علاوه بر عملکرد حرارتی مطلوب، از ویژگی خاصی مانند تحمل وزن بالا نیز برخوردار باشند. عایق‌های ذکر شده به عنوان جدیدترین تکنولوژی در زمینه عایق‌کاری کرایوژنیک شناخته شده و حتی در موارد بسیاری عملیاتی شده‌اند.

۲- عایق‌های چندلایه استاندارد

عایق‌های چندلایه برای به کارگیری در مخازن نگهداری مواد کرایوژنیک در دهه ۱۹۵۰ معرفی شدند. این عایق‌ها از چندین صفحه نازک فلزی یا پلیمری مانند مایلار یا کاپتون ساخته شده‌اند که با یک فلز بسیار بازتابنده پوشش داده شده‌اند و به صورت موازی در کنار هم قرار گرفته‌اند. جداکننده‌های با رسانایی کم حرارتی بین صفحات قرار گرفته‌اند تا از تماس مستقیم آن‌ها با هم جلوگیری شود. ضخامت یک عایق چندلایه معمولی چند میلی‌متر است. انتقال حرارت تشعشعی، هدایت جامد و هدایت گاز، مکانیسم‌های اصلی انتقال حرارت در عایق‌های چندلایه هستند. شکل ۱ نمایی از یک عایق چندلایه با فرایند انتقال حرارت در داخل آن را نشان می‌دهد. گرمای تابشی از فضای خارجی به اولین لایه بازتابنده برخورد می‌کند که در آن، یک بخش به محیط منعکس می‌شود و بقیه انرژی تابشی باعث گرم شدن اولین لایه جداکننده می‌شود. همان‌طور که دمای لایه افزایش می‌یابد، گرما از طریق رسانش و تابش از جداکننده به لایه بازتابنده دیگر منتقل می‌شود. بنابراین، دمای لایه بازتابنده دوم افزایش خواهد یافت. لایه بازتابنده دوم مقداری از تشعشع را به لایه بازتابنده اول منعکس می‌کند و باقیمانده انرژی به لایه بازتابنده سوم منتقل می‌شود. این فرایند به همین شکل ادامه پیدا می‌کند تا در نهایت مقداری انرژی به لایه بازتابنده زیرین منتقل می‌شود [۱۰].

دسترس است. در دهه‌های اخیر مطالعات و تحقیقات بسیاری در زمینه عایق‌های چندلایه انجام شده و زمان و هزینه زیادی برای بررسی عایق‌های خلأ بالا صرف شده است و پیشرفت‌های قابل توجهی چه از لحاظ ساختاری و چه از لحاظ مفهومی در این زمینه به وجود آمده است. این عایق‌ها در مقایسه با عایق‌هایی مانند پرلیت وزن و حجم کمی را اشغال می‌کند. این عایق‌ها در خلأهای بالا عملکرد بالایی دارند. موادی که در ساختار عایق چندلایه استفاده می‌شود به مرور زمان از سازه خود گازهایی را متصاعد می‌کند. این گازها باعث تضعیف خلأ و متعاقباً باعث کاهش عملکرد عایق می‌شود. با استفاده از مواد گاز زدا^{۲۰} مانند کربن که این گازهای متصاعد شده را جذب می‌کند، می‌توان خلأ را پایدارتر کرد.

۴- روند توسعه عایق چندلایه

عایق‌های چندلایه مزایای متعددی دارند به همین دلیل در اکثر مطالعات اخیر در زمینه عایق‌کاری‌های کرایونیک، توجه ویژه‌ای به این عایق‌ها شده است. در زمینه عایق‌های چندلایه مطالعات بسیاری به صورت تجربی، عددی و ترکیبی از این دو انجام شده است [۱۰]. عایق‌های چندلایه رایج توانایی بارگذاری را ندارد و فشارهای زیاد که حاصل از وزن زیاد خود لایه‌ها باشد یا بارهای خارجی باعث تخریب عملکرد عایق می‌شود. اغلب جدیدترین پیشرفت‌ها با هدف تأثیرگذاری روی لایه جداکننده متمرکز شده است. جدیدترین برنامه فضایی ناسا^{۲۱} بر توسعه تکنولوژی کاهش جوشش خاموش در هیدروژن مایع، با ترکیب فن‌آوری‌های جدید در عایق‌بندی غیر پویای^{۲۲} پیشرفته برای کار به‌طور مؤثر با سپرهای حرارتی خنک شده متمرکز شده است [۱۶].

عایق چندلایه یکپارچه و عایق‌های چندلایه پاسخگو به بار تکنولوژی‌های جدیدی هستند که در آن‌ها زیرساخت‌های پلیمری با سپرهای تابشی برای فراهم نمودن سیستم‌های عایق حرارتی با عملکرد بالا، ادغام می‌شود. در این عایق‌ها از جداکننده‌های لایه‌ای متداول استفاده نشده است و به جای آن، در بین لایه‌های سپر تابشی از قطعه‌های پلیمری خاصی که سطح تماس کمی را ایجاد می‌کند، استفاده شده است. جداکننده‌های پلیمری استفاده شده در عایق چندلایه یکپارچه دارای ساختار منحصر به فردی است که دارای سطح مقطع عرضی خیلی کوچکی نسبت به طول (m $10^{-4} \times 1$) بوده تا نشت گرما را کاهش دهد [۷]. شکل ۲ به صورت مفهومی

برای این که این عایق‌ها دارای یک عملکرد پایدار و قابل قبول باشند، باید فشار کمتر از ۰/۱ millitorr و همچنین برای عملکرد بهینه فشار کمتر از ۰/۰۰۱ millitorr باشد [۱۳]. ایجاد و حفظ چنین خلأ بالایی پرهزینه، دشوار و زمان‌بر می‌باشد. تجهیزات جانبی، لوله‌ها و اتصالات که در مخازن کرایونیک وجود دارد، باعث ایجاد سطوح ناصاف و غیر یکنواخت می‌شود. بنابراین، با توجه به شکل عایق‌های چندلایه که اکثراً مانند پتو دور سیستم پیچیده می‌شوند، تمام سیستم نمی‌تواند به‌طور مناسب با عایق پیچیده شده یا تحت پوشش قرار گیرد. در نتیجه محل اتصالات یا برخی سطوح که به دلیل هندسه خاص مخزن به شکل مناسب با عایق قابل پوشش نیست، محل نشت حرارت می‌شود. با افزایش تعداد لایه‌ها، وزن لایه‌ها افزایش پیدا می‌کند و این افزایش وزن باعث فشردگی لایه‌ها در برخی قسمت‌ها می‌شود. این فشردگی‌های محلی می‌تواند عملکرد حرارتی عایق را کاهش دهد [۱].

برای مخازن دارای ژاکت خلأ، پایداری خلأ می‌تواند به دلیل تخلیه گاز^{۱۸} و سرویس دوره‌ای مورد نیاز برای حفظ عملکرد، مشکل باشد. عایق چندلایه ظریف است و به راحتی از طریق تماس با مواد غیر قابل عایق‌کاری مانند سنسورهای فشار یا دما یا تجهیزات ایمنی آسیب می‌بیند. در عایق‌های چندلایه با افزایش بارگذاری مکانیکی و افزایش شکاف‌ها در نقاط تقاطع، نشت حرارت افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، عایق‌بندی چندلایه بسیار گران است و باید به صورت دستی در سطوح پیچیده نصب شود که نیاز به تجربه زیادی برای نصب دقیق دارد [۱۴].

از دیگر معایب این عایق‌ها آن است که بسیار ناهمسان و اختصاصی و دارای خواص متغیر (آنیزوتروپیک^{۱۹}) است. اگر خصوصیتی به جهت‌گیری آن در فضا بستگی داشته باشد، آن خصوصیت ناهمسان‌گرد (آنیزوتروپ) است. همچنین، این عایق‌ها به بارهای فشاری حساس بوده و نیازمند توجه دقیق در زمان نصب است و اغلب برای استفاده در کاربردهایی با هندسه پیچیده محدودیت دارند. علاوه‌براین، در مراحل تخلیه، گرمایش و نگهداری خلأ، پرهزینه و زمان‌بر است. عملکرد حرارتی این عایق‌ها برای سطوح خلأ بالاتر از 10^{-3} torr به شدت افت می‌کند [۱۵].

درباره مزایای عایق‌های چندلایه می‌توان این‌گونه اشاره کرد که معمولاً مواد اولیه استفاده شده برای این عایق‌ها به صورت رایج در صنعت وجود دارد. موادی از قبیل فویل‌های آلومینیومی، مایلار یا موادی مانند پارچه‌های فایبرگلاس یا توری‌های ابریشمی و غیره به صورت عمده در بازار قابل

20. Getters

21. NASA (National Aeronautics and Space Administration)

22. Passive

18. Gassin Out

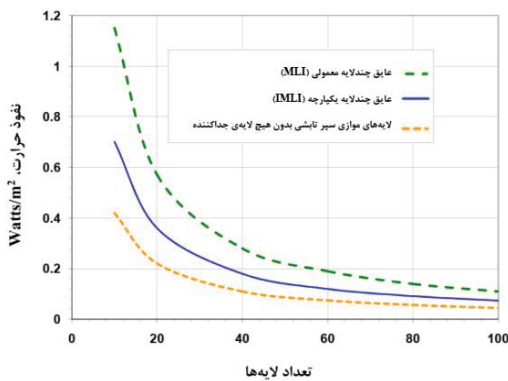
19. Anisotropic

عملکرد حرارتی بالا ایجاد کرده‌اند [۸]. در ادامه تعدادی از انواع عایق‌های چندلایه جدید مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۱- عایق‌های چندلایه یکپارچه

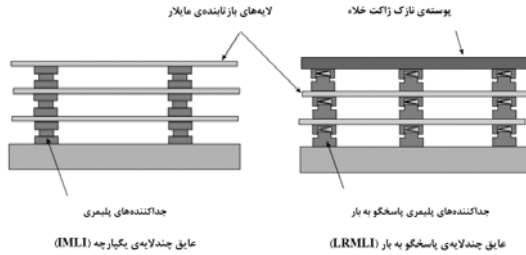
عایق چندلایه یکپارچه، یک سیستم عایق‌بندی طراحی شده با مزایای عایق چندلایه معمولی در کنار عملکرد بالاتر، استحکام بیشتر، آلودگی ذرات پایین‌تر، هدایت حرارتی کم و هزینه کم‌تر است. عایق‌بندی چندلایه برای کاهش نشست گرما به سیستم‌های کرایونیک مانند مخازن، دوئرها^{۲۷} و ابزارها و برای کنترل نشست گرما در فضاپیماها به کار می‌رود. عایق‌های چندلایه یکپارچه عایق‌هایی هستند که در آن لایه‌های جداکننده با قطعه‌های پلیمری کوچک با رسانایی حرارتی پایین جایگزین می‌شود. این قطعه‌های پلیمری باعث ایجاد فاصله‌های دقیق میان لایه‌ها می‌شود.

عایق چندلایه یکپارچه در یک عملکرد یکسان، تعداد لایه‌های آن ۳۰ درصد کمتر از عایق چندلایه معمولی است که این باعث می‌شود تا ضخامت و وزن عایق‌بندی کمتر شود [۷]. فرایند ساخت این عایق به صورت خودکار و با دستگاه‌های اتوماتیک انجام می‌شود. پس با توجه به مونتاژ خودکار این عایق، هزینه و زمان ساخت به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. در شکل ۳، برای عایق چندلایه معمولی، عایق چندلایه یکپارچه و لایه‌های موازی سپر تابشی بدون هیچ لایه جداکننده، برای دماهای مرزی ۲۹۵ کلوین سمت گرم و ۷۷ کلوین سمت سرد (نیترژن مایع)، تغییرات نفوذ حرارتی با تعداد لایه‌ها نشان داده شده است. شار حرارتی در عایق چندلایه یکپارچه ۳۵ درصد کمتر از عایق چندلایه معمولی بوده و تقریباً مانند لایه‌های موازی بدون جداکننده می‌باشد.



شکل (۳): تغییرات عملکرد عایق چندلایه یکپارچه و عایق چندلایه پاسخگو به بار و سپرهای تابشی موازی بدون جداکننده [۱۴].

عایق چندلایه یکپارچه و عایق چندلایه پاسخگو به بار را نشان می‌دهد.



شکل (۵): طرح مفهومی عایق چندلایه یکپارچه و عایق چندلایه پاسخگو به بار [۱۶].

تکنیک‌های کاهش نشست گرما به تانک‌های کرایونیک سوخت عبارت‌اند از: استفاده از عایق‌بندی چندلایه غیر پویا (عایق چندلایه معمولی) و سپرهای حرارتی سرد شده با بخار سیال کرایونیک. استفاده از جریان گاز برای جلوگیری از ورود جریان گرما در یک سیستم عایق‌بندی، در بسیاری از مأموریت‌های علمی انجام شده است. چنین سیستم‌هایی به عنوان سپر سرد شده با بخار شناخته می‌شود. در این سیستم‌ها بخار سیال کرایونیک قبل از ترک سیستم نگهداری، در لوله‌هایی که دور مخزن پیچیده شده به گردش درمی‌آید و لوله‌ها را خنک می‌کند. این لوله‌ها به تنهایی دور مخزن پیچیده نشده‌اند بلکه روی صفحات خاصی سوار شده که قدرت خنک‌کنندگی را افزایش دهد. سیالی که در لوله‌ها گردش دارد را می‌توان به صورت اجباری با تجهیزاتی مانند کرایوکولر^{۲۳} به جریان درآورد که در این صورت قدرت خنک‌کنندگی بخار سیال بیشتر می‌شود [۲].

در مخازن بزرگ کرایونیک باید از سپرهای سرد شده با بخار در مقیاس بزرگ استفاده کرد. افزایش مقیاس این سپرها باعث افزایش وزن شده و برای نگهداری این سپرها نیاز به تجهیزات خاصی مانند گیره یا حمایت‌کننده^{۲۴} می‌باشد. این تجهیزات نگهدارنده به نوبه خود باعث انتقال حرارت به مخزن کرایونیک می‌شود. در واقع گیره‌های معمولی تانک‌ها برای حفاظت از سپرهای حرارتی مقیاس بزرگ باعث نشست حرارت به تانک می‌شود. عایق‌های چندلایه معمولی نیز نمی‌تواند به خوبی وزن بالای این سپرها را تحمل کند و استفاده از تجهیزات نگهدارنده نیز باعث نشست حرارت به مخزن می‌شود. گروه حرارتی کوئست^{۲۵} و بل ایرو اسپیس^{۲۶} با حمایت ناسا یک عایق چندلایه متحمل بار جدید با قابلیت تحمل وزن سپرهای حرارتی و ارائه

23. Cryocooler
24. Support
25. Quest
26. Ball Aerospace

27. Dewars

(علمی-ترویجی)

محمد رضا بایرامعلی پور، علی صابری مقدم و محمدمهدی بحری رشت آبادی

اتمسفریک از عایق‌های فوم اسپری شده^{۲۸} استفاده می‌شود که رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به عایق چندلایه معمولی دارد و استحکام مکانیکی زیادی ندارد. فوم اسپری شده یک محصول شیمیایی است که توسط دو ماده مایع، ایزوسیانات^{۲۹} و رزین پلی آل^{۳۰} تولید می‌شود که در صورت مخلوط شدن این دو مایع با یکدیگر در محل اسپری شده، حجم ۳۰ الی ۶۰ برابر حجم اولیه مایع افزایش می‌یابد. این ماده به علت چگالی پایین، راحتی استفاده و مقاومت حرارتی بالا به عنوان عایق حرارتی در مخازن کرایوژنیک استفاده می‌شود.

جداکننده عایق چندلایه پاسخگو به بار از ستون‌های کوچک پلیمری ساخته شده است که به بارهای خارجی در هر لحظه پاسخ نشان می‌دهد. شکل ۵ نمای عرضی یک عایق چندلایه پاسخگو به بار را نشان می‌دهد. ساختار جداکننده‌ها از سه بخش تشکیل شده است. یک ستون اصلی و دو پایه که در اثر بار خارجی جابه‌جا می‌شوند. با جابجایی این پایه‌ها، لایه‌ها فشرده یا باز می‌شود. این ستون‌های کوچک پلیمری که دارای هدایت حرارتی پایینی هستند از پوسته نازک و یکپارچه خلأ نیز حمایت می‌کنند. در فضای اتمسفریک، این جداکننده‌ها یک پوسته خلأ سبک‌وزن و نازک را پشتیبانی می‌کنند که اجازه می‌دهد خلأ بالا در داخل عایق‌بندی حفظ شود. جداکننده‌ها در اثر نیروی خارجی که حاصل از فشار اتمسفریک روی لایه نازک خلأ است، فشرده می‌شود ولی در ارتفاعات بالا یا در مدار که این فشار وجود ندارد این جداکننده‌ها اصطلاحاً از فشردگی خارج شده^{۳۱} و باز می‌شود.

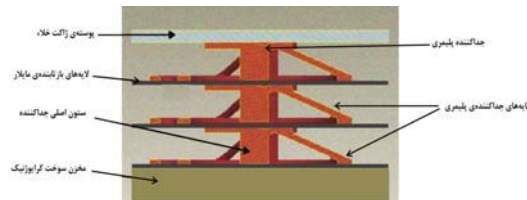
یک پوشش ۴۰ لایه‌ای عایق چندلایه یکپارچه در خلأ 10^{-5} torr با دمای جانبی گرم ۲۹۳ کلوین، دمای جانبی سرد ۷۷ کلوین و ضخامت پوشش ۱/۷ سانتیمتر می‌تواند هدایت حرارتی به اندازه 0.16 W/m^2 داشته باشد که این ۴۰ درصد از عایق چندلایه معمولی کمتر است. در شکل ۴ یک نمونه عایق چندلایه یکپارچه با جداکننده‌های پلیمری را نشان می‌دهد. برخلاف عایق چندلایه معمولی، جداکننده‌های پلیمری اجازه نمی‌دهد که چگالی لایه‌ها و عملکرد تغییر کند. جداکننده‌های پلیمری باعث کنترل دقیق فاصله بین لایه‌ها می‌شوند. عایق چندلایه یکپارچه جداکننده توری ندارد، این جداکننده‌های پلیمری هیچ‌گونه گازی از ساختار خود متصاعد نمی‌کند و باعث تضعیف خلأ نمی‌شود. این عامل یک مزیت عمده برای عایق چندلایه یکپارچه می‌باشد. لایه‌های پوشش عایق چندلایه معمولی آزادانه با رشته‌های پلیمری یا نخ‌های نسوز که از نظر ساختاری ضعیف هستند، به هم دوخته شده‌اند. جداکننده‌های عایق چندلایه یکپارچه به هر لایه چسبانده می‌شود و لایه‌ها را در فاصله دقیق نگه داشته و منجر به استحکام ساختاری عایق می‌شود که می‌تواند نسبت به جابجایی، شتاب یا لرزش مقاومت بیشتری داشته باشد.



شکل (۴): عایق چندلایه یکپارچه با جداکننده‌های پلیمری [۱۷].

۴-۲- عایق چندلایه پاسخگو به بار

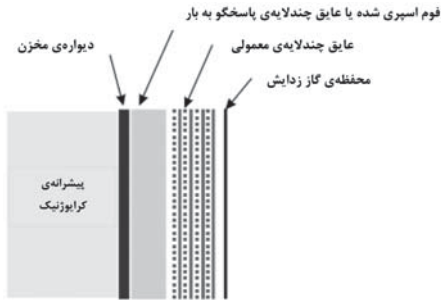
نسل جدید سفینه‌های فضایی ناسا و موتورهای لانچر فضایی به‌طور فزاینده‌ای از پیشرانده‌های کرایوژنیک استفاده می‌کنند. این پیشرانده‌ها به دلیل پایین بودن دمای جوش پیشرانده کرایوژنیک و مدت زمان طولانی نگهداری، باید حداقل مقدار جوشش خاموش را داشته باشند. در نتیجه مخازن نگهداری این پیشرانده‌ها نیاز به عایق‌بندی با وزن کم و عملکرد بالایی دارند، به‌طوری که در فشارهای مختلف (فشار اتمسفریک مانند شرایط قبل از پرتاب تا فشار خلأ مانند فشار محیط‌های فضایی) عملکرد بالایی داشته باشد. عایق چندلایه معمولی در خلأ بالا عملکرد حرارتی مورد نیاز را فراهم می‌کند، اما نیازمند یک پوسته خلأ سنگین برای استفاده در اتمسفر است. به‌طور معمول برای عایق‌بندی مخازن سوخت کرایوژنیک قبل از پرتاب به دلیل وزن کم و توانایی عایق‌کاری در فشار جو و محیط



شکل (۵): یک نمای عرضی از عایق چندلایه پاسخگو به بار که بر روی مخزن کرایوژنیک نصب شده است [۱۸].

جداکننده‌ها از پوسته خلأ تحت فشار اتمسفریک خارجی پشتیبانی می‌کند و اجازه می‌دهد که به جای استفاده از یک پوسته ضخیم و سنگین برای ژاکت خلأ از یک پوسته خیلی نازک، سبک و انعطاف‌پذیر استفاده شود. با کاهش فشار خارجی در ارتفاع بالا و یا در مدار جداکننده‌ها باز می‌شود. این باز شدن باعث کاهش نقاط تماس در جداکننده می‌شود و هدایت گرمایی

28. SOFI: Spray on Foam
29. Isocyanate
30. Polyol Resin
31. Decompress



شکل (۶): تنظیمات عایق مخزن سوخت کرایوژنیک، مفهوم پوسته‌ی خلاً نرم [۱۸].

جدول (۱): ضخامت مورد نیاز فوم اسپری شونده و عایق چندلایه پاسخگو به بار، برای نگهداری قسمت خارجی فوم یا عایق چندلایه معمولی در بالاتر از ۷۷ کلون و با ۸ کلون اختلاف [۲۲].

تعداد لایه‌های MLI زوده شده	ضخامت (cm) MLI	ضخامت (cm) SOFI	تعداد لایه‌های LRMLI	ضخامت (cm) LRMLI	فوم (kg/m^2) MLI	فوم (kg/m^2) SOFI	فوم (kg/m^2) LMLI	جرم (kg/m^2) SOFI-MLI	فوم (kg/m^2) LRMLI-MLI
۴۰	۴	۱/۲	۱	۰/۲۱	۱/۲	۰/۵	۰/۸	۱/۷	۲/۰
۶۰	۶	۱/۸	۱	۰/۲۱	۱/۸	۰/۸	۰/۸	۲/۶	۲/۶
۸۰	۸	۲/۴	۱	۰/۲۱	۲/۴	۱/۰	۰/۸	۳/۴	۳/۲
۱۲۰	۱۲	۳/۴	۲	۰/۳۹	۳/۶	۱/۴	۰/۹	۵/۰	۴/۵

۴-۳- عایق چندلایه متحمل بار

صفحات دارای لوله در عایق‌بندی مخازن کرایوژنیک همراه با عایق‌های چندلایه استفاده می‌شوند. عایق‌های چندلایه معمولی رایج توانایی بارگذاری را ندارند و وزن بالای این صفحات هنگام اتصال این صفحات به عایق‌های چندلایه معمولی مشکل ساز می‌شود. برای برطرف کردن این مشکل از عایق‌های چندلایه توسعه یافته به نام عایق چندلایه متحمل بار استفاده می‌شود. این عایق‌ها لایه جداکننده ندارد بلکه در آن‌ها از جداکننده‌های پلیمری که توانایی تحمل بار و وزن بالایی دارد، استفاده شده است. این جداکننده‌ها استحکام بالا و توانایی تحمل وزن سپرهای خنک شده بزرگ را دارد. شکل ۷ نمونه‌ای از عایق چندلایه متحمل بار را نشان می‌دهد. در این شکل سیستم خنک‌سازی با بخار در میان عایق‌های چندلایه قرار گرفته است. در آخرین و بیرونی‌ترین لایه از عایق چندلایه معمولی استفاده شده است.

ناشی از تماس جامد کاهش پیدا کرده و متعاقباً نشت حرارتی کمتر می‌شود. طراحی عایق چندلایه پاسخگو به بار به گونه‌ای انجام می‌شود که نیاز عایق‌کاری را در فضای اتمسفری و فضای خلاً مدار برآورده سازد [۱۹].

عایق چندلایه پاسخگو به بار می‌تواند جایگزین مناسبی برای فوم‌های اسپری شونده در استفاده‌های زمینی یا عایق‌کاری‌های محفظه‌های پیشرانه فضاییما قبل از پرتاب باشد. استفاده از این عایق از به وجود آمدن یخ در بدنه مخازن جلوگیری می‌کند و باعث می‌شود انتقال حرارت کمتری به سیال کرایوژنیک انجام پذیرد و پیشرانه در زمان استفاده در حالت مافوق سرد باشد. عایق چندلایه پاسخگو به بار مزایای قابل توجهی برای کاربردهای فضایی خواهد داشت، مخصوصاً سیستم‌هایی که در زمان پرتاب باید دمای کمتری داشته باشد.

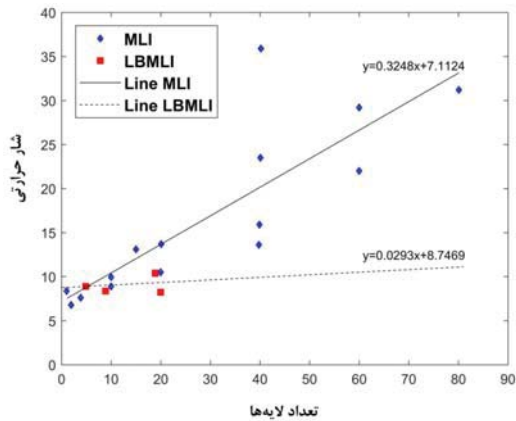
ابزارهای دقیق فضایی مانند دوربین‌های مادون قرمز و اسپکترومترها به صورت دوره‌ای به وسیله سیالات کرایوژنیک سرد می‌شود. مخازن سوخت کرایوژنیک معمولاً از ژاکت‌های خلاً استفاده نمی‌کند، زیرا جرم بالایی دارد و سوخت در عرض چند ساعت بعد از پرتاب مصرف می‌شود. با این حال، مأموریت‌های آینده نیازمند این است که سوخت کرایوژنیک به‌طور مؤثر چندین روز یا چند ماه ذخیره شود. این امر مستلزم این خواهد بود که مخازن با عایق‌های چندلایه به ضخامت ۴۰ تا ۱۲۰ لایه ساخته شود [۲۰].

یک روش مناسب برای نگهداری هیدروژن مایع، عایق‌بندی مخازن با لایه‌ای از فوم‌های اسپری شونده بین مخزن و پوشش ضخیم عایق چندلایه است [۲۱]. فوم اسپری شده باید به اندازه کافی ضخیم باشد که دما در خارج از آن بیشتر از ۷۷ کلون باشد تا نیتروژنی که به عنوان گاز زدایش مورد استفاده قرار می‌گیرد، چگالیده نشود. شکل ۶ این آرایش را نشان می‌دهد که در آن عایق چندلایه پاسخگو به بار جایگزین فوم اسپری شونده می‌شود. جدول ۱ ضخامت مورد نیاز فوم و عایق چندلایه پاسخگو به بار را برای نگهداری قسمت خارجی فوم در بالاتر از ۷۷ کلون و با ۸ کلون تفاوت را نشان می‌دهد. یک لایه از عایق چندلایه پاسخگو به بار برای جلوگیری از چگالش نیتروژن کافی است. یک تحلیل کلی سیستم نشان می‌دهد که جرم سیستم با عایق چندلایه پاسخگو به بار کمتر می‌شود و این به دلیل کاهش اندازه سیستم است.

(علمی-ترویجی)

محمد رضا بایرامعلی پور، علی صابری مقدم و محمدمهدی بحری رشت آبادی

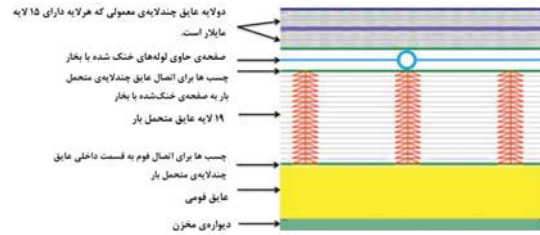
نیست و تحمل بارگذاری بالایی دارد. این امر منجر به افزایش عملکرد حرارتی عایق در تعداد لایه‌های بالای عایق می‌شود. عایق چندلایه متحمل بار دارای چگالی پایین ۵/۵ لایه در هر سانتی‌متر است، در عایق چندلایه معمولی دانسیته لایه بین ۱۰ تا ۴۰ لایه در هر سانتی‌متر است. عایق چندلایه متحمل بار نسبت به عایق چندلایه معمولی به‌طور متوسط ۳۸ درصد کاهش در جرم سیستم را فراهم می‌کند [۸]. این عایق می‌تواند به صورت پنل‌هایی روی مخازن سوخت کرایونیک نصب شود. عایق چندلایه متحمل بار در مقایسه با عایق چندلایه معمولی، بار گرمایی وارده به مخزن را در یک ضخامت مشخص و دمای عملیاتی مابین ۲۰ (تانک هیدروژن مایع) و ۹۰ کلوین (سپر خنک شده) تا ۱۸ درصد کاهش می‌دهد [۲].



شکل (۷): اثر افزایش تعداد لایه‌ها و قابلیت فشردگی در MLI و LBMLI [۸].

۴-۴- عایق‌بندی کامپوزیتی لایه‌ای

عایق کامپوزیتی لایه‌ای یک سیستم عایق حرارتی می‌باشد که متشکل از لایه‌های متناوب سپرهای تابشی و جداکننده‌ها است. یک سیستم عایق کامپوزیتی لایه‌ای شامل لایه‌های سپر تابشی، لایه‌های پودری (آبروژل^{۳۳} یا فیوم سیلیکا^{۳۴}) و لایه‌های حامل (پارچه بدون بافت یا کاغذ فایبرگلاس) می‌باشد. عایق‌های کامپوزیتی لایه‌ای به صورت یک لایه پوشش پتو مانند نیست، بلکه چندین لایه به طور متناوب به دور سیستم پیچیده می‌شود و تفاوت آن‌ها با عایق چندلایه معمولی در این است که عایق کامپوزیتی لایه‌ای یک لایه اضافی پودری در ساختار خود دارد.



شکل (۶): برش عرضی از سیستم عایق چندلایه متحمل بار با سپر خنک شده با بخار [۲].

توسعه سیستم‌های عایق‌بندی چندلایه متحمل بار باعث می‌شود تا صفحات خنک شده با بخار با وزن بالا همراه با عایق چندلایه بدون تأثیر منفی بر عملکرد عایق استفاده شود که این باعث افزایش عملکرد سیستم عایق‌بندی حرارتی مخزن سیال کرایونیک می‌شود. استفاده از سپر حرارتی خنک شده بزرگ همراه با عایق چندلایه معمولی که از لایه‌های سپر تابشی و توری‌های جداکننده که به صورت ضعیف و شل دوخته شده یا پین شده‌اند، مشکل ساز است. عایق چندلایه معمولی تحت فشار فشرده می‌شود که به‌طور قابل‌توجهی عملکرد حرارتی خود را از دست می‌دهد. برای جلوگیری از فشرده شدن عایق چندلایه معمولی، می‌توان از استندآف^{۳۳} استفاده کرد که عملکرد عایق چندلایه معمولی را تنزل می‌دهد و مستقیماً حرارت را به مخزن منتقل می‌کند. استندآف‌ها قطعه‌های فلزی یا پلاستیکی محکمی هستند که برای ایجاد فاصله و جلوگیری از فشردگی و تحمل وزن در عایق‌های لایه‌ای استفاده می‌شود. همچنین، این مسئله برای مخازن استوانه‌ای بزرگ هیدروژن مایع و سوخت کرایونیک و وسایل نقلیه مشکل ساز است.

عایق چندلایه متحمل بار به‌طور خاص برای پشتیبانی از سپرهای حرارتی بزرگ بدون نیاز به استندآف و یا هر قطعه پشتیبانی دیگر طراحی شده است. عایق چندلایه متحمل بار ذاتاً یک عایق چندلایه معمولی است که قادر به تحمل وزن سپر خنک شده بزرگ است. عایق چندلایه متحمل بار ۴۰ درصد شار حرارتی عبوری کم‌تری نسبت به عایق چندلایه معمولی دارد. شکل ۸ نشان‌دهنده تغییرات شار گرمایی عبوری از عایق چندلایه معمولی و عایق چندلایه متحمل بار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست، افزایش تعداد لایه‌ها منجر به فشردگی لایه‌ها و افزایش در شار حرارتی عبوری از عایق می‌شود. برای عایق چندلایه متحمل بار این تابع تقریباً مسطح است و افت کمتری با پوشش‌های ضخیم‌تر دارد. به عبارتی دیگر، عایق چندلایه متحمل بار نسبت به افزایش وزن حاصل از افزایش تعداد لایه‌ها حساس

33. Aerogel
34. Fumed Silica

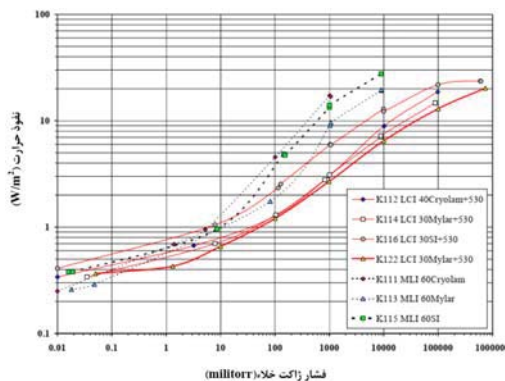
32. Standoff

جدول (۱): مشخصات برخی از عایق‌های کامپوزیتی لایه‌ای و عایق چندلایه معمولی [۲].

کد نمونه	نوع عایق	توضیح سیستم عایق‌بندی	ضخامت کلی (mm)	چگالی (kg/m^3)
C107	LCI	۱۸ لایه فویل+کاغذ+۵ یوم سیلیکا ۷۲۰	۲۴/۸	۵۲
C108	MLI	۴۰ لایه فویل+ کاغذ (میلی‌متر/لایه) (۱/۸)	۲۲/۳	۵۸
C113	LCI	۱۸ لایه فویل+کاغذ+۵ یوم سیلیکا ۷۲۰	۲۰/۹	۵۱
C115	LCI	۱۵ لایه فویل+ پارچه پلی‌استر + فیوم سیلیکا ۷۲۰	۲۵/۱	۶۴
C116	MLI	۱۵ لایه فویل+ پارچه پلی‌استر	۱۸/۷	۵۱
C123	MLI	۶۰ لایه فویل+کاغذ (۶۰SI)	۲۴/۵	۷۹
C130	LCI	۳۰ لایه مایلار+کاغذ+۵ فیوم سیلیکا ۵۳۰	۲۲/۳	۵۰
A110	LCI	نمونه اولیه پتوی ایروزل	۲۱/۹	۱۲۰
A112	Material	۶ لایه کرایوزل پتوی ایروزل	۲۲/۶	۱۳۴
A113	Material	کرایوزل با ۱۵ لایه فویل + کاغذ	۲۱/۵	۹۲

سیستم عایق کامپوزیتی لایه‌ای به طور ذاتی انعطاف‌پذیر و انطباق‌پذیر و سازگار است و به هیچ اندازه یا شکل خاصی محدود نمی‌شود. عایق‌های کامپوزیتی لایه‌ای دارای فاصله بین لایه‌ای بزرگ‌تری است تا آسیب‌پذیری در برابر تراکم (و نشت حرارتی متعاقب) ناشی از نصب و استفاده را کاهش دهد. چگالی کلی عایق کامپوزیتی لایه‌ای معمولاً حدود ۱ لایه در هر میلی‌متر است. چگالی لایه جداکننده تا حد زیادی با مقدار تراکم پودر تعیین می‌شود که بسته به نظم خود به خودی ایجاد شده در هنگام فرایند پیچیدن عایق ایجاد می‌شود. پودری که در لایه‌های عایق کامپوزیتی لایه‌ای قرار دارند، هنگام پیچیدن فشرده شده و چگالی آن افزایش پیدا می‌کند. لایه‌ها با یک فرآیند پیوسته پیچاندن و رول کردن کنار هم قرار می‌گیرد. لایه پودر را می‌توان بر روی سطح لایه حامل یا درون خود لایه حامل قرار داد.

در جدول ۲ ویژگی تعدادی از نمونه‌ها عایق‌های کامپوزیتی لایه‌ای و عایق‌های چندلایه معمولی که مورد آزمایش قرار گرفته، آورده شده است. این نمونه‌های همگی در شرایط یکسان مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفته است. ضخامت نمونه‌های عایق مورد استفاده در دو سیستم در بیشترین حد از ۲۵ میلی‌متر بیشتر نمی‌شود. عایق‌های از نوع کامپوزیتی لایه‌ای، اکثراً دارای لایه پودری از جنس فیوم سیلیکا است. چگالی عایق‌های کامپوزیتی لایه‌ای و عایق‌های چندلایه معمولی تقریباً با هم برابر می‌باشد. نتایج مقایسه عملکرد حرارتی عایق‌بندی کامپوزیتی چندلایه و عایق چندلایه معمولی در شکل‌های ۱۰-۹ ارائه شده است. در شکل ۹ رسانندگی گرمایی سیستم‌های عایق کامپوزیتی لایه‌ای در مقایسه با سه سیستم عایق چندلایه معمولی نشان داده شده است. در خلأهای متوسط (۱۰-۰/۰۱ torr)، عایق کامپوزیتی لایه‌ای عملکرد حرارتی مناسب‌تری را نسبت به عایق چندلایه معمولی دارد. در خلأ بالا (کمتر از ۰/۰۱ torr)، عملکرد سیستم‌های عایق کامپوزیتی لایه‌ای تقریباً با سیستم‌های عایق چندلایه معمولی برابر است. این در حالی است که عایق کامپوزیتی لایه‌ای در یک عملکرد نسبتاً برابر، دارای نصف تعداد لایه‌های عایق چندلایه معمولی می‌باشد. شکل ۱۰ نیز هدایت حرارتی این نمونه‌های عایق‌های مختلف را در خلأهای متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای این شکل نیز می‌توان عملکرد عایق کامپوزیتی لایه‌ای را مشاهده کرد.

**شکل (۹):** نتایج عملکرد حرارتی سیستم‌های عایق کامپوزیتی چندلایه‌ای و عایق چندلایه معمولی (دمای مرزی به ترتیب ۲۹۳ و ۷۸ کلون، گاز باقی‌مانده نیتروژن است) [۲].

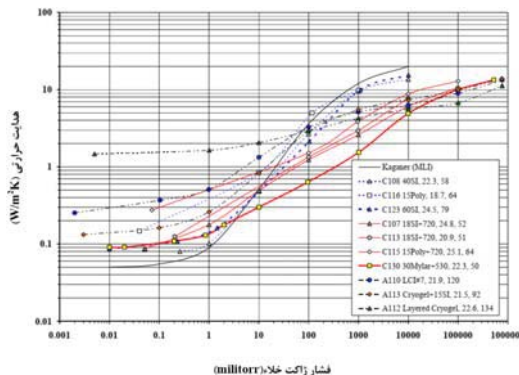
جدول (۲): نقاط ضعف و قوت انواع عایق‌های چندلایه معرفی شده.

نوع استفاده	نقاط ضعف	ویژگی	نوع جداکننده	نوع عایق
زمینی و فضای	عدم قابلیت بارگذاری انعطاف‌پذیری کم	ساخت آسان مواد تشکیل‌دهنده متداول عملکرد مناسب	صفحه‌ای معمولی	چندلایه معمولی (MLI)
زمینی	عدم قابلیت بارگذاری	ساخت آسان انعطاف‌پذیری بالا عملکرد حرارتی مناسب در خلأ کم	صفحه‌ای معمولی	عایق‌بندی کامپوزیتی لایه‌ای (LCI)
فضایی و زمینی	عدم قابلیت بارگذاری گران‌قیمت	استحکام بالای عایق عملکرد حرارتی بالا	قطعات پلیمری	چندلایه یکپارچه (IMLI)
فضایی	فرایند ساخت سخت گران‌قیمت	عملکرد حرارتی بالا هم در خلأ و هم در اتمسفر	قطعات پلیمری پاسخگو به بار	چندلایه پاسخگو به بار (LRMLI)
فضایی	فرایند ساخت سخت گران‌قیمت	دارای قابلیت بارگذاری	قطعات پلیمری با تحمل وزن بالا	چندلایه متحمل بار (LBMLI)

۶- نتیجه‌گیری

سیستم‌های عایق حرارتی کرایوژنیک برای ذخیره‌سازی و انتقال کارآمد سیالات کرایوژنیک مورد نیاز است. با توجه به دمای بسیار پایین سیالات کرایوژنیک، سیستم‌های عایق حرارتی باید دارای عملکرد بالا و مناسبی باشد تا سیال به صورت مناسب نگهداری شده و ایجاد مشکل نکند. کاوش‌های فضایی طولانی‌مدت که از سیالات کرایوژنیک به عنوان سوخت یا اکسیدکننده استفاده می‌کند، یکی از مواردی است که نیاز شدید به عایق‌کاری مناسب با عملکرد عالی دارد.

عایق چندلایه یکپارچه دارای مزایای قابل توجهی نسبت به عایق چندلایه معمولی در عملکرد حرارتی، تعداد لایه‌ها، ضخامت، جرم، استحکام و غیره است. در این نوع عایق جداکننده متداول حذف شده و برای ایجاد فاصله از قطعه‌های پلیمری با هدایت حرارتی کم در میان صفحات بازتابنده استفاده شده است. این قطعه‌های پلیمری نقاط تماس و هدایت حرارتی کمی دارند. این عایق نسبت به عایق چندلایه معمولی در یک عملکرد مشابه، ۳۰ درصد کمتر تعداد لایه‌ها نیاز دارد و باعث نازک‌تر و سبک‌تر شدن ضخامت عایق‌بندی می‌شود. نوع دیگری از عایق‌های چندلایه جدید، عایق‌های چندلایه پاسخگو به بار است. در



شکل (۸): نتایج هدایت حرارتی ظاهری برای عایق‌های عایق کامپوزیتی چندلایه‌ای و عایق چندلایه معمولی و سایر سیستم‌های لایه‌ای (دمای مرزی به ترتیب ۲۹۳ و ۷۸ کلون، گاز باقی‌مانده نیتروژن است) [۲].

۵- بحث و بررسی

در بخش‌های قبلی انواع عایق‌های چندلایه معرفی شد. در جدول ۳ به‌طور کلی ویژگی‌های این عایق‌ها برای مقایسه آورده شده است. عایق‌های معرفی شده را می‌توان براساس ساختار جداکننده به دو دسته تقسیم‌بندی کنیم. دسته اول که دارای جداکننده معمولی بوده و دسته دوم که دارای جداکننده‌های تغییر یافته است. عایق چندلایه معمولی و عایق کامپوزیتی لایه‌ای در دسته اول قرار می‌گیرد. عایق چندلایه معمولی پیچیدگی خاصی ندارد و از لایه‌های متعدد بازتابنده و جداکننده‌های معمولی ساخته شده است. این عایق نسبت به سایر عایق‌ها آسان‌تر است ولی توانایی تحمل وزن را ندارد و برای عملکرد مناسب نیاز به ژاکت خلأ دارد. عایق کامپوزیتی لایه‌ای از لحاظ ساختاری مانند عایق چندلایه معمولی است ولی تفاوتی که دارد این است که یک لایه اضافی پودری در ساختار خود دارد. دسته دوم عایق‌هایی هستند که جداکننده آن‌ها تغییر یافته است. در عایق چندلایه یکپارچه جداکننده‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که استحکام و عملکرد حرارتی عایق بالا برود ولی همچنان این عایق توانایی بارگذاری را ندارد. در عایق چندلایه پاسخگو به بار، جداکننده‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که به بارهای خارجی ناشی از فشار محیط خارجی پاسخ دهد. این مکانیسم باعث می‌شود که عملکرد عایق در هر دو فشار خلأ و اتمسفری بالا باشد. عایق چندلایه متحمل بار به گونه‌ای طراحی شده است که توانایی تحمل سپر خنک شده با بخار را داشته باشد. ساختار و جداکننده‌های این عایق به گونه‌ای است که وزن بالا را بدون افت عملکرد عایق تحمل کند.

- Insulation”, *Appl. Therm. Eng.* Vol. 130, pp. 161–168, 2018.
- [5] Finckenor, M.M. and Dooling, D., *Multilayer Insulation Material Guidelines*, NASA/TP-1999-209263, Marshall Space Flight Center, Alabama, USA, 1999.
- [6] Neumann, H., “Thermal Performance Of Different Glass Microspheres In Comparison To Perlite Between 77 And 300 K”, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1218, pp. 747-754, 2010.
- [7] Dye, S., Kopelove, A., and Mills, G., “Integrated and Load Responsive Multilayer Insulation”, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1218, pp. 946-953, 2010.
- [8] Dye, S.A., Johnson, W.L., Plachta, D.W., Mills, G.L., Buchanan, L., and Kopelove, A.B., “Design, Fabrication and Test of Load Bearing Multilayer Insulation to Support a Broad Area Cooled Shield”, *Cryogenics (Guildf)*, Vol. 64, pp. 135–140, 2014.
- [9] Jiang, W.B., Zuo, Z.Q., Huang, Y.H., Wang, B., Sun, P.J., and Li, P., “Coupling Optimization of Composite Insulation and Vapor-cooled Shield for On-orbit Cryogenic Storage Tank”, *Cryogenics (Guildf)*, Vol. 96, pp. 90–98, 2018.
- [10] Suthesh, P.M. and Chollackal, A., “Thermal Performance of Multilayer Insulation: A Review”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 396, pp. 12–61, 2018.
- [11] Fesmire, J.E., Augustynowicz, S.D., and Scholtens, B.E., “Robust Multilayer Insulation for Cryogenic Systems”, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 985, pp. 1359–1366, 2008.
- [12] Fesmire, J.E. and Johnson, W.L., “Cylindrical Cryogenic Calorimeter Testing of Six Types of Multilayer Insulation Systems”, *Cryogenics (Guildf)*, Vol. 89, pp. 58–75, 2018.
- [13] Adams, J., Gangloff, J., Stetson, N., Werth, C., White, S., Aller, M., Franta, T., Sorkin, A., Byerly, D., Eihusen, J., Newhouse, N., Fesmire, J., Swanger, A., Anton, D., Tamburello, D., and Meneghelli, B., *Integrated Insulation System for Cryogenic Automotive Tanks*, ICAT, Golden, Colorado, USA, 2018.
- [14] Meneghelli, B., Tamburello, D., Fesmire, J., Swanger, A., Manager, D., and Adams, J., *Integrated Insulation System for Automotive Cryogenic Storage Tanks*, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program, FY 2017 Annual Progress Report, 2017.
- [15] Fesmire, J., “Research and Development History of Glass Bubbles Bulk-Fill Thermal Insulation Systems for Large-Scale Cryogenic Liquid Hydrogen Storage Tanks”, *Technical Report KSC-E-DAA-TN57204*, NASA Kennedy Space Center, Cocoa Beach, FL, United States, 2017.
- [16] Kamg, S.W., Garceau, N., Mulim, C., Hoonbaik, J., Kim, S., and Oh, I.H. “Performance of a 5L Liquid Hydrogen Storage Vessel”, *Trans. Korean Hydrog. New Energy Soc.*, Vol. 26, pp. 234–240, 2015.
- [17] Mills, G., *Modeling and Testing Integrated and Load Responsive Multilayer Insulation*, Spacecraft Thermal Control Workshop, Ball Aerospace & Technologies Corp., Broomfield, Colorado, USA, 2012.

این نوع عایق جداکننده متداول با جداکننده‌های پلیمری خاصی که به بار خارجی واکنش نشان می‌دهد، جایگزین شده است. این عایق در برابر فشار اتمسفر خارجی از خود واکنش نشان می‌دهد. این عمل سبب می‌شود تا این نوع عایق‌ها عملکرد مطلوبی هم در فشار اتمسفری و هم در خلأ بسیار بالا داشته باشد. عایق چندلایه پاسخگو به بار یک پیشرفت قابل توجه نسبت به فوم‌های اسپری شونده برای عایق‌بندی سیالات کرایوژنیک در اتمسفر و مدار است که عایق‌بندی سبک‌تر و نازک‌تر را فراهم می‌کند. سپرهای خنک شده با بخار سیال یکی از مکانیسم‌های عایق‌کاری به شمار می‌آید. این سپرها وزن بالایی دارد و متصل کردن این سپرها با عایق‌های چندلایه معمولی امکان‌پذیر نیست. عایق چندلایه متحمل بار نسل بعدی عایق چندلایه است که از جداکننده‌های پلیمری برای حفظ چگالی لایه‌ها استفاده می‌کند و از لحاظ ساختاری از سپر حرارتی خنک شده با بخار پشتیبانی می‌کند و نشت گرما را از طریق سیستم عایق‌بندی کاهش می‌دهد. از مزایای این روش می‌توان به هزینه کمتر، عملکرد حرارتی بالاتر، تکرارپذیری و غیره اشاره کرد. سیستم‌های کامپوزیت لایه‌ای با موفقیت توسعه یافته و به عنوان نمونه‌ای از یک سیستم عایق چندلایه با استحکام به کار گرفته شده است. این عایق انعطاف‌پذیر بوده و پوشش‌دهی مناسبی دارد. این عایق در خلأهای پایین دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به عایق چندلایه معمولی است. در خلأهای بالا این عایق عملکرد مشابهی با عایق چندلایه معمولی دارد. کاربرد این سیستم عایق‌بندی در مواردی است که احتمال از بین رفتن خلأ زیاد یا افت خلأ باعث بروز خطرات جدی می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Fesmire J.E., “Aerogel-Based Insulation Materials for Cryogenic Applications”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 502, No. 1, pp. 012188, 2019.
- [2] Johnson, W.L., Plachta, D.W., Valenzuela, J.G., and Feller, J.R., “Tank Applied Testing of Load-Bearing Multilayer Insulation (LB-MLI)”, *The 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Jt. Propuls. Conf.*, Cleveland, Ohio, USA, 2014.
- [3] Liu, Y.W., Liu, X., Yuan, X.Z., and Wang, X.J., “Optimizing Design of a New Zero Boil Off Cryogenic Storage Tank in Microgravity”, *Appl. Energy*, Vol. 162, pp. 1678–1686, 2016.
- [4] Zheng, J., Chen, L., Cui, C., Guo, J., Zhu, W., Zhou, Y., and Wang, J., “Experimental Study of Foam Insulation System of Spray on Foam Insulation and Variable Density Multilayer

- [21] Hastings, L.J., "Analytical Modeling and Test Correlation of Variable Density Multilayer Insulation for Cryogenic Storage", *Technical Report NASA/TM-2004-213175, M-1109*, NASA Marshall Space Flight Center; Huntsville, AL, United States, 2004.
- [22] Johnson, W.L., Fesmire, J.E., and Heckle, K.W., "Demonstration of Hybrid Multilayer Insulation for Fixed Thickness Applications", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 101, pp. 12015, 2015.
- [18] Dye, S., Kopelove, A., and Mills, G.L., "Novel Load Responsive Multilayer Insulation with High In-atmosphere and On-orbit Thermal Performance", *Cryogenics (Guildf)*, Vol. 52, No's. 4-6, pp. 243-247, 2012.
- [19] Dye, S., Kopelove, A., and Mills, G.L., "Load Responsive Multilayer Insulation Performance Testing", *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1573, pp. 487-492, 2014.
- [20] Mills, G.L. and Zeller, C.M., "The Performance of Gas Filled Multilayer Insulation", *AIP Conf. Proc.*, Vol. 985, pp. 1475-1482, 2008.