نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، جلد ۱۹، پاییز ۱۳۸۷، صفحه ۸۹-۸۵
ویژه‌نامه مهندسی مکانیک

بررسی تاثیر نوع اکسیدایزر بر سرعت انتشار شعله و سرعت سوزش ابر ذرات آلومینیم

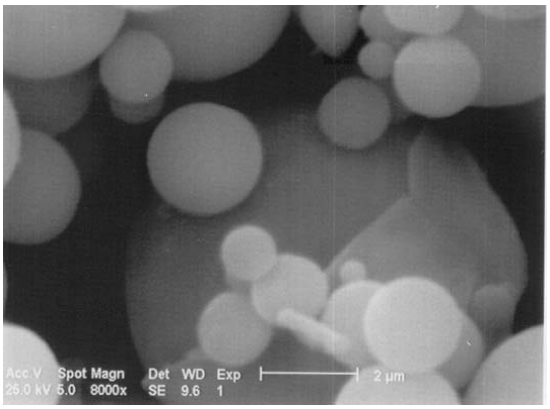
مهدی بیدآبادی، محمد صدیقی و مریم سیدی

چکیده: در این مقاله نتایج حاصل از یک مطالعه تجربی در رابطه با سرعت سوزش ابر ذرات آلومینیم در مخلوط گازی اکسیژن/ نیتروژن ارایه می‌گردد. این تحقیق به بررسی تاثیر میزان اکسیدایزر موجود در مخلوط اکسیژن/ نیتروژن بر سرعت انتشار شعله و سرعت سوزش ابر ذرات آلومینیم به قطر ۱۸ میکرون می‌پردازد. برای انجام آزمایشات از دستگاه موجود در آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزایش درصد اکسیژن در مخلوط اکسیژن/ نیتروژن از ۲۱ درصد به ۲۵ درصد، سرعت سوزش ذرات آلومینیم افزایش می‌یابد اما با افزایش غلظت ذرات، از روند افزایش سرعت کاسته می‌شود. همچنین افزایش درصد اکسیژن در مخلوط اکسیژن/ نیتروژن از ۲۱ درصد به ۲۵ درصد، حد رقیق اشتعال‌پذیری را از ۹۵ گرم بر مترمکعب در ۲۱ درصد اکسیژن به ۹۴ گرم بر مترمکعب در ۲۵ درصد اکسیژن کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سرعت سوزش، سرعت انتشار شعله، تاثیر اکسیدایزر، تاثیر قطر ذرات.

۱. مقدمه

فلزات بدلیل برخورداری از ارزش حرارتی بسیار بالا، سوخت بسیار مناسبی جهت استفاده در ترکیب سوختهای جامد پیشرانه می‌باشند. استفاده از فلز آلومینیوم باعث تاثیرگذاری زیاد روی ضربه مخصوص و دیگر مشخصه‌های سوزش سوختهای جامد می‌باشد[۱-۳]. برای طراحی دقیق و پیش بینی عملکرد یک راکت سوخت جامد حاوی ذرات آلومینیوم، رفتار احتراقی ذرات آلومینیوم در جریان سوخت باید بصورت دقیق تشریح شود. افزودن پودر ذرات سبک مانند آلومینیوم به ترکیب سوختهای جامد فواید زیادی دارد، از جمله آنکه مکانیزم احتراق ذرات فلز، انرژی زیادی به جریان سوخت داده و دمای بالای شعله حاصل از سوختن ذرات فلز می‌تواند انرژی زیادی در طی احتراق ایجاد نماید[۴- ۵]. سیستم‌های حاوی ذرات آلومینیوم به اندازه قطر ذرات و همچنین کنترل میزان تجمع ذرات ریز فلز حساسیت زیادی داشته و این دو عامل جزو فاکتورهای اصلی در طراحی سیستم‌های پیشرانه می‌باشند[۶]. برای شناخت پدیده احتراق ابر ذرات و شناخت مکانیزم این احتراق، نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی شعله می‌باشد. آزمایشاتی در مورد احتراق ابر ذرات آلومینیم در هوای استاندارد آزمایشگاهی (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) انجام شده است. برای شناخت دقیق مکانیزم احتراق ابر ذرات آلومینیم، علاقمندی به انجام آزمایشات در رنج وسیعی از اکسیدایزرها و در محیطهای متفاوت وجود دارد [۷- ۸]. بدین منظور در این تحقیق، تاثیر درصد اکسیدایزر بر پارامتر دینامیکی سرعت انتشار شعله و سرعت سوزش ابر ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون بررسی شده است. شکل ۱ تصویر ذرات مورد استفاده در آزمایشات را با بزرگنمایی ۸۰۰۰ برابر نشان می‌دهد.



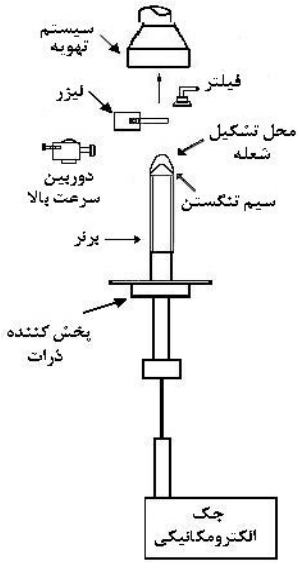
شکل ۱. تصویر ذرات آلومینیم با بزرگنمایی ۸۰۰۰ برابر

این مقاله در تاریخ ۸۵/۱۰/۱۰ دریافت و در تاریخ ۸۷/۲/۷ به تصویب نهایی رسیده است.

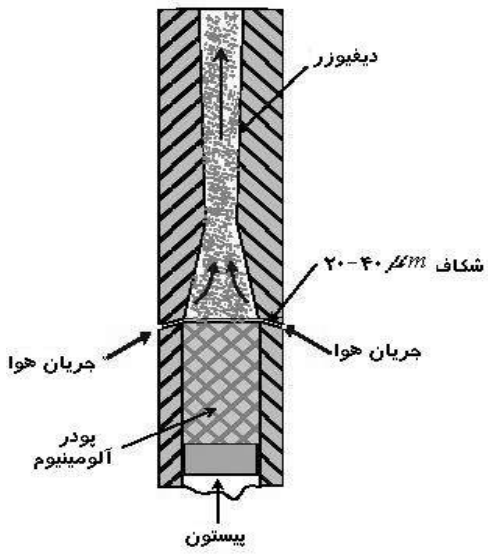
دکتر مهدی بیدآبادی، استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
bidabadi@iust.ac.ir
دکتر محمد صدیقی، استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی.
m_sedighi@iust.ac.ir
مریم سیدی، کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۲. لوازم وتجهیزات تجربی

دستگاه مورد استفاده در این آزمایشات در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است که توانایی ایجاد شعله در ابر ذرات آلومینیم را دارا می‌باشد. آزمایشات در فشار محیط انجام می‌شود. ذرات آلومینیم موجود در پیستون دستگاه، با بالا آمدن پیستون و ایجاد جریان اکسیدایزر و گاز بستر، در لوله شیشه‌ای پراکنده می‌شوند. پس از ایجاد جرقه و تشکیل شعله در بالای لوله، جریان اکسیدایزر و گاز بستر قطع می‌شود و بنابراین شعله در لوله به سمت پایین حرکت می‌کند. برای ایجاد جرقه از سیم تنگستن ملتهب با قطر۱/۵ میلیمتر استفاده شده است. به وسیله تصویربرداری از شعله و بازبینی تصاویر اخذ شده به صورت تک فریم، سرعت انتشار شعله اندازه‌گیری می‌شود[۱۴].



شکل ۲. دستگاه انتشار ذرات آلومینیوم



شکل ۳. سیستم پخش کننده دستگاه انتشار ذرات

۳. نتایج

در این تحقیق، سرعت انتشار و سرعت سوزش ابر ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون در محیطهای (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و (۲۵٪ اکسیژن و ۷۵٪ نیتروژن) اندازه‌گیری شده است

سرعت انتشار شعله عبارت است از سرعتی که شعله با آن سرعت، فاصله بین دو نقطه را طی کرده و یا به عبارتی دیگر مسافت طی شده توسط شعله در واحد زمان است. اما سرعت سوزش یعنی سرعتی که مخلوط نسوخته به مخلوط سوخته تبدیل می‌گردد[۹]. در صورتی که بتوان از نیروی گرانش زمین صرف نظر کرد و یا آزمایشات در یک محیط جاذبه صفر صورت پذیرد، در آن صورت سرعت سوزش شعله با سرعت پیشروی آن برابر خواهد بود[۱۰]. اما در صورت وجود گرانش زمین این دو پارامتر با یکدیگر متفاوت بوده و می‌بایست سرعت سوزش را از رابطه زیر محاسبه نمود:

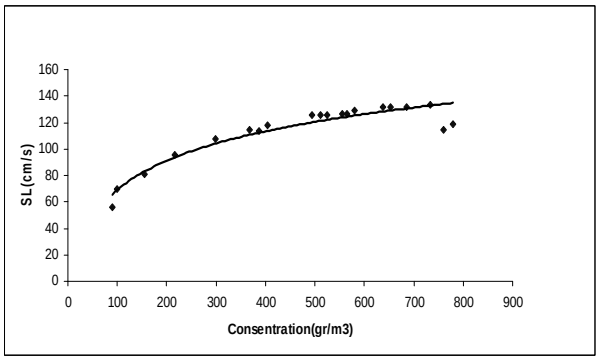
$$S_b = \frac{S_L}{\frac{A_f}{A_c}} \qquad (۱)$$

که در آن S_b سرعت سوزش، S_L سرعت انتشار، A_c مساحت سطح مقطع لوله و A_f مساحت سطح (پیشانی) شعله می‌باشد.

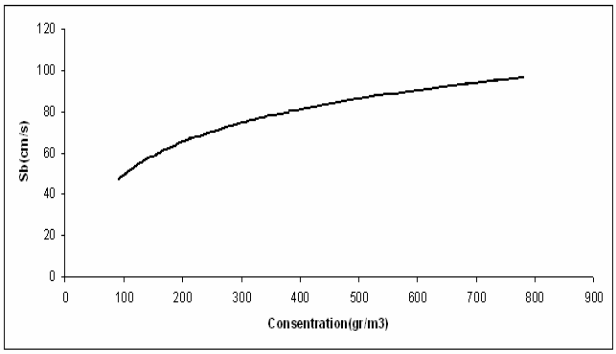
در این تحقیق با استفاده از نسبت سطح شعله به سطح لوله که برابر عدد ۱/۴۲ بوده[۱۵] و با استفاده از رابطه ۱ سرعت سوزش ذرات به دست آمده است.

با انجام آزمایشات متعدد (صد و ده مرحله آزمایش) و بازبینی تصاویر، آزمایشات موفق استخراج و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آزمایش موفق شامل تشکیل شعله و حرکت آن در ناحیه آرام لوله با سرعت معقول می‌باشد. عوامل بسیاری در انجام آزمایشات موفق تاثیر دارند. تشکیل شعله و پایداری آن وابستگی زیادی به سیستم جرقه دارد. محل قرارگیری سیم جرقه نسبت به لوله و همینطور شکل سیم جرقه از عوامل مهم و تاثیرگذار هستند. آزمایشات برای غلظت ابر ذرات حدود ۸۰ تا ۸۰۰ گرم بر مترمکعب انجام شده است. به علت وجود مشکلات پراکنش ذرات در غلظت‌های بالا در اثر پدیده انباشتگی و به‌هم‌چسبندگی ذرات، خطای آزمایشات در غلظت حدود ۸۰۰ گرم بر مترمکعب بیشتر است و انجام آزمایش موفق در این غلظت‌ها دارای مشکلات خاص است.

شکل ۴ سرعت انتشار شعله بر حسب غلظت ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون را در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) نشان می‌دهد. حد رقیق اشتعال‌پذیری حدود ۹۵ گرم بر مترمکعب به دست آمده است و حد غنی اشتعال‌پذیری قابل تشخیص نمی‌باشد. همچنین شکل۵ نمودار سرعت سوزش ابر ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) را بر حسب غلظت ذرات نشان می‌دهد.

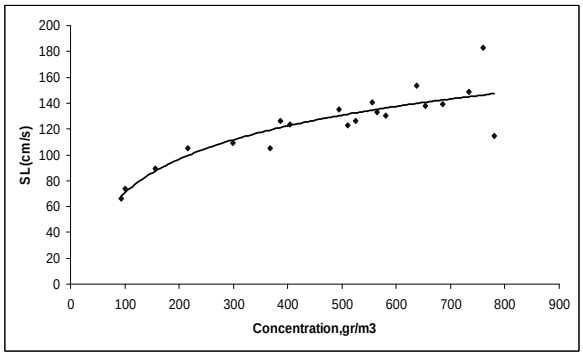


شکل ۴. نمودار نتایج تجربی سرعت انتشار شعله ذرات ۱۸ میکرون درمحیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن)

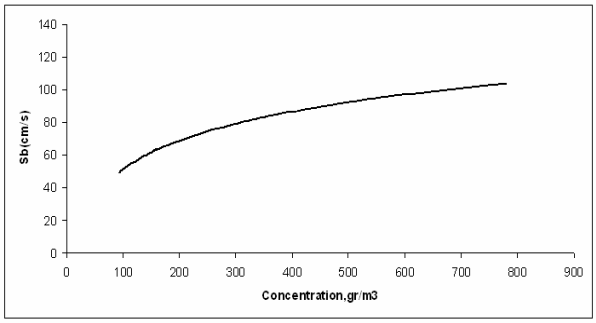


شکل ۵. نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش ذرات ۱۸ میکرون در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن)

نمودار سرعت انتشار شعله بر حسب غلظت ذرات در محیط (۲۵٪ اکسیژن و ۷۵٪ نیتروژن) برای ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون در شکل ۶ رسم شده است. در این آزمایشات حد رقیق اشتعال‌پذیری حدود ۹۴ گرم بر مترمکعب به دست آمده و مشابه با نمودار شکل ۳ حد غنی اشتعال‌پذیری قابل تشخیص نمی‌باشد. شکل ۷ نیز نمودار سرعت سوزش ابر ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) را بر حسب غلظت ذرات نشان می‌دهد.



شکل ۶. تصویری از ردیابی ذره در زمان‌های متوالی، ذرات آلومینیوم ۲μm در مخلوط گازی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن

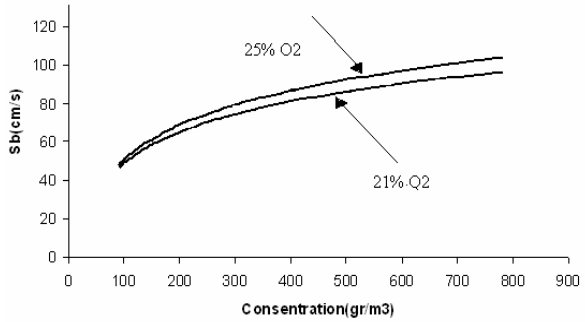


شکل ۷. نمودار نتایج تجربی سرعت سوزش ذرات ۱۸ میکرون در محیط (۲۵٪ اکسیژن و ۷۵٪ نیتروژن)

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نمودارهای شکل ۵ و ۷ نمایانگر میزان وابستگی سرعت سوزش به غلظت ذرات می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت در ناحیه رقیق، سرعت سوزش افزایش می‌یابد. این مورد به علت افزایش نرخ نفوذ اکسیژن به داخل ناحیه احتراق ذرات می‌باشد که در نتیجه آن، اکسیژن کافی جهت احتراق در اختیار ذرات قرار می‌گیرد. اما با توجه به روند رو به افول افزایش سرعت در غلظت‌های بالا می‌توان پیش‌بینی نمود که در مخلوط‌های غنی، سرعت سوزش وابستگی کمتری به غلظت ذرات دارد. در واقع چون در غلظت‌های بالا نسبت ذرات به اکسیدایزر به شدت افزایش می‌یابد، لذا اکسیژن کافی در اختیار ذرات جهت احتراق کامل قرار نمی‌گیرد و در نتیجه با افزایش غلظت، سرعت سوزش ذرات رشد قبلی را نخواهد داشت.

.

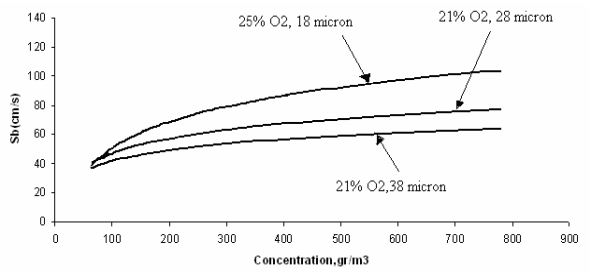


شکل ۸. مقایسه سرعت سوزش ذرات ۱۸ میکرون در محیطهای (۲۱٪اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) و (۲۵٪ اکیژن و ۷۵٪ نیتروژن)

برای بررسی تاثیر افزایش اکسیژن در محیط بر سرعت سوزش ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون و همچنین مقایسه نتایج، نمودار شکل ۸ رسم شده است. در این نمودار، سرعت سوزش ذرات ۱۸ میکرون در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) آزمایشات همراه با سرعت سوزش ذرات ۱۸ میکرون در محیط (۲۵٪ اکسیژن و ۷۵٪ نیتروژن) آمده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش میزان اکسیژن از ۲۱٪ به ۲۵٪، بر سرعت سوزش ذرات افزوده می‌گردد.

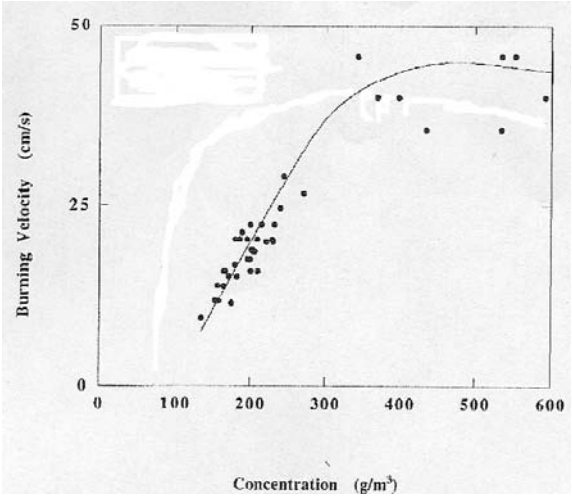
شیب نمودار در غلظت‌های بالا کمی شدیدتر است که نشان‌دهنده تاثیر بیشتر افزایش اکسیدایزر بر سرعت سوزش در غلظت‌های بالاست. شاید بتوان گفت که در غلظت‌های پایین ذرات، به دلیل متعادل بودن نسبت ذرات به اکسیژن، نیاز شدیدی به اکسیژن احساس نمی‌شود. اما در غلظت‌های بالا، به دلیل زیاد بودن نسبت غلظت ذرات به میزان اکسیژن، کمبود اکسیژن احساس می‌شود و بنابراین با افزودن اکسیژن، سرعت سوزش با شدت بیشتری افزایش می‌یابد. حد رقیق اشتعال‌پذیری در احتراق ابر ذرات آلومینیم ۱۸ میکرون در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) حدود ۹۵ گرم بر مترمکعب و در آزمایشات احتراق همان ذرات در محیط (۲۵٪ اکسیژن و ۷۵٪ نیتروژن) حدود ۹۴ گرم بر متر مکعب به دست آمده است. بنابراین با افزایش درصد اکسیژن از ۲۱٪ به ۲۵٪ در محیط اکسیژن/ نیتروژن، حد رقیق اشتعال‌پذیری اندکی کاهش می‌یابد. در آزمایشات احتراق ابر ذرات آلومینیم که تا غلظت حدود ۸۰۰ گرم بر مترمکعب انجام شده، حد غنی اشتعال‌پذیری مشاهده نشده است. علت این پدیده، ناشی از مکانیزم احتراق ذرات جامد می‌باشد که به صورت سطحی است و تمامی ذرات در احتراق شرکت نمی‌کنند و بنابراین در پایان احتراق ذرات نسوخته در خاکستر باقی مانده، وجود دارند [۱۱و ۱۲]. در شکل ۹ نتایج آزمایشات مرجع [۱۶] بر روی ذرات آلومینیم به قطر ۲۸و ۳۸ میکرون در هوا (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ اکسیژن) به همراه نتایج این تحقیق آمده است.



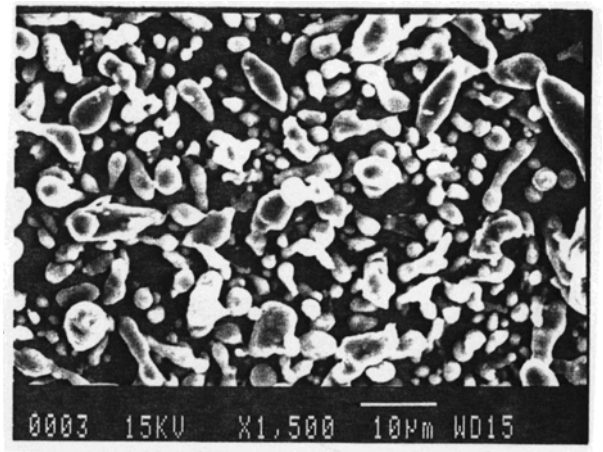
شکل ۹. مقایسه سرعت سوزش ذرات ۱۸ میکرون در محیط (۲۵٪ اکسیژن و ۷۵٪ نیتروژن) با سرعت سوزش ذرات ۲۸ و ۳۸ میکرون در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن)

در یک غلظت معین، با کاهش قطر ذره، سرعت سوزش افزایش می‌یابد. این نکته را می‌توان به پراکنش یکنواخت‌تر ذرات ریزتر و همچنین کاهش سطح خارجی ذره نسبت داد. بدین معنی که کاهش سطح خارجی ذره باعث افزایش نرخ نفوذ اکسیدایزر به سطح ذره و در نتیجه افزایش سرعت سوزش ذره می‌گردد. همانطور که ملاحظه می‌شود با کاهش قطر ذره از ۲۸ میکرون و ۳۸ میکرون به ۱۸ میکرون و همینطور افزایش اکسیدایزر از ۲۱٪ اکسیژن به ۲۵٪ اکسیژن، سرعت سوزش ذرات افزایش می‌یابد.

نمودار شکل ۱۰ سرعت سوزش بر حسب غلظت ذرات در احتراق ابر ذرات آلومینیم به قطر ۵/۴ میکرون در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن) [۱۳] را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که سرعت سوزش در این آزمایشات پایین‌تر از سرعت سوزش بدست آمده از آزمایشات این تحقیق است که این پدیده به علت شکل ذرات استفاده شده در این آزمایشات است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. انحراف از شکل کروی این ذرات، علت اختلاف نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۱۰. سرعت سوزش ذرات ۵/۴ میکرون غیر کروی در محیط (۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن)



شکل ۱۱. تصویر ذرات ۵/۴ میکرونی مورد استفاده درآزمایشات مرجع [۱۳]

مراجع

[1] Eapen, B. Z., Hoffmann, V.K., Schoenitz, M., Dreizin, E., *"Combustion of Aerosolized Spherical Aluminum Powders and Flakes in Air"*, Combustion Science and Technology, Vol.176, No.7, 2004, PP. 1055-1069.

[2] Shoshin, Y., Dreizin, E.,*"Particle Combustion Rates in Premixed Flames of Polydisperse Metal–Air Aerosols"*, Combustion and Flame, Vol.133, 2003, PP. 275-287.

[3] Rossi, S., Dreizin, E.L., Law, C.K, *"Combustion of Aluminum Particles in Carbon Dioxide"*, Combustion Science and Technology, Vol. 164, 2001, PP. 209 – 237.

[4] Pokhil, P.F., Belyayev, A.F., Frolov, Y.V., *"Combustion of Powdered Metal in Active Media"*, Rept. FTD-MT-24-551-73, Foreign Technology Div., Write-Patterson AFB. H.,1972.

[5] Price, E.W., *"Combustion of Metalized Propellants"*, Fundamentals of Solid-Propellant Combustion, Progress in Aeronautics and Astro-nautics, Vol.90. AIAA, New York, 1984, PP. 479-513.

[6] Gany, A., Caveny, L.H., *"Agglomeration and Ignition Mechanism of Aluminum Particles in Solid Propellants"*, 17th symposium on combustion, Combustion Inst., Pittsburgh, 1978, PP.1453-1461.

[7] Dreizin, E.L., *"Effect of Phase Changes on Metal-Particle Combustion Processes"*, Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol.39, No.6, 2003, PP. 681-693.

[8] Dreizin, E.L., *"Phase Changes in Metal Combustion"*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.26, 2000, PP. 57-78.

[9] Kuan, K., Kuo, Y., *"Principles of Combustion"*, John Wiley & sons, 1986.

[10] Dreizin, E.L., *"Experimental Study of Stages in Aluminum Particle Combustion in Air"*, Combustion and Flame, Vol.105, 1996, PP. 541-556.

[11] Dreizin, E.L., *"On the Mechanism of Asymmetric Aluminum Particle Combustion"*, Combustion and Flame, Vol.117, 1999, PP. 841-850.

[12] Dreizin, E.L., Trunov, M.A., *"Brief Communication Surface Phenomena in Aluminum Combustion"*, Combustion and Flame, Vol.101, 1995, PP. 100-114.

[13] Goroshin, S., Bidabadi, M., Lee, J.H.S., *"Quenching Distance of Laminar Flame in Aluminum Dust Clouds"*, Combust Flame, Vol. 105, 1996, PP.147–160.

[۱۴] سیدی، م.، *«بررسی اثر نوع اکسیدایزر بر سرعت انتشار شعله دو فازی جامد گاز»*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.

[۱۵] صدیقی، م.، *«تحلیل تجربی مکانیزم انتشار شعله ذرات ریز جامد»*، پایان‌نامه دکتری تخصصی، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.

[۱۶] مرآتی، ر.، «تاثیر قطر ذرات بر سرعت سوزش ذرات ریز جامد»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۹.