

تأثیر پوشش‌های فلزی بر خصوصیات اشتعالی آلومینیوم

محمد رضا سویزی^{۱*}، محمد مولایی^۲

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*E-mail: mrsovizi@hotmail.com

(تاریخ وصول: ۸۹/۶/۹، تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۱۱)

چکیده

استفاده از آلومینیوم در فرمولاسیون پیشرانه‌های جامد به دلیل گرمازا بودن اکسایش آن و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی، تأثیر خوبی بر خصوصیات عملکردی پیشرانه علی‌الخصوص ایمپالس ویژه می‌گذارد. اما مشکلی که در راستای این کاربرد وجود دارد، مربوط به احتراق و اشتعال این فلز می‌شود که علت آن حضور لایه‌ی اکسیدی آلومینا بر سطح آلومینیوم می‌باشد. یکی از راهکارهای حذف این لایه‌ی اکسیدی و کاهش زمان تأخیر اشتعال و افزایش سرعت سوزش، ایجاد پوشش‌های فلزی همچون نیکل، کبالت، آهن و ... بر روی سطح آلومینیوم، می‌باشد که در این مقاله به طور مفصل راجع به آنها بحث شده و تأثیر این پوشش‌های فلزی بر سرعت سوزش و نیز عملکرد پیشرانه‌های موردنظر بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: پوشش‌دهی آلومینیوم، پوشش نیکل، پوشش کبالت، پوشش آهن، احتراق آلومینیوم، سرعت سوزش، مکانیسم اشتعال، پیشرانه‌ها.

۱- مقدمه

خوبی نشان می‌دهد که آلومینیوم پس از بور و بریلیم، بالاترین گرمای آزاد شده به ازای جرم اولیه را داراست. قابل ذکر است با وجود اینکه گرمای آزاد شده به ازای واحد جرم، در مورد B و Be بیشتر از Al است ولی باز هم آلومینیوم بیشتر مدنظر بوده و مورد استفاده قرار گرفته است. چراکه در مورد بور، نقطه‌ی ذوب B_2O_3 پایین است و در مورد Be هم مشکل سمیت مطرح می‌باشد [۲].

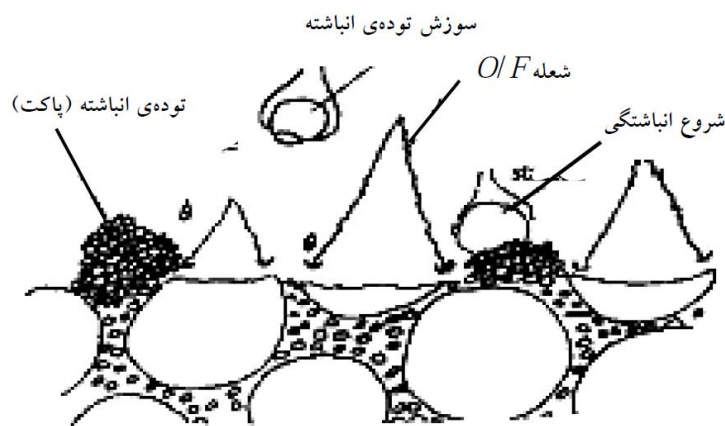
گرمازا بودن اکسایش Al باعث شد تا فرآیند احتراق این فلز برای کاربردهای انرژی زایی مطلوب باشد. در اواسط دهه‌ی ۱۹۵۰، چارلز هندرسون و کیت رامبل مقادیر قابل توجهی از پودر این فلز را وارد فرمولاسیون پیشرانه جامد کردند که نتیجه‌ی آن بهبود خصوصیات عملکردی پیشرانه و افزایش ایمپالس ویژه‌ی آن بود [۱]. جدول ۱، به

۱- استادیار

۲- کارشناس ارشد پیشرانه

جدول ۱- مقادیر آنتالپی احتراق سوخت‌های فلزی [۲].

سوخت	دانسیتته ($\frac{g}{cm^3}$)	گرمای احتراق به ازای واحد جرم ($\frac{kJ}{g}$)	گرمای احتراق به ازای واحد حجم ($\frac{kJ}{cm^3}$)
آلومینیوم	۲/۷۰	۳۱/۰۶	۸۳/۸۶
بور	۲/۳۴	۵۸/۴۷	۱۳۷/۴۵
برلییم	۱/۸۵	۶۶/۴۶	۱۲۲/۹۵
کربن	۲/۲۵	۳۲/۷۸	۷۳/۷۶
منیزیم	۱/۷۴	۲۴/۷۳	۴۳/۰۳
تیتانیوم	۴/۵۴	۱۹/۷۳	۸۹/۵۷
زیرکونیوم	۶/۴۹	۱۲/۰۴	۷۸/۱۴



شکل ۱- تصویری از فرآیند انباشتگی ذرات آلومینیوم [۵].

این فلز می‌باشد که نتیجه‌ی آن محدود شدن شدید سرعت سوزش ذرات Al و کاهش راندمان احتراق در موتور راکت می‌باشد. در یک بررسی پرایس و سیگمن پدیده انباشتگی را در موتورهای راکت جامد مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده شد که همزمان با مصرف شدن پیشرانه، یک لایه‌ی نازک ذوب شده با دمایی حدود $600^\circ C$ روی سطح داخلی در حال واکنش قرار می‌گیرد که این لایه باعث می‌شود تا ذرات Al که اغلب در فاز جامد هستند بین ذرات بزرگتر و در حال سوزش آمونیم پرکلرات جمع شوند. از آنجایی که دمای ذوب خیلی پایین تر از دمای سوزش Al است، لذا سوزش آلومینیوم تنها زمانی رخ خواهد داد که ذرات، یا نزدیک آمونیم پرکلرات در حال اشتعال و یا دور از سطح، تحت تأثیر جریان گازی اکسید شده‌ی داغ قرار بگیرند [۵].

به طور کلی از مزایای سوخت‌های آلومینیومی می‌توان به آنتالپی اکسایش بالا، محصولات بی‌خطر از دید محیطی و قیمت نسبتاً پایین اشاره کرد [۳].

استفاده از فلز آلومینیوم همراه با مشکلاتی است، که به ویژه به مشکل احتراق مربوط می‌شود. در واقع حضور لایه‌ی اکسیدی قوی (Al_2O_3) که به طور طبیعی بر سطح آلومینیوم تشکیل می‌شود، منشأ اصلی مشکل مربوط به احتراق این فلز است. برای اینکه آلومینیوم بسوزد لازم است که ابتدا این لایه‌ی اکسیدی ذوب شود و همین امر موجب بالا رفتن دمای سوزش آلومینیوم (حدود $2050^\circ C$) می‌شود. از طرف دیگر این لایه‌ی اکسیدی مانند سدی بین فلز و اکسیژن اتمسفر عمل کرده و واکنش بین این دو را کند و آهسته می‌کند که نتیجه‌ی آن ایجاد تأخیر در اشتعال خواهد بود [۴]. انباشتگی^۱ ذرات آلومینیوم قبل از احتراق و در طی احتراق، از دیگر مشکلات عملی استفاده از

1- Agglomeration

نتیجه‌ی این کار کاهش دمای اشتعال ذرات به اندازه‌ی تقریباً 170°C بود [۱۰].

مشاهدات نشان داده است که پوشاندن Al با یک ماده‌ی محافظتی مثل نیکل یا آهن، در کاهش پدیده‌ی انباشتگی بسیار مؤثر است. این پوشش‌ها از به هم آمیختگی و به هم پیوستن ذرات جلوگیری می‌کنند و همچنین با Al به‌طور گرم‌آزا واکنش می‌دهند و بدین ترتیب دمای اشتعال را کمتر می‌کنند که این هم مسلماً با کاهش زمان بقای ذرات در سطح پیش‌رانه، باعث کاهش پدیده‌ی انباشتگی می‌گردد. در واقع پوشش فلزی، با حذف لایه‌ی اکسیدی اجازه می‌دهد تا واکنش‌های چند فلزی^۲ برای شتاب بخشیدن به اشتعال صورت بگیرد. این واکنش‌ها دارای انرژی کافی برای مشتعل کردن ذرات حتی در اتمسفرهای خنثی و بی‌اثر می‌باشند [۱۱و۱۲]. در ادامه به بررسی اثر پوشش بعضی از این فلزات بر روی آلومینیوم پرداخته می‌شود.

۲-۱- تأثیر پوشش نیکل

مطالعات نشان داده است که استفاده از ذرات Al پوشش یافته با نیکل، می‌تواند عملکرد احتراق پیش‌رانه‌های حاوی Al را بهبود بخشد. این اثر با این حقیقت که نقطه‌ی ذوب نیکل (۱۷۲۸ K) خیلی بالاتر از آلومینیوم (۹۳۳ K) است، توجیه شدنی است. لایه‌ی جامد Ni روی سطح قطرات Al از انعقاد و انباشتگی روی سطح سوزش پیش‌رانه یا در فاز گازی جلوگیری می‌کند.

در عین حال، مشاهداتی وجود دارد که ثابت می‌کند ذرات Al پوشش یافته با نیکل، آسانتر از ذرات اصلی Al، مشتعل می‌گردند. همچنین مطالعات روی گسترش شعله در ابری از ذرات Al پوشش یافته با نیکل در هوا، ثابت می‌کند که سرعت جبهه‌ی شعله در مقایسه با ابر ذرات Al بدون پوشش، یک افزایش ۴ برابری را دارد. محققین این اثر را با کاهش زمان تأخیر اشتعال ذرات به علت فشار گرمایی حاصل از شکافت گرمایی و پوست انداختن قشر جامد نیکل، توجیه می‌کنند که به دنبال آن مشتعل شدن هسته‌ی عریان Al، آسان می‌گردد. از این گذشته، واکنش‌های شیمیایی گرم‌آزا بین آلومینیوم و نیکل موجب پیشرفت اشتعال می‌گردد [۱۳].

این موارد موجب افزایش و بالا رفتن زمان اقامت^۱ ذرات Al روی سطح خواهد شد که پدیده‌ی انباشتگی آلومینیوم را ممکن می‌کند (شکل ۱) [۱۵]. در واقع انباشتگی ذرات به طولانی بودن زمان بقای ذرات آلومینیوم در لایه‌ی مذاب موجود در سطح سوزش پیش‌رانه مربوط می‌شود. کاهش در این پدیده، موجب می‌شود که بتوان موتورهای راکت جامد کوچکتر ساخت و استفاده‌ی مؤثرتری از آن به عمل آورد [۱۶].

۲- تأثیر پوشش‌های فلزی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، اشتعال و سوختن مؤثر آلومینیوم همیشه یک مسئله بوده است. مطالعات نشان می‌دهد که در راه افزایش اشتعال پذیری و بهبود خصوصیات احتراقی پیش‌رانه‌ی حاوی Al، راهکارهای مختلفی از جمله استفاده از نانو ذرات آلومینیوم و ذرات آلومینیوم پوشش یافته با فلز در فرمولاسیون پیش‌رانه وجود دارد. همچنین استفاده از نانو پودرهای آلومینیوم، در فرمولاسیون به عنوان یک روش جایگزین برای جلوگیری از نتایج نامطلوب انباشتگی آلومینیوم، مورد مطالعه قرار گرفته و مشاهده شده است که با کاهش چشمگیر اندازه‌ی ذره، نانو ذرات آلومینیوم عملاً در داخل سایر لایه‌های مذاب سطحی پخش شده و در فرآیند احتراق مصرف می‌شوند [۷و۸].

با این وجود استفاده از نانو ذرات آلومینیوم در فرمولاسیون پیش‌رانه، دو عیب اساسی دارد [۹]:

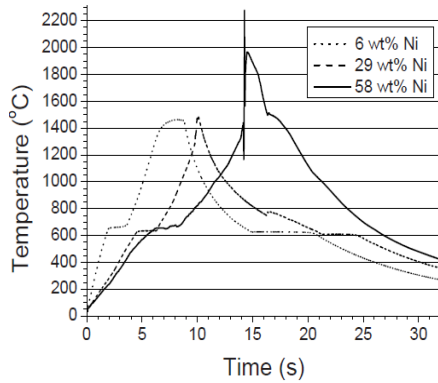
۱- نانو ذرات آلومینیوم به میزان قابل توجهی گرانتتر از میکرو ذرات آن است.

۲- از آنجا که به طور طبیعی لایه‌ی Al_2O_3 ، روی سطح آلومینیوم وجود دارد و با توجه به اینکه در نانو ذرات، نسبت سطح به جرم خیلی بزرگ است، لذا میزان قابل توجهی (۳ تا ۷ درصد وزنی یا بیشتر) از Al_2O_3 را به همراه خواهند داشت.

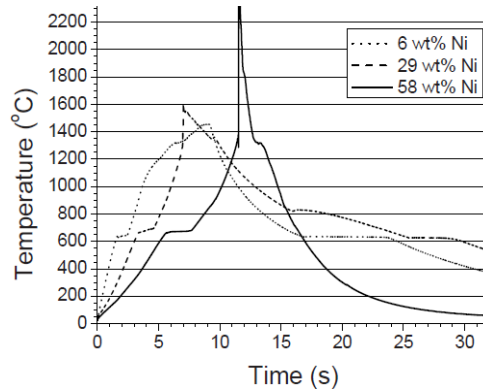
بنابراین به خوبی مشخص است که باز هم حضور لایه‌ی اکسیدی در دسر ساز شد و محققین را به این فکر انداخت که آلومینیوم پوشش‌دهی شود. برای مثال «کوهل و گلاسن» در تلاشی به منظور بهبود بخشیدن به خصوصیات اشتعالی Al، از تکنیک ملغمه برای حذف لایه‌ی سطحی Al_2O_3 و جایگزین کردن آن با لایه‌ی Hg-Al استفاده کردند. اگرچه جیوه با Al یا هوا واکنش نمی‌دهد ولی بازهم

2- Intermetallic reactions

1- Residence time



شکل ۴- نمودار دما-زمان ذرات Al پوشش یافته با Ni در اتمسفر CO₂ [۱۵].



شکل ۳- نمودار دما-زمان ذرات Al پوشش یافته با Ni در اتمسفر Ar [۱۵].

نمودارها مشخص است که ذره با ۶٪ Ni وزنی، در اتمسفر Ar و CO₂ مشتعل نمی‌گردد.

جدول ۲- دمای اشتعال ذرات Al پوشش یافته با Ni در آرگون [۱۵].

محتوای نیکل (درصدوزنی)	دمای اشتعال (°C)
۶	—
۲۹	۱۳۱۳ +/- ۴۱
۵۸	۱۳۴۰ +/- ۳۷

جدول ۳- دمای اشتعال ذرات Al پوشش یافته با Ni در CO₂ [۱۵].

محتوای نیکل (درصدوزنی)	دمای اشتعال (°C)
۶	—
۲۹	۱۳۲۷ +/- ۱۸
۵۸	۱۳۲۳ +/- ۲۰

ذره‌ی با نیکل ۵۸٪ وزنی پس از اشتعال به دماهای خیلی بالاتری نایل می‌شود و این به علت حضور مقدار بیشتری از نیکل است که با Al به طور گرمازا واکنش می‌دهد. با مقایسه‌ی شکل‌های موجود، واضح است که دماهای اشتعال ذرات با ۲۹٪ و ۵۸٪ Ni وزنی در محیط‌های CO₂ و Ar به طور اساسی با هم منطبق و یکسانند و این عدم وابستگی دمای اشتعال ذرات آلومینیوم پوشش یافته با نیکل را به نوع اتمسفر نشان می‌دهد (جداول ۲ و ۳) [۱۵].

در تحقیقی، تأثیر پوشش نیکل بر روی انباشتگی Al بررسی شد و نتایج نشان داد که در اتمسفر هوا و در هر دو فشار بالا و پایین، پوشش های نیکل، اندازه‌ی توده‌ی انباشته را کاهش می‌دهند، اما با رسیدن فشار هوا به ۸ bar، و بالاتر از آن، یک انباشتگی قوی در محصولات احتراق (اکسید آلومینیوم، Al₂O₃) رخ می‌دهد که نتیجه‌ی آن سقوط ناگهانی سرعت سوزش در فشارهای بالاست. چرا که در فشارهای بالاتر از ۸ bar سرعت واکنش‌ها آنقدر بالا می‌رود که تلفات حرارتی بسیار ناچیز می‌گردد و نتیجه‌ی آن هم ذوب شدن اکسیدها می‌باشد. همچنین اندازه‌گیری سرعت انتشار شعله برای ذرات پوشش یافته نشان داد که این سرعت حدود ۱/۵ تا ۴ برابر بیشتر از حالتی است که ذرات Al پوشش ندارند [۴ و ۱۴].

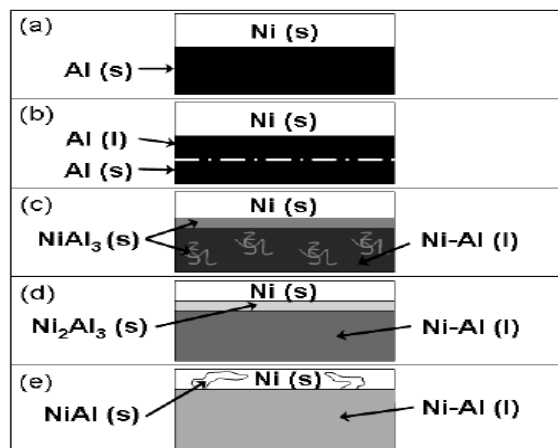
در مطالعه‌ی دیگری، خصوصیات اشتعال و احتراق ذرات Al پوشش یافته با سه ضخامت مختلف از نیکل (۶٪، ۲۹٪ و ۵۸٪ وزنی) مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی آزمایشات اشتعال و خاموش سازی^۱، در هر دو اتمسفر Ar و CO₂ انجام شد. لازم به ذکر است که برای درک اشتعال ذره، شناسایی واکنش‌های بین نیکل و آلومینیوم امری ضروری است و بدین منظور بهتر است که اشتعال ذره در غیاب گازهای واکنشگر مثلاً در حضور اتمسفر Ar صورت بگیرد. شکل‌های ۳ و ۴ نمودار دما- زمان را برای ذرات با مقادیر مختلف از نیکل سطحی نشان می‌دهند. در این نمودارها دمای اشتعال نقطه‌ای است که در آن شیب منحنی دما- زمان به طور شدیدی افزایش می‌یابد. بر اساس

در اینجا، متکی بر فرآیندهای درون ذره‌ای است، تشکیل پی‌درپی ترکیبات واسطه‌ای $NiAl_3$ و Ni_2Al_3 در طی فرآیند اشتعال کاملاً در تفاهم است با مطالعاتی که بر روی مخلوط‌های پودری Ni/Al و نیز ذرات به هم فشرده‌ی Al پوشش یافته با نیکل صورت گرفته است [۱۶-۱۹].

در مطالعه‌ی دیگری، زمان احتراق برای ذرات حاوی پوشش‌های نیکل ۰ تا ۱۵٪ وزنی، در دو اتمسفر هوا و CO_2 تحت بررسی قرار گرفت. زمان کل احتراق برابر با مجموع زمان تأخیر اشتعال^۲ و زمان سوختن^۳ می‌باشد. شکل ۶، زمان تأخیر اشتعال، زمان سوختن و زمان کل احتراق را برای ذرات Al با محتوای نیکل مختلف نشان می‌دهد که در هوا و فشار اتمسفری اندازه گرفته شده است. به خوبی مشخص است که وجود پوشش نیکل تأثیر بسزایی بر کاهش زمان تأخیر اشتعال دارد. بطوریکه با افزایش کسر جرمی نیکل از ۰ تا ۳٪ وزنی، زمان تأخیر اشتعال به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و حداقل زمان تأخیر اشتعال مربوط به پوشش ۳٪ است. این روند کاهش در میزان زمان تأخیر اشتعال، موجب کمتر شدن زمان کل احتراق، نسبت به حالت بدون پوشش، می‌گردد [۱۳].

آزمایشات میکروسکوپی متعدد از نمونه‌های ذرات نشان داده است که پوشش روی سطح ذره همیشه یکنواخت نیست. برای مقادیر کم از پوشش، پوشش Ni به شکل دانه‌های کوچکی دور تا دور ذره دیده می‌شود و پوشش دهی به طور کامل صورت نگرفته و لذا بخش‌هایی از سطح هنوز توسط آلومینا پوشیده است (شکل ۷-الف). اما برای مقادیر بالاتر پوشش، فیلمی یکنواخت از پوشش بدست می‌آید (شکل ۷-ب). پس می‌توان دو نتیجه گرفت [۱۳]:

- از آنجا که برای مقادیر کم از پوشش، یکنواخت بودن و همگن بودن آن ممکن نیست، لذا کاهش مشاهده شده در زمان اشتعال را می‌توان به راحتی به واکنش‌های چند فلزی نسبت داد؛
- چون تنها در مورد پوشش‌های هموزن زمان احتراق کاهش می‌یابد، پس می‌توان نتیجه گرفت که تجزیه و شکست پوسته‌ی نیکل پس از ذوب شدن و گدازش^۴ کامل Al پوشیده شده، منجر به سوختن پرانرژی‌تر، پس از اشتعال می‌گردد.



شکل ۵- مراحل مکانیسم اشتعال ذرات Al پوشش یافته با Ni :

(a) $< 660^{\circ}C$ (b) $660^{\circ}C$ (c) $660^{\circ}C - 854^{\circ}C$

(d) $1133^{\circ}C - 1325^{\circ}C$ (e) $1133^{\circ}C - 854^{\circ}C$

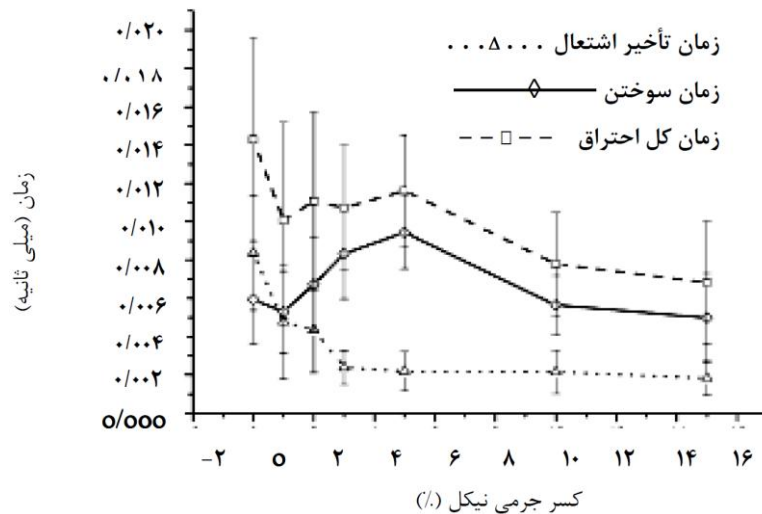
مناطق روشن تر موجود در شکل مربوط به محتوای نیکل بالاتر است [۱۵].

نتایج حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی، مکانیسمی را برای اشتعال این ذرات در اتمسفر Ar و CO_2 ارائه می‌کند که به طور شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است:

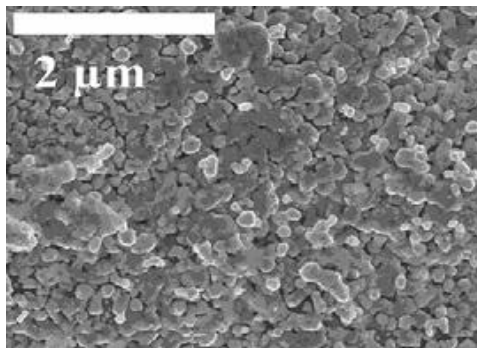
به محض ذوب شدن هسته‌ی مرکزی ($660^{\circ}C$ ، شکل ۵-ب)، $NiAl_3$ به صورت لایه‌ای جامد در طول وجه مشترک پوسته/ هسته و نیز به شکل ساختارهای تارمانند^۱ در هسته‌ی مرکزی و به سبب جداسازی فاز شروع به تشکیل شدن می‌کند (شکل ۵-ج). وقتی که دما از نقطه‌ی ذوب $NiAl_3$ ($854^{\circ}C$) فراتر می‌رود، جامد Ni_2Al_3 شروع به تشکیل شدن در طول وجه مشترک می‌کند (شکل ۵-د). زمانیکه دما از $1133^{\circ}C$ بیشتر شد، Ni_2Al_3 ذوب شده و موجب تشکیل جامد $NiAl$ می‌گردد (شکل ۵-ه). $NiAl$ به جای اینکه به صورت لایه‌ای در طول وجه مشترک تشکیل گردد، در پوسته‌ی جامد نیکل نفوذ کرده و به طور قابل توجهی ناحیه‌ی بین وجهین را افزایش می‌دهد [۱۵]. بر اساس مکانیسم فوق‌الذکر مشخص است که مکانیسم اشتعال ذرات Al پوشش یافته با Ni متکی بر فرآیندهای درون ذره‌ای است و دمای اشتعال در حضور پوشش نیکل کاهش یافته و به حدود $1325^{\circ}C$ رسیده است. ضمناً علیرغم طبیعت هتروژن ذرات اصلی (هسته‌ی مرکزی Al و پوسته‌ی Ni) فازهای محصول به خوبی با هم مخلوط می‌شوند. جالب توجه است که اگرچه مکانیسم اشتعال توصیف شده

2- Ignition delay time
3- Combustion time
4- Liquefaction

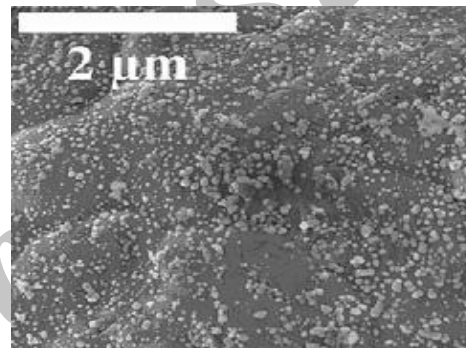
1- web-type structures



شکل ۶- تأثیر پوشش نیکل روی زمان تأخیر اشتعال، زمان سوختن و زمان کل احتراق در اتمسفر هوا [۱۳].



(ب)



(الف)

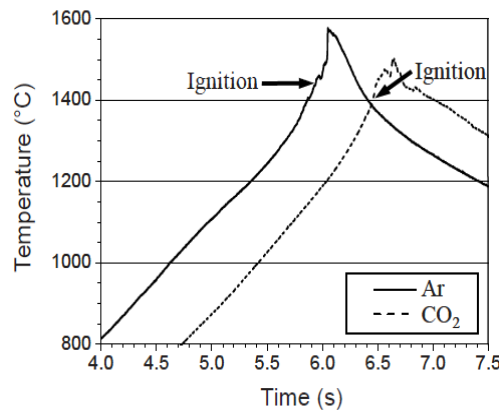
شکل ۷- تصاویر پوششی میکروسکوپ الکترونی از ذرات آلومینیوم پوشش یافته با نیکل: (الف) پوشش ۲٪ وزنی نیکل، (ب) پوشش ۱۰٪ وزنی نیکل [۱۳].

زمانیکه NiAl_3 در 854°C ذوب نشود، نرخ حرارتی را چندان تحت تأثیر قرار نمی‌دهد (و لذا این دما برای اشتعال ذره، بحرانی، به حساب می‌آید). اما در مورد ذرات Al پوشش یافته با آهن، واکنش‌های چندفلزی به محض ذوب شدن آلومینیوم در 660°C به میزان قابل توجهی در تولید حرارت مشارکت می‌کند. بنابراین دمای موردنیاز برای استفاده‌ی گرمایی از واکنش‌های چندفلزی، در ذرات پوشش یافته با آهن، پایین تر از ذرات پوشش یافته با نیکل است که این تأثیر مطلوب‌تر پوشش‌های Fe در طی احتراق پیش‌رانه را توجیه می‌کند [۱۵ و ۲۰]. در مطالعه‌ی، خصوصیات اشتعالی ذرات Al با قطر $2/38\text{mm}$ که با ضخامت‌های مختلف از آهن (۵، ۲۵ و ۵۶٪ وزنی) پوشش یافته‌اند در دو اتمسفر Ar و CO_2 بررسی شد.

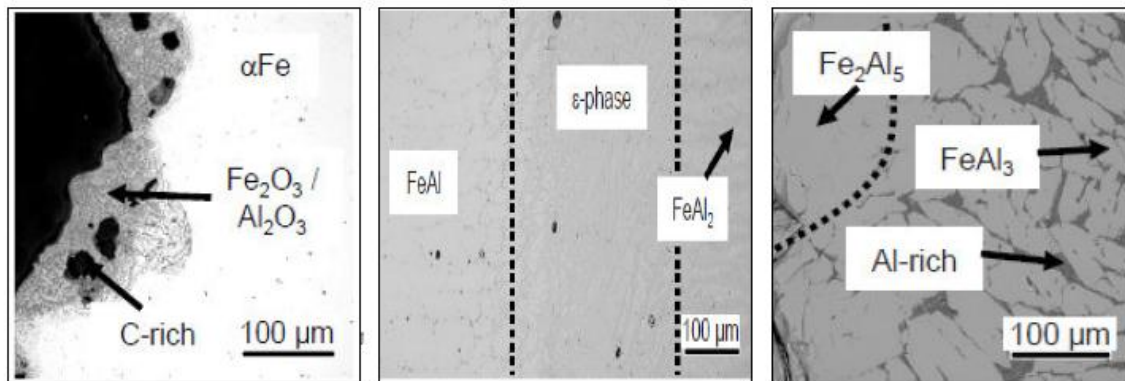
در واقع یکی از نتایج مهم این مطالعه، این واقعیت بود که انجام واکنش‌های بسیار انرژی‌زای چندفلزی بین هسته‌ی مایع Al و پوسته‌ی جامد Ni، زمان اشتعال ذره را به شدت کاهش می‌دهد.

۲-۲- پوشش دهی ذرات Al با آهن

یکی از دلایل استفاده از آهن به عنوان پوشش، غیر سمی بودن آن (برخلاف نیکل) می‌باشد. به علاوه کاهش پدیده‌ی انباشتگی Al در طی سوختن پیش‌رانه توسط آهن بسیار موثرتر و بهتر از نیکل صورت می‌گیرد که البته علت این واقع را می‌توان با مقایسه منحنی‌های گرادبان دمایی بین ذرات پوشش یافته با نیکل و ذرات پوشش یافته با آهن توجیه کرد. در مورد پوشش‌های Ni واکنش‌های چندفلزی تا



شکل ۸- نمودار دما - زمان ذرات Al پوشش یافته با آهن در دو اتمسفر Ar و CO₂ [۲۰].



شکل ۹- تصاویر پویشی میکروسکوپ الکترونی از ذرات Al پوشش یافته با آهن که در اتمسفر CO₂ مشتعل شده اند، همراه با نتایج حاصل از EDX [۲۰].

اشتعال بدست آمده در اتمسفرهای Ar و CO₂، انجام واکنش بین پوسته ی آهن و محیط CO₂ می‌باشد. تصاویر پویشی میکروسکوپ الکترونی (SEM) حاصل از اشتعال ذره در اتمسفر CO₂، به خوبی حضور Fe₂O₃ و یک فاز غنی از کربن را که در اتمسفر Ar مشاهده نشده بود، نمایش می‌دهد و این خود مؤید انجام واکنش بین CO₂ و پوسته‌ی آهن است (شکل ۹) [۲۰].

جدول ۴- دمای اشتعال ذرات Al پوشش یافته با آهن ۵۶٪ وزنی [۲۰].

نوع اتمسفر	دمای اشتعال (°C)
Ar	2441 ± 9 °C
CO ₂	2421 ± 21 °C

انجام آزمایشات در اتمسفر CO₂ از این جهت اهمیت دارد که CO₂ یکی از اکسید کننده های اصلی Al در موتورهای راکت جامد است. شکل ۸، نمودار دما-زمان را برای ذرات Al پوشش یافته با آهن ۵۶٪ وزنی، که در CO₂ و Ar مشتعل شده اند نشان می‌دهد.

باز هم دمای اشتعال مربوط است به نقطه ای که در آن یک افزایش ناگهانی و تند در منحنی دما-زمان ایجاد می‌شود. مشاهده می‌شود که دمای اشتعال ذرات آلومینیوم پوشش یافته با آهن، نسبت به ذرات پوشش یافته با نیکل، حدود ۱۰۰ °C بالاتر است که علت آنرا می‌توان به پراورزی تر بودن سیستم Ni-Al نسبت به سیستم Fe-Al (گرم‌تر بودن واکنش‌های بین نیکل و آلومینیوم) نسبت داد. همچنین طبق جدول ۴، مشخص است که دمای اشتعال در اتمسفر CO₂ نسبت به اتمسفر آرگون کمتر می‌باشد. در واقع به نظر می‌رسد که این بار نوع اتمسفر بر اشتعال ذره تأثیر گذار است و علت این اختلاف بین دماهای

در یک بررسی تأثیر پوشش کبالت (۱٪ وزنی) که از طریق آبکاری بدون برق، بر روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌شود، بر روی خصوصیات احتراقی ذرات آلومینیوم مطالعه شد. مشاهده شد که در اتمسفر CO_2 ، در فشارهای بالا، با انجام واکنش گرماگیر $CO_2 \rightarrow CO, C$ ، کربن آزاد شده مانند لایه ای جامد روی ذرات پوشش یافته با کبالت نشست کرده و مانع از کامل شدن احتراق می‌گردد. اما در مورد ذرات پوشش یافته با نیکل، شدت بالای واکنش در طی احتراق، ذره را مذاب نگهداشته و باعث می‌شود تا کربن با آن مخلوط شده و لایه‌ی گرافیتی تشکیل ندهد. از طرف دیگر، واکنش احتمالی نیکل با کربن، تولید کاربید نیکل می‌کند که از تشکیل پوسته‌ی جامد گرافیتی و در نتیجه خاموش شدن واکنش احتراق ممانعت به عمل می‌آورد [۴].

۳- نتیجه گیری

برای جلوگیری و کاهش معایبی چون طولانی بودن زمان تأخیر اشتعال و انباشتگی ذرات آلومینیوم، یکی از راهکارها پوشش‌دهی آلومینیوم با لایه‌ی نازکی از فلزاتی مثل نیکل، آهن و کبالت است. همه‌ی این پوشش‌های فلزی، انباشتگی آلومینیوم فلزی را قبل از احتراق به طور کامل از بین می‌برند. اما پوشش نیکل به دلیل میزان زیاد نرخ تولید حرارت، موجب پیشرفت انباشتگی باقیمانده‌ی احتراق می‌شود. همچنین قابلیت اشتعال تمام ذرات آلومینیوم پوشش یافته با فلزات مذکور، نسبت به مواد بدون پوشش، به طور وسیعی بهبود و سرعت سوختن در تمام اتمسفرهای بررسی شده، افزایش می‌یابد. در واقع با ایجاد پوشش فلزی، انجام واکنش‌های چند فلزی بسیار انرژی زا بین هسته‌ی مایع آلومینیوم و پوسته‌ی جامد پوشش، میسر می‌شود که نتیجه‌ی آن، کاهش شدید زمان اشتعال ذره است. همانطور که بحث شد، دمای اشتعال ذرات آلومینیوم پوشش یافته با نیکل، نسبت به دمای اشتعال ذرات پوشش یافته با آهن حدود $100^\circ C$ کمتر است. ضمناً برخلاف پوشش‌های نیکل، پوسته‌ی آهن با اتمسفر CO_2 واکنش داده و دمای اشتعال را در مقایسه با اتمسفر آرگون کاهش می‌دهد. علاوه بر این، مقایسه‌ی تأثیر این دو پوشش بر روی پدیده‌ی انباشتگی نشان می‌داد که کاهش پدیده‌ی انباشتگی آلومینیوم در طی سوختن پیشرانه، توسط آهن بسیار مؤثرتر و بهتر از نیکل صورت می‌گیرد.

شکل ۹، فازهای Fe-Al را نیز نشان می‌دهد که عبارتند از: آهن α ، FeAl، فاز ϵ (که تنها در دماهای بالای $1102^\circ C$ وجود دارد)، $FeAl_2$ ، Fe_2Al_3 ، $FeAl_3$ و محلول جامد غنی از Al (مناطق روشن‌تر مربوط به محتوای آهن بیشتر است). براساس آنچه در شکل ۹ می‌بینیم و طبق آزمایشات خاموش سازی، مشخص شد که فاز α (آهن تنها پس از اشتعال ذره یافت می‌شود. به علاوه در محصولات پس از اشتعال، آهن خالص دیده نمی‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که اشتعال، با تبدیل آهن خالص به آهن α شناسایی می‌گردد. مکانیسم اشتعال برای ذرات Al پوشش یافته با آهن به ترتیب زیر می‌باشد [۲۰]:

۱- در دمای $660^\circ C$ ، آلومینیوم ذوب و گداخته می‌شود و امکان تشکیل جامد Fe_2Al_5 در وجه مشترک پوسته-هسته و حل شدن آهن در هسته‌ی مرکزی Al فراهم می‌شود.

۲- در دمای $1169^\circ C$ ، Fe_2Al_5 ذوب شده و به دنبال آن جامد FeAl در وجه مشترک تشکیل می‌گردد.

۳- بسته به نوع اتمسفر در دمای حدود $1412^\circ C$ تا $1442^\circ C$ اشتعال رخ می‌دهد که این فرآیند مربوط به تبدیل شدن پوشش آهن به آهن α است.

برخلاف ذرات پوشش یافته با نیکل، در ذرات پوشش یافته با آهن، محصولات پس از اشتعال به خوبی مخلوط نمی‌شوند و محتوی لایه‌ی هایی از ترکیبات مختلف آهن-آلومینیوم هستند که این خصوصیت ممکن است به دلیل اختلاط ناپذیری فازهای مایع آهن-آلومینیوم و به خاطر نفوذ آهسته‌تر آهن در فاز مذاب آلومینیوم باشد [۲۰].

۳-۲- پوشش کبالت

پوشش کبالت نیز همچون پوشش نیکل سرعت سوزش را افزایش و پدیده‌ی انباشتگی را کاهش می‌دهد. هم پوشش نیکل و هم کبالت، در دماهای بالا خیلی سریعتر از Al اکسید شده و انرژی اضافی را برای گرم کردن ذرات تا بالای نقطه‌ی ذوب آلومینیوم فراهم می‌کنند و در نتیجه اکسید فلزی با Al یک واکنش ترمیت^۱، انجام داده منبع گرمایی شدیدتری را تولید می‌نماید که به اشتعال ذرات Al کمک می‌کند [۱۳].

تشکیل نمی‌دهند و احتراقشان به طور کامل انجام می‌شود.

ذرات پوشش یافته با نیکل بر خلاف ذرات پوشش یافته با کبالت، در اتمسفر CO_2 ، حتی در فشارهای زیاد هم پوسته‌ی جامد گرافیتی را

مراجع

- [1]. Brown, H. "Aluminum and its Applications."; Pitman Publishing Corp, New York and London, 1948.
- [2]. Alain Davenas, "Solid Rocket Propulsion Technology,"; First English edition, 1993.
- [3]. Trunov, A. M.; Schoenitz, M.; Dreizin, E. "Ignition of Aluminum Powders under Different Experimental Conditions."; Propellant, Explosives, Pyrotechnics, 2005, 30 (1), 517-528.
- [4]. Hahma, A.; Gany, A.; Palovuori, K. "Combustion of activated aluminum."; Combustion and Flame, 2006, 145, 464-480.
- [5]. Price, E. W.; Sigman, R.K. "Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics."; American Institute of Aeronautics and Astronautics: New York, 2000, 185, 663-688.
- [6]. Breiter, V.M.; Mal'nev, V.M.; Popov, E.I. "Means of Modifying Metallic Fuel in Condensed Systems."; Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1990, 26(1), 86-96.
- [7]. Baschung, B.; Grune, D.; Licht, H.H. "Combustion Phenomena of A Solid Propellant Based on Aluminium Powder."; International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2002, 5, 219-225.
- [8]. Jackson, T.L.; Buckmaster, J.; Wang, X. "Modeling of Propellants Containing Ultrafine Aluminum."; Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(1), 158-165.
- [9]. Kwon, Y.S.; Gromov, A.A.; Iyin, A.P. "Reactivity of Superfine Aluminum Powders Stabilized by Aluuminum Diboride."; Combustion and Flame, 2002, 131, 349-352.
- [10]. Kuehl, D.K.; Glassman, I. "Mercury-Coated Metal Particles as Propellant Fuel."; U.S. Patent 3,328,805, 1967.
- [11]. Babuk, V.A.; Vassiliev, V.A.; Sviridov, V.V., "Propellant Formulation Factors and Metal Agglomeration in Combustion of Aluminized Solid Rocket Propellant."; Combustion Science and Technology, 2001, 163, 261-289.
- [12]. Pokhil, P.F.; Belyayev, A.F.; Frolov, Yu.V.; Logachev, V.S.; Korotkov, A.I. "Combustion of Powdered Metals in Active Media."; Nauka: FTD-MT-24-551-73, 1972.
- [13]. Escot Bocanegra, P.; Chauveau, C.; Gokalp, I. "Experimental Studies on the Burning of Coated and Uncoated micro and nano-sized Aluminum Particles," Aerospace Science and Technology, 2007, 11, 33-38.
- [14]. Yavor, Y.; Gany, A. "Effect of Nickel Coating on Aluminum Combustion and Agglomeration in Solid Propellants."; 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, CT., also AIAA J., 5255, 2008.
- [15]. Andrzejak, T. A.; Shafirovich, E.; Varma, A. "Ignition Mechanism of Nickel-coated Aluminum Particles," Combustion and Flame, 2007, 150, 60-70.
- [16]. Thiers, L.; Mukasyan, A.S.; Varma, A. "Thermal Explosion in Ni-Al System: Influence of Reaction Medium Microstructure."; Combustion and Flame, 2002, 131, 198-209.
- [17]. Lebrat, J.P.; Varma, A.. "Self- Propagating High-Temperature Synthesis of Ni3Al."; Combustion Science and Technology, 1992, 88, 211-221.
- [18]. Rogachev, A.S.; Varma, A.; Merzhanov, A.G. "The Mechanism of Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Nickel Aluminides, Part I: Formation of The Product Microstructure in a Combustion Wave."; International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 1993, 2, 25-38.
- [19]. Rogachev, A.S.; Khomenko, I.O.; Varma, A.; Merzhanov, A.G.; Ponamarev, V.I." The Mechanism of Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Nickel Aluminides, Part II: Crystal Structure Formation in a Combustion Wave."; International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 1994, 3, 239-252.
- [20]. Andrzejak, T. A.; Shafirovich, E.; Varma, A. "Ignition Mechanism of Single Iron-Coated Aluminum Particles."; Combustion and Flame, 2007, 150, 82-94.