

مطالعه واکنش‌های سطحی در احتراق ذرات فلزی استفاده‌شده در پیشرانه‌های جامد غنی از سوخت

سیدناصر حسینی ^{۱*}، میلاد خان چوپان ^۲، علی‌اکبر جمالی ^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، naserhosseini1996@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، miladkhanchupan@gmail.com

۳- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، jamalis5@gmail.com

* نویسنده مخاطب

چکیده

بررسی تجربی و تجزیه و تحلیل عددی تأثیر فشار و غلظت اکسیژن روی خصوصیات احتراق پیشرانه‌های غنی از سوخت آلومینیوم/ منیزیم نتایج مطلوبی در پی دارد. جهت اندازه‌گیری فرآیند احتراق پیشرانه‌های غنی از سوخت بر پایه‌ی ذرات فلزی آلومینیوم/ منیزیم استفاده از سیستم آزمایشی اشتعال لیزری در مقیاس کوچک کارآمد می‌باشد. نتایج حاصله بیانگر این است که با افزایش فشار و غلظت اکسیژن، دمای احتراق افزایش‌یافته و منجر به انتقال گرمای جابه‌جایی و بازتاب‌گرمای تابشی شعله به سطح سوزش شده که در نهایت باعث افزایش نرخ‌سوزش می‌شود. با افزایش درصد آلومینیوم و کاهش درصد منیزیم، نرخ‌سوزش افزایش می‌یابد. به منظور درک توزیع محصولات احتراق، یک برنامه شبیه‌سازی دوبعدی متقارن محوری ایجاد شده است. نتایج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که با افزایش فشار، نفوذگاز پیرولیز شده مهار می‌شود در نتیجه با مصرف سریع‌گاز اکسیدکننده، مقدار اکسیژن پایین‌تر و سیانور بالاتر به سطح سوزش نزدیک می‌شود. در مقاله حاضر مدلی مبتنی بر احتراق ذرات آلومینیوم در هوا ارائه شده که در این مدل فرض بر این است که در مرحله‌اشتعال، واکنش‌های ذوب و ناهمگن سطحی تا رسیدن به دمای ذوب اکسید رخ داده و در مرحله احتراق، یک شعله نفوذی حالت شبه‌پایدار وجود دارد که امکان استفاده از تقریب ورق‌های شعله را فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: احتراق، قطره‌آلومینیوم، زمان سوزش، رمجت، پیشرانه

مقدمه

ذرات آلومینیوم یرای بهبود عملکرد نیروی محرکه و پایداری احتراق رمجت سوخت جامد به پیشرانه‌های غنی از سوخت اضافه می‌شوند. با این حال، ذرات آلومینیوم تمایل به تجمع در سطح سوزش دارند. توده ذرات آلومینیوم می‌تواند منجر به بازده احتراق کم‌تری شود. توده‌های بزرگ‌تر می‌توانند سبب اتلاف جریان دو فازی، رسوب خاکستر و تشدید فرسایش و ... شوند. بنابراین، لازم است مشخصات تجمع پیشرانه‌های غنی از سوخت آلومینیوم در رمجت سوخت جامد بررسی شود. احتراق ذرات آلومینیوم، دود و باقی‌مانده اکسید آلومینیوم را ایجاد می‌کند که به میدان جریان انتقال می‌یابد. اشتعال ذرات آلومینیوم با یک مرحله احتراق نسبتاً کوتاه ناهمگن آغاز می‌شود و به سرعت به سمت یک شعله نفوذی تقریباً ثابت با شعله‌کروی جداشده از سطح ذرات در شعاع دو تا پنج واقع شده جهت می‌گیرد [۱،۲]. علاوه بر محصولات گازی ناشی از شعله، میعانات اکسید جامد در سمت ذره سرپوشیده تجمع می‌یابند و یک کلاهک را تشکیل می‌دهند. این کلاهک مساحت کلی آلومینیوم را کاهش می‌دهد و منجر به خروج شدید گازهای سطحی از طریق رقیق‌سازی آلومینیوم مذاب با اکسیدها و مشارکت واکنش‌های نیتريد می‌شود [۳،۴]. پدیده‌ها و مکانیسم احتراق ذرات آلومینیوم از طریق تحقیقات مختلف تحلیلی یا تجربی مشخص شده است و مدل‌های عددی توسعه یافته‌اند. بیشتر مطالعات قبلی روی اشتعال یا احتراق شبه‌پایدار به طور جداگانه متمرکز

بودند و مطالعات عددی دقیقی برای توصیف همه جزئیات در مورد اکسید آلومینیوم از لحاظ محاسباتی سنگین هستند [۵]. مطالعات اولیه روی احتراق ذرات فلزی منفرد متمرکز بود. در مراحل اولیه، محققان تعداد زیادی آزمایش در مورد ویژگی‌های احتراق ذرات آلومینیوم در اندازه‌های مختلف تحت شرایط مختلفی مانند محیط‌های اکسیدکننده، دمای محیط و فشار را انجام دادند. بارتلت [۶] و اولسن [۷] ریز ساختار محصولات احتراق ذرات آلومینیوم با اندازه میکرون را در شرایط مختلف اکسیدی بدست آورد. درزین [۸] و اسووسکی [۹] مطالعات تجربی را در مورد ویژگی‌های اشتعال و احتراق قطره‌آلومینیوم انجام دادند و دریافتند که شرایط جاذبه محیط و فشار اکسیدکننده بر توزیع اندازه و ریزساختار محصولات احتراق تأثیر می‌گذارد. بتدریج تشخیص داده شد که بازده احتراق ذرات آلومینیوم قابل توجهی در عملکرد پیشرانه‌های غنی از سوخت دارد. مطالعات در مورد احتراق ذرات آلومینیوم عمدتاً بر شفاف‌شدن ویژگی‌های احتراق پودر آلومینیوم بعنوان یک افزودنی برای افزایش ایمپالس ویژه یا آرام‌کردن ناپایداری پیشرانه‌های جامد متمرکز شده است [۱۰]. ساندرام و همکاران [۱۱] یک نظریه کلی در مورد اشتعال و احتراق ذرات آلومینیومی با اندازه نانو و میکرون مطرح کردند. املیانوف و همکاران [۱۲] به بررسی احتراق ذره آلومینیوم منفرد در محیط پیشرانه جامد پرداختند. جولین گوریانا و همکاران [۱۳] نقش واکنش‌های ناهمگن در احتراق آلومینیوم را بررسی کردند. زدویف و همکاران [۱۴] میکرو عکس و روش گرمایش با لیزر کربن‌دی‌اکسید را امتحان کردند. تصاویر با وضوح بالا نشان می‌دهد که اشتعال به صورت موضعی آغاز شده و در سراسر سطح ذرات با سرعتی که بستگی به اندازه ذرات دارد منتشر می‌شود. اشتعال ذرات فلزی که با لایه نازک اکسید و خودگرمایش مشخص می‌شود بر حسب عدد ماراگونی به خوبی بیان می‌شود [۱۵]. فدوروف و همکاران [۱۶] قوانین نیمه تجربی اکسیداسیون را تصویب کردند و یک مدل اشتعال را پیشنهاد کردند که شامل رشد گرمایی فیلم اکسید می‌شود. مدل‌های نظری و عددی برای سوزش ذرات آلومینیوم شبه‌پایدار بی‌شمار است. گلاسن [۱۷] گزارش داد که احتراق ذرات فلزی مشابه سوزش قطرات مایع است، بنابراین می‌توان از قانون D^2 استفاده کرد. لیانگ و همکاران [۱۸] مدل عددی دو بعدی را که دارای خواص انتقال متغیر است و تراکم اکسید آلومینیوم و رشد کلاهک اکسید را پیش‌بینی کردند. فابینیون و همکاران [۱۹] یک مدل سه‌بعدی متقارن محوری بر اساس فرمول‌بندی تعادل انرژی در سطح ذرات ارائه دادند. بابوک و همکاران [۲۰] در مدل دقیق پنج منطقه‌ای خود رشد کلاهک اکسیدی^۱ را با نفوذ داخلی اکسید آلومینیوم فرموله کردند. ملچر و همکاران [۲۱] به طور تجربی تأثیر جریان گازهای جابه‌جایی بر احتراق ذرات را بررسی کردند. در مطالعه حاضر بررسی‌های تجربی و عددی

¹ Cap Oxid

آزمایش فوق در یک نمونه استوانه‌ای به قطر 4 mm و طول 7 mm صورت گرفته و به منظور اطمینان از صحت داده‌های تجربی و وضوح پدیده‌های تجربی، نمونه آزمایشی با لاستیک عایق مقاوم در برابر دمای بالا در جوانب محیطی پوشانده شده تا از شعله‌وری در هنگام سوختن جلوگیری شود.

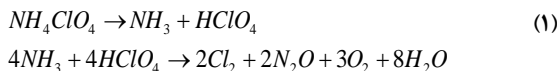
خلاصه‌ای از تمام شرایط آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: شرایط و مقادیر آزمایش

مقادیر	شرایط آزمایش
۰/۱، ۰/۵، ۱/۰، ۱/۴	فشار (MPa)
۰، ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۱، ۴۰	غلظت اکسیژن (%)
۶/۶، ۱۵، ۲۰، ۲۵	شار گرمای خارجی (Kw/m ²)
۲۵	دمای هوای ورودی (°C)

مدل واکنش شیمیایی

احتراق پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم/ منیزیم در رجعت سوخت جامد یک فرآیند واکنش شیمیایی بسیار پیچیده است و اغلب با آزادسازی و جذب انرژی همراه است. بنابراین، تهیه یک مدل واکنش شیمیایی دقیق دشوار است. فرض بر این است که (۱) آمونیوم پرکلرات و پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل^۲ در قسمت جامد گرما را جذب کرده و گرم می‌شوند. آمونیوم پرکلرات ابتدا شروع به پیرولیز شدن در محصولات فاز گازی مربوطه می‌کند. فرمول شیمیایی آمونیوم پرکلرات در سطح سوزش بدین صورت است.



پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل دیرتر از آمونیوم پرکلرات شروع به پیرولیز می‌کند و محصول اصلی تجزیه بوتادین است که می‌تواند با اکسیژن به واکنش ادامه دهد [۲۲]. (۲) ذرات آلومینیوم و منیزیم با آمونیوم پرکلرات و پلی بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل واکنش نشان نمی‌دهند و فقط با اکسیژن واکنش می‌دهند و اکسید مربوطه را بعنوان آلومینیوم اکسید و منیزیم اکسید تشکیل می‌دهند. از این رو، یک مدل واکنش شیمیایی دقیق شامل ۱۶ جزء و ۱۶ واکنش شیمیایی استفاده شده است، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است.

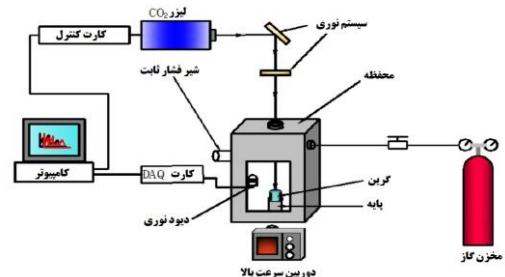
احتراق قطره‌ای

ذره آلومینیوم در یک واکنش فازگازی می‌سوزد که قسمت جلوی شعله در فاصله‌ای جدا از سطح ذرات قرار دارد (شکل ۲). آلومینای مذاب روی سطح آلومینیوم مایع قرار می‌گیرد و بدلیل کشش سطحی بالاتر، یک کلاهک اکسیدی به شکل برجسته تشکیل می‌دهد. کلاهک اکسیدی در طول دوره احتراق شبه پایدار رشد می‌کند زیرا محصول واکنش به داخل

برای تجزیه و تحلیل تأثیر فشار و غلظت اکسیژن بر روی خصوصیات احتراق پیشرانه‌های غنی از سوخت آلومینیوم/ منیزیم انجام شده است. جهت اندازه‌گیری فرآیند احتراق پیشرانه‌های غنی از سوخت بر پایه‌ی ذرات فلزی آلومینیوم/ منیزیم استفاده از سیستم آزمایشی اشتعال لیزری در مقیاس کوچک کارآمد می‌باشد.

دستگاه اشتعال لیزری

دستگاه اشتعال لیزری نشان داده شده در شکل ۱ عمدتاً شامل سیستم کنترل، لیزر CO₂، سیستم نوری، محفظه احتراق و سیستم جمع‌آوری داده است. سیستم کنترل مجهز به کارت داده می‌تواند زمان بارگذاری لیزر و تابش لیزر CO₂ را کنترل کند. لیزر CO₂ منبع اشتعال با توان ۳۰۰ w است. سیستم نوری از یک آینه صفحه‌ای و یک آینه متمرکز در بالای محفظه احتراق تشکیل شده است. عملکرد سیستم نوری تغییر پرتو لیزر افقی منتشر شده از لیزر به پرتو لیزر عمودی است که به سطح پیشرانه می‌رسد و سطح انتهایی نمونه 4 mm را به طور کامل می‌پوشاند. محفظه اشتعال که اندازه آن 150×150×300 mm است دارای یک پنجره مشاهده 50×100 mm در جهت افقی و یک پنجره ورودی لیزر به قطر 20 mm در بالا است. سیستم جمع‌آوری داده می‌تواند هر دو سیگنال نور لیزر و شعله اولیه پیشرانه را با استفاده از دو دیود نوری بدست آورد. هنگامی که لیزر شروع به انتشار نور می‌کند، دیود نوری سیگنال را جمع‌آوری کرده و به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. علاوه بر این، فشار با استفاده از سنسور فشار کنترل می‌شود. فرآیند احتراق توسط یک دوربین پرسرعت Sanyo HD 2000 با سرعت فریم ۲۴۰ fps ضبط می‌شود. فشار و غلظت اکسیژن در محفظه اشتعال توسط مخزن گاز تنظیم می‌شود.



شکل ۱: شماتیک سیستم اشتعال لیزری

ترکیب پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم/ منیزیم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ترکیب پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم/ منیزیم

ترکیب	کسر جرمی	قطر ذره
AP	٪ ۳۶	μm (۱۰۰-۱۲۰)
HTPB	٪ ۲۰	
Al	٪ ۲۰	~۲۴ μm
Mg	٪ ۲۰	~۳۰ μm
Other	٪ ۴	

² AP
³ HTPB

پخش می‌شود و متراکم می‌شود و سوزش ذرات با تشکیل ذره باقی‌مانده به پایان می‌رسد.

جدول ۳: مدل واکنش شیمیایی پیشرفته غنی از سوخت آلومینیوم/ منیزیم [۲۳].

شماره	واکنش شیمیایی	$A(\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	n	E/R (K)
1	$\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO} + 3\text{H}_2$	8.80×10^{11}	0	1.52×10^4
2	$\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{OH}$	1.70×10^{13}	0	2.41×10^4
3	$\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	2.19×10^{13}	0	2.59×10^3
4	$2\text{OH} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	6.02×10^{12}	0	5.50×10^2
5	$\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{OH}$	1.80×10^{10}	1.0	4.48×10^3
6	$\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{OH}$	1.22×10^{17}	-0.91	8.37×10^3
7	$\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{OH}$	1.00×10^{16}	0	0
8	$2\text{O} \rightarrow \text{O}_2$	2.55×10^{14}	-1.0	5.94×10^4
9	$2\text{H} \rightarrow \text{H}_2$	5.00×10^{15}	0	0
10	$\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	8.40×10^{21}	-2.0	0
11	$\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{H} + \text{CO}_2$	4.00×10^{12}	0	4.03×10^3
12	$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$	3.00×10^{12}	0	2.50×10^4
13	$\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$	6.00×10^{13}	0	0
14	$\text{Mg} + \text{O}_2 \rightarrow \text{MgO} + \text{O}$	4.44×10^{12}	0.5	1.54×10^4
15	$\text{Mg} + \text{O} \rightarrow \text{MgO}$	1.90×10^{14}	0.5	0
16	$4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$	9.70×10^{13}	0	8.06×10^1

تضعیف شده و در نهایت می‌شکنند. در این مرحله، بخار آلومینیوم از درون پوسته خارج شده و در محیط اطراف پخش می‌شود تا با گونه‌های اکسیدکننده و دود واکنش دهد. این شرایط نقطه اشتعال آلومینیوم و شروع فرآیند احتراق را مشخص می‌کند. از آنجا که دمای ذوب اکسید بالاتر از دمای ذوب آلومینیوم است، فرض می‌شود که آلومینیوم در هنگام اشتعال به طور کامل ذوب می‌شود. سطح ذرات مذاب آلومینیوم در دمایی بین دمای ذوب اکسید و دمای جوش آلومینیوم می‌سوزد [۲۴]. اگرچه واکنش اکسیداسیون کلی آلومینیوم، آلومینا (Al_2O_3) تولید می‌کند، اما بسیاری از اکسیدهای فرعی مانند Al_2O ، AlO ، Al_2O_2 و Al_2O در منطقه شعله وجود دارد که برجسته‌ترین آن AlO است. تراکم آلومینا در نقطه جوش (3800 K) دمای تقریبی ابر اکسید را تنظیم می‌کند زیرا $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{l})$ مستقیماً از ارتباط با زیر اکسیدها متراکم می‌شود و شکل‌گازی ایده‌آل شده، $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{g})$ ، بلافاصله در قسمت عقب به گونه‌های AlO و O_2 متصل می‌شود [۲۵، ۲۶].

زمان سوزش

احتراق ذرات آلومینیوم اغلب با زمان سوزش قطره مشخص می‌شود. نظریه کلاسیک تبخیر و احتراق قطرات سوخت بیان می‌کند که قطر یک قطره در حال سوزش به صورت $D^2 = D_0^2 - kt$ تغییر می‌کند، که D قطر ذرات، D_0 قطر اولیه ذرات، k ثابت تبخیر و t زمان است. با تنظیم قطر قطرات روی صفر ($D = 0$)، زمان سوزش قطرات به صورت $t_b = D_0^2 / k$ تعریف می‌شود. ثابت تبخیر به طور معمول تابعی از خواص حالت محیط از جمله فشار، دما و غلظت اکسیدکننده است.

تحقیقات نشان‌دهنده است که وابستگی قطر لزوماً از قانون D^2 کلاسیک پیروی نمی‌کند، بلکه از قانون D^n پیروی می‌کند، که n معمولاً بین ۱/۵ تا ۲ است (مقادیر کم‌تر مربوط به قطره‌های کوچک و مقادیر بالاتر مربوط به قطره‌های بزرگ است). فرض بر این است که n به طور معمول مستقل از خواص حالت محیط است و فقط تابعی از مکانیسم احتراق است. روابط کلاسیک نشان‌دهنده این است که n برای جریان جابه‌جایی آرام در اطراف قطره ۱/۵ و برای جریان آشفته نزدیک به ۱ است [۲۷].

زمان سوزش ذرات باید با زمان تبخیر آلومینیوم تقریب‌زده شود. فرض بر این است که در حالت پایا میزان تبخیر آلومینیوم را نشان می‌دهد و پس از آن میزان تبخیر اولیه متناسب با کسری از آلومینیوم اصلی باقی‌مانده است. علاوه بر این، هنگامی که ۹۵٪ آلومینیوم اصلی تبخیر می‌شود، فرض بر این است که احتراق ذرات کامل شده است. برای ارزیابی زمان سوزش نتایج شبیه‌سازی، از عبارت زیر استفاده می‌شود:

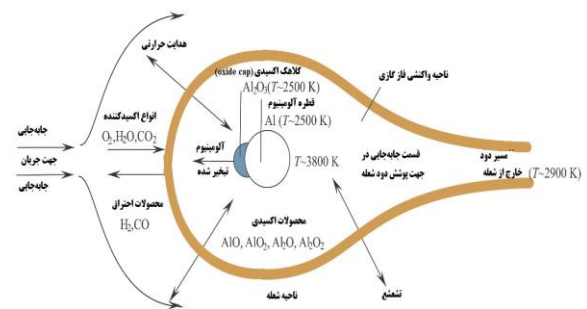
$$t_b = \frac{1}{2} \rho_{Al} \int_0^{D_0} \frac{dD}{S_{Al}} \quad (2)$$

که ρ_{Al} چگالی آلومینیوم مایع در فاز توده و S_{Al} نرخ دبی جرمی توده آلومینیوم توسط واکنش‌های سطحی است. این روش شامل تقریب انتگرالی از یک سری نتایج محاسباتی بر نرخ مصرف جرمی برای قطرهای مختلف است [۲۷].

فرمولاسیون مدل

فرض بر این است که ذره کروی متقارن است و از مدل یکپارچه استفاده می‌شود زیرا عدد بایوت، $Bi = hD_p / k_s$ ، برای همه پوسته در نظر گرفته شده بزرگ‌تر از ۰/۱ آورد نشده است. اشتعال و احتراق ذرات آلومینیوم به

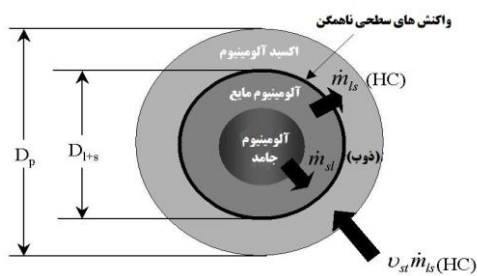
کسری از اکسید به سمت عقب پخش می‌شود و روی سطح ذرات رسوب می‌کند که کلاهک اکسیدی نامیده می‌شود. کلاهک اکسیدی تمایل به تجمع در انتهای پایینی ذره دارد. بخش دیگر اکسید به خارج منتقل می‌شود و دود اکسید نامیده می‌شود. تأثیر کلاهک اکسیدی بر زمان سوزش بستگی به اندازه اولیه ذره دارد. کلاهک اکسیدی بعنوان یک وزن مرده عمل می‌کند که سطح تبخیر را کاهش می‌دهد و منجر به احتراق غیرمتقارن و چرخش احتمالی قطره می‌شود. بین دمای سطح (1200 K) و دمای اولیه (300 K)، دو دمای مشخص باید در نظر گرفته شود: دمای ذوب آلومینیوم (930 K) و تخریب دمای اتصال دهنده.



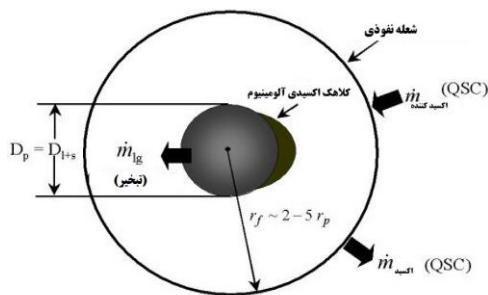
شکل ۲: احتراق ذرات آلومینیوم.

برای ذرات با قطر بیش از $100 \mu\text{m}$ اکثر مطالعات تجربی نشان داده‌اند که اشتعال در دمایی نزدیک به نقطه ذوب اکسید آلومینیوم (2300 K) انجام می‌شود. از آنجا که هر ذره آلومینیوم توسط یک پوسته اکسید غیر قابل نفوذ پوشانده شده است، استدلال می‌شود که این ذره مشتعل نمی‌شود تا زمانی که پوسته اکسید تحت تأثیر انبساط حرارتی آلومینیوم در نزدیکی دمای ذوب خود ذوب نشده یا تجزیه نشود. با گرم شدن ذرات آلومینیوم در دمای ذوب آلومینیوم، ذوب می‌شود اما هنوز در پوسته اکسید وجود دارد. حرارت بیشتر باعث ایجاد فشار بخار در پوسته آلومینیوم مایع می‌شود. وقتی دمای ذرات به نقطه ذوب اکسید نزدیک می‌شود، پوسته اکسید

است، اما بدلیل وجود اکسید آلومینیوم، آلومینا، تا حد زیادی تغییر کرده است.



شکل ۳: شماتیک اشتعال مرحله اول ذرات ناهمگن.



شکل ۴: شماتیک مرحله دوم احتراق ذرات ورق شعله.

تأخیر در اشتعال بدلیل فیلم اکسید اولیه، رسوب از محصول اکسید روی آلومینیوم مایع و ذرات اکسید باقی مانده از مشخصه‌های قابل توجه است [۲۸].

شکل ۵ (الف)، ترتیب اشتعال ذرات آلومینیوم را نشان می‌دهد. فیلم اکسید طبیعی یا مصنوعی ابتدا هسته آلومینیوم را می‌پوشاند. انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی از گاز داغ محیط باعث افزایش دمای ذرات می‌شود و سپس هسته آلومینیوم در داخل فیلم اکسید منفعل و غیرفعال فاز جامد از قبل شروع به ذوب می‌کند زیرا دمای ذوب اکسید آلومینیوم بیشتر از آلومینیوم است. برخلاف اشتعال قطره‌مایع، فیلم اکسید جامد آلومینیوم مایع از نفوذ اکسیدکننده جلوگیری می‌کند، بنابراین از اشتعال ذره جلوگیری می‌کند. فیلم اکسیدی در حالت جامد است اما با افزایش دمای ذرات، فاز آن از حالت بی‌شکل به حالت آلفا می‌رسد. این انتقال فاز در حالت جامد چگالی اکسید آلومینیوم را افزایش می‌دهد و باعث قرار گرفتن موضعی سطح هسته آلومینیوم در برابر اکسیدکننده می‌شود. در این مناطق گسیختگی، یک واکنش گرمازا که واکنش سطحی ناهمگن نامیده می‌شود، بین آلومینیوم مایع و اکسیدکننده گازی رخ می‌دهد. واکنش سطحی ناهمگن بعنوان منبع اصلی حرارت برای اشتعال عمل می‌کند. با افزایش دمای ذرات، واکنش سطحی ناهمگن فعال می‌شود و اکسید آلومینیوم به دمای ذوب خود می‌رسد ($k \sim 2200$). آلومینای مذاب روی سطح آلومینیوم مایع قرار می‌گیرد و بدلیل کشش سطحی بیشتر، یک کلاهک اکسیدی به شکل برجسته تشکیل می‌دهد. کلاهک اکسیدی در طول دوره احتراق شبه پایدار رشد می‌کند بطوریکه محصول واکنش به داخل نفوذ می‌کند و متراکم می‌شود و سوزش ذرات با تشکیل ذره باقی مانده به پایان می‌رسد (شکل ۵ (ب)). از آنجا که اکسید آلومینیوم همچنان بر روی کلاهک اکسیدی متراکم می‌شود، نفوذ داخلی محصول واکنش بدون تغییر شعاعی در گرایان غلظت محصول گازی ادامه می‌یابد. سطح موثر

در مرحله مدل‌سازی شده است. در مرحله اول، ذره تحت حرارت سریع قرار می‌گیرد و به دنبال آن ذوب ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی صورت می‌گیرد. واکنش‌های سطحی ناهمگن در نظر گرفته می‌شود (مطابق شکل ۳) و منجر به گرم شدن اضافی ذرات می‌شود تا دمای ذوب لایه اکسید آلومینیوم بدست آید. در مرحله دوم، فرض می‌شود که لایه اکسیدی اطراف ذره به هم متصل شده و به صورت یک کلاهک در طرف پایین دست ذره تشکیل می‌شود. در شکل ۴ آلومینیوم مذاب در معرض هوا و شعله نفوذی جدا شده در شعاع ۲ تا ۵ ذره قرار گرفته است. در این مطالعه تنها معیاری که برای انتقال از مرحله I به مرحله II استفاده می‌شود، دمای ذوب لایه اکسید آلومینیوم است که فقط از اکسید آلومینیوم تشکیل شده است بنابراین شکست دینامیکی و تکه‌تکه شدن اکسید به صراحت مدل‌سازی نشده است [۲۸].

مرحله اول اشتعال

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ذره به صورت سه ناحیه حاوی آلومینیوم جامد، آلومینیوم مایع و لایه‌ای از اکسید آلومینیوم نشان داده شده است. با عمل گرمایش ذره گرم می‌شود و تحت مرحله ذوب قرار می‌گیرد که با استفاده از کسر جرمی مایع در ذره، α تعیین می‌شود. اگر $\alpha > 0$ باشد، اکسید آلومینیوم مجاز است بین آلومینیوم مذاب و اکسیژن گازی که از طریق پوسته اکسید نفوذ می‌کند، ایجاد شود [۲۸].

مرحله دوم احتراق شبه پایا

پس از گرم شدن ذره تا دمای ذوب لایه اکسید فرض می‌شود که احتراق در فاز بخار اتفاق می‌افتد و با توسعه مدل لایه ورق شعله بهبود می‌یابد. مدل انتقال جرم و انرژی لایه در نزدیکی سطح ذرات به دو ناحیه تقریبی زده می‌شود. اولین مورد بین سطح ذرات و شعله، دومی بین شعله و محیط اطراف است. کسرهای محصول متراکم و بخار فرموله شده و برای مقادیر معین کسر جرمی اکسیدکننده، دمای شعله و دمای سطح ذرات به سمت سطح ذره و کسر جرمی مایع در سطح ذره منتقل می‌شود [۲۸].

ذره آلومینیوم ورودی به گاز اکسیدکننده به ترتیب درجه حرارت بالا، مراحل گرمایش، اشتعال و سوزش شبه پایا را تجربه می‌کند. این مشخصات احتراق ذرات آلومینیوم شبیه سوزش قطره‌مایع است، اما بدلیل وجود اکسید آلومینیوم، آلومینا، تا حد زیادی تغییر کرده است. تأخیر در اشتعال بدلیل فیلم اکسید اولیه، رسوب از محصول اکسید روی آلومینیوم مایع و ذرات اکسید باقی مانده از مشخصه‌های قابل توجه است [۲۸].

شکل ۵ (الف)، ترتیب اشتعال ذرات آلومینیوم را نشان می‌دهد. فیلم اکسید طبیعی یا مصنوعی ابتدا هسته آلومینیوم را می‌پوشاند. انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی از گاز داغ محیط باعث افزایش دمای ذرات می‌شود و سپس هسته آلومینیوم در داخل فیلم اکسید منفعل و غیرفعال فاز جامد از قبل شروع به ذوب می‌کند زیرا دمای ذوب اکسید آلومینیوم بیشتر از آلومینیوم است. برخلاف اشتعال قطره‌مایع، فیلم اکسید جامد آلومینیوم مایع از نفوذ اکسیدکننده جلوگیری می‌کند، بنابراین از اشتعال ذره جلوگیری می‌کند. ذره آلومینیوم ورودی به گاز اکسیدکننده به ترتیب درجه حرارت بالا، مراحل گرمایش، اشتعال و سوزش شبه پایا را تجربه می‌کند. این مشخصات احتراق ذرات آلومینیوم شبیه سوزش قطره‌مایع

^۴ HSR (Heterogeneous surface reaction)

$$F_V = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + q_x \\ \rho D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \end{bmatrix}, G_V = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + q_y \\ \rho D_i \frac{\partial c_i}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$H = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} -\rho v \\ -\rho uv + \tau_{xy} \\ -\rho v^2 + \tau_{yy} - \tau_{\theta\theta} \\ -v(\rho E + p) + u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + q_y \\ -\rho_i v + \rho D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} S_\rho \\ S_{\rho u} \\ S_{\rho v} \\ S_{\rho E} \\ \dot{\omega}_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{v}{y} \right)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{v}{y} \right)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{\theta\theta} = 2\mu \frac{v}{y} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{v}{y} \right)$$

$$q_x = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \sum_{i=1}^N D_i h_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad i=1,2,\dots,N$$

$$q_y = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \rho \sum_{i=1}^N D_i h_i \frac{\partial c_i}{\partial y} \quad i=1,2,\dots,N$$

که ρ چگالی، u سرعت‌های محوری، v سرعت‌های شعاعی، T دما، P فشار و E انرژی کل به‌ازای واحد جرم است. S_{ρ} ، $S_{\rho u}$ ، $S_{\rho v}$ ، $S_{\rho E}$ ، h_i آنالپی جرمی گونه i ، q_x ، q_y شار حرارتی، ρ_i/ρ C_i کسر جرمی گونه i ، ω_i نرخ جرمی گونه i تولیدی بر اثر واکنش شیمیایی. μ ویسکوزیته موثر کل، شامل ویسکوزیته آرام μ_1 و ویسکوزیته آشفته μ_t .

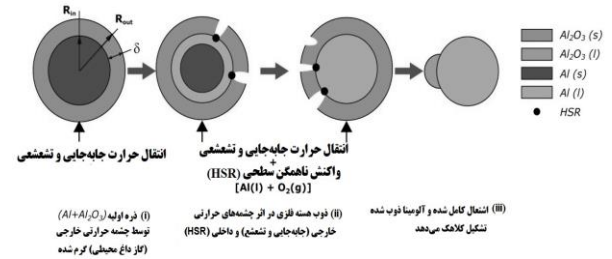
معادلات حاکم بر میدان جامد

فرم انتگرالی معادله دوبعدی حاکم بر میدان جامد متقارن محوری به شرح زیر است [۳۳].

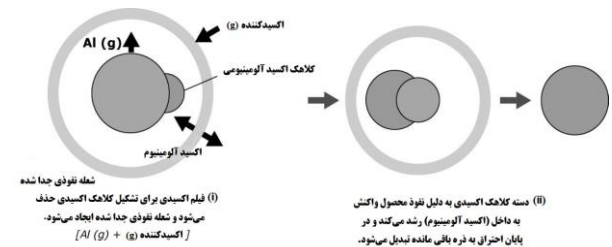
$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \rho_s c_s T_s d\Omega = \iint_S \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \cdot n_x + \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \cdot n_y \right) dS$$

$$+ \iiint_{\Omega} \frac{1}{y} \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} d\Omega + \rho_s i h_p \quad (6)$$

آلومینیوم مایع توسط کلاهک اکسید کاهش می‌یابد و ممکن است دفع‌گازهای سطحی شدید و احتراق نامتقارن رخ دهد. همزمان با رشد کلاهک اکسیدی، اثر دود اکسید رخ می‌دهد. در اینجا، قسمتی از اکسید آلومینیوم‌گازی به بیرون نفوذ می‌کند و در مجاورت ناحیه شعله خارجی به حالت مایع متراکم می‌شود. واکنش تجزیه‌گرماگیر رخ می‌دهد و دمای شعله را به دمای تجزیه اکسید آلومینیوم محدود می‌کند [۲۹].



الف) شماتیک مرحله اشتعال؛ از ذره اولیه با فیلم اکسید تا تشکیل کلاهک اکسیدی با منابع حرارتی.



ب) شماتیک مرحله احتراق شبه پایدار با شعله نفوذی جدا شده برای تشکیل ذرات باقی‌مانده.

شکل ۵: شماتیک اشتعال و مرحله احتراق شبه پایدار.

مدل ریاضی

معادلات حاکم بر میدان جریان

با توجه به اینکه رویکرد حجم محدود برای این کار انتخاب شده، بهتر است معادلات حاکم به صورت انتگرالی نوشته شود. محفظه احتراق یک ساختار دو بعدی متقارن محوری است. از میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس در جریان تراکم‌پذیر برای توصیف احتراق و فرآیند جریان در محفظه احتراق استفاده می‌شود. شکل انتگرالی معادلات ناویر-استوکس در یک حجم کنترل به شرح زیر نشان داده شده است [۳۱-۳۰]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} U d\Omega + \iint_S (F \cdot n_x + G \cdot n_y) dS - \iint_S (F_v \cdot n_x + G_v \cdot n_y) dS$$

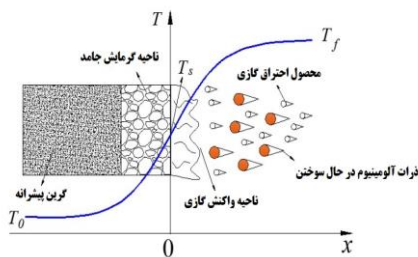
$$= \iiint_{\Omega} H d\Omega + \iint_{\Omega} S d\Omega \quad (3)$$

که $n = n_x i + n_y j$ بردار نرمال، S سطح مش و t زمان است. U بردار بقایای و G, F بردار شار جابه‌جایی و F_v, G_v بردار شار ویسکوز و H ترم چشمه متقارن محوری و S ترم چشمه واکنش‌های شیمیایی که در مرجع [۳۲] داده شده است:

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho_i \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u v \\ u(\rho E + P) \\ \rho_i u \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 + p \\ v(\rho E + P) \\ \rho_i v \end{bmatrix}$$

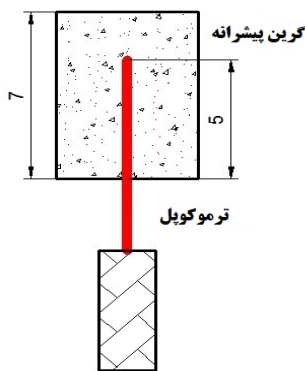
توزیع دمای احتراق

مکانیسم احتراق پیشراانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم بدلیل ساختارهای متفاوت آنها منحصر به فرد است. ساختار احتراق و مدل توزیع دما در شکل ۷ نشان داده شده است. جریان گرمای خارجی و جریان گرمای برگشتی به داخل پیشراانه منتقل می‌شود و یک ناحیه گرمایش جامد را در یک محدوده ضخامت مشخص تشکیل می‌دهد. ناحیه گرمایش جامد در سطح سوخت بسته‌شده و باعث می‌شود دما به سرعت افزایش یابد. هنگامی که به دمای پیرولیز آلومینیوم پرکلرات و بایندر (اتصال‌دهنده) رسید، پیرولیز آلومینیوم پرکلرات و بایندر به طور جداگانه تکمیل می‌شود، سپس پخش و مخلوط می‌شود، و یک واکنش فیزیکی شیمیایی مربوطه ایجاد می‌شود تا یک ناحیه واکنش گاز ایجاد شود، که با برخی از ذرات مایع و جامد همراه است. در نهایت ذرات به مخلوط قابل احتراق‌گازی تبخیر می‌شوند و واکنش احتراق تسریع می‌شود، با توجه به محصولات احتراق و ذرات آلومینیوم به طور کامل می‌سوزد. دمای گاز برای حفظ احتراق مداوم پایدار به سطح تابش آورده می‌شود.



شکل ۷: ساختار احتراق و مدل توزیع دما.

در این آزمایش، یک حفره به قطر ۵/۵ mm و طول ۵ mm در محور مرکزی ذره سوخت پیشراانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم ایجاد می‌شود. برای اندازه‌گیری توزیع دمای احتراق در فرآیند احتراق، یک ترموکوپل به مرکز حفره وارد می‌شود. نمودار شماتیک اندازه‌گیری دمای احتراق در شکل ۸ نشان داده شده است. با سوختن پیشراانه، سطح سوخت به طور مداوم دور می‌شود و بتدریج به سر ترموکوپل نزدیک می‌شود. با رسیدن سر ترموکوپل به سطح سوخت، دمای سطح سوخت T_s اندازه‌گیری می‌شود. سپس ترموکوپل وارد ناحیه واکنش‌گازی شده و در نهایت وارد ناحیه شعله می‌شود. بنابراین، ترموکوپل توزیع دمای کل احتراق را اندازه‌گیری می‌کند.



شکل ۸: نمودار شماتیک اندازه‌گیری دمای احتراق.

جایی که ρ_s چگالی سوخت جامد، C_s ظرفیت گرمایی ویژه، λ_s ضریب هدایت حرارتی و T_s دمای منطقه جامد است. برای پیشراانه غنی از سوخت آلومینیوم/منیزیم $\rho_s = 1700 \text{ kg/m}^3$ ، $C_s = 1300 \text{ J/kg.k}$ ، $\lambda_s = 1/3 \text{ Wm.k}$. ترم چشمه انرژی فاز جامد است که در اثر واکنش شیمیایی سطح سوخت ایجاد می‌شود. \dot{r} نرخ سوخت پیشراانه است h_p انرژی واکنش به ازای واحد جرم است.

قانون آرنیوس معمولاً برای بیان ارتباط بین دما و نرخ سوخت استفاده می‌شود. نرخ سوخت را می‌توان بدین صورت $\dot{r} = A e^{-\frac{E}{RT}}$ بیان کرد که A ضریب پیش‌نمایی است، n توان دمایی است، E انرژی فعال‌سازی است. بدلیل انتقال حرارت از ناحیه سیال به سطح جامد در طی فرآیند احتراق، نرخ سوخت باید به عنوان ترم چشمه تأثیرگذار بر معادلات بقاء ناحیه سیال در نظر گرفته شود. بنابراین، برای حجم کنترل، ترم‌های چشمه اضافه شده به معادلات حاکم را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

$$S_{\rho} = \rho_s \dot{r} A_b$$

$$S_{\rho u} = \rho_s \dot{r} \left(\dot{r} \frac{\rho_s}{\rho} A_b \right) n_x$$

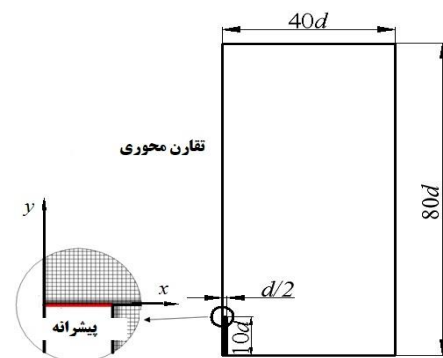
$$S_{\rho v} = \rho_s \dot{r} \left(\dot{r} \frac{\rho_s}{\rho} A_b \right) n_y$$

$$S_{\rho E} = \frac{1}{2} \left(\dot{r} \frac{\rho_s}{\rho} \right)^2 \rho_s \dot{r} A_b + h \cdot (\rho_s \dot{r} A_b)$$

که A_b مساحت سوخت و h آنتالپی ویژه است.

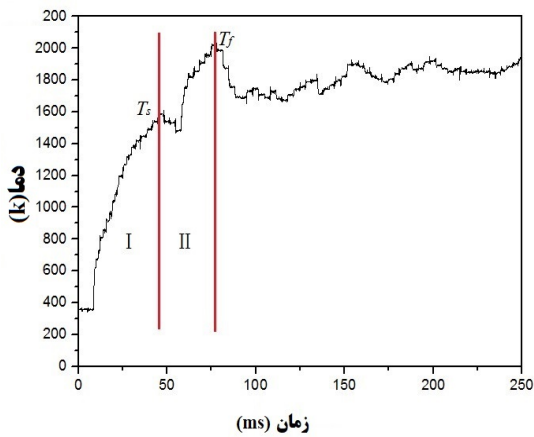
مدل محاسباتی

بر اساس ساختار محفظه احتراق سیستم آزمایشی اشتعال لیزری، یک مدل محاسباتی ساده دوبعدی متقارن محوری ایجاد شده است، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است. مدل از یک منطقه جامد که از یک گرین پیشراانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم و یک منطقه مایع تشکیل شده است که حجم محفظه احتراقی است که ذره را از بین می‌برد. قطر گرین پیشراانه غنی از سوخت $d = 5 \text{ mm}$ است و طول آن $d = 10$ است. طول ناحیه سیال در جهت محوری $d = 80$ و در جهت شعاعی $d = 40$ است. مرز محیط را می‌توان دور از میدان ملاحظه کرد. مدل متقارن محوری مش‌بندی شده و به چهار حوزه محاسباتی تقسیم می‌شود و تعداد کل شبکه‌ها حدود ۲۰۰۰۰ است.

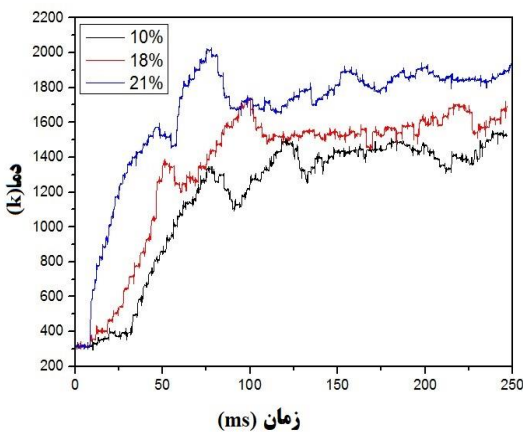


شکل ۶: مدل محاسباتی

مشخصی از ذرات منیزیم به منظور بهبود خواص اشتعال و احتراق به آن افزوده می‌شود. در این آزمایش، مقدار کل آلومینیوم و منیزیم موجود در پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم ۴۰٪ است که ثابت است. فقط نسبت محتوای آلومینیوم / منیزیم تغییر می‌کند که (۲۰٪ آلومینیوم و ۲۰٪ منیزیم)، (۲۵٪ آلومینیوم و ۱۵٪ منیزیم)، (۳۰٪ آلومینیوم و ۱۰٪ منیزیم)، (۳۵٪ آلومینیوم و ۵٪ منیزیم). تحت فشارهای ۰/۵ Mpa، ۱ Mpa و ۱/۴ Mpa آزمون احتراق در چهار نسبت مختلف محتوای آلومینیوم / منیزیم صورت گرفته است. نرخ سوزش اندازه‌گیری شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزایش فشار محیط، نرخ سوزش افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۹: نمایش توزیع دمای احتراق تحت غلظت‌های مختلف اکسیژن و فشارهای ۱ Mpa (ب) و ۰/۵ Mpa (الف)

با افزایش فشار، شارگرمای جابه‌جایی سطح و شارگرمای تابشی افزایش می‌یابد، در نتیجه نرخ سوزش به میزان قابل توجهی با شار گرما افزایش می‌یابد. در شرایط فشار یکسان، وقتی محتوای ذرات آلومینیوم افزایش می‌یابد، نرخ سوزش پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم افزایش می‌یابد. وقتی محتوای ذرات آلومینیوم از ۲۰٪ تا ۳۵٪ افزایش می‌یابد، نرخ سوزش تا ۸/۶٪ در فشار ۱/۴ Mpa افزایش می‌یابد، اما درجه افزایش زیاد نیست. بدلیل وجود این امر نرخ سوزش در آلومینیوم دارای دو اثر مخالف است. از یک طرف، قبل از سوزش ذرات آلومینیوم، مقدار زیادی گرما باید جذب شود، که انرژی مورد نیاز برای تبخیر فاز جامد را افزایش می‌دهد در نتیجه نرخ سوزش را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، پس از سوزش ذرات آلومینیوم، دمای شعله افزایش یافته و گرمای بازخورد

کل توزیع دما (دما-زمان) احتراق از ناحیه فاز جامد به ناحیه فاز گاز را می‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. در هوای ۱/۰ Mpa (غلظت اکسیژن ۲۱٪ است)، نرخ مقدار ذره پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم (۲۰٪ آلومینیوم و ۲۰٪ منیزیم) تحت آزمایش اشتعال لیزر قرار می‌گیرد. منحنی توزیع دمای احتراق اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است. می‌توان دید که دما پس از زمان تأخیر در اشتعال بتدریج افزایش می‌یابد. در حدود ۵۰ ms، دما به حدود ۱۶۰۰ K می‌رسد که T_s دمای سطح سوزش است. در این زمان، یک پلت‌فرم^۵ دما ظاهر می‌شود، که دما تقریباً ثابت است. دلیل این امر این است که اساساً انرژی جذب شده توسط واکنش پیرولیز و انرژی جذب شده از اشتعال لیزر به تعادل می‌رسد. این فاصله ناحیه I گرمایش جامد است. هنگامی که ترموکوپل بالای سطح سوزش قرار دارد، وارد واکنش مخلوط گاز ناحیه II می‌شود که باعث پیچیدگی منحنی دما و زمان می‌شود. ابتدا دما به سرعت شروع به افزایش می‌کند و به دمای شعله آدیباتیک T_f می‌رسد، این نشان می‌دهد که واکنش گرمازا غالب است. واکنش اصلی، واکنش پیرولیز آمونیوم پرکلرات است که گاز قابل احتراق تولید می‌کند. گاز قابل احتراق و فاز منیزیم با نقطه اشتعال کم‌تر در نزدیکی سطح سوزش واکنش داده و مقدار زیادی گرما آزاد می‌کند. در همان زمان، می‌توان توضیح داد که گاز اکسیدکننده تولید شده توسط پیرولیز در اثر حرارت در این مرحله به سرعت مصرف می‌شود بنابراین، درجه حرارت سریع‌تر افزایش می‌یابد تا به درجه حرارت شعله آدیباتیک T_f برسد. بعد، درجه حرارت عمدتاً بدلیل پایان بارگذاری لیزر شروع به کاهش می‌کند، که نشان می‌دهد واکنش گرماگیر در این مرحله غالب است. علاوه بر این، آلومینیوم و اکسیدهای آن در جذب گرما واکنش نشان می‌دهند و در نتیجه دما کاهش می‌یابد.

توزیع دمای احتراق پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم تحت فشارهای مختلف و غلظت‌های مختلف اکسیژن در شکل ۹ نشان داده شده است. در شرایط فشار متفاوت، روند تغییر منحنی دما و زمان احتراق اساساً یکسان است، اما نقطه شروع تغییر دما متفاوت است، نقطه شروع تغییر دما در ۱ Mpa (در شکل ۹ (ب) نشان داده شده) حدود ۲۵ ms در مقایسه با ۰/۵ Mpa (در شکل ۹ (الف) نشان داده شده) زودتر است. بدلیل اینکه فشار بر زمان تأخیر در اشتعال تأثیر می‌گذارد و هرچه فشار کم‌تر باشد، مدت زمان تأخیر در اشتعال نیز بیشتر می‌شود. در همان زمان، مشخص شده است که با افزایش فشار، دمای احتراق افزایش می‌یابد. بدلیل اینکه وقتی غلظت اکسیژن محیط ثابت است، افزایش فشار معادل افزایش غلظت اکسیژن است، و باعث می‌شود واکنش احتراق شدیدتر شود و در نتیجه دما افزایش یابد. به طور مشابه، در همان شرایط فشار، دما با افزایش غلظت اکسیژن محیط افزایش می‌یابد. با این حال، زمان‌های رسیدن T_s و T_f متفاوت است. هرچه غلظت اکسیژن در محیط بیشتر باشد، به T_s و T_f زودتر می‌رسیم، زیرا واکنش شدید و سرعت واکنش سریع‌تر است.

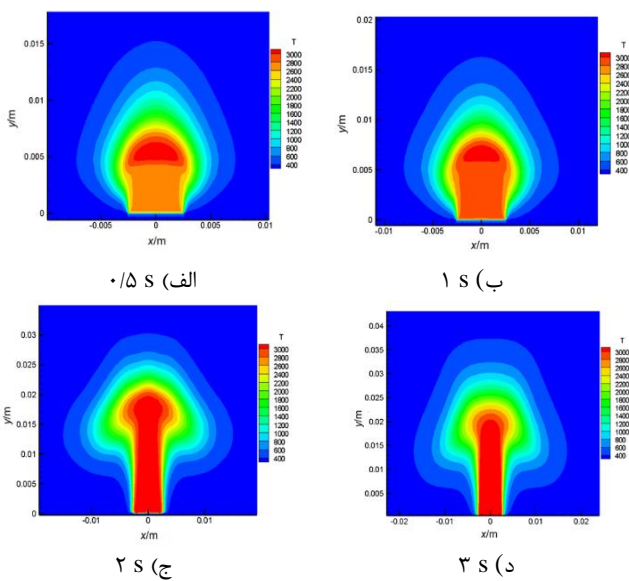
نرخ سوزش

افزودن ذرات آلومینیوم در پیشرانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم می‌تواند به طور قابل توجهی انرژی پیشرانه را افزایش دهد، اما ذرات آلومینیوم در سطح سوزش تجمع می‌کنند و در نتیجه راندمان احتراق رمجت سوخت جامد کاهش می‌یابد. ذرات آلومینیوم دارای نقطه اشتعال بالاتری هستند و به راحتی قابل اشتعال نیستند، بنابراین غالباً مقدار

^۵ Platform

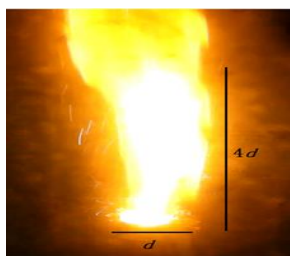
توزیع محصول احتراق

مشخصات میدان جریان فرایند احتراق تجزیه و تحلیل می‌شود و کانتور دمایی هر لحظه در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است، در نسبت محتوای آلومینیوم / منیزیم (۲۰٪ آلومینیوم و ۲۰٪ منیزیم)، غلظت اکسیژن ۲۱٪، فشار ۰/۵ Mpa است. گام زمانی در سراسر میدان $s \times 10^{-5}$ است و می‌توان میدان جریان را تقریباً در ۳ s تثبیت کرد. در شبیه‌سازی، رگرسیون سطح‌سوزش و تغییر شکل شبکه در نظر گرفته نشده است. مطابق با شکل ۱۲(الف) هنگامی که ذره مشتعل می‌شود با افزایش درجه حرارت سطح شروع به تجزیه و تولید گاز قابل احتراق برای ایجاد شعله‌ی اولیه در نزدیکی سطح سوزش می‌کند. در همان زمان، حرارت تولیدشده در سطح سوزش برای افزایش دمای سطح ذره تغذیه می‌شود (در شکل ۱۲(ب)). همانطور که در شکل ۱۲(ج) نشان داده شده است؛ با ادامه احتراق، طول ناحیه شعله دمایی بالا به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و سرانجام با گذشت زمان به احتراق پایدار می‌رسد (شکل ۱۲(د)).



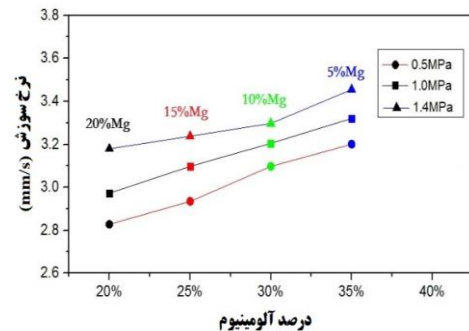
شکل ۱۲: کانتور دما میدان جریان در زمان‌های مختلف.

شکل شعله نشان داده شده در شکل ۱۲(د) مانند عکس آزمایشی است که توسط دوربین پرسرعت در هنگام احتراق ثابت در شکل ۱۳ گرفته شده است. تا آنجا که به طول ناحیه شعله درجه حرارت بالا مربوط می‌شود، شبیه‌سازی عددی در شکل ۱۲(د) حدود 0.2 m است، که تقریباً چهار برابر قطر نمونه پیشراانه است که قطر آن 0.05 m است. در شکل ۹، طول ناحیه شعله دمایی بالا گرفته شده نیز چهار برابر قطر نمونه پیشراانه است.



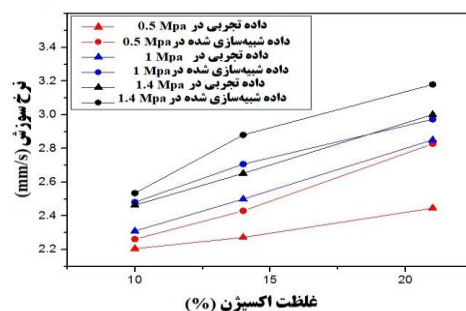
شکل ۱۳: عکس آزمایشی گرفته‌شده توسط دوربین پرسرعت.

(برگشتی) گاز نسبت به فاز جامد افزایش می‌یابد، به طوری که نرخ سوزش افزایش می‌یابد. بدیهی است که بازخورد گرمایی پس از احتراق آلومینیوم نقش مهمی دارد. بنابراین، افزایش محتوای ذرات آلومینیوم برای افزایش نرخ سوزش، برای افزایش انرژی پیشراانه، سودمند است. در طی فرآیند احتراق پایدار، واکنش اکسیداسیون ذرات آلومینیوم و ذرات منیزیم عمدتاً در ناحیه فاز گاز رخ می‌دهد. به طور کلی، احتراق اولیه ذرات آلومینیوم در پایین دست ناحیه فاز گاز، نسبتاً دور از سطح سوزش، رخ می‌دهد. احتراق ذرات منیزیم نزدیک به سطح سوزش است و نسبت به احتراق ذرات آلومینیوم گرمای کم‌تری تولید می‌کند که برای افزایش نرخ سوزش ضرر دارد.



شکل ۱۰: اثر نسبت محتوای آلومینیوم / منیزیم نرخ سوزش.

بررسی نرخ سوزش پیشراانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم در شرایط مختلف فشار محیط و غلظت اکسیژن اندازه‌گیری شده است. در نسبت محتوای آلومینیوم / منیزیم (۲۰٪ آلومینیوم و ۲۰٪ منیزیم)، غلظت اکسیژن ۱۰٪، ۱۴٪ و ۲۱٪ به ترتیب، در هر غلظت اکسیژن، فشار ۰/۵ Mpa، ۱ Mpa و ۱/۴ Mpa است، به ترتیب نرخ سوزش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به وضوح دیده می‌شود که با افزایش فشار نرخ سوزش افزایش می‌یابد. در همان شرایط فشار، با افزایش غلظت اکسیژن نرخ سوزش افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت اکسیژن انتقال گرمای جابه‌جایی و بازخورد گرمای تابشی با سطح سوزش پیشراانه افزایش می‌یابد، در نتیجه باعث افزایش نرخ سوزش می‌شود، در عین حال، روشنایی شعله افزایش می‌یابد. در تمام فشارهای آزمایشی، نرخ سوزش با افزایش غلظت اکسیژن افزایش می‌یابد، اما درجه افزایش متفاوت است. هرچه فشار بیشتر شود، نرخ سوزش با غلظت اکسیژن سریع‌تر افزایش می‌یابد. نرخ سوزش شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری‌های تجربی مطابقت دارد که انحراف آن در حدود ۱۰٪ است و نشان می‌دهد که شبیه‌سازی صورت گرفته در محدوده فشار و غلظت اکسیژن برای پیش‌بینی نرخ سوزش معتبر است.



شکل ۱۱: تأثیر غلظت اکسیژن بر نرخ سوزش تحت فشارهای مختلف.

σ	ثابت استفان بولتزمن
A	مساحت سطح
A_i	ضریب پیش‌نمایی
E_a	انرژی فعال‌سازی
\dot{Q}	انتقال حرارت
ε	ضریب انتشار
μ	ویسکوزیته
\dot{Q}_{Conv}	انتقال حرارت جابه‌جایی
\dot{Q}_{rad}	انتقال حرارت تابشی
\dot{Q}_{HSR}	انتقال حرارت واکنش سطحی ناهمگن
$h_{r,HSR}$	آنتالپی واکنش برای واکنش سطحی ناهمگن
h_{sl}	گرمای نهان تغییر فاز جامد به مایع
\dot{m}	دبی جرمی
\dot{S}	نرخ انتشار اکسید به داخل
R	ثابت جهانی گازها
(g)	فاز گاز
(l)	فاز مایع
(s)	فاز جامد

منابع

- [1] Dreizin, E. L. (1996). Experimental study of stages in aluminium particle combustion in air. *Combustion and Flame*, 105(4), 541-556.
- [2] Bucher, P., Ernst, L., Dryer, F. L., & Yetter, R. (2000). Detailed studies of the flame structure of aluminum particle combustion. *Solid propellant chemistry, combustion, and motor interior ballistics* (A 00-36332 09-28), Reston, VA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (Progress in Astronautics and Aeronautics., 185, 689-722.
- [3] Dreizin, E. L. (1999). On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion. *Combustion and flame*, 117(4), 841-850.
- [4] Dreizin, E. L. (2000). Phase changes in metal combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), 57-78.
- [5] Law, C. K. (1973). A simplified theoretical model for the vapor-phase combustion of metal particles. *Combustion Science and Technology*, 7(5), 197-212.
- [6] Bartlett, R. W., Ong Jr, J. N., Fassell Jr, W. M., & Papp, C. A. (1963). Estimating aluminium particle combustion kinetics. *Combustion and Flame*, 7, 227-234.
- [7] Olsen, S. H. A. N. E. E., & Beckstead, M. E. R. R. I. L. L. W. (1995). Burn time measurements of single aluminum particles in steam and carbon dioxide mixtures. In *31st Joint Propulsion Conference and Exhibit* (p. 2715).
- [8] Dreizin, E. L. (2003). Effect of Phase Changes on Metal-Particle Combustion Processes. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 39(6), 681-693.
- [9] Assovskiy, I. G., Zhigalina, O. M., Kuzhnetsov, G. P., & Kolesnikov-Svinarev, V. I. (2000). Aluminum droplet combustion in normal and low-gravity environment. *Hanneng Cailiao*, 8(3), 117-118.
- [10] Melcher, J., Burton, R., & Krier, H. (1999, June). Combustion of aluminum particles in solid rocket motor flows. In *35th Joint Propulsion Conference and Exhibit* (p. 2630).
- [11] Sundaram, D. S., Puri, P., & Yang, V. (2016). A general theory of ignition and combustion of nano- and micron-sized aluminum particles. *Combustion and Flame*, 169, 94-109.

نتیجه‌گیری‌ها

به منظور درک بهتر خصوصیات احتراق پیش‌رانه غنی از سوخت آلومینیوم / منیزیم که در سوخت جامد رجمت استفاده می‌شود، تأثیر فشار محیط، غلظت اکسیژن و نسبت محتوای آلومینیوم / منیزیم بر دمای احتراق، نرخ سوزش و توزیع جرمی محصولات احتراق با روش‌های تجربی و عددی تجزیه و تحلیل می‌شوند.

(۱) توزیع دمای احتراق به نظر می‌رسد دو پلت فرم دارد. پلت فرم اول در مرحله انتقال بین فاز متراکم و فاز گاز ظاهر می‌شود، که عمدتاً توسط تجزیه در اثر تجزیه محلول آمونیوم پرکلرات ایجاد می‌شود، و پلت فرم دوم در مرحله احتراق پایدار فاز گاز ظاهر می‌شود با افزایش فشار محیط و غلظت اکسیژن، دمای احتراق افزایش می‌یابد.

(۲) وقتی محتوای کل فلز ثابت باشد، با افزایش محتوای ذرات آلومینیوم و کاهش محتوای ذرات منیزیم، نرخ سوزش افزایش می‌یابد. وقتی محتوای ذرات آلومینیوم از ۲۰٪ به ۳۵٪ افزایش یابد، نرخ سوزش به طور متوسط ۷٪ افزایش می‌یابد. نرخ سوزش با افزایش فشار محیط و غلظت اکسیژن افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش فشار محیط و غلظت اکسیژن، انتقال گرمای جابه‌جایی و بازخورد گرمای تابشی شعله روی سطح سوزش تسهیل می‌شود، بنابراین باعث افزایش نرخ سوزش می‌شود.

(۳) افزایش فشار، هدایت گرما و بازخورد گرما به سطح سوزش را تشدید می‌کند و از نفوذ محصولات پیرولیز جلوگیری می‌کند و باعث واکنش شیمیایی در نزدیکی سطح سوزش می‌شود، در نتیجه مقدار اکسیژن کم‌تر و محصول سیانور بیشتری به سطح سوزش نزدیک می‌شود. منیزیم فلزی دارای نقطه اشتعال کم‌تری است و در نزدیکی سطح سوزش می‌سوزد. کاربیدها و آلومینا با نقطه اشتعال بالا در ناحیه دور از میدان تولید می‌شوند.

(۴) غلظت اکسیژن محیط تأثیر کمی بر نرخ سوزش دارد، اما تأثیر بیشتری روی محصولات احتراق دارد. با افزایش غلظت اکسیژن، پیش‌رانه به میزان کافی می‌سوزد و محصول احتراق افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

D	قطر ذرات
D_0	قطر اولیه ذرات
k	ثابت تبخیر
t_b	زمان سوزش
ρ_{Al}	چگالی آلومینیوم
S_{Al}	دبی جرمی توده آلومینیوم
B_i	عدد بدون بعد بایوت
P_r	عدد بدون بعد پرائنتل
N_u	عدد بدون بعد ناسلت
T	دما
k	رسانایی گرمایی
h	ضریب جابه‌جایی
α	نسبت جرم ذره مایع به مجموع جرم مایع و جامد
\dot{m}_{lg}	نرخ تبخیر جرمی آلومینیوم مایع از تبخیر
\dot{m}_{ls}	نرخ مصرف جرمی آلومینیوم مایع برای تشکیل آلومینیوم اکسید
\dot{m}_{sl}	نرخ انتقال جرم از جامد به مایع در حین ذوب
D_{l+s}	قطر مجموع ذرات از فازهای مایع و جامد

combustion stability in solid fuel ramjet with swirling flow. *Acta Astronautica*, 137, 157-167.

[31] Musa, O., Changsheng, Z., Xiong, C., & Lunkun, G. (2016). Prediction of swirling cold flow in a solid-fuel ramjet engine with a modified rotation/curvature correction SST turbulence model. *Applied Thermal Engineering*, 105, 737-754.

[32] Musa, O., Xiong, C., Weixuan, L., & Wenhe, L. (2019). Combustion characteristics of a novel design of solid-fuel ramjet motor with swirl flow. *Aerospace Science and Technology*, 92, 750-765.

[33] Musa, O., Xiong, C., Changsheng, Z., & Li, W. (2017). Effect of inlet conditions on swirling turbulent reacting flows in a solid fuel ramjet engine. *Applied Thermal Engineering*, 113, 186-207.

[12] Emelyanov, V. N., Teterina, I. V., & Volkov, K. N. (2020). Dynamics and combustion of single aluminium agglomerate in solid propellant environment. *Acta Astronautica*, 176, 682-694.

[13] Glorian, J., Gallier, S., & Catoire, L. (2016). On the role of heterogeneous reactions in aluminum combustion. *Combustion and Flame*, 168, 378-392.

[14] Razdobreev, A. A., Skorik, A. I., & Frolov, Y. V. (1976). Ignition and combustion mechanism in aluminum particles. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 12(2), 177-182

[15] Meinköhn, D. (2001). Oxide layer effects in metal particle combustion. *Combustion of Disperse Systems*.

[16] Fedorov, A. V., & Kharlamova, Y. V. (2003). Ignition of an aluminum particle. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 39(5), 544-547.

[17] Glassman, I. (1959). METAL COMBUSTION PROCESSES. Aeronautical Engineering Laboratory Report No. 473 (No. AFOSR-TN-59-1093). Princeton Univ., New Jersey, (United States). Aeronautical Engineering Lab.

[18] Liang, Y., Beckstead, M. W., & Pudduppakkam, K. (1999, October). Numerical simulation of unsteady, single aluminum particle combustion. In *Proceedings of 36th JANNAF Combustion Meeting (Vol. 1, pp. 283-309)*.

[19] Fabignon, Y., Trubert, J. F., Lambert, D., Orlandi, O., & Dupays, J. (2003). Combustion of aluminum particles in solid rocket motors. In *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (p. 4807)*.

[20] Babuk, V. A., & Vasilyev, V. A. (2002). Model of aluminum agglomerate evolution in combustion products of solid rocket propellant. *Journal of Propulsion and Power*, 18(4), 814-823

[21] Melcher, J. C., Krier, H., & Burton, R. L. (2002). Burning aluminum particles inside a laboratory-scale solid rocket motor. *Journal of propulsion and power*, 18(3), 631-640.

[22] DesJardin, P. E., Felske, J. D., & Carrara, M. D. (2005). Mechanistic model for aluminum particle ignition and combustion in air. *Journal of propulsion and power*, 21(3), 478-485.

[23] M. Zhu, X. Chen, C. S. Zhou, Experimental and numerical investigations on the decomposition and combustion characteristics of composite propellant with Mg/Al particles additives, *Applied Thermal Engineering*, 111(2016)863-875.

[24] Widener, J., Liang, Y., & Beckstead, M. (1999, June). Aluminum combustion modeling in solid propellant environments. In *35th Joint Propulsion Conference and Exhibit (p. 2629)*.

[25] Liang, Y., & Beckstead, M. (1998). Numerical simulation of quasi-steady, single aluminum particle combustion in air. In *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 254)*.

[26] Brooks, K. P., & Beckstead, M. W. (1995). Dynamics of aluminum combustion. *Journal of propulsion and power*, 11(4), 769-780.

[27] K.K. Kuo, *Principles of Combustion*, Wiley & Sons, New York, 1986.

[28] George, P., & DesJardin, P. (2004). Effects of heterogeneous surface reactions on the ignition of aluminum particles. In *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 790)*.

[29] Yang, H., & Yoon, W. (2010). Modeling of aluminum particle combustion with emphasis on the oxide effects and variable transport properties. *Journal of mechanical science and technology*, 24(4), 909-921.

[30] Musa, O., Xiong, C., & Changsheng, Z. (2017). Experimental and numerical investigation on the ignition and