

Aerogels: A New Generation of High-Temperature Thermal Insulators for Power Plant Applications

Majid Mirzaee*, Majid Rezaei Abadchi

Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

High-temperature aerogels have attracted significant attention as promising insulating materials in the power industry due to their exceptional thermal insulation properties and low density. With recent advancements in production techniques, the thermal resistance of these aerogels has been significantly improved. Specifically, polyimide-based aerogels can withstand temperatures up to 1000 °C, zirconia-based aerogels up to 1300 °C, silica-based aerogels up to 1500 °C, alumina-based aerogels up to 1800 °C, and carbon-based aerogels can endure temperatures up to 2500 °C. This article systematically reviews recent advancements in the thermal insulation performance of these five materials. It also details the thermal resistance of aerogels and their thermal insulation mechanisms, examining the impact of doping elements on the thermal conductivity of aerogels. Furthermore, various methods for producing aerogels capable of withstanding high temperatures are consolidated. Finally, recent applications of these materials in power plant uses are presented. A thermal imaging survey of the furnace chimney, which was insulated with basalt fibers and aerogel, was conducted, and the temperature of the flue gases was controlled by determining the required ratio of natural gas and oxidizer flow. The results showed that aerogel outperformed basalt fibers in all key thermophysical properties.

Keywords

high-temperature aerogel; thermal insulation performance; mechanisms; power plant applications

Article history:

Received: 17-09-2024

Accepted: 09-12-2024

Corresponding author:

*mjmirzaei@nri.ac.ir

اروژل‌ها: نسل جدید عایق‌های حرارتی دما بالا برای مصارف نیروگاهی

مجید میرزایی*، مجید رضائی آبادچی

عضو هیات علمی گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده

اروژل‌های با دمای بالا به عنوان مواد عایق امیدوارکننده در صنایع نیروگاهی، به دلیل خواص عایق حرارتی فوق‌العاده و چگالی پایین خود، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های تولید، مقاومت حرارتی این اروژل‌ها به طور قابل توجهی بهبود یافته است. به طور خاص، اروژل‌های مبتنی بر پلی‌ایمید می‌توانند دماهای تا 1000°C را تحمل کنند، اروژل‌های مبتنی بر زیرکونیا تا 1300°C ، اروژل‌های مبتنی بر سیلیس تا 1500°C ، اروژل‌های مبتنی بر آلومینا تا 1800°C و اروژل‌های مبتنی بر کربن می‌توانند تا 2500°C را تحمل کنند. این مقاله به طور سیستماتیک به بررسی پیشرفت‌های اخیر در عملکرد عایق حرارتی این پنج ماده می‌پردازد. همچنین به تفصیل به مقاومت دمایی اروژل‌ها و مکانیزم‌های عایق حرارتی آن‌ها پرداخته و تأثیر عناصر دوپینگ بر هدایت حرارتی اروژل‌ها را بررسی می‌کند. علاوه بر این، روش‌های مختلفی که به تولید اروژل‌های دما بالا می‌پردازند، تجمیع می‌شود. در پایان، نمونه‌ای از کاربردهای اخیر آن در مصارف نیروگاهی بیان می‌شود. یک بررسی تصویربرداری حرارتی از دودکش کوره انجام شد که با الیاف بازالت و اروژل عایق‌بندی شده بود، و دمای گازهای دود را با تعیین نسبت مورد نیاز جریان گاز طبیعی و اکسیدکننده کنترل شد. نتایج نشان داد که اروژل در تمام ویژگی‌های ترموفیزیکی کلیدی از الیاف بازالت پیشی گرفت.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۹/۱۹

اروژل با دمای بالا؛ عملکرد عایق حرارتی؛ مکانیزم‌ها؛ کاربرد نیروگاهی

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

اروژل‌ها [۱] مواد نانومتخلخل سه‌بعدی هستند که دارای ویژگی‌های منحصر به فردی همچون، آب‌گریزی، هدایت کم حرارتی در دمای اتاق، سطح ویژه بسیار زیاد و خاصیت جذب پرتوی فرابنفش را نیز دارند که ویژگی آن‌ها را از عایق‌های سنتی متمایز می‌کند. برخی از ویژگی‌های عایق‌های سنتی به همراه مزایا و معایب و ضریب هدایت حرارتی آن‌ها در جدول ۱ آمده است. عایق‌های موجود در بازار که مورد استفاده در صنعت هست، تمام خواص یک عایق حرارتی ایده‌آل را یکجا ندارند. برای مثال مهم‌ترین ویژگی پشم سنگ، مقاومت زیاد آن در برابر آتش است. همچنین برای رشد آفت، قارچ، باکتری و حشرات موذی محیط نامناسبی است و به عنوان یک ماده غیرآلی در برابر انگل‌ها ایمن است. پشم سنگ در بین انواع عایق‌هایی که تا امروز درجهان ساخته اند، بی‌ضررترین آن‌هاست و با محیط زیست کاملاً سازگاری دارد. اما براساس برخی از گزارش‌ها این عایق می‌تواند در مواردی موجب خارش پوست، سوزش چشم و حساسیت شود. همچنین در یک گزارش اگرچه اثرات منفی پشم سنگ بر سلامتی انسان را کمتر از پشم شیشه گزارش کرده ولی این ماده را بدون عوارض جانبی گزارش نکرده است. به نظر می‌رسد برای حفظ سلامتی در هنگام استفاده از پشم سنگ و نصب آن حتماً باید از ماسک، عینک و دستکش استفاده کرد. چرا که در هنگام نصب این ماده احتمال ریزش ذرات پشم سنگ و ورود آن به سیستم تنفسی، چشم و ایجاد حساسیت در پوست وجود دارد. از جمله ویژگی‌های منفی دیگر پشم سنگ می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ریزش پشم سنگ بعد از گذشت زمان
- افت کیفی عایق با گذشت زمان
- ایجاد خارش حتی پس از نصب
- نیاز به شاسی کشی برای نصب و هزینه بالا نصب
- عمده چالش‌های عایق‌های حرارتی به صورت زیر است:
- افزایش مقاومت انتقال حرارت در عایق‌ها
- کاهش ضخامت و وزن عایق‌ها
- کاهش خوردگی تجهیزات به‌وسیله عایق‌های حرارتی
- نصب آسان عایق‌ها
- افزایش انعطاف‌پذیری و استحکام عایق‌ها
- کارایی در دماهای خیلی زیاد و خیلی کم
- نسوز بودن عایق
- افزایش ایمنی و بهداشت عایق‌ها
- افزایش مقاومت در برابر رشد کپک و قارچ
- افزایش سازگاری با محیط زیست

• افزایش طول عمر عایق در دماهای بالا

اروژل در تمام ویژگی‌های ترموفیزیکی و عملیاتی کلیدی از عایق‌های سنتی پیشی می‌گیرد. تنها مانع برای تولید و استفاده گسترده صنعتی اروژل در بخش عایق حرارتی با دمای بالا، ارزش بازار آن است که معمولاً چندین برابر قیمت عایق‌های سنتی در حجم معادل ماده است. با در نظر گرفتن این ویژگی‌ها هنگام انتخاب عایق حرارتی که در دماهای بالا کار می‌کند، به شرکت‌های صنعتی این امکان را می‌دهد که مواد عایق حرارتی با ویژگی‌های بهینه حرارتی، عملیاتی و اقتصادی را انتخاب کنند. اروژل بلنکت در دماهای مختلف از سایر عایق‌های حرارتی سنتی ضریب هدایت حرارتی کمتری دارد و در محدوده دمای ۲۰۰- تا ۶۵۰ درجه کارایی دارد. اروژل بلنکت‌ها دارای خواص منحصر به فردی هستند که آنها را از دیگر عایق‌ها متمایز می‌سازد. ضخامت و وزن کم اروژل بلنکت اروژل بلنکت‌ها در مقایسه با سایر عایق‌ها با مقاومت حرارتی یکسان، دارای ضخامت کمتری هستند. خوردگی زیر عایق می‌تواند هر جایی نظیر خطوط لوله، شیرها و یا تانک‌ها که تحت عایق‌کاری حرارتی قرار گرفته‌اند و در معرض رطوبت هستند، اتفاق بیفتد. مشکل زمانی آغاز می‌شود که جلد خارجی که حفاظت‌کننده عایق است، دچار نقص و شکافی شود. در این حالت باران و یا برف در حال ذوب می‌تواند به لایه‌های درونی رسوخ کرده و باعث خیس شدن عایق شوند. لذا رطوبت و خیس شدن به سطوح خارجی خطوط لوله و یا هر وسیله دیگری خواهد رسید. حال اگر سازه از جنسی ساخته شده باشد که در مقابل خوردگی مقاوم نباشد و یا هی چگونه پوشش حفاظت‌کننده روی آن قرار نگرفته باشد، خوردگی اتفاق خواهد افتاد. با توجه به مقدار رطوبت، در دسترس بودن اکسیژن و دما، خوردگی زیر عایق می‌تواند به آرامی و با سرعتی بیش از ۰/۰۶ اینچ در سال پیشروی کند و لذا دیواره‌های سازه نازک خواهد شد. از آنجایی که اغلب اثر خاصی از این نوع خوردگی دیده نمی‌شود، معمولاً اولین علامت وجود این خوردگی، خرابی و آسیب دیدن خط لوله، تانک و... خواهد بود. به دلیل اینکه خوردگی مذکور در سطح بزرگی از سازه اتفاق می‌افتد، خوردگی زیر عایق بسیار ناگهانی و فاجعه‌انگیز خواهد بود و لذا خوردگی زیر عایق از لحاظ زیست‌محیطی و امنیتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از مناطقی که به شدت در معرض خطر خوردگی زیر عایق قرار دارد، مناطق جوشکاری شده تکه‌های لوله به یکدیگر برای تشکیل خطوط لوله هستند. وارد شدن آب باعث خوردگی زیر عایق کاری می‌شود. لذا توجهات زیاد و مخصوصی باید در حین طراحی برای جلوگیری از ورود مستقیم و یا غیر مستقیم آب انجام گیرد. رطوبت می‌تواند از بیرون وارد شود و یا در

می‌مانند و بنابراین آبریز هستند. آبریز کردن سیلیکا آئروژل به وسیله متیل تری متوکسی سیلان مانع نفوذ بخار درون عایق آبروژل بلنکت می‌شود. نصب آسان بلنکت آبروژل‌ها به دلیل ضخامت کم به افرادی که عایق را بر روی لوله نصب می‌کنند، این امکان را می‌دهد که فضای بیشتری برای حرکت داشته باشند و نصب عایق با دقت و سرعت بیشتری انجام شود، از طرفی وزن سبک این بلنکت‌ها موجب سهولت در حمل و نقل آنها می‌شود. انعطاف‌پذیری و استحکام عایق‌های آبروژل بلنکت داشتن ویژگی

خود عایق وجود داشته باشد. سیلیکا آئروژل‌ها خواص آبریزگری از خود نشان می‌دهند. با انجام اصلاحاتی در روش سنتز آبروژل می‌توان آن را آبریز کرد که به عنوان نمونه ساختارهای آبریز آئروژلی متیل تری متوکسی سیلان و تترامتوکسی سیلان که در شرایط بازی سنتز شدند و در متانول فوق بحرانی خشک شدند را می‌توان نام برد. در این روش خشکاندن با حرارت بالا منجر به آبریز شدن سطح آئروژل‌ها می‌شود. آئروژل‌هایی که از ۲۰ درصد متیل تری متوکسی سیلان تشکیل شده‌اند روی آب شناور

جدول ۱. عایق‌های حرارتی سنتی و ویژگی‌های آن‌ها [۲].

Table 1. Traditional Thermal Insulations and Their Characteristics [2].

Insulator	Description	Advantage	Disadvantage	Thermal Conductivity
Fiberglass	Fiberglass is a type of thermal insulation with a fibrous structure. It is typically made from recycled glass combined with regular sand and a special resin, demonstrating excellent thermal resistance. This material is produced by melting glass and converting it into fine fibers.	With various densities, it is lightweight, easy to install, fire-resistant, and has a very low smoke and fire spread coefficient, making it useful as sound insulation.	It has low resistance to moisture and vapor penetration, which can reduce thermal resistance in humid conditions, produce silicic acid in the presence of moisture, and promote the growth of mold and bacteria. There are also respiratory hazards and skin and eye irritations, along with an increased risk of cancer, particularly lung cancer.	0.039-0.054
Asbestos Fibers	Asbestos fibers are obtained by separating natural mineral silicates with a crystalline structure in thin strands.	They are non-flammable, heat-resistant, and chemically inert.	They have a relatively high thermal conductivity and are carcinogenic.	0.6
Cellulose Insulation	Cellulose insulation is a fibrous material made from paper, raw paperboard or wood, along with binders, flame retardants, and other additives, or without them. Major raw materials include newspapers, cardboard, fabric, straw, and hemp sawdust.	It is fire-resistant, highly recyclable, and prevents moisture transfer. It is also environmentally friendly.	It requires skilled labor, has a long drying time, and consumes significant energy during production.	0.04

Rock Wool	Rock wool, or mineral wool, is an inorganic and non-metallic material made from very fine fibers of volcanic rocks such as basalt and dolomite, along with a certain amount of iron furnace slag. It is produced by melting basalt at a temperature of 1500 degrees Celsius and then obtaining fibers with a thickness of 6 microns.	It has a high operating temperature range and is suitable for thermal insulation in refinery and petrochemical industries, and for pipelines. It features low thermal conductivity and lower costs compared to elastomeric insulations, along with recyclability and good stability.	It is prone to defects, resulting in low resistance to water and vapor penetration. The thermal conductivity increases with rising temperature and humidity, necessitating moisture-resistant coatings when installed in outdoor or high-humidity environments.	0.039-0.047
Silicate Insulation	This type of insulation is a combination of mineral materials and ceramic fibers along with silica particles and metal oxides such as calcium, magnesium, or aluminum, which are combined at high temperatures. This insulation can be manufactured in blanket form or as solid bricks.	It is resistant to thermal shocks and non-flammable; resistant to corrosion and chemical compounds; has relatively good compressive strength and high stability; and does not corrode steel and iron pipes.	It is sensitive to moisture and water vapor penetration, making the use of moisture-resistant coatings mandatory due to its sensitivity to humidity.	0.055
Polyethylene	Polyethylene insulation is a flexible closed-cell type, divided into two categories: EPE (Expanded Polyethylene) and XLPE (Cross-linked Polyethylene). In addition to its insulating properties, polyethylene has a wide range of applications in various industries, including dampers, vibration and shock absorbers, packaging, and various types of sleeping and sports mats.	It is easy and quick to install, has a moisture permeability coefficient of nearly zero, is resistant to pollution and corrosion, withstands pressure and impact, is flexible, non-toxic, and has high stability.	It has a relatively high cost, can undergo permanent deformation and collapse if the temperature exceeds a certain range, and lacks stability against thermal shocks.	0.033
Polyurethane	Polyurethane insulation is a type of rigid closed-cell insulation considered a cold insulation material. When sprayed, polyurethane requires special equipment and the presence of skilled labor	It has a very low thermal conductivity, making it suitable for thermal insulation, particularly for industrial applications. It offers high resistance to abrasion and corro	Insulation requires greater thicknesses and diameters if injection polyurethane is needed, necessitating skilled operators and specialized equipment. If the work	0.030-0.033

	is essential for achieving the best results. One of the main applications of polyurethane is as insulation used in sandwich panels.	sion, as well as to acids, solvents, and moisture. Additionally, it is highly resistant to microbial, fungal, and biological contaminants.	ing temperature exceeds the permissible range, the thermal resistance of polyurethane significantly decreases, it can ignite, and in the event of a fire, it produces toxic gases. Pre-formed blocks and shapes of polyurethane insulation can generate dust.	
--	---	--	---	--

کاربرد تبدیل می‌کند. تا به امروز، این نمونه‌ای بی‌چون و چرا برای یافتن یک بازار خاص برای محصولات عایق ائروژل و کاوش موفقیت‌آمیز در آن است.

- کاربردهای هوافضا و هوانوردی

یکی از زمینه‌های سنتی ائروژل‌ها در زمان احیای آن‌ها در دهه ۱۹۶۰ پس از کشف کیستلار در سال ۱۹۲۵، این مواد به طور گسترده‌ای توسط اداره فضایی ایالات متحده (NASA) مورد مطالعه قرار گرفتند. بلوک‌های بزرگ مونولیتیک ائروژل برای جمع‌آوری گرد و غبار و ذرات ستاره‌ای در فضای بیرونی استفاده می‌شوند و در وسیله نقلیه رباتیک مریخ‌نورد نیز ائروژل‌های سیلیسی برای عایق حرارتی به کار رفته‌اند. با توجه به پتانسیل صرفه‌جویی در فضا و وزن نسبتاً کم آن‌ها، سیستم‌های عایق ائروژل می‌توانند همچنین در هوانوردی غیرنظامی و نظامی کاربرد پیدا کنند، اما تا کنون فعالیت کمی در این زمینه شناخته شده است که احتمالاً به دلایل هزینه‌ای است.

- عایق حرارتی در دماهای بالا

مواد جامد در حال حاضر کمترین هدایت حرارتی را دارند، اما ائروژل‌های اکسید فلزی بهترین گزینه‌ها برای عایق حرارتی در دماهای بالا (مانند لوله‌های بخار، کوره‌های صنعتی و حتی کاربردهای فضایی) هستند. در مقایسه با سایر ائروژل‌های اکسید فلزی، ائروژل‌های مبتنی بر آلومینا در حال حاضر پایداری حرارتی بهتری تا 1300°C و چگالی‌های کمتری را نشان می‌دهند، که به دلیل وزن اتمی پایین Al است و این موضوع به‌ویژه برای کاربردهای فضایی اهمیت دارد. وانگ^۱ و همکاران [۳] ائروژل‌های آلومینای اصلاح‌شده با SiO_2 را با پایداری حرارتی بالا (بدون انقباض و SSA بالا معادل 147 g/m^2 پس از کلسینه شدن در 1200°C) و هدایت حرارتی کم (0.13 و $0.18\text{ W/m}\cdot\text{K}$ در 800°C و 1000°C) تهیه کردند. در صنعت هوافضا، این مواد می‌توانند به

استحکام و انعطاف‌پذیری برای بلنک‌ها در عایق‌کاری لوله‌ها، تانک‌ها و دیگر تجهیزات از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. ائروژل بلنک‌ها با افزودن الیاف کربنی خواص فیزیکی بهتری پیدا می‌کنند و همراه انعطاف‌پذیری بالا مستحکم نیز هستند. عایق حرارتی ائروژل بلنک دارای مقاومت حرارتی بسیار بالایی است و در برابر شعله مستقیم عایقی با 10 میلی‌متر ضخامت بسیار مقاوم است و دمای 950°C درجه شعله را به 80°C درجه می‌رساند و این مطلب تنها با ضخامت 10 میلی‌متر انجام می‌شود. داشتن مقاومت حرارتی بسیار خوب در ضخامت‌های کم و مقاوم بودن در برابر شعله از ویژگی‌های منحصر به فرد ائروژل بلنک‌ها است که از دیگر عایق‌ها آن را متمایز می‌کند. برای اکثر محصولات عایق ائروژل، کاهش هزینه‌های عملیاتی بیشتر از صرفه‌جویی‌های حاصل از نصب است. با این حال، در مورد عایق‌کاری خطوط لوله نفت و گاز دریایی، بخش نصب عامل کلیدی به نفع محصولات مبتنی بر ائروژل است: با قطر لوله‌های به مراتب کوچکتر و وزن کاهش یافته، کشتی‌های مونتاژ می‌توانند در هر سفر مقدار بیشتری از لوله‌ها را حمل کنند و در نتیجه تعداد سفرها و هزینه کلی نصب به طور قابل توجهی کاهش یابد. این یک مثال مدل از چگونگی این است که یک کاربرد بسیار تخصصی می‌تواند فرصت‌هایی برای محصولات با عملکرد بالا و هزینه بالا ایجاد کند. برخی از کاربردهای محصولات عایق‌بندی ائروژل، مزایای صرفه‌جویی و ارتباط اقتصادی آن‌ها در جدول ۲ آمده است.

- نفت و گاز دریایی

این یکی از قدیمی‌ترین زمینه‌های فعالیت پتو عایق حرارتی Spaceloft شرکت Aspen Aerogels است. شرکت Cabot Corporation بسته‌های Compression Pack پر شده با Nanogel را به عنوان یک راه‌حل جایگزین امیدوارکننده برای محصول پتو ارائه می‌دهد. عملکرد حرارتی برتر و مقاومت شیمیایی/فشاری بهبود یافته ائروژل‌ها به همراه صرفه‌جویی در هزینه‌های مونتاژ، آن‌ها را به کاندیدهای ایده‌آل برای این نوع

جدول ۲. کاربردهای محصولات عایق‌بندی آئروژل، مزایای صرفه‌جویی و ارتباط اقتصادی آن‌ها [۲].

Table 2. Applications of Aerogel Insulation Products, Savings Benefits, and Their Economic Relevance [2].

Application	Installation and assembly cost	Operating cost
Off-shore oil and gas	Smaller pipe diameter, lower weight, more pipes per installation round trip, fewer trips	Superior lifetime, improved degradation resistance
Aeronautics/aerospace	Simplification of overall design, light construction, and size reduction lowers materials/ assembly cost	Smaller gross weight results in results in fuel savings or additional capacity
Building insulation	Comparable to conventional insulation, currently more elaborate due to a lack of experience	Reduction of heating/cooling energy and/or larger useable building/exterior volume
High-temperature insulation	Smaller overall pipe diameter or exterior dimensions, easier installation	Reduced surface area per unit length, lower radiative losses, improved resistance and lifetime
Cryogenic applications	Smaller overall pipe diameter or exterior dimensions, easier installation	Reduced sensitivity to cryo-embrittlement, increased lifetime, energy and/or space savings
Appliances and apparel	Significantly more complex than standard technology	Energy savings/increased thermal comfort for lightweight extreme performance personal wear/ gear

در حالی که ترکیبات چندجزئی برای افزایش پایداری حرارتی آئروژل‌های زیرکونیا استفاده شده‌اند. فررایرا^۲ و همکاران [۵] آئروژل $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ را به عنوان یک فتوکاتالیزور تهیه کردند و نشان دادند که پس از کلسینه شدن در 1000°C پایداری حرارتی بالاتری دارد و فعالیت فتوکاتالیزوری بالاتری نسبت به آئروژل‌های TiO_2 یا کاتالیزور فتوکاتالیزوری تجاری P25 TiO_2 نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که این آئروژل‌ها به عنوان کاشی‌های سرامیکی فتوکاتالیزوری و غشاهای سرامیکی برای تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرند. ساروانان^۳ و همکاران [۶] آئروژل‌های زیرکونیا سولفات را به عنوان یک کاتالیزور اسید جامد برای استری‌سازی اسید استتاریک با متانول تهیه کردند، که دارای اسیدیتته برونستد و لوئیس به دلیل اثر الکترون‌کشنده گروه‌های سولفات متصل به زیرکونیا است. این کاتالیزور نشان‌دهنده نرخ واکنش به‌طور قابل توجهی بالاتر ($18/94 \text{ mmol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$) و فرکانس چرخش ($8/55 \text{ h}^{-1}$) برای جایگزینی کاتالیزورهای اسید همگن بود. در تحقیق دیگری [۴] کاتالیزورهای آئروژل زیرکونیا دوپ شده با گروه‌های سولفات را برای القای ایزومریزاسیون هیدروکربن‌های خطی به هیدروکربن‌های شاخه‌ای تهیه کردند. آن‌ها دریافتند که عدم وجود ذرات ZrO_2 منجر به کاتالیزورهای ناکارآمد از ۱۵۰ تا 200°C می‌شود و تجمع ذرات زیرکونیا تشکیل ایزومرهای با

عنوان عایق برای وسایل نقلیه مافوق صوت استفاده شوند که باید دماهای 1200°C یا حتی بالاتر را به دلیل اصطکاک بین وسایل نقلیه و جو تحمل کنند. زو^۱ و همکاران [۴] آئروژل‌های مبتنی بر آلومینا تقویت‌شده با الیاف را با مدول یانگ بالا تا $3/58 \text{ MPa}$ و هدایت حرارتی کم معادل $0/129 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ در 800°C و $0/168 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ در 1000°C سنتز کردند. این ترکیبات می‌توانند در لوله‌های دما بالا، کوره‌های صنعتی و هواپیماها به جای کاشی‌های عایق سرامیکی سنگین و ناکارآمد استفاده شوند.

• کاتالیزور در دماهای بالا

با توجه به ساختار نانومتخلخل، آئروژل‌های اکسید فلزی دارای SSA و فعالیت سطحی بالایی هستند که برای استفاده به عنوان کاتالیزورها یا پشتیبان‌های کاتالیزوری بسیار مناسب است. در مقایسه با آئروژل‌های آلومینا، آئروژل‌های مبتنی بر زیرکونیا و تیتانیا جذاب‌تر هستند زیرا زیرکونیا خود یک کاتالیزور رایج است و دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل غیرسمی بودن، پایداری نوری، هزینه پایین و پایداری حرارتی در زمینه‌های فتوکاتالیزوری به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. به عنوان یک کاتالیزور، پودرها گزینه‌های بهتری هستند و دشواری ساخت را در مقایسه با مواد مونولیتیک کاهش می‌دهند. حفظ ساختار نانومتخلخل در دماهای بالا برای به‌دست آوردن کاتالیزورهای بسیار مؤثر حیاتی است. واکنش‌های سولفات‌ها برای افزایش فعالیت کاتالیزوری آئروژل زیرکونیا به کار رفته‌اند،

2- Ferreira-Neto

3- Saravanan

1- Zou

این به وضوح یکی از زمینه‌هایی است که پتانسیل زیادی برای بازارهای در حال رشد عایق آئروژل در جهان دارد. با تأکید بر نوسازی که در آن صرفه‌جویی در فضا کلیدی است، کاربردهای اصلی مواد آئروژل در صنعت ساختمان عبارتند از:

- نوسازی ساختمان‌های تاریخی (عایق کاری خارجی)
- عایق کاری داخلی و نورگیری شفاف/نیمه شفاف و پنجره‌ها
- ساخت و ساز بالکن‌های سقف‌دار (آئروژل‌ها به عنوان جایگزینی کمتر حساس به آسیب نسبت به VIP)
- معماری زیبا با عایق کاری خارجی باریک و عناصر سبک وزن بخش عمده‌ای از ساختمان‌های جدید و بیشتر نوسازی‌ها همچنان از محصولات عایق معمولی استفاده خواهند کرد، زیرا فضای اضافی به دست آمده از عایق نازک‌تر هزینه اضافی را در مکان‌های با قیمت بالا (مرکز شهر) جبران می‌کند. این دلیل اصلی است که چرا آئروژل‌ها به بخش عایق کاری ساختمان راه یافته‌اند، با این حال، این روند در حال حاضر در حال تغییر است و محصولات جدید مبتنی بر آئروژل و پروژه‌های نمایشی بیشتری در این روزها ظاهر می‌شوند.

۲- عایق‌های دمای بالا

مواد عایق با دمای بالا در سیستم‌های مهندسی و فرآیندهای صنعتی مختلف نقش بسیار مهمی دارند. ارائه عایق مؤثر در دماهای بالا برای افزایش کارایی انرژی و دستیابی به اهداف کربن خنثی ضروری است. با بهره‌گیری از ویژگی‌های متخلخل و سبک آروژل‌ها، این مواد خواص عایق حرارتی فوق‌العاده‌ای را ارائه می‌دهند. در مقایسه با مواد عایق سنتی، آروژل‌ها دارای هدایت حرارتی بسیار پایینی ($W/(m \cdot K) < 0.1$) هستند. همچنین، آروژل‌ها مقاومت قابل توجهی در برابر خوردگی و اکسیداسیون دارند و پایداری شیمیایی فوق‌العاده‌ای را نشان می‌دهند. آروژل‌های سیلیس معمولی معمولاً در دماهای بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ °C پایدار می‌مانند، که ممکن است برای کاربردهای سخت‌گیرانه در حوزه‌های نظامی، ساخت و ساز انرژی کارآمد و باتری‌های وسایل نقلیه الکتریکی کافی نباشد. برآورده کردن نیازهای سخت‌گیرانه این زمینه‌های متنوع نیازمند پیشرفت در فناوری آروژل است. آروژل‌ها نه تنها استانداردهای مهندسی دماهای بالا را برآورده می‌کنند، بلکه پشتیبانی فنی قوی برای توسعه انرژی پایدار نیز فراهم می‌آورند. به طور کلی، فرآیند تهیه آروژل‌ها شامل مراحل سل-ژل و خشک کردن است. فرآیند سل-ژل شامل به کارگیری ترکیبات غنی از عامل‌های شیمیایی بسیار واکنش‌پذیر به عنوان پیش‌سازها است که با حلال‌ها در واکنش‌هایی مانند هیدرولیز

ارزش‌تر را در ۲۲۰ °C تسهیل می‌کند. رئیسی^۱ و همکاران [۷] از آئروژل زیرکونیا سولفات دوپ شده با کروم (Cr) برای کاتالیز واکنش ایزومریزاسیون n-هگزان استفاده کردند. آئروژل حاصل SSA معادل ۱۳۱ g/m² و فاز بلوری t-ZrO₂ را پس از کلسینه شدن در ۷۰۰ °C حفظ کرد که خاصیت کاتالیزوری فعال و انتخابی در ایزومریزاسیون n-هگزان را نشان داد.

- کاربردهای کریوژنیک
- در زمینه کریوتکنولوژی، که شامل حمل و نقل و ذخیره‌سازی گازهای مایع یا نمونه‌های بیومدیال منجمد می‌شود، عایق آئروژل مزایای زیادی را ارائه می‌دهد. علاوه بر خواص فوق‌عایق، آئروژل‌ها تمایل دارند که با کاهش دما نسبت به عایق‌های فوم پلیمری کمتر شکننده شوند. شرکت Aspen Aerogels یک محصول خاص عایق پتو آئروژل با دمای پایین به نام Cryogel Z توسعه داده است. محصولات گرانولی مانند Nanogel شرکت Cabot برای پوشش‌دهی به هندسه‌های غیرمعمول مخازن و لوله‌ها که بخشی از سیستم‌های کریوژنیک پیچیده‌تر هستند، بسیار متنوع هستند. عایق آئروژل کریوژنیک همچنین توسط تیم‌های تحقیقاتی موتور راکت NASA برای سیستم‌های محرک هیدروژن مایع و اکسیژن مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- پوشاک و لوازم (سیستم‌های یخچالی، لباس و کفش‌های بیرونی)
- خواص فوق‌عایق می‌توانند در تعدادی از محصولات روزمره مورد استفاده قرار گیرند. به ویژه پوشاک شخصی مانند تجهیزات عملکردی در فضای باز، به عنوان مثال لباس، کفش، دستکش، گرم‌کن‌های پا، چادرها، کیسه‌های خواب و غیره می‌توانند با لایه‌های عایق حرارتی آئروژل تجهیز شوند. همین موضوع برای لوازم خانگی مانند یخچال‌ها یا جعبه‌های خنک‌کننده در فضای باز نیز صدق می‌کند. تعدادی از این محصولات به تازگی به بازار مصرف رسیده‌اند. با افزایش حجم بازار و آگاهی بیشتر مشتریان، این محصولات پتانسیل قابل توجهی برای رقابت در بخش محصولات با قیمت بالا دارند. با این حال، بعید است که محصولات مصرفی مبتنی بر آئروژل بتوانند در بخش‌های با هزینه متوسط و پایین نفوذ کنند.
- عایق کاری ساختمان

عایق کاری موجودی ساختمان‌ها می‌تواند صرفه‌جویی‌های قابل توجهی در انرژی به همراه داشته باشد و یکی از معقول‌ترین اقدامات کوتاه‌مدت برای کاهش سریع انتشار CO₂ است. با توجه به حجم عظیم مواد عایق مورد نیاز برای کاربردهای ساختمانی،



شکل ۱. طبقه‌بندی و کاربرد اروژل‌های با دمای بالا [۸].

Figure 1. Classification and application of high-temperature aerogels [8].

[۱۰]. پتوهای اروژل تقویت‌شده با الیاف (FRABs) عایق‌بندی فوق‌العاده‌ای را فراهم می‌کنند و نرخ تبخیر گاز طبیعی مایع (LNG) را به طور قابل توجهی کارآمدتر از پرلیت کاهش می‌دهند. مواد عایق سنتی مانند پرلیت محدودیت‌هایی دارند که FRABs می‌توانند به راحتی آن‌ها را برطرف کنند. این بهبود می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه و استفاده بهینه‌تر از فضا در حمل و نقل LNG شود. علاوه بر این، استفاده از FRABs می‌تواند ایمنی را در حین نصب و نگهداری مخازن کریوژنیک افزایش دهد. اروژل‌های مبتنی بر کربن، که به دلیل سطح ویژه بالا، هدایت الکتریکی و پایداری حرارتی خود شناخته می‌شوند، در ابرخازن‌ها، مواد الکترونیکی، باتری، حامل‌های کاتالیزور و جاذب‌ها استفاده می‌شوند. [۱۱]. شرکت Fanruiyihui Composite Material Co. (Zhengzhou, Henan, China) Ltd. به طور نوآورانه‌ای از پتوهای عایق اروژل در بخش باتری‌های انرژی نو استفاده کرده است. اروژل‌های مبتنی بر آلومینا دارای بازتاب حرارتی و خواص شیمیایی پایدار هستند و آن‌ها را برای عایق حرارتی بازتابی در دماهای بالا و کاربردهای حامل کاتالیزور ایده‌آل می‌سازد [۱۲]. اروژل‌های پلی‌ایمید خواص مکانیکی فوق‌العاده، پایداری حرارتی و هدایت حرارتی پایینی دارند که آن‌ها را برای کاربردهای هوافضا، الکتریکی و الکترونیکی مناسب می‌سازد. اروژل‌های مبتنی بر زیرکونیا دارای مقاومت در برابر دماهای بالا و مقاومت استثنایی در برابر خوردگی هستند و به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد خود، به کاربردهای خاص پاسخ می‌دهند. شرکت Technology Co., Ltd. Shanghai Gaoguanda Material (Shanghai, China) از بیومس و زباله‌های صنعتی متنوع برای

درگیر می‌شوند. این واکنش‌ها منجر به ایجاد یک ماتریس سل پایدار و شفاف درون محلول می‌شوند. با پیشروی واکنش، ذرات تشکیل‌دهنده آن به تدریج تحت پلیمریزاسیون قرار می‌گیرند و به یک ژل با ساختار شبکه سه‌بعدی تبدیل می‌شوند [۸]. شکاف‌های موجود در این چارچوب ژل با حلال پر می‌شوند و منجر به انتقال از حالت مایع به حالتی بدون سیالیت می‌شوند. خشک کردن یک مرحله حیاتی در فرآیند تهیه است که هدف آن حفظ ساختار منافذ اروژل در حین حذف حلال است. خشک کردن انجمادی فرآیندی است که حلال را مستقیماً از حالت جامد به حالت گاز با انجماد زیر نقطه انجماد خود بدون ایجاد فاز مایع تصعید می‌کند. اما، به دلیل اثر رشد بلورهای یخ، به دست آوردن یک توده کامل اروژل چالش‌برانگیز است. خشک کردن فوق بحرانی از اصل ناپدید شدن مرزهای فاز مایع-گاز در وضعیت مایع فوق بحرانی استفاده می‌کند، به طوری که نیروی موئینگی بر اروژل تأثیر نمی‌گذارد. این روش می‌تواند اسکلت سه‌بعدی را بهتر حفظ کرده و اروژل را به صورت یکپارچه با ساختار شبکه‌ای خوب توسعه یافته تهیه کند، اما این تکنیک هزینه‌بر و خطرناک است. برخی تعاریف سخت‌گیرانه در نظر می‌گیرند که اروژل‌های جامدی که از طریق خشک کردن فوق بحرانی به دست می‌آیند، اروژل نامیده می‌شوند، در حالی که آن‌هایی که تحت شرایط غیر فوق بحرانی خشک می‌شوند، زیرروژل نامیده می‌شوند [۸].

اروژل‌های با دمای بالا، که بر اساس اجزای اصلی خود طبقه‌بندی می‌شوند، شامل انواع مبتنی بر سیلیس (SiO_2)، کربن، آلومینا (Al_2O_3)، پلی‌ایمید و زیرکونیا (ZrO_2) هستند. شکل ۱ نمای کلی جامعی از پنج دسته اروژل‌ها را ارائه می‌دهد و عناصر دوپینگ، مکانیزم‌های عایق حرارتی و دامنه وسیعی از کاربردهای عملی آن‌ها را به تفصیل شرح می‌دهد [۸].

هر نوع اروژل دارای خواص و مزایای کاربردی خاص خود است. اروژل‌های مبتنی بر سیلیس، که به دلیل هدایت حرارتی پایین ($W/(m\cdot K) > 0.1$)، پایداری شیمیایی و مقاومت حرارتی خود شناخته می‌شوند، در زمینه‌های عایق حرارتی بسیار کارآمد مانند عایق کاری ساختمان، پوشش لوله‌ها و سیستم‌های حفاظت حرارتی برای اکتشافات فضایی کاربرد دارند [۹]. به عنوان مثال، شرکت IBIH Advanced Material Co. Ltd. (Xuchang, Henan, China) مجموعه کاملی از راه‌حل‌های صرفه‌جویی در انرژی مبتنی بر فناوری اروژل را به صنعت ساخت و ساز ارائه می‌دهد تا مصرف انرژی را کاهش دهد و راحتی محیط زندگی را بهبود بخشد. اروژل‌های مبتنی بر سیلیس همچنین در حمل و نقل مایعات کریوژنیک پیشرفت‌های جدیدی را رقم می‌زنند

آسیب‌پذیری در برابر شکست و تغییراتی مانند جمع‌شدگی و تغییر شکل در حین پردازش مواجه هستند [۱۷]. برای بهبود ویژگی‌هایی مانند استحکام، سختی و مقاومت در برابر دماهای بالا، اجزای اضافی به پایه سیلیس اضافه می‌شوند تا ژل‌های پیشرفته با دمای بالا تولید شوند.

۳-۱-۲- اروژل‌های ترکیبی مبتنی بر سیلیس

در مقایسه با اروژل‌های خالص سیلیس، اروژل‌های ترکیبی مبتنی بر سیلیس که با عناصر و ترکیبات مختلف غنی شده‌اند، بهبودهای قابل توجهی در پایداری حرارتی و خواص مکانیکی نشان می‌دهند. تانگ و همکاران [۱۸] یک ترکیب اروژل SiO_2 را توسعه دادند و هدایت حرارتی آن در دماهای بین 300°C تا 1400°C از $0.27 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ تا $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ متغیر بود. شن و همکاران [۱۹] ترکیبات نانو SiO_2 در فشار محیطی توسعه دادند که چگالی آن $0.24 \text{ g}/\text{cm}^3$ و هدایت حرارتی آن در دمای 700°C برابر با $0.1334 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ بود. وانگ و همکاران [۲۰] اروژل‌های پلی‌متیل‌سیلوکسان را با مقادیر کمی از پلی‌ایمیدها تقویت کردند و به هدایت حرارتی $0.16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ دست یافتند. علاوه بر این، وانگ و همکاران [۲۱] یک اروژل نانوکامپوزیت لیگنین معدنی شده با سیلیس را معرفی کردند که می‌تواند شعله‌ها را تا 1200°C تحمل کند و هدایت حرارتی آن در شرایط رطوبت نسبی ۳۳-۹۴٪ برابر با $0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ بود. گائو و همکاران از تکنیک‌های سل-ژل و خشک کردن در فشار جوی برای تولید یک اروژل ترکیبی با سطح ویژه و حجم منافذ به ترتیب $179/5 \text{ m}^2/\text{g}$ و $1/295 \text{ cm}^3/\text{g}$ در دمای 1000°C استفاده کردند. همچنین، ژانگ و همکاران [۲۲] یک ترکیب سه‌گانه از الیاف مولیت/امولسیون/اروژل از طریق اشباع ایجاد کردند که منجر به تولید ماده‌ای با چگالی پایین $0.195 \text{ g}/\text{cm}^3$ و هدایت حرارتی $0.42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ شد. علاوه بر این، ژانگ و همکاران [۲۳] یک ژل جدید Y_2SiO_5 با هدایت حرارتی بین 0.29 تا $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ فرموله کردند. سو و همکاران [۲۴] یک اروژل سرامیکی TiCN/SiBCN با هدایت حرارتی $0.08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ معرفی کردند، در حالی که دینگ و همکاران [۲۵] اروژل‌های ترکیبی نانو الیاف سرامیکی-ذره‌ای را تهیه کردند که در شکل ۲ الف-ج نشان داده شده است.

۳-۱-۳- اروژل‌های ترکیبی نانو الیاف

اروژل‌های ترکیبی نانو الیاف، در مقایسه با اروژل‌های سنتی، خواص مکانیکی برتری و مقاومت دمایی استثنایی را نشان می‌دهند. وانگ و همکاران [۲۶] اروژل‌های نانو الیاف SiC/SiO_2 را سنتز

تولید اروژل‌ها استفاده می‌کند و جایگزینی پایدارتر از نظر محیط زیست را ارائه می‌دهد و در عین حال به چالش مواد خام پرهزینه و فرآیندهای تولید می‌پردازد. استفاده مجدد از مواد زاید می‌تواند به طور قابل توجهی ردپای زیست‌محیطی ما را کاهش دهد و از یک منبع عظیم از منابع بالقوه بهره‌برداری کند. این رویکرد اقتصاد دایره‌ای و آینده‌ای پایدارتر و دوستدار محیط زیست را ترویج می‌کند [۱۳].

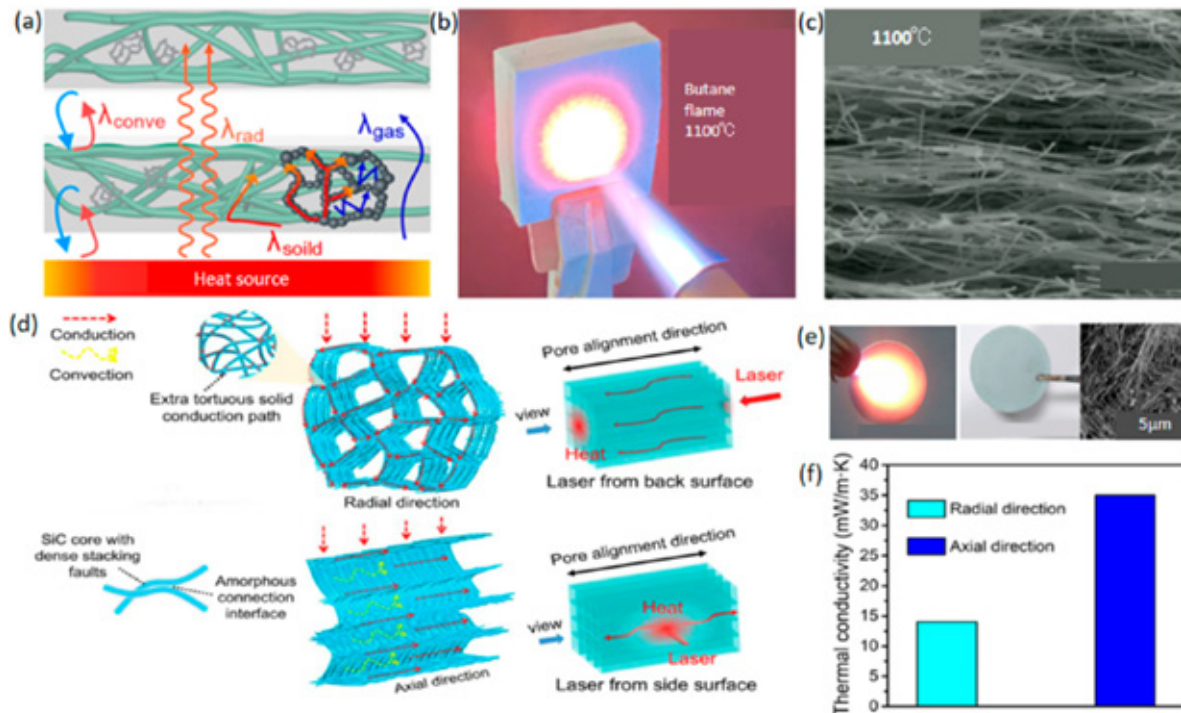
۳- طبقه‌بندی و ویژگی‌های مواد عایق حرارتی

۳-۱- اروژل‌های مبتنی بر سیلیس

اروژل‌های سیلیس، که به خاطر سبکی فوق‌العاده، تخلخل بالا و خواص عایق حرارتی برجسته خود شناخته می‌شوند، در سال‌های اخیر به عنوان یک نقطه کانونی در زمینه علم مواد ظهور کرده‌اند. در حال حاضر، اروژل‌های سیلیس می‌توانند دماهای تا 1500°C را تحمل کنند و هدایت حرارتی آن‌ها در دمای اتاق به $0.14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ می‌رسد. تهیه اروژل‌های مبتنی بر سیلیس معمولاً شامل استفاده از یک منبع سیلیکون به عنوان پیش‌ساز است. پیش‌سازهای رایج اروژل‌های سیلیس شامل تترااتوکسی‌سیلان (TEOS)، متیل‌تری‌متوکسی‌سیلان (MTMS)، متیل‌تری‌اتوکسی‌سیلان (MTES) و پلی‌متیل‌سیلوکسان هستند. با این حال، تنها تعداد کمی از اروژل‌های مبتنی بر سیلیس دارای مقاومت در برابر دماهای بالا هستند که عمدتاً اروژل‌های به دست آمده از ارگانوآلکسی‌سیلان‌ها هستند. به عنوان مثال، MTMS یا MTES در برابر دماهای بالا مقاوم نیستند.

۳-۱-۱- اروژل‌های سیلیس

اروژل‌های SiO_2 با تخلخل بالا، چگالی پایین و هدایت حرارتی پایین مشخص می‌شوند و آن‌ها را به کاندیداهای امیدوارکننده‌ای برای مواد فوق‌العاده عایق تبدیل می‌کند. این اروژل‌ها کمترین هدایت حرارتی را دارند و آن‌ها را برای دماهای تا 800°C مناسب می‌سازد [۱۴]. جیانگ و همکاران [۱۵] با استفاده از تغییر اندازه ذرات با استفاده از سل سیلیس، به یک پیشرفت نوآورانه دست یافتند و اروژل‌های سیلیس با هدایت حرارتی $0.223 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ سنتز کردند. با این حال، اروژل‌های سیلیس خالص محدود به استفاده کوتاه‌مدت در دماهای تا 1100°C هستند. برای کاهش بیشتر هدایت حرارتی به زیر $0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ وانگ و همکاران [۱۶] از یک اصلاح‌کننده سطح استفاده کردند تا اروژل‌های سیلیس خشک و آب‌گریز را در شرایط محیطی تولید کنند. با وجود هدایت حرارتی پایین آن‌ها، اروژل‌های سیلیس با چالش‌هایی مانند شکنندگی،



شکل ۲. (الف-ج) مکانیزم عایق حرارتی و مقاومت دما در اروژل کامپوزیت نانوفیبر-ذره سرامیکی [۲۵] (الف) تصویر شماتیک که عوامل مؤثر بر رسانایی حرارتی اروژل کامپوزیت نانوفیبر-ذره سرامیکی را نشان می‌دهد. (ب) اروژل کامپوزیت نانوفیبر-ذره سرامیکی که در معرض شعله مشعل بوتان قرار گرفته است بدون هیچ گونه تخریبی. (ج) تصاویر SEM مقطع عرضی از اروژل کامپوزیت نانوفیبر-ذره سرامیکی که در دماهای بالا تا ۱۱۰۰ °C سینتر شده است. (د) تصویر شماتیک که مکانیزم دستیابی به عایق حرارتی فوق‌العاده را نشان می‌دهد. (ه) عکس و تصویر SEM از اروژل پس از قرار گرفتن در معرض مشعل بوتان به مدت ۳۰ دقیقه. (و) رسانایی حرارتی اروژل نانوالی SiC/SiO₂ در جهت محوری و شعاعی [۲۶]

Figure 2. (a-c) Heat insulation mechanism and temperature resistance of ceramic nanofiber-particle composite aerogel [25] (a) Schematic illustration depicting factors contributing to the thermal conductivity of the ceramic nanofiber-particle composite aerogel. (b) Ceramic nanofiber-particle composite aerogel exposed to a butane blowtorch flame without any destruction. (c) Cross-sectional SEM images of the ceramic nanofiber-particle composite aerogel sintered at high temperatures up to 1100 °C. (d) Schematic illustration demonstrating the mechanism for achieving thermal superinsulation. (e) The photograph and SEM image of the aerogel after being treated by the butane blowtorch for 30 min. (f) Thermal conductivities of the SiC/SiO₂ nanowire aerogel in axial and radial directions [26].

[۲۸] یک اروژل نانو الیاف SiC/SiO₂ چندمنظوره با ساختار سه‌بعدی متخلخل و پیوندی تولید کردند که به هدایت حرارتی ۰/۰۲۷ W/(m·K) دست یافت. ژو و همکاران [۲۹] یک اروژل ترکیبی از نانو الیاف سلولز سیلانیزه و نانو ورق‌های نیتريد بور هیدروکسیله (Si/CNF/BNNS) تولید کردند که به ترتیب دارای هدایت حرارتی محوری و شعاعی ۰/۰۶۲۱ W/(m·K) و ۰/۰۳۳۹ W/(m·K) بودند. ژانگ و همکاران [۳۰] همچنین کامپوزیت‌های اروژل SiO₂ تقویت‌شده با الیاف شیشه (GF) را توسعه دادند که دارای هدایت حرارتی ۰/۰۲۴۸ W/(m·K) بودند. آرنو ریگاکي و همکاران [۳۱] یک اروژل ترکیبی از الیاف سلولز کوتاه و سیلیس توسعه دادند که نسخه خشک‌شده فوق بحرانی (SC-dried) آن دارای هدایت حرارتی ۰/۰۱۵ W/(m·K) و نسخه خشک‌شده در شرایط محیطی آن

از میکروکریستال‌ها با استفاده از ریخت‌گری انجام‌داری جهت‌دار و سپس عملیات حرارتی موتاژ شده‌اند. اروژل‌های نانو الیاف SiC/SiO₂ دارای هدایت حرارتی تقریباً ۰/۰۱۴ W/(m·K) هستند و در دمای ۱۲۰۰ °C پایدار می‌مانند، همان‌طور که در شکل ۲ د-و [۲۷] نشان داده شده است. ادغام ساختارهای منافذ و اجزای نانو الیاف مسیرهای زیکزاک اضافی زیادی را برای هدایت جامد در مقطع ایجاد می‌کند که به طور مؤثری کارایی انتقال حرارت شعاعی را کاهش می‌دهد. این هدایت حرارتی غیرایزوتروپیک با رفتارهای متفاوت انتقال حرارت در دو جهت اصلی مشهود است، به طوری که جهت شعاعی قابلیت‌های عایق‌بندی برتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، وانگ و همکاران [۲۷] مواد SiC/NWA ۵ mg/cm³ و چگالی ۵ و هدایت حرارتی ۰/۰۲۶ W/(m·K) توسعه دادند. به طور مشابه، ژانگ و همکاران

دمای مرکز در سمت جلویی نمونه به سرعت به حدود 1000°C افزایش یافت، اما دمای سمت پشتی تنها $92/9^{\circ}\text{C}$ پس از ۵ دقیقه افزایش یافت (شکل ۳ الف).

در طول فرآیند گرم کردن، نمونه‌ها غیرقابل احتراق و دارای ثبات ابعادی عالی هستند و هیچ تغییر اندازه و شکلی واضحی نشان نمی‌دهند. گائو و همکاران [۳۶] یک روش پلیمریزاسیون با فشار بالا را همراه با خشک کردن در فشار محیطی گزارش کردند که منجر به تولید کامپوزیت‌های کربن/کربن (C/C) با مقاومت استثنایی در برابر شعله اکسی استیلن شد. فنگ و همکاران [۳۷] یک استراتژی پوشش لایه کربنی (CLE) را برای طراحی اروژل‌های چندمنظوره پیشنهاد کردند که منجر به ایجاد یک ساختار هم‌افزای دوگانه هسته-پوسته $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ منحصر به فرد با هدایت حرارتی چشمگیر شد.

۳-۲-۲- اروژل‌های الیاف کربنی

الیاف مبتنی بر کربن دارای استحکام بالا، چگالی پایین و ثبات حرارتی عالی هستند. با این حال، در دماهای بالا، تجمع ذرات و فروپاشی منافذ ممکن است مقاومت در برابر اکسیداسیون اروژل‌های سرامیکی را تحت تأثیر قرار دهد. لی و همکاران [۳۸] نانوذرات دی‌سیلیکات را از طریق نفوذ پیش‌ساز و پیرولیز (IP) و فناوری الکترواسپینینگ به نانو الیاف معرفی کردند که منجر به تولید اروژل تقویت شده با الیاف SiCBN/SiC/IP شبیه به مرجان انگشتی با خواص مکانیکی بهبود یافته شد. از طریق آزمایش عایق کاری با تفنگ اسپری بوتان، آن‌ها کشف کردند که دما در پشت SiBCN/SiC/IP به تدریج افزایش یافته و پس از ۱۰ دقیقه در دمای نسبتاً ثابتی 75°C باقی ماند و هدایت حرارتی آن به آرامی با افزایش دما در آزمایش افزایش یافت (شکل ۳ ب)؛ هدایت حرارتی در 1600°C تنها $0/036 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ است. ژانگ و همکاران [۴۰] یک پوشش اروژل سرامیکی بر روی سطوح الیاف مبتنی بر کربن با استفاده از نفوذ و سرامیک‌های مشتق شده از پلیمرها ساختند و به یک اروژل الیاف کربنی با یک رابط با مقاومت حرارتی بالا (CE/SiCF/Mo) و عملکرد عایق حرارتی استثنایی در دماهای بالا دست یافتند. در نتیجه، هدایت حرارتی کامپوزیت تنها $0/025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ است. به طور قابل توجهی، اروژل در معرض شعله بوتان در دمای 1300°C به مدت ۵ دقیقه دمای پشتی بسیار پایینی معادل $69/1^{\circ}\text{C}$ را نشان داد و عملکرد عایق حرارتی عالی در دماهای بالا را به نمایش گذاشت. ژانگ و همکاران [۴۱] کامپوزیت‌های اروژل کربنی با الیاف کربن کوتاه و کامپوزیت

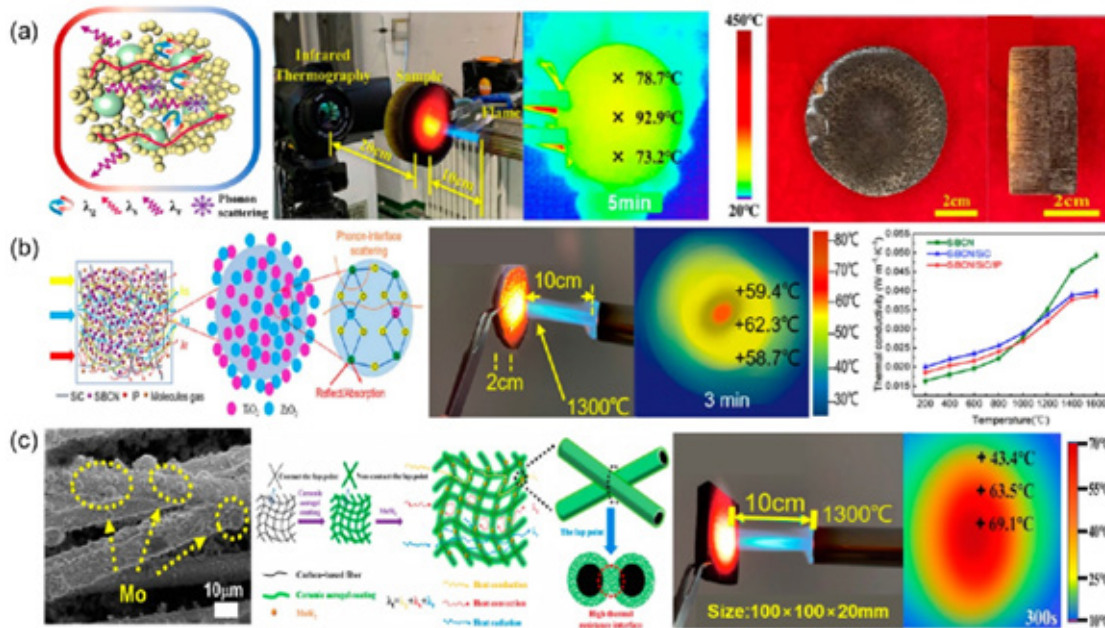
$0/017 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ بود. یانگ و همکاران [۳۲] یک ماده ترکیبی نانو الیاف با هدایت حرارتی $0/0251 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ معرفی کردند. علاوه بر این، یانگ و همکاران [۳۳] یک فیلم نانو الیاف ترکیبی اروژل SiO_2 انعطاف‌پذیر با ساختار دانه‌ای و شبیه توت‌فرنگی از طریق فناوری الکتروریسی تولید کردند که به هدایت حرارتی $0/0303 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ و سطحی به مساحت $240 \text{ m}^2/\text{g}$ دست یافتند.

۳-۲-۱- اروژل‌های مبتنی بر کربن

اروژل‌های مبتنی بر کربن، به دلیل وزن سبک و مقاومت حرارتی بالای خود، مواد ایده‌آلی برای حفاظت حرارتی وسایل نقلیه فضایی هستند. در حال حاضر، اروژل‌های کربنی عمدتاً از نانو لوله‌های کربنی، گرافن، رزکینول و سایر مواد خام ساخته می‌شوند. پیش‌سازهای رایج اروژل‌های کربنی شامل نانو مواد کربنی، مواد پلیمری آلی و مواد زیست‌توده‌ای هستند. با این حال، شکنندگی و استحکام مکانیکی پایین آن‌ها در حال حاضر مانع از کاربرد گسترده آن‌ها می‌شود. برای حل این چالش‌ها، تاکتیک‌های مختلفی پیشنهاد شده است، از جمله تغییر عناصر دوپینگ، استفاده از کامپوزیت‌های الیافی و غیره.

۳-۲-۱- اروژل‌های مبتنی بر کربن با عناصر دوپینگ

به طور معمول، دستیابی به استحکام مکانیکی بالا در اروژل‌های کربنی شامل افزایش چگالی توده‌ای یا تقویت آن‌ها با الیاف است. در حالی که افزایش چگالی توده‌ای به بهبود استحکام مکانیکی کمک می‌کند، اما بر سفتی ذاتی آن‌ها تأثیری ندارد. با این حال، تقویت اروژل‌های کربنی با الیاف می‌تواند خواص الاستیک آن‌ها را افزایش دهد. هر دو رویکرد چگالی اروژل‌های کربنی را افزایش می‌دهند که معمولاً با افزایش هدایت حرارتی همراه است و بنابراین تعادل بین محدودیت‌های حرارتی و مکانیکی را برقرار می‌کند. فنگ و همکاران [۳۴] کامپوزیت‌های اروژل کربنی (C/CA) را چندین بار در یک محلول پیش‌ساز سیلیکون کربن اکسید (SiCO) نفوذ کردند که منجر به تولید کامپوزیت‌های اروژل کربنی ضد اکسیداسیون با پوشش داخلی سرامیکی SiCO (C/CA/SiCO) با ثبات حرارتی قابل توجه شد. کاهش وزن برای کامپوزیت‌های تهیه شده پس از گرم کردن در دمای 1600°C به مدت ۶۰ دقیقه در هوا تنها 7.6% بود و انقباض در صفحه کمتر از 2% بود. ژانگ و همکاران [۳۵] از یک روش ساختاری چند مرحله‌ای قوی برای تولید یک نانو کامپوزیت جدید اروژل سیلیکون کربن اکسید-فونولیک تقویت شده با الیاف کربنی سوزنی (SiCF/PR) استفاده کردند که هدایت حرارتی فوق‌العاده‌ای



شکل ۳. نمودار مکانیزم مقاومت در برابر آتش و عایق حرارتی اروژل‌های مبتنی بر کربن: (الف) نمودار شماتیک که مکانیزم عایق حرارتی SiCF/PR را نشان می‌دهد. تنظیم آزمایش احتراق مشعل بوتان و تصاویر ترموگرافی از سمت پشتی نمونه‌ای به ضخامت ۳ سانتی‌متر پس از ۵ دقیقه. نمای جلو و جانبی آزمایش احتراق [۳۵] (ب) نمودار شماتیک که مکانیزم عایق حرارتی SiBCN/SiC/IP را نشان می‌دهد [۳۸]. (ج) تصویر شماتیک از مکانیزم عایق حرارتی و عکس اپتیکی از آزمایش ابلش با تفنگ اسپری بوتان [۳۹].

Figure 3. Fire Resistance and Thermal Insulation Mechanism Diagram of Carbon-Based Aerogel:(a) Schematic diagram illustrating the thermal insulation mechanism of SiCF/PR. Setup of the butane torch combustion test and thermographic pictures of the backside for a 3 cm thick sample after 5 min. Front and side views of the combustion test [39] (b) Schematic diagram illustrating the thermal insulation mechanism of SiBCN/SiC/IP [38] (c) Schematic illustration of the thermal insulation mechanism and optical photograph of the butane spray gun ablation test [39].

را بیشتر کاهش می‌دهند. ژئیه و همکاران [۴۲] اروژل‌های گرافنی با هدایت حرارتی فوق‌العاده پایین $0.0047 - 0.0059 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ تهیه کردند که خواص عایق حرارتی برتری را نشان می‌دهد. ژانگ و همکاران [۴۳] اروژل‌های گرافنی با خواص مکانیکی و هدایت حرارتی بهبود یافته از طریق کاهش هیدروترمال و خشک کردن اتانول فوق بحرانی تهیه کردند که آن‌ها را به نامزدهای امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای مختلف از باتری‌ها تا حسگرهای فشار، الکترودها، هادی‌های سبک و مواد عایق تبدیل می‌کند.

۳-۳-۳ اروژل‌های مبتنی بر آلومینا

اروژل‌های مبتنی بر آلومینا عمدتاً از آلومینیوم سک-بوتوکسید، آلومینیوم استیل‌استونات، آب و اتانول به عنوان مواد خام تشکیل شده‌اند و اروژل‌ها از طریق خشک کردن فوق بحرانی به دست می‌آیند. با وجود اینکه ثبات حرارتی خوبی را نشان می‌دهند، اروژل‌های مبتنی بر آلومینا در دماهای بالا دچار یک سری تغییرات فازی می‌شوند که منجر به انقباض حجم و آسیب به ساختار نانو

عایق حرارتی و حفاظت حرارتی یکپارچه سبک منحصر به فرد (QCF/SPA) را به ترتیب با استفاده از استراتژی‌های ساخت نوآورانه توسعه دادند. اروژل کامپوزیت قادر است ساختار منافذ عالی خود را حتی در دماهای بالای 2500°C فقط کند و هدایت حرارتی بسیار پایینی معادل $0.05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ داشته باشد.

۳-۲-۳ اروژل‌های گرافنی

در سال‌های اخیر، مواد نانو ساختاری کربنی نوآورانه مختلفی سنتز و به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند تا نیازهای کاربردهای جدید را برآورده کنند. اروژل‌های گرافنی سه‌بعدی (GA) انعطاف‌پذیری، استحکام مکانیکی بالا، وزن سبک، تخلخل بالا و دوام عالی را نشان می‌دهند. در حالی که اروژل‌های گرافنی تک‌لایه دارای هدایت حرارتی مثبت هستند، ساختار نانو-پور، چگالی پایین و کدری کامل اروژل‌های گرافنی، هدایت حرارتی گازی، جامد و تابشی را سرکوب می‌کند. علاوه بر این، نقص‌ها در گرافن و اندازه‌های نسبتاً کوچک ورق‌های گرافنی، هدایت حرارتی

پس از گرم کردن در دمای 1200°C به مدت ۱۲۰ ثانیه، دمای سمت سرد نمونه در شکل ۴ h حدود 50°C بود که نشان دهنده مقاومت دمای بالای آن است. گائو و همکاران [۵۱] اروژل‌های نانو الیاف سرامیکی با ساختار چند قوس لایه‌ای برای استفاده در محیط‌های دمای بالا طراحی کردند. روش‌های نوآورانه‌ای برای تهیه اروژل‌های آلومینا-سیلیکا پیشنهاد شده است. فنگ و همکاران [۵۱] یک استراتژی جدید از نفوذ-ژل و خشک کردن فوق بحرانی را معرفی کردند، همراه با یک روش خشک کردن فوق بحرانی پس از درمان هیدروترمال. شن و همکاران [۴] کامپوزیت‌های سه‌گانه اروژل مبتنی بر TiO_2 /الیاف/آلومینا را با استفاده از روش سل-ژل، روش نفوذ و روش خشک کردن عایق حرارتی سنتز کردند. علاوه بر این، روش‌های سنتی سل-ژل [۶۲] برای تولید اروژل‌هایی با هدایت حرارتی پایین و استحکام بالا پس از کلسینه شدن به کار رفته است. با این حال، اروژل‌های آلومینا-سیلیکا عملکرد برتری در دماهای بالا نشان داده‌اند، با مقاومت دمای بالا که با تنظیم نسبت مولی کامپوزیت اروژل آلومینا-سیلیکا قابل دستیابی است. علاوه بر این، آلومینا و اکسید سیلیکون می‌توانند مولیت را تشکیل دهند که نقطه ذوب آن تا 1800°C است و معمولاً در مواد نسوز و پوشش‌های کوره‌های دما بالا استفاده می‌شود. شن و همکاران [۵۲] اروژل‌های آلومینا تقویت شده با الیاف مولیت بدون کلاتور را توسعه دادند که پس از درمان در دمای 1300°C خواص مکانیکی قابل توجهی را نشان می‌دهند.

اروژل‌های $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ که با شیشه آب و کلرید آلومینیوم به عنوان مواد خام تهیه شده‌اند در طول درمان حرارتی کریستال‌های مولیت تولید کردند که ثبات حرارتی بالایی را افزایش می‌دهد. محلول هیدروکسید آلومینیوم پر شده با الیاف مولیت، اروژل‌های کامپوزیت الیاف مولیت/اکسید آلومینیوم را تولید کرد و نانو الیاف سیلیکات آلومینیوم که به اروژل‌های $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ادغام شده‌اند عملکرد را بیشتر بهبود بخشیدند [۵۳].

۳-۴- اروژل‌های مبتنی بر زیرکونیا

اروژل‌های زیرکونیا، با ثبات بالا و مقاومت دمایی فوق‌العاده، در خط مقدم تحقیقات نسل بعدی مواد با عملکرد بالا قرار دارند. در حال حاضر، اروژل‌های زیرکونیا دارای حداکثر مقاومت دمایی 1300°C و رسانایی حرارتی $0.104\text{ W/m}\cdot\text{K}$ هستند. اروژل زیرکونیا، که به‌عنوان یک ماده پیشرفته به دلیل خواص منحصر به فرد و کاربردهای گسترده‌اش شناخته می‌شود، در سال‌های اخیر توجه قابل توجهی از سوی محققان علمی و بخش‌های صنعتی جلب کرده است. لی و همکاران [۵۴] اروژل‌های نانوفیبر سرامیکی

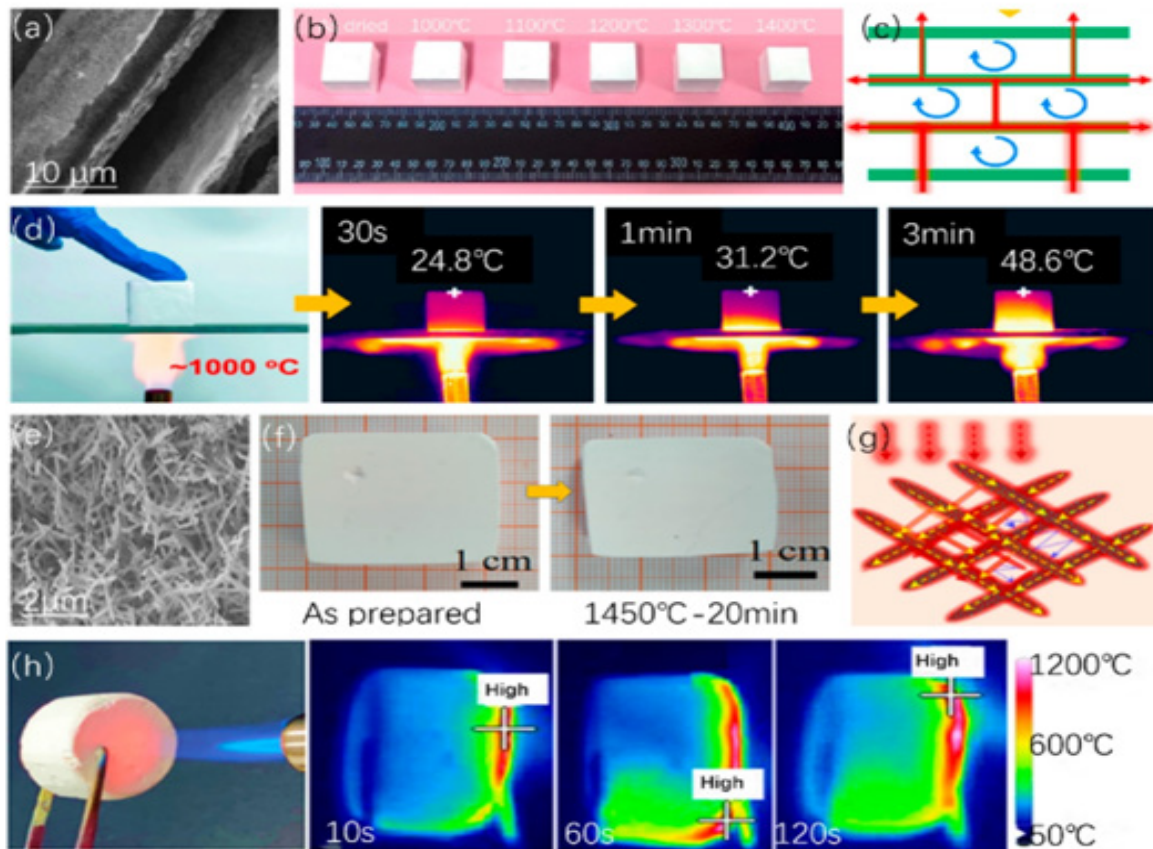
متخلخل آن‌ها می‌شود. برای حل این مشکل، تلاش‌های کنونی بر بهبود میکروساختار، عناصر دوپینگ و افزودن عوامل مسدودکننده نور متمرکز شده است. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در تحقیق درباره اروژل‌های مبتنی بر آلومینا حاصل شده است. این اروژل‌ها دارای هدایت حرارتی پایین هستند و می‌توانند ساختار نانو-پور خود را در دماهای تا 1000°C حفظ کنند که آن‌ها را برای کاربردها در صنایع فضایی و کوره‌های صنعتی مناسب می‌سازد.

۳-۳-۱- اروژل‌های آلومینا

اروژل آلومینا که با ساختار نانو متخلخل خود با سطح ویژه بالا، چگالی پایین و هدایت حرارتی پایین مشخص می‌شود، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. فنگ و همکاران [۴۴] اروژل‌های آلومینا با سطح ویژه $95\text{ m}^2/\text{g}$ را از طریق درمان هیدروترمال و خشک کردن فوق بحرانی به دست آوردند، در حالی که شن و همکاران [۴۵] اروژل‌های آلومینا با سطح ویژه $154\text{ m}^2/\text{g}$ را با استفاده از هیدروژل‌های استون-آنیلین سنتز کردند. روش‌های مختلفی برای تهیه و کنترل عملکرد اروژل‌های آلومینا معرفی شده است. به عنوان مثال، فنگ و همکاران [۴۶] از درمان هیدروترمال مستقیم و خشک کردن فوق بحرانی برای تنظیم بلورینگی کلوتید بوهیمیت استفاده کردند که منجر به تولید اروژل‌های آلومینا با مقاومت حرارتی و بلورینگی خوب شد. شن و همکاران [۴۷] مونومرهای اروژل آلومینا با سطح بالا را بدون عوامل کمپلکس‌کننده تهیه کردند و از روش سل-ژل به همراه فناوری خشک کردن فوق بحرانی اتانول استفاده کردند که منجر به تولید اروژل‌های آلومینا با سطح ویژه $690\text{ m}^2/\text{g}$ شد.

۳-۳-۲- اروژل‌های آلومینا-سیلیکا

اروژل‌های آلومینا-سیلیکا ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) در طراحی ساختاری پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند. فنگ و همکاران [۴۸] اروژل‌های سرامیکی نانوپور دوگانه‌ای را توسعه دادند که در برابر دماهای تا 1000°C مقاوم هستند. شکل ۴ الف-د نشان می‌دهد که دمای سمت سرد نمونه پس از گرم کردن در دمای 1000°C به مدت ۱۸۰ ثانیه 45.6°C بود. چن و همکاران [۴۹] از محلول سیلیکا به عنوان یک چسب دمای بالا برای تولید اروژل‌های آلومینا با مقاومت دمای بالا و انقباض خطی کم استفاده کردند. ژانگ و همکاران [۵۰] یک اروژل نانو میله‌ای آلومینا با مقاومت دمای بالا (شکل ۴ ه-ز) با ساختار خود پشتیبان و پیوند قوی Si-O-Al تولید کردند که حتی در دمای 1200°C عملکرد استثنایی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقاومت در برابر آتش اروژل‌های آلومینیوم-سیلیکا به شکل ورق و میله. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اروژل‌های ورقی. (ب) انقباض حرارتی نمونه در دماهای مختلف. (ج) مکانیزم عایق حرارتی. (د) تصویربرداری حرارتی از دستگاه آزمایش احتراق و نمونه [۴۸]. (ه) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اروژل به شکل میله. (و) انقباض حرارتی نمونه پس از گرم شدن به مدت ۲۰ دقیقه. (ز) مکانیزم عایق حرارتی اروژل CE/SiCF/Mo به شکل میله. (ح) تصویربرداری حرارتی از دستگاه آزمایش احتراق و نمونه‌ها [۵۰].

Figure 4. Fire resistance of sheet and rod-shaped aluminum-silica aerogels. (a) Scanning electron microscope image of sheet aerogels. (b) Thermal shrinkage of the sample at different temperatures. (c) Thermal insulation mechanism. (d) Thermal imaging of the combustion experimental device and sample [48] (e) Scanning electron microscope image of rod-shaped aerogel. (f) Thermal shrinkage of the sample after heating for 20 min. (g) The thermal insulation mechanism of rod-shaped CE/SiCF/Mo aerogel. (h) Thermal imaging of the combustion experimental device and samples [50].

منجر به تغییرات در جرم، عدم تعادل بار و ارتعاشات پیوند شیمیایی می‌شود که در نهایت به کاهش رسانایی حرارتی منجر می‌شود. علاوه بر این، لیو و همکاران [۵۵] یک اروژل ZrC/C سنتز کردند که هدایت حرارتی آن بین $0.1064 - 0.1096 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ تغییر است. همچنین، ژانگ و همکاران [۵۶] با موفقیت اروژل‌های زیرکونی را تولید کردند که قادر به حفظ ساختار نانومتخلخل خود حتی در دمای 1000°C بودند و دارای چگالی 1.136 g/cm^3 و 0.74 و سطح ویژه $650 \text{ m}^2/\text{g}$ بودند. از طریق ادغام عناصر سیلیکون و طراحی‌های نوآورانه، مقاومت دمایی مواد بیشتر تقویت شده است. لی و همکاران [۱۴] یک ماتریس الیاف زیرکونیوم سه‌بعدی (3D) طراحی کردند و یک اروژل نانو الیاف زیرکونیوم زیر بلوری با ساختار دنداندار توسعه دادند که هدایت حرارتی

را توسعه دادند که شامل کربن آمورف درون نانوفیبرهای زیرکونیوم تثبیت شده با ایتیریم هستند و به رسانایی حرارتی قابل توجهی برابر با $0.095 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ در دمای 1000°C درجه سانتی‌گراد دست یافتند. در همین حال، یک اروژل سرامیکی زیرکونات نادر زمین با آنتروپی بالا $(\text{Sm}_{0.2}\text{EuTbDyLu})_2\text{ZrO}_7$ را معرفی کردند که پس از عملیات حرارتی در 900°C ، رسانایی حرارتی قابل توجهی برابر با $0.31 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، زیرکونیوم در شبکه بلوری در کنار پنج عنصر نادر زمین (ساماریوم، اروپیوم، ترابیوم، دیسپروسیوم و لوتیتیوم) قرار دارد و یک ساختار فلوریت معیوب را تشکیل می‌دهد که با آرایش کاتیون نامنظم و خلاءهای اکسیژن مشخص می‌شود. این پیچیدگی ساختاری، پیچیدگی شبکه و بی‌نظمی ترکیبی را افزایش می‌دهد و

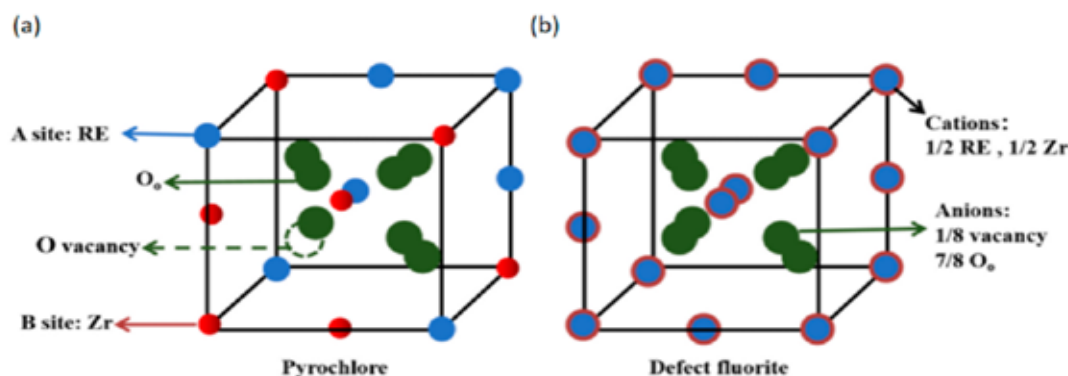
ساختار مولکولی منحصر به فرد خود، پلی‌ایمیدها در حل شدن در بسیاری از حلال‌های آلی برای ساخت اروژل چالش‌هایی را به وجود می‌آورند. یک رویکرد قابل قبول شامل معرفی واحدهای هیدروفیلیک از طریق طراحی ساختاری برای امکان‌پذیر کردن حل شدن پلی‌ایمید یا تهیه اروژل‌های پلی‌ایمید از طریق ایمیدزاسیون با شروع از اسید پلی‌آمیک است. با این حال، روش اول هزینه‌بر و دشوار برای مقیاس‌پذیری در تولید انبوه است. خشک کردن CO_2 فوق بحرانی به عنوان روش اصلی برای ساخت اروژل‌ها شناخته می‌شود. با این حال، هزینه‌های بالای عملیاتی CO_2 فوق بحرانی و محدودیت‌های ساختار منافذ یکنواخت، کاربرد گسترده آن‌ها را محدود می‌کند. در مقابل، خشک کردن انجمادی در خلاء به عنوان یک روش جایگزین امیدوارکننده به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و سازگاری با محیط زیست ظهور کرده است. زو و همکاران [۶۱] اروژل‌های کامپوزیت پلی‌ایمید/نانو لوله کربنی چند دیواره‌ای با عملکرد کربوکسیل (PI/MWCNTs/COOH) را با ساختار کانال شکاف‌مانند هم‌راستا از طریق خشک کردن انجمادی یک‌طرفه سنتز کردند. ادغام نانو لوله‌های کربنی استحکام زنجیره‌های مولکولی پلی‌ایمید را افزایش می‌دهد، سیالیت آن را کاهش می‌دهد و بازه زغال را در دمای 800°C به $56/1\% \text{wt}$ افزایش می‌دهد. ژائو و همکاران [۶۲] یک سری اروژل‌های پلی‌ایمید آیزوتروپیک تمام آروماتیک ((p-phenylenediamine)) را که با خشک کردن تصادفی تهیه شده بودند، گزارش کردند که هدایت حرارتی $(0.0559 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$ را نشان می‌دهد. این مطالعه همچنین تأیید کرد که خشک کردن انجمادی یک‌طرفه برای تهیه اروژل‌ها منجر به هدایت حرارتی به طور قابل توجهی پایین‌تر در جهت شعاعی نسبت به جهت محوری می‌شود، در حالی که خشک کردن تصادفی تقریباً هدایت حرارتی یکسانی در هر دو جهت تولید می‌کند.

قابل توجهی معادل $0.104 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ در دماهای عملیاتی 1000°C را به دست آورد و برای استفاده تا 1300°C طراحی شده است. به طور مشابه، دینگ و همکاران [۵۷] نانو الیاف $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ انعطاف‌پذیر را به یک ساختار لانه زنبوری لایه‌ای و پفکی تبدیل کردند که منجر به هدایت حرارتی اروژل $0.268 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ شد. علاوه بر این، اروژل $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ اصلاح شده با دی‌متیل‌دی‌اتوکسی‌سیلان که توسط وو و همکاران [۵۸] تهیه شده بود، هدایت حرارتی را به $0.2332 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ کاهش داد.

همچنین، دوپینگ اروژل‌های زیرکونیوم با آلومینیوم نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشته است. دینگ و همکاران [۵۹] یک اروژل نانو الیاف سرامیکی چند قوسی لایه‌ای را معرفی کردند که در آن اروژل نانو الیاف $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ مقاومت دمای بالایی تا 1300°C و هدایت حرارتی $0.322 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ را نشان داد. در همین حال، وو و همکاران [۶۰] از مواد فیلتر هوای تمام سرامیکی تاشو برای حذف ذرات از گازهای خروجی دمای بالا استفاده کردند که کاغذ فیلتر هوای الیاف زیرمیکرونی ZrO_2 تثبیت شده با Al_2O_3 (ASZ) انعطاف‌پذیری و ثبات حرارتی در دمای 1100°C را نشان داد. ویژگی بارز مواد ژل گرمازا مبتنی بر زیرکونیا در مؤلفه اصلی آن، زیرکونیوم، نهفته است که به خاطر خواص حرارتی استثنایی، مقاومت دمای بالا و ثبات شیمیایی خود شناخته شده است. این ویژگی‌ها دامنه وسیعی از کاربردها را برای ژل‌های گرمازا مبتنی بر زیرکونیوم در زمینه‌های مختلف فراهم می‌آورد.

۳-۵- اروژل‌های پلی‌ایمید

اروژل‌های پلی‌ایمید مواد سه‌بعدی متخلخل هستند که از زنجیره‌های مولکولی پلیمری متقاطع تشکیل شده‌اند و خواص عالی پلی‌ایمیدها و اروژل‌ها را ترکیب می‌کنند. این اروژل‌ها دارای چگالی فوق‌العاده پایین و هدایت حرارتی پایینی هستند. به دلیل



شکل ۵. نمودارهای ساختار (الف) پیروکلور و (ب) فلوریت معیوب [۵۴].

Figure 5. Pyrochlore (a) and defect fluorite (b) structure diagrams [54].

۴- نمونه موردی

در یک کار، عایق‌های مورد بررسی الیاف بازالت برند URSA و اروژل برند Aspen Aerogels بودند. طبق ویژگی‌های فنی اعلام شده، هر دو ماده می‌توانند به عنوان عایق حرارتی دما بالا برای تأسیسات صنعتی فناوری استفاده شوند. مطالعات تجربی با استفاده از نمونه‌ها بر روی یک دودکش با قطر ۱۵۰ میلی‌متر از کوره (شکل ۶) انجام شد، که در آن گاز طبیعی سوزانده می‌شد. تنظیم عملیاتی گاز طبیعی و جریان هوا این امکان را داد که دو رژیم پایدار از آزمایش با دماهای گاز دود در پایه دودکش به ترتیب ۳۰۰ و ۶۰۰ °C تعیین شود [۶۳].

شکل ۷ تصویر حرارتی از یک دودکش عایق نشده در رژیم دمای پایدار ۳۰۰ °C را نشان می‌دهد. شکل ۸ و ۹ نمونه‌هایی از تصاویر حرارتی سطوح عایق حرارتی را در شرایط دمای پایدار ۳۰۰ و ۶۰۰ °C به ترتیب نشان می‌دهند. یک سری اندازه‌گیری دما بر روی سطح مواد عایق انجام شد. مقادیر دما می‌توانند در نقاط مختلف سطح به شدت متفاوت باشند. این ممکن است به دلیل گرمایش نامنظم سطح لوله و جریان‌های هوای همرفتی نزدیک به عایق باشد. نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. جدول ۱ نشان می‌دهد که دمای متوسط بر روی سطح اروژل بیشتر از دمای متوسط بر روی سطح الیاف بازالت در دمای لوله ۳۰۰ °C است. در این حالت، دمای متوسط بر روی سطح اروژل کمتر از دمای متوسط بر روی سطح الیاف بازالت در دمای لوله ۶۰۰ °C است. این ممکن است به دلیل انتخاب نادرست ضخامت ماده عایق استفاده شده باشد [۶۳].

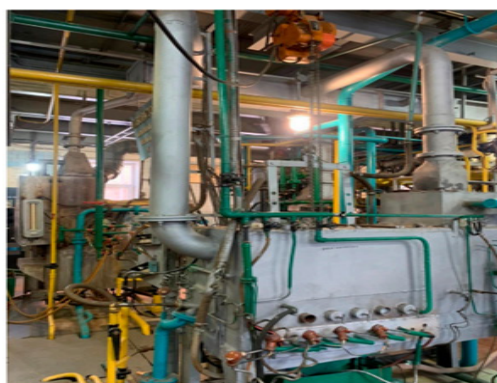
ضخامت‌های عایق حرارتی برای رژیم‌های مربوطه به صورت برابر استفاده شدند: ۲۰ و ۶۰ میلی‌متر برای اروژل (راهنمای عملی برای مواد Aspen Aerogel Pyrogel XT) و ۱۵۰ و ۲۲۵ میلی‌متر برای الیاف بازالت (SP ۴۱-۱۰۳-۲۰۰۰). شکل ۱۰ الف

نمودارهای ضخامت مواد عایق در مقابل دما را برای یک لوله با قطر ۱۵۰ میلی‌متر طبق اسناد انتخاب شده نشان می‌دهد؛ شکل ۱۰ ب هدایت حرارتی یک ماده را به عنوان تابعی از دما نشان می‌دهد. شکل ۵ نشان می‌دهد که در دماهای بالا، حداقل ضخامت عایق توصیه شده تقریباً به صورت خطی تغییر می‌کند. علاوه بر این، قانون تغییر خطی دارای وابستگی هدایت حرارتی الیاف بازالت به دما است. در این مورد، تغییر در هدایت حرارتی برای اروژل در دماهای بالا اساساً غیرخطی است [۶۳].

بر اساس نتایج مطالعات موردی، اروژل در تمام ویژگی‌های ترموفیزیکی و عملیاتی کلیدی از الیاف بازالت پیشی می‌گیرد. بنابراین، تنها مانع برای تولید و استفاده گسترده صنعتی اروژل در بخش عایق حرارتی با دمای بالا، ارزش بازار آن است که معمولاً چندین برابر قیمت الیاف بازالت در حجم معادل ماده است. با در نظر گرفتن این ویژگی‌ها هنگام انتخاب عایق حرارتی که در دماهای ۳۰۰-۶۰۰ °C کار می‌کند، به شرکت‌های صنعتی این امکان را می‌دهد که مواد عایق حرارتی با ویژگی‌های بهینه حرارتی، عملیاتی و اقتصادی را انتخاب کنند. روش‌شناسی و الگوریتم ارائه شده برای تعیین حداقل ضخامت ماده عایق بسته به دمای سطح مورد نظر می‌تواند در عمل مفید باشد [۶۳].

۵- خلاصه و چشم‌اندازها

به طور کلی، اروژل‌های اکسید فلزی تک‌جزئی معمولاً مقاومت حرارتی ضعیفی دارند. در حال حاضر، اروژل‌های مبتنی بر سیلیکا دارای مقاومت حرارتی استثنایی تا ۱۵۰۰ °C هستند و هدایت حرارتی بسیار پایینی معادل $0.14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ در دمای ۱۲۰۰ °C دارند. به طور خاص، اروژل‌های کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ که ساختار مولیت را نشان می‌دهند، پایداری حرارتی بهبودیافته‌ای دارند و می‌توانند دماهای تا ۱۴۰۰ °C را تحمل کنند. در مقابل،



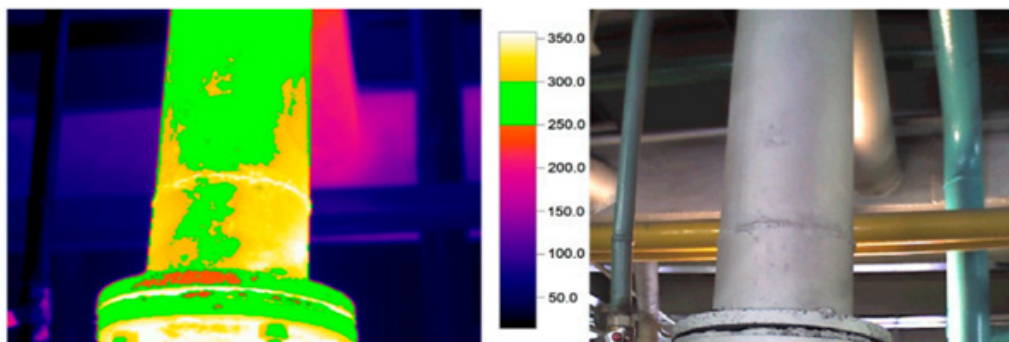
(a)



(b)

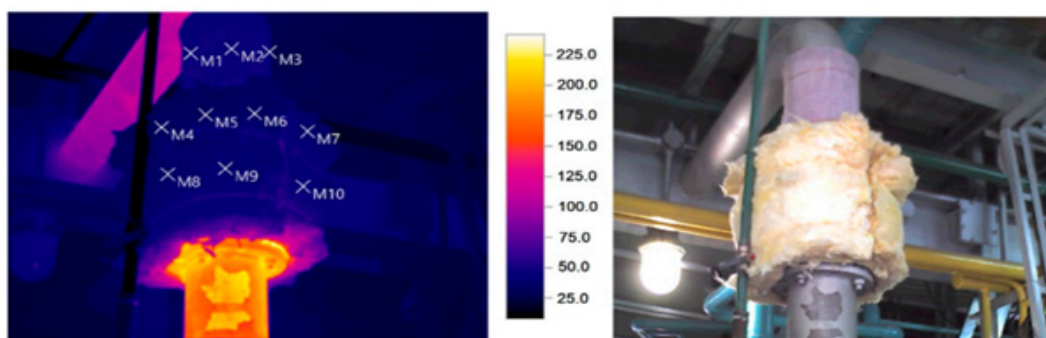
شکل ۶. کوره گاز طبیعی: (الف) نمای کلی؛ (ب) دودکش [۶۳].

Figure 6. Natural gas furnace: (a) General view; (b) Chimney [63].



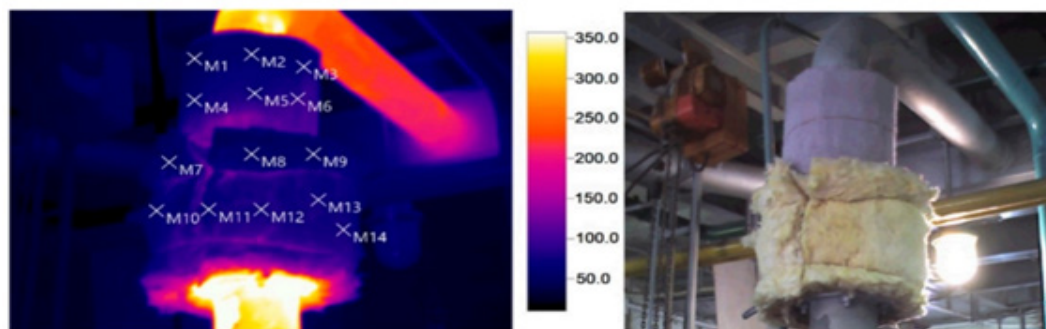
شکل ۷. تصویربرداری حرارتی از دودکش در دمای ۳۰۰ °C [۶۳].

Figure 7. Thermal imaging of the chimney at 300 °C [63].



شکل ۸. تصویربرداری حرارتی از یک دودکش عایق شده در دما ۳۰۰ °C مقادیر اندازه‌گیری (°C) عبارتند از: M1—48.1؛ M2—46.1؛ M3—43.9؛ M4—35.0؛ M5—34.7؛ M6—36.2؛ M7—40.5؛ M8—37.3؛ M9—42.0؛ M10—46.0 [۶۳].

Figure 8. Thermal imaging of an insulated chimney at 300 °C: measurements values (°C) are M1—48.1; M2—46.1; M3—43.9; M4—35.0; M5—34.7; M6—36.2; M7—40.5; M8—37.3; M9—42.0; M10—46.0 [63].



شکل ۹. تصویربرداری حرارتی از یک دودکش عایق شده در دمای ۶۰۰ °C، اندازه‌گیری‌ها (°C): M1—47.5؛ M2—59.6؛ M3—72.0؛ M4—63.9؛ M5—76.2؛ M6—81.2؛ M7—54.0؛ M8—58.1؛ M9—56.8؛ M10—61.1؛ M11—70.9؛ M12—79.0؛ M13—74.8؛ M14—80.2 [63].

Figure 9. Thermal imaging of an insulated chimney at 600 °C, measurements (°C): M1—47.5; M2—59.6; M3—72.0; M4—63.9; M5—76.2; M6—81.2; M7—54.0; M8—58.1; M9—56.8; M10—61.1; M11—70.9; M12—79.0; M13—74.8; M14—80.2 [63].

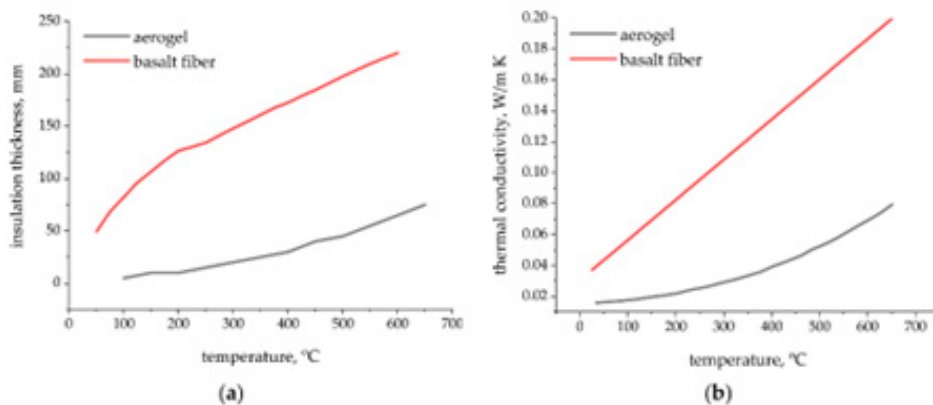
علاوه بر این، اروژل‌های مبتنی بر آلومینیوم دارای مقاومت دمایی برتری تا ۱۸۰۰ °C هستند و هدایت حرارتی $0.3274 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ را نشان می‌دهند که عملکرد بالای آن‌ها را در کاربردهای حرارتی شدید نشان می‌دهد. اروژل‌های مبتنی بر زیرکونیا می‌توانند تا

اروژل‌های مبتنی بر کربن یکپارچگی قوی را نشان می‌دهند و پس از قرار گرفتن در معرض شعله اکسی‌استیلن در دمای شگفت‌انگیز ۲۵۰۰ °C به مدت ۳۰ ثانیه، شکل خود را حفظ می‌کنند و در دمای ۱۲۰۰ °C هدایت حرارتی $0.05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ را به دست می‌آورند.

جدول ۳. نتایج اندازه‌گیری‌ها [۶۳].

Table 3. The results of measurements [63].

Type of Insulator	Pipe Surface Temperature (°C)	Insulation Surface Temperature (°C)			Average Deviation
		T _{min}	T _{max}	T _{average}	
Aerogel	300	43.9	51.4	47.3	1.6
	600	44.6	81.2	62.9	9.1
Basalt fibre	300	34.7	53.2	41.2	4.5
	600	53.6	80.2	64.7	8.4



شکل ۱۰. پارامترهای مواد عایق طبق مستندات فنی: (الف) حداقل ضخامت؛ (ب) هدایت حرارتی [۶۳].

Figure 10. Parameters of insulating materials according to technical documentation: (a) minimum thickness; (b) thermal conductivity [63].

در محیط‌های دمای بالا، توجه زیادی به اروژل‌های کامپوزیت چندجزئی به دلیل پایداری حرارتی قابل توجه آن‌ها معطوف شده است. مقاومت حرارتی اروژل‌های اکسید فلزی، هنگامی که با نانوذرات سیلیکا ترکیب می‌شوند، بهبود قابل توجهی یافته است. ادغام الیاف با پایداری حرارتی استثنایی، مانند مولیت یا سپیولیت، به عنوان یک استراتژی قابل قبول برای تقویت اروژل‌های اکسید فلزی عمل می‌کند و منجر به افزایش استحکام و کاهش انقباض می‌شود. این مواد کامپوزیت دارای کاربردهای امیدوارکننده‌ای در عایق حرارتی در دماهای بالا هستند.

۱۳۰۰ °C را تحمل کنند و هدایت حرارتی آن‌ها $0.104 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ است. اروژل‌های پلی‌ایمید با حداکثر تحمل دما $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ، در دمای اتاق دارای هدایت حرارتی $0.344 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ هستند. این مواد نمونه‌ای از پیشرفت‌های قابل توجه در فناوری اروژل هستند و به دلیل مقاومت‌های حرارتی و هدایت‌های متنوع خود، کاربردهای متنوعی را ارائه می‌دهند. به عنوان مثال، اروژل‌های زیرکونیا معمولاً هنگام قرار گرفتن در دماهای آنیلینگ بالای $600 \text{ }^\circ\text{C}$ دچار انقباض قابل توجهی می‌شوند. در تلاش برای گسترش دامنه کاربردهای اروژل، به ویژه

۶- مراجع

- [1] H. H. Maleki, L. M. R. Durães, and A. Portugal, "An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies," *Journal of Non-crystalline Solids*, vol. 385, pp. 55-74, 2014.
- [2] M. Koebel, A. Rigacci, and P. Achard, "Aerogel-based thermal superinsulation: an overview," *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 63, pp. 315-339, 2012.
- [3] Z. Deng, J. Wang, A. Wu, J. Shen, and B. Zhou, "High strength SiO₂ aerogel insulation," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 225, pp. 101-104, 1998.
- [4] W. Zou, X. Wang, Y. Wu, L. Zou, G. Zu, D. Chen, and J. Shen, "Opacifier embedded and fiber reinforced alumina-based aerogel composites for ultra-high temperature thermal insulation," *Ceramics International*, vol. 45, no. 1, pp. 644-650, 2019.
- [5] E. P. Ferreira-Neto, M. A. Worsley, and U. P. Rodrigues-Filho, "Towards thermally stable aerogel photocatalysts: TiCl₄-based sol-gel routes for the design of nanostructured silica-titania aerogel with high photocatalytic activity and outstanding thermal stability," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 5, p. 103425, 2019.
- [6] K. Saravanan, B. Tyagi, and H. C. Bajaj, "Nanocrystalline, mesoporous aerogel sulfated zirconia as an efficient catalyst for esterification of stearic acid with methanol," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 192, pp. 161-170, 2016.
- [7] S. Raissi, M. Younes, and A. Ghorbel, "Synthesis and characterization of aerogel sulphated zirconia doped with chromium: n-hexane isomerization," *Journal of Porous Materials*, vol. 17, pp. 275-281, 2010.
- [8] W. Jing and W. Jin, "Advances on dimensional structure designs and functional applications of aerogels," *Acta Chimica Sinica*, vol. 79, no. 4, p. 430, 2021.
- [9] T. Linhares, M. T. P. de Amorim, and L. Durães, "Silica aerogel composites with embedded fibres: a review on their preparation, properties and applications," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 7, no. 40, pp. 22768-22802, 2019.
- [10] M. Sambucci, F. Savoni, and M. Valente, "Aerogel technology for thermal insulation of cryogenic tanks—Numerical analysis for comparison with traditional insulating materials," *Gels*, vol. 9, no. 4, p. 307, 2023.
- [11] J.-H. Lee and S.-J. Park, "Recent advances in preparations and applications of carbon aerogels: A review," *Carbon*, vol. 163, pp. 1-18, 2020.
- [12] F. Peng, Y. Jiang, J. Feng, L. Li, H. Cai, and J. Feng, "A facile method to fabricate monolithic alumina-silica aerogels with high surface areas and good mechanical properties," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 6, pp. 2480-2488, 2020.
- [13] N. Asim et al., "Biomass and industrial wastes as resource materials for aerogel preparation: opportunities, challenges, and research directions," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, no. 38, pp. 17621-17645, 2019.
- [14] J. Guo et al., "Hypocrystalline ceramic aerogels for thermal insulation at extreme conditions," *Nature*, vol. 606, no. 7916, pp. 909-916, 2022.
- [15] H. Cai et al., "Preparation of silica aerogels with high temperature resistance and low thermal conductivity by monodispersed silica sol," *Materials & Design*, vol. 191, p. 108640, 2020.
- [16] L.-J. Wang, S.-Y. Zhao, and M. Yang, "Structural characteristics and thermal conductivity of ambient pressure dried silica aerogels with one-step solvent exchange/surface modification," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 113, no. 1, pp. 485-490, 2009.
- [17] G. Buscarino, V. Ardizzone, G. Vaccaro, and F. Gelardi, "Sintering process of amorphous SiO₂ nanoparticles investigated by AFM, IR and Raman techniques," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 357, no. 8-9, pp. 1866-1870, 2011.
- [18] P.-E. Okafor and G. Tang, "Study of effective thermal conductivity of a novel SiO₂ aerogel composite for high-temperature thermal insulation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 212, p. 124242, 2023.
- [19] Y. Liu, Z. Zhao, Y. Kong, C. Chu, J. Tang, J.

- Ren, and X. Shen, "Facile preparation of nano-SiO₂ composites with excellent high-temperature thermal insulation performance," *Ceramics International*, vol. 48, no. 19, pp. 27486-27492, 2022.
- [20] X. Wang et al., "Flexible, high-temperature-resistant silica-polymer aerogel hybrids by templating polymethylsilsesquioxane microstructure with trace polyimide," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 6, no. 1, p. 32, 2023.
- [21] Q. Fan et al., "Water-induced self-assembly and in situ mineralization within plant phenolic glycol-gel toward ultrastrong and multifunctional thermal insulating aerogels," *Acs Nano*, vol. 16, no. 6, pp. 9062-9076, 2022.
- [22] J. Yao, X. Gao, Y. Wu, X. Zhao, and X. Li, "High-temperature resistant ambient pressure-dried aluminum doped silica aerogel from inorganic silicon and aluminum sources," *Ceramics International*, vol. 48, no. 11, pp. 15006-15016, 2022.
- [23] H. Gu, X. Hou, R. Zhang, and D. Fang, "Novel high-temperature-resistant Y₂SiO₅ aerogel with ultralow thermal conductivity," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 16, no. 6, pp. 2393-2397, 2019.
- [24] X. Sun, W. Zhu, H. Wang, X. Yan, and D. Su, "In situ formation of the TiCN phase in SiBCN ceramic aerogels enabling superior thermal and structural stability up to 1800° C," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 15, no. 9, pp. 12221-12231, 2023.
- [25] X. Zhang, X. Cheng, Y. Si, J. Yu, and B. Ding, "All-ceramic and elastic aerogels with nanofibrous-granular binary synergistic structure for thermal superinsulation," *ACS nano*, vol. 16, no. 4, pp. 5487-5495, 2022.
- [26] L. Su et al., "Anisotropic and hierarchical SiC@ SiO₂ nanowire aerogel with exceptional stiffness and stability for thermal superinsulation," *Science advances*, vol. 6, no. 26, p. eaay6689, 2020.
- [27] L. Su, H. Wang, M. Niu, X. Fan, M. Ma, Z. Shi, and S.-W. Guo, "Ultralight, recoverable, and high-temperature-resistant SiC nanowire aerogel," *ACS nano*, vol. 12, no. 4, pp. 3103-3111, 2018.
- [28] L. Song et al., "Multifunctional SiC@ SiO₂ nanofiber aerogel with ultrabroadband electromagnetic wave absorption," *Nano-Micro Letters*, vol. 14, no. 1, p. 152, 2022.
- [29] J. Zhao, J. Zhou, H. Li, and A. Xiao, "Directional fabricating of flexible and compressible cellulose nanofibril composite cryogel with excellent thermal insulation, flame-retardancy and radiative cooling for efficient thermal management," *Cellulose*, vol. 29, no. 18, pp. 9671-9691, 2022.
- [30] T. Zhou, X. Cheng, Y. Pan, C. Li, L. Gong, and H. Zhang, "Mechanical performance and thermal stability of glass fiber reinforced silica aerogel composites based on co-precursor method by freeze drying," *Applied Surface Science*, vol. 437, pp. 321-328, 2018.
- [31] G. Markevicius, R. Ladj, P. Niemeyer, T. Budtova, and A. Rigacci, "Ambient-dried thermal superinsulating monolithic silica-based aerogels with short cellulosic fibers," *Journal of Materials Science*, vol. 52, pp. 2210-2221, 2017.
- [32] Y. Ding et al., "Optimization of ultralight SiO₂/TiO₂ nanofibrous aerogel for high-temperature application," *Ceramics International*, vol. 49, no. 23, pp. 38058-38069, 2023.
- [33] M. Yang, Y. Lixia, Z. Chen, W. Qiong, Y. Wang, T. Liu, and M. Li, "Flexible electrospun strawberry-like structure SiO₂ aerogel nanofibers for thermal insulation," *Ceramics International*, vol. 49, no. 6, pp. 9165-9172, 2023.
- [34] X. Li, J. Feng, Y. Jiang, L. Li, and J. Feng, "Anti-oxidation performance of carbon aerogel composites with SiCO ceramic inner coating," *Ceramics International*, vol. 45, no. 8, pp. 9704-9711, 2019.
- [35] X. Jin et al., "Multiscale, elastic, and low-density carbon fibre/siliconoxycarbide-phenolic interpenetrating aerogel nanocomposite for ablative thermal protection," *Composites Part B: Engineering*, vol. 245, p. 110212, 2022.
- [36] J. Li et al., "Fabrication of large aerogel-like carbon/carbon composites with excellent load-bearing capacity and thermal-insulating performance at 1800 °C," *ACS nano*, vol. 16, no. 4, pp. 6565-6577, 2022.

- [37] F. Liu et al., "Carbon layer encapsulation strategy for designing multifunctional core-shell nanorod aerogels as high-temperature thermal superinsulators," *Chemical Engineering Journal*, vol. 455, p. 140502, 2023.
- [38] J. Wang, H. Li, H. Liu, L. Lu, and T. Wang, "“Finger coral-like” ceramic fiber aerogels with enhanced high-temperature thermal insulation, anti-oxidation, and mechanical performance," *Composites Science and Technology*, vol. 225, p. 109515, 2022.
- [39] X. Wang et al., "A novel carbon-based fiber aerogel with interfacial thermal resistance: Temperature insulation, oxidation resistance, and mechanical performance," *Ceramics International*, vol. 49, no. 9, pp. 13698-13707, 2023.
- [40] S. Gao, T. Yang, S. Liu, K. Liu, Z. Cao, W. Pang, and H. Jiang, "Preparation of high-temperature resistant aluminum-doped silica aerogel from aluminum sol source by ambient pressure drying," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 109, no. 1, pp. 162-173, 2024.
- [41] X. Jin et al., "Synergistic reinforcement and multiscaled design of lightweight heat protection and insulation integrated composite with outstanding high-temperature resistance up to 2500 °C," *Composites Science and Technology*, vol. 232, p. 109878, 2023.
- [42] Y. Xie, M. Han, R. Wang, H. Zobeiri, X. Deng, P. Zhang, and X. Wang, "Graphene aerogel based bolometer for ultrasensitive sensing from ultraviolet to far-infrared," *ACS nano*, vol. 13, no. 5, pp. 5385-5396, 2019.
- [43] Y. Cheng, S. Zhou, P. Hu, G. Zhao, Y. Li, X. Zhang, and W. Han, "Enhanced mechanical, thermal, and electric properties of graphene aerogels via supercritical ethanol drying and high-temperature thermal reduction," *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 1439, 2017.
- [44] F. Peng, Y. Jiang, F. Liu, J. Feng, J. Feng, and L. Li, "Hydrothermal assisted synthesis of heat resistant, well-crystallized aerogels constructed by boehmite nano rods," *Ceramics International*, vol. 48, no. 11, pp. 16232-16240, 2022.
- [45] W. Zou et al., "Highly thermally stable alumina-based aerogels modified by partially hydrolyzed aluminum tri-sec-butoxide," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 84, pp. 507-514, 2017.
- [46] A. E. Lebedev, N. V. Menshutina, I. I. Khudееv, and R. A. Kamysinsky, "Investigation of alumina aerogel structural characteristics at different «precursor-water-ethanol» ratio," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 553, p. 120475, 2021.
- [47] G. Zu, J. Shen, X. Wei, X. Ni, Z. Zhang, J. Wang, and G. Liu, "Preparation and characterization of monolithic alumina aerogels," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 357, no. 15, pp. 2903-2906, 2011.
- [48] F. Liu, Y. Jiang, J. Feng, L. Li, and J. Feng, "Dual template strategy to prepare ultralight and high-temperature resistant ceramic nanorod aerogels for efficient thermal insulation," *Ceramics International*, vol. 49, no. 14, pp. 22677-22689, 2023.
- [49] Q. Ji, L. Zhang, X. Jiao, and D. Chen, "Alpha Al₂O₃ nanosheet-based biphasic aerogels with high-temperature resistance up to 1600 °C," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 15, no. 5, pp. 6848-6858, 2023.
- [50] E. Zhang et al., "Insulating and robust ceramic nanorod aerogels with high-temperature resistance over 1400 °C," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 13, no. 17, pp. 20548-20558, 2021.
- [51] R. Liu et al., "Ultralight, thermal insulating, and high-temperature-resistant mullite-based nanofibrous aerogels," *Chemical Engineering Journal*, vol. 360, pp. 464-472, 2019.
- [52] L. Liu et al., "A facile method for fabricating a monolithic mullite fiber-reinforced alumina aerogel with excellent mechanical and thermal properties," *Gels*, vol. 8, no. 6, p. 380, 2022.
- [53] M. Hao, H. Chen, C. Xia, T. Su, C. Ma, and Y. Miao, "Al₂O₃-SiO₂ aerogel reinforced with aluminum silicate nanofibers: A strategy to preserve the properties of Al₂O₃-SiO₂ aerogel," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 109, no. 2, pp. 523-533, 2024.
- [54] D. Liu, Y. Wang, F. Zhou, B. Xu, and B. Lv, "A

novel high-entropy ($\text{Sm}_0.2\text{Eu}_0.2\text{Tb}_0.2\text{Dy}_0.2\text{Lu}_0.2$) $2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ceramic aerogel with ultralow thermal conductivity," *Ceramics International*, vol. 47, no. 21, pp. 29960-29968, 2021.

[55] S. Ren, K. Liu, K. Wang, J. Fan, J. Liang, and C. Yang, "ZrC/C aerogel with high compressive strength by a carbothermic process," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 41, no. 9, pp. 4710-4719, 2021.

[56] H. Gao, Z. Zhang, Z. Shi, J. Zhang, M. Zhi, and Z. Hong, "Synthesis of high-temperature resistant monolithic zirconia-based aerogel via facile water glass assisted sol-gel method," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 85, pp. 567-573, 2018.

[57] X. Zhang, X. Cheng, Y. Si, J. Yu, and B. Ding, "Elastic and highly fatigue resistant ZrO_2 - SiO_2 nanofibrous aerogel with low energy dissipation for thermal insulation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 433, p. 133628, 2022.

[58] Y. Han, Y. Wu, H. Zhang, S. Huang, S. Wu, and Z. Liang, "A three-dimensional network modifier (dimethyldiethoxysilane) makes ZrO_2 - SiO_2 aerogel with excellent thermal insulation performance and high-temperature stability," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 671, p. 131716, 2023.

[59] J. Liao, Y. Zhang, and L. Zhang, "Improved catalytic activity on the thermal decomposition of ammonium perchlorate and efficient adsorption of uranium using a novel ultra-low density Al_2O_3 -based aerogels," *Journal of hazardous materials*, vol. 387, p. 122015, 2020.

[60] C. Jia et al., "A foldable all-ceramic air filter paper with high efficiency and high-temperature resistance," *Nano Letters*, vol. 20, no. 7, pp. 4993-5000, 2020.

[61] Z. Kantor et al., "Heterogeneous silica-polyimide aerogel-in-aerogel nanocomposites," *Chemical Engineering Journal*, vol. 443, p. 136401, 2022.

[62] S. Ma et al., "Anisotropic all-aromatic polyimide aerogels with robust and high-temperature stable properties for flexible thermal protection," *Chemical Engineering Journal*, vol. 431, p. 134047, 2022.

[63] A. V. Fedyukhin et al., "Aerogel product applications for high-temperature thermal insulation," *Energies*, vol. 15, no. 20, p. 7792, 2022.