



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 1-21
2022

DOI:

10.22034/jssta.2022.323217.1045

Article Info

Received: 2022-1-5
Accepted: 2022-10-18

Keywords

Iridium Nanoparticles,
Catalyst, Weight percentages,
Catalyst Activity

How to Cite this article

Changes in iridium catalyst activity with different amounts of nanoparticles

Zahra Amirsardari^{1*}, Babak Afzali², Mohammad Reza Amirsoleimani³

^{1*} Space Transportation Research Institute, Iranian space research center, Tehran, Iran

z.amirsardari@isrc.ac.ir

² Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

b.afzali@isrc.ac.ir

³ Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

mr.amirsoleimani@isrc.ac.ir

Abstract

To discuss the potential effect of iridium (Ir) nanoparticles as an active loaded in atmospheric conditions, we prepared a series of catalysts with the same active phase, but different contents of iridium (10, 15, and 20% by weight) on gamma-alumina for decomposition of hydrazine. The performance of catalyst nanoparticles was better with 15wt% and 20wt% of the Ir particles, and also the selectivity to hydrogen was about 27%. An increase in the reaction rate from 181 h^{-1} to 218 h^{-1} was observed in loading 15% by weight of iridium particles due to the good dispersion of the active phases by preventing surface agglomeration. Therefore, as a satisfactory result of this investigation, it was found that Ir catalysts with different weight percentage (15wt% and 20wt%) show the same performance against the activity and selectivity to hydrogen, and are suitable substitutes for each other. Using a catalyst with a lower weight percentage of the active phase and high activity is economically acceptable due to its low cost.



دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۲۱-۱
بایبوز و زمستان ۱۴۰۱

DOI:

10.22034/jssta.2022.323217.1045

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

واژه‌های کلیدی

نانوذرات ایریدیم، کاتالیست،
درصدهای وزنی، فعالیت کاتالیستی

نحوه استناد به این مقاله

تغییرات فعالیت کاتالیست ایریدیم با مقادیر مختلف نانوذرات

زهرا امیرسرداری*^۱، بابک افضلی^۲، محمدرضا امیرسلیمانی^۳

* نویسنده مسئول

۱- پژوهشکده سامانه‌های حمل‌ونقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران- z.amirsardari@isrc.ac.ir

۲- پژوهشکده سامانه‌های حمل‌ونقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران- b.afzali@isrc.ac.ir

۳- پژوهشکده سامانه‌های حمل‌ونقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران- mr.amirsoleimani@isrc.ac.ir

چکیده

برای بررسی میزان اثر نانوذرات ایریدیم (Ir) به عنوان فاز فعال بارگذاری شده در شرایط اتمسفری، کاتالیست‌هایی با حامل یکسان، اما محتوای متفاوت نمک ایریدیم (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) بر روی پایه‌های گرانولی گاما آلومینا به منظور تجزیه هیدرازین تهیه کردیم. عملکرد نانوذرات کاتالیستی هنگام استفاده از ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی ذرات ایریدیم بهتر بود و هم‌چنین گزینش‌پذیری به هیدروژن حدود ۲۷ درصد شد. افزایش سرعت واکنش از ۱۸۱ تا ۲۱۸ بر ساعت در بارگذاری ۱۵ درصد وزنی ذرات ایریدیم به دلیل پراکندگی خوب فازهای فعال با جلوگیری از کلوخه شدن سطح مشاهده شد. بنابراین، به عنوان یک نتیجه رضایت‌بخش از این بررسی مشخص شد که کاتالیست‌های ایریدیم با درصد وزنی متفاوت (۱۵ و ۲۰ درصد وزنی)، عملکردی یکسان در برابر فعالیت و سرعت گزینش‌پذیری به هیدروژن از خود نشان می‌دهند و جایگزین مناسب برای یکدیگر هستند. استفاده از کاتالیزوری با درصد وزنی کم‌تر فاز فعال و فعالیت زیاد به دلیل هزینه کم از نظر اقتصادی قابل قبول است.

کاتالیست ناهمگن شامل فاز فعال است که مسئول فعالیت کاتالیست بوده و اهمیت ویژه‌ای دارد. بخش دوم کاتالیست شامل پایه است: پایه موادی هستند که بدنه کاتالیست را تشکیل داده و ترکیبات فعال روی آن‌ها قرار می‌گیرند که در اغلب موارد فعالیت کاتالیستی ندارند. فعالیت کاتالیست به خواص فیزیکی و ساختمانی آن بستگی دارد که این خواص مستقیماً با خواص فیزیکی و ساختمانی پایه کاتالیست مرتبط است. ساختار حفره‌ها، نحوه توزیع اندازه و حجم حفره‌ها، تعیین‌کننده سطح ویژه پایه و در نهایت کاتالیست است [۱]. آلومینا یک ماده اولیه سرامیکی است که ضمن داشتن خواص بسیار منحصربه‌فرد، نسبتاً فراوان و ارزان است. دلیل دیگر اهمیت آلومینا ناشی از پایین بودن دمای تف جوشی^۱ آن نسبت به سایر سرامیک‌های مهندسی است که کاربرد صنعتی آن را مقرون‌به‌صرفه می‌سازد. در ضمن به همین دلیل آلومینا بیش از سایر سرامیک‌های مهندسی مورد بررسی تئوری قرار گرفته و خواص مختلف آن به عنوان یک ماده کلاسیک مدل‌سازی شده است. آلومینای فعال شده به طور وسیعی در ساخت مواد جاذب و کاتالیست‌های دارای سطح بزرگ، ساختمان متخلخل و فعالیت شیمیایی سطحی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلومینای فعال شده از آب‌زدایی آلومیناهای هیدراته مختلف از طریق کنترل حرارت به دست می‌آید [۲]. فعالیت کاتالیست اغلب تابعی از سرعت نفوذ و اکسیددهنده‌ها و فرآورده‌ها به داخل و خارج از حفره‌ها است؛ بنابراین افزایش اندازه حفره‌ها موجب سهولت نفوذ و اکسیددهنده‌ها به درون حفره‌ها و خروج فرآورده‌ها از درون آن‌ها و نهایتاً موجب افزایش فعالیت کاتالیستی خواهد شد. فعالیت یک کاتالیست فقط به اندازه حفره‌های پایه کاتالیست بستگی ندارد بلکه تابعی از سطح ویژه و مراکز فعال کاتالیست نیز است؛ بنابراین باید کاتالیست دارای تعداد زیادی حفره باشد تا سطح ویژه و مؤثر برای انجام واکنش را فراهم کند. هر یک از دستگاه‌ها باید با کاتالیست خاصی همراه باشد تا بیش‌ترین فعالیت و پایداری را داشته باشد [۳]. پایداری بدون از دست دادن فعالیت، یکی از ویژگی‌های اصلی کاتالیست است که بر

طول عمر آن تأثیر می‌گذارد [۴]. مواد با هدلیت حرارتی بالا و مقاوم در برابر حرارت در ساختار یا بخشی از کاتالیست‌ها، نقش مهمی در طول عمر سیستم دارند [۵-۷]. بیش‌تر محققان از جمله پاکدهی و همکاران [۸]، در این زمینه نشان دادند که افزودن نیکل به ایریدیم تنها سبب بهبود خواص گزینش‌پذیری هیدروژن می‌شود. اما افزودن نیکل در تحقیق گروه سینگ^۲ و همکاران [۹] باعث کاهش سرعت واکنش تجزیه شد، بنابراین افزودن نیکل به آن برای تجزیه سوخت مناسب نیست. فیردوس^۳ و همکاران [۱۰] نشان دادند که کاتالیست کبالت همراه با ایریدیم برای مواد ذخیره‌سازی هیدروژن مناسب است. از سوی دیگر، شروع واکنش تجزیه ایریدیم خود به خود است، در حالی که، سایر کاتالیست‌ها به یک آغازگر نیاز دارند. مطالعات اندکی بر روی کاتالیست ایریدیم انجام شده، زیرا کاتالیست تجاری آن در ایالات متحده تولید می‌شود و بیش‌تر مطالعات بر روی این کاتالیست همراه با یک فاز فعال دیگر برای اهدافی متفاوت مانند وسایل ذخیره هیدروژن بوده است. ایریدیم به تنهایی سرعت بالایی در تجزیه هیدرازین دارد و باید موارد کنترلی بسیاری در این کاتالیست بررسی شود. در شرایط کاری کاتالیست، واکنش در گرانول‌ها^۴ می‌تواند ترک ایجاد کند [۱۱]. در کاتالیست‌های متخلخل مبتنی بر آلومینا، به دلیل هدلیت حرارتی کم، گرادیان دما ایجاد می‌شود. رسانایی حرارتی بالاتر به دلیل افزایش بارگذاری نانوذرات باعث انتشار سریع‌تر گرما می‌شود که از غلظت دما و ترک خوردن بدون کاهش قابل توجه در سطح ویژه جلوگیری می‌کند [۱۲-۱۵]. با کنترل بارگذاری نانوذرات واقع در داخل منافذ آلومینا، می‌توان استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر تنش را بهینه کرد و سرعت واکنش کاتالیستی را به میزان مطلوب تغییر داد [۱۶، ۱۷]. با افزایش نانوذرات، غلظت محلی بالایی از محصولات روی سطح ایجاد می‌شود که منجر به گرادیان اسمزی^۵ و سرعت سیال می‌شود [۱۸-۲۱]. کاتالیست، یکی از چالش‌های اصلی در تست‌ها محسوب می‌شود. با توجه به فشارهای حرارتی و مکانیکی وارد بر کاتالیست، ایجاد ترک در دانه‌های کاتالیست و در نهایت خرد شدن حاصل می‌شود، بنابراین، تهیه این کاتالیست دشوار خواهد بود.

⁴ . Granules

⁵ . Osmotic gradient

¹ Sintering

² . Singh

³ . Firdous

این عملکرد نسبتاً سریع است، اگرچه توسط حضور هوای پنهان شده در پایه از سرعت کاسته می‌شود. حداکثر مقدار ماده که می‌تواند وارد شود، به حلالیت نمک در حلالش و حجم تخلخل پایه بستگی دارد. محلول فلزی و پایه در دمای ۵۰-۶۰ درجه سانتی-گراد قرار می‌گیرد تا محلول تبخیر و خشک شود. بارگذاری کاتالیست‌های ایریدیم در ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی پایه کنترل شد. پس از رسوب‌دهی ایریدیم، کاتالیست‌ها در آن تحت خلأ در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت کلسینه شدند. نهایتاً، احیا در اتمسفر H_2 برای کاتالیست‌ها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به تشکیل بلورهای کوچک ایریدیم شد. کاتالیست‌ها برای تجزیه هیدرازین مونوهیدرات ($N_2H_4 \cdot H_2O$)، Merck) استفاده شدند.

ریزساختارهای نانوذرات ایریدیم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM، MIRA3 Tescan) مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای مطالعه مساحت سطح و ساختار حفره می‌توان از آنالیز BET استفاده کرد. تعیین مشخصه پارامترهای ساختاری مربوط به حفرات در جامدها توسط اندازه‌گیری ایزوترم‌های جذب-دفع است که حجم گاز جذب شده (نیترژن) به عنوان تابعی از فشار جزئی‌اش بیان می‌شود. به منظور آماده‌سازی و خشک کردن مواد قبل از اندازه‌گیری و اطمینان از حذف بخار آب، دی اکسید کربن و یا سایر مولکول‌هایی که ممکن است حجم حفره‌های ماده را اشغال کرده باشند، نمونه چندین ساعت در دمای بالا قرار می‌گیرد. سطح کاتالیست‌ها بر اساس روش بررسی میزان تخلخل (BET, MicrotracBel Corp)، با آماده‌سازی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر آرگون به مدت ۵ ساعت اندازه‌گیری شد. فعالیت‌های کاتالیست‌های ایریدیم با اندازه‌گیری مقدار گازی که از تجزیه هیدرازین مونوهیدرات در یک راکتور آزمایشگاهی تولید می‌شود، تعیین شد.

۲- یافته‌ها

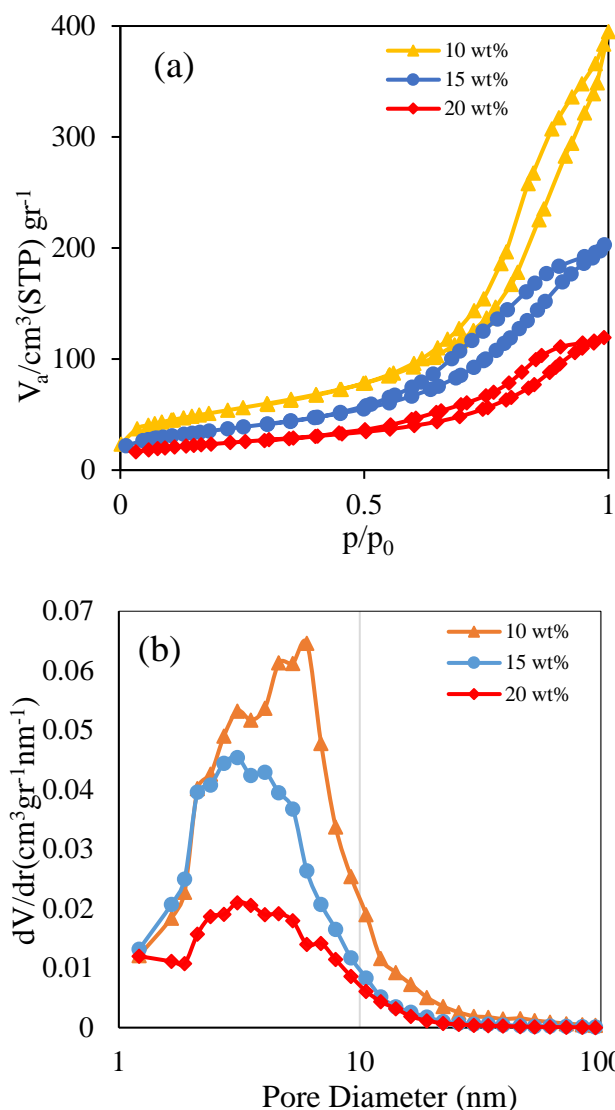
با استفاده از آنالیز سطح ایزوترم، جذب به دست می‌آید. برای این منظور، جذب نیترژن در دمای نقطه جوش نیترژن مایع انجام می‌گیرد. بسته به بافت و ترکیب جامد متخلخل، شکل ایزوترم‌های جذب متفاوت است. مقایسه منحنی نمونه‌های ساخته

کاتالیست‌های تجاری برای تجزیه هیدرازین، S-405 است که معمولاً هر مکانی در دنیا که نیاز به استفاده از این نوع کاتالیست است، خریداری و استفاده می‌شود. به این علت معمولاً مطالعات کم‌تری بر روی پارامترهای کاتالیست تجزیه هیدرازین انجام شده است. استفاده از بارگذاری‌های مختلف ایریدیم بر روی یک تکیه‌گاه می‌تواند تلاش‌های متعددی برای جایگزینی کاتالیست‌ها با کاتالیست‌های اقتصادی‌تر برای اهداف مختلف مانند دوره زمانی یا اصلاح ساختارهای کاتالیست در مقیاس آزمایشگاهی باشد. برای زمان‌های مختلف عمر (سد سیستم عمر کوتاه‌میا طولانی)، در نظر گرفتن هزینه کاتالیست قابل توجه است [۲۲]. به عنوان روشی برای بهینه‌سازی طراحی، درصد وزن کم کاتالیست‌ها برای اصلاح سد سیستم به منظور کاهش هزینه کاتالیست در پژوهش‌های امروزی اجرا می‌شود.

هدف از تحقیق حاضر، اصلاح فعالیت و سرعت واکنش کاتالیست‌های ایریدیم در برابر محتویات بارگذاری متفاوت (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) است. پراکندگی و تغییرات اندازه ذرات، مؤثرترین عوامل کاتالیست در نتیجه این تحقیق بود. بایک رویکرد اقتصادی‌تر با فعالیت مناسب در بارگذاری کم ایریدیم، کاتالیست می‌تواند در فرایند واکنش استفاده شود.

۲- مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در تهیه کاتالیست ایریدیم (Ir)، نمک دی‌هیدروژن هگزا کلروایریدات هیدرات ($H_2IrCl_6 \cdot xH_2O$)، Aldrich Sigma با خلوص ۹۹ درصد و گرانول‌های گاما آلومینا ($\gamma-Al_2O_3$)، سطح ویژه برابر با $160 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ، حجم حفرات $0.51 \text{ cm}^3/\text{g}$ و اندازه حفرات $11/5$ نانومتر-تهیه شده در آزمایشگاه بود. کاتالیست‌های با تلقیح دی‌هیدروژن هگزا کلروایریدات هیدرات در محلول مبتنی بر آب بر روی سطح گاما آلومینا تهیه شدند. برای تهیه کاتالیست‌های ایریدیم در بین روش‌های سنتز، روش تلقیح ترجیح داده می‌شود. این روش دارای تعداد مراحل کم‌تر و همچنین قطر ذرات تولیدشده کوچک‌تر به نسبت سایر روش‌ها است. در این روش، برای ساخت کاتالیست‌های فلزی پایه‌دار از محلول نمکی فاز فعال استفاده می‌شود. نخست، نمک فلزی با آب برای تهیه محلول نمک ایریدیم مخلوط شد. سپس، با قرار گرفتن پایه در محلول، جذب فلز روی پایه انجام می‌گیرد که محلول توسط نیروهای موئینه داخل حفرات پایه وارد و پخش می‌شود.



شکل ۱. (a): ایزوترم‌های جذب- و جذب N_2 و (b): منحنی‌های توزیع اندازه منافذ برای کاتالیست‌های ایریدیوم

بعد از فرایند پوشش دهی ایریدیوم بر سطح پایه آلومینا، سطح کاملاً سیاه رنگ تشکیل می‌شود. چنانچه فرایند تلقیح سطح و پوشش دهی نانوذرات مناسب انجام نشود، نمک ایریدیوم پس از فرایند تلقیح با ایجاد پوششی کلوخه‌ای بر روی سطح پراکنده می‌شود. تشکیل کلوخه‌ها سبب بروز تأخیر فوق‌العاده‌ای در واکنش و کاهش سرعت فرایند می‌شود. بنابراین، باید نانوذرات به صورت کاملاً جدا از یکدیگر پوشش داده شوند که سطح سیاه رنگ تشکیل شود. سطح هر کاتالیست توسط تصاویر SEM در شکل ۲ بررسی و مشاهده شد.

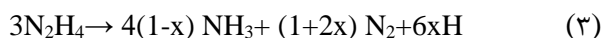
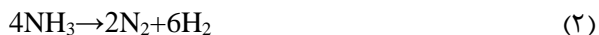
شده و منحنی‌های آیوپاک، نوع منحنی‌ها به نوع چهارم شبیه است [۲۳]. شکل ۱، ایزوترم‌های جذب- و جذب کاتالیست‌های ایریدیوم ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی را نشان می‌دهد. پارامترهای ریزساختار این نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. افزایش سطح ویژه در ۱۰ درصد وزنی نانوذرات نسبت به پایه کاتالیست به دلیل باز شدن برخی حفرات مسدود شده حین فرایند بارگذاری، کلسینه و احیای کاتالیست است. مساحت سطح با افزایش بارگذاری به دلیل مسدود شدن بخشی از منافذ با نانوذرات کاهش می‌یابد. هر چه درصد وزنی فاز فعال بیشتر شود، فلز سطح را پوشانده و در داخل حفرات جا می‌گیرند و از حجم حفرات کاسته می‌شود. افزایش محتوای ایریدیوم، منجر به کاهش اندازه متوسط همراه با کاهش حجم منافذ پایه شد. میزان تجمع نانوذرات ناشی از افزایش بارگذاری ایریدیوم باعث کاهش سطح ویژه در ۲۰ درصد وزنی با کاهش اندازه منافذ در مقایسه با ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی به دلیل نفوذ بیشتر به منافذ شد. با بالاتر رفتن درصد وزنی نانوذرات بر روی سطح باید سعی شود از کلوخه شدن حین فرایند ساخت جلوگیری شود. در کاتالیست ۱۵ درصد وزنی کلوخه شدن نسبت به ۲۰ درصد وزنی کاهش می‌یابد. مساحت سطح ۱۵ درصد وزنی در مقایسه با نمونه ۱۰ درصد وزنی حدود ۲۹ درصد کاهش یافت. این نسبت کاهش سطح برای بارگذاری ۱۵ تا ۲۰ درصد وزنی بیش‌تر و حدود ۳۴٪ بود.

جدول ۱. خواص سطحی کاتالیست‌های ایریدیوم

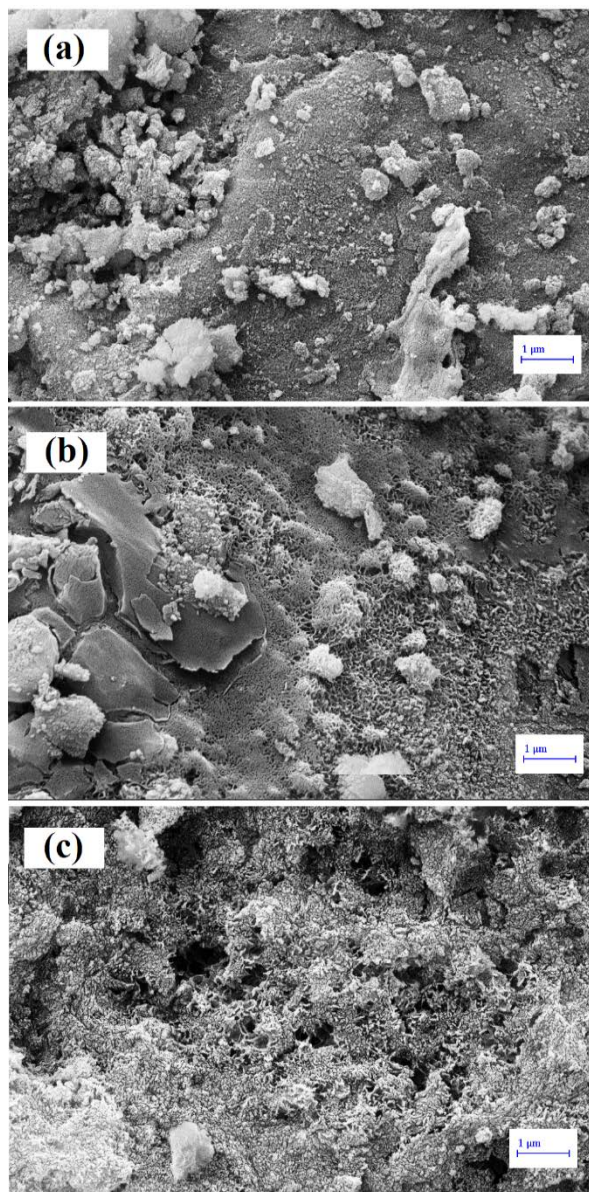
درصد وزنی کاتالیست	سطح ویژه (m^2g^{-1})	حجم حفرات (cm^3/g)	اندازه حفره (nm)
۱۰	۱۸۴	۰/۵۸	۱۲
۱۵	۱۳۰	۰/۳	۹
۲۰	۸۵	۰/۱۸	۸

ثابت باقی ماند؛ اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش بارگذاری ایریدیم در کاتالیست ۲۰ درصد وزنی (شکل ۲c) - که به طور معمول نیز انتظار می‌رود - تجمع ذرات را بر روی سطح افزایش می‌دهد. در ۱۰ درصد وزنی در شکل ۲a نسبت به ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سطح با ایریدیم کم‌تری پوشش داده شده و حفرات و شیارهای سطح کاملاً مشهود است. با بالا رفتن درصد وزنی سطح کاملاً یکنواخت با نانوذرات ایریدیم پوشش داده می‌شود و حفرات و شیارها توسط نانوذرات پوشانده می‌شوند. به طوری که در ۲۰ درصد وزنی، سطح یکنواخت و همگن‌تری به دست آمده و بر روی کاتالیست، سطح آلومینا دیده نمی‌شود.

در تجزیه کاتالیستی، ابتدا هیدرازین توسط ایریدیم به گاز آمونیاک (NH_3) و نیتروژن (N_2) تجزیه می‌شود. این واکنش به شدت گرمازا است و تولید حرارت می‌کند و سپس آمونیاک به گازهای نیتروژن و هیدروژن تجزیه می‌شود که این واکنش گرماگیر است و حرارت را جذب می‌کند. این واکنش ساده را می‌توان به صورت واکنش ۱ و ۲ (در رابطه ۳) نشان داد.

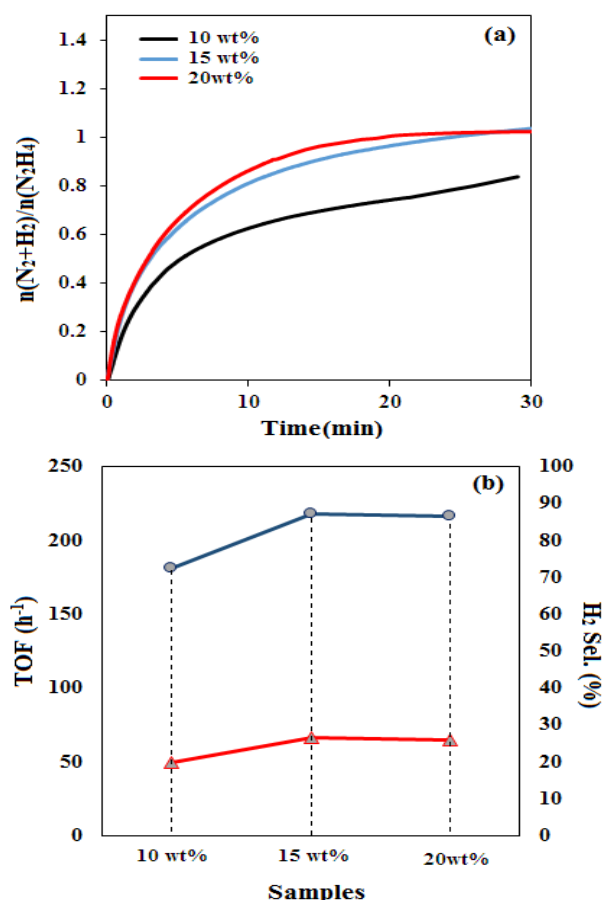


x درجه تفکیک آمونیاک است که تابعی از نوع کاتالیست، اندازه، هندسه، فشار محفظه و زمان اقامت در بستر کاتالیستی است. درجه حرارت محصولات تجزیه هیدرازین، در محدوده ۶۵۰ تا ۸۵۰ کلوین تغییر می‌کند. این پارامتر تحت تأثیر درصد تفکیک آمونیاک به نیتروژن و هیدروژن است. همان‌طور که در بالا اشاره شد، تجزیه آمونیاک گرماگیر است و با تجزیه آمونیاک دمای محصولات کاهش می‌یابد. کاتالیست در فشار اتمسفر، هیدرازین مونوهیدرات را در دمای پایین به NH_3 و کمی H_2 تبدیل می‌کند، شکل ۳a پروفیل‌های دوره زمانی سه کاتالیست را نشان می‌دهد. فعالیت آن‌ها با افزایش محتوای ایریدیم افزایش یافت. فعالیت کاتالیست‌های ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی بیش‌تر از ۱۰ درصد وزنی بود. از آنجایی که در کاتالیست ۲۰ درصد وزنی، میزان فلز قرار گرفته شده بیش‌تر از ۱۰ درصد وزنی است و واکنش فلز با فلز بیش‌تر است؛ پیوند فلز با فلز مستحکم‌تر شده و رهایش ایریدیم کم‌تری نیز اتفاق می‌افتد. سطح فعالیت کاتالیست با بارگذاری و غلظت سطحی نانوذرات



شکل ۲. تصویر SEM از سطح کاتالیست‌های (a) ۱۰، (b) ۱۵ و (c) ۲۰ درصد وزنی ایریدیم

رشد و پراکندگی ذرات ایریدیم در طول فرایند در تمام سطوح موجود رخ می‌دهد. این پراکندگی به بارگذاری ایریدیم بستگی دارد که سطوح گاما آلومینا با بارگذاری بیش‌تر، پوشش و نفوذ قابل توجه ایریدیم در منافذ را نشان می‌دهد. اندازه و فاصله بین نانوذرات با استفاده از مراحل تلقیح متوالی، به میزان مطلوبی در هر سه درصد وزنی رسیده است. اندازه نانوذرات (۵۰-۸۰ نانومتر) در هر سه درصد وزنی با کنترل تعداد مراحل اشباع تقریباً



شکل ۳. (a): منحنی‌های تجزیه هیدرازین مونوهیدرات و (b): مقایسه گزینش پذیری H_2 و TOF کاتالیست‌های ایریدیم

۳- بحث و نتیجه‌گیری

رویکرد ارائه شده در این مقاله با هدف بهبود طراحی و بهینه‌سازی سطح بارگذاری کاتالیست با فعالیت کاتالیستی بالا برای اهداف مختلف است. کاتالیست‌های ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی ایریدیم بر روی $\gamma-Al_2O_3$ در آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی سرعت تجزیه بیش‌تری از ۱۰ درصد وزنی را نشان می‌دهند و منجر به تولید مقدار بالاتری از محصولات گازی می‌شوند که عملکردی مشابه در فرایند تجزیه را ارائه می‌کنند. بنابراین، کاتالیست‌ها با فعالیت بالا، استحکام مکانیکی قوی و آماده‌سازی سریع، کاندیدهای امیدوارکننده‌ای برای تجزیه هیدرازین برای برخی اهداف مانند دستگاه‌های الکترونیکی هستند. در ۱۵ درصد وزنی با توجه به مقدار بالای نانوذرات، با افزایش مراحل تلقیح و بهبود عمق نفوذ به بیشینه ضخامت و استحکام پیوندی رسیده‌ایم؛ بنابراین در طی زمان، عمر این درصد وزنی نسبت به ۱۰ درصد

و هم‌چنین با درصد فاز فعال متغیر بود. کاتالیست ۱۰ درصد وزنی به دلیل کاهش سطح فعال مؤثر نسبت به دو کاتالیست دیگر کاهش شدیدی را در فعالیت نشان می‌دهد. این کاتالیست به دلیل درصد کم فاز فعال کم‌ترین فعالیت را دارد. بر اساس فعالیت کاتالیستی، نتیجه‌گیری می‌شود که ایریدیم با بارگذاری مناسب باعث افزایش فعالیت می‌شود.

مقایسه سرعت واکنش در مورد واکنش‌های کاتالیستی، تعداد فازهای فعال موجود را با پارامترهای مربوط به شرایط سنتز، اثر تجمع، اندازه ذرات و غیره تعیین می‌کنند. شکل ۳b تفاوت قابل توجهی در سرعت واکنش (TOF) و میزان گزینش-پذیری بین کاتالیست‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ذرات Ir در ۲۰ درصد وزنی حدود ۱۹٪ سرعت بیش‌تری نسبت به ذرات Ir با اندازه مشابه در ۱۰ درصد وزنی دارند. سرعت واکنش و میزان گزینش‌پذیری به هیدروژن برای دو درصد وزنی ۱۵ و ۲۰ تقریباً یکسان است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کاتالیست ۱۰ درصد وزنی نانوذرات در مقایسه با کاتالیست‌های ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی نانوذرات، فعالیت کاتالیستی کم‌تری دارد که به ساختار ماکروحفره‌های باز آن نسبت داده شده زیرا به حالت اشباع نرسیده است. تجمع ذرات ماکروحفره‌هایی بیش‌تر می‌شود که سطح تماس کم‌تری بین ذرات ایریدیم و هیدرازین ایجاد می‌کنند.

مکانیسم تجزیه دقیق هیدرازین بر روی کاتالیست‌های ایریدیم هنوز به خوبی پیدا نشده و کاملاً پیچیده است. به طور کلی، شکستن پیوند نیتروژن-نیتروژن درون مولکولی آسان‌تر از پیوند نیتروژن-هیدروژن است، رادیکال‌های NH_2 (آمید) را می‌توان بر روی ایریدیم تولید کرد. رادیکال‌های آمید می‌توانند به اتم‌های هیدروژن تبدیل شوند یا منجر به تشکیل مولکول‌های N_2 و NH_3 شوند. تحقیقات نشان داده که NH_3 نمی‌تواند به طور مستقیم در سایت‌های فعال ایریدیم جذب شود، اما در دمای واکنش NH_3 در پایه آلومینا و کاتالیست ایریدیم-آلومینا جذب اولیه می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده آن است که فرایند جذب NH_3 به طور عمده بر روی کاتالیست در تجزیه هیدرازین بر روی ایریدیم-آلومینا ادامه می‌یابد [۲۴-۲۵].

- [۹] S. K. Singh, and Q. Xu, "Bimetallic nickel-iridium nanocatalysts for hydrogen generation by decomposition of hydrous hydrazine," *Chemical communications*, vol. 46, no.35, pp.6545-6547, 2010.
- [۱۰] N. Firdous, N.K. Janjua, I. Qazi, and M. H. S. Wattoo, "Optimal Co-Ir bimetallic catalysts supported on γ -Al₂O₃ for hydrogen generation from hydrous hydrazine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 2, pp.984-995, 2016.
- [۱۱] C. H. Hwang, S. N. Lee, S. W. Baek, C. Y. Han, S. K. Kim, and M. J. Yu, "Effects of catalyst bed failure on thermochemical phenomena for a hydrazine monopropellant thruster using Ir/Al₂O₃ catalysts," vol. 51(15), pp. 5382-5393, 2012.
- [۱۲] G. Groppi, G. Airoidi, C. Cristiani, and E. Tronconi, "Characteristics of metallic structured catalysts with high thermal conductivity," *Catal. Today*, vol. 60, no. 1, pp. 57-62, 2000.
- [۱۳] R. A. Mischke and J. M. Smith, "Thermal conductivity of alumina catalyst pellets," *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 1, no. 4, pp. 288-292, 1962.
- [۱۴] N. P. Padture, "Advanced structural ceramics in aerospace propulsion," *Nat. Mater.*, vol. 15, no. 8, p. 804, 2016.
- [۱۵] S. Kang, D. Lee, and S. Kwon, "Lanthanum doping for longevity of alumina catalyst bed in hydrogen peroxide thruster," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 46, pp. 197-203, 2015.
- [۱۶] K.-W. Yao, S. Jaenicke, J.-Y. Lin, and K. L. Tan, "Catalytic decomposition of nitrous oxide on grafted CuO/ γ -Al₂O₃ catalysts," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 16, no. 3, pp. 291-301, 1998.
- [۱۷] I. J. Jang et al., "Macroporous-mesoporous alumina supported iridium catalyst for hydrazine decomposition," *Catal. today*, vol. 185, no. 1, pp. 198-204, 2012.
- [۱۸] I. Ali, Z. A. Alothman, and A. Alwarthan, "Supra molecular mechanism of the removal of 17- β -estradiol endocrine disturbing pollutant from water on functionalized iron nano particles," *J. وزنی ایریدیم طولانی تر شده و از نظر اقتصادی، مناسب تر از ۲۰ درصد وزنی عمل خواهد کرد.*
- مراجع**
- [۱] G. J. Hutchings and J. C. Védrine, "Heterogeneous catalyst preparation," in *Basic principles in applied catalysis*, Springer, 2004, pp. 215-258.
- [۲] M. Trueba and S. P. Trasatti, " γ -Alumina as a support for catalysts: a review of fundamental aspects," *Eur. J. Inorg. Chem.*, vol. 2005, no. 17, pp. 3393-3403, 2005.
- [۳] I. Ali, K. AlGhamdi, and F. T. Al-Wadaani, "Advances in iridium nano catalyst preparation, characterization and applications," *J. Mol. Liq.*, vol. 280, pp. 274-284, 2019.
- [۴] S. Mary, C. Kappenstein, S. Balcon, S. Rossignol, and E. Gengembre, "Monopropellant decomposition catalysts. I. Ageing of highly loaded Ir/Al₂O₃ catalysts in oxygen and steam. Influence of chloride content," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 182, no. 2, pp. 317-325, 1999.
- [۵] Z. Amirsardari, R. M. Aghdam, M. Salavati-Niasari, and S. Shakhesi, "Facile Carbothermal Reduction Synthesis of ZrB₂ Nanoparticles: The Effect of Starting Precursors," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 2, pp. 134-140, Jan. 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1019119.
- [۶] Z. Amirsardari, R. M. Aghdam, M. Salavati-Niasari, and S. Shakhesi, "Preparation and characterization of a novel hetero-nanostructure of zirconium diboride nanoparticle-coated multi-walled carbon nanotubes," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 106, pp. 61409-61414, 2014.
- [۷] Z. Amirsardari, R. M. Aghdam, M. Salavati-Niasari, and M. R. Jahannama, "The effect of starting precursors on size and shape modification of ZrB₂ ceramic nanoparticles," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 15, no. 12, pp. 10017-10021, 2015.
- [۸] S. G Pakdehi, and M. Rasoolzadeh, "Comparison of catalytic behavior of iridium and nickel nanocatalysts for decomposition of hydrazine," *Procedia Materials Science*, vol. 11, pp.749-753, 2015.

- Mol. Liq., vol. 241, pp. 123–129, 2017.
- [۱۹] I. Ali, “Microwave assisted economic synthesis of multi walled carbon nanotubes for arsenic species removal in water: Batch and column operations,” J. Mol. Liq., vol. 271, pp. 677–685, 2018.
- [۲۰] I. Ali, O. M. L. Alharbi, Z. A. Alothman, and A. Alwarthan, “Facile and eco-friendly synthesis of functionalized iron nanoparticles for cyanazine removal in water,” Colloids Surfaces B Biointerfaces, vol. 171, pp. 606–613, 2018.
- [۲۱] I. Ali et al., “Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers,” J. Mol. Liq., vol. 279, pp. 251–266, 2019.
- [۲۲] J. Hinckel, J. Jorge, T. Soares, M. Zacharias, and J. Palandi, “Low cost catalysts for hydrazine monopropellant thrusters,” in 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009, p. 5232.
- [۲۳] M. Khalfaoui, S. Knani, M. A. Hachicha, and A. Ben Lamine, “New theoretical expressions for the five adsorption type isotherms classified by BET based on statistical physics treatment,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 263, no. 2, pp. 350–356, 2003.
- [۲۴] V. Shankar, K. A. Ram, and K. A. Bhaskaran, “Prediction of the concentration of hydrazine decomposition products along a granular catalytic bed,” *Acta astronautica*, vol. 11, no. 6, pp. 287–299, 1984.
- [۲۵] L. Li, X. Wang, X. Zhao, M. Zheng, R. Cheng, L. Zhou, and T. Zhang, “Microcalorimetric studies of the iridium catalyst for hydrazine decomposition reaction,” *Thermochimica acta*, vol. 434, no. 1-2, pp. 119–124, 2005.