

مروری بر انتقال حرارت در مدل‌های مختلف مخازن ذخیره‌سازی هیدریدهای فلزی

عبداله ایران خواه*، سهیلا سهرابی، مسعود خواجه نوری
دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، آزمایشگاه هیدروژن و پیل سوختی
دریافت: ۹۱/۰۹/۲۷ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۰

چکیده

در مقاله حاضر، مروری بر مهمترین پژوهش‌های انجام شده در سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۲ در مورد انتقال حرارت در مدل‌های مختلف مخازن ذخیره‌سازی هیدریدهای فلزی ارائه شده است. در هیدریدهای فلزی که به عنوان ذخیره‌ساز هیدروژن مطرح شده‌اند، جذب هیدروژن توسط فلز به صورت گرمازا انجام می‌گیرد، بنابراین مسئله انتقال حرارت در بهبود ذخیره‌سازی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله مدل‌های مختلف طراحی مخازن هیدرید فلزی که شامل سیستم‌های خنک‌کننده دارای لوله صاف، لوله‌های مارپیچ و پره‌دار می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شیوه‌های مختلف ذخیره هیدروژن بررسی شده است. طبق مطالعات انجام گرفته، استفاده از سیال خنک‌کننده در داخل بستر تاثیر بیشتری بر سرعت جذب خواهد داشت و در صورتی که این سیال در خارج بستر استفاده شود نیز باعث انتقال حرارت بیشتری نسبت به پره می‌شود.

کلمات کلیدی: هیدرید فلزی، ذخیره هیدروژن، واکنش گرمازا، انتقال حرارت، مخزن ذخیره

مقدمه

که به جذب شیمیایی معروف است. به دلیل ایمنی بالا، حجم کم‌تر و دانسیته نسبتاً بالای ذخیره هیدروژن در هیدریدهای فلزی که با سهولت نسبی دفع هیدروژن نیز همراه است، این مواد به عنوان ذخیره‌ساز هیدروژن دارای اهمیت می‌باشند [۲۱]. هیدروژن دانسیته بیشتری نسبت به بنزین دارد (حدود سه برابر) اما از نظر ذخیره‌سازی در یک خودرو در یک حجم یکسان از هر دو سوخت، محتوای انرژی هیدروژن حدود چهار

از چالش‌های اساسی در زمینه هیدروژن، ذخیره هیدروژن می‌باشد. هیدروژن یا به صورت مولکولی با پیوند ضعیف (عمدتاً واندروالسی) به سطح متصل می‌شود که به آن جذب فیزیکی گویند و در موادی مانند نانوساختارهای کربنی، ساختارهای آلی-فلزی و زئولیت‌ها انجام می‌گیرد و یا به صورت اتمی با پیوند قوی در مواد هیدریدی (ترکیبی و فلزی) جذب می‌شود

* Irankhah@kashanu.ac.ir

گرفته است. ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن در نانولوله‌های کربنی در حدود ۶۰٪-۳۰٪ گزارش شده است [۷]. ذخیره‌سازی در مواد دیگر با سطح بالا مانند زئولیت‌ها، برخی اکسیدهای فلزی و هیدرات‌ها اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]. کم‌هزینه بودن فرآیند ساخت این مواد در مقایسه با نانولوله‌های کربنی و کمتر بودن خطرات مربوط به ذخیره‌سازی هیدروژن در آن‌ها باعث توجه روز افزون پژوهشگران به این مواد شده است [۸ و ۳].

ترکیبات هیدروژن‌دار (هیدریدی) قابل شارژ

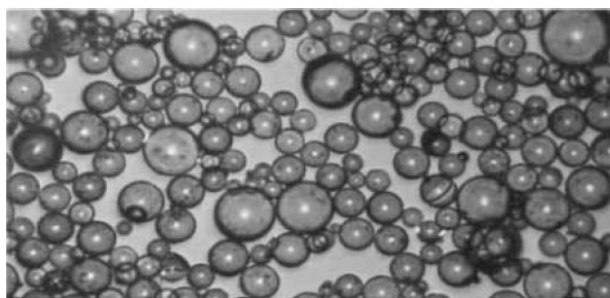
در حال حاضر هیچ ماده هیدروژن‌داری نیست که بتواند به عنوان یک ماده ذخیره‌ساز هیدروژن با انواع دیگر مواد ذخیره‌ساز هیدروژن رقابت کند (در جدول ۱ چند نمونه از این ترکیبات هیدروژن‌دار آورده شده است). بنابراین نیاز است که تکنیک‌های جدیدی به منظور افزایش ظرفیت جذب و دفع هیدروژن در این مواد توسعه یابد.

جدول ۱: چند نمونه از هیدریدهای متداول برای ذخیره هیدروژن [۹]

نوع هیدرید	دانسیتته ذخیره هیدروژن (wt% H ₂)	دما
LiAlH ₄	۱۰/۶	۱۹۰
NaAlH ₄	۷/۵	۱۰۰
MgAlH ₄	۹/۳	۱۴۰
CaAlH ₄	۷/۸	>۲۳۰

با وجودی که این ترکیبات ظرفیت ذخیره هیدروژن بالایی دارند ولی تاکنون کمتر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. دلیل اصلی این امر می‌تواند پایداری بیش از اندازه این ترکیبات باشد که همین امر باعث می‌شود که جداسازی هیدروژن از آنها به سختی صورت گیرد [۹]. هیدریدهای شیمیایی معمولاً به شکل نیمه مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توان آن را به راحتی پمپاژ کرد. در فرآیند تولید هیدروژن از هیدرولیز آب، از آنجایی که آزادسازی هیدروژن گرمازا است لذا نیاز به تامین گرمای اضافی نیست. در میان هیدریدهای شیمیایی، ترکیب هیدرید منگنز شاید بهترین عملکرد را داشته باشد [۱۰]. جذب

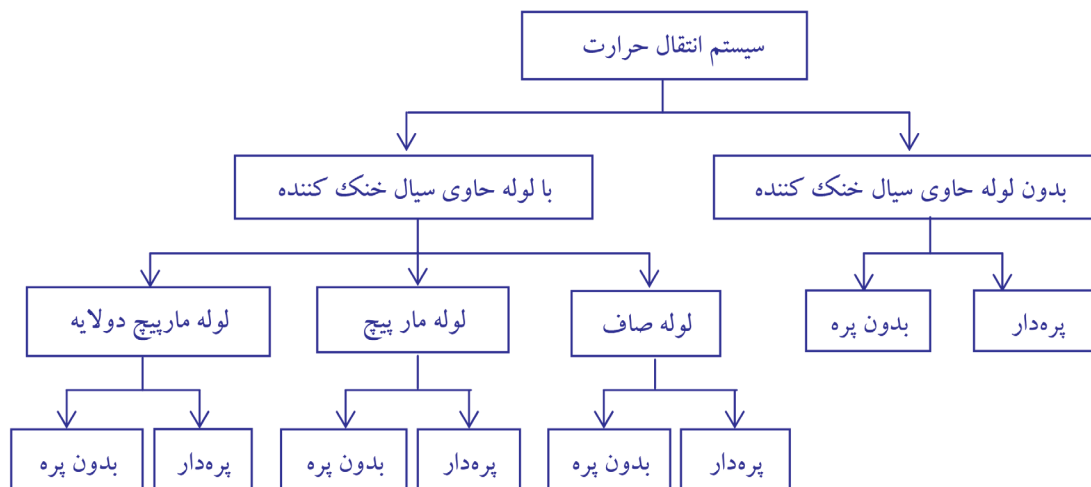
برابر کمتر از بنزین است. پیشرفت در روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن باعث توسعه روز افزون مصرف این سوخت خواهد شد. بسیاری از پژوهش‌های این صنعت اخیراً بر روی روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن صورت گرفته است [۳]. رایج‌ترین روش در ذخیره‌سازی هیدروژن، ذخیره آن به حالت گازی در تانک‌های فولادی و مخازن کامپوزیتی بسیار سبک است که فشارهای بالا را تحمل می‌کنند. مخازن کامپوزیتی در حال حاضر مزایای زیادی دارند: (۱) از نظر وزنی بسیار سبک‌تر از مخازن فولادی هستند. (۲) در برابر فشارهای بالا در حدود ۷۰۰-۳۵۰ bar مقاومت بالایی دارند. معایب آن عبارتند از: (۱) انرژی زیادی برای ذخیره هیدروژن با فشار بالا در این تانک‌ها لازم است (۲) مقاومت کمی در برابر تابش خورشید دارند [۴]. روش جدید دیگر برای ذخیره‌سازی هیدروژن استفاده از ریزحفره‌های شیشه‌ای است. ابتدا تحت دماهای بالا (۳۰۰°C) و در فشارهای بالا (۷۰۰-۳۵۰ bar) گاز هیدروژن به داخل حفرات شیشه که در حدود ۵۰ μm است ذخیره می‌شود. در مرحله بعد با کاهش فشار و دما به دمای محیط میتوان هیدروژن را از این مخازن به مخازن خودروها انتقال داد [۵].



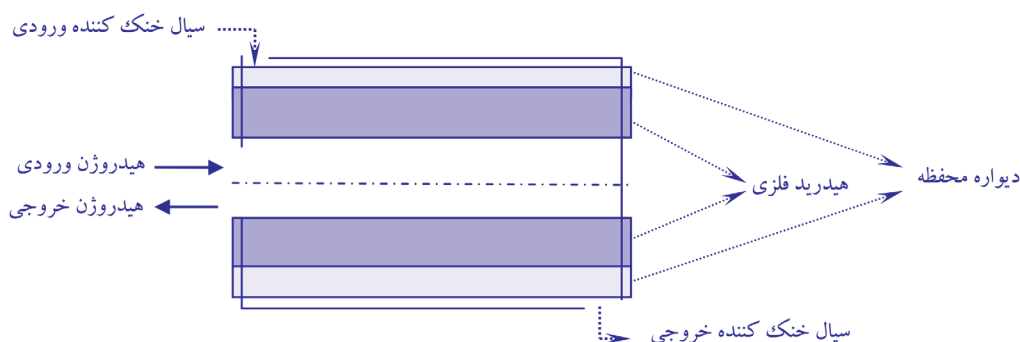
شکل ۱: میکرو حفره‌های شیشه‌ای برای ذخیره‌سازی هیدروژن

از چالش‌های این روش چگالی پایین ذخیره‌سازی هیدروژن است و همچنین فشارهای بالایی مورد نیاز است که هزینه‌های فرآیند را افزایش می‌دهد. پژوهش‌های زیادی در حال انجام است تا این معایب را برطرف سازد [۵ و ۶]. ذخیره‌سازی هیدروژن^۱ به کمک مواد با پایه کربنی (نانولوله‌های کربنی و نانوالیاف گرافیتی) روش دیگری می‌باشد که به علت وزن کم آن، مورد توجه قرار

1. H₂



شکل ۲: طراحی‌های مختلف سیستم خنک کننده مخزن هیدرید فلزی



شکل ۳: مدل ساده مخزن ذخیره هیدرید فلزی

نیز می‌توانند در بهبود ذخیره‌سازی موثر باشند [۱۳]. علاوه بر طراحی مخازن، جنس ماده مورد استفاده برای دیواره مخزن و ماده‌ای که برای تبادل بهتر حرارت استفاده می‌شود نیز موثر خواهد بود. در صورت استفاده از پره، نحوه قرارگیری آنها و فاصله پره‌ها از یکدیگر و همچنین طول و قطر پره نیز در بهبود انتقال حرارت موثر می‌باشد [۱۴ و ۱۵].

مدل‌های مختلف مخازن ذخیره هیدرید فلزی

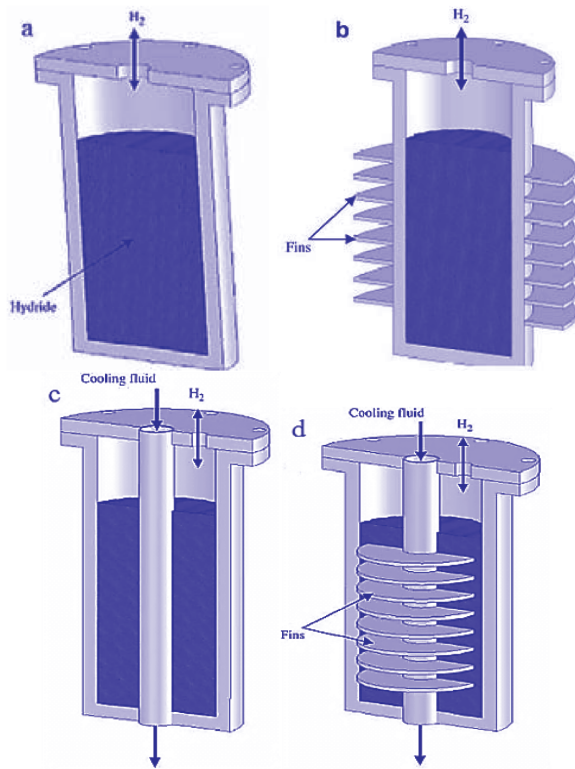
به‌طور کلی سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شامل ناحیه قرارگیری هیدرید فلزی و ناحیه عبور سیال خنک‌کننده می‌باشد [۱۶]. اسکری و همکارانش [۱۴ و ۱۷]، چهار مدل برای مخزن

هیدروژن در هیدریدهای فلزی، طبق واکنش زیر انجام می‌گیرد و طی آن مقداری حرارت آزاد می‌شود [۱۱].

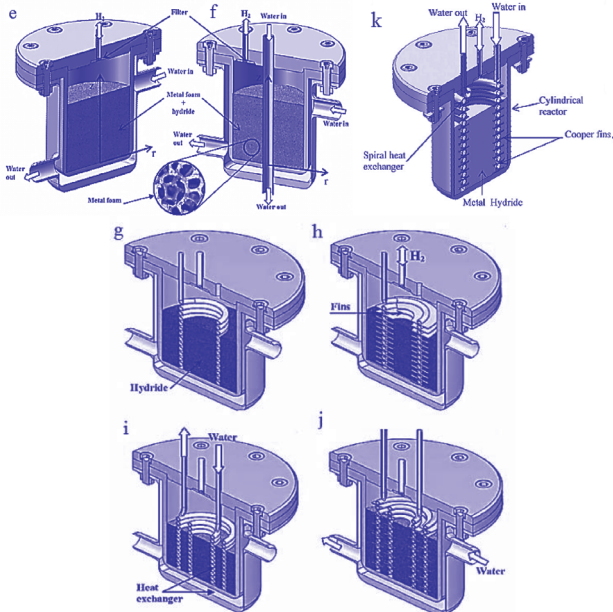


بنابراین میزان جذب در مخازن هیدرید فلزی به مقدار زیادی به انتقال حرارت و سیستم خنک‌سازی، مرتبط می‌باشد. برای افزایش میزان انتقال حرارت در بستر هیدرید فلزی باید شکل هندسی سیستم خنک‌کننده بهینه شود [۱۲]. در شکل ۲، طراحی‌های مختلفی که برای سیستم خنک‌سازی مخزن هیدرید فلزی مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است.

در ادامه انتقال حرارت در هر یک از موارد فوق بررسی شده و مقایسه صورت می‌گیرد. موادی که به عنوان مبادله‌گر حرارت در دیواره مخازن ذخیره مورد استفاده قرار می‌گیرند



شکل ۴: مدل‌هایی از طراحی مخازن هیدرید فلزی [۱۴]

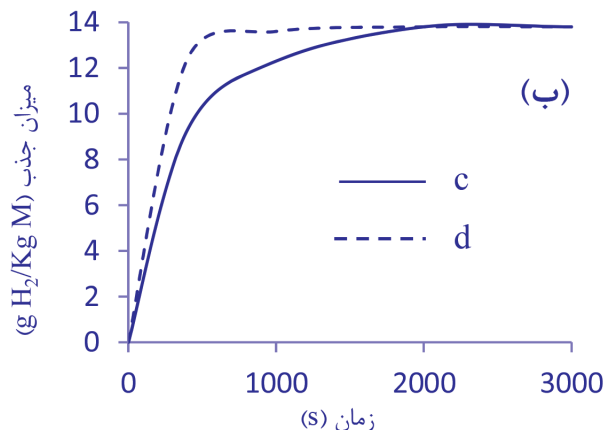
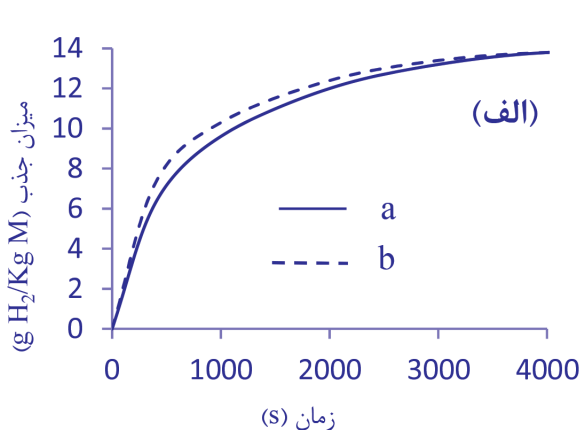


شکل ۵: مدل‌هایی از طراحی مخازن هیدرید فلزی [۱۲، ۱۳، ۱۹]

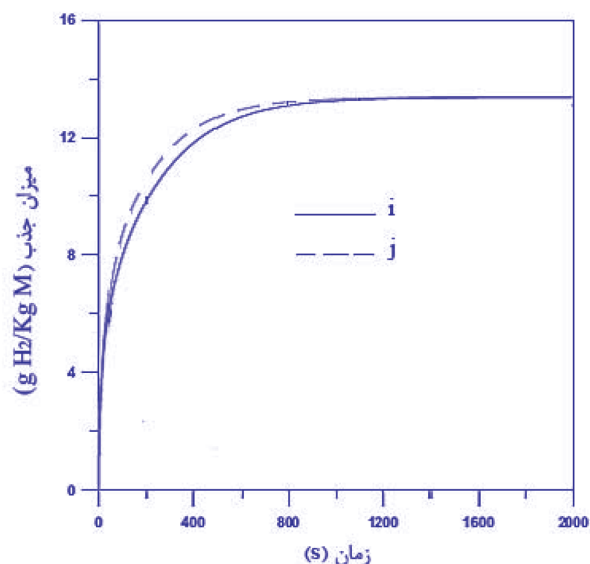
ذخیره ارائه کردند که در شکل ۴ نشان داده شده است. این مدل‌ها شامل؛ ۱- مخزن استوانه‌ای (شکل ۴-ا) ۲- مخزن استوانه‌ای شامل پره‌های خارجی (شکل ۴-ب) ۳- مخزن استوانه‌ای شامل لوله هم‌مرکز حاوی سیال خنک‌کننده (شکل ۴-ج) ۴- مخزن استوانه‌ای شامل لوله هم‌مرکز حاوی سیال خنک‌کننده و پره‌های داخلی (شکل ۴-د)، می‌باشد.

ملولی و همکارانش [۱۲ و ۱۳]، انتقال حرارت را در مخازن ذخیره هیدرید فلزی با شش مدلی که در شکل ۵ نشان داده شده است بررسی کردند. ۱- دو استوانه با جریان سیال خنک‌کننده در استوانه خارجی و حاوی فوم آلومینیوم در استوانه داخلی (شکل ۵-ه) ۲- دو استوانه با جریان سیال خنک‌کننده در استوانه خارجی و لوله هم‌مرکز داخلی حاوی سیال خنک‌کننده و حاوی فوم آلومینیوم در استوانه داخلی (شکل ۵-ف) ۳- دو استوانه با جریان سیال خنک‌کننده در استوانه خارجی و یک لوله مارپیچ (شکل ۵-گ) ۴- دو استوانه با جریان سیال خنک‌کننده در استوانه خارجی و دارای پره (شکل ۵-ه) ۵- دو استوانه با جریان سیال خنک‌کننده در استوانه خارجی و حاوی دو لوله مارپیچ (شکل ۵-ی) ۶- دو استوانه با جریان سیال خنک‌کننده در استوانه خارجی و حاوی دو لوله مارپیچ و دارای پره (شکل ۵-ج). کاپلن [۱۸]، مقایسه‌ای بین میزان انتقال حرارت در مخازن هیدرید فلزی که برای تبادل حرارت از سیال خنک‌کننده (آب) و یا پره استفاده کرده‌اند (شکل‌های ۴-ب و ۵-ه)، انجام داد. داهو و همکارانش [۱۹ و ۲۰]، انتقال حرارت در مخزن هیدرید فلزی شامل دو استوانه که پوسته، حاوی سیال خنک‌کننده است و همچنین در مخزنی که یک استوانه با لوله مارپیچ حاوی سیال خنک‌کننده و دارای پره می‌باشد، بررسی کردند، همچنین میزان تبادل حرارت در حالتی که جریان سیال خنک‌کننده در اطراف هیدرید فلزی جریان دارد را با حالتی که جریان سیال خنک‌کننده از داخل بستر هیدرید فلزی عبور می‌کند مقایسه کردند (شکل‌های ۵-ه و ۵-ک).

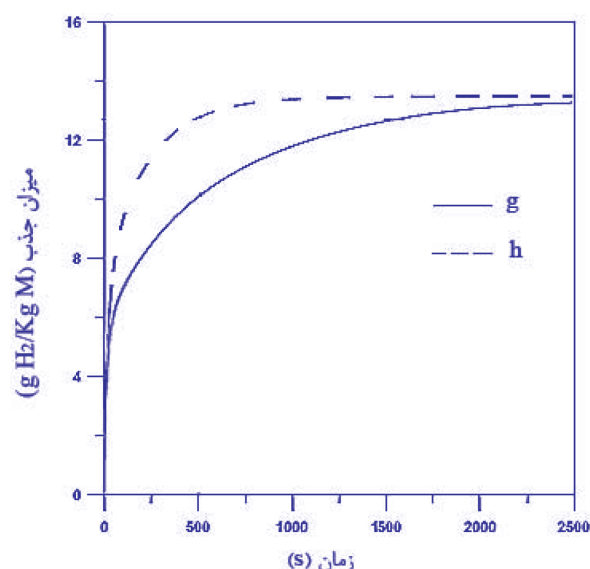
ماده‌ای که جذب آن بررسی می‌شود آلیاژ LaNi_5 است. پودر ابتدا در آسیای گلوله‌ای خرد شده و سپس در داخل گلاباکس (برای جلوگیری از اکسیداسیون آن)، به راکتور



شکل ۶: مقایسه سرعت جذب در مدل‌های a, b, c, d در $T=293\text{ K}$ و $P=8\text{ bar}$ [۱۴]



شکل ۸: مقایسه سرعت جذب در مدل‌های i و j در $T=297\text{ K}$ و $P=10\text{ bar}$ [۱۲]



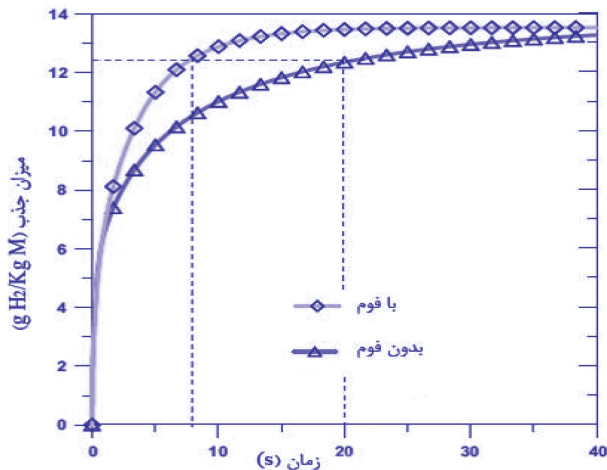
شکل ۷: مقایسه سرعت جذب در مدل‌های g و h در $T=297\text{ K}$ و $P=10\text{ bar}$ [۱۲]

مطالعه بر روی مدل‌های مختلف مخازن هیدریدی با پره و بدون پره صورت گرفته است که نتایج آن در نمودارهای ۶ تا ۸ نشان داده است.

همان‌طور که از نمودارهای ۶ تا ۸ مشخص است، سرعت جذب در تمامی مدل‌ها با وجود پره افزایش یافته است که دلیل این امر را می‌توان به میزان انتقال حرارت بیشتری که توسط پره صورت می‌گیرد نسبت داد. از مقایسه نمودارهای

(مخزن ذخیره) منتقل شده و راکتور نیز برای بررسی میزان و سرعت جذب در دما و فشار مورد نظر (برای هر نمونه در نمودار مربوطه ذکر شده است) به دستگاه سیورت متصل می‌شود. قبل از انجام آزمایشات جذب برای فعال‌سازی پودر، چندین مرتبه عملیات جذب و دفع و همچنین گاززدایی از پودر انجام می‌گیرد.

تأثیر پره بر سرعت جذب در هیدرید فلزی



شکل ۹: مقایسه سرعت جذب در مخزن با فوم و بدون فوم فلزی
 $T=293\text{ K}$ و $P=10\text{ bar}$ و $\Delta T=3\text{ K}$

مساحت سطح بر واحد حجم در دسترس، بیشتر می‌شود (شکل ۹) [۱۳]. فوم فلزی باعث تسریع انتقال حرارت از پودر هیدرید به سیال خنک‌کننده می‌شود. با بررسی اثر جنس فوم‌های مختلف مانند آلومینیوم، مس و روی، نشان داده شده است که فوم آلومینیوم به دلیل داشتن بالاترین ضریب انتقال حرارت، بیشترین تاثیر را بر سرعت جذب دارد. شایان ذکر است که لازمه تاثیر مثبت فوم فلزی بر سرعت جذب هیدروژن در مخزن ذخیره هیدرید، استفاده از لوله حاوی سیال خنک‌کننده مرکزی در مخزن می‌باشد.

انتقال حرارت داخل و خارج بستر هیدرید

مطالعه‌ای که بر روی مدل‌های e و k انجام گرفت، نشان داد در حالتی که انتقال حرارت در داخل بستر هیدرید انجام گیرد نسبت به خارج بستر، تاثیر بیشتری بر میزان و سرعت جذب خواهد داشت (شکل ۱۰) [۱۹]. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که جذب ۴ درصد وزنی هیدروژن در مدل k که از پره و سیال خنک‌کننده هم‌زمان در داخل بستر هیدرید استفاده شده است، در زمان ۱۰۰۰ ثانیه و همین مقدار جذب در مدل e که از سیال خنک‌کننده در خارج بستر هیدرید استفاده شده، در زمان ۳۷۰۰ ثانیه بدست آمده است. دلیل این امر را می‌توان به تماس مستقیم پره با پودر هیدرید فلزی و افزایش سطح تبادل حرارت

۶-الف و ۶-ب مشخص است که وجود پره در مدل d که دارای لوله حاوی سیال خنک‌کننده می‌باشد، تاثیر به مراتب بیشتری نسبت به مدل b دارد. قرار گرفتن پره داخل مخزن به دلیل تماس مستقیم پره با هیدرید و لوله حاوی سیال خنک‌کننده و همچنین حذف مقاومت دیواره مخزن ذخیره، سرعت انتقال حرارت را بهبود بخشیده و در نتیجه سرعت جذب هیدروژن را نیز افزایش داده است. از مقایسه نمودارهای ۷ و ۸ نیز می‌توان دریافت که وجود پره در مدل g که به مدل h منجر می‌شود نسبت به وجود پره در مدل i که به مدل j منجر می‌شود، بهبود بیشتری در عملکرد تبادل حرارت نشان می‌دهد، البته در نهایت مدل j نسبت به مدل h انتقال حرارت بیشتر و در نتیجه سرعت جذب بیشتری را نشان می‌دهد. مساحت سطح انتقال حرارت بر واحد حجم در دسترس مخزن، در صورت استفاده از دو لوله مارپیچ (شکل‌های ۵-i و ۵-j) بیشتر می‌شود که این امر منجر به افزایش سرعت انتقال حرارت شده و عملکرد هیدروژناسیون را بهبود می‌بخشد. اگرچه افزایش تعداد لوله‌های مارپیچ ممکن است باعث افزایش ابعاد مخزن ذخیره گردد که در این صورت اثر مثبت آن را از بین خواهد برد. ذکر این نکته ضروری است که در رابطه با عملکرد پره، قطر، جنس [۱۴]، ضخامت، طول، فاصله بین پرها و نحوه قرار گرفتن پرها نسبت به هم نیز بر سرعت جذب اثرگذار می‌باشند [۲۱]. بدین ترتیب با افزایش طول پره، کاهش فاصله بین پرها، افزایش ضخامت پره، میزان انتقال حرارت بیشتر شده که در نتیجه باعث افزایش سرعت جذب هیدرون توسط هیدرید می‌شود [۱۲].

تاثیر فوم فلزی بر سرعت جذب هیدرید فلزی

فوم فلزی به علت تراکم کم، سطح زیاد و ساختاری با مقاومت بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بافت فلزی را می‌توان از مواد جامد با رسانایی بالای حرارتی مانند آلومینیوم، مس و روی نیز فراهم کرد. استفاده از فوم فلزی در مخزن هیدرید فلزی نشان داد که برای رسیدن به ۹۰٪ از کل ذخیره هیدروژن حدود ۶۰٪ بهبود زمانی مشاهده می‌شود و هرچه قطر حفره در فوم فلزی کوچکتر باشد، انتقال حرارت به علت افزایش

بودن دمای آب از دمای محیط منجر به اختلاف دمای بیشتر میان هیدرید و سیال می‌شود و از این طریق به تبادل بیشتر حرارت و در نهایت به میزان و سرعت جذب بیشتر کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

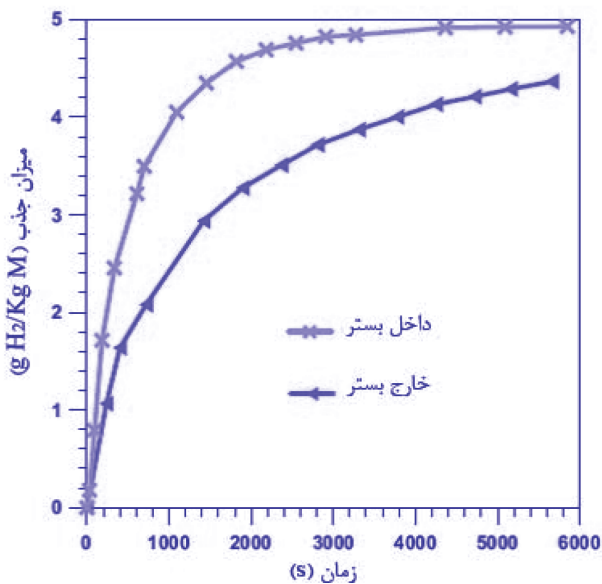
طبق مطالعات انجام گرفته نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد؛

- پره با افزایش انتقال حرارت به سرعت بیشتر جذب هیدروژن توسط هیدرید فلزی کمک می‌کند و در صورتی که در داخل بستر هیدرید و به همراه سیال خنک‌کننده استفاده شود این اثر بیشتر نیز خواهد شد. البته در مدل‌هایی که از چند لوله مارپیچ داخل بستر هیدرید استفاده می‌شود اثر پره چندان قابل توجه نخواهد بود.

- فوم فلزی با رسانایی بالای حرارتی و تراکم کم، به دلیل افزایش مساحت سطح، انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد و در نتیجه باعث افزایش سرعت جذب می‌شود.

- انتقال حرارت داخل بستر هیدرید، به علت تبادل حرارت مستقیم میان سیال و پودر هیدرید، تاثیر به مراتب بیشتری بر مقدار و سرعت جذب هیدروژن خواهد داشت.

- بررسی‌ها نشان داده است که اگر انتقال حرارت خارج از بستر هیدرید انجام گیرد، در صورت استفاده از سیال خنک‌کننده در مقایسه با پره، به دلیل ایجاد اختلاف دمای بیشتر، نتیجه مطلوب‌تری در طی هیدروژناسیون حاصل می‌شود.



شکل ۱۰: مقایسه میزان جذب در مدل‌های e و k، $T=297K$ ، $P=10\text{ bar}$ [۱۹]

نسبت داد که منجر به افزایش میزان و سرعت جذب شده است. همان‌طور که ذکر شد برای افزایش تبادل حرارت در مخازن هیدرید فلزی از یک سیال خنک‌کننده استفاده گردیده است که برای این امر از لوله‌ای داخل بستر هیدرید و یا از یک پوسته حاوی سیال خنک‌کننده استفاده شد. راه دیگر برای افزایش میزان انتقال حرارت استفاده از پره است.

کاپلن مقایسه‌ای بر روی مدل‌های b و e انجام و نشان داد که در صورت استفاده از آب به عنوان سیال خنک‌کننده، میزان افزایش دما در داخل مخزن هیدرید کمتر خواهد بود و این نشان می‌دهد که تبادل حرارت بیشتری صورت می‌گیرد [۱۸]. کمتر

منابع

1. A.J. Maeland, Recent advances in hydride chemistry, chap. 18, 2001, pp.531-556.
2. R.J. Press, Introduction to hydrogen technology, chap. 3, John Wiley & Sons. Inc, Hoboken, 2009, pp.173-194.
3. US Department Of Energy - Hydrogen Program. [Accessed August 2012]. Available from <http://www.hydrogen.energy.gov> Hydrogen production: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/> Hydrogen delivery: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/delivery/> Hydrogen storage: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/> Safety, codes and standards: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/codes/>

4. National Renewable Energy Laboratory: learning about renewable energy. Hydrogen basics, [Accessed August 2009]. Available from http://www.nrel.gov/learning/eds_hydrogen.
5. R. Teitel, Hydrogen storage in glass microspheres, Brookhaven National Laboratories Report 51439, 1981.
6. W. Burmeister, Hydrogen project at Munich airport, 2003 [accessed August 2009]. Available from http://www.ieahia.org/pdfs/munich_airport.pdf
7. Hydrogen production and storage, R&D Priorities and Gaps, International Energy Agency, Hydrogen Implementing Agreement, 2006 [accessed August 2009]. Available from <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf>
8. A. Gromis, California fuel cell partnership CaFCP. IEA - Hydrogen Implementation Agreement, 2004 [accessed August 2009]. Available from http://www.ieahia.org/pdfs/cafcpc_case_study.pdf
9. L. Schlapbach, Hydrogen storage materials for mobile applications, Nature, Vol. 414, 2001, pp.353-358.
10. M.H. Maack, Ecological city transport system. IEA-Hydrogen Implementation Agreement, Icelandic New Energy, 2006 [accessed August 2009]. Available from <http://www.ieahia.org/pdfs/ECTOS.pdf>
11. H. Xin, et al, Coal gasification and its applications, chap 8, 2010, pp.157-245.
12. S. Mellouli, et al, Numerical simulation of heat and mass transfer in metal hydride hydrogen storage tanks for fuel cell vehicles, Int J of Hydrogen Energy, Vol.35, 2010, pp.1693-1705.
13. H. Dhaou, et al, Hydrogen storage in metal hydride tanks equipped with metal foam heat exchanger, Vol.34, 2009, pp.9393-9401.
14. F. Askri, Optimization of hydrogen storage in metal-hydride tanks, Int J. of Hydrogen Energy, Vol.34, 2009, pp.897-905.
15. G. Sandstede, Moderne Elektrolyseverfahren für die Wasserstoff-Technologie, Chemie Ingenieur Technik, Vol. 61, 1989, pp.349-442.
16. M. Gambin, Numerical analysis and performance assessment of metal hydride-based hydrogen storage systems, Int J of Hydrogen Energy, Vol.33, 2008, pp.6178-6187.
17. Qystein Ulleberg. Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems. PhD dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998.
18. Y. Kaplan, Effect of design parameters on enhancement of hydrogen charging in metal hydride reactors, Int J of Hydrogen Energy, Vol.34, 2009, pp.2288-2294.
19. H. Dhaou, et al, Experimental study of a metal hydride vessel based on a finned spiral heat exchanger, Int J of Hydrogen Energy, Vol.35, 2010, pp.1674-1680.
20. G. Kyriakarakos, et al, Polygeneration microgrids: a viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel, Appl Energy, Vol. 88, 2011, pp.4517-26.
21. P. Jena, Materials for hydrogen storage: past, present and future. J Phys Chem Lett, Vol. 2, 2012.