دومین کنفرانس احتراق ایران
بهمن ماه 1386 - مشهد- دانشگاه آزاد اسلامی مشهد
انجمن احتراق ایران
کد مقاله: CCI2051
Archive of SID

اندازه‌گیری فاصله خاموشی شعله مخلوط دو فازی گاز- جامد

مهدی بیدآبادی [1] ، محمد صدیقی [2]، فریبا فیضی [3]
تهران ، دانشگاه علم و صنعت ایران ، دانشکده مهندسی مکانیک
bidabadi@iust.ac.ir

چکیده

نتایج مطالعات تجربی احتراق ابر ذرات آلومینیم در مخلوط N_2/O_2 ارائه می‌گردد. در این تحقیق، بررسی پارامتر دینامیکی فاصله خاموشی شعله ابر ذرات ریز جامد، مورد توجه قرار گرفته است و تاثیر افزایش میزان O_2 در مخلوط N_2/O_2 بر پارامتر فاصله خاموشی بررسی شده است. روش آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق، بر مبنای پاشش ذرات آلومینیم و معلق ساختن این ذرات در محیط دارای جاذبه و سپس مشتعل کردن ذرات می‌باشد. در آزمایشات، ذرات آلومینیم با قطر 5/4 و 18 میکرون مورد استفاده قرار گرفته‌اند و حداقل فاصله خاموشی و حد رقیق اشتعال پذیری ابر ذرات اندازه‌گیری شده است . بر اساس این آزمایشات حداقل فاصله خاموشی در احتراق ذرات آلومینیم 18 میکرون در مخلوط گازی 21 درصد اکسیژن و79 درصد نیتروژن 3 میلیمتر و حد رقیق اشتعال پذیری $95\ gr/m^3$ به دست آمده در حالی که با افزایش میزان اکسیژن مخلوط گازی به 25 درصد، حداقل فاصله خاموشی و حد رقیق اشتعال‌پذیری کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: ذرات آلومینیم، سوخت جامد، فاصله خاموشی

1- مقدمه

مواد جامد بسیاری وجود دارند که قابلیت احتراق داشته و در صورتیکه شرایط محیطی برای اشتعال آن‌ها فراهم شود، شروع به سوختن می‌نمایند. این شرایط که در نهایت منجر به جرقه می‌گردد تا حدود زیادی به طبیعت و ابعاد ذره جامد بستگی دارد. معمولاً قابلیت احتراق ذرات جامد با کاهش اندازه آنها به شدت افزایش می‌یابد به خصوص اگر ذرات جامد به شکل پودر و یا غبار در آیند که در این صورت شرایط جهت احتراق به مراتب مساعدتر می‌گردد و در این حالت نه تنها سریعتر محترق گشته بلکه سرعت سوزش آنها نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر به میزان اکسیژن نفوذ کرده به داخل توده ذرات بر می‌گردد. در واقع در حالت فوق الذکر هوا یا اکسیژن راحت‌تر به درون توده ذرات نفوذ می‌کند.

هنگامی که فاصله بین ذرات زیاد می‌شود، زمینه مناسب جهت سوختن سریع مهیا می‌گردد، چرا که هوای کافی جهت احتراق، بین ذرات قرار می‌گیرد. حال اگر این پتانسیل بالا که در احتراق ذرات ریز جامد وجود دارد خارج از کنترل به فعلیت درآید می‌تواند باعث خطرات فاجعه‌آمیز و آسیب‌دیدگی شود. چرا که نرخ سریع سوزش ذرات باعث گستردگی شعله می‌گردد.

1- استادیار - مهندسی مکانیک
2- استادیار - مهندسی هوافضا
3- کارشناسی ارشد مکانیک

www.SID.ir

Archive of SID

مکانیزم انتشار ذرات جامد در ابری از این ذرات کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. برای شناخت این مکانیزم باید پارامترهای دینامیکی شعله را شناخت که از این پارامترها می‌توان به سرعت انتشار، سرعت سوزش، ضخامت شعله و فاصله خاموشی اشاره کرد.

احتراق ذرات ریز جامد، مانند آلومینیم و منیزیم، به علت کاربرد آنها در موتور موشکها مورد توجه قرارگرفته‌است. این موشکها فلزاتی را به عنوان سوخت با انرژی بالا حمل می‌کنند و گاز دی‌اکسیدکربن و بخار آب معمولاً مهمترین اکسیدکننده برای ذرات ریز جامد در موتور موشکها می‌باشند [7]. آلومینیم نسبت به منیزیم برای شروع احتراق به گرمای بیشتری احتیاج دارد ولی انرژی بیشتری هم از احتراق آن حاصل می‌شود و به این دلیل است که از آلومینیم به عنوان سوخت در موتور موشکها استفاده می‌شود.

فلزات دارای آنتالپی احتراق بالا هستند و تخمین‌های شیمیایی_ترمودینامیکی، بازده بسیار بالایی را برای احتراق آنها پیش‌بینی می‌کند. در بسیاری از سیستمهای عملی، ذرات فلزی در فشار بالا با CO_2، CO و H_2O به عنوان اکسیدکننده‌های اولیه محترق می‌شوند. فرآیندهای احتراقی در دمای بالا (1500-3000 درجه سانتیگراد) اتفاق می‌افتد و شامل تشکیل و تراکم ذرات دوده در ابعاد نانویی می‌شود و نیز شامل پخش جرم و گرما می‌باشد.

در تحقیق حاضر اثر افزایش میزان اکسیژن در مخلوط اکسیژن و نیتروژن، بر حداقل فاصله خاموشی شعله ابر ذرات آلومینیم، بررسی می‌شود

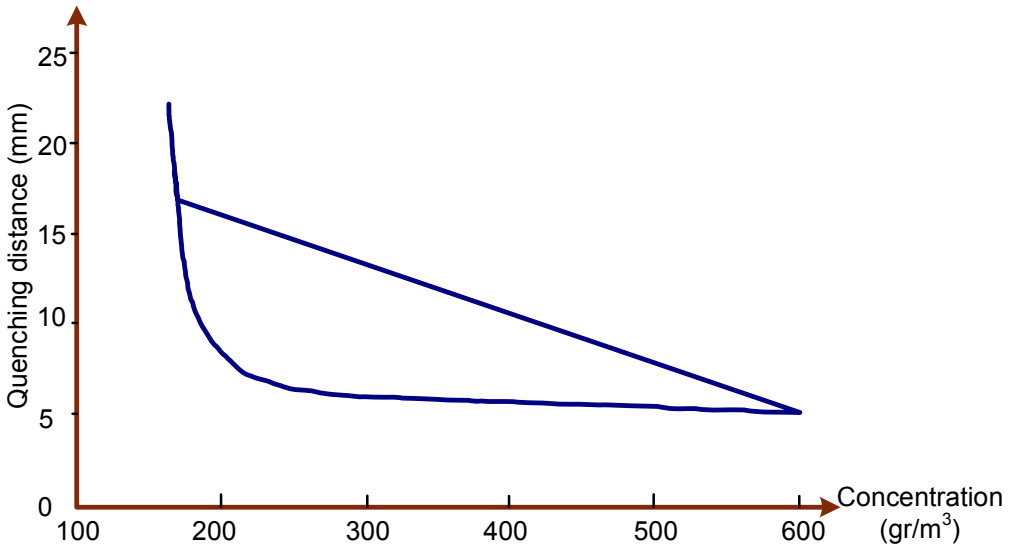
2- آزمایشات

در انجام آزمایشات از دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران[8]، استفاده شده است. ذرات آلومینیم 18 میکرون که درون سیلندر قرار دارند، توسط حرکت جک الکترومکانیکی و نیز جریان گاز (مخلوط اکسیژن و نیتروژن) ورودی به سیستم، به درون لوله پیرکس دستگاه پاشیده می‌شوند، پس از اینکه جریان ذرات آلومینیم به غلظت ثابت و دلخواه رسید، توسط سیستم جرقه، با استفاده از سیم تنگستن، اشتعال ذرات آلومینیم صورت گرفته و وقتی شعله تشکیل شد، پاشش ذرات به درون لوله پیرکس قطع می‌شود و شعله تشکیل شده درون لوله شیشه‌ای به سمت پایین شروع به حرکت می‌نماید.صفحات خاموشی درون لوله شیشه‌ای در محل تعیین شده قرار دارند، وقتی شعله به این صفحات خاموشی رسید، یا شعله دراین صفحات، خاموش می‌گردد (که در این صورت به این صفحات، صفحات خاموشی و به فاصله بین این صفحات فاصله خاموشی گفته می‌شود) و یا شعله از صفحات مربوطه عبور می‌نماید و پس از صفحات هم منتشر می‌شود.

در ابتدا به منظور شناخت و بررسی احتراق ابر ذرات آلومینیم، بررسی آزمایشگاهی احتراق ذرات آلومینیم 5/4 میکرون با مخلوط اکسیژن- نیتروژن (21 درصد اکسیژن و 79 درصد نیتروژن) صورت گرفته است که نتایج حاصل به صورت زیر می‌باشد.

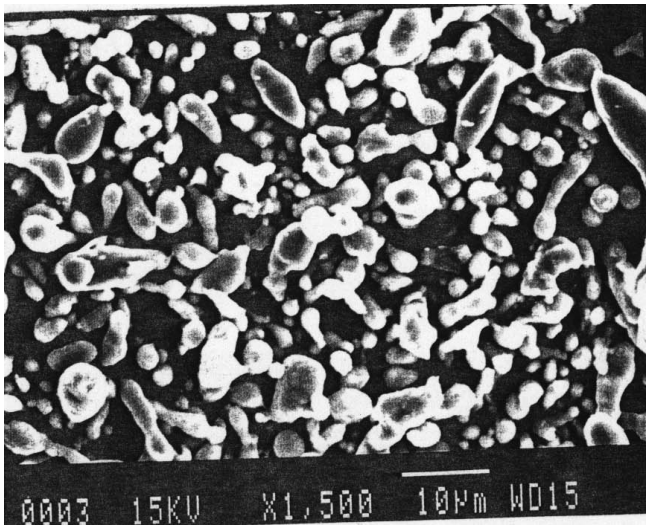
www.SID.ir

Archive of SID



شکل1. نتایج تجربی فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت ذرات آلومینیم به قطر 5/4 میکرون

تصویر ذرات آلومینیم به قطر 5/4 میکرون به کار رفته در آزمایشات در شکل زیر نشان داده شده است و همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود این ذرات نامتقارن و غیر کروی هستند.

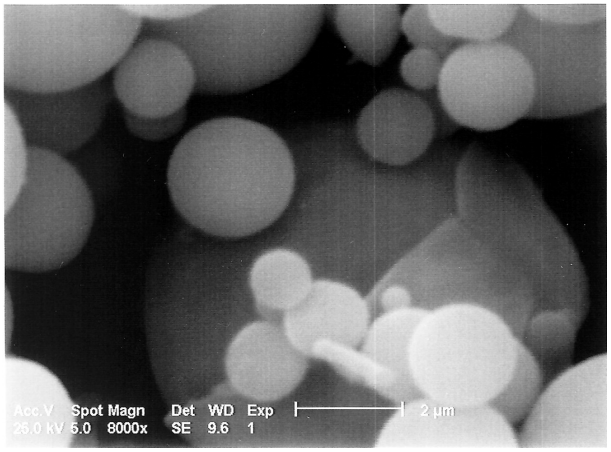


شکل2. تصویر ذرات آلومینیم 5/4 میکرون

در گام بعدی به منظور بررسی احتراق ذرات آلومینیم 18 میکرون، پس از اینکه این ذرات به مدت 48 ساعت در کوره با دمای 70 درجه سانتی گراد قرار داده شده تا خشک شوند و پاشش ذرات به درون دستگاه بهتر صورت گیرد، آزمایشاتی با استفاده از این ذرات انجام گرفت. تصویری از ذرات استفاده شده در شکل (3) نشان داده شده است.

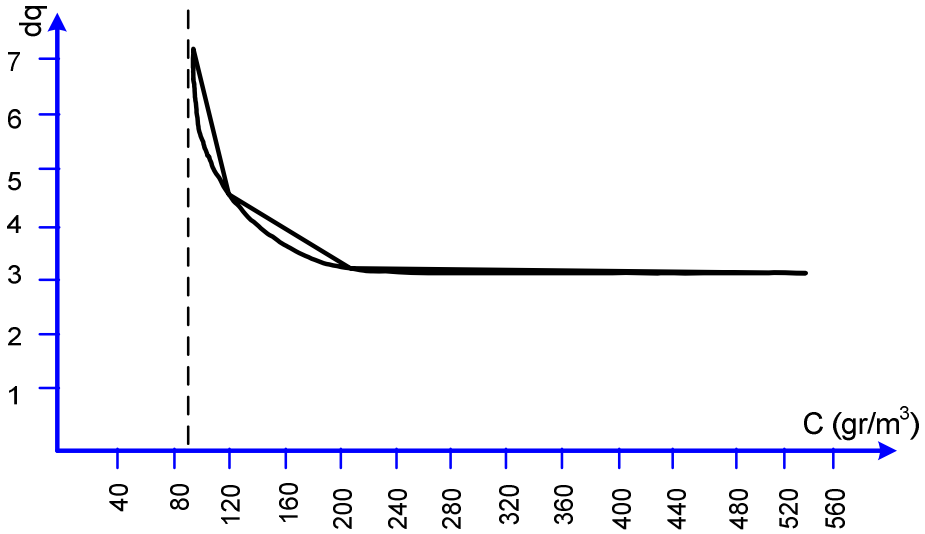
www.SID.ir

Archive of SID



شکل3. تصویر ذرات آلومینیم 18 میکرون

نتایج آزمایشات احتراق ابر ذرات آلومینیم 18 میکرون در هوای استاندارد (21 درصد اکسیژن و 79 درصد نیتروژن) به صورت نمودار زیر می باشد.



شکل4. نتایج تجربی فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت ذرات آلومینیم به قطر 18 میکرون در مخلوط 21 درصد اکسیژن و 79 درصد نیتروژن

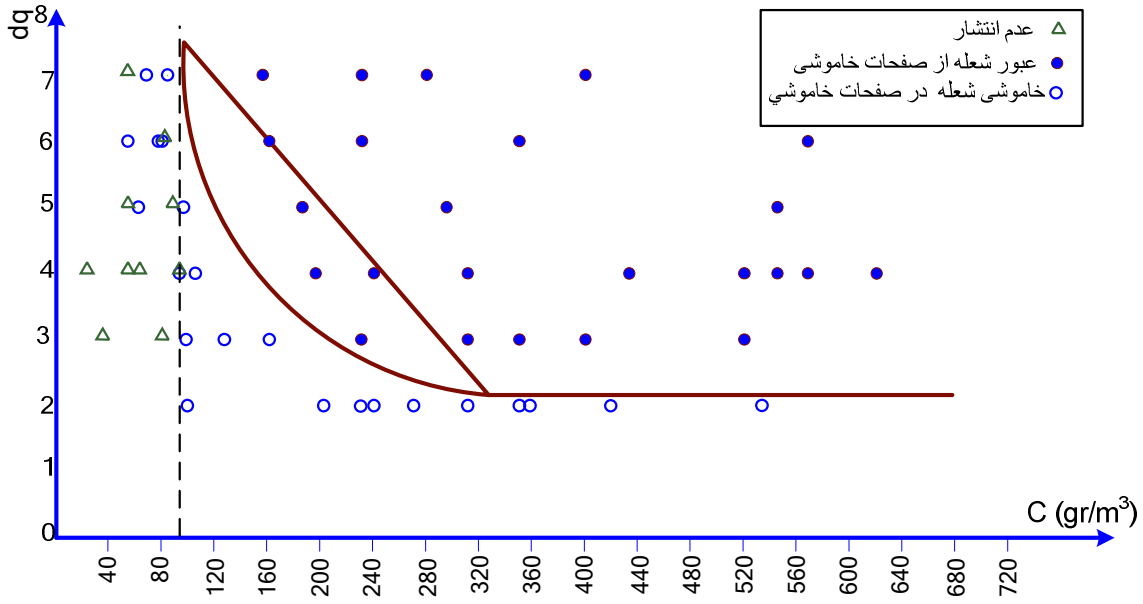
بر اساس این نمودار، حداقل فاصله خاموشی 3 میلیمتر به دست آمده و حد رقیق اشتعال پذیری 95gr/m3 می‌باشد. لازم به ذکر است که حد غنی اشتعال پذیری در آزمایشات به دست نیامد، بدین معنی که در گستره افزایش غلظت انجام گرفته، هر چه غلظت ذرات آلومینیم افزایش یابد، باز هم شعله تشکیل گردیده و انتشار می‌یابد.

گام بعدی، انجام آزمایشات احتراق ابر ذرات آلومینیم 18 میکرون در مخلوط گازی (25 درصد اکسیژن و 75 درصد نیتروژن)،به جای هوای استاندارد، به منظور بررسی اثر افزایش میزان اکسیژن در مخلوط اکسیژن - نیتروژن بر احتراق ذرات ریز جامد بوده است. در نمودار حاصل از نتایج، نمودار (4)، محور افقی به غلظت ذرات آلومینیم اختصاص دارد و محور عمودی بیانگر

www.SID.ir

Archive of SID

فاصله‌خاموشی می‌باشد. نقاط دایروی توخالی در نمودار، نقاطی را نشان می‌دهند که در آزمایش مربوط به آنها، شعله تشکیل‌شده و در صفحات خاموشی مورد استفاده، خاموش گردیده است. نقاط دایروی توپر، نشان دهنده نقاطی هستند که در آزمایش مربوط به آنها، شعله تشکیل شده و از صفحات خاموشی استفاده شده، عبور کرده است مثلثها نشان دهنده نقاطی هستند که در آزمایش مربوط به آنها، شعله تشکیل شده ولی انتشارنیافته است. همانطور که ملاحظه می‌شود یک منحنی از نقاط به دست آمده عبور داده شده که در طرف راست این منحنی نقاط دایروی توپر مربوط به حالتی که شعله از صفحات خاموشی عبور کرده قرار دارند و در سمت چپ آن نقاط دایروی توخالی مربوط به حالت‌هایی که شعله در فاصله‌های خاموشی مربوطه خاموش شده‌است و نیز نقاط مثلثی نشان دهنده عدم انتشار شعله، قرار دارند.



شکل5 منحنی نتایج بدست آمده از احتراق ذرات آلومینیم 18میکرون در ٪25اکسیژن و ٪75 نیتروژن

بر اساس این نمودار حد رقیق اشتعال پذیری 94gr/m3و حداقل فاصله خاموشی 2 میلیمتر می‌باشد و این بدین معناست که هر شعله‌ای در احتراق ابر ذرات آلومینیم 18 میکرون با 25 درصد اکسیژن و 75 درصد نیتروژن، یعنی با اکسیژنی بیش از اکسیژن هوا، تشکیل شود در صفحات خاموشی با فاصله 2 میلیمتر خاموش می‌گردد.

3- بحث و نتیجه گیری

با توجه به نمودار نتایج آزمایش، نمودار (4)، خاموشی شعله در صفحات خاموشی، عبور شعله از صفحات و انتشار شعله بعد از صفحات نیز عدم انتشار شعله پس از تشکیل شعله در آزمایشات انجام گرفته در این تحقیق مشاهده شدند.

در نمودار نقاطی وجود دارند که در این نقاط، یک دایرهٔ توخالی و یک مثلث بر روی هم قرار گرفته‌اند، مثلاًبرای شرایط آزمایشی که غلظت ذرات $93\ gr/m^3$ و فاصله خاموشی به کار رفته 4 میلیمتر بوده است و با نقطه‌ای به مختصات (4و93)، نمایش داده شده، شعله تشکیل شده و در صفحه خاموشی خاموش شده است در جایی که در مثلث نشان داده شده نزدیک مختصات (4و93) شعله تشکیل شده ولی انتشار نیافته است.

www.SID.ir

Archive of SID

در خصوص فاصله خاموشی 5 میلیمتر، نقطه‌ای به مختصات (5 و88) با علامت مثلث، بعد از نقطهٔ (5 و62) با علامت دایره توخالی قرار گرفته‌است، یعنی در یک آزمایش با غلظت ذرات $88gr/m^3$، شعله تشکیل شده اما انتشار نیافته است ولی در آزمایش دیگری با غلظت کمتر $62gr/m^3$ شعله تشکیل شده، منتشر گردیده و در صفحات خاموشی 5 میلیمتر خاموش شده است. ولی باید گفت که بدست آوردن چنین نتایجی در آزمایشات تجربی دلایل خاص خود را دارد. یکی از این دلایل، عدم یکنواختی ذرات در آزمایش انجام گرفته با مختصات(5و88) باشد که در این آزمایش خاص با این غلظت به دلیل ماهیت روش‌های تجربی، غلظت ذرات یکنواخت نبوده ولی در آزمایش به مختصات (5و62) پراکندگی ذرات قابل قبول بوده و شعله انتشار یافته است. دلیل دیگری که می‌توان برای توضیح این مساله بیان‌کرد، تغییرات جریان هوا در آن لحظهٔ خاص، به دلیل تغییر عملکرد ناگهانی هواکش و سیستم تهویه دستگاه آزمایش [8] است. عدم ایجاد دمای مناسب جهت اشتعال ذرات توسط سیستم جرقه هم می‌تواند دلیل دیگری باشد تا در یک آزمایش خاص که با غلظتی پایین‌تر از غلظت آن، از آزمایش جواب گرفته‌ایم، جواب قابل قبول بدست‌نیاید.

به جز تعداد نقاط محدودی که در بالا در مورد آنها توضیح داده شد، نقاط بدست آمده از آزمایشات از روند قابل قبولی پیروی می‌کنند. به عنوان نمونه اگر نقاط به مختصات (7و231)، (3و231) و (2و231) را در نظر بگیریم، می‌توان چنین نتیجه گرفت که با غلظت $231gr/m^3$ ، شعله از فاصله خاموشی 7 و3 عبور کرده ولی در فاصله خاموشی 2 میلیمتر خاموش گردیده است ولی در غلظت $161gr/m^3$، یعنی مختصات (3و 161)، شعله تشکیل شده ، نتوانسته از صفحه خاموشی 3میلیمتر عبور کند و در این صفحات خاموش شده است، یعنی شعله‌ای که با غلظت بیشتر تشکیل می‌شود، انرژی بیشتری دارد و برای خاموش کردن آن به فاصله خاموشی کوچکتری نیاز است و این نتیجه، با مطالب تئوری هم منطبق است [5].

همانطور که در نمودار مشخص می‌باشد هر چه فاصله خاموشی کوچکتر باشد، غلظتی که در آن، شعله مربوطه در این فاصله خاموشی خاموش می‌گردد، افزایش می‌یابد یعنی در آزمایشاتی که با مختصات (4و311)، (3و311) و (2و311). نشان داده شده اند، شعله در فاصله های خاموشی 3 و 4 میلیمتر خاموش نشده ولی در فاصله خاموشی 2 میلیمتر خاموش گردیده است.

در انجام آزمایشات با یک فاصله خاموشی مشخص، با افزایش غلظت ذرات آلومینیم، احتمال عبور شعله تشکیل شده از صفحات خاموشی و انتشار شعله پس از صفحات بیشتر می‌شود و نیز در یک غلظت مشخص هر چه فاصله خاموشی استفاده شده کوچکتر شود، احتمال خاموشی شعله در صفحات خاموشی افزایش می‌یابد [6].

با تکرار آزمایشات مشخص می‌شود که در احتراق ابر ذرات آلومینیم 18 میکرون، اگر غلظت ذرات از میزان مشخصی ($94gr/m^3$)،کمتر باشد، شعله تشکیل نمی‌شود که این غلظت همان حد رقیق اشتعال‌پذیری می‌باشد، نمودار (5)، و پس از انجام آزمایشات مشخص شد که در یک فاصله خاموشی مشخص، حداقل فاصله خاموشی، شعله ابر ذرات آلومینیم تشکیل شده با هر غلظتی خاموش می‌گردد.

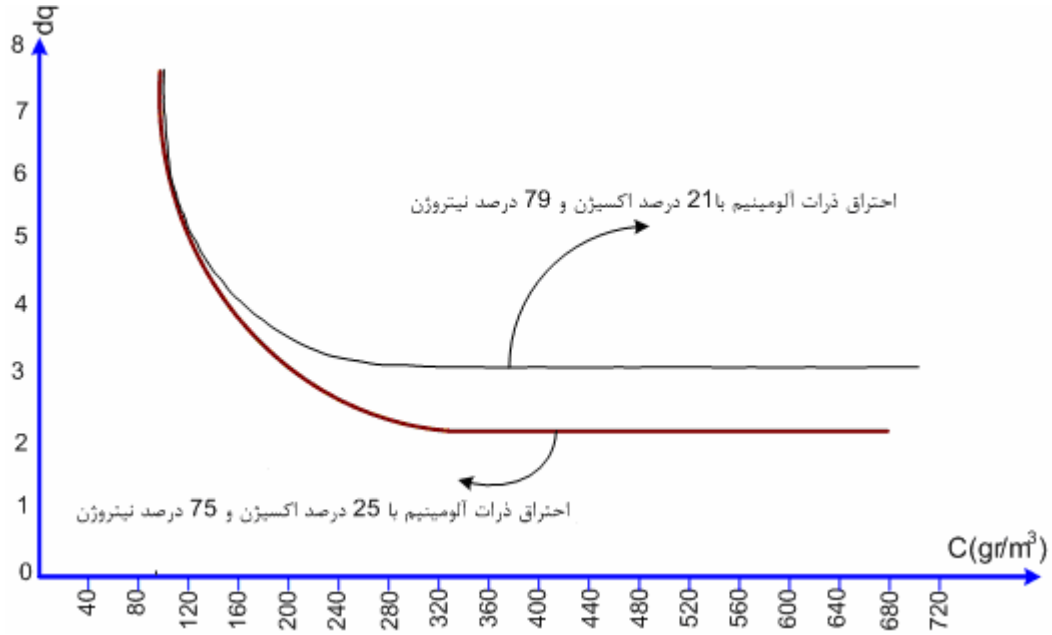
در آزمایشات انجام گرفته، حد غنی اشتعال پذیری ذرات آلومینیم 18 میکرون بدست نیامده است و این به دلیل ماهیت احتراق ذرات ریز جامد می‌باشد [2]. ذرات ریز جامد بر خلاف قطرات مایع سوخت هیدروکربنی که وقتی در معرض اکسیدکننده قرار بگیرند به سرعت واکنش داده و می‌سوزند، واکنش ذرات فلزی به صورت لایه لایه صورت گرفته یعنی میزان غلظت ذرات آلومینیمی که واقعاً در واکنش شرکت می‌کنند از میزان غلظتی که توسط دستگاه آزمایش مشخص می‌شود، کمتر است [1]. و به دلیل اینکه در حین احتراق لایه اکسیدی Al_2O_3 در محصولات احتراق تشکیل گردیده و بر روی ذره در حال احتراق رسوب می‌نماید [3]، قبل از اینکه تمام یک ذره آلومینیم در واکنش با اکسید کننده مصرف شود، واکنش متوقف می‌شود [4]. با توجه به دلایل ذکر شده، غلظت واقعی ذرات آلومینیمی که در واکنش شرکت می‌کنند از غلظت ذرات فرستاده شده به درون دستگاه کمتر است. پس می‌توان چنین نتیجه گیری کرد که در گستره‌ای از غلظت که آزمایشات انجام گرفته‌اند، هر چه غلظت افزایش یافته،

www.SID.ir

Archive of SID

غلظت ذرات آلومینیمی که در واکنش شرکت کرده و مصرف شده‌اند هنوز به میزانی نرسیده که واکنش به صورت استوکیومتری انجام شود و بنابراین حد غنی اشتعال‌پذیری مشاهده نمی‌گردد.

با توجه به آزمایشات، نتایج به دست آمده در مورد حد رقیق اشتعال پذیری و حداقل فاصله خاموشی ذرات آلومینیم 5/4 میکرون، شکل(1)، و ذرات آلومینیم 18 میکرون اشکال (4) و (5) دارای اختلاف هستند که این اختلاف با توجه به غیر کروی بودن ذرات آلومینیم 5/4 میکرون، شکل(2)، و متقارن و کروی بودن ذرات آلومینیم 18 میکرون، شکل (3)، قابل تفسیر می‌باشد.
به منظور بررسی اثر افزایش اکسیژن بر احتراق ذرات آلومینیم، منحنی حاصل از احتراق ذرات آلومینیم 18 میکرون در 21 درصد اکسیژن و نیز 25 درصد اکسیژن، بر روی یک نمودار ترسیم شده‌اند.



شکل 6. مقایسه نتایج احتراق ذرات آلومینیم 18 میکرون در 21 و 25 درصد اکسیژن

با بررسی این نمودار می‌توان گفت، با افزایش میزان اکسیژن در مخلوط اکسیژن و نیتروژن، از 21 درصد به 25 درصد حد رقیق اشتعال پذیری از $95gr/m^3$ به $94gr/m^3$ یعنی به مقدار جزئی کاهش یافته است. در اینجا ممکن است این سوال مطرح شود که قبل از حالت استوکیومتری احتراق، میزان اکسیژن بر احتراق تاثیر گذار نیست و این میزان سوخت است که عامل تعیین کننده می‌باشد ولی مکانیزم احتراق ذرات ریز جامد، ماهیتی خاص دارد. اگر هر ذره ریز جامد در ابری از ذرات در نظر گرفته شود چون این ذره یک ذره جامد است، و وقتی که شروع به سوختن نماید به صورت لایه لایه سوخته و تماماً در واکنش شرکت نمی‌کند و با توجه به لایه اکسیدی که همواره بر روی ذرات آلومینیم در حال سوختن وجود دارد که سبب ایجاد دو مرحله مختلف احتراق در فاز بخار و سپس احتراق در فاز جامد و بر روی سطح ذره می‌شود، این عدم تمایل برای شرکت در واکنش بیشتر شده و می توان گفت اگر در این شرایط میزان اکسیژن افزایش یابد، ذرات بیشتری در معرض حضور اکسیدکننده قرار گرفته و شروع به سوختن می‌کنند و این امر، حد رقیق اشتعال‌پذیری را به میزان ناچیزی کاهش می‌دهد و همانطور که از بررسی نمودار ملاحظه می‌شود، با افزایش میزان اکسیژن حداقل فاصله خاموشی از 3 میلیمتر، به 2 میلیمتر کاهش یافته‌است و این کاهش هم با توجه به اینکه وقتی میزان اکسیژن بیشتر باشد ذرات بیشتری می‌توانند در معرض اکسیژن قرار گرفته و شروع به سوختن نمایند، قابل تفسیر می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

[1] Dreizin, E.L., Trunor, M.A. , "Surface phenomena in Aluminum Combustiion", Combustion and Flame [0]: 378-382 (1995).
[2] Dreizin, E.L., "On the Mechanism of Asymetric Aluminum Particle Combustion", Combustion and Flame [0]: 117:841-850 (1999).
[3] Dreizin, E.L., 'Experimental Study of Stages in Aluminum Particle Combustion in Air', Combustion and Flame 105:541-556 (1996).
[4] Dreizin, E.L., "Effect of Phase Changes on Metal-Particle Combustion Process", Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 39, No. 6, pp. 681-693, (2003).
[5] Bidabadi, M., Goroshin, S. , Lee, J.H.S. , "Flames Speed and Quenching Distance in Aluminum Dust Clouds", Combustion and Flame (1996).
[6] Goroshin, S., Bidabadi, M., Lee, J.H.S, "Quenching Distance of Laminar Flame in Aluminum Dust Clouds", Combustion and Flame 105: 147-160 (1996).
[7] Linnell, J.A. , Miller, T.F. , "A Preliminary Design of a Magnesium Fueled Martian Ramjet Engine", Applied Research Laboratory, Pennsylvania, 2002.
[8] صدیقی، محمد، «تحلیل تجربی مکانیزم انتشار شعله ذرات ریز جامد»، پایان‌نامه دکترای تخصصی، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، 1385.

www.SID.ir