



Scientific Extension Paper

Requirements and Criteria for Selecting Metallic and Composite Materials for Cryogenic Tank Structures in Modern Launch Vehicles

Mehdi Jafari¹, Amir Kaveh^{*2}, Mehdi Dalir³, Mehrdad Rasouli⁴, and Hossean Jafary⁵

1. Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
2. Materials and Manufacturing Technology Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
3. School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Faculty of Textile Chemical Engineering - Fiber Science, Islamic Azad University of Research Sciences, Tehran, Iran
5. Materials and Manufacturing Technology Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 03 September 2024
Revised 14 October 2024
Accepted 02 November 2024
Available Online 16 November 2024

Keywords:

Cryogenic tanks
Rocket engine fuel
Liquid hydrogen storage
Composite cryogenic tanks

ABSTRACT

Modern launch vehicles depend on liquid fuels such as liquid hydrogen and oxygen, which must be stored at cryogenic temperatures. Cryogenic tanks are essential for containing and transporting liquid hydrogen and serve as critical infrastructure across the defense, aerospace, and energy sectors. Given the extremely low boiling point of liquid hydrogen (20K), materials used for these tanks must meet stringent requirements, including chemical compatibility with hydrogen, resistance to hydrogen embrittlement, and reliable mechanical and thermophysical performance at cryogenic temperatures. These characteristics are vital to ensuring structural integrity and operational reliability. This report provides a detailed evaluation of cryogenic materials currently used to store and transport liquid hydrogen. It reviews recent research advances, compiles performance data under low-temperature conditions, and identifies key material characterization and application gaps. The objective is to support informed material selection for future cryogenic tank development. Stainless steel remains the most widely used material for liquid hydrogen storage, with different grades selected based on specific operational demands. However, the growing need for space-based hydrogen systems has accelerated research into advanced cryogenic materials, including high-strength aluminum alloys, titanium alloys, and composite structures. Composite cryogenic tanks have been implemented in launch vehicles such as the DC-XA, X-33, and various platforms developed by SpaceX and in programs led by McDonnell Douglas and Lockheed Martin (LM). Notably, LM reported up to an 18% weight reduction by replacing metallic tanks with composite alternatives. This review critically evaluates cryogenic tank materials' applicability to next-generation launch vehicle designs.

* Corresponding Author's E-mail: P90132910@aut.ac.ir

How to Cite this Article:

M. Jafari, A. Kaveh, M. Dalir, M. Rasouli, and H. Jafary, "Requirements and criteria for selecting metallic and composite materials for cryogenic tank structures in modern launch vehicles," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 81-103, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.2.6>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





الزامات و معیارهای انتخاب مواد فلزی و کامپوزیتی برای ساخت بدنه مخازن کرایوژنیک در پرتابگرهای روز دنیا

مهدی جعفری^۱، امیر کاوه^{۲*}، مهدی دلیر^۳، سید مهرداد رسولی^۴، و حسین جعفری^۵

- ۱- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
- ۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
- ۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۴- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی شیمی نساجی- علوم الیاف، دانشگاه آزاد اسلامی علوم تحقیقات، تهران، ایران
- ۵- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

پرتابگرهای روز دنیا از سوخت‌های مایع همچون هیدروژن مایع و اکسیژن مایع در دمای کرایوژنیک استفاده می‌کنند. مخازن کرایوژنیک به‌عنوان یک حامل مهم در ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع محسوب می‌شوند. مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل کرایوژنیک هیدروژن مایع تجهیزات کلیدی مرتبط با امنیت دفاعی در حوزه‌های هوافضا و انرژی هستند. به دلیل دمای پایین هیدروژن مایع (۲۰ کلوین)، مواد انتخاب شده برای مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع باید دارای ویژگی‌هایی از جمله سازگاری در محیط هیدروژن مایع، مقاومت در برابر تردی هیدروژنی، خواص مکانیکی و خواص ترموفیزیکی مناسب در دمای پایین باشند. همه موارد مطرح شده می‌توانند بر طراحی ایمن و قابل‌اعتماد مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل تأثیر بگذارند. در این گزارش، انواع و کاربردهای مواد کرایوژنیک مورد استفاده در مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع بررسی شده‌است. پیشرفت‌های تحقیقاتی در مواد کرایوژنیک و داده‌های عملکرد دمای پایین مواد، معرفی شده و نواقص موجود در تحقیق و کاربرد مواد کرایوژنیک برای مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع خلاصه شده تا راهنمایی برای توسعه آتی انتخاب ماده مخزن ارائه شود. در میان مواد مورد استفاده، فولاد ضدزنگ به‌عنوان رایج‌ترین ماده کرایوژنیک برای مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع استفاده می‌شود، اما گریدهای مختلف فولاد ضدزنگ نیز کاربردهای متفاوتی دارند. با این حال، با افزایش تقاضا برای ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع فضایی، تحقیقات در مورد مواد کرایوژنیک با استحکام ویژه بالا مانند آلیاژ آلومینیوم، آلیاژ تیتانیوم یا مواد کامپوزیتی نیز در حال توسعه است. مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع کامپوزیتی در پرتابگرهایی همچون DC-XA، X-33 و Space X و توسط شرکت‌هایی همچون McDonnell Douglas Company و Lockheed Martin Company (LM) مورد استفاده قرار گرفت. شرکت (LM) با جایگزینی مخازن کامپوزیتی به جای مخازن فلزی باعث کاهش وزن مخزن تا ۱۸٪ شد. در مقاله حاضر، به‌طور کلی به بررسی مواد و پتانسیل‌های موجود برای استفاده در بدنه مخازن کرایوژنیک پرتابگرهای روز دنیا پرداخته می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳ شهریور ۱۴۰۳
بازنگری ۲۳ مهر ۱۴۰۳
پذیرش ۱۲ آبان ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۶ آبان ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

مخازن کرایوژنیک
بدنه سوخت پرتابگر
ذخیره‌سازی هیدروژن مایع
مخازن کامپوزیتی کرایوژنیک

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: P90132910@aut.ac.ir

How to Cite this Article:

M. Jafari, A. Kaveh, M. Dalir, M. Rasouli, and H. Jafari, "Requirements and criteria for selecting metallic and composite materials for cryogenic tank structures in modern launch vehicles," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 81-103, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.2.6>.

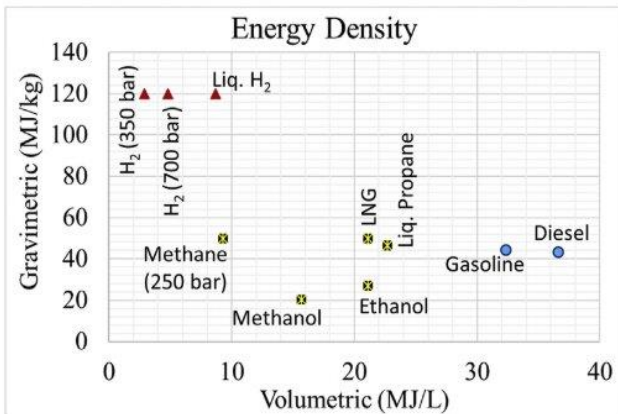
COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



و ۲۰ درجه سانتی‌گراد، تنها یک سوم محتوای انرژی در واحد حجم هیدروژن مایع^۲ را دارد. با وجود هزینه‌هایی که برای ذخیره LH2 وجود دارد (همچون فشار کم، دمای کرایوژنیک و یا عایق‌های مورد نیاز برای مخازن هیدروژن مایع)، اما چشم‌پوشی از این هزینه‌ها برای به‌دست آوردن نسبت انرژی به واحد حجم بیشتر، توصیه شده‌است. شکل ۲ مقایسه‌ای از چگالی انرژی هیدروژن با سایر سوخت‌ها را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۲- چگالی انرژی حجمی برای سوخت‌های رایج بر اساس مقادیر حجم اشغالی آن‌ها [۲].

Fig. 1. Volumetric energy density for common fuels based on their occupied volume [2].

همان‌طور که اشاره شد برای نگهداری از هیدروژن و اکسیژن مایع نیاز به مخازن کرایوژنیک داریم. مخازن کرایوژنیک جزء حیاتی از پرتابگرهای فضایی هستند که نقش مهمی در ذخیره و مدیریت سوخت‌هایی مانند هیدروژن مایع و اکسیژن مایع ایفا می‌کنند. این سوخت‌ها باید در دماهای بسیار پایین، اغلب زیر ۲۵۳-درجه سانتی‌گراد، نگهداری شوند تا به حالت مایع باقی بمانند. به همین منظور باید از مواد بسیار خاص در ساخت مخازن کرایوژنیک استفاده کرد. انتخاب مواد مناسب برای اطمینان از یکپارچگی ساختاری، عایق حرارتی و عملکرد کلی این مخازن در شرایط سخت مأموریت‌های فضایی ضروری است.

چالش اصلی در طراحی مخازن کرایوژنیک در نیاز به توازن بین چندین مؤلفه نهفته است. مواد استفاده شده باید نسبت استحکام به وزن بالایی داشته باشند تا جرم مخزن به حداقل برسد. این امر در حالی است که این مخازن باید بتوانند فشارهای مکانیکی را در طول پرتاب و عملیات تحمل کنند. علاوه بر این، این مواد باید

۱ مقدمه

پیشرفت‌های ایجاد شده در صنعت هوافضا، نیاز به توسعه مواد و ساختارهای نوآورانه برای بهبود کارایی، ایمنی و عملکرد وسایل نقلیه فضایی را ضروری کرده است. در میان این اجزاء، مخازن سوخت کرایوژنیک به‌عنوان یک مؤلفه حیاتی برای وسایل نقلیه بزرگ فضایی دارای اهمیت هستند. این مخازن برای ذخیره و مدیریت سوخت‌های کرایوژنیک مانند هیدروژن مایع و اکسیژن مایع در دماهای بسیار پایین طراحی شده‌اند.

علاقه به توسعه صنعت هوافضا که از منابع انرژی جایگزین مانند هیدروژن استفاده می‌کنند، عمدتاً به دلیل این واقعیت است که استفاده از هیدروژن باعث کاهش میزان محصولات مضر زیست‌محیطی می‌شود. یکی از عوامل مؤثر و تأثیرگذار برای انتخاب نوع و میزان سوخت، مدت‌زمان پرواز است که می‌تواند از چند دقیقه تا چند روز متغیر باشد. در شکل ۱، دو نمونه از هواپیماهای بدون سرنشین ناسا با مدت زمان پرواز طولانی نشان داده شده‌است. برای مثال وسیله نقلیه Helios HP03 ناسا یک هواپیمای بدون سرنشین با نیروی خورشیدی است که از یک سیستم سلول سوختی تجدیدپذیر برای ذخیره انرژی استفاده می‌کند. این هواپیما قادر به پرواز تا مدت زمان یک ماه است، اما ظرفیت بار محدودی در حدود ۲۳۰ کیلوگرم دارد که باید در طول بال‌ها توزیع شود. این وسیله می‌توانست در ارتفاع تقریباً ۷۰,۰۰۰ فوت پرواز کند [۱].



شکل ۱- هواپیماهای Altair و Helios HP03 بدون سرنشین ناسا با مدت زمان پرواز طولانی [۱].

Fig. 2. NASA's unmanned Altair and Helios HP03 aircraft with long flight duration [1].

در میان منابع انرژی سازگار با محیط‌زیست که می‌تواند برای پرتابگرهای و وسایل نقلیه هوایی استفاده شود، سوخت هیدروژن و اکسیژن مایع بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

در میان انواع سوخت‌های مایع و گاز، هیدروژن بیشترین انرژی در واحد حجم را دارا است. در بین حالت‌های مختلف هیدروژن نیز، هیدروژن مایع انرژی در واحد حجم بیشتری را نسبت به هیدروژن گازی ارائه می‌دهد. هیدروژن گازی^۱ ذخیره شده در ۳۵ مگاپاسکال

2. Liquefy Hydrogen (LH2)

1. Gaseous Hydrogen (GH2)

خواص حرارتی عالی داشته باشند تا انتقال حرارت را به حداقل برسانند و از به جوش آمدن مایعات کرایوژنیک جلوگیری کنند. همچنین، سازگاری مواد مورد استفاده در دماهای کرایوژنیک بسیار مهم است، زیرا بسیاری از مواد در دماهای کرایوژنیک ترد می‌شوند و خواص مکانیکی خود را از دست می‌دهند [۳].

در طول تاریخ، آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای ضدزنگ به دلیل خواص مطلوب و کاربرد گسترده در صنایع هوافضا انتخاب‌های اصلی برای ساخت مخازن کرایوژنیک بوده‌اند. آلیاژهای آلومینیوم، به خاطر وزن کم و استحکام بالای خود شناخته شده‌اند که آن‌ها را برای کاهش وزن کلی پرتابگر ایده‌آل می‌سازد. از سوی دیگر، فولادهای ضدزنگ، مقاومت عالی در برابر خوردگی و خواص مکانیکی خوبی در دماهای کرایوژنیک دارند. با این حال، پیشرفت‌های مداوم در علم مواد به اکتشاف مواد جایگزینی منجر شده است که می‌توانند عملکردهای بهتری ارائه دهند [۴].

یکی از دسته‌های امیدوارکننده مواد که توجه زیادی را به خود جلب کرده است، مواد کامپوزیتی هستند. مواد کامپوزیتی (که معمولاً از ترکیب الیاف‌هایی مانند کربن یا شیشه در یک ماتریس پلیمری ساخته می‌شوند) مزایای متعددی نسبت به فلزات دارند. این مواد می‌توانند طوری طراحی شوند که استحکام و سختی بالایی داشته باشند در حالی که بسیار سبک هستند که این امر یک مزیت حیاتی برای کاربردهای فضایی است. علاوه بر این، مواد کامپوزیتی می‌توانند به گونه‌ای تنظیم شوند که خواص عایق حرارتی مناسبی داشته باشند تا منجر به کاهش لایه‌های عایق اضافی شده و جرم کلی مخزن را بیشتر کاهش دهند [۵].

۲ مواد با پتانسیل برای استفاده در کاربردهای

علمی فضایی

مخازن کرایوژنیک باید به گونه‌ای طراحی شوند که شرایط سخت پرتاب و پرواز فضایی را تحمل کنند. این شرایط سخت شامل دماهای بسیار پایین، فشارهای بالا و بارهای مکانیکی دوره‌ای است. انتخاب مواد مناسب برای این مخازن از اهمیت بالایی برخوردار است تا ایمنی، قابلیت اطمینان و عملکرد مناسب پرتابگر تضمین شود. معیارهای مختلفی جهت انتخاب مواد برای مخازن کرایوژنیک وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند. از جمله این معیارها می‌توان به خواص مکانیکی خوب، خواص حرارتی مناسب و سازگاری در شرایط کرایوژنیک اشاره کرد.

خواص مکانیکی: ماده باید استحکام و سختی مناسبی از خود نشان دهد تا بتواند تنش‌های مکانیکی شدید در طول پرتاب، از

جمله لرزش، شوک و فشار را تحمل کند. علاوه بر این، ماده باید دارای انعطاف‌پذیری مناسب و مقاومت به خستگی بالا باشد تا بتواند تغییر شکل را بدون شکست تحمل کرده و در برابر اثرات بارگذاری چرخه‌ای مقاومت کند. برای حفظ یکپارچگی ساختاری در دماهای کرایوژنیک، ماده باید مقاومت به خزش نیز داشته باشد تا در معرض طولانی مدت به دماهای پایین، خواص مکانیکی خود را حفظ کند [۶].

خواص حرارتی: مدیریت خواص حرارتی در مخازن کرایوژنیک بسیار مهم است. رسانایی حرارتی کم برای کاهش انتقال حرارت بین مایع کرایوژنیک و محیط اطراف ضروری است تا دمای سرد سوخت حفظ شود. همچنین، ضریب انبساط حرارتی پایین به جلوگیری از ایجاد تنش‌های حرارتی بیش از حد در طول نوسانات دما کمک می‌کند. ماده باید مقاومت به شوک حرارتی نیز داشته باشد تا بتواند تغییرات سریع دما را بدون ترک خوردن یا لایه‌لایه شدن تحمل کند [۷].

سازگاری با محیط کرایوژنیک و نسبت وزن به استحکام: ماده باید از نظر شیمیایی با مایعات کرایوژنیک ذخیره شده مانند اکسیژن مایع و هیدروژن مایع سازگار باشد. همچنین باید در برابر تردی هیدروژنی مقاوم باشد. همچنین برای بهبود عملکرد کلی پرتابگر، ملاحظات وزنی از اهمیت بالایی برخوردار است. یک ماده با چگالی کم می‌تواند وزن کلی مخزن کرایوژنیک را کاهش دهد و به این ترتیب ظرفیت بار و کارایی سوخت را بهبود بخشد [۸].

روش‌ها و معیارهای دیگری نیز برای انتخاب مواد قابل استفاده در مخازن کرایوژنیک پرتابگرها نیز وجود دارد. برای مثال ریزساختار ماده نقش بسیار مهمی در خواص مکانیکی و مقاومت در برابر تردی در دماهای بسیار پایین ایفا می‌کند. ساختارهای دانه‌ریز معمولاً در دماهای پایین چقرمگی و انعطاف‌پذیری بهتری از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، ماده باید توانایی تحمل نقص‌هایی مانند ترک یا حفره را داشته باشد بدون اینکه منجر به شکست شود. این موضوع به‌ویژه در کاربردهایی که بازرسی و کنترل کیفیت دشوار است، اهمیت زیادی دارد. از دیگر معیارهای انتخاب ماده مناسب، قابلیت تولید آن در مقیاس‌های بزرگ است. ماده باید برای فرآیندهای تولیدی که برای ساخت مخازن کرایوژنیک استفاده می‌شوند، مانند کشش عمیق، خم‌کاری و جوشکاری مناسب باشد. با این حال، برخی مواد ممکن است در حین تولید یا فرآوری مشکلاتی ایجاد کنند. همچنین دوام طولانی مدت ماده نیز از دیگر عواملی است که باید به آن توجه شود. ماده انتخابی باید در طول زمان‌های طولانی، کمترین میزان پیری و تخریب را از خود نشان دهد.

پرواز را تحمل کرده و یکپارچگی خود را در طول عمر عملیاتی پرتابگر حفظ کنند [۱۱].

۴ مواد با پتانسیل برای استفاده در کاربردهای علمی فضایی

با در نظر گرفتن موارد فوق، برای انتخاب ماده جهت استفاده در بدنه مخازن کرایوژنیک به دودسته فلزات و کامپوزیت‌ها خواهیم رسید. فلزات مورد استفاده در مخازن کرایوژنیک باید دارای مجموعه‌ای منحصر به فرد از خواص برای مقاومت در برابر چالش‌های ناشی از دماهای پایین و تنش‌های دینامیکی باشند. ویژگی‌های اساسی شامل استحکام بالا، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر شکنندگی در دماهای کرایوژنیک و همچنین سازگاری با پیشران‌های کرایوژنیک است. معمولاً فلزات مورد استفاده در این زمینه آلیاژهای آلومینیوم، فولادهای ضدزنگ و آلیاژهای تیتانیوم هستند که هر کدام دارای مزایای خاصی هستند. به عنوان مثال، آلیاژهای آلومینیوم به دلیل وزن سبک و عملکرد عالی که در دمای پایین دارند بسیار ارزشمند هستند. این در حالی است که فولادهای ضدزنگ استحکام و دوام بالاتری را ارائه می‌دهند. از سوی دیگر، آلیاژهای تیتانیوم، تعادل استثنایی نسبت استحکام به وزن و مقاومت در برابر خوردگی را ارائه می‌دهند و آن‌ها را برای کاربردهای مختلف ایده‌آل می‌سازند. در ادامه به بررسی برخی از این مواد و ویژگی‌های آن‌ها می‌پردازیم.

۴.۱ فولادهای زنگ‌زن

فولادهای زنگ زده شامل انواع فولادهای زنگ‌زن برای مخازن کرایوژنیک، تردی هیدروژنی فولادهای زنگ‌زن آستنیتی، خواص مکانیکی فولاد زنگ‌زن در دمای کرایوژنیک.

۴.۱.۱ انواع فولادهای زنگ‌زن برای مخازن کرایوژنیک

فولاد زنگ‌زن آستنیتی عملکرد خوبی در دماهای پایین دارد که به عنوان اولین ماده برای شرایط کاری دما پایین و همچنین ماده‌ای که بیشترین استفاده را برای مخازن ذخیره و حمل و نقل هیدروژن مایع دارد، شناخته می‌شود. همان‌طور که اشاره شد در سال ۱۹۵۵، ایالات متحده اولین تلاش‌ها برای استفاده از هیدروژن مایع به عنوان سوخت هواپیما را آغاز کرد و دو مخزن هیدروژن مایع از جنس فولاد زنگ‌زن برای استفاده در نوک بال هواپیما توسعه داد [۱۲]. آستنیت در فولاد زنگ‌زن به ساختار بلوری مکعبی وجوه مرکز پر تعلق دارد که توانایی تغییر شکل پلاستیکی بالایی دارد.

این موضوع به‌ویژه زمانی که مواد در معرض محیط‌های خشن و چرخه‌های حرارتی مکرر قرار می‌گیرد، حائز اهمیت می‌شود. علاوه بر این، باید بازرسی و نگهداری آن آسان باشد و دستورالعمل‌های واضحی برای شناسایی نقص‌ها یا علائم تخریب وجود داشته باشد [۹].

روش‌های ذکر شده در واقع معیارهای اضافی و تکمیل‌کننده معیارهای اصلی (خواص مکانیکی، خواص حرارتی، سازگاری با محیط کرایوژنیک و نسبت وزن به استحکام) هستند و دیدگاه جامع‌تری در مورد انتخاب مواد برای مخازن کرایوژنیک ارائه می‌دهند. بررسی ریزساختار و توانایی تحمل نقص برای ایمنی طولانی‌مدت حیاتی هستند. ساختار چندفازی می‌تواند خواص را بهینه کرده و وزن را کاهش دهد، اما نیاز به بررسی دقیق تکنیک‌های اتصال و مشکلات احتمالی سازگاری دارد. ملاحظات تولید و فرآوری برای اجرای عملی و هزینه اثربخشی ضروری هستند و در نهایت، دوام و قابلیت اطمینان طولانی‌مدت برای اطمینان از عملکرد ایمن و کارآمد مخازن کرایوژنیک در طول عمر آن‌ها بسیار مهم هستند [۱۰].

۳ چالش‌ها و محدودیت انتخاب مواد

انتخاب ماده بهینه برای مخازن کرایوژنیک در پرتابگرها عملی پیچیده است. این امر به دلیل الزامات منحصر به فرد و بحرانی است که پرتابگرها با آن مواجه هستند برای اطمینان از ایمنی و عملکرد مناسب این مخازن، باید به چندین چالش کلیدی پرداخت. یکی از مهم‌ترین چالش‌های انتخاب ماده مناسب، نیاز به ایجاد تعادل بین ویژگی‌های متضاد است. به عنوان مثال، موادی که استحکام و سختی بالایی دارند، اغلب دارای هدایت حرارتی پایین تری هستند که می‌تواند کنترل انتقال حرارت را دشوار کند. به‌طور مشابه، موادی با چگالی کم ممکن است خواص مکانیکی یا سازگاری با دماهای بسیار پایین را داشته باشند. یافتن تعادل مناسب بین ویژگی‌های مختلف مواد، نیازمند در نظر گرفتن دقیق الزامات خاص پرتابگر و اجزای آن است.

چالش دیگر، محدودیت در دسترسی به موادی است که بتوانند الزامات سختگیرانه کاربردهای کرایوژنیک را برآورده کنند. بسیاری از مواد متداول در دماهای پایین، ویژگی‌های نامطلوبی مانند شکنندگی یا انعطاف‌پذیری نامناسب از خود نشان می‌دهند. این امر مستلزم توسعه و آزمایش مواد جدید یا اصلاح مواد موجود برای بهبود عملکردشان در محیط‌های کرایوژنیک است.

در نهایت، پیش‌بینی دوام و قابلیت اطمینان طولانی‌مدت مواد در مخازن کرایوژنیک دشوار است. ارزیابی اثرات چرخه‌های حرارتی مکرر، قرار گرفتن در معرض محیط‌های خورنده، و تجمع نقص‌ها در طول زمان می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. این امر نیازمند آزمایش و تحلیل دقیق است تا اطمینان حاصل شود که مواد انتخاب شده می‌توانند شرایط سخت

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی که معمولاً در دمای کرایونیک استفاده می‌شوند [۱۳].

Table 1. Chemical composition of austenitic stainless steel commonly used at cryogenic temperatures [13].

Alloy	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
201	0.15	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03
202	0.15	7.5-10.0	1.00	17.0-19.0	4.0-6.0	0.06	0.03
301	0.15	2.0	1.00	16.0-18.0	6.0-8.0	0.045	0.03
302	0.15	2.0	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03
303	0.15	2.0	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.15
304	0.08	2.0	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03
304L	0.03	2.0	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03
305	0.12	2.0	1.00	17.0-19.0	10.5-13.0	0.045	0.03
308	0.08	2.0	1.00	19.0-21.0	10.0-11.0	0.045	0.03
309	0.20	2.0	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03
310	0.25	2.0	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03
316	0.08	2.0	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03
316L	0.03	2.0	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03
321	0.08	2.0	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03

۴.۱.۲ تردی هیدروژنی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی

همان‌طور که اشاره شد، تردی هیدروژنی به پدیده‌ای اشاره دارد که در آن نفوذ مولکول‌های هیدروژن به ماده باعث شروع ترک و شکست می‌شود. وقتی ماده در محیط هیدروژنی تحت بار قرار می‌گیرد، مولکول‌های هیدروژن در تمرکز تنش داخلی ماده جمع شده و منجر به شروع و گسترش ترک و در نهایت شکست می‌شوند. مکانیزم تئوریک تردی هیدروژنی عمدتاً شامل ضعیف شدن پیوند اتم‌ها با یکدیگر به واسطه حضور هیدروژن و تغییر شکل پلاستیک موضعی است. در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، به دلیل دشواری تشکیل هیدریدها توسط اتم‌های آهن و هیدروژن، مکانیزم تردی هیدروژنی عمدتاً بر اساس نظریه تغییر شکل پلاستیکی محلی ناشی از هیدروژن است [۱۴]. برای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، پایداری آستنیت در دماهای پایین مقاومت بالا در برابر تردی هیدروژنی را تضمین می‌کند که یکی از دلایل اصلی استفاده از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در محیط هیدروژن مایع است. به‌عنوان مثال، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ نیمه‌پایدار مقاومت کمتری در برابر تردی هیدروژنی نسبت به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ و ۳۱۶ با پایداری فاز بهتر دارد. علاوه بر این، سرویس طولانی مدت در محیط

با افزودن مقدار بیشتری از نیکل و کروم در آلیاژ، آستنیت پایداری بیشتری در دماهای پایین دارد. بنابراین، با کاهش دما، مقاومت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی بهبود می‌یابد درحالی که پلاستیسیته و مقاومت به ضربه در دماهای پایین حفظ می‌شود. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، افزودن عناصر مختلف ویژگی‌های منحصر به فردی به فولاد زنگ نزن می‌بخشد که این ویژگی‌ها، کاربردهای کلی آن‌ها را تعیین می‌کند. اگرچه مخزن ذخیره هیدروژن مایع عمدتاً از فولاد زنگ‌نزن ساخته شده است، اما راهنمای تئوریک یا استانداردی در مورد انتخاب درجه مناسب فولاد زنگ‌نزن برای کاربردهای مختلف و ارزیابی عملکرد جامع فولاد زنگ‌نزن در محدوده دمای هیدروژن مایع وجود ندارد. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را می‌توان بر اساس ترکیب شیمیایی آن به دو دسته Cr-Ni-Mn (سری ۲۰۰) و Cr-Ni (سری ۳۰۰) تقسیم کرد [۱۳]. به دلیل عملکرد جامع برتر، سری ۳۰۰ به‌طور گسترده‌ای در مخازن ذخیره و حمل‌ونقل مایعات در دماهای پایین استفاده می‌شود که از بین آن‌ها، فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴، L304، ۳۱۶، L316، ۳۲۱، ۳۴۷ به کار می‌روند (جدول ۱). تفاوت در عناصر آلیاژی درجات مختلف فولاد زنگ‌نزن، به‌طور مستقیم عملکرد نهایی و کاربرد مواد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال، فولاد زنگ‌نزن L316 دارای عنصر Mo افزوده شده است که مقاومت فولاد زنگ‌نزن را در برابر خوردگی یون کلرید به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این ماده برای محیط‌های دریایی با غلظت بالای نمک مناسب است. از طرف دیگر، فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ دارای مقداری عنصر Ti است که مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت به دمای بالا را بهبود می‌بخشد، بنابراین برای محیط‌هایی که نیاز به مقاومت به خوردگی و مقاومت به حرارت وجود دارد، مناسب است.

باتوجه به کاربرد خاص، انتخاب بهترین ماده باید با در نظر گرفتن خواص مکانیکی، مقاومت به خوردگی، عملکرد جوشکاری و هزینه مواد تعیین شود. با افزایش تقاضا برای ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن مایع در دماهای پایین، لازم است که تحقیقات جامع و سیستماتیک بر روی مواد فولاد زنگ‌نزن برای مخازن ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن مایع انجام شود، تا بتوان ویژگی‌های عملکردی انواع و برندهای مختلف فولاد زنگ‌نزن را به‌طور کامل درک کرد و بر این اساس، استانداردهای انتخاب مواد فولاد زنگ‌نزن را که نیازهای مخازن ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن مایع در دماهای پایین را برآورده می‌کنند، تدوین کرد.

شاخص ارزیابی مواد در دماهای پایین است [۱۹]. روش‌های آزمون مختلفی برای ارزیابی عملکرد مربوط به مخازن ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن مایع وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به آزمون چقرمگی ضربه در دمای پایین (نمونه V-notch)، آزمون سقوط وزنه، آزمون ضخامت کامل و آزمون مکانیک شکست اشاره کرد. آزمون چقرمگی ضربه‌ای در دماهای پایین بیشترین استفاده را دارد. در آزمون ضربه، دمای مربوط به جذب انرژی یا درصدی از ایلف شکسته شده (یعنی دمای انتقال تردی) برای ارزیابی چقرمگی مواد در دماهای پایین استفاده می‌شود. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی به ساختار مکعبی سطوح مرکز پر تعلق دارد که در دمای پایین پایداری بالایی دارد و با کاهش دما، پلاستیسیته و چقرمگی آن به‌طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد [۲۰].

بر اساس استاندارد انجمن مهندسين مکانیک آمریکا^۱، برای مخازنی که از فولاد کم‌کربن و برخی فولادهای کم‌آلیاژ ساخته شده‌اند، زمانی که در دمای زیر دمای مشخصی کار می‌کنند (این دما به ضخامت مواد بستگی دارد)، انرژی ضربه تست ضربه چارپی (V-notch) مواد نباید کمتر از ۲۰ ژول باشد. در طراحی مخازن ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن مایع، توجه به چقرمگی ضربه در دمای ۲۰ کلوین ضروری است. مطابق با استاندارد GB150، زمانی که دمای کاری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی بالاتر یا برابر با ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد باشد، می‌توان از تست ضربه در دمای پایین صرف‌نظر کرد. با این حال، ASME الزامات سخت‌گیرانه‌تری دارد که در آن (وقتی از فولاد زنگ‌نزن که در دمای بالاتر از ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود) مقدار کربن، باید کمتر از ۰.۱ درصد باشد. فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت تنها در حالی می‌توانند از تست ضربه در دمای پایین معاف شوند که مقدار کربن آن‌ها بیشتر از ۰.۱ درصد باشد. مطابق با استاندارد صنعتی ژاپن^۲ برای خدمات در دمای پایین فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، زمانی که دمای کاری کمتر از ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد هستیم، باید تست ضربه در دمای پایین انجام شود. با در نظر گرفتن تأثیر نوع مواد، دسته، فرایند شکل‌دهی و فرایند عملیات حرارتی بر ساختار ریز و خواص مواد، لازم است تست چقرمگی ضربه در دمای پایین برای مواد مخازن ذخیره هیدروژن مایع عملی، انجام شود. از آنجایی که استحکام قطعات جوش داده شده معمولاً کمی ضعیف‌تر از فلز پایه است، بنابراین ارزیابی چقرمگی ضربه در دمای پایین (۲۰ کلوین) برای قسمت‌های جوش داده شده اهمیت ویژه‌ای دارد [۲۱].

مقاومت کششی، استحکام تسلیم و مدول الاستیک مواد را می‌توان با تست کشش به‌دست آورد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است،

هیدروژن مایع یا تنش در محیط هیدروژن مایع نیز منجر به تردی هیدروژنی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی می‌شود. ریزساختار فولاد زنگ‌نزن تحت تأثیر ترکیب و فرآیند عملیات حرارتی است. ریزساختارها و وضعیت‌های سطحی مختلف، مقاومت متفاوتی در برابر تردی هیدروژنی دارند [۱۵]. لی و همکاران [۱۶] ویژگی‌های تردی هیدروژنی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی تولید شده توسط فناوری پرینت سه‌بعدی را با فولاد زنگ‌نزن آستنیتی معمول مقایسه کرد و دریافت که مقاومت به تردی هیدروژنی فولاد زنگ‌نزن تولید شده توسط پرینت ۳ بعدی کاهش نیافته درحالی که استحکام بهبود یافته است [۱۶]. لوکاس اثر زبری سطح بر ویژگی‌های تردی هیدروژنی فولاد زنگ‌نزن را مطالعه کرد و نشان داد که تبدیل مارتنزیت سطحی ناشی از برش، علت اصلی تردی هیدروژنی است. در مقایسه با فولاد ۳۰۴، فولاد زنگ‌نزن ۳۱۰ پایداری بالاتر و مقاومت بیشتری در برابر تردی هیدروژنی داشت [۱۷].

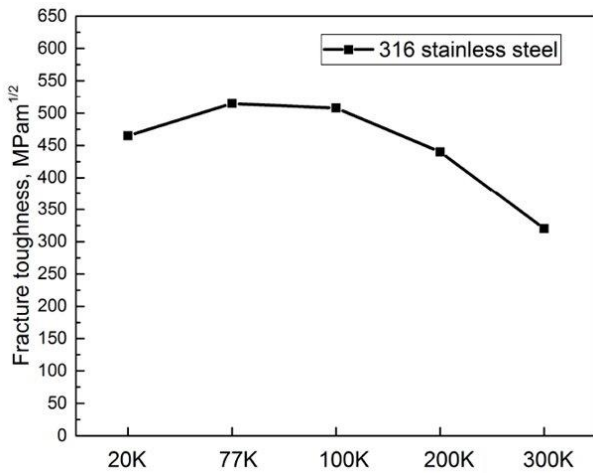
بنابراین، برای بهبود مقاومت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در برابر تردی هیدروژنی تا حد امکان، کنترل دقیق تمامی جنبه‌های تهیه و شکل‌دهی مواد، به حداکثر رساندن پایداری آستنیت و کاهش تمرکز تنش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، تحقیقات زیادی در زمینه پوشش سطحی، حفاظت کاتدی، کاشت یون، شات پینینگ لیزری و سایر جنبه‌ها برای بهبود مقاومت به خوردگی ناشی از تردی هیدروژنی فولاد زنگ‌نزن انجام شده است. با افزایش کاربرد فولاد زنگ‌نزن در زمینه ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن مایع، نیاز به درک بیشتر پدیده تردی هیدروژنی نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین مطالعه ویژگی‌های تردی هیدروژنی برندهای مختلف فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و کاربردهای مختلف آن‌ها از اهمیت عملی بالایی برخوردار است [۱۸].

۳.۱.۴ خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن در دمای کرایوژنیک

به‌طور کلی، با کاهش دما، مدول الاستیک، استحکام کششی و استحکام تسلیم ماده افزایش می‌یابد و مقاومت خستگی نیز افزایش پیدا می‌کنند. چقرمگی ضربه به ساختار کریستالی ماده بستگی دارد. کریستال مکعبی سطوح مرکز پر در دمای پایین مقاومت ضربه‌ای بهتری دارد، درحالی که کریستال مکعبی مرکز پر مقاومت ضربه‌ای ضعیف‌تری دارد. برای موادی که انتقال حالت ترد در دمای پایین ندارند، ازدیاد طول با کاهش دما افزایش می‌یابد. برای موادی که دارای انتقال حالت ترد در دمای پایین هستند، پلاستیسیته در دمای پایین به‌شدت کاهش می‌یابد و نمی‌توان از آن‌ها در محیط‌های دمای پایین استفاده کرد. چقرمگی در دمای پایین مهم‌ترین

2. Japanese Industrial Standards (JIS)

1. American Society of Mechanical Engineers (ASME)



شکل ۴- چقرمگی شکست در دمای کرایونیک فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در دماهای مختلف [۲۰].

Fig. 4. Fracture toughness of 316 stainless steel at cryogenic temperatures across different temperatures [20].

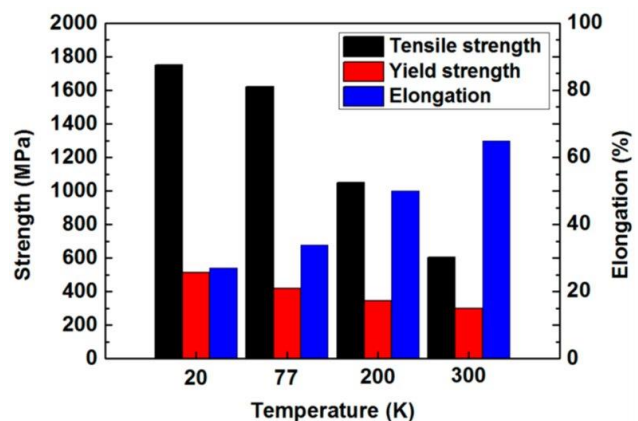
۲.۴ آلیاژهای آلومینیوم

انواع آلیاژهای آلومینیوم شامل انواع آلیاژهای آلومینیوم برای مخازن کرایونیک و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم در دمای کرایونیک می‌باشد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

۱.۲.۴ انواع آلیاژهای آلومینیوم برای مخازن کرایونیک

آلیاژ آلومینیوم دارای ساختار بلوری مکعبی و جوه مرکزپر مانند فولاد زنگ‌نزن آستنیتی است. این امر باعث می‌شود که آلیاژ آلومینیوم در دمای پایین تردی قابل توجهی نداشته باشد و همچنین دارای چقرمگی ضربه‌ای بالا باشد. علاوه بر این، آلیاژ آلومینیوم دارای ویژگی‌هایی مانند استحکام بالا، شکل‌پذیری خوب و حساسیت کم به تردی هیدروژنی است، بنابراین به‌طور گسترده‌ای در مخازن هیدروژن مایع استفاده می‌شود. آلیاژ آلومینیوم به خصوص در مخازن پیش‌ران هوافضا یک ماده ایده‌آل برای دمای پایین است. آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده در دمای پایین عمدتاً شامل آلیاژهای محلول سخت شده و رسوب سخت شده هستند. آلیاژهای محلول سخت شده معمولاً آلیاژهای Al-Mg (سری ۵۰۰۰) و آلیاژهای Al-Mn (سری ۳۰۰۰) هستند. آلیاژهای رسوب سخت شده عمدتاً شامل آلیاژهای Al-Cu-Mg (سری ۲۰۰۰)، آلیاژهای Al-Mg-Si (سری ۶۰۰۰) و آلیاژهای Al-Zn-Mg (سری ۷۰۰۰) هستند. ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم که معمولاً در دمای پایین استفاده می‌شوند در جدول ۲ نشان داده شده است [۲۰].

مقاومت کششی و استحکام تسلیم فولاد زنگ‌نزن با کاهش دما افزایش می‌یابد، درحالی که پلاستیسیته فولاد زنگ‌نزن با کاهش دما کاهش می‌یابد. با این حال، کاهش پلاستیسیته آنچنان شدید نیست که انعطاف‌پذیری در دمای کرایونیک حفظ شود. این امر در شکل ۴ نشان داده شده است. موادی که در دمای پایین شکست ترد مشخصی دارند نمی‌توانند در محیط کرایونیک استفاده شوند. کاهش قابل توجه پلاستیسیته در دمای پایین منجر به آغاز ترک ترد خواهد شد. توانایی تغییر شکل پلاستیکی مواد به ساختار بلوری مواد وابسته است. برای مواد با ساختار مکعبی و جوه مرکز پر (فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، آلیاژ آلومینیوم و غیره) شکست تردی وجود ندارد. در شکل ۳ دیده می‌شود که چقرمگی شکست فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با کاهش دما تا ۷۷ کلون افزایش یافته است. همچنین چقرمگی شکست در دمای ۲۰ کلون نسبت به ۷۷ کلون کاهش اندکی نشان داد، اما هنوز هم بالاتر از آن در دمای اتاق قرار داشت. برای مواد با ساختار مکعبی مرکز پر (فولاد مارتنزیتی و غیره)، پلاستیسیته با کاهش دما کاهش یافت و شکست ترد واضحی دیده شد. مواد با ساختار هگزاگونال (آلیاژ تیتانیوم و غیره) خواصی بین دو حالت قبل داشتند. به‌طور کلی پلاستیسیته در دمای پایین می‌تواند با تنظیم ترکیب و ریزساختار بهبود یابد. این موضوع برای طراحی مخازن کرایونیک برای دستیابی به خواص کششی مواد مختلف در دمای ۲۰ کلون بسیار مهم است. بنابراین، لازم است آزمایش‌های سیستماتیک و جامع برای خواص کششی دمای کرایونیک (کمتر یا برابر با ۱۹۶- درجه سانتیگراد) انجام شود [۲۰].



شکل ۳- خواص کششی فولاد زنگ‌نزن ۱۸Cr-۸Ni در دماهای مختلف [۲۰].

Fig. 3. Tensile properties of 18Cr-8Ni stainless steel at different temperatures [20].

شده‌است. با افزایش ظرفیت بارگیری موشک‌ها، مخازن هیدروژن مایع و اکسیژن مایع آینده نیز بر این اساس توسعه خواهند یافت و تقاضا برای مخازن آلیاژ آلومینیوم هیدروژن مایع نیز افزایش پیدا خواهد کرد [۲۰].

۲.۲.۴ خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم در دمای کرایوژنیک

استحکام کششی و استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم با کاهش دما افزایش می‌یابد و نسبت به ایجاد شیار در دمای پایین حساس نیست. بنابراین، آلیاژهای آلومینیوم نیز به‌عنوان مواد اصلی برای مخازن هیدروژن مایع برای پرتابگرهای فضایی استفاده می‌شوند. مخازن هیدروژن مایع معمولاً با استفاده از فناوری‌های تولیدی مانند شکل‌دهی ورق فلزی، فرزکاری، جوشکاری و دیگر فناوری‌های تولید ساخته می‌شوند که در این بین، فناوری جوشکاری همواره یکی از موضوعات مورد توجه در موضوع مخازن هیدروژن مایع بوده است. به دلیل تغییر ساختار میکرو در منطقه جوش و منطقه تحت تأثیر حرارت، سه نوع ترک در منطقه جوش وجود دارد: ترک‌های ناشی از تبلور مجدد، ترک‌های مایع شدن و ترک‌های ناشی از ذخیره [۲۲]. طبق استاندارد کیفیت تولید مخازن پیش‌رانه‌های فضایی در چین، وجود ترک در اتصال جوشکاری مجاز نیست. فرآیند جوشکاری نیز با تولید تنش باقی‌مانده همراه است. با توجه به اینکه وجود تنش باقی‌مانده مقاومت خستگی را کاهش می‌دهد و باعث شکستگی آسان می‌شود، لازم است تنش باقی‌مانده مخزن پس از جوشکاری حذف شود [۲۳]. علاوه بر این، مقاومت به خوردگی و مقاومت به خوردگی تحت تنش نیز از جنبه‌های مهم مخازن آلیاژ آلومینیوم هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. بسیاری از محققان پژوهش‌هایی در مورد مقاومت به خوردگی اتصالات جوش آلیاژ آلومینیوم انجام داده و برخی روش‌های آلیاژسازی سطحی را برای بهبود مقاومت به خوردگی اتصالات جوش آلومینیوم پیشنهاد داده‌اند [۲۴]. با توجه به کاربرد در محیط هیدروژن مایع، عملکرد جوشکاری مواد نیز یک شاخص کلیدی در انتخاب مواد برای ساخت مخازن ذخیره‌سازی در دمای پایین است. به‌عنوان مثال، جوش اتصالات آلیاژ آلومینیوم A142 دارای تمایل شدیدی به تولید ترک‌های جدی است [۲۵]. روش جوشکاری با چگالی انرژی متمرکز و بدون فیلر برای این ماده مناسب نیست. با این حال، در حال حاضر روش‌های جوشکاری رایج در مهندسی برای آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ مناسب هستند. در شکل ۵ منحنی تنش کرنش آلیاژ آلومینیوم با ترکیب حاوی عناصر Al-Zn-Mg-Cu در محیط گاز نیتروژن خشک و هوای مرطوب نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشخص است، سطح زیر منحنی در حالتی که در محیط گاز نیتروژن خشک قرار دارد بیشتر است. علاوه بر این، مطابق مطالعات صورت گرفته آلیاژ آلومینیوم سری 7xxx که در محیط هیدروژن مایع دچار کاهش پلاستیسیته یا تردی هیدروژنی می‌شود، برای ساخت مخازن هیدروژن مایع مناسب نیستند [۲۶].

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم که معمولاً در دمای کرایوژنیک استفاده می‌شوند [۲۰].

Table 2. Chemical composition of aluminum alloys commonly used at cryogenic temperatures [20].

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
1100	0.95(3) + Fe	0.05- 0.4	0.05	0.05-0.2	0.02	0.10
2219	0.2	0.3	5.8-6.8	0.2-0.4	0.02	0.10
2014	0.5-1.2	0.7	3.9-5.0	0.4-1.2	0.2- 0.8	0.25
2017	0.2	0.7	3.5-4.5	0.4-1.0	0.4- 0.8	0.25
2024	0.3	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2- 1.8	0.25
3003	0.6	0.7	0.05	1.0-1.5	1.0- 1.5	0.10
5005	0.3	0.7	0.2	0.2	0.8	0.25
5052	0.25	0.4	0.1	0.1	2.2- 2.8	0.10
5083	0.4	0.4	0.1	0.4-1.0	4.0- 4.9	0.25
5086	0.4	0.5	0.1	0.2-0.7	3.5- 4.5	0.25
5154	0.25	0.4	0.1	0.1-0.5	3.1- 3.9	0.25
5454	0.25	0.4	0.1	0.1-0.5	2.4- 3.0	0.25
5456	0.25	0.45	0.1	0.5-1.0	4.7- 5.5	0.25
6061	0.4-0.8	0.7	0.15- 0.4	0.15	0.8- 1.2	0.25
6063	0.2-0.6	0.35	0.1	0.35	0.45- 0.9	0.1
7005	0.35	0.4	0.1	0.2-0.7	1.0- 1.6	4.5- 5.0

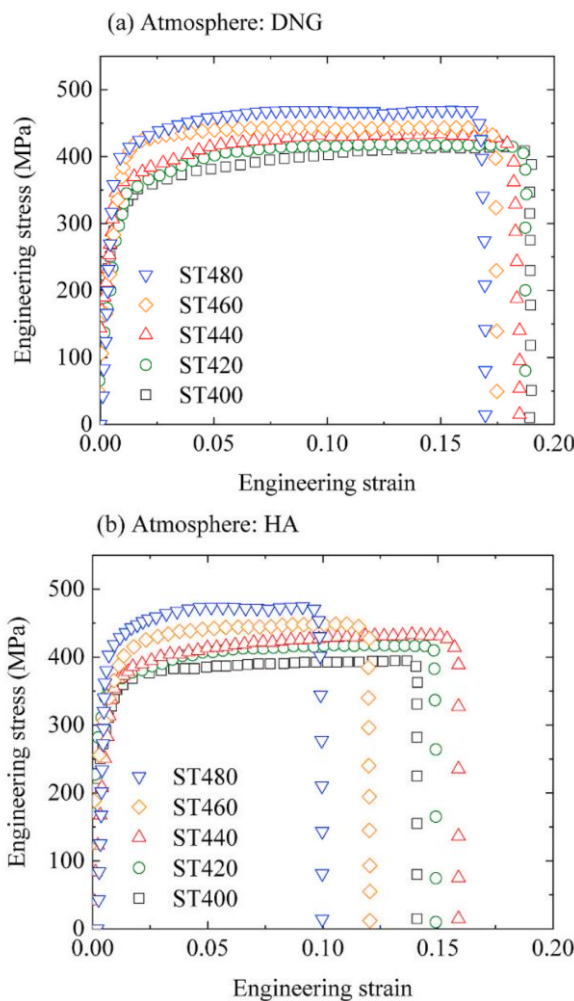
از اوایل سال ۱۹۷۰، ایالات متحده تحقیقات خود را در زمینه استفاده از سوخت هیدروژنی در هواپیماهای غیرنظامی آغاز کرد. مخازن ذخیره هیدروژن مایع از آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ ساخته شده بود که به ترتیب در جلو و عقب بدنه هواپیما قرار داده شده بود. با توسعه صنعت هوافضا، مخازن آلیاژ آلومینیوم هیدروژن مایع در زمینه پرتابگرها در ایالات متحده استفاده شد که در آن از آلیاژهای آلومینیوم ۲۱۹۵، آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۹ و آلیاژهای آلومینیوم ۲۲۱۹ استفاده شده‌است. در سال‌های اخیر، سیستم پرتاب فضایی که به‌طور مشترک توسط ناسا و بوئینگ توسعه یافته است، یک موشک هیدروژن مایع را به‌کار گرفته و هدف نهایی آن ارسال انسان به مریخ است. مخزن سوخت هیدروژن مایع این موشک از آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ ساخته شده و توسط جوشکاری اصطکاکی بهم متصل شده‌است. مخزن پیش‌رانه پرتابگرها در چین از آلیاژهای A065 به آلیاژهای آلومینیوم A142 و آلیاژهای آلومینیوم مس ۲۲۱۹ تغییر پیدا کرده است. آلیاژ آلومینیوم A142 به‌عنوان ماده ساختاری مخازن تا کنون استفاده شده. علاوه بر این، آلیاژ ۲۲۱۹ به‌عنوان ماده ساختاری نسل جدید مخازن پرتابگرها در چین تعیین

تیتانیوم نیز به‌عنوان یک ماده جدید با دمای پایین، بسیار مناسب برای استفاده در زمینه هوافضا هستند [۲۷]. در سال ۱۹۸۱، موشک فضایی آپولو که توسط ناسا پرتاب شد، از تیتانیوم و آلیاژهای تیتانیوم به‌عنوان مخازن هلیوم مایع و هیدروژن مایع استفاده کرد [۲۸]. تیتانیوم خالص در دمای اتاق دارای ساختار هگزاگونال فشرده است. هنگامی که دما بالاتر از ۸۵۵ درجه سانتی‌گراد باشد، تغییر ایزومری صورت می‌گیرد و ساختار مکعبی مرکزپر تشکیل می‌شود. با کاهش دما، پلاستیسیته و چقرمگی این فاز کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشتر آلیاژهای تیتانیومی که در دماهای پایین استفاده می‌شوند، تیتانیوم خالص یا آلیاژ دو فازی هستند [۲۰].

در حال حاضر، آلیاژهای تیتانیوم در دماهای پایین به‌صورت اولیه در زمینه موتورهای موشک‌های حاوی سوخت‌های مایع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آلیاژها عمدتاً به‌عنوان مواد ساختاری مانند دیواره مخازن ذخیره‌ساز هیدروژن و پروانه‌های پمپ‌های هیدروژنی مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از این آلیاژها منجر به کاهش نسبت وزن به تراست و بهبود عمر کاری موتور پرتابگر شده‌است [۲۹]. با این حال، بزرگترین مشکل در استفاده از آلیاژهای تیتانیوم در دماهای پایین این است که طول کشش، چقرمگی ضربه و چقرمگی شکست آن با کاهش دما کاهش می‌یابد. بنابراین، محققان تحقیقات زیادی در این زمینه انجام داده‌اند. با کاهش محتوای O, H, C و دیگر عناصر بینابینی و کاهش محتوای کلر، می‌توان عملکرد آلیاژهای تیتانیوم در دماهای پایین را به‌طور مؤثری بهبود بخشید. روسیه در تحقیق و توسعه آلیاژهای تیتانیوم در دماهای پایین در سطح جهانی پیشرو بوده و یک سری آلیاژهای تیتانیوم حاوی مقداری آلومینیوم را توسعه داده است که از جمله آن‌ها OT4 و BT5-1 به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند [۳۰]. ایالات متحده عمدتاً بر توسعه آلیاژهای تیتانیوم در دماهای پایین مانند آلیاژ $\alpha+\beta$ TC4 و آلیاژ β -Ti TA7 ELI تمرکز کرده است. به‌عنوان ماده اصلی مخازن هیدروژن مایع و لوله‌های هیدروژن مایع، TC4 ELI به‌طور گسترده‌ای در پروژه آپولو استفاده شد و نتایج خوبی را به‌دست آورد [۳۰]. در زمینه تحقیق و توسعه آلیاژهای تیتانیوم در دماهای پایین، چین نسبت به سایر کشورها دیرتر شروع به کار کرده است و تحقیق و توسعه آلیاژهای تیتانیوم در دماهای پایین مانند CT20, Ti-3Al-2.5Zr, Ti-2Al-2.5Zr و دیگر آلیاژهای تیتانیوم با دمای پایین را به ترتیب انجام داده است [۳۱-۳۳].

۴.۴ کامپوزیت‌ها

با توسعه مداوم در صنعت هوافضا، تقاضا برای مخازن سوخت سبک در حال افزایش است. مواد کامپوزیتی دارای استحکام بالاتر و چگالی کمتری هستند و پتانسیل کاهش وزن به میزان ۲۵ درصد در مقایسه با مخازن آلیاژ آلومینیوم را دارند [۳۴]. به‌عنوان مخزن ذخیره و حمل‌ونقل مایعات کرایوژنیک، ویژگی‌های کرایوژنیک مواد کامپوزیتی توجه بسیاری را به



شکل ۵- منحنی‌های تنش-کرنش کششی مهندسی برای دماهای مختلف آلیاژ Al-Zn-Mg-Cu در گاز نیتروژن خشک (DNG) و (ب) هوای مرطوب (HA) [۲۶]

Fig. 5. Engineering tensile stress-strain curves for different temperatures of Al-Zn-Mg-Cu alloy (a) in dry nitrogen gas (DNG) and (b) in humid air (HA) [26].

۳.۴ آلیاژهای تیتانیوم

در ادامه به انواع آلیاژهای تیتانیوم برای مخازن کرایوژنیک می‌پردازیم.

۳.۴.۱ انواع آلیاژهای تیتانیوم برای مخازن کرایوژنیک

آلیاژهای تیتانیوم به دلیل مزایای خاص خود از جمله استحکام ویژه بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی، مقاومت در برابر دماهای بالا، هدایت حرارتی کم و ضریب انبساط کوچک، به‌طور گسترده‌ای در زمینه هوافضا استفاده شده‌اند. علاوه بر این، آلیاژهای تیتانیوم عملکرد بسیار خوبی در دماهای پایین دارند. با توسعه صنعت هوافضا، نیازهای به مواد با عملکردی مناسب در دمای پایین برای سازه‌های هوافضا بیشتر شده‌است. آلیاژهای

ذخیره‌سازی هیدروژن مایع معمولاً توسط لیاف‌های کربنی چیده می‌شوند و توسط رزین پخت می‌شوند. به‌طور کلی برای مواد کامپوزیتی، بزرگ‌ترین مشکل این است که نفوذ هیدروژن منجر به ایجاد میکروترک، شکست، نشست و مشکلات جدی دیگر می‌شود. به همین منظور، ناسا یک پوشش غشایی مانع را در دیواره داخلی توسعه داده است که می‌تواند به‌طور مؤثری از مشکل نفوذ هیدروژن جلوگیری کند [۴۲]. در چین، تحقیق در مورد ساختارهای کامپوزیتی از دهه ۱۹۷۰ آغاز شده است. در سال‌های اخیر، مواد کامپوزیتی در ساختارهای پرتابگرها کاربرد پیدا کرده‌اند. با این حال، استفاده از مواد کامپوزیتی در مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن مایع همچنان نیازمند تحقیق سیستماتیک و عمیق است و هنوز نیاز به پیشرفت‌های فنی زیادی در زمینه مواد رزینی، فرآیند قالب‌گیری، بررسی‌های عملکرد مواد در دمای پایین، نفوذ هیدروژن و سایر جنبه‌ها وجود دارد [۲۰].

به‌طور کلی فناوری استفاده از کامپوزیت‌ها برای مخازن کرایوژنیک، نیاز به تحقیق و توسعه دارد تا از یک طرف موجب کاهش هزینه‌ها شود و از طرف دیگر عملکرد و دوام مخازن فشارقوی موجود بهبود یابد. پوسته کامپوزیت به دلیل فشار داخلی، می‌تواند بارهای مکانیکی قابل‌توجهی را تحمل کند. استفاده گسترده از لیاف کربن ۵۰ تا ۷۰ درصد قابلیت تحمل بارهای مکانیکی را افزایش می‌دهد. بهینه‌سازی ساختار کامپوزیت منجر به کاهش قابل‌توجه هزینه‌ها در مخازن هیدروژن مایع خواهد شد. از آنجایی که لیاف‌های کربن به‌طور گسترده در ساختار کامپوزیتی مخازن کرایوژنیک به کار رفته‌اند، بدین منظور در ادامه به بررسی تعدادی از لیاف‌های کربن می‌پردازیم [۴۳].

نوع لیاف کربن مورد استفاده برای ساخت مخازن ذخیره هیدروژن می‌تواند تأثیر بسزایی بر ویژگی‌های مکانیکی و ظرفیت ذخیره هیدروژن مخزن داشته باشد. به‌طور کلی، لیاف‌های کربن با استحکام بالا مانند T1000 یا بالاتر برای مخازن ذخیره هیدروژن ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا ویژگی‌های مکانیکی برتری مانند استحکام کششی و سختی بالا دارند که برای تحمل شرایط فشار بالا و بارگذاری سیکلی که مخازن در طول ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن متحمل می‌شوند، مهم است. با این حال، انتخاب نوع لیاف کربن به کاربرد خاص و نیازهای مخزن ذخیره هیدروژن بستگی دارد. برای مثال، اگر مخزن نیاز به وزن سبک داشته باشد، لیاف‌های کربن با استحکام پایین‌تر مانند T300 یا T700 نیز ممکن است مناسب باشند. علاوه بر این، فرایند تولید و هزینه لیاف‌های کربن نیز می‌تواند یک مسئله مورد توجه باشد [۴۳].

لیاف‌های کربن مزایای بسیاری همچون از جمله سختی بالا، استحکام کششی بالا، وزن کم، مقاومت شیمیایی بالا، تحمل دمای بالا و انبساط حرارتی کم دارند. بیشترین توجه معمولاً به محتوای کربن هنگام خرید محصولات یا قطعات لیاف کربن معطوف می‌شود. از سوی دیگر نوع ماده لیاف کربنی که در ساخت استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری دارد.

خود جلب کرده و در سال‌های اخیر تعداد زیادی از متون به‌طور مفصل به این موضوع پرداخته‌اند [۳۵-۳۷]. ویژگی‌های مکانیکی مواد کامپوزیتی در دمای پایین تحت تأثیر رزین، لیاف و سطح مشترک قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، با کاهش دما، استحکام پیوند زنجیره مولکولی پلیمری افزایش می‌یابد که موجب افزایش مدول یانگ و استحکام کششی ماتریس رزین می‌شود. با این حال، با کاهش دما، چقرمگی ماتریس رزین کاهش می‌یابد. برخلاف پلیمرها، استحکام لیاف‌های کامپوزیت‌ها کمتر تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد. با کاهش دما، استحکام یک لیاف به اندازه یک واحد کاهش می‌یابد، اما اثر این کاهش در مقایسه با ماتریس رزین یا سطح مشترک بین لیاف و رزین بر ترکیب کلی ناچیز است. علاوه بر این، ویژگی‌های مکانیکی مواد کامپوزیتی در دمای پایین نیز به فرم ساختاری، نحوه ترکیب اجزا آن، روش شکل‌دهی و جهت لیاف مواد کامپوزیتی بستگی دارد. مکانیسم شکست در دمای پایین برای مواد کامپوزیتی پیچیده است. در حال حاضر، بیشتر مطالعات بر روی ویژگی‌های مکانیکی ماتریس رزین در دمای پایین متمرکز شده‌اند، اما تحقیقات کمی در مورد سیستم‌های کامپوزیتی با تقویت لیافی انجام شده و هیچ روش ارزیابی قابل اعتمادی و معیار شکست برای شکست در دمای پایین مواد کامپوزیتی تقویت شده با لیاف وجود ندارد. بدین جهت تحقیقات بیشتری برای مواد کامپوزیتی در آینده مورد نیاز است [۳۸].

در فرایند تغییر دما، انبساط حرارتی مواد کامپوزیتی عامل اصلی تأثیرگذار بر ویژگی‌های مکانیکی آن است. تفاوت در ضریب انبساط حرارتی لیاف و رزین منجر به ایجاد حالت‌ها و درجات مختلفی از تغییر شکل در حین سرد شدن می‌شود [۳۹]. حالت‌های تغییر شکل در قسمت‌ها و جهت‌های مختلف لیاف نیز متفاوت است. حالت‌های تغییر شکل رزین و لیاف مواد کامپوزیتی در حین سرد شدن به‌صورت ذیل است: رزین با کاهش دما منقبض می‌شود و باعث ایجاد تنش فشاری در سطح می‌شود. در حالی که بیشتر لیاف‌های کامپوزیتی با کاهش دما به‌صورت افقی و طولی منبسط می‌شوند و باعث ایجاد تنش کششی در سطح می‌شوند. با کاهش دما، لیاف‌ها به‌صورت افقی و طولی منقبض می‌شوند و سطح، تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد [۴۰]. بنابراین، برای اصلاح مواد کامپوزیتی تقویت شده با لیاف و جلوگیری از شکست مواد کامپوزیتی لازم است که ویژگی‌های ضریب انبساط حرارتی رزین و لیاف، به‌طور عمیق مورد بررسی قرار بگیرد تا بتوان همبستگی بین رزین و لیاف ایجاد کرد.

ناسا برای ذخیره و حمل‌ونقل هیدروژن مایع، ماده کامپوزیتی Cycom 5320-1/IM7 را به‌عنوان جایگزینی برای مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن مایع پیشنهاد داد. این ماده می‌تواند به‌طور کامل از ایجاد میکروترک‌های ناشی از نفوذ هیدروژن جلوگیری کند و در مقایسه با مخازن ذخیره‌سازی فلزی آلیاژ آلومینیوم مشابه، ۳۰ درصد کاهش وزن و ۲۰ درصد کاهش هزینه را به ارمغان بیاورد [۴۱]. مواد کامپوزیتی مخازن

اولین الیاف کربنی که مورد بررسی قرار می‌گیرد T300 است. این الیاف توسط شرکت ژاپنی TORAY در دهه ۱۹۷۰ ساخته شد. این الیاف کربن مدول استاندارد با مدول 33Msi یا کمی بیشتر است. T700 یک الیاف کربن استاندارد با استحکام کششی بالا و مدول استاندارد است. از دیدگاه عملکرد، الیاف‌های کربن T300 و T700 هر دو دارای مدول کششی ۲۳۰GPa و قطر ۷ میلی‌متر هستند. با این حال، T300 دارای استحکام کششی ۳.۵۳GPa و T700 دارای استحکام کششی ۴.۹۰GPa است. این بدان معناست که استحکام T300 به میزان ۳۸/۸٪ افزایش یافته است. در الیاف T700 افزایش طول به میزان ۴۰٪ و چگالی حجم به میزان ۲/۲۷٪ نسبت به T300 محاسبه شده است. T800 یک الیاف با استحکام کششی بالا و مدول کششی Msi42 است. این الیاف دارای خواص ترکیبی مناسبی است [۴۳].

الیاف کربن T300 اولین ماده استفاده شده در ساختارهای کامپوزیتی بود و برای بیش از ۳۰ سال مورد استفاده قرار می‌گرفت. در ابتدا، قیمت آن بسیار بالا بود. قیمت یک ورق الیاف کربن ۴۰۰ × ۵۰۰ × ۵ میلی‌متر T300 بین ۱۳۰ تا ۱۴۰ دلار آمریکا بود. با این حال، شرکت Toray شروع به ارسال بیشتر و بیشتر T300 کرد، و این موجب کاهش هزینه‌های ماده مذکور شد. قیمت الیاف کربن T300 اکنون بسیار پایین است. یک ورق الیاف کربن ۴۰۰ × ۵۰۰ × ۵ میلی‌متر حدود ۸۰ دلار آمریکا هزینه دارد که تقریباً نصف قیمت اولیه آن است. از نظر قیمت، T700 حدود ۴۰٪ گران‌تر از T300 است. یک ورق الیاف کربن ۴۰۰ × ۵۰۰ × ۵ میلی‌متر T700 حدود ۱۲۰ دلار هزینه دارد، در حالی که یک ورق T800 بین ۳۰٪ و ۴۰٪ بیشتر از یک ورق T700 هزینه دارد. درجه T700 و هزینه مواد خام، و هزینه ساخت و پردازش الیاف کربن T800، متفاوت از الیاف‌های T300 است. به همین دلیل، قیمت نهایی T700 و T800 بسیار بیشتر از T300 است [۴۳].

T300 رایج‌ترین و کم‌هزینه‌ترین نوع الیاف کربن است. T700 در صنعت پهپادها استفاده می‌شود؛ زیرا استحکام بالایی دارد قیمت آن مقدار بهینه‌ای است. یکی از گران‌ترین انواع الیاف کربن T800 است که قوی‌ترین نوع نیز هست. T800 بیشتر برای تولید محصولات با استحکام بالا و وزن کم استفاده می‌شود. به‌طور کلی برای ساخت محصولات سبک‌تر، باید از مواد الیاف کربن T800 استفاده کرد [۴۳]. اخیراً، محققان اثر استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول^۱ بر خواص لایه کامپوزیتی مورد استفاده در مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن فشرده‌شده در دمای پایین را بررسی کرده‌اند (شکل ۶). نتایج نشان می‌دهد که رزین اپوکسی اصلاح‌شده استحکام بالای ۷۳.۳۸ مگاپاسکال خود را حفظ می‌کند در حالی که مدول الاستیک آن را به میزان ۴۵/۳۱٪ کاهش می‌دهد.

زیرا مواد مختلف برای اهداف مختلف استفاده می‌شوند، برای تشریح این امر تفاوت‌های بین الیاف‌های کربن T300، T700 و T800 در ادامه بررسی خواهد شد. رزین‌های مختلف مورد استفاده در مواد الیاف کربن مختلف در جدول ۳ ارائه شده‌اند [۴۳].

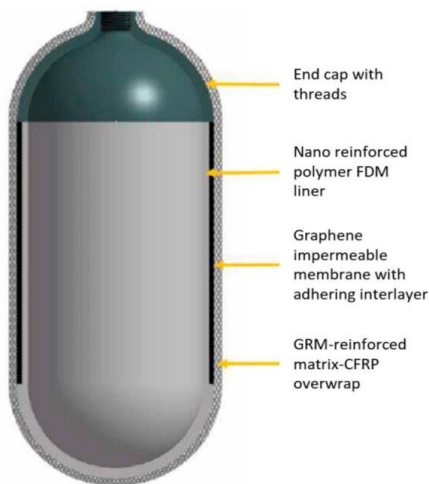
جدول ۳- مشخصات انواع الیاف کربن [۴۳].

Table 3. Characteristics of carbon fiber types[43].

Type of carbon fiber	Dimensions and size	Resin system used	Method used
T300	40A/B (1.0%)	Epoxy	TY030B-05
	40B (0.5%)	Epoxy	TY030B-05
	5A/B (1.0%)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	TY030B-05
T300S	5C (1.0%)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	TY030B-05
	6E (0.5%)	Epoxy	
	6E (0.3%)	Vinyl ester, compatible with epoxy	
T700S	3E (0.5%)	Epoxy	TY030B-05
	4E (1.0%)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	
	5C (1.0%)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	
T700G	Epoxy	Epoxy	TY030B-05
T800H	40B (0.5%)	Epoxy	TY030B-05
	50B (1.0%)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	
T800S	10E (0.5%)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	TY030B-05
	5C (1.0%)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	

1. Polyethylene Glycol (PEG)

در یکی از پروژه‌های صورت گرفته در خصوص مخازن ذخیره هیدروژن مایع باهدف توسعه مخازن ذخیره‌سازی [۴۴]، هیدروژن به صورت فشرده شده در مخازن^۲ Graphene-CFRP با وزن سبک ذخیره شد. این مخازن به گونه‌ای طراحی شده‌اند که هیدروژن را به طور ایمن و کارآمد ذخیره و حمل کنند، درحالی که برای کاربردهای هوافضا نیز به اندازه کافی سبک و بادوام باشند. یکی از اجزای کلیدی این مخازن، لایه پلیمری تقویت شده با نانومواد و پرینت سه بعدی شده است که مانعی برای نفوذ هیدروژن فراهم می‌کند و از نفوذ هیدروژن جلوگیری می‌کند. جزء مهم دیگر، لایه گرافنی با نفوذپذیری کم است که حفاظت اضافی در برابر نفوذ هیدروژن فراهم می‌کند. در نهایت، ماتریس تقویت شده با مواد CFRP و گرافن، به عنوان یک لایه بیرونی قوی، بادوام و سبک وزن که می‌تواند شرایط سخت کاربردهای هوافضا را تحمل کند، عمل می‌کند (شکل ۷).

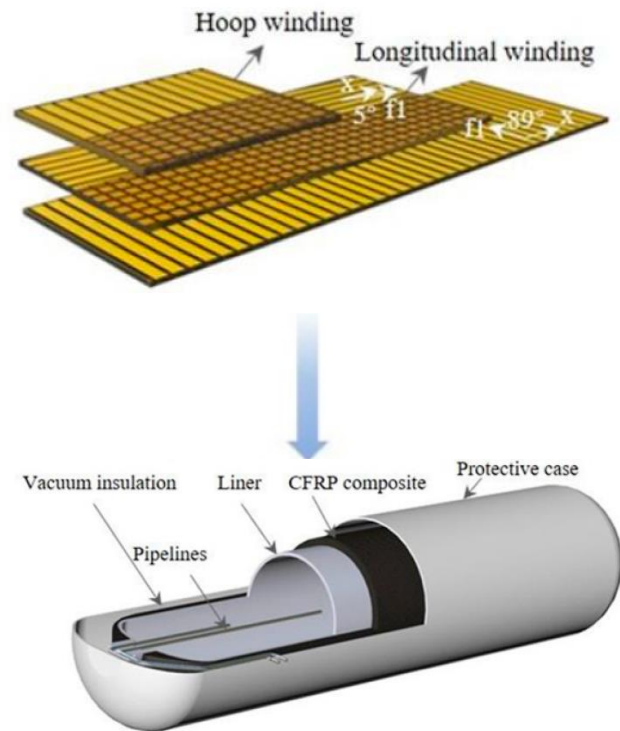


شکل ۷- مخزن ذخیره هیدروژن فشرده Graphene-CFRP با کارایی بالا و وزن سبک [۴۴]

Fig. 7. High-performance and lightweight Graphene-CFRP compressed hydrogen storage tank [44].

همان طور که اشاره شد استفاده از نانولوله‌های کربنی (CNTs) در مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن چندین مزیت نسبت به مواد سنتی دارد. نانولوله‌های کربنی به خاطر نسبت بالای استحکام به وزن، رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا، و مقاومت عالی در برابر نفوذ هیدروژن شناخته شده‌اند. این ویژگی‌ها نانولوله‌های کربنی را برای مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن ایده‌آل می‌کند، زیرا می‌توانند محفظه‌ای قوی و سبک فراهم کنند تا از نشت هیدروژن جلوگیری کنند. همچنین سازنده نانولوله‌های کربنی ادعا می‌کند که نانولوله‌های کربنی می‌توانند برای ساخت مخازن

افزودن ۳ درصد وزنی PEG 600 میزان پیچش را به میزان ۳۲/۶۵٪ کاهش داده و در عین حال میزان استفاده از الیاف کربن را به میزان ۵۰/۶۹٪ افزایش می‌دهد. خواص مکانیکی الیاف کربن را می‌توان در طراحی مخازن ذخیره‌سازی CCH2 با تنها ۰۶/۰۶٪ افزایش در میزان پیچش بهبود داد [۴۳].

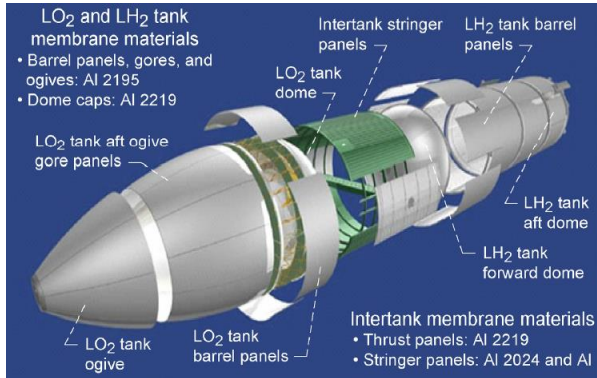


شکل ۶- بهبود خواص یک لایه کامپوزیتی با استفاده از PEG 600 [۴۳].

Fig. 6. Improving the properties of a composite layer using PEG 600 [43].

استفاده از مواد جدیدی مانند گرافن و نانولوله‌های کربنی^۱ به طور فزاینده‌ای برای ساخت مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن مهم شده است. این مواد مزایای متعددی از جمله سطح بالا برای جذب هیدروژن، استحکام بالا و خواص مکانیکی مناسب دارند. از جمله این مزایا می‌توان به کاهش وزن، افزایش انعطاف‌پذیری برای هندسه‌های پیچیده و قابلیت تولید با هزینه‌های کمتر نیز اشاره کرد. این مزایا می‌توانند به بهبود عملکرد، ایمنی و مقرون به صرفه بودن فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن در مخازن کرایوژنیک کمک کنند. با این حال، تحقیقات بیشتری لازم است تا به طور کامل خواص و رفتار این مواد شرایط کرایوژنیک درک شود [۴۳].

نمایی از ET شاتل فضایی را نشان می‌دهد. نوع مواد به کار رفته در اجزای کلیدی نیز در ذکر شده‌اند [۴۶].



شکل ۹- اجزای مخزن فوق سبک کرایونیک شاتل فضایی ناسا به همراه جنس مواد مورد استفاده در آن [۴۶].

Fig. 9. Components of NASA's Space Shuttle super lightweight cryogenic tank along with the materials used in it [46].

۵. ۱ توسعه مخزن کرایونیک CFRP با لاینر فلزی

صرفه‌جویی در وزن سازه‌های پرتابگرهای قابل استفاده مجدد یکی از عوامل اساسی برای سیستم‌های حمل نقل فضایی آینده است. یک مخزن کرایونیک سبک وزن نقش اساسی در این زمینه ایفا می‌کند. پرتابگرهای فضایی قابل استفاده مجدد ISAS چندین بار در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱ مورد استفاده قرار گرفتند و بارها پرواز، پرتاب، فرود و سوخت‌گیری را تجربه کردند. سیستم پرتابگرهای قابل استفاده مجدد شامل یک موشک پرتاب و فرود به صورت عمودی بود که از هیدروژن مایع LH₂ و اکسیژن مایع به عنوان سوخت استفاده می‌شد. موتور موشک این پرتابگرها برای سادگی، یک سیستم تحت فشار بود. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که به منظور گسترش استفاده کاربردی این مدل از پرتابگرها، ساختار سبک‌تری مورد نیاز است. از این رو، انتظار می‌رود یک مخزن کامپوزیتی، تاثیر قابل توجهی بر کاهش وزن پرتابگر برای تست‌های جدید داشته باشد [۴۷]. مخزن کامپوزیتی کرایونیک که در این گزارش مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای تست وسیله موشکی قابل استفاده مجدد و صرفاً برای تحقیقات تجربی طراحی شده است. در این پرتابگر، به جای مخزن قبلی که از جنس فولاد زنگ‌نزن بودند، مخزن هیدروژن مایع از مواد کامپوزیتی توسعه یافته استفاده شد و از طرفی مخزن اکسیژن مایع از آلومینیوم ساخته شد [۴۸].

۵. ۱. ۱ طراحی بنیادین

از آنجایی که موتور استفاده شده پرتابگر مورد بررسی به هیچ پمپ مکانیکی مجهز نیست، بنابراین برای انتقال هیدروژن نیازمند یک مخزن

ذخیره‌سازی هیدروژن کارآمدتر از مخازن سنتی هستند، زیرا می‌توانند هیدروژن را در فشارها و دماهای بالاتری نسبت به مواد سنتی ذخیره کنند. این به این معنی است که می‌توان هیدروژن بیشتری را در حجم کمتری ذخیره کرد، که اندازه و وزن مخزن ذخیره‌ساز را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، نانولوله‌های کربنی به راحتی می‌توانند با مواد دیگر مانند کامپوزیت‌ها ترکیب شوند تا مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن هیبریدی با عملکرد و دوام بهتری ایجاد کنند (شکل ۸) [۴۵].



شکل ۸- مخزن کامپوزیتی ساخته شده با نانولوله‌های کربنی [۴۵].

Fig. 8. Composite tank made with carbon nanotubes [45].

۵ استفاده از مخازن کرایونیک در پرتابگرها

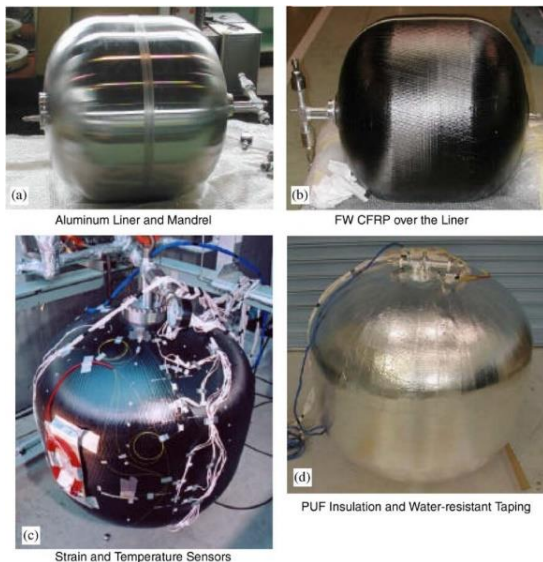
تحقیقات در زمینه ذخیره‌سازی LH₂ برای هواپیماها و فضاپیماها برای سال‌ها انجام شده است. از آنجایی که هواپیماها و فضاپیماها نیازمندی‌های مشابهی دارند، خلاصه‌ای مختصر برای کاربردهای مخازن کرایونیک هوافضا ارائه می‌شود.

از اوایل دهه ۱۹۸۰ تا به امروز، ناسا از شاتل فضایی به عنوان پرتابگر سنگین خود استفاده کرده است. مخزن خارجی (ET) شاتل فضایی یک مخزن کرایونیک سبک‌وزن پیشرفته است که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مخزن خارجی یک سیستمی است که قابلیت تحمل بار را نیز در شاتل فضایی دارد. این مخزن برای حمل وزن LH₂ و LO₂ و بارهای ناشی از بوسترهای موشکی جامد طراحی شده است. مایعات کرایونیک در این مخزن تحت فشار حدود ۲ اتمسفر ذخیره می‌شوند. مخزن خارجی این پرتابگر درست قبل از پرتاب پر می‌شود و برای مدت کوتاهی در حدود ۸/۵ دقیقه، شاتل را از سکوی پرتاب به مدار مد نظر می‌برد. وزن LH₂ ذخیره شده ۱/۰ مگانیوتن است. در هنگام پایداری مخزن، نرخ تبخیر هیدروژن حدود ۴/۴ نیوتن بر ثانیه تخمین زده شد که معادل حدود ۱/۶ درصد وزن LH₂ در ساعت است. بخش تحت فشار ET با یک آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم، ۲۱۹۵ ساخته شده است. آلیاژ آلومینیوم اصلی ۲۲۱۹ بود که بعدها با آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم ۲۱۹۵ جایگزین شد. آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم باعث افزایش استحکام و کاهش جزئی در چگالی نسبت به آلیاژ ۲۲۱۹ قبلی می‌شود. شکل ۹

ساختار دولایه می‌شود و از جداسدن لاینر و CFRP جلوگیری می‌کند. از طرفی دیگر، یک پوسته کروی تحت فشار در معرض یک کمانش ساختاری است. تمایل به کمانش پوسته داخلی ممکن است جدایش بین لایه‌ای را برعکس کند. برای جلوگیری از کمانش لایه داخلی، چسبندگی مشخصی مورد نیاز است. سطح خارجی مخزن به کمک عایق حرارتی پلی‌یورتان^۳ عایق شده و در نهایت با نوار مقاوم در برابر آب پیچیده می‌شود [۴۸].

۵. ۲.۱. فرایند ساخت و آزمایش اجزا

دوپوسته آلومینیومی مشابه نیمکره مطابق شکل ۱۰ جوش داده شده‌اند تا شکلی نسبتاً کروی به‌عنوان لایه داخلی داشته باشند. از طرفی این پوسته آلومینیومی را می‌توان به‌عنوان مندرل برای پیچش الیاف در CFRP استفاده کرد. سپس تنش پسماند فرایند تغییر شکل پلاستیک به همراه مواد چسبنده، برای جلوگیری از جدایش لایه‌ها صورت می‌گیرد.



شکل ۱۰- تصاویر مراحل تولید: (a) لایه آلومینیوم و سنبه (b) سیم پیچی CFRP بالای لاینر (c) سنسور کرنش و دما (d) عایق PUF و نوار مقاوم به آب [۴۸].

Fig. 10. Production process images: a) Aluminum layer and mandrel b) CFRP coil over liner c) Strain and temperature sensor d) PUF insulation and water-resistant tape [48].

۵. ۳.۱. نکات مهم

جنس لاینر فلزی آلومینیوم A6061T3 است. علت انتخاب این ماده قابلیت استفاده آن در دمای کرایوژنیک، جوش‌پذیری مناسب و وجود داده‌های خواص مکانیکی آن در دمای کرایوژنیک است. به‌کارگیری شار نامناسب برای جوشکاری فلز پایه منجر به ترک داغ می‌شود. نشی

فشار بالا برای سوخت‌رسانی هستیم. سوخت موجود در مخزن توسط گاز هلیوم انباشته شده تحت فشار قرار می‌گیرد. مخزن جدید توسعه‌یافته باید طوری طراحی شود که برای جایگزینی مخزن معمولی آماده باشد. برای اطمینان از عملکرد درست پرتابگر، باید مواردی همچون شکل مخزن، ظرفیت مخزن، حداکثر فشار عملیاتی مورد انتظار^۱، عایق حرارتی مورد استفاده، نحوه قرارگیری لوله‌ها و اندازه‌گیری داده‌ها با مشخصات RVT فعلی مطابقت داشته باشند. از طرفی، تغییر شکل حرارتی مخزن کامپوزیت به دلیل تغییر دما و تغییر شکل مکانیکی ناشی از فشار باید محاسبه شوند و از مخزن باید به‌گونه‌ای طراحی شود که به‌طور پیوسته در برابر فشار، لرزش و شوک‌های ناشی از فرود قرار بگیرند [۴۸].

از آنجایی که مخزن کامپوزیتی تحت فشار گازهایی با وزن مولکولی بسیار کم مانند هلیوم و هیدروژن قرار دارد، باید به‌گونه‌ای طراحی شود که مقاومت لازم را در برابر این فشارها داشته باشد. برای این منظور، ساختار مخزن کرایوژنیک به‌صورت دولایه است که ترکیبی از یک لایه بیرونی ساخته شده از پلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن^۲ برای استحکام در دمای کرایوژنیک و یک لایه داخلی ساخته شده از آلومینیوم است به‌عنوان سد گازی است.

ریزترک‌ها در قسمت CFRP در این مورد مجاز هستند، زیرا آستر فلزی نازک به‌عنوان یک مانع گاز عمل می‌کند. این بدان معنی است که ضخامت دیوار CFRP فقط از نظر مکانیکی طراحی می‌شود، نه از نقطه‌نظر نشت گازها، و بنابراین CFRP را می‌توان تا حد استحکام کامل مواد مورد استفاده قرارداد.

در صورت عدم وجود لاینر باید آزمایش‌های متعددی صورت گیرد تا ضخامت دیواره CFRP لازم برای عدم نفوذ گازهایی با وزن مولکولی کم (مانند هلیوم و هیدروژن) مورد بررسی قرار گیرد. اما حضور لاینر فلزی به ما این امکان را می‌دهد که در سیکل‌های متعدد در دمای کرایوژنیک، ضخامتی مشخص برای دیواره مخازن داشته باشیم. بنا به دلایل ذکر شده، استفاده از یک لاینر نازک در طراحی یک مخزن تحت فشار سبک‌وزن برای پرتابگرهای قابل‌استفاده مجدد پیشنهاد می‌شود [۴۸]. اتصال لاینر فلزی نازک به پوسته بیرونی CFRP باید به‌طور مداوم حفظ شود تا به‌طور یکپارچه عمل کند. نیروهای موجود می‌توانند باعث جداسازی لاینر فلزی از پوسته بیرونی CFRP شوند. اگر مخزن در دمای کرایوژنیک تحت فشار نباشد، به علت تفاوت در ضریب انبساط حرارتی فلز داخلی و CFRP بیرونی، بین لایه‌ها نیروهای کششی ایجاد می‌شود. در صورتی که فشار وارده از حد الاستیک لاینر عبور کند، پس از برداشته‌شدن فشار، تنش پسماند بین لاینر فلزی و پوسته خارجی CFRP باقی می‌ماند. عکس‌العمل این تنش پسماند باعث یکپارچگی

3. Polyurethane Foam (PUF)

1. Maximum Expected Operating Pressure (MEOP)
2. Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)

۵.۱.۴ اطلاعات مخزن

داده‌های عملکرد مخزن توسعه‌یافته کامپوزیتی در جدول ۴ نشان داده شده‌است.

جدول ۴- داده‌های موجود برای مخزن هیدروژن مایع [۴۸].

Table 4. Available data for the liquid hydrogen tank [48].

Cryogenic Tank Density Parameters	
Diameter used	849 mm
Outer diameter of the liner	645 mm
Overall height	851 mm
Nozzle diameter	81 mm
Tank volume	0.157 m ³
Maximum expected operating pressure	4.51 MPa
Burst pressure	9.0 MPa
Total weight	36.5 kg

مخزن کامپوزیتی با حجم داخلی اسمی 0.157m^3 وزنی برابر $36/5$ کیلوگرم داشت که شامل تثبیت‌کننده، لوله‌های تغذیه، اعمال‌کننده فشار، تخلیه‌کننده، هواکش و لوله‌ای برای فشارسنج، کرنش‌سنج‌ها، ترموکوپل‌ها، کابل‌های سنسور، سنسورهای الیاف نوری، عایق و لایه مقاوم به آب بودند. وزن جزئی پوسته CFRP با لایه آلومینیومی تنها $12/2$ کیلوگرم است و وزن دستگاه داخلی $8/9$ کیلوگرم است. از طرفی دیگر، وزن کلی مخزن فولاد زنگ نزن مورد استفاده در نمونه قبلی برابر 82 کیلوگرم با حجم داخلی اسمی 0.13m^3 بود [۴۸].

۵.۱.۵ تست پرواز

پس از تکمیل تست‌های اجزای مخزن کامپوزیت هیدروژن مایع، مخزن کامپوزیتی به وسیله عایق حرارتی محصور شد و بر روی پرتابگر RVT قرار گرفت [۴۰]. شکل ۱۲ محل قرارگیری این مخزن را در وسط پرتابگر نشان می‌دهد. به منظور تثبیت مخزن در برابر شتاب محیطی پرتابگر حین پرواز، یک توری الاستیک مخزن را به سمت پایین می‌کشید تا تغییر شکل‌های محیطی و محوری مخزن (ناشی از تغییر دما و فشار) را ایجاد کند. یک تکیه‌گاه اضافی نیز به بالاترین قیمت مخزن اجازه می‌داد تا به صورت محوری بلغزد و حرکت جانبی آن را محدود کند.

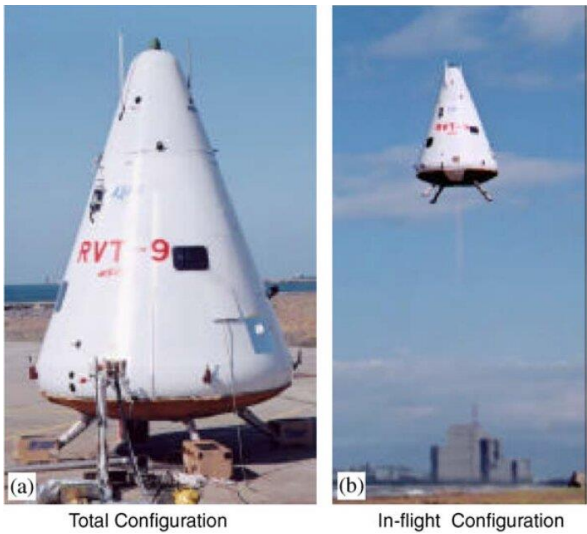
کوچکی که در ابتدای فرایند یافت شد به انتخاب شار نامناسب برای جوشکاری نسبت داده شده‌است.

بستن واب بندی حلقه O شکلی که در ابتدا و انتهای مخزن وجود دارد، نیازمند توجه و مراقب ویژه است. چرا که این دهانه‌ها در قطب‌های بالا و پایین مخزن در معرض دمای پایین هیدروژن مایع، فشار بالا و گازهایی با وزن مولکولی بسیار پایین قرار دارند. برای اطمینان از امنیت این موضوع، به جای استفاده از حلقه O شکل، دهانه‌های مذکور با فرآیند جوشکاری بسته شد. الگوی مناسب سیم پیچی و استفاده مناسب از چسب‌ها نیز توجه ویژه‌ای را می‌طلبد. برای مثال شکل ۱۱ جدا شدن لایه‌های CFRP و لاینر فلزی را به دلیل استفاده از چسب نامناسب نشان می‌دهد [۴۸].



شکل ۱۱- لایه لایه شدن اتصال لاینر و CFRP [۴۸].

Fig. 11. Delaminating the connection of the liner and CFRP[48].



شکل ۱۳- (a) تست پرواز دستگاه مجهز به مخزن کامپوزیت هیدروژن مایع پیکربندی کلی (b) پیکربندی حین پرواز [۴۸].

Fig. 13. a) Flight test of a device equipped with a liquid hydrogen composite tank General configuration b) In-flight configuration [48].

۵.۱. خلاصه و جمع بندی

یک مخزن هیدروژن مایع ساخته شده از مواد کامپوزیتی، مورد تحقیق و توسعه قرار گرفت. مخزن سیم‌پیچی شده CFRP با پوشش داخلی آلومینیومی علی‌رغم نیاز به فشار بالا، خصوصیات بسیار خوبی در مورد وزن کم نشان داد و بارها تحت فشار در دمای کرایوژنیک قرار گرفت. در نهایت تکنولوژی مخزن کامپوزیت هیدروژن مایع با نمایش مکرر پرواز مورد آزمایش قرار گرفت و سربلند بیرون آمد. مخزن کامپوزیتی هیدروژن مایع پرتابگر قابل استفاده مجدد توسعه یافت و بارها مورد عملیات‌هایی همچون چرخه‌های حرارتی و چرخه‌های تنشی قرار گرفت که در آن‌ها داده‌ها توسط حسگر الیاف نوری در طول پرواز قابل نظارت بودند. طراحان، مهندسان و تکنسین‌ها با تکنیک‌های آزمایشی لازم برای به‌عمل‌آوردن مخازن کامپوزیتی کرایوژنیک و همچنین تکنیک‌های عملیات‌های روی زمین و حین پرواز آشنا شدند. داده‌های ارزشمندی برای طراحی مخازن سوخت کرایوژنیک قابل استفاده مجدد در آینده، ساخت خودرو، ارزیابی ایمن و طراحی سیستم وسایل موشکی قابل استفاده مجدد نیز به‌دست آمد [۴۸].



شکل ۱۲- مخزن هیدروژن مایع نصب شده بر پرتابگر RVT [۴۸].

Fig. 12. Liquid hydrogen tank mounted on RVT launcher [48].

پرتابگر مجهز به مخزن هیدروژن مایع سه پرتاب را انجام داد. هر کدام از این پرتاب‌ها شامل پرتاب عمودی، صعود، شنواری، جابجایی افقی، پایین آمدن و فرود عمودی به‌صورت امن بود. در طول عملیات روی زمین و حین پرواز، آشکارساز گاز هیدروژن نصب شده بر دستگاه هیچ نشانه‌ای از نشت نشان نداد. کرنش ساختاری مخزن توسط حسگر الیاف نوری در طول پرواز اندازه‌گیری شد و داده‌ها بر روی زمین نشان داده شد. برای تست ۲۰۰۳، ارتفاع کلی وسیله نقلیه ۳/۵ متر و وزن ناخالص آن ۵۷۰ کیلوگرم بود که در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است [۴۸].

۲.۵ شرکت CTD (رویکردی برای توسعه مخازن کامپوزیتی بدون لاینر)

بسیاری از سیستم‌های هواپیماها، دستگاه‌های پرتاب و فضایپماهای آینده مانند سیستم لیزر ایرورن^۱ مخزن‌های نگهداری مواد شیمیایی کامپوزیت‌های لاینرلس^۲ نیاز دارند. این مخازن که در حال حاضر استفاده می‌شوند با موادی چون فولادهای زنگ‌نزن و کامپوزیت‌های تماما پوشیده شده با فلزات تولید می‌شوند. تانک‌های ساخته شده با کامپوزیت‌های لاینرلس به دلیل هزینه ساخت کمتر و وزن کمتری که دارند برای افزایش ظرفیت پرتابگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مخازن تا بیش از ۲۵٪ کاهش وزن را در مقایسه با مخازن سنتی‌ای که در حال حاضر استفاده می‌شوند ارائه می‌کنند که این امر باعث افزایش حجم مخزن و کاهش وزن کلی سیستم کلی می‌شود. در صورتی که مخازن لاینرلس به صورت درست طراحی و ساخته شوند، می‌توانند باعث کاهش ریسک عملیات و کاهش هزینه‌های نگهداری شوند [۴۹].

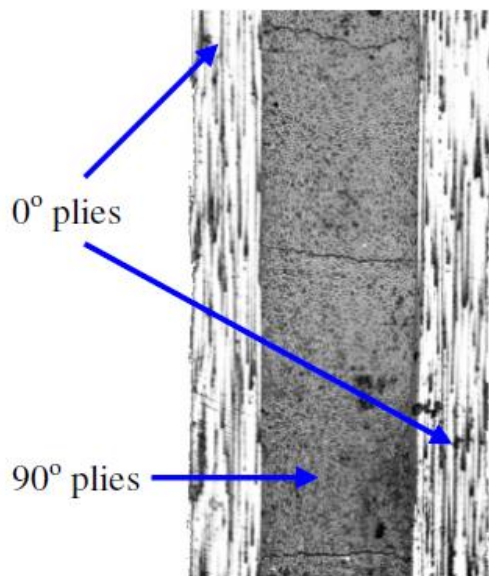
لایه بیرونی مخازن کامپوزیتی سنتی بیشتر برای محافظت از فشارهای خارجی و مقاومت در برابر شکست‌های داخلی مورد استفاده قرار می‌گرفت در حالی که لاینر، که بخش داخلی این مخازن را تشکیل می‌داد، برای محافظت از مایع داخلی قرار می‌گرفت. در مقابل، مخازن کامپوزیت لاینرلس به پوشش کامپوزیتی نیاز دارند تا علاوه بر تحمل تمام فشار و بارهای محیطی، به عنوان مانع نفوذ مایع نیز عمل کنند. درک نحوه تشکیل و کارکرد میکروترک‌ها، نحوه گسترش آسیب‌ها و در نتیجه نفوذ سیالات در مخازن در حال کار، یک معیار اولیه و اساسی برای بهینه‌سازی طراحی ساختار این مخازن است. در اصل، طراحی مخازن کامپوزیتی لاینرلس نیاز به دانش دقیقی از عملکرد ساختاری مخازن در مقیاس ماکرو و همچنین رفتار مواد در مقیاس میکرو دارد [۵۰].

در نهایت، برای موفقیت در توسعه و گسترش این مخازن نیاز به موفقیت در توسعه مواد جدید به خصوص برای برآوردن نیازها در مقیاس میکرو و ماکرو بستگی دارد. مواد مورد استفاده در این مخازن همچنین باید نگرانی‌های حفظ یکپارچگی ساختاری در طولانی مدت، نشت ناشی از میکروترک‌ها و آلوده شدن مواد کامپوزیتی را برطرف کنند. برای برطرف ساختن این چالش‌ها، توسعه تکنولوژی کامپوزیت‌ها^۳ که به مختصر CTD نیز شناخته می‌شوند، یک رویکرد سیستماتیک یکپارچه را توسعه داده است که شامل توسعه همزمان مشخصات مخازن، مدل‌های مهندسی و میکرومکانیک‌ها طراحی هدفمند مواد کامپوزیتی، طراحی نوآورانه، روش‌های طراحی و برطرف سازی مسائل می‌شود [۵۰]. تلاش‌های CTD در راستای مخازن کامپوزیتی لاینرلس بر مواد اپوکسی سخت شده به همراه بهبود مقاومت در برابر تشکیل

میکروترک‌ها تمرکز کرده است. سرمایه گذاری‌ها در این قسمت بر روی چند رویکرد جدید در تشکیل ماتریکس مواد مناسب شامل استفاده از لاستیک و بلاک‌های سنتی کوپلیمری مقاوم در برابر ضربه انجام شده است. در طول این تلاش‌ها مخلوط‌های رزین اپوکسی برای رسیدن به حد بهینه تعادل بین هزینه رزین و عملکرد آن انتخاب شده است. بعلاوه، افزودنی‌های متفاوتی برای بهبود عمر مخزن داخلی و عمر محافظ بیرونی مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای طراحی مخازن کامپوزیتی در مقیاس بزرگ، عمر مخزن داخلی طولانی‌تری فرض می‌شود [۴۹].

۱.۲.۵ تست‌های تک محوره بررسی عملکرد تشکیل میکروترک

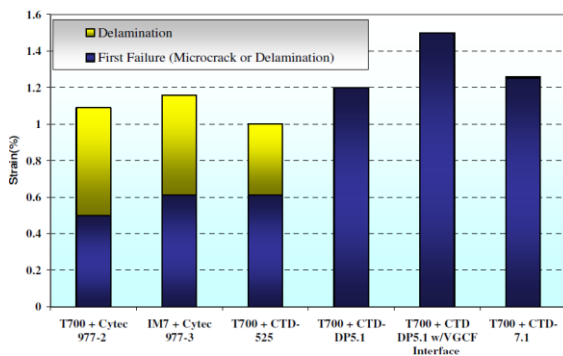
چقرمگی شکست میکروترک ۴ به عنوان یکی از ابزارهای آنالیز، برای بررسی و انتخاب مواد برای مخازن کامپوزیتی لاینرلس استفاده می‌شود. هنگامی که مقدار انرژی که ممکن است توسط میکروترک آزاد شود به حد بحرانی خود است، می‌رسد، رشد میکروترک شروع می‌شود و جوانه زنی‌های جدیدی شکل می‌گیرد. اندازه‌گیری چقرمگی شکست میکروترک‌ها به وسیله تست‌های کشش تک‌محور لایه‌های متقاطع [0/90n]s انجام می‌شود. در فرمول مذکور n تعداد لایه‌ها ۹۰ درجه است که بین لایه‌های ۰ درجه قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- لایه پولیش شده یک نمونه تست چقرمگی شکست میکروترک‌ها در چیدمان [0/90n]s [50].

Fig. 14. Polished edge of a microcrack fracture toughness test specimen in the [0/90n]s configuration [50].

کرنش‌های اولیه میکروترک‌ها و لایه لایه شدن پارامتری مهم برای طراحی مخازن کامپوزیت لاینرلس هستند. شکل ۱۶ این دو نوع کرنش شکست برای لایه‌های متقاطع برای چندین ماده متفاوت آزمایش شده توسط CTD در دمای اتاق را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده در این نمودار در پنج نمونه مختلف به صورت میانگین محاسبه شده است. نکته جالب این است که هیچ میکروترکی برای نمونه‌های ساخته شده با CTD DP5.1 و CTD7.1 تشخیص داده نشده است. اولین شکست که در این مواد، لایه لایه شدن^۱ بود که در کرنش بیش از ۱٪ رخ داد. نکته قابل توجه این است که کرنش ۱ درصد، یک سطح کرنش بهینه برای طراحی مخازن کامپوزیتی لاینرلس است. همچنین حضور نانو تقویت‌کننده VGCF در لایه‌های فصل مشترک، کرنش لایه لایه شدن را می‌تواند تا ۱/۵٪ افزایش دهد. این عمل، حالت شکست ناشی از ماتریکس را به طرز قابل توجهی به کرنش نهایی شکست فیبر که برابر با ۱/۷٪ بود، افزایش داد. این امر یک بهبود عملکرد قابل توجه در مقایسه با مواد Cytec 977-2 و 977-3 است که تشکیل میکروترک‌ها را در سطوح کرنش نزدیک ۰/۵٪ نشان می‌دادند [۵۰].



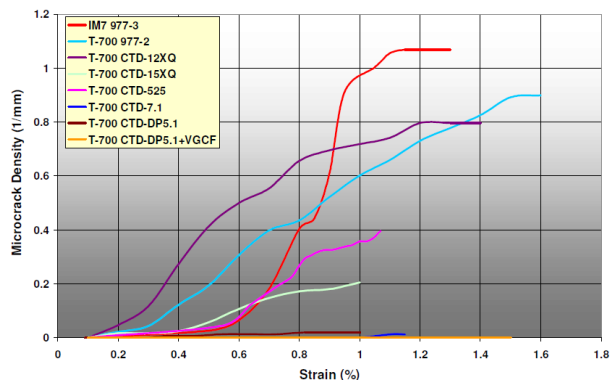
شکل ۱۶- کرنش اولیه میکروترک‌ها و لایه لایه شدن چندین ماده تست شده در دمای اتاق [۵۰].

Fig. 16. Initial microcrack strain and delamination of several materials tested at room temperature [50].

نمونه اولیه مخزن کامپوزیتی لاینرلس، با قطر ۱۰ اینچ در طول ۱۸ اینچ، با استفاده از یک ماشین سیم پیچ رشته‌ای ۵ محوره در آزمایشگاه تحقیقات نیروی هوایی^۲، کیرتلند^۳ ساخته شد. ماندلر استفاده شده در دو نیمه با استفاده از نمک یوتکتیک قابل شست و شو به نام آکوئاپور^۴ ساخته شد. چهار زنجیر فیبر کربنی Toray T700-SC 12K و یک زنجیر اپوکسی CTD7.1 سخت شده در طول فرایند ساخت استفاده شد که در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

درحالی که میکروسکوپ طول لبه نمونه را طی می‌کند، تعداد ریزترک‌ها در لایه مرکزی روی مانیتور کامپیوتر مشخص می‌شود. شمارش ریزترک برای هر لبه نمونه انجام می‌شود و میانگین تراکم میکروترک (تعداد ریزترک تقسیم بر طول لبه نمونه) برای هر سطح کرنش گزارش می‌شود. این روش تا زمانی که نمونه بشکند، تکرار می‌شود. تعیین چگالی میکروترک نمونه‌ها به صورت درجا و حین آزمایش، از جدا کردن نمونه‌ها از دستگاه آزمایش و نصب مجدد آن‌ها در زیر میکروسکوپ نوری برای شمارش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کند. از طرفی، میکروترک‌ها به راحتی شناسایی می‌شوند و زمانی که نمونه تحت کرنش قرار می‌گیرد، با دقت بیشتری شمارش می‌شوند، در غیر اینصورت ممکن بود بعضی از ترک‌ها در هنگام جابجایی بین تست کشش و اندازه‌گیری چگالی میکروترک‌ها بسته شوند.

شکل ۱۵ چگالی میکروترک را به عنوان تابعی از کرنش اعمال شده برای چندین ماده کامپوزیتی مختلف که در دمای اتاق آزمایش شده اند نشان می‌دهد. چیدمان میکروترک‌ها برای این نمونه‌ها به صورت [02,904]s است. ضخامت لایه‌های نمونه‌ها ۰/۱۵ میلی‌متر و کسر حجمی فیبر ۶۰٪ انتخاب شد. هرچه چقرمگی شکست میکروترک یک ماده بیشتر باشد، چگالی میکروترک در یک کرنش مشخص، کمتر خواهد بود که احتمالاً باعث نفوذ کمتر سیالات از طریق دیواره مخزن می‌شود. مطابق نتایج این تست، چندین ماده ماتریکس جدید CTD مانند CTD-7.1 و CTD-DP5.1 چقرمگی شکست میکروترک‌ها بالایی در مقایسه با رزین‌های استاندارد صنعتی Cytec 977-2 و 977-3 نشان دادند [۵۰].



شکل ۱۵- رشد میکروترک‌ها در برابر کرنش در یک لایه متقاطع برای چند ماده آزمایش CTD شده در دمای اتاق [۵۰].

Fig. 15. Microcrack growth against strain in a cross-layer for several materials tested CTD at room temperature [50].

حال حاضر، تحقیقات بیشتری بر روی بهینه‌سازی روش جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم و ویژگی‌های مکانیکی دماهای پایین پس از جوشکاری، مقاومت در برابر خوردگی و خوردگی محل‌های اتصال متمرکز شده‌است.

آلیاژهای تیتانیوم نیز ویژگی‌هایی همچون استحکام بالا، وزن سبک و عملکرد مناسب در دماهای پایین دارند. باین وجود خصوصیات آن‌ها در شکل‌پذیری و جوشکاری در دمای کرایوژنیک در حال بررسی است. از طرفی هزینه نسبتاً بالای این آلیاژها موجب استفاده کمتر آن‌ها در مخازن کرایوژنیک شده‌است.

در حوزه پرتابگرهای فضایی، مخازن کرایوژنیک کامپوزیتی توجهات بسیاری را به خود جلب کرده‌اند و روند روبه‌رشدی را در سال‌های اخیر داشته‌اند. مواد کامپوزیتی بیشترین پتانسیل را به‌عنوان یک جایگزین برای مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع در دمای پایین دارند. باین حال، اطلاعات و دیتاهای موجود در خصوص مکانیزم عملکرد دماهای پایین مواد کامپوزیتی به‌اندازه کافی در دسترس نیست که همین امر نیاز به مطالعه و تحقیق در این زمینه را افزایش داده است. به‌طورکلی، تحقیق و توسعه آینده مواد مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع شامل جهت‌های زیر است: (۱) ایجاد پایگاه داده‌ای از ویژگی‌های مکانیکی در مواد معمولی (فولاد ضدزنگ، آلیاژ تیتانیوم، آلیاژ آلومینیوم) در محدوده دماهای هیدروژن مایع؛ (۲) توسعه مواد کرایوژنیک جدید با عملکرد بالا و هزینه کم؛ و (۳) افزایش داده‌ها و بهبود فناوری‌های مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف.

۷ پیشنهادها

باتوجه به نقش حیاتی مخازن کرایوژنیک در پرتابگرهای فضایی، تحقیقات مداوم برای توسعه موادی با عملکرد و قابلیت اطمینان بهتر ضروری است. در ادامه برخی از زمینه‌ها برای تحقیقات آینده آورده شده‌است:

بررسی پتانسیل سایر مواد پیشرفته: بررسی مواد جدید، مانند آلیاژهای انتروپی بالا، نانوکامپوزیت‌ها، یا متامواد، باتوجه به پتانسیل آن‌ها در ارائه خواصی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، هدایت حرارتی مناسب و یا سازگاری بهتر با شرایط کرایوژنیک.

تحقیق و توسعه بر روی تکنیک‌های پیشرفته مشخصه‌یابی مواد: توسعه و تحقیق بر روی تکنیک‌های مشخصه‌یابی پیشرفته برای درک بهتر ریزساختار، رفتار عیوب، و تخریب طولانی‌مدت مواد تحت شرایط کرایوژنیک. این امر امکان پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد مواد و طول عمر آن‌ها را فراهم می‌کند.



شکل ۱۷- مراحل متفاوت طراحی نمونه اولیه یک مخزن کامپوزیتی لاینرلس [۵۰].

Fig. 17. Different stages of designing a linear composite tank prototype [50].

لایه مخزن یک لایه مخزن شامل لایه‌های حلقه‌ای و مارپیچ در هم ۱، با لایه‌های حلقه‌ای که تراکم لایه مارپیچ قبلی را فراهم می‌کرد در نظر گرفته شد. کشش سیم پیچ برای جلوگیری از میکروکمانش فیبرها متفاوت بود. مخازن نهایی پس از آن که ماندلر هل با استفاده از آب در حال خارج شدن از مخزن کامپوزیتی لاینرلس شسته شدند، در کوره مورد پخت قرار گرفتند. در زمان گزارش، CTD در حال آماده سازی تست فشار بر روی نمونه‌های اولیه مخازن بود [۵۰].

۶ نتیجه‌گیری

برای توسعه صنعت هوافضا و بهبود عملکرد پرتابگرها در آینده، نیاز به بهبود عملکرد مخازن ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل سوخت‌های کرایوژنیک مایع وجود دارد؛ بنابراین انجام تحقیقات سیستماتیک بر روی مواد کرایوژنیک و ویژگی‌های کرایوژنیک آن‌ها برای ایجاد یک پایگاه داده بسیار مهم است.

فولادهای ضدزنگ دارای مقاومت عالی در برابر تردی هیدروژنی هستند. وجود ویژگی‌هایی همچون عملکرد خوب در دماهای پایین، قابلیت جوشکاری و مقاومت در برابر خوردگی باعث استفاده گسترده این آلیاژها در ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن مایع شده‌است. باین حال، ویژگی‌های مکانیکی مواد در دماهای پایین تحت شرایط محیطی خاص نیاز به بهبود بیشتر دارند. به‌عنوان مثال، ترکیب مقاومت در برابر خوردگی و ویژگی‌های دماهای پایین مخازن ذخیره‌سازی، ویژگی‌های مکانیکی این آلیاژها در دماهای پایین و ویژگی‌های خوردگی محل‌های اتصال و جوش‌ها در محیط‌های مختلف باید موردتوجه قرار گیرد.

آلیاژهای آلومینیوم در مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن مایع برای پرتاب‌های فضایی به‌طور گسترده‌ای در داخل و خارج از کشور استفاده شده‌اند. در مقایسه با فولاد ضدزنگ، آلیاژهای آلومینیوم نسبت به آلیاژهای فولاد ضدزنگ مزایایی همچون سبک بودن، شکل‌پذیری عالی، عملکرد جوشکاری و مقاومت در برابر خوردگی بهتری دارند. در

- [6] S. Prasanraj, B. Sreejish, Y. Vincy Jarome, and K. P. Dhanabalakrishnan, "Advanced composite materials in cryogenic propellant tank," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 8, pp. 490-499, 2019.
- [7] S. Ashraf, M. S. Chohan, S. Muhammad, and F. Khan, "Circular intuitionistic fuzzy TODIM approach for material selection for cryogenic storage tank for liquid nitrogen transportation," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 98458-98468, 2023, <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3312568>.
- [8] A. P. Ustinova, Y. L. Siuskina, and R. A. Peshkov, "Evaluation of the possibility to use composite material in the structure of the rocket stage cryogenic conical tank," *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, no. 3 (756), pp. 90-100, 2023, <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-3-90-100>.
- [9] Z. Wang, Y. Wang, S. Afshan, and J. Hjalmarsson, "A review of metallic tanks for H₂ storage with a view to application in future green shipping," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 9, pp. 6151-6179, 2021, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.168>.
- [10] Q. Cheng, R. Zhang, Z. Shi, and J. Lin, "Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 7, no. 2, pp. 269-284, 2024, <http://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.08.002>.
- [11] D. Chen *et al.*, "A review of the polymer for cryogenic application: Methods, mechanisms and perspectives," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 3, p. 320, 2021, <http://doi.org/10.3390/polym13030320>.
- [12] W. S. Park, S. W. Yoo, M. H. Kim, and J. M. Lee, "Strain-rate effects on the mechanical behavior of the AISI 300 series of austenitic stainless steel under cryogenic environments," *Materials and Design*, vol. 31, no. 8, pp. 3630-3640, 2010, <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.041>.
- [13] R. McLellan and C. Harkins, "Hydrogen interactions with metals," *Materials Science and Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 5-35, 1975, [http://doi.org/10.1016/0025-5416\(75\)90069-5](http://doi.org/10.1016/0025-5416(75)90069-5).
- [14] B. Sun, D. Wang, X. Lu, D. Wan, D. Ponge, and X. Zhang, "Current challenges and opportunities toward understanding hydrogen embrittlement mechanisms in advanced high-strength steels: a review," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 34, pp. 741-754, 2021, <http://doi.org/10.1007/s40195-021-01233-1>.
- [15] S. Prasanraj, "Advanced composite materials in cryogenic propellant tank," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 8, no. 12, 2019, <http://doi.org/10.17577/IJERTV8IS120284>.
- [16] D.-H. Lee, B. Sun, S. Lee, D. Ponge, E. A. Jäggle, and D. Raabe, "Comparative study of hydrogen embrittlement resistance between additively and conventionally manufactured 304L austenitic stainless steels," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 803, 2021, Art. no. 140499, <http://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140499>.
- [17] L. R. Queiroga, G. F. Marcolino, M. Santos, G. Rodrigues, C. E. dos Santos, and P. Brito, "Influence of machining parameters on surface roughness and susceptibility to hydrogen embrittlement of austenitic stainless steels," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 54, pp. 29027-29033, 2019, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.139>.

تحقق روی نحوه بهینه سازی اتصالات: بررسی تکنیک‌های اتصال برای بهینه‌سازی ترکیب مواد برای کاربردهای خاص مخازن کرایوژنیک، با ایجاد تعادل بین خواصی مانند وزن، استحکام و خواص حرارتی.

بررسی پتانسیل‌های ساخت افزایشی: بررسی پتانسیل تکنیک‌های ساخت افزایشی، مانند پرینت سه بعدی، برای ساخت ساختارهای پیچیده مخازن کرایوژنیک با خواص مطلوب و هزینه‌های تولید کمتر.

ارائه مدل‌های پیش‌بینی طول عمر مواد مورد استفاده: توسعه مدل‌های دقیق پیش‌بینی طول عمر بر اساس خواص مواد، شرایط عملیاتی و مکانیسم‌های تخریب برای ارزیابی قابلیت اطمینان طولانی‌مدت مخازن کرایوژنیک.

بررسی تکنیک‌های نظارت و تشخیص درجای عیوب: یکپارچه‌سازی سنسورها و سیستم‌های نظارتی در مخازن کرایوژنیک برای تشخیص نقص‌های احتمالی، نظارت بر تخریب مواد و امکان هشدار زودهنگام در شرایط بحرانی.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

مراجع

- [1] T. E. Noll *et al.*, "Technical findings, lessons learned, and recommendations resulting from the helios prototype vehicle mishap," in *NATO/RTO AVT-145 Workshop on Design Concepts, Processes and Criteria for UAV Structural Integrity*, USA, 2007. Available: <http://ntrs.nasa.gov/citations/20070022260>.
- [2] R. R. Ratnakar *et al.*, "Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH₂ storage and transportation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 47, pp. 24149-24168, 2021, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.025>.
- [3] G. Abumeri, D. Kosareo, and J. Roche, "Cryogenic composite tank design for next generation launch technology," in *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004, Paper 3390, <http://doi.org/10.2514/6.2004-3390>.
- [4] K. D. Timmerhaus, "Advances in Cryogenic Engineering [electronic resource]: Proceeding of the 1970 Cryogenic Engineering Conference," University of Colorado Boulder, Colorado, Boston, MA : Springer, 1970, <http://doi.org/10.1007/978-1-4757-0244-6>.
- [5] T. F. Johnson, D. W. Sleight, and R. A. Martin, "Structures and design phase I summary for the NASA composite cryotank technology demonstration project," in *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2013, Paper 1825, <http://doi.org/10.2514/6.2013-1825>.

- with B at cryogenic temperatures," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 611, pp. 45-57, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.075>.
- [32] Q. Sun and H. Gu, "Tensile and low-cycle fatigue behavior of commercially pure titanium and Ti-5Al-2.5 Sn alloy at 293 and 77 K," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 316, no. 1-2, pp. 80-86, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01249-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01249-7).
- [33] A. Ghisi and S. Mariani, "Mechanical characterization of Ti-5Al-2.5 Sn ELI alloy at cryogenic and room temperatures," *International Journal of Fracture*, vol. 146, pp. 61-77, 2007, <https://doi.org/10.1007/s10704-007-9140-z>.
- [34] D. Verstraete, P. Hendrick, P. Pilidis, and K. Ramsden, "Hydrogen fuel tanks for subsonic transport aircraft," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11085-11098, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.060>.
- [35] J. Schutz, "Properties of composite materials for cryogenic applications," *Cryogenics*, vol. 38, no. 1, pp. 3-12, 1998, [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(97\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00102-1).
- [36] T. Horiuchi and T. Ooi, "Cryogenic properties of composite materials," *Cryogenics*, vol. 35, no. 11, pp. 677-679, 1995, [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(95\)90887-L](https://doi.org/10.1016/0011-2275(95)90887-L).
- [37] O. Yano and H. Yamaoka, "Cryogenic properties of polymers," *Progress in Polymer Science*, vol. 20, no. 4, pp. 585-613, 1995, [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(95\)00003-X](https://doi.org/10.1016/0079-6700(95)00003-X).
- [38] J. Hohe *et al.*, "Performance of fiber reinforced materials under cryogenic conditions—A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 141, 2021, Art. no. 106226, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106226>.
- [39] A. Slifka and D. Smith, "Thermal expansion of an E-glass/vinyl ester composite from 4 to 293 K," *International Journal Of Thermophysics*, vol. 18, pp. 1249-1256, 1997, <https://doi.org/10.1007/BF02575259>.
- [40] Z. Sapi and R. Butler, "Properties of cryogenic and low temperature composite materials—A review," *Cryogenics*, vol. 111, 2020, Art. no. 103190, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103190>.
- [41] A. Gomez and H. Smith, "Liquid hydrogen fuel tanks for commercial aviation: Structural sizing and stress analysis," *Aerospace Science and Technology*, vol. 95, 2019, Art. no. 105438, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105438>.
- [42] R. Heydenreich, "Cryotanks in future vehicles," *Cryogenics*, vol. 38, no. 1, pp. 125-130, 1998, [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(97\)00122-7](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00122-7).
- [43] M. Nachtane *et al.*, "An overview of the recent advances in composite materials and artificial intelligence for hydrogen storage vessels design," [18] X. Xiuqing, A. Junwei, W. Chen, and N. Jing, "Study on the hydrogen embrittlement susceptibility of AISI 321 stainless steel," *Engineering Failure Analysis*, vol. 122, 2021, Art. no. 105212, <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105212>.
- [19] P. Duthil, "Material properties at low temperature," arXiv preprint arXiv:1501.07100, 2015, <http://doi.org/10.48550/arXiv.1501.07100>.
- [20] Y. Qiu, H. Yang, L. Tong, and L. Wang, "Research progress of cryogenic materials for storage and transportation of liquid hydrogen," *Metals*, vol. 11, no. 7, 2021, Art. no. 1101, <http://doi.org/10.3390/met11071101>.
- [21] Q. Xiao, Y. Xie, F. Hu, and C. Hu, "Current status and trends of low-temperature steel used in polar regions," *Materials*, vol. 17, no. 13, 2024, Art. no. 3117, <http://doi.org/10.3390/ma17133117>.
- [22] A. K. Jha, S. N. Murty, V. Diwakar, and K. S. Kumar, "Metallurgical analysis of cracking in weldment of propellant tank," *Engineering Failure Analysis*, vol. 10, no. 3, pp. 265-273, 2003, [http://doi.org/10.1016/S1350-6307\(02\)00073-0](http://doi.org/10.1016/S1350-6307(02)00073-0).
- [23] V. Viswanath, A. Asraff, P. Jayesh, S. M. Thomas, and R. Krishnakumar, "Structural integrity assessment of a propellant tank in presence of welding residual stresses," *Procedia Structural Integrity*, vol. 14, pp. 442-448, 2019, <http://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.054>.
- [24] M. Jariyaboon, A. Davenport, R. Ambat, B. Connolly, S. Williams, and D. Price, "The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024-T351," *Corrosion Science*, vol. 49, no. 2, pp. 877-909, 2007, <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.038>.
- [25] A. K. Jha, P. R. Narayanan, K. Sreeksumar, and P. Sinha, "Cracking of Al-4.5 Zn-1.5 Mg aluminium alloy propellant tank—A metallurgical investigation," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 2, pp. 562-570, 2010, <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.009>.
- [26] M. Moshtaghi, M. Safyari, and T. Hojo, "Effect of solution treatment temperature on grain boundary composition and environmental hydrogen embrittlement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy," *Vacuum*, vol. 184, 2021, Art. no. 109937, <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109937>.
- [27] Z. Liu, S. Xin, and Y. Zhao, "Research progress on the creep resistance of high-temperature titanium alloys: A review," *Metals*, vol. 13, no. 12, 2023, Art. no. 1975, <https://doi.org/10.3390/met13121975>.
- [28] H. E. Boyer, "Atlas of stress-strain curves," 1987, Available:https://books.google.com/books/about/Atlas_of_Stress_strain_Curves.html?id=up5KS9fd_pkC
- [29] A. Xu, H. Wan, and C. Liang, "Application status and development trend of low temperature titanium alloy," *Journal of Netshape Form Engineering*, vol. 12, pp. 145-156, 2020, <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20130409>.
- [30] Y. Li, S. Li, and Q. Yu, "Research review on cutting temperature and cutting vibration of titanium alloy," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 353: EDP Sciences, 2021, Paper 01017, <https://doi.org/10.1051/mateconf/202135301017>.
- [31] G. Singh, G. Bajargan, R. Datta, and U. Ramamurty, "Deformation and strength of Ti-6Al-4V alloyed

- vehicle," in *10th AIAA/NAL-NASDA-ISAS International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, Kyoto, Japan, 2001, Paper 1907, <https://doi.org/10.2514/6.2001-1907>.
- [48] K. Higuchi *et al.*, "Development and flight test of metal-lined CFRP cryogenic tank for reusable rocket," *Acta Astronautica*, vol. 57, no. 2-8, pp. 432-437, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2005.03.059>.
- [49] J. Guerrero, B. Hamilton, R. Burton, D. Crockett, and Z. Taylor, "Upper stage flight experiment (USFE) integral structure development effort," *Composite Structures*, vol. 66, no. 1-4, pp. 327-337, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.04.069>.
- [50] K. Mallick *et al.*, "An integrated systematic approach to linerless composite tank development," *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, vol. 5, pp. 3553-3569, 2005, <https://doi.org/10.2514/6.2005-2089>.
- Journal of Composites Science*, vol. 7, no. 3, 2023, Art. no. 119, <https://doi.org/10.3390/jcs7030119>.
- [44] J. Keyte, K. Pancholi, and J. Njuguna, "Recent developments in graphene oxide/epoxy carbon fiber-reinforced composites," *Frontiers in materials*, vol. 6, 2019, Art. no. 224, <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00224>.
- [45] K. Adeli, M. Nachtane, A. Faik, D. Saifaoui, and A. Boulezhar, "How green hydrogen and ammonia are revolutionizing the future of energy production: A comprehensive review of the latest developments and future prospects," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, 2023, Art. no. 8711, <https://doi.org/10.3390/app13158711>.
- [46] F. Bickley and R. J. Schwinghamer, "NASA experience with the shuttle external tank," in *National Manufacturing Week*, Chicago, 1999.
- [47] H. Yamakawa, K. Higuchi, T. Maruyama, and N. Kubota, "Flight evaluation of GN&C system and vertical landing dynamics of reusable rocket