

بررسی تأثیر ریز و نانوکاتالیست‌ها بر سرعت سوختن پیشراندهای جامد مرکب نیترامینی

سید محمدرضا نیازی^۱، سید عباس وزیری^{۲*}، محمدعلی دهنوی^۳

۱- کارشناس ارشد پیشرانده جامد، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۳

پیام‌نگار: vaz_in@yahoo.com

چکیده

افزودن ترکیبات نیترامینی از جمله RDX و HMX به پیشراندهای جامد مرکب، علی‌رغم مزایای بسیار، به سرعت سوختن پایین و مقدار بالایی نمای فشار (n) می‌انجامد. از این رو، تعیین کاتالیست مناسب برای بهبود سرعت سوختن پیشراندهای جامد مرکب حاوی نیترامین ضروری است. در این مقاله، تأثیر ریز و نانوکاتالیست‌ها بر پیشرانده جامد مرکب مبتنی بر پایه HTPB/AP/Al/RDX بررسی شده و کاتالیست‌های مناسب سرعت سوختن برای این نوع پیشرانده تعیین شده است. بنابر این مطالعه، تأثیر نانوکاتالیست‌ها بر افزایش سرعت سوختن این نوع پیشراندها، نسبت به ریزکاتالیست‌ها بیشتر است و با مقدار درصد کمتری از آن‌ها، می‌تواند سرعت سوختن بالاتر به دست آید.

کلیدواژه‌ها: کاتالیست‌های سرعت سوختن، بهبوددهنده‌های بالستیکی (پرتابی)، پیشراندهای جامد مرکب، نیترامین

۱. مقدمه

پیشراندهای راکتی (موشکی، پرتابه‌ای)، و بر اساس ماهیت به دو دسته همگن و ناهمگن تقسیم می‌شوند [۲]. پیشراندهای جامد در موشکها، تفنگ‌ها و مولدهای گاز کاربرد گسترده‌ای دارند. این پیشراندها به دلیل برخورداری از خواصی چون سادگی فرآیند، تولید چگالی بالا، زمان نگهداری طولانی، هزینه نازل، و نیز از دیدگاه ایمنی بر پیشراندهای مایع ترجیح داده می‌شوند. این دسته از پیشراندها به دودسته پیشراندهای همگن^۲ و ناهمگن^۳ تقسیم می‌شوند [۲ و ۳]. انواع پیشراندهای همگن،

پیشراندها، دسته‌ای از مواد پرنرژی‌اند که در واکنش گرمای^۱ خود محصولات گازی با دمای بالا تولید می‌کنند. این محصولات گازی تولیدشده در محفظه بسته، فشار زیادی تولید می‌کنند و در نهایت به ایجاد نیروی رانشی برای پیشرانده منجر می‌شوند [۱]. پیشراندها بر اساس شرایط فیزیکی، به دو دسته پیشراندهای جامد و پیشراندهای مایع، مبتنی بر کاربرد، به دو دسته پیشراندهای تفنگی و

* تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، گروه مهندسی شیمی

1. Exothermic

2. Homogeneous Propellants
3. Heterogeneous Propellants

شناخته شده است [۲ و ۴]. گرین پیشران جامدی است که در حین ساخت به آن پیکربندی (شکل (۲)) داده شده است [۴].

$$(۱) \quad \text{سرعت سوختن} / \text{ضخامت وب} = \text{سرعت سوختن خطی}$$

منحنی نمایی قانون سرعت سوختن که به قانون وایلی^۷ شناخته می‌شود، در معادله (۲) آمده است.

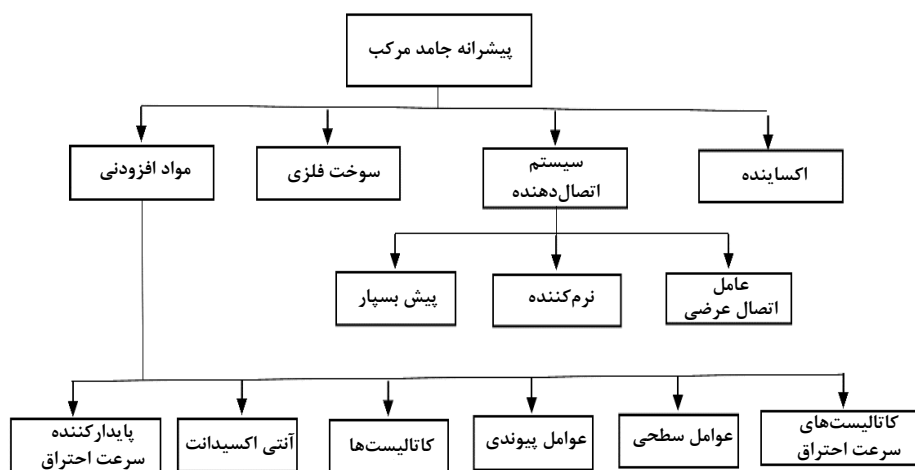
$$(۲) \quad r = ap_c^n$$

که در آن:

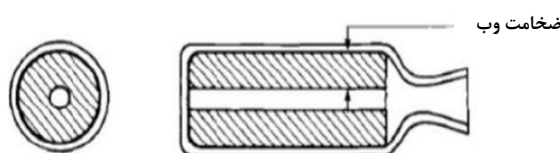
r سرعت سوختن و وابسته به فشار محفظه سوختن و دمای اولیه پیشران است. p_c فشار محفظه، a ضریب خطی سرعت سوختن و وابسته به دمای اولیه پیشران و تغییرات آن در محدوده ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵، و n نمای فشار است [۲ و ۴ و ۸]. افزایش نمای فشار موجب اثر انباشتی بر فشار محفظه سوختن می‌شود و در نتیجه به کاهش ایمنی سیستم پیشران می‌انجامد.

پیشران‌های تک پایه^۱، دو پایه^۲ و سه پایه^۳ را شامل می‌شوند. در پیشران‌های همگن، عوامل اکساینده و احیا شونده یکجا در این نوع پیشران‌ها وجود دارند، از این رو این پیشران‌ها در مقایسه با پیشران‌های مرکب، پیشران‌های همگن شناخته می‌شوند [۲ و ۴]. انواع پیشران‌های ناهمگن شامل پیشران‌های مرکب، پیشران‌های دو پایه اصلاح شده مرکب، پیشران‌های غنی از سوخت هستند [۲]. پیشران‌های مرکب، از یک ماتریس بسپاری پر شده از یک پودر جامد اکساینده و یک پودر جامد فلزی، به عنوان سوخت دوم، تشکیل شده‌اند [۴ و ۵]. اجزای اصلی پیشران‌های جامد مرکب را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید.

کارایی پیشران‌ها برای کاربردهای خاص، به میزان بزرگی سرعت سوختن آن بستگی دارد. سوختن پیشران‌های جامد از سطح صورت می‌گیرد و این سوختن لایه به لایه ادامه می‌یابد که هر کدام موازی دیگری است و به طور کلی پیکربندی^۴ هندسی سطح سوختن تا زمانی که شبکه وب^۵ (شکل (۲)) گرین کاملاً بسوزد، ثابت باقی می‌ماند (ضخامت وب، حداقل ضخامت از پیشران است که باید طی سوختن مصرف شود) و به عنوان قانون پیوبرت^۶ (معادله (۱))



شکل ۱. اجزای تشکیل دهنده فرمولبندی پیشران‌های جامد مرکب [۲ و ۴].



شکل ۲. ساختار گرین و ضخامت وب [۷].

1. Single-Base Propellants
5. Web

2. Double-Base Propellants
6. Piobert

3. Triple-Base Propellants
7. Vielle

4. Configuration

۲-۱ میزان اکساینده

طی بررسی‌های جداگانه‌ای که گراس^۵ و همکاران، برای پی بردن به تأثیر درصد جرمی اکساینده بر سرعت سوختن پیشرانه‌های جامد مرکب مبتنی بر پایه HTPB، متشکل از ذرات AP و با استفاده از درصدهای جرمی متفاوت اکساینده (۷۵، ۷۷/۵ و ۸۰٪) به عمل آوردند، مشاهده شد که افزایش درصد جرمی اکساینده باعث افزایش سرعت سوختن می‌شود. علاوه بر این، افزایش درصد AP، به افزایش دمای سطح و دمای شعله این نوع پیشرانه می‌انجامد [۱۱].

۲-۲ تأثیر ابعاد ذرات اکساینده

سرعت سوختن از طریق حرارت منتقل شده از فاز گازی به سطح سوختن و حرارت تولید شده در سطح سوختن (فاز متراکم) تعیین می‌شود. برای پیشرانه‌های مرکب مبتنی بر پایه AP، سرعت سوختن قویاً تابعی از ابعاد ذرات AP است. در صورتی که درصد AP در فرمولبندی پیشرانه ثابت بماند، سرعت سوختن با کاهش اندازه ذرات AP افزایش می‌یابد، هر چند که اثر اندازه ذرات در فشارهای بالاتر کاهش پیدا می‌کند [۱۱].

۲-۳ سوخت فلزی

در واقع، سرعت سوختن برای یک فرمولبندی پیشرانه جامد، همانند اکساینده به سوخت فلزی نیز وابسته است. به طور کلی، دمای تجزیه بیشتر و ماهیت گرماگیر تجزیه اکساینده آهنگ سوختن را پایین می‌آورد. سوخت فلزی گرم‌آزا، سرعت سوختن را افزایش می‌دهد [۲].

۲-۴ کاتالیست‌های سرعت سوختن

سرعت سوختن تابعی از ترکیب پیشرانه است و نه تنها از طریق تغییر درصد اکساینده، تغییر ابعاد ذره اکساینده یا حرارت ایجادشده از سوختن اتصال‌دهنده و جز اینها می‌تواند تعدیل شود، بلکه از طریق افزودن کاتالیست‌های سرعت سوختن نیز می‌تواند بهبود داده شود [۱۲]. به بیان دیگر، سرعت سوختن علاوه بر عوامل گوناگون یادشده در بالا، به کاتالیست‌های سرعت سوختن نیز بستگی دارد [۱۲ و ۶].

یک پیشرانه جامد خوب باید سرعت سوختن پایدار و نمای فشار پایین داشته باشد و یکی از بهترین روش‌ها برای نیل به این هدف

در پیشرانه‌های جامد مرکب متداول، پلی بوتادیان منتهی به گروه‌های هیدروکسی^۱ (HTPB) اولین اتصال‌دهنده (بایندر) خنثی است که برای دستیابی به بازده بالای سوختن و خواص افزایش طول بهتر در دمای پایین و نیز خواص مقاومتی مناسب‌تر در دمای بالا، به همراه پرکلرات آمونیم (اکساینده) و پودر آلومینیم (سوخت فلزی) به کار گرفته شده است [۱]. گسترده‌ترین اکساینده به کار رفته در پیشرانه‌های جامد مرکب، آمونیم پرکلرات^۲ است [۲]. باتوجه به اینکه نیترامین‌های حلقوی RDX^۳ و HMX^۴ مزایای بسیاری، از جمله عملکرد بهتر (مقدار زیاد گازهای خروجی، انرژی زیاد، ضربه ویژه بالاتر برای موشکها و نیروی محرکه بالاتر برای اسلحه)، ایمنی بیشتر (سوختن تصادفی مشکل و حساسیت کم در هوای آزاد)، کاهش پرتو فروسرخ ناشی از احیای CO₂-H₂O در دود و سازگاری با محیط زیست (فقدان دود، غیر سمی بودن، محصولات سوختنی مقاوم در برابر خوردگی) برای پیشرانه‌های جامد مرکب ارائه می‌کنند، امروزه تلاش می‌کنند بخشی از AP را با نیترامین‌ها جایگزین کنند [۹]. تنها اشکال ترکیبات مبتنی بر پایه نیترامین، آهنگ سوختن پایین و نمای فشار (n) بالاست؛ نسبت به تجزیه نیز حساس‌اند و بنابراین فرآوری، کارکردن و حمل و نقل آنها با محدودیت همراه است [۱۰].

از آنجا که سرعت سوختن از مهم‌ترین خواص پرتاییک (بالستیکی) پیشرانه‌های جامد مرکب به‌شمار می‌رود و اندازه ذرات کاتالیست‌ها نیز بر سرعت سوختن تأثیر می‌گذارد، در این تحقیق، ضمن شناخت عوامل مؤثر بر سرعت سوختن پیشرانه‌های جامد مرکب نیتراміні، تأثیر ابعاد ذرات کاتالیست‌ها (مقایسه نانو کاتالیست‌ها و ریز کاتالیست‌ها) و سازوکار هر کدام بررسی شده است.

۲. عوامل مؤثر بر سرعت سوختن

سرعت سوختن تابعی از نوع سوخت، ترکیب پیشرانه، ذرات فلزی، ابعاد ذرات اکساینده، سرعت گاز نسبت به سطح جامد، دمای اولیه پیشرانه و فشار است، که برای پیشرانه‌های جامد مرکب با تغییر شاخصه‌های زیر افزایش می‌یابد [۷].

1. Hydroxyl Terminated Polybutadiene
2. Ammonium Perchlorate (AP)
3. Cyclo-1,3,5-Tri Methylene-2,4,6-Tri Nitramine (RDX)
4. Cyclo-1,3,5,7-Tetra Methylene-2,4,6,8-Tetra Nitramine (HMX)

5. Gross

مانند آنها نیز یافت می‌شوند که به‌عنوان کاهنده سرعت سوختن برای پیشران‌های جامد مرکب متداول، قابل استفاده‌اند [۱۸]. سرعت پایین سوختن پیشران‌های حاوی ترکیبات نیترامینی، حاکی از آن است که مصرف کاتالیست‌های سرعت سوختن (بهبوددهنده‌های بالستیکی) برای بهبود سرعت سوختن این نوع پیشران‌ها ضروری است [۱۹]. علاوه بر ترکیب کاتالیست، تغییر در اندازه ذرات کاتالیست‌های سرعت سوختن نیز می‌تواند بر سرعت سوختن پیشران تأثیر بگذارد. بررسی اثر ابعاد ذرات کاتالیست‌های سرعت سوختن در پیشران‌های جامد مرکب در قالب مقایسه اثر نانوکاتالیست‌ها و ریزکاتالیست‌های سرعت سوختن، از اهداف عمده این تحقیق است.

۳. تأثیر کاتالیست‌ها بر سرعت سوختن پیشران جامد مرکب بر پایه HTPB/AP/Al

در این بخش، ابتدا تأثیر کاتالیست‌های بالستیکی بر سرعت سوختن پیشران‌های جامد مرکب بدون نیترامین HTPB/AP/Al، به اختصار بیان خواهد شد. خلاصه نتایج عملکرد ریز و نانو کاتالیست‌های سرعت سوختن بر این پیشران‌ها، به ترتیب، در جدول‌های (۱) و (۲) درج شده است.

افزودن کاتالیست سرعت سوختن به پیشران است [۱۴]. کاتالیست‌های سرعت سوختن، یکی از مهم‌ترین اجزای پیشران‌های جامد مرکب‌اند، که می‌توانند سرعت سوختن پیشران جامد را افزایش یا کاهش دهند [۱۴]. کاتالیست ترکیبی است که سرعت واکنش شیمیایی را با ارائه یک مسیر جایگزین یا نمودار مصرف انرژی کمتر، تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۵]. کاتالیست‌های سرعت سوختن (بهبوددهنده‌های سرعت سوختن) شامل شتاب‌دهنده^۱ سرعت سوختن و تعدیل‌کننده^۲ (کاهنده) سرعت سوختن‌اند. از شتاب‌دهنده‌های سرعت سوختن برای بهبود سرعت سوختن پیشران استفاده می‌شود [۱۶]. شتاب‌دهنده‌های سرعت سوختن موادی‌اند که تجزیه اکساینده را شتاب می‌بخشند و یا دمای تجزیه آن را کاهش می‌دهند. در عمل، شتاب‌دهنده‌های سرعت سوختن، مواد معدنی یا فلزات آلی به‌ویژه محصولات جانبی مس، آهن، کروم یا بور هستند. البته سالیان متمادی برای پیشران‌های جامد مرکب، فقط از اکسیدهای آهن و کرومیت مس استفاده شده است [۲۰ و ۸]. تعدیل‌کننده‌های سرعت سوختن معمولاً نمک‌های قلیایی یا مواد قلیایی خاکی‌اند که در مقادیر یک تا دو درصد به پیشران اضافه می‌شوند و باعث تعدیل تحرک تجزیه اکساینده می‌شوند [۱۶]. کاتالیست‌های سرعت سوختن، چون LiF [۱۷]، CaCO_3 ، SrCO_3

جدول ۱. نتایج عملکرد ریزکاتالیست‌های سرعت سوختن بر پیشران جامد مرکب بر پایه HTPB/AP/Al.

مرجع	نمای فشاری (n)	درصدوزنی Al	درصدوزنی AP	درصدوزنی HTPB	فشار MPa	سرعت سوختن mm/s	نوع بهبوددهنده
[۲۰]	۰/۴۱	۱۲	۷۲	۱۴	۶	۱۳	فریک اکساید
[۲۱]	۰/۲۸	-	۷۸	۲۲	۶/۹	۱۱/۹	پیشران بدون بهبوددهنده
[۲۱]	۰/۳۴	-	۷۸	۲۲	۶/۹	۱۴/۲	C CO N^3
[۲۱]	۰/۴۵	-	۷۸	۲۲	۶/۹	۱۶/۲	C Ni N^4
[۱۸]	-	۱۰/۲	۶۹/۶	۲۰/۴	۶/۹	۵/۶	پیشران بدون بهبوددهنده
[۱۸]	-	۱۰	۶۸	۲۰	۶/۹	۴/۶	CaCO_3 ٪۲
[۱۸]	-	۱۰	۶۸	۲۰	۶/۹	۴/۳	SrCO_3 ٪۲
[۱۸]	-	۱۰	۶۸	۲۰	۶/۹	۸/۸	Fe_2O_3 ٪۲
[۱۸]	-	۱۰	۶۸	۲۰	۶/۹	۱۳/۸	۲٪ مس اکسید

1. Accelerator
3. Tris-carbohydrazide cobalt(II) nitrate

2. Moderator
4. Tris-carbohydrazide nickel(II) nitrate

جدول ۲. نتایج عملکرد نانوکاتالیست‌های سرعت سوختن بر پیشرانده جامد مرکب بر پایه HTPB/AP/Al.

نوع بهبوددهنده	پیشرانده بدون بهبوددهنده مربوط به نانوفریت	نانوفریت نیکل کربات مس	نانوفریت روی مس نیکل	نانوفریت روی کربات مس	پیشرانده بدون بهبوددهنده مربوط به $CdFe_2O_4$	نانوبلور $CdFe_2O_4$	نانوبلور Cd	پیشرانده بدون بهبوددهنده مربوط به نانوالیاز	نانوالیاز Ni-Co	نانوالیاز Ni-Cu	نانوالیاز Ni-Zn
سرعت سوختن mm/s	۱/۲	۱/۳۳	۲/۹۹	۱/۶۷	۱/۱۵	۱/۹۴	۱/۶۲	۱/۲۲	۲/۰۸	۱/۷۷	۱/۵۹
مرجع	[۲۲]	[۲۲]	[۲۲]	[۲۲]	[۲۳]	[۲۳]	[۲۳]	[۲۴]	[۲۴]	[۲۴]	[۲۴]

نتایج حاصل از جدول (۱) حاکی از آنند که:

۴. تأثیر ریزکاتالیست‌های سرعت سوختن بر پیشرانده

جامد مرکب بر پایه HTPB/AP حاوی نیترامین RDX کاتالیست‌های گوناگونی یافت می‌شوند که بر خواص سوختنی پیشرانده جامد مرکب بر پایه HTPB/AP حاوی نیترامین RDX، از جمله سرعت سوختن، خواص تجزیه حرارتی، گرمای سوختن شدید^۱ و جز آنها اثر می‌گذارند. در ادامه، به بررسی نمودارهای تجزیه حرارتی و مقادیر سرعت سوختن حاصل از ریزکاتالیست‌های سرعت سوختن پرداخته شده است.

۴-۱ تأثیر ریزکاتالیست‌های سرعت سوختن بر تجزیه

حرارتی

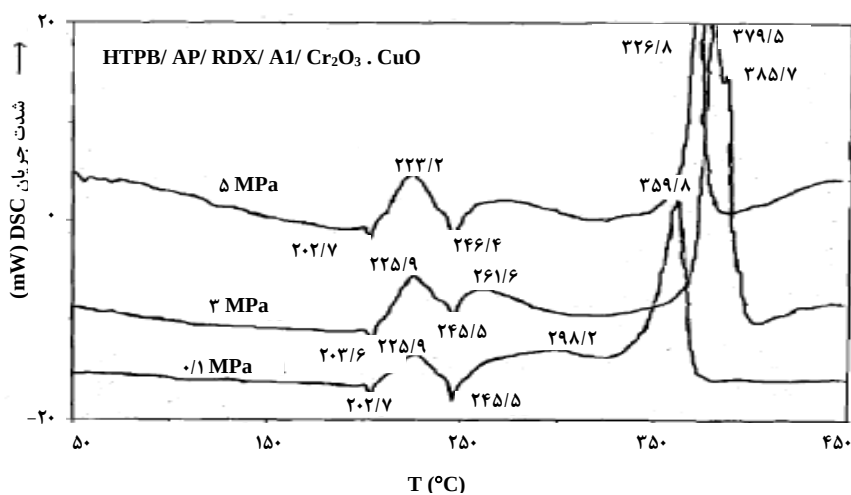
نتایج تجزیه حرارتی AP خالص، RDX خالص، مخلوط AP/RDX و کاتالیست‌های سرعت سوختن حاوی مس (QC و YB)^۲ اضافه شده، در جدول (۳) درج شده‌اند [۲۵].

جدول ۳. اثر ریزکاتالیست‌های سرعت سوختن حاوی مس بر عملکرد تجزیه حرارتی [۲۵].

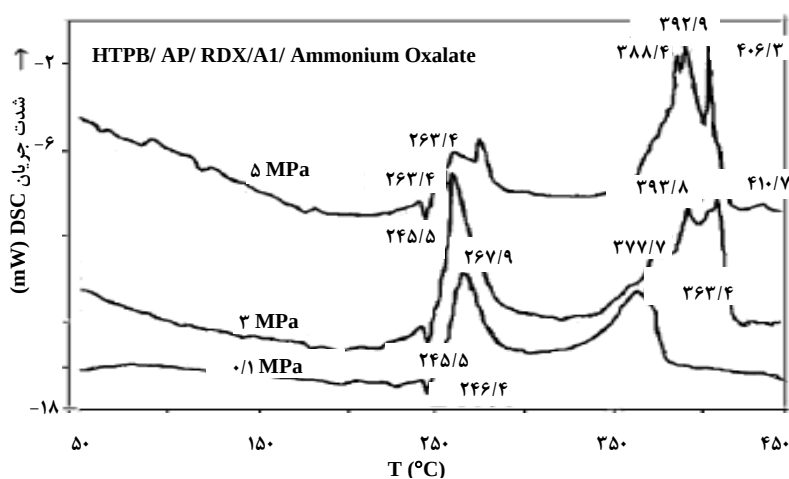
فرمولبندی	دمای تجزیه پایین (°C)	دمای تجزیه (°C)	دمای تجزیه بالا (°C)	انرژی فعال‌سازی تجزیه دما پایین (kJ/mol)	انرژی فعال‌سازی تجزیه (kJ/mol)	انرژی فعال‌سازی تجزیه دما بالا (kJ/mol)
RDX		۲۴۰		۲۰۵		
AP	۲۸۳		۳۳۸	۱۲۷		۲۱۸
RDX+AP (1: 2)		۲۳۰		۱۸۸		
AP+YB (10: 1)	۲۸۶		۳۲۳	۸۱		۶۹
RDX+YB (10: 1)		۲۴۰		۲۰۵		
AP+QC (19: 1)		۲۸۴		۱۲۷		
RDX+QC (19: 1)		۲۲۳		۱۹۲		
RDX+ AP+YB (13: 26: 1)		۲۱۲		۱۲۵		

1. Deflagration
3. YB: Copper Chromium Oxide $CuCr_2O_4$

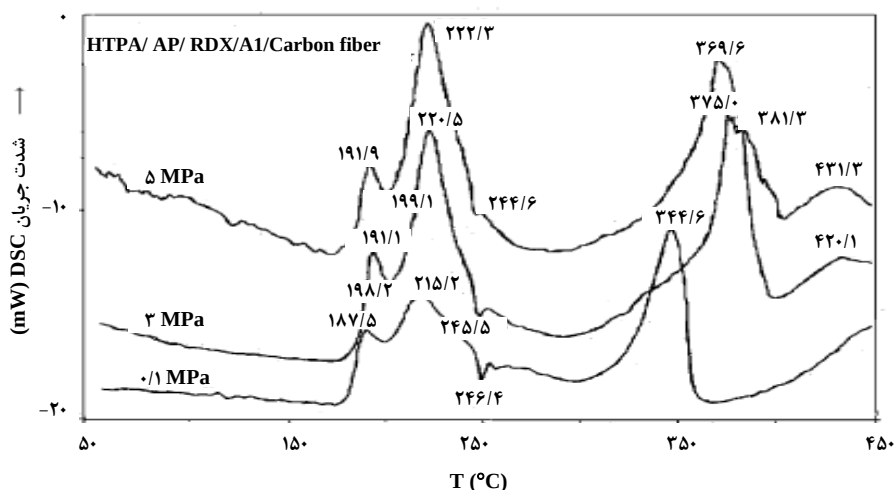
2. QC: Copper I-Containing Organic Chelate mp 324.9°C



شکل ۴. نتایج حاصل از DSC (جریان حرارتی بر حسب دما) نمونه ۲ [۱۹].



شکل ۵. نتایج حاصل از DSC (جریان حرارتی بر حسب دما) نمونه ۳ [۱۹].



شکل ۶. نتایج حاصل از DSC (جریان حرارتی بر حسب دما) نمونه ۴ [۱۹].

به ترتیب، به $215/2^{\circ}\text{C}$ و $344/6^{\circ}\text{C}$ کاهش می‌یابد. آهنگ تجزیه گرمازا و گرمای تجزیه RDX به‌وضوح افزایش می‌یابد؛ بنابراین، سرعت سوختن نمونه ۴ حاوی الیاف کربن، بالاترین سرعت سوختن است [۱۹].

۴-۲ تأثیر ریز کاتالیست‌ها بر سرعت سوختن

دنگ پنج‌تیو^۱ و همکاران، سرعت سوختن پیش‌رانه جامد HTPB/AP/RDX حاوی دو کاتالیست YB و QC را تحت فشارهای مختلف بررسی کرده‌اند (جدولهای (۵) و (۶)). در جدول (۵)، ترکیب درصد AP، HTPB و RDX، به ترتیب، ۵۰، ۱۲/۵ و ۲۵ درصدند [۲۵].

جدول ۵. فرمولبندی پیش‌رانه HTPB/AP/RDX با و بدون کاتالیست در آزمون سرعت سوختن [۲۵].

فرمولبندی	YB (%)	QC (%)	درصد اجزای دیگر
۱	-	-	۱۲/۵
۲	۱	-	۱۱/۵
۳	-	۱	۱۱/۵
۴	۰/۹	۰/۹	۱۰/۷
۵	-	۱/۵	۱۱
۶	-	۲	۱۰/۵

جدول ۶. سرعت سوختن‌ها (mm/s) مربوط به فرمولبندیهای جدول ۵ تحت فشارهای مختلف [۲۵].

انواع	۴ MPa	۶ MPa	۷ MPa	۸ MPa	نمای فشاری
۱	۴/۷۹	۵/۵۴	۵/۹۲	۶/۶۵	۰/۴۵
۲	۶/۴۴	۷/۴۶	۸/۴۶	۹/۴۳	۰/۵۳
۳	۵/۶۲	۶/۷۱	۷/۰۰	۷/۸۶	۰/۴۶
۴	۶/۶۱	۷/۳۹	۸/۰۷	۸/۹۰	۰/۵۲
۵	۵/۶۹	۶/۵۳	۷/۰۷	۷/۴۳	۰/۳۹
۶	۵/۵۴	۶/۶۷	۷/۱۷	۷/۶۴	۰/۴۶

از مندرجات جدول (۶) می‌توان نتیجه گرفت که سرعت سوختن پس از اضافه کردن YB بیشترین افزایش را نشان می‌دهد و YB می‌تواند سرعت سوختن را ۴۳٪ افزایش دهد. همچنین، اضافه کردن

از مقایسه شکل‌های (۳) و (۴)، مشاهده می‌شود که نقاط حداکثر لحظه‌ای HTPB در $213/4^{\circ}\text{C}$ (شکل (۳))، در حضور $\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{CuO}$ از بین می‌رود (شکل (۴)). همچنین، در فشار ۰/۱ Mpa، دمای تجزیه AP در نمونه ۲ از $371/4^{\circ}\text{C}$ به $359/8^{\circ}\text{C}$ پیدا می‌کند و دمای تجزیه RDX نیز از $240/2^{\circ}\text{C}$ تا $225/9^{\circ}\text{C}$ کاهش پیدا می‌کند که این مسئله نشان می‌دهد $\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{CuO}$ برای پیش‌رانه HTPB/AP/RDX، به‌عنوان شتاب‌دهنده سرعت سوختن عمل می‌کند. نقطه حداکثر گرمازا در $298/2^{\circ}\text{C}$ به تجزیه AP در دمای پایین‌تر مربوط است و با افزایش فشار، این نقطه حداکثر به سمت پایین جابه‌جا می‌شود. هیچ نقطه حداکثر مجزا و مشخصی از تجزیه RDX در $225/9^{\circ}\text{C}$ و برای تجزیه AP در $298/2^{\circ}\text{C}$ وجود ندارد تا تجزیه AP در $359/8^{\circ}\text{C}$ که نشان می‌دهد پیش‌رانه HTPB/AP/RDX در حضور $\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{CuO}$ پیوسته گرما آزاد می‌کند. این نتیجه در افزایش سرعت سوختن پیش‌رانه بسیار مفید است [۱۹ و ۲۶].

از مقایسه منحنی‌های DSC نمونه ۳ در شکل (۵) با شکل (۳)، پی می‌بریم که بیشینه نقطه ذوب RDX در $203/6^{\circ}\text{C}$ از بین می‌رود. نقطه بیشینه تجزیه RDX پس از نقطه بیشینه تغییر شکل بلوره‌ای AP ظاهر می‌شود و دمای تجزیه آن از 240°C به $267/9^{\circ}\text{C}$ افزایش می‌یابد. هنگامی که فشار به ۵ Mpa افزایش می‌یابد، نقطه بیشینه تجزیه RDX کوچکتر می‌شود و گرمای تجزیه RDX کاهش می‌یابد. حداکثر دمای تجزیه AP کمتر می‌شود و حرارت تجزیه AP کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که آمونیم اکسالات مانع تجزیه RDX و AP می‌شود. در نتیجه، سرعت سوختن نمونه ۳ حاوی آمونیم اکسالات کاهش می‌یابد [۱۹ و ۲۶]. از مقایسه منحنی‌های DSC نمونه ۴ حاوی الیاف کربن در شکل (۶)، با منحنی‌های DSC در شکل (۳)، پی می‌بریم که بیشینه گرمایی در $187/5^{\circ}\text{C}$ قبل از نقطه بیشینه ذوب RDX وجود دارد که به تجزیه HTPB مرتبط است. با افزایش فشار، بیشینه دمایی به دماهای بالاتر جابه‌جا می‌شود و حداکثر دمای تحت فشار ۳ Mpa نزدیک به فشار ۵ Mpa است. حداکثر دمای تجزیه گرمازای HTPB به سمت دماهای پایین‌تر جابه‌جا می‌شود و به تدریج به دمای بیشینه گرمازای AP نزدیک می‌شود. این نتایج در ایجاد فرایند گرمازای نمونه ۴ برای افزایش سرعت سوختن خیلی سودمند است [۱۹ و ۲۶]. در نمونه ۴ حاوی الیاف کربن نیز، دمای بیشینه تجزیه گرمازای RDX و AP،

1. Deng Pengtu

دارای کاتالیست‌های مختلف سرعت سوختن درج شده‌اند [۱۹]. ترکیب درصد فرمولبندیها در جدول (۴) درج شده است. در جدول (۸)، به‌وضوح مشاهده می‌شود که در محدوده فشاری مورد مطالعه (۵ Mpa - ۰/۱)، هم $\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{CuO}$ و هم الیاف کربن، آنتالپی تجزیه ΔH_d را افزایش می‌دهند. مقادیر (ΔH_d) نمونه ۴ بزرگتر از (ΔH_d) نمونه ۲ است. این امر نشان می‌دهد که اثر الیاف کربن برجسته‌تر است؛ اما آمونیم اکسالات باعث کاهش آنتالپی تجزیه می‌شود. مطالب ذکر شده در بالا نشان می‌دهد که آنتالپی تجزیه پیشرا نه با سرعت سوختن پیشرا نه مرتبط است.

۵. تأثیر نانوکاتالیست‌های سرعت سوختن بر پیشرا نه‌های جامد مرکب بر پایه HTPB/AP حاوی نیترا مین RDX

در ادامه، به بررسی نمودارهای تجزیه حرارتی، مقادیر گرمای سوختن شدید (گرگرفتن) ^۲ و مقادیر سرعت سوختن حاصل از حضور نانوکاتالیست‌های سرعت سوختن خواهیم پرداخت.

QC نمای فشار سرعت سوزش پیشرا نه را کاهش می‌دهد، به‌طوری که می‌تواند نمای فشار را به ۰/۳۹ کاهش دهد. با تنظیم مناسب نسبت کاتالیست و محدوده فشار، شاخص فشار می‌تواند بیشتر کاهش یابد. با توجه به عملکرد مورد نیاز، می‌توان از نسبت مناسب YB و QC به‌منظور دستیابی به سرعت سوختن دلخواه و نمای فشاری پایین‌تر بهره گرفت [۲۵]. سرعت سوختن حاصل از تحقیقات ژائو^۱ و همکاران، با استفاده از بمب کرافورد نیز در جدول (۷) درج شده است [۱۹]. ترکیب درصد فرمولبندیها در جدول (۴) درج شده است.

نتایج حاصل نشان می‌دهد، مثلاً، در فشار ۱۰ Mpa حضور الیاف کربن و کرومیت مس در پیشرا نه HTPB/AP/RDX باعث افزایش سرعت سوختن می‌شود و نمای فشار، تقریباً ثابت مانده است. اضافه کردن آمونیم اکسالات به پیشرا نه HTPB/AP/RDX باعث کاهش سرعت سوختن و نیز کاهش نمای فشار پیشرا نه HTPB/AP/RDX شده است [۱۹].

۳-۴ تأثیر ریزکاتالیست‌ها بر آنتالپی تجزیه

در جدول (۸) آنتالپی‌های تجزیه پیشرا نه HTPB/AP/RDX

جدول ۷. سرعت سوزش پیشرا نه HTPB/AP/RDX همراه با کاتالیست‌های مختلف سرعت سوختن [۱۹].

نمای فشاری در ۱۰-۸ Mpa	سرعت سوختن (mms^{-1}) در فشارهای مختلف (Mpa)					نمونه
	۱۰	۸	۶	۴	۲	
۰/۲۶	۷/۴۲	۷/۰۲	۶/۲۳	۵/۲۷	۴/۱۰	۱
۰/۲۵	۱۱/۷۰	۱۱/۱۰	۹/۷۹	۷/۸۰	۵/۷۵	۲
۰/۱۷	۵/۵۰	۵/۲۹	۴/۹۵	۴/۳۳	۴/۱۲	۳
۰/۲۶	۷۲/۴۸	۶۸/۵۵	۶۰/۰۶	۴۸/۲۲	۳۰/۶۰	۴

جدول ۸. آنتالپی تجزیه پیشرا نه [۱۹].

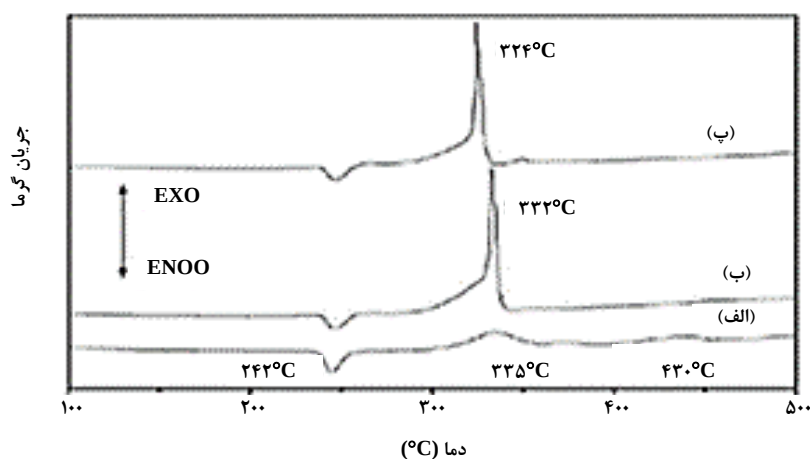
$\Delta H_d (\text{J g}^{-1})$			نمونه
۵ Mpa	۳ Mpa	۰/ ۱ Mpa	
۳۸۱/۹	۲۶۹/۹	۲۹۵/۹	۱
۵۷۷/۱	۵۹۸/۸	۴۵۸/۲	۲
۱۴۲/۰	۱۶۷/۶	۱۱۳/۰	۳
۱۸۵۶	۱۶۶۰	۱۲۷۴	۴

۵-۱ تأثیر نانوکاتالیست‌ها بر روی تجزیه حرارتی

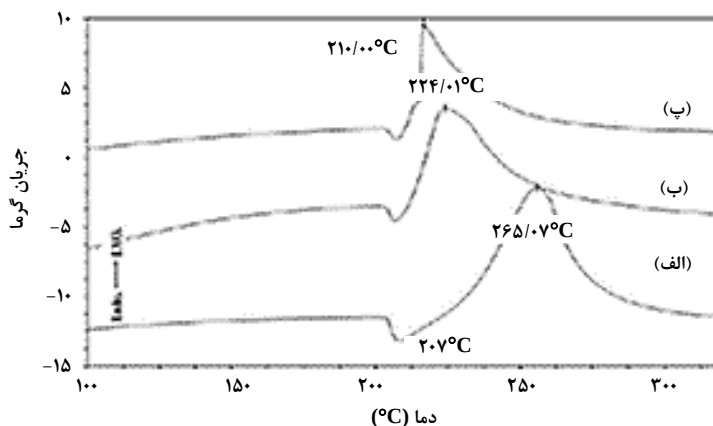
در شکل (۷) - (ب و پ) است که روند تجزیه سریعی را نشان می‌دهد [۲۷].

در شکل (۸)، نقطهٔ بیشینهٔ گرماگیر در 207°C منجر به ذوب RDX می‌شود. نقطهٔ بیشینهٔ گرمایی در 255°C به تجزیه RDX نسبت داده شده و برخی محصولات حدواسط مانند H_2CO ، N_2O ، HCN و HONO تشکیل شده و سپس محصولات تجزیه کامل مانند CO ، N_2 ، N_2O و NO_2 و غیره تولید می‌شوند [۲۸]. اضافه کردن مس و یا ND/Cu به RDX تغییر شکل چندانی در منحنی DSC ایجاد نکرده، اما دمای تجزیه را، به ترتیب، 31°C و 39°C به طور چشمگیری کاهش داده است [۲۷].

ژیاو کین شی^۱ و همکاران، در سال ۲۰۰۷ مطالعاتی بر روی AP و RDX در حضور مس و AP و RDX در حضور نانو ذرات ND/Cu (مس/نانو الماس) و اثر کاتالیستی آن‌ها بر AP و RDX انجام دادند. منحنی DTA برای AP خالص، AP در حضور مس و AP در حضور نانو ذرات ND/Cu را در شکل (۷) - (الف) مشاهده می‌کنید. تغییرات فاحشی در شکل (۷) - (ب و پ) دیده می‌شود. دو نقطهٔ بیشینهٔ گرمازا با هم ادغام شدند و دما بسیار پایین‌تر است. با ۲ درصد وزنی از مس یا ND/Cu اضافه شده، دمای تجزیه حرارتی AP به ترتیب 107°C و 115°C کاهش یافته است و کلهٔ تیز گرمایی



شکل ۷. منحنی DTA (جریان حرارتی بر حسب دما) برای (الف) AP خالص، (ب) AP در حضور مس و (پ) AP در حضور نانو ذرات ND/Cu [۳۲].



شکل ۸. منحنی DTA (جریان حرارتی بر حسب دما) برای (الف) RDX خالص، (ب) RDX در حضور مس و (پ) RDX در حضور نانو ذرات ND/Cu [۳۲].

1. XiaoQin Shi

(جدول ۱۰) نشان می‌دهد که استفاده از توزیع آلومینیم دوحالتی^۳ با نسبت حدود 4:1 n-Al به g-Al یا اضافه کردن ۲٪ پودر نانو نیکل (n-Ni) رفتار سوختنی پیشراشه را بهبود می‌بخشد؛ درحالی‌که در استفاده از پودرهای آلومینیم با نسبت ۱:۱ n-Al به g-Al، سوختن پیشراشه مختل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هم n-Al و هم n-Ni دارای ظرفیت حرارتی پایین‌تر، آستانه اشتعال پایین‌تر و زمان سوختن کوتاه‌تری نسبت به g-Al هستند. علاوه براین، n-Al گرایش به سوختن در شکل تک ذره منفرد، نتایج آنالیز حرارتی نشان می‌دهد که n-Ni می‌تواند تجزیه حرارتی AP در پیشراشه را کاتالیز کند. در جدول (۹) ترکیب درصد AP، HTPB و RDX، به ترتیب، ۶۰، ۱۵ و ۲۰ درصد درج شده‌اند [۳۲].

جدول ۹. فرمولبندی نمونه‌ها [۳۲].

فرمولبندی پیشراشه	g-Al (%)	n-Al (%)	n-Ni (%)
N-0	۵	۰	-
N-1	۲/۵	۲/۵	-
N-2	۱	۴	-
N-3	۵	۰	۲

بنابر مندرجات جدول (۱۰)، سرعت سوختن فرمولبندی N-1 در مقایسه با فرمول پایه N-0، در محدوده فشار تجربی کاهش یافته است. اما سرعت سوختن N-2 و N-3 در محدوده فشار پایین، افزایش یافته‌است. مقدار این افزایش با افزایش فشار؛ کاهش یافته و نمای فشاری N-2 و N-3، به ترتیب، ۰/۰۸۷ و ۰/۱۲۵ پایین‌تر از N-0 هستند.

جدول ۱۰. مقادیر سرعت سوختن حاصل از تحقیقات ژیانگ ژی [۳۲].

نمای فشاری n	سرعت سوختن (mms ⁻¹) در فشارهای مختلف (Mpa)					نمونه
	۱۰	۸	۶	۴	۲	
۰/۴۸۵	۱۲/۴۸	۱۱/۳۰	۹/۹۶	۷/۹۶	۵/۷۳	N-0
۰/۴۰۱	۱۰/۸۱	۹/۹۷	۸/۹۶	۷/۵۷	۵/۶۳	N-1
۰/۳۹۸	۱۱/۷۸	۱۰/۹۰	۹/۵۱	۸/۲۱	۶/۲۴	N-2
۰/۳۶۰	۱۰/۹۸	۱۰/۳۸	۹/۵۱	۸/۲۱	۶/۰۴	N-3

همراه با تجزیه AP یا RDX، مس به تدریج به Cu^+ یا Cu^{2+} اکسید شده، اوربیتال 4s خالی Cu^+ و اوربیتال نیمه پر $3d$ Cu^{2+} به فرایند انتقال الکترون گرایش می‌یابند. حفره مثبت در Cu^+ و Cu^{2+} می‌تواند الکترون‌ها را از یون AP و محصولات حد واسط آن بپذیرند که از طریق آن تجزیه گرمایی AP و RDX بهبود می‌یابد. از دیدگاه فعالیت کاتالیستی بهتر ND/Cu نسبت به Cu، می‌توان آن را از لحاظ خواص نانوالماس مورد بحث قرارداد. نانوالماس حاوی گروه‌های عاملی فراوان از جمله: OH, C=O, NH, C-O, C-H, C-N و جز آنهاست [۲۷] و این منطقه دارای چگالی بالایی از رادیکال‌های آزاد است [۲۹]. همچنین، این ناحیه دارای سطح مخصوص بزرگ است، از حجم بالای منافذ (حدود $1/1 M^3G^{-1}$) و تعداد زیادی مراکز نقص برخوردار است [۳۰]. فعالیت شیمیایی بالا و ویژگی‌های بیان شده نانوالماس، آن را به یک حامل کاتالیستی تبدیل می‌کند؛ در نتیجه نانوالماس می‌تواند فعالیت کاتالیستی مس را به‌عنوان حامل کاتالیستی بهبود ببخشد [۲۷].

۵-۲ تأثیر نانو کاتالیست‌ها بر سرعت سوختن

لیو^۱ و همکاران نشان دادند که با اضافه کردن نانو آهن $n-Fe_2O_3$ با درصد جرمی ۰/۲۵٪ به پیشراشه جامد مرکب HTPB/AP/Al/RDX، دود کاهش یافته و سرعت سوختن در ۶ مگاپاسکال از $6/31 mms^{-1}$ به $8/51 mms^{-1}$ افزایش می‌یابد [۱۴ و ۳۱]. ژیانگ ژی^۲ و همکاران نیز رفتار حرارتی n-Al (آلومینیم در اندازه نانو) و g-Al (آلومینیم در اندازه معمولی، مثلاً ۱۰ میکرومتر) را مورد بررسی قرار دادند. فرمولبندی‌های به‌کار رفته در مطالعه ژیانگ ژی و همکاران در جدول (۹) درج شده‌اند. نتایج آزمون‌های سرعت سوختن

۵-۳ تأثیر نانوکاتالیست‌ها بر گرمای گرگرفتن

گرمای گرگرفتن نمونه N-3 در مقایسه با فرمولبندی پایه N-0، به مقدار ۷۷ kJ/kg کاهش یافته است، این میزان کاهش، به دلیل ظرفیت گرمایی نسبتاً پایین‌تر n-Ni (۴/۱ MJ/kg) در مقایسه با Al مرسوم مورد استفاده (۳۱ MJ/kg) است [۳۳]. گرمای سوختن شدید حاصل از تحقیقات ژيانگ ژي و همکاران در جدول (۱۱) درج شده است [۳۲].

جدول ۱۱. نتایج اندازه‌گیری گرمای گرگرفتن [۳۲].

نمونه پیش‌رانه	N-0	N-1	N-2	N-3
درصد اجزاء	g-Al:n-Al = 1:0	g-Al:n-Al = 1:1	g-Al:n-Al = 1:4	% n-Ni
گرمای گرگرفتن (kJ/kg)	۵۳۱۵	۵۲۶۱	۵۳۱۴	۵۲۳۸

در مقایسه با فرمول پایه N-0، گرمای گرگرفتن N-1 کاهش یافته است (۵۴ kJ/kg). در ساده‌ترین مشاهدات از جدول (۱۱)، می‌توان ادعا کرد که جایگزینی مقدار بیشتری از g-Al با n-Al در N-2 گرمای گرگرفتن کمتری در مقایسه با N-1 را نتیجه می‌دهد. این دیدگاه توسط نتایج پشتیبانی نمی‌کنند. در جدول (۱۱) نشان داده می‌شود که گرمای گرگرفتن N-2 با g-Al:n-Al=1:4 بیشتر از N-1 با g-Al: n-Al=1:1 و تقریباً با گرمای گرگرفتن N-0 یکسان است. همچنین، می‌توان استدلال کرد که نمونه N-3 دارای کمترین مقدار گرمای گرگرفتن و در فشارهای پایین دارای سرعت سوختن بالاتر است و این امر بیان‌گر آن است که در فشارهای پایین سرعت سوختن و گرمای گرگرفتن، باهم رابطه معکوس دارند.

۶. نتیجه‌گیری کلی

با افزودن نیترامین RDX به پیش‌رانه جامد مرکب HTPB/AP/Al، سرعت سوزش این نوع پیش‌رانه‌ها کاهش می‌یابد و از این رو تعیین کاتالیست‌های سرعت سوختن مناسب برای افزایش سرعت سوختن این نوع پیش‌رانه‌ها برای رسیدن به عملکرد مورد نیاز لازم است. در بررسی تأثیر کاتالیست‌های مورد استفاده برای پیش‌رانه جامد مرکب حاوی RDX نتایج زیر به‌دست آمد:

۱. با افزایش آنتالپی تجزیه و تعداد بیشینه‌های گرمای حاصل از تجزیه، سرعت سوختن نمونه افزایش می‌یابد.
۲. با جابجایی بیشینه دمای تجزیه توسط کاتالیست به سمت دماهای بالاتر، سرعت سوختن کاهش می‌یابد.
۳. در فشارهای پایین، مقدار گرمای گرگرفتن با مقدار سرعت سوختن رابطه عکس دارد.
۴. آنتالپی تجزیه و تعدادی از بیشینه‌های تجزیه گرمای پیش‌رانه HTPB/AP/RDX حاوی $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{CuO}$ و الیاف کربن نسبت به پیش‌رانه HTPB/AP/RDX پایه افزایش یافته؛ در نتیجه سرعت سوختن این نوع پیش‌رانه در اثر افزودن کرومیت مس و الیاف کربن افزایش می‌یابد.
۵. با افزایش آمونیم اکسالات به سیستم HTPB/AP/RDX، سرعت سوختن کاهش می‌یابد.
۶. با توجه به عملکرد مورد نیاز، می‌توان از نسبت مناسب YB و QC به‌منظور دستیابی به سرعت سوختن دلخواه و نمای فشاری پایین‌تر استفاده کرد.
۷. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نانو آلومینیم و نانو نیکل، ظرفیت حرارتی پایین‌تر، آستانه اشتعال پایین‌تر و زمان سوختن کوتاه‌تری نسبت به آلومینیم با اندازه معمولی دارند و از این رو می‌توانند سرعت سوختن را افزایش دهند.
۸. اضافه کردن مقدار کمی از نانوکاتالیست آهن ($\text{n-Fe}_2\text{O}_3$) باعث افزایش چشمگیر سرعت سوختن نسبت به حالت ریزکاتالیست شده است.
۹. نانوالماس می‌تواند فعالیت کاتالیستی مس را به‌عنوان حامل کاتالیستی بهبود بخشد.

مراجع

- [1] Kubota, N., "Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion"; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 88-89, (2002).
- [2] Agrawal, J. P., "High Energy Materials Propellants, Explosives and Pyrotechnics"; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 219-292, (2010).
- [3] Lindner, V., "Propellants"; Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley, 1, (2000).
- [4] Davenas, A., "Solid Rocket Propulsion Technology"; Pergamon Press, Technology and Research Director, SNPE, France, 10, 14, 331, 415, 427-434, (1990).

- [5] Carro, R. V., "High Pressure Testing of Composite Solid Rocket Propellant Mixtures: Burner Facility Characterization"; A Thesis Submitted In University Of Central Florida Orlando, (2001).
- [6] Yang, V., Brill, T., Ren, W. Z., "Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics"; AIAA, 185-204, 276, (2000).
- [7] Sutton, G. P., Biblarz, O., "Rocket Propulsion Elements"; Seventh Edition, John WILEY & Sons, 417-519, (2001).
- [8] Thakre, P., Yang, V., "Solid Propellants"; Encyclopedia of Aerospace Engineering, 1-10, (2010).
- [9] Luca, L. D., Cozzi, F., Germiniasi, G., "Combustion Mechanism of an RDX-Based Composite Propellant", International Seminar on High Energy Materials, Pune, India., 19-21, (1996).
- [10] Ramesh, K., Jawalkar, S. N., "Development of a Composite Propellant Formulation with a High Performance Index Using a Pressure Casting Technique", Central European Journal of Energetic Materials, 9, 1, 49-58, (2012).
- [۱۱] فتحی، ن.، دهنوی، م. ع.، سمنانی رهبر، م.، "تعیین روشهای مناسب جهت کاهش حساسیت دمایی در سوخت جامد، تحقیق و توسعه مواد پرنرژی، سال نهم، شماره ۱، صفحات ۳۲-۲۱، (۱۳۹۲).
- [۱۲] محمودیان، غ. ر.، "به کارگیری نانوکاتالیست به منظور بهبود خواص سوزشی و انرژی سوخت حاوی آمونیوم پر کلرات"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، (۱۳۹۱).
- [13] Price, E. W., Sigman, R. K., "Combustion of Aluminized solid propellants", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2, 18, (1999).
- [14] Gao, J., Wang, L., Yu, H., Xiao, A., Ding, W., "Recent Research Progress in Burning Rate Catalysts", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. Propellants Explos. Pyrotech., 36, 404 – 409, (2011).
- [15] Chaturvedi, S., Dave, P. N., "A review on the use of nanometals as catalysts for the thermal decomposition of ammonium perchlorate", Journal of Saudi Chemical Society, 17, 2, 135-149, (2013).
- [16] Davenas, A., "Solid Rocket Propulsion Technology", Pergamon Press Technology and Research Director. SNPE. France, 427-430, (1990).
- [17] Kubota, N., Hirata, N., "Inhibition Reaction of Lif on The Combustion of Ammonium Perchlorate Propellants", 12th Symposium international on Combustion, 2051-2056, (1984).
- [18] Rastogi, R. P., Syal, V., "Pressure dependence of catalysed and inhibited burning rate of composite solid propellants", Indian Journal of Chemistry, 28, 452-457, (1989).
- [19] Zhao, F., Chen, P., Wen, L. Sh., "Effect of ballistic modifiers on thermal decomposition characteristics of RDX/AP/HTPB propellant", Thermochemica Acta, 416, 75-78, (2004).
- [20] Campos, E. A., Cássia, R. D., Dutra, L., Rezende, L. C., Diniz, M. F., Nawa, W. M. D., Iha, K., "Performance evaluation of commercial copper chromites as burning rate catalyst for solid propellants", J. Aerosp. Technol. Manag, 2, 323-330, (2010).
- [21] Sonawane, S. H., Gore, G. M., Polke, B. G., Nazare, A. N., Asthana S. N., "Transition Metal Carbohydrazide Nitrates: Burn-rate Modifiers for Propellants", Defence Science Journal, 56, 3, 391-398, (2006).
- [22] Srivastava, P., Kapoor, I. P. S., Singh, G., "Nanoferrites: Preparation, characterization and catalytic activity", Journal of Alloys and Compounds, 485, 88-92, (2009).
- [23] Singh, G., Kapoor, I. P. S., Dubey, R., Srivastava, P., "Preparation, characterization and catalytic behavior of CdFe_2O_4 and Cd nanocrystals on AP, HTPB and composite solid propellants, Part: 79" Thermochemica Acta, 511, 112-118, (2010).
- [24] Singh, G., Kapoor, I. P. S., Dubey, S., "Bimetallic nanoalloys: Preparation, characterization and their catalytic activity", Journal of Alloys and Compounds, 480, 270-274, (2009).
- [25] Deng, P., Tian, D., Tang, S., "The Effect of Copper-Containing Catalysts on Combustion Characteristics of AP/RDX/HTPB Composite propellants" Chinese Journal of Explosives & Propellants, 6, 2, (1996).
- [26] Zhao, F., Chen, P., Li, S., Yin, C., Liu, Z., "Effect of potassium salt flame suppressors on the thermal decomposition behavior of the combustion catalysts used in solid propellant", Journal of Solid Rocket Technology, 32, 1, 26-28, (2002).
- [27] Shi, X., Jiang, X., Lu, L., Yang, X., Wang, X., "Structure and catalytic activity of nanodiamond/Cu nanocomposites", Elsevier, Materials Letters, 62, 1238-1241, (2008).
- [28] Lee, Y., Tang, C. J., Litzinger, T. A., "A study of the chemical and physical processes governing CO_2 laser-induced pyrolysis and combustion of RDX", Combust. Flame, 17, 795, (1999).
- [29] Shames, A. I., Panich, A. M., Kempinski, W., Alexenskii, A. E., Baidakova, M. V., Dideikin, A. T., Osipov, V. Yu., Siklitski, V. I., Osawa, E., Ozawa, M., Vul, A. Ya., "Defects and impurities in nanodiamonds: EPR, NMR and TEM study" J. phys. Chem. Solids 63, 1993, (2002).

- [30] Shames, A. I., Panich, A. M., Kempinski, W., "Defects and impurities in nanodiamonds: EPR, NMR and TEM study". J. phys. Chem. Solids, 63, 1995, (2002).
- [31] Liu, J. M., Xu, F. M., Zhou, W. L., Zhu, L. X., Gang, L., Yang, Q. F., "Preparation and Catalytic Effect of Nano-structured Iron Oxide for Reduced Smoke Composite Propellant", Acta Armamentarii, 27, 553, (2006).
- [32] Zhi, J., Shu-Fen, L., "Research on the Combustion Properties of Propellants with LowContent of Nano Metal Powders" Wiley-Vch VerlagGmbH &Co. KGaA. Weinheim. Propellants. Explosives. Pyrotechnics, 31, 139-147, (2006).
- [33] Yagodnikov, D. A., Voronetskii, A. V., "Experimental and Theoretical Study of the Ignition and Combustion of Aerosol of Encapsulated Aluminum Particles", Combust. Explo. Shock., 33, 49-55, (1997).