

مطالعه‌ی تاثیر نانوذرات آلومینیوم بر عملکرد احتراقی پیشرانه‌های مرکب بر پایه آمونیوم پرکلرات (AP)

ابراهیم بلاغی اینالو^۱، محمدعلی دهنوی^{۲*}، اسماعیل بلاغی اینالو^۳، مجتبی سممانی رهبر^۴

تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

*E-mail: mdehnavi@ihu.ac.ir

(تاریخ وصول: ۹۱/۲/۱۸، تاریخ پذیرش: ۹۱/۶/۲۰)

چکیده

در این مقاله استفاده از نانوذرات آلومینیوم در پیشرانه‌های جامد بر پایه آمونیوم پرکلرات (AP) مورد بررسی قرار گرفته است که شامل بررسی تاثیر افزایش نانوذرات آلومینیوم به عنوان سوخت فلزی به پیشرانه‌های جامد بر عملکرد و کارایی آنها از قبیل سرعت سوزش، دمای شروع احتراق و کاهش اندازه ذرات خاکستر باقیمانده می‌باشد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اضافه کردن نانوذرات آلومینیوم به فرمولاسیون‌های سوخت جامد مرکب موجب افزایش قابل توجهی در نرخ سوزش، کوتاه‌تر شدن زمان تاخیر اشتعال و زمان سوختن کلوخه‌های ذرات آلومینیوم در پیشرانه می‌گردد. با کاهش اندازه ذرات آلومینیوم، احتراق به سطح سوزش پیشرانه نزدیک‌تر شده و موجب افزایش نرخ سوزش می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نانو ذرات آلومینیوم، پیشرانه‌های جامد مرکب، مکانیسم احتراق، سرعت سوزش، آمونیوم پرکلرات.

۱- مقدمه

احتراق بالاتر، دانسیته بیشتر، دمای احتراق بالاتر و بنابراین I_{sp} بیشتر، کاربرد وسیعی در فرمولاسیون‌های پیشرانه پیدا کرده و اغلب موجب سوزش پایدار می‌شود. با اینکه پودر برلیوم مقدار انرژی تسوری بالاتری نسبت به آلومینیوم دارد اما بخاطر سمیت فوق‌العاده، دسترسی کم و هزینه بالا، به ندرت از آن استفاده می‌شود. علاوه بر این برلیوم بازده احتراق ضعیفی با بیشتر بایندر- سوخت‌های هیدروکربنی قابل دسترس دارد. هرچند این مشخصه را می‌توان با استفاده از بایندهای پیشرفته و منحصر بفرد مانند فلوروکربن‌ها بهبود داد. منیزیم به عنوان

پودرهای فلزی به منظور رسیدن به انرژی آزاد شده بیشتر در اثر حرارت واکنش با اکسیژن، بهبود دانسیته پیشرانه، کاهش نمای فشار (n) و جلوگیری از ناپایداری‌های احتراق به پیشرانه‌ها اضافه می‌گردند. در برخی مواقع فلزات به شکل سیم یا صفحات نازک جهت افزایش سرعت سوزش و بهبود خواص مکانیکی اضافه می‌شوند. آلومینیوم، منیزیم، بور و زیرکونیوم کاربرد گسترده‌ای در فرمولاسیون‌های پیشرانه پیدا کرده‌اند. پودر آلومینیوم به علت انرژی بسیار بالا، حرارت

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استادیار گروه مهندسی شیمی

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد

۴- دانشیار گروه مهندسی شیمی

شروع احتراق، زمان تاخیر احتراق و همچنین کاهش میزان و اندازه خاکستر باقیمانده است. با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که علت این تاثیرات احتراق نانوذرات آلومینیوم در نزدیکی سطح سوزش است که ناشی از مکانیسم احتراق ذرات آلومینیوم در ساختار میکرووی پیشراانه است [۳-۶].

۲- مکانیسم احتراق ذرات آلومینیوم در پیشراانه‌های

جامد بر پایه AP

پیشراانه‌های مرکب شامل یک سوخت فلزی، اکسیدکننده^۲ و یک بستر پلیمری می‌باشد. تفاوت در اندازه ذرات جزء اکسیدکننده که معمولاً درشت‌تر از ذرات سوخت فلزی است سبب می‌شود تا سوخت فلزی به همراه اکسیدکننده‌هایی که اندازه کوچکتری دارند در بین فضا‌های خالی اکسیدکننده قرار گیرند [۷].

ذرات آلومینیوم به طور فوق‌العاده‌ای فعال هستند اما به دلیل تشکیل یک لایه اکسیدی (Al_2O_3) بروی ذرات آلومینیوم فعالیت خود را تا حد زیادی از دست می‌دهند و تا از بین رفتن این لایه اکسیدی به همین صورت باقی می‌مانند. برخلاف دیگر اجزا پیشراانه، ذرات آلومینیوم به دلیل دمای بالای ذوب آنها که $660^\circ C$ است و وجود لایه اکسیدی با دمای بالای ذوب $2047^\circ C$ در دمای سطح پیشراانه هنگام احتراق تجزیه نمی‌شوند. زمانی که ذرات آلومینیوم در سطح سوزش قرار می‌گیرند در لایه بایندر که حالتی شبه مایع به خود گرفته است فرو می‌روند. همزمان با این فرو رفتگی ذرات آلومینیوم، پیشروی جبهه سوزش سبب می‌شود تا بایندر و ذرات اکسیدکننده بسوزند که باعث ریزش ذرات آلومینیوم می‌شود. ذرات آلومینیوم تجزیه یا تبخیر نمی‌شود بنابراین در سطح سوزش باقی می‌مانند، تغلیظ شده و یک برهم‌کنش^۳ را می‌دهند که وابسته به غلظت ذرات آلومینیوم اولیه در ساختار میکرووی پیشراانه است [۸]. در شکل ۱ نحوه ایجاد تجمع^۴ نشان داده شده است.

سوخت فلزی برای پیشراانه‌های غنی از سوخت ترجیح داده می‌شود. بور سوخت طلائی در دهه ۱۹۶۰ بود اما بعدها با سوخت‌های دیگر جایگزین شد زیرا احتراق آن به علت تشکیل لایه اکسید بور بر روی سطح آن مشکل ایجاد می‌کرد. استفاده از زیرکونیوم یا تیتانیوم برای پیشراانه‌هایی که نیازمند دانسیته - ایمپالس بالایی بودند، گزارش شده است [۱].

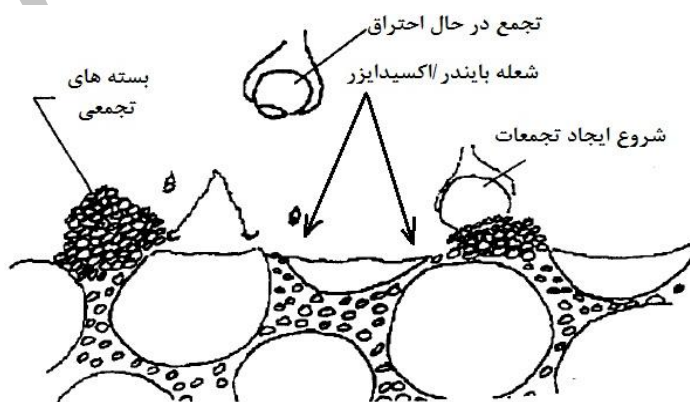
در سالهای اخیر بررسی‌های زیادی بر روی استفاده از نانوذرات آلومینیوم در پیشراانه‌های جامد بر پایه AP صورت گرفته است. افزایش نانوذرات آلومینیوم به عنوان سوخت فلزی به پیشراانه‌های جامد کارایی آنها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، زیرا دانسیته ذرات آلومینیوم $3/8$ برابر AP و 3 برابر بایندهای هیدروکربنی می‌باشد و از طرفی میزان انرژی بالایی در حین فرآیند اکسیداسیون آزاد می‌کنند [۲]. برخی از خواص مهم نانو آلومینیوم و تفاوت آن با پودر آلومینیوم در مقیاس میکرو عبارتند از [۱]:

الف) پودر آلومینیوم با اندازه میکرو معمولاً خاکستری روشن هستند در صورتیکه پودر آلومینیوم زیر 200 nm خاکستری تیره هستند.

ب) دانسیته توده^۱ به مقدار زیادی به اندازه ذرات وابسته است. ذرات بسیار ریز نانو آلومینیوم بسیار سبک هستند و دانسیته توده آنها زیر 0.1 g/cm^3 می‌باشد. از طرف دیگر ذرات بزرگ دانسیته‌ی بالایی $1/5\text{ gr/cm}^3$ دارند.

ج) مساحت سطح بالای پودر نانو آلومینیوم منجر به فعالیت زیاد آن شده است.

د) پودر نانو آلومینیوم تقریباً 5% (جرمی) از آب محیط را جذب می‌کند. این رطوبت تاثیر منفی در هنگام استفاده از پودر دارد. از مهمترین اثرات مثبت افزایش نانوذرات آلومینیوم در مقایسه با آلومینیوم با اندازه‌های معمولی، افزایش سرعت سوزش، کاهش دمای



شکل ۱- مکانیسم احتراق پیشراانه‌های جامد بر پایه AP [۲].

2 -Oxidiser
3 -Interaction
4 -Accumulation

1-Bulk Density

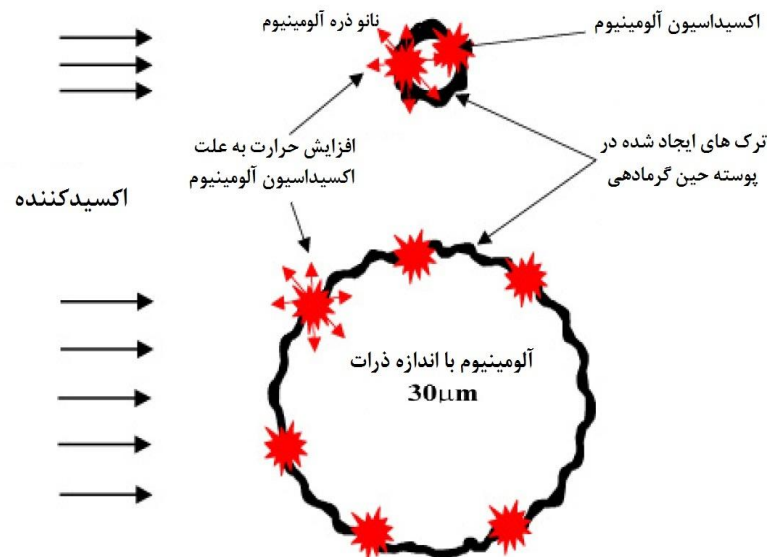
میزان نزدیکی مکان‌های با دمای بالای شعله به سطح سوزش وابسته است [۴].

رفتار سوزشی پیش‌رانه‌های جامد حاوی آلومینیوم با اندازه ذرات معمولی متفاوت از نانوذرات آلومینیوم است. هنگام استفاده از نانوذرات آلومینیوم به جای ذرات آلومینیوم با اندازه معمولی فاصله میانگین بین ذرات آلومینیوم و AP به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. از آنجا که یک ذره آلومینیوم با قطر $30\ \mu\text{m}$ ، جرمی معادل $10^7 - 10^6$ ذره آلومینیوم با قطر $100\ \text{nm}$ دارند انرژی شروع به احتراق نانوذرات آلومینیوم کم است که این انرژی از شعله پاششی ناشی از احتراق آلومینیوم تامین می‌شود. مکانیسم احتراق نانوذرات آلومینیوم در پیش‌رانه مشابه ذرات آلومینیوم با اندازه معمولی است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است به علت کوچک شدن اندازه ذرات آلومینیوم شکستن لایه اکسیدی و در معرض قرارگیری آلومینیوم به طور موثرتری صورت می‌گیرد و با افزایش سایت‌های^۱ احتراق ذرات آلومینیوم گرمای احتراق آزاد شده در واحد حجم در مقایسه با ذرات آلومینیوم با اندازه معمولی افزایش می‌یابد [۸].

اندازه ذرات اکسیدی باقیمانده، به اندازه ذرات آلومینیوم در داخل تجمعات وابسته است، که با انتخاب اندازه ذرات مناسب آلومینیوم می‌توان به ذرات اکسیدی بهینه دست یافت. مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش نانوذرات آلومینیوم، میزان تجمع افزایش می‌یابد. تجمع ایجاد شده از نانوذرات آلومینیوم بسیار کوچکتر از تجمع تولید شده از ذرات آلومینیوم با اندازه معمولی می‌باشد [۴].

تغلیظ و نفوذ تا زمانیکه این ذرات از سطح سوزش جدا نشوند یا در سطح شعله‌ور نشوند ادامه می‌یابد. در چنین مواردی ذرات تغلیظ شده که اکنون شروع به ایجاد تجمع‌هایی از ذرات آلومینیوم کرده‌اند، با قرار گرفتن در جریان گازی که به سمت بالای سطح سوزش پیش‌رانه در حرکت است به بالای این سطح منتقل می‌شود و با ذوب شدن به شکل قطره‌ای تجمع‌هایی را ایجاد می‌کنند. این تجمع‌ها اغلب در جریان داغ گازی بالای سطح پیش‌رانه می‌سوزند و قطرات سوزشی با شعله داغ 3800°C را ایجاد می‌کنند. وجود این قطرات سوزشی سبب افزایش سریع دما می‌شود. فرآیند تغلیظ - نفوذ - جداسدن از سطح سوزش و ایجاد تجمع‌ها مهم است زیرا بر مکان و زمان تاخیر احتراق ذرات آلومینیوم و همچنین قطرات اکسیدی ایجاد شده موثر است که خود تاثیر مهمی در سرعت سوزش پیش‌رانه و همچنین خاکستر تولیدی دارند [۸].

انرژی احتراق ذرات بزرگ در سطح سوزش از شعله پاششی AP تامین می‌شود که ساختار شعله پاششی ذرات منفرد AP وابسته به فشار است که در فشارهای پایین احتراق سخت‌تر صورت می‌گیرد در نتیجه احتراق ذرات آلومینیوم با اندازه معمولی سخت‌تر است [۹، ۱۰]. برای پیش‌رانه‌های حاوی ذرات آلومینیوم با اندازه معمولی، با افزایش فشار ساختار شعله به سطح سوزش نزدیک‌تر شده و منجر به افزایش حرارت برگشتی به سطح سوزش می‌شود، که نتیجه آن، قطر تجمع‌ها کاهش یافته و احتراق با حالتی شتابدار رخ داده و کارایی احتراق پیش‌رانه افزایش می‌یابد. میزان ایجاد این تجمع‌ها به غلظت آلومینیوم در ساختار میکرووی پیش‌رانه در الگوی به قرار گرفتن بین ذرات AP و



شکل ۲- افزایش میزان حرارت در واحد حجم با کوچک شدن اندازه ذرات آلومینیوم [۸].

سرعت سوزش

کارایی پیشران‌ها برای یک کاربرد خاص به مقدار زیادی به سرعت سوزش آن وابسته است در حالیکه در عمل رابطه سرعت سوزش - فشار مفید است. وقتی که یک پیشران جامد شروع به سوختن می‌کند، سوزش از سطح شروع می‌شود و لایه به لایه بصورت موازی با هم ادامه پیدا می‌کند. طوری که آرایش هندسی عمومی سطح سوزش تا زمانی که وب¹ گرین² کاملاً بسوزد حفظ می‌شود. سرعت سوزش از قانون شناخته شده پیوبرت³ پیروی می‌کند [۱]:

$$(1) \quad \text{زمان سوختن/ضخامت وب} = (r) \text{ سرعت سوزش}$$

معمولاً سرعت سوزش با بالا رفتن یا پایین آمدن فشار، افزایش یا کاهش پیدا می‌کند. سرعت سوزش همچنین تحت تاثیر دمای پیشران قرار دارد و با افزایش دمای پیشران، زیاد و با کاهش دمای پیشران کم می‌شود. بنابراین ضروری است محدوده دمای بالا و پایین در موقع توسعه پیشران برای کاربردهای خاص تعیین شود. محدوده دمایی ویژه برای کاربردهای عملیاتی °C ۴۰- تا °C ۶۰+ است [۱].

شکل نمایی قانون سرعت سوزش که به عنوان قانون ویله⁴ به صورت زیر است:

$$(2) \quad r = aP_c^n$$

که r سرعت سوزش و عمدتاً به فشار محفظه احتراق و دمای اولیه پیشران وابسته است. P_c فشار محفظه، a ضریبی است که به دمای اولیه پیشران بستگی دارد و در محدوده ۰/۰۲ - ۰/۰۵ قرار دارد. n اندیس یا نمای فشار است و تابعی از فرمولاسیون پیشران می‌باشد [۱]. سرعت سوزش به عوامل مختلفی وابسته است که مهمترین آنها می‌توان به نوع اکسیدکننده، توزیع اندازه ذرات اکسیدکننده، نوع بایندر، کنترل کننده‌های سرعت سوزش نظیر Fe_2O_3 ، فشار و تاثیر آن بر جریان دوفازی گازی داغ بالای پیشران، حالت جریان گازی ایجاد شده از ناحیه احتراقی اشاره نمود [۸].

یک راه ساده برای بهبود سرعت سوزش پیشران‌های مرکب استفاده از کاتالیست‌ها یا بهبوددهنده‌های بالستیکی است. کاتالیست‌های مورد استفاده برای سالیان متمادی در دو گروه دسته‌بندی می‌شوند:

الف- اکسیدها و نمک‌های فلزات با ظرفیت متغیر: اکسید آهن (III)، اکسید مس (II)، کرومیت مس، کرومات مس و غیره.

ب- ترکیبات ارگانومتالیک جامد یا مایع از قبیل فروسین و مشتقات متغیر آن، آهن (III) استیل استونات و غیره.

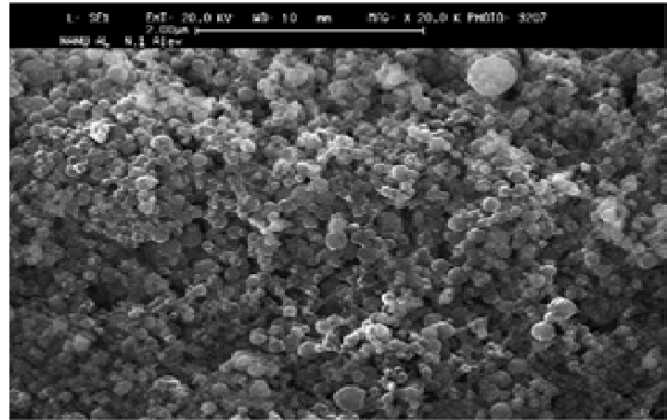
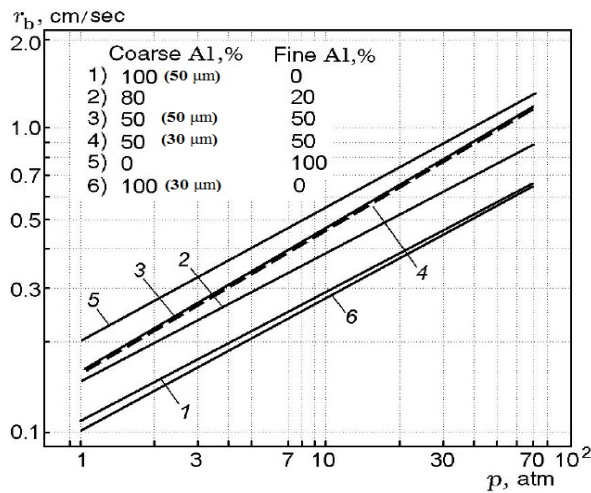
پیشران‌های مرکب با انرژی بالا حاوی مقدار زیادی از فاز جامد در

فرمولاسیون خود هستند بنابراین وارد کردن مقادیر زیاد کاتالیست ممکن است سبب ایجاد تغییر در خواص رئولوژیکی از قبیل ویسکوزیته مخلوط پیشران، کاهش زمان پوت لایف⁵، کاهش ازدیاد طول⁶ و افزایش مدول الاستیک شود [۱]. البته اخیراً تحقیقاتی بر روی بهبود سرعت سوزش با استفاده از نانو ذرات آلومینیوم گزارش شده است. در سال ۱۹۹۴ محققان از AP بسیار ریز $1/5 \mu m$ و آلومینیوم بسیار ریز 100 nm و سیم‌های نقره‌ای در پیشران‌های بر پایه HTPB استفاده کردند و به سرعت سوزش بالای 150 mm/s دست یافتند [۹].

در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان به سمت استفاده از نانوذرات آلومینیوم در پیشران به منظور افزایش سرعت سوزش معطوف شده است. چیاورنی⁷ نشان داد که سرعت سوزش پیشران‌های بر پایه HTPB با افزایش ۲۰٪ از پودر آلومینیوم Alex در فرمولاسیون سرعت سوزش به میزان ۷۰٪ افزایش می‌یابد که این مقدار بیش از افزایش سرعت سوزش هنگام استفاده از آلومینیوم با اندازه معمولی است. در اندازه‌گیری سرعت سوزش به خوبی مشخص شده است که حرارت از فاز گازی به سطح سوزش منتقل می‌شود و سبب گرم شدن سطح سوزش می‌شود. هنگام استفاده از نانوذرات آلومینیوم واکنش در ناحیه سطح احتراق کامل می‌شود که سبب افزایش میزان حرارت بازگشتی به سطح جامد نسوخته می‌شود [۹]. علت دیگر افزایش سرعت سوزش در موقع اضافه کردن نانوآلومینیوم، احتراق نانوذرات آلومینیوم در نزدیکی سطح سوزش است. این فاصله احتراقی هنگام استفاده از نانوذرات آلومینیوم کمتر از ذرات آلومینیوم با اندازه معمولی است [۸ و ۷]. افزایش سرعت سوزش هنگام استفاده از نانو ذرات آلومینیوم وابسته به اندازه ذرات و میزان نانوذرات آلومینیوم است. با کاهش اندازه ذرات آلومینیوم سرعت سوزش به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. گالفتی⁸ نشان داد با جایگزینی آلومینیوم با اندازه 100 nm به جای آلومینیوم که جمعاً با اندازه $90 \mu m$ را تشکیل داده بودند با آلومینیوم اندازه ذرات $30 \mu m$ سرعت سوزش حدود ۱۰۰٪ افزایش می‌یابد [۱۲ و ۱۱]. شکل و اندازه نانو ذرات آلومینیوم استفاده شده توسط گالفتی در شکل ۳ و میزان تغییرات ایجاد شده در سرعت سوزش هنگام استفاده از ذرات آلومینیوم با اندازه‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است.

5-pot life
6-Elongation
7-Chiaverini
8-Galfetti

1-Web
2- Grain
3-Piobert
4-Vielle



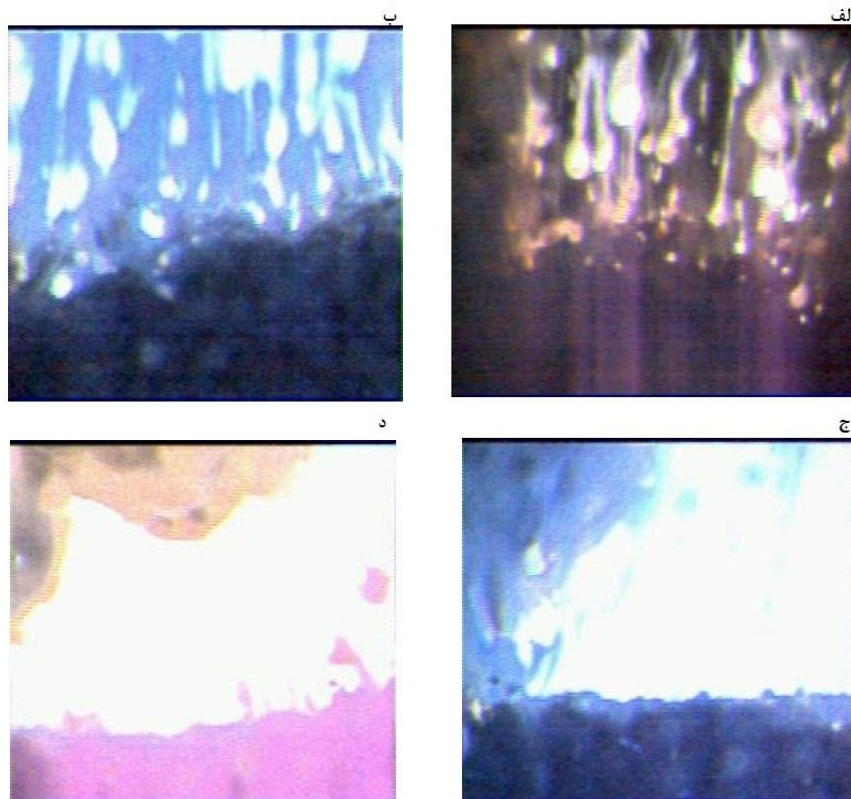
شکل ۳- ذرات نانو آلومینیوم استفاده شده توسط کالفتی با اندازه ۱۰۰ nm [۱۳].

شکل ۴- نمودار تغییرات سرعت سوزش بر حسب فشار با تغییر درصد نانوذرات آلومینیوم [۱۰].

درصد جرمی نانوذرات آلومینیوم از طریق جایگزینی با ذرات آلومینیوم معمولی تعداد نواحی درخشان و توزیع پراکندگی آن بیشتر می‌شود. این میزان برای پیشراندهای حاوی ۱۰۰٪ آلومینیوم ریز به حداکثر می‌رسد که نتیجه‌ی آن ایجاد یک ناحیه احتراقی بسیار درخشان است. نزدیکتر شدن شعله به سطح سوزش همراه با ایجاد نواحی تابش قویتر و زیادتر منجر به افزایش حرارت برگشتی به سطح سوزش می‌شود که مهمترین نتیجه‌ی آن افزایش سرعت سوزش است [۴].

۴- ساختار شعله

استفاده از ذرات کوچکتر سبب کاهش میزان تجمع‌ها و قطر ذرات سوزشی می‌شود. از آنجا که ذرات ریز آلومینیوم سریعتر محترق می‌شوند جبهه شعله به سطح سوزش نزدیکتر می‌شود. مزیت دیگر استفاده از نانوذرات آلومینیوم در ساختار شعله افزایش تمرکز درخشندگی ناحیه شعله است. نواحی درخشان حاصل از سوزش قطرات آلومینیوم در پیشراندهای حاوی آلومینیوم با اندازه ذرات معمولی منفرد و جدا از یکدیگر در ساختار شعله است. با افزایش



شکل ۵- نواحی درخشان در شعله پیشرانه حاوی الف- 30 μm - ب- 15 μm - ج- 3 μm - د- 100 nm [۴].

مترکب محصولات می‌باشد که نتایج مطلوبی چون کاهش ناپایداری احتراق دارد. این ذرات اکسیدی باقیمانده به طور موثری باعث کاهش نوسانات فرکانس پایین تا متوسط می‌شوند. برای مثال اندازه ذرات بهینه برای کاهش نوسانات با فرکانس ۵۰۰ Hz برابر ۳۰-۱۰ μm است. البته این ذرات باقیمانده نتایج نامطلوبی مانند خوردگی نازل و دود خروجی دارند [۵]. منشا ذرات اکسیدی باقیمانده عبارتند از:

۱- Al_2O_3 ناشی از لایه اکسیدی

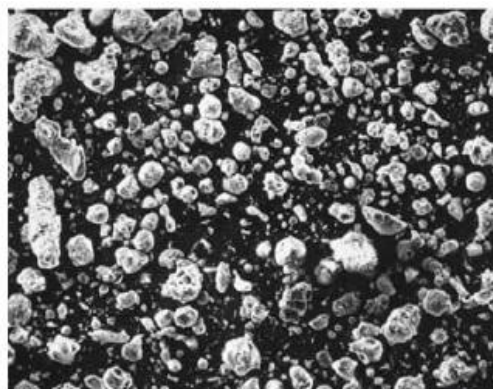
۲- Al_2O_3 ناشی از احتراق ذرات آلومینیوم

این تجمع از نانوذرات آلومینیوم محترق شده تولید شده‌اند اما اندازه آنها بسیار کوچکتر از تجمعات ناشی از احتراق آلومینیوم معمولی است [۲]. گالفتی نشان داد که با کاهش اندازه ذرات آلومینیوم اندازه ذرات اکسیدی باقیمانده نیز کاهش می‌یابد. او گزارش کرد که با جایگزینی نانوذرات آلومینیوم با اندازه ۱۵۰ nm با آلومینیوم با اندازه ۳۰ μm متوسط ذرات از ۱۳ μm به ۶/۶ μm کاهش یافته است [۱۸ و ۱۱].

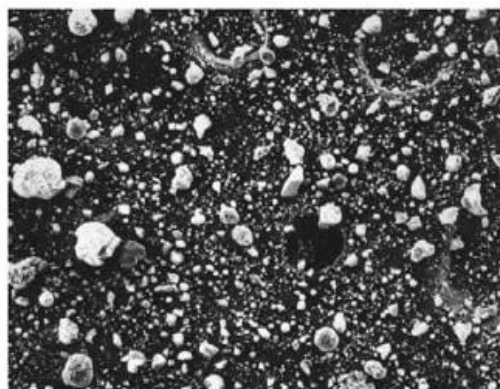
از آنجا که آستانه‌ی احتراق نانوذرات آلومینیوم 10^9 برابر ذرات آلومینیوم معمولی است، نانوذرات آلومینیوم سریعتر محترق می‌شوند و این سبب می‌شود تا دمای شروع احتراق و گرمای احتراق کاهش می‌یابد [۹]. سان^۱ در سال ۲۰۰۶ گزارش کرد که با جایگزینی ۹٪ نانوذرات آلومینیوم در پیشرانده حاوی ۲۰٪ سوخت فلزی آلومینیوم گرمای احتراق از ۹۵۵۵ J/g به ۸۱۳۰ J/g و دمای شروع احتراق از ۳۰۹/۵°C به ۲۸۵/۶°C کاهش پیدا کرده است [۱۰]. محققان دلیل این تغییر را کاهش در میزان آلومینیوم فلزی در نانوذرات آلومینیوم نسبت به آلومینیوم معمولی می‌دانند. مقدار آلومینیوم اکسیدی برای آلومینیوم با اندازه ۳۰ μm برابر ۵٪ وزنی [۸] درحالی‌که مقدار آلومینیوم اکسیدی برای نانوذرات آلومینیوم با اندازه ۱۵۰ nm برابر ۳۸٪ وزنی می‌باشد [۱۷ و ۱۶].

۵- باقیمانده‌های پس از احتراق (خاکستر احتراق)

اولین محصول ناشی از اکسیداسیون آلومینیوم Al_2O_3 است که فاز



ب- آلومینیوم با اندازه 30 μm



الف- آلومینیوم با اندازه 170 nm

شکل ۶- توزیع اندازه ذرات خاکستر باقیمانده الف- پیشرانده حاوی آلومینیوم 170 nm ب- پیشرانده حاوی آلومینیوم 30 μm [۱۱].

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که بیشترین نسبت افزایش سرعت سوزش با جایگزینی ۲۰٪ وزنی آلومینیوم معمولی با نانوذرات آلومینیوم در فرمولاسیون پیشرانده حاصل می‌شود. تاثیر دیگر استفاده از نانوذرات آلومینیوم در پیشرانده، بهبود ساختار شعله بوده که با افزایش مکان‌های دمای بالا و یکپارچگی در نحوه توزیع آنها و همچنین نزدیک‌تر شدن شعله به سطح سوزش ممکن می‌شود. کاهش اندازه و میزان خاکستر باقی مانده، کاهش دما و زمان شروع احتراق از دیگر مزایای استفاده از نانوذرات آلومینیوم است. از معایب استفاده از نانوذرات آلومینیوم، می‌توان به هزینه بالا و کاهش گرمای احتراق اشاره نمود که ناشی از تشکیل اکسید آلومینیوم می‌باشد.

استفاده از نانوذرات آلومینیوم در فرمولاسیون پیشرانده‌ها گسترش چندانی نیافته‌اند که از مهمترین دلایل آن می‌توان به هزینه بالای استفاده از نانوذرات آلومینیوم اشاره کرد [۱].

۶- نتیجه‌گیری

با کاهش اندازه ذرات آلومینیوم سطح ویژه آنها افزایش می‌یابد که سبب افزایش کارایی احتراقی آنها می‌شود. افزایش نانوذرات آلومینیوم به پیشرانده‌های جامد مرکب بر پایه آمونیوم پرکلرات سبب افزایش خطی سرعت سوزش می‌گردد این میزان افزایش متناسب با نوع و میزان استفاده از نانو ذرات آلومینیوم در فرمولاسیون پیشرانده خواهد بود.

مراجع

- [1] Agrawal, J. P. "High Energy Materials Propellants, Explosives and Pyrotechnics."; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA Weinheim, 2010.
- [2] Yang, V.; Brill, T.B. "Solid Propellant Chemistry Combustion and Motor Interior Ballistics."; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [3] Meda, L.; Marra, G.; Galfetti, L.; Inchingalo, s. "Nano-composites for rocket solid propellants."; Composites Science and Technology, 2005, 65, 769-773.
- [4] Galfetti, L.; DeLuca, L.T.; Severini, F. "Pre and post-burning analysis of nano-aluminized solid rocket propellants."; Aerospace Science and Technology, 2007, 11, 26-32.
- [5] Dokhan, A.; Price, E. W.; Seitzman, J.M. "Combustion Mechanisms Of Bimodal And Ultra-Fine Aluminum In AP Solid Propellant", 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2002.
- [6] Dokhan, A.; Price, E. W. "The Effects Of Bimodal Aluminum With Ultrafine Aluminum On The Burning Rates Of Solid Propellants."; Proceedings Of The Combustion Institute, 2001, 29, 2939-2945.
- [7] Pivkina, A.; Ulyanova, P.; Frolov, Y.; Zavyalov, S.; Schoonman, J. "Nanomaterials for Heterogeneous Combustion."; Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2004, 29, 39.
- [8] Davenas, A. "Solid Rocket Propulsion Technology."; Aerospace vehicles. Engines, 1993.
- [9] Dokhan, A. "The Ignation of Ultra-Fine Aluminium Perchlorate Solid Propellant Flames", 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003.
- [10] Sun, Y.; Li, S. "Combustion Characteristics of Coated Nano Aluminum in Composite Propellants."; Defence Science Journal, 2006, 56,4, 543-550.
- [11] Dupays, J.; Fabignon, Y. "Combustion of Aluminum Particles in Solid Rocket Motors", ONERA/DLR Aerospace Symposium, 2000.
- [12] De Luca, L. T.; Galfetti, L.; Severini, F. "Burning of Nano-Aluminized Composite Rocket Propellants."; Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2005, 41, 6, 680-692.
- [13] Galfetti, L.; De Luca, L. T.; Severini, F.; Meda, L.; Marra, G.; Marchetti, M.; Regi, M.; Bellucci, S. "Nanoparticles for solid rocket propulsion."; J. Phys., Condens. Matter, 2006, 18, 1991-2005.
- [14] Meda, L.; Marra, L.; Galfetti, L.; De Luca, L. T.; "Nano-aluminum as energetic material for rocket propellants."; Materials Science and Engineering, 2007, 27, 1393-1396.

Archive of SID