

## واکنش‌های سطحی در احتراق ذرات آلومینیوم و زمان سوختن

عباسعلی فرداد (استادیار)  
مهدی بیدآبادی (استادیار)  
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران  
محمد صدیقی (استادیار)  
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی  
سروش خسروی (کارشناس ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

برخلاف نظریه‌های رایج گذشته که احتراق آلومینیوم را غالباً در فاز بخار (واکنش گاز-گاز) تصور می‌کردند، تحقیقات اخیر حاکی از آن است که در برخی شرایط واکنش‌های احتراقی فاز جامد - گاز نقش مؤثری در پیشبرد فرایند احتراق دارد. برای تعیین این نقش در احتراق ذرات فلزی روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها بررسی زمان احتراق، و تغییرات این زمان با تغییر قطر ذرات، و حساسیت آن نسبت به مقدار اکسیژن است. آزمایش‌های انجام شده نشان داد در اندازه‌های زیر ۵۰ میکرون، واکنش جامد - گاز نقش قوی‌تری نسبت به واکنش فاز گاز - گاز دارد.

### مقدمه

دانشمندانی که در زمینه‌ی احتراق آلومینیوم بیشترین زحمات را متحمل شده‌اند [۲-۴]، همیشه از واکنش‌های سطحی و نامتجانس (واکنش‌های غیر هم‌فاز) مثلاً واکنش جامد - گاز صرف نظر کرده‌اند. در سال‌های اخیر در تحقیقات احتراقی آلومینیوم گام‌های مؤثری برداشته شده است و اعتقاد بر این است که در احتراق فلزات به هیچ وجه نمی‌توانیم از واکنش‌های سطحی ذره و تغییرات فازی درون ذره صرف نظر کنیم. [۵] علی‌رغم آنچه که گفته شد هرگز نمی‌توان ارزش کارهای پژوهشی بزرگی را که متقدمین در حوزه‌ی احتراق فلزات انجام داده‌اند نادیده گرفت. یکی از روش‌های تعیین سازوکار احتراق ذرات ریز فلزی بررسی و اندازه‌گیری زمان احتراق ذرات بر حسب قطر ذرات است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد اگرچه واکنش شیمیایی در سطح ذره انجام می‌شود، زمان احتراق ذرات با قطر ذرات رابطه‌ی خطی دارد و نیز در صورتی که واکنش فلز در فاز گاز صورت گیرد با تغییر درصد اکسیژن محیط، زمان احتراق تغییر قابل ملاحظه‌ی نمی‌کند. [۶] در این نوشتار داده‌های تجربی زمان‌های احتراق در راستای تعیین سازوکار احتراق ذرات آلومینیوم ارائه شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

### شرح آزمایش

در آزمایش‌های انجام شده از ذرات کروی آلومینیوم با ابعاد  $2\mu$ ،  $5\mu$ ،  $18\mu$  و  $28\mu$  استفاده شده است. دستگاه آزمایش و قسمت پخش‌کننده‌ی ذرات به‌طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم از دو قسمت تغذیه‌کننده و پخش‌کننده‌ی ذرات تشکیل شده است. پودر

احتراق فلزات امروزه کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. از فلزاتی نظیر منیزیم و بور در مخلوط‌های آتش‌زا برای ایجاد روشنایی و درخشش زیاد استفاده می‌کنند. پودر آلومینیوم نیز برای بالا بردن آنتالپی احتراق به سوخت‌های جامد اضافه می‌شود. فلزات یاد شده به همراه برلیوم، زیرکنیم، تیتانیم و هافنیم (با حرارت احتراقی بالا) افزودنی‌هایی مناسب برای سوخت‌های پیشرفته‌ها و مواد منفجره‌اند. درک پایه‌ی سازوکارهای احتراق فلزات در طول چنددهه تحقیق رشد بسیاری کرده است، و مجموعاً پذیرفته شده که در احتراق فلزات سه واکنش اصلی رخ می‌دهد: [۱]

۱. اکسایش فاز گازی (بخار) فلزات؛

۲. اکسایش منجر به تولید اکسیدهای فرار؛

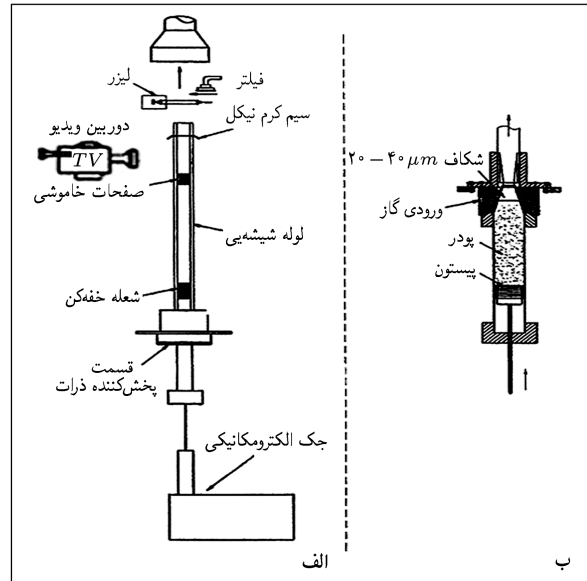
۳. اکسایش سطحی بر اثر شکل‌گیری و رشد اکسیدهای غیر فرار که ممکن است در فلزات ذوب شده حل شوند.

در دهه‌های گذشته، احتراق فلزات عمدتاً در فاز بخار مورد توجه بوده است. این فرض بدین علت است که دمای شعله‌ی فلزات معمولاً بالاتر از دمای جوش آنهاست؛ و بنابراین فلز ناگزیر به تبخیر شدن است. در نگاه اول منطقی به نظر می‌آید که وقتی فلز در حال بخار شدن است آنچه می‌سوزد بخار فلز است نه بدنه‌ی ذره، و شعله در فاصله‌ی دور از سطح ذره شکل می‌گیرد. هنوز هم در بسیاری از حالات این فرض می‌تواند تا حدود زیادی توجیه‌کننده‌ی پارامترهای احتراقی و پدیده‌های مشاهده شده در آزمایش‌ها باشد.

شدت نور دریافتی، ولتاژی از خود ارسال می‌کند که اعداد ولتاژ خوانده شده را می‌توان برای مقادیر مختلف غلظت کالیبره کرد. داده‌های لیزر توسط نرم‌افزار Genie به صورت منحنی‌های شکسته‌ی تابع غلظت غبار روی نمایشگر رایانه قابل رویت است. شکل ۲ نشان‌گر نمونه‌ی از منحنی ارسالی توسط حس‌گر به رایانه است.

اعداد و رأس‌های نشان داده شده در حین آزمایش، و چند ثانیه قبل و بعد از آزمایش ثبت می‌شود. هنگام احتراق به دلیل شدت نور شعله، تغییر و جهش ناگهانی در اعداد خوانده شده دیده می‌شود. مقدار غلظت با استفاده از  $I_0$  و  $I$  که نشان‌گر شدت جریان لیزر قبل از جهش بزرگ بوده، خوانده می‌شوند. نمونه‌ی از نمودار کالیبراسیون برای ذراتی با قطر ۱۸ میکرون در شکل ۳ آورده شده است.

لیزر انتخابی آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق، از دسته لیزرهای گازی و از نوع هلیوم - نئون مدل IR۲۰۰۰، ساخت مرکز تحقیقاتی لیزر وابسته به سازمان انرژی اتمی است که دارای فرکانس  $5 \times 10^{14}$  هرتز با منبع تغذیه  $220^\circ$  ولت است و طول موج نور خروجی آن  $6328$  آنگستروم است. به منظور بالا بردن دقت اندازه‌گیری محاسبات، یک مجموعه لنز (شامل سه لنز) در سیستم تعبیه می‌شود. لنزها باعث می‌شوند که ضخامت پرتو لیزر تا  $4/5$  سانتی‌متر وسعت یابد و مجموعه‌ی آبر ذرات خروجی از لوله‌ی پیرکس را کاملاً پوشش دهد. پس از عبور اشعه از آبر ذرات، به منظور جمع‌آوری اشعه از یک لنز همگرا استفاده می‌شود. برای وسیع‌کردن قطر اشعه به  $2$  لنز نیاز داریم که لنز اولی دسته پرتو موازی خروجی از لیزر را واگرا می‌کند و لنز دوم سبب موازی‌کردن مجدد



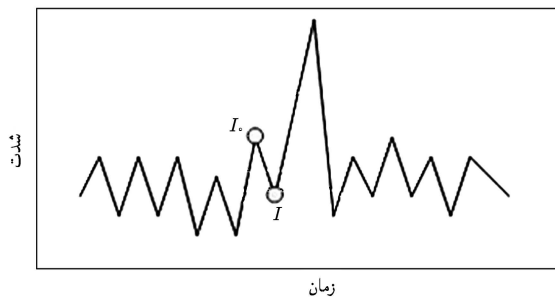
شکل ۱. شمایی از دستگاه آزمایش مورد استفاده: الف) طرح‌واره‌ی دستگاه احتراق ذرات؛ ب) سیستم تزریق ذرات.

آلومینیوم را درون یک سیلندر سرنگ مانند با قطر داخلی  $2/5$  cm طول کورس  $16/1$  cm ریخته و توسط پیستون به سمت بالا حرکت می‌دهند تا توسط یک پخش‌کننده در بالای سیلندر و تزریق گاز از مجرای آن، به صورت غبار داخل لوله‌ی شیشه‌ی پیرکس پخش شود. نیروی محرکه‌ی پیستون توسط یک جک الکترومکانیکی تأمین می‌شود. شدت غبار تزریق شده با تغییر سرعت جک تنظیم می‌شود. محدوده‌ی تغییرات سرعت جک  $1^\circ$  تا  $5^\circ$  (cm/s) است. جت هوای (گاز) ورودی با شدتی حدود  $3$  تا  $6$  لیتر در دقیقه وارد قسمت جانبی می‌شود. قطر داخلی لوله‌ی شیشه‌ی  $4/5$  cm و طول آن  $15$  cm است.

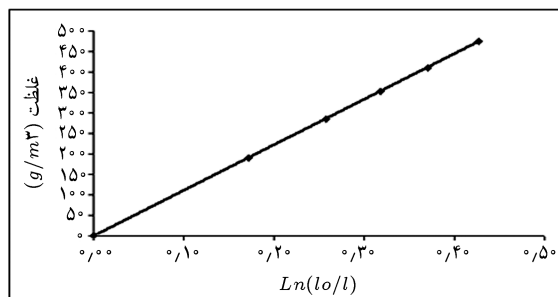
### اندازه‌گیری غلظت ذرات

برای اندازه‌گیری غلظت ذرات خروجی از انتهای بالایی لوله‌ی پیرکس، از یک دسته اشعه‌ی نور موازی استفاده شده است. این دسته اشعه که توسط دستگاه لیزر هلیوم - نئون تولید می‌شود و قطر آن حدود  $8$  میلی‌متر است، جریان ذرات ریز آلومینیوم را به صورت قطری قطع می‌کند. دستگاه لیزر در قسمت بالای لوله تعبیه شده است. باید توجه داشت که سیستم اندازه‌گیری غلظت در مکانی مستقر شود که از کوچک‌ترین لرزش‌ها دور باشد. بدیهی است این محل نباید هیچگونه تماسی با میز آزمایش داشته باشد.

پرتو لیزر با غبار ذرات خارج شده از لوله برخورد می‌کند و قسمتی از این اشعه به اطراف پراکنده شده و مابقی آن از سمت دیگر آبر ذرات خارج شده و وارد آشکارساز (دیتکتور) می‌شود. آشکارساز برحسب



شکل ۲. تغییرات سیگنال شدت نور دریافتی با زمان.



شکل ۳. منحنی تقریباً خطی کالیبراسیون برای ذرات ۱۸ میکرون.

نورانی مشاهده می‌شود تک‌ذره یا مجموعه‌ی بی از ذرات به هم چسبیده‌اند.

۳. به فرض نادیده انگاشتن موارد فوق، ردیابی یک ذره به علت وضع خاص شعله‌ی غباری و امکان اشتباه گرفتن یک ذره با ذره‌ی دیگر مجاورش که تازه مشتعل شده (بر اثر برخورد)، کار مشکلی است.

البته ردیابی نقاط نورانی مختلف، فارغ از اینکه تک‌ذره‌اند یا مجموع چند ذره، می‌تواند در تحقیقات درمورد زمان احتراق مفید باشد و در این زمینه هم کارهایی انجام شده است. از مجموع مطالب فوق می‌توان به این نتیجه رسید که باید راه دیگری برای اندازه‌گیری زمان احتراق انتخاب کرد. روش رایجی که محققین احتراق ذرات از آن استفاده می‌کنند به دست آوردن زمان احتراق به وسیله‌ی سرعت سوزش شعله و ضخامت آن است. در آزمایش‌هایی که در شرایط جاذبه‌ی ناچیز انجام شود می‌توان نشان داد که زمان احتراق از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید: [۷]

$$t = \frac{\delta}{v} \quad (1)$$

که در آن  $v$  و  $\delta$  به ترتیب عبارت‌اند از «سرعت سوزش» و «ضخامت شعله»؛ به عبارتی زمان احتراق غبار ذرات عبارت است از زمانی که ذرات در ناحیه‌ی انجام واکنش، یا همان ضخامت شعله، حضور دارند. در صورت وجود جاذبه‌ی زمین باید اصلاحاتی در این رابطه انجام داد. اگر آزمایش‌ها در محیطی با جاذبه‌ی ناچیز انجام شود شعله به صورت تقریباً «تخت» منتشر می‌شود، اما در شرایط معمولی به علت اثر ثقل و ایجاد لایه‌ی مرزی در دیواره‌ی داخلی لوله، انتشار شعله سهمی‌گون خواهد بود. سرعت انتشار در لوله با در نظر گرفتن فواصل معینی روی لوله‌ی آزمایش و شمارش فریم‌های دوربین تصویربرداری در طی فواصل ذکر شده، اندازه‌گیری می‌شود. سرعت سوزش از تقسیم سرعت انتشار بر نسبت سطح شعله‌ی سهمی‌گون به سطح مقطع لوله، که در حدود ۲-۱/۵ بوده [۸]، به دست می‌آید.

### تعیین ضخامت شعله

ضخامت شعله نیز به شیوه‌های مختلف محاسبه می‌شود. یکی از این شیوه‌ها استفاده از صفحات خاموشی است. صفحات خاموشی، صفحاتی آهنی‌اند که به دلیل هدایت حرارتی بالا، شعله را سرد و یا خاموش می‌کنند. به طور خلاصه می‌توان گفت انرژی شعله با ضخامت آن و فاصله‌ی خاموشی که از آن عبور می‌کند رابطه دارد. اما روش مورد استفاده در این تحقیق که دقت قابل قبولی دارد استفاده از تصاویر ضخامت شعله و اندازه‌گیری مستقیم آن است.

به علت مشکلات خاص فیلترکردن نور، در اکثر تصاویر گرفته شده از شعله‌ها، تفکیک مناطق پیش‌گرم شعله و پس از شعله، کار مشکلی

پرتوها می‌شود. آشکارساز، سیگنال‌های نوری دریافتی را به صورت سیگنال‌های الکتریکی، که متناسب با شدت نور تابیده شده است، تبدیل می‌کند و آنها را به منظور پردازش به سیستم اخذ و پردازش اطلاعات ارسال می‌کند.

### ثبت تصاویر آزمایش

آزمایش‌ها به دو روش تصویربرداری می‌شوند. در همه‌ی آزمایش‌ها، یک دوربین ویدیویی معمولی (۲۵ فریم در ثانیه) با استفاده از یک فیلتر، تمام طول لوله را تصویربرداری می‌کند و از آن برای اندازه‌گیری سرعت انتشار شعله در لوله طی مراحل مختلف استفاده می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر شعله از یک دوربین سرعت بالا با قابلیت ثبت ۸۰۰۰ فریم در ثانیه استفاده می‌شود. البته به علت افت کیفیت تصاویر در سرعت‌های بالا، عمدتاً از سرعت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ فریم در ثانیه استفاده شده است.

### روش انجام آزمایش

برای ایجاد غبار، لحظاتی قبل از رسیدن دمای سیم به دمای التهاب، به وسیله‌ی جک الکترومکانیکی به صورت متناوب تزریق‌های درون لوله انجام می‌شود. تا قبل از ته‌نشینی ذرات در ته لوله، در یک فاصله‌ی زمانی کوتاه می‌توان یک غبار تقریباً همگن درون آن ایجاد کرد. هرچه اندازه‌ی ذرات کوچک‌تر باشد امکان پخش بهتر وجود دارد. هنگام اشتعال، جریان غبار قطع می‌شود و بنابراین شعله‌ی تشکیل شده به سمت پائین لوله منتشر می‌شود.

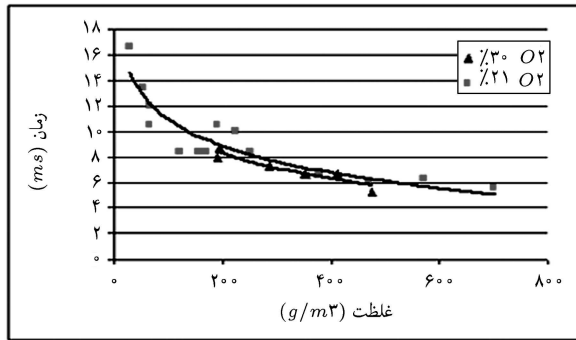
شعله‌ی تشکیل شده به سمت بالا حرکت نمی‌کند زیرا با خروج غبار از لوله به فضای باز اطراف، غلظت غبار به میزان قابل توجهی افت می‌کند. در داخل سیستم مکش و در مجاری آن، شعله خفه‌کن‌هایی با قدرت سردکنندگی بالا تعبیه شده است که امکان احتراق درون مجاری را تقریباً به صفر می‌رساند.

### بررسی تغییرات زمان احتراق ذرات

اولین مطلبی که در این بخش به آن خواهیم پرداخت چگونگی اندازه‌گیری زمان احتراق ذرات است. از مشاهده‌ی فیلم‌های شعله‌ی ثبت شده با دوربین پرسرعت، ملاحظه می‌شود که نمی‌توان زمان احتراق ذرات را طی مشاهده‌ی مستقیم به دست آورد زیرا:

۱. نمی‌توان یک ذره را از ابتدا تا پایان سوختن، درون یک کادر محدود دنبال کرد.

۲. اصولاً نمی‌توان تشخیص داد که آنچه در تصاویر به صورت نقاط



شکل ۶. تغییر زمان احتراق ذرات ۱۸ میکرون بر اثر افزایش اکسیژن.

ذرات ۱۸ میکرون، در مخلوط‌های ۲۱ و ۳۰ درصد اکسیژن در شکل ۶ نشان داده شده است.

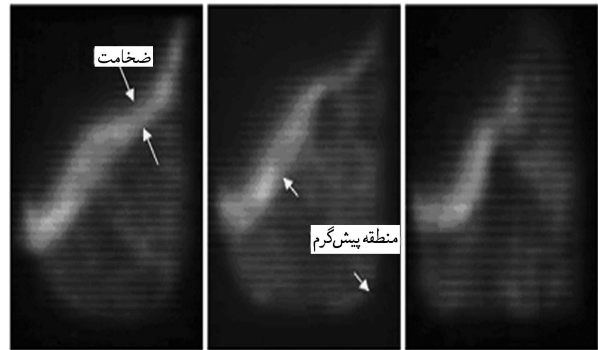
مطلب قابل تأمل این است که در معدود مواردی (حدود ۵٪ موارد) زمان احتراق در مخلوط ۳۰ درصد اکسیژن بیشتر از مخلوط ۲۱ درصد اکسیژن است، که به احتمال قوی ناشی از خطاهای آزمایش و اندازه‌گیری است.

### نتیجه‌گیری

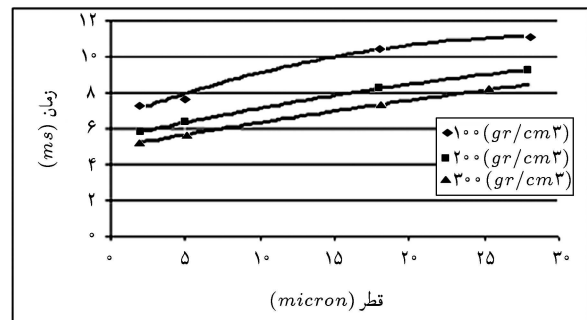
در بحث مدت زمان احتراق ذرات، چنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، این زمان‌ها با دقت خوبی به صورت خطی با قطر ذرات تغییر می‌کند. این امر مبین آن است که ذرات آلومینیوم در محدوده‌ی اندازه‌های آزمایش شده (کوچک‌تر از ۲۸ میکرون) و مخلوط‌های گازی به‌کار رفته، به صورت احتراق جامد - گاز صورت می‌گیرد.

نکته‌ی قابل ذکر دیگر این که با افزایش غلظت، تمایل به خطی شدن این رابطه بیشتر می‌شود؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که غباری بودن (برخلاف احتراق تک‌ذره) تمایل به انجام واکنش در فاز جامد را افزایش می‌دهد. البته در این تحقیق غلظت‌های بالای ۷۰۰ گرم بر متر مکعب انجام نشد، ولی می‌توان گفت که با افزایش غلظت حداقل تا یک مقدار معین، رژیم فاز جامد - گاز تقویت می‌شود. در مورد تغییر زمان احتراق ذرات بر اثر افزایش مقدار اکسیژن، با توجه به داده‌های قبلی محققین تفاوت بیشتری انتظار می‌رفت. اما همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است تغییر زمان احتراق ذرات ۱۸ میکرون نسبت به افزایش اکسیژن ناچیز است. این نکته مؤید غلبه‌ی رژیم احتراقی فاز جامد - گاز بر فاز گاز - گاز است.

استفاده از ذرات بزرگ‌تر (حدود ۵۰ الی ۱۰۰ میکرون) که در احتراق خود تمایل بیشتری به واکنش فاز گاز دارند (نسبت به ذرات کوچک) برای سنجیدن وزن این دو رژیم توصیه می‌شود. اگر چه با بزرگ‌تر شدن ذرات امکان انجام آزمایش‌های غبار ذرات در شرایط جاذبه‌ی طبیعی دشوارتر است.



شکل ۴. سه تصویر از مراحل انتشار شعله (ضخامت شعله و منطقه‌ی پیش‌گرم مشخص شده‌اند).



شکل ۵. تغییرات زمان احتراق ذرات بر حسب قطر.

است و یک نور اشباع هر سه ناحیه را در بر گرفته است. در معدود آزمایش‌هایی، ناحیه‌ی شعله به صورت نوار باریکی بین دو ناحیه‌ی دیگر به خوبی قابل تشخیص است. شکل ۴ تصویر واضحی از یک شعله‌ی در حال انتشار و ضخامت آن را نشان می‌دهد.

در آزمایش‌های انجام شده با قطرها و غلظت‌های مختلف، این ضخامت در حدود ۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. برای به دست آوردن زمان احتراق تمام ذرات، در غلظت‌های مختلف، از این عدد استفاده شده است. این کار دقیق نیست ولی به علت سازوکار انتشاری شعله که هدایت است این ضخامت در حالات مختلف تفاوت چندانی ندارد. هر چند با بیشتر شدن غلظت غبار و یا کاهش قطر ذرات از ضخامت شعله کاسته می‌شود. نمودار تغییرات زمان سوختن ذرات بر حسب قطر برای ذرات ۲۸μ، ۱۸μ، ۵μ، ۲μ در مخلوط گازی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) برای سه غلظت در شکل ۵ نشان داده شده است.

### بررسی تغییرات زمان احتراق با مقدار اکسیدایزر

برای بررسی تأثیر تغییر میزان اکسیژن بر زمان احتراق ذرات از مخلوط‌های گازی (۲۱٪ اکسیژن، ۷۹٪ نیتروژن) و (۳۰٪ اکسیژن، ۷۰٪ نیتروژن) استفاده شد. نمودارهای تغییرات زمان احتراق بر حسب غلظت برای

منابع

1. Dreizin, E. L., "Phase changes in metal combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, **26**, pp. 57-78 (2000).
2. Law, C.K. and Williams, F.A. "A simplified theoretical model for the vapor-phase combustion of metal particles", *Combustion and Flame*, **22**, pp. 383-405 (1974).
3. Macek, A., "fundamentals of combustion of single aluminum and beryllium particles", Eleventh Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 203-17 (1967).
4. Brooks, K.P. and Beckstead, M.W., "dynamics of aluminum combustion", *Propulsion & Power*, **11**, pp. 769-780 (1995).
5. Dreizin, E.L., "On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion", *Combustion and Flame*, **117**, pp. 841-850 (2001).
6. Shoshin, Y. and Dreizin, E.L., "Particle combustion rates in premixed flames of polydisperse metal- air aerosols", *Combustion and Flame*, **133**, pp. 275-287 (2003).
7. Dreizin, E.L, Shoshin, Y, Nudryy, R, and Hoffmann V.K., "Constant pressure flames of aluminum and aluminum - magnesium mechanical alloy aerosols in microgravity", *Combustion and Flame*, **130**, pp. 381-385 (2002).
8. Gorshin, S, Bidabad, M. and Lee, J.H.S., "Quenching distance in aluminum dust clouds", *Combustion and Flame*, **105**, pp. 147-160 (1996).