

آغازش شیمیایی انفجار در مخلوط استیلن-اکسیژن با استفاده از آغازگر کلر

ایرج احمدزاده^۱، عبدالرضا خداوردی^۲، رضا کسایی^۳

اتوبان بسیج - سه راه تختی - سازمان تحقیقات و خودکفایی نرسا - گروه شهید چمران
rezakmail@yahoo.com

چکیده

یکی از جدیدترین شیوه های آغازش انفجار، روش آغازش شیمیایی (Chemical Initiation) می باشد که در آن از کاتالیست های شیمیایی برای شروع انفجار مخلوط های سوخت-اکسیدکننده استفاده می شود. استفاده از این روش در سلاح های FAE موجب بهینه سازی این سلاح ها و ظهور سلاح های FAE تک مرحله ای شده است. در تحقیق حاضر با انتخاب سوخت استیلن و آغازگر شیمیایی کلر، روش آغازش شیمیایی انفجار در مخلوط استیلن-اکسیژن توسط آغازگر کلر با موفقیت انجام شده است.

واژه های کلیدی: آغازش شیمیایی- انفجارات گازی- سوخت استیلن- آغازگر کلر- اندازه گیری فشار و سرعت انفجار.

۱- مقدمه

به دنبال توسعه صنایع پالایش، پتروشیمی و دانه داری در کشورهای مختلف، حوادث ناگوار ناشی از انفجارات هوا- سوخت (Fuel-Air Explosions) در کارخانجات و صنایع موجب خسارت فراوان مالی و جانی می گردید [۱]. با مطالعه این حوادث مشخص شد که پتانسیل تخریب بسیار بالایی در این گونه انفجارات وجود دارد و لذا مطالعه و شناخت پدیده انفجارات هوا- سوخت با دو هدف عمده دنبال گردید: (۱) پیشگیری از حوادث ناگهانی که در صنعت رخ می دهد و موجب خسارات فراوان می گردد (۲) بکارگیری پتانسیل بالای این انفجارات در مهمات نظامی و توسعه سلاح های هوا- سوخت (FAE). از دهه ۶۰ میلادی روش های گوناگون آغازش انفجار از جمله آغازش خودبه خودی (Self Initiation) و آغازش مستقیم (Direct Initiation) مطالعه گردید که نتایج آن در ساخت نمونه های دومرحله ای FAE بکار رفت. این سیستم ها نیاز به یک منبع انرژی قوی داشتند که بکارگیری آن موجب پایین آمدن ضریب اطمینان سلاح می گردید [۲]. در ادامه با هدف حذف منبع احتراق خارجی و دستیابی به روش اشتعال خودبه خودی (Autoignition) در احتراق ابرهای هوا- سوخت، دو روش آغازش فتوشیمیایی (Photochemical Initiation) و آغازش شیمیایی (Chemical Initiation) مطالعه و بررسی شد [۳،۴] که در نهایت روشی جدید و عملیاتی با نام آغازش شیمیایی انفجار در مخلوط های سوخت- هوا شناخته شد و موجب ظهور نسل جدیدی از سلاح های هوا- سوخت گردید. در تحقیقات انجام شده، روش های مختلف آغازش شیمیایی انفجار نظیر استفاده از جت فلوئور به درون سوخت گازی و جت اکسیژن به درون سوخت و آغازگر استفاده شده است [۵]. در این تحقیق نیز روش آغازش شیمیایی انفجار در مخلوط گازی استیلن- اکسیژن با استفاده از جت سرعت بالای آغازگر کلر بررسی شده است.

۱- کارشناس ارشد شیمی

۲- کارشناس مکانیک

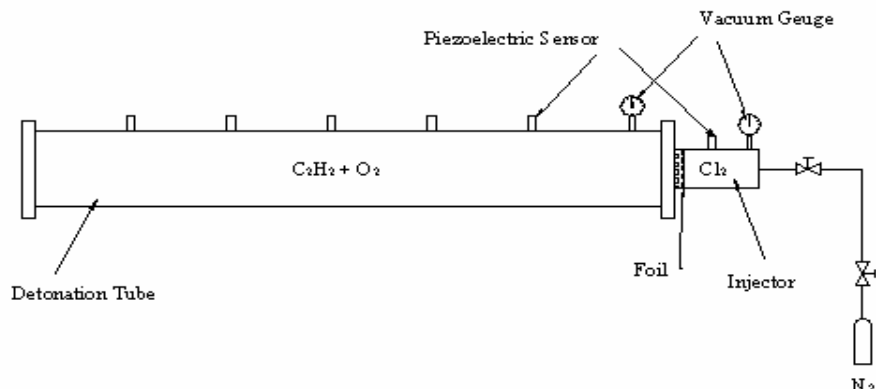
۳- کارشناس پتروشیمی

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام تست‌های آغازش شیمیایی انفجار، از یک لوله انفجار به طول ۲/۵ متر و قطر داخلی ۸۸ mm استفاده شد. طراحی این لوله با توجه به قطر بحرانی سوخت‌های هیدروکربنی حساس و دیگر پارامترهای مورد نیاز برای ایجاد انفجار در این گازها انجام گرفت. سیستم پاشش آغازگر می‌بایست در زمان بسیار کوتاهی (در حد چند میلی ثانیه) حجمی در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ سی سی آغازگر را با آشفتگی مناسب به درون لوله انفجار جت نماید، لذا از نوعی سیستم پاشش با نیروی محرکه کپسول فشار بالا استفاده شد. در این سیستم پاشش از یک فویل آلومینیمی با ضخامت ۳۰ میکرون و چند نوع صفحه مشبک استفاده گردید. با انجام چندین تست تجربی مشخص شد که صفحه مشبکی که دارای ۹ سوراخ متقارن با قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشد، بیشترین سرعت جت گاز را تولید می‌کند و لذا برای انجام تست‌ها مناسب می‌باشد. به منظور ثبت پارامترهای گوناگون پدیده انفجار از جمله فشار و سرعت در تست‌های انجام‌شده، از سنسورهای پیزوالکتریک مدل 603B ساخت شرکت Kistler سوئیس و سنسور AVL مدل 4QP استفاده شد. رنج اندازه‌گیری مجاز فشار در این سنسورها از صفر تا ۱۰۰ بار و خطای اندازه‌گیری نیز حدود یک درصد می‌باشد. همچنین برای مهار انواع مواد شیمیایی قابل اشتعال، اکسیدکننده و خورنده مورد استفاده در این تست‌ها از تجهیزات ایمنی نظیر ماسک شیمیایی، رگلاتور و لوله رابط نقره‌ای و سیستم تهویه مناسب استفاده گردید.

۳- انجام تست

برای انجام آزمایشات، لوله انفجار و سیستم پاشش توسط یک رابط به هم متصل شدند که در این حالت مخازن لوله انفجار و سیستم پاشش توسط فویل آلومینیمی از هم جدا بودند. پس از تخلیه هوای موجود در لوله با استفاده از یک پمپ، این مخزن با نسبت استیلن به اکسیژن مورد نظر شارژ شده و سپس سیستم پاشش آغازگر، تخلیه و با گاز کلر پر می‌شد. در مرحله بعد گاز کلر توسط فشار سیلندر فشار بالا، به درون لوله انفجار جت می‌شد و پارامترهای انفجار به کمک سیستم‌های ثبت نتایج ثبت می‌گردید. شکل ۱ طرح کلی تجهیزات تست را نشان می‌دهد. برای نشان دادن نسبت استیلن به اکسیژن از فاکتور Φ استفاده شد که این ثابت از تقسیم نسبت مولی استیلن به اکسیژن تجربی به میزان استوکیومتری آن بدست می‌آید [۶، ۷]. همچنین دما و فشار محیط تست به صورت متوسط ۲۵ درجه سانتیگراد و ۰/۸۴ اتمسفر بوده است. در این تست‌ها از مقادیر Φ برابر ۰/۵، ۱، ۲، ۲/۵ و ۲/۸ استفاده شد. همچنین از چهار سنسور پیزوالکتریک برای ثبت نتایج تست‌ها استفاده گردید که چیدمان آن بدین صورت بود: سنسور شماره ۱ بر روی سیستم پاشش و سنسور شماره ۲ در فاصله ۳۸ سانتیمتری از ابتدای لوله انفجار نصب شد. همچنین سنسور شماره ۳ در فاصله ۲۵ سانتیمتری از سنسور دوم و سنسور شماره ۴ در فاصله ۱۵۰ سانتیمتری از ابتدای سنسور اول نصب گردید. در تمامی تست‌های انجام شده طی جت کلر به درون مخلوط استیلن-اکسیژن پدیده اشتعال یا انفجار مطابق جدول ۱ ایجاد شد.



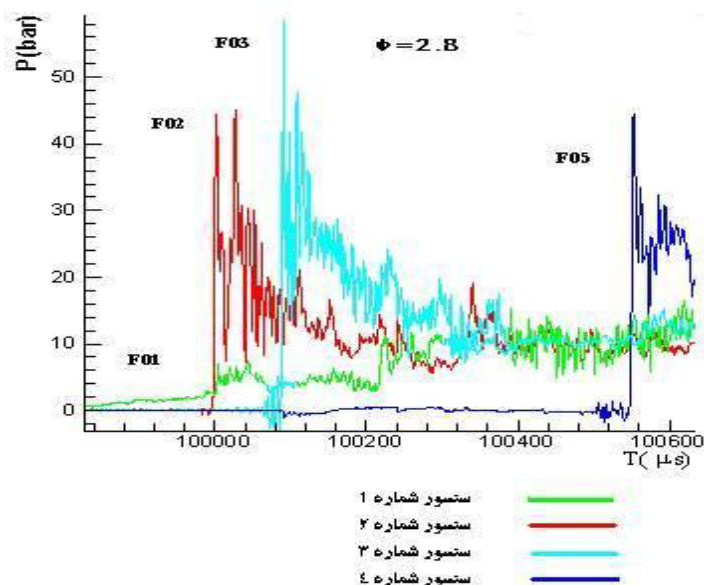
شکل ۱- شمای کلی تست‌های آغازش شیمیایی انفجار

جدول ۱- نتایج تست های انجام شده

کد تست	Φ سوخت	حجم آغازگر (CC)	فشار انفجار سنسور ۱ (Bar)	فشار انفجار سنسور ۲ (Bar)	فشار انفجار سنسور ۳ (Bar)	فشار انفجار سنسور ۴ (Bar)	سرعت انفجار سنسور ۲-۳ (m/s)	سرعت انفجار سنسور ۴-۳ (m/s)	نوع پدیده
۱۰۱	۰/۵	۱۵۰	۹/۶	۹/۲	۱۰/۴	۴۴/۴	-	-	اشتعال
۱۰۲	۰/۵	۱۵۰	۵/۷	۷/۷	۱۵/۹	۳۵/۷	-	-	اشتعال
۱۰۳	۱	۱۵۰	۶/۲	۴۳	۳۲	۲۳	۲۴۰۴	۲۳۵۸	انفجار
۱۰۴	۱	۱۵۰	۱۰	۴۴	۳۵/۵	۳۲/۶	۲۵۵۱	۲۳۶۷	انفجار
۱۰۵	۲	۱۵۰	۲۶	۵۰	۳۹	-	۲۷۴۷	۲۶۲۶	انفجار
۱۰۶	۲	۱۵۰	۱۱/۸	۴۸/۶	۴۴/۳	۳۵/۱	۲۸۰۹	۲۶۷۸	انفجار
۱۰۷	۲/۵	۱۵۰	۶/۹	۳۶/۵	۴۳/۷	۴۰/۹	۲۹۷۶	۲۸۴۷	انفجار
۱۰۸	۲/۵	۱۵۰	۴/۶	۴۶	۳۴	۴۴/۹	۲۸۴۱	۲۸۳۴	انفجار
۱۰۹	۲/۸	۱۵۰	۲/۹	۴۴	۵۸	۴۴	۲۷۴۷	۲۷۱۷	انفجار
۱۱۰	۲/۸	۱۵۰	۱/۵	۵۷	۶۱	۴۲	۲۸۰۹	۲۶۹۴	انفجار

سرعت انفجار بر اساس نسبت فاصله بین سنسورها به زمان رسیدن موج از سنسور اول به سنسور دوم محاسبه می شود . در روش آغازش شیمیایی انفجار ، تنها مواد فعالی نظیر هالوژن ها (فلوئور و کلر) و پلی هالوژن ها (BrF_3 ، ClF_3) می توانند با جت شدن به درون مخلوط سوخت- اکسیدکننده موجب احتراق شوند . این ترکیبات با تولید رادیکال های آزاد و ایجاد واکنش های شیمیایی گرمازا (واکنش های زنجیره ای سریع و گرمازا) ، بدون نیاز به منبع تولید موج ، جرقه و یا حرارت ، باعث ایجاد احتراق در مخلوط سوخت - اکسیدکننده می شوند.

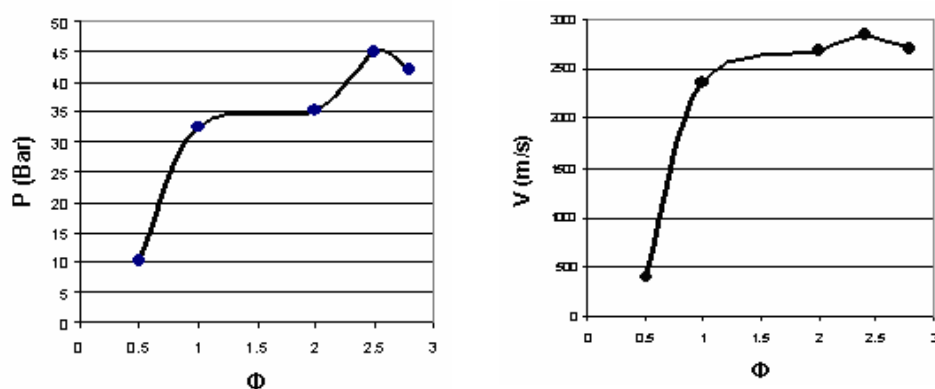
نتایج تست ها نشان می دهد که آغازگر کلر توانایی آغاز احتراق را در مخلوط های سوخت-اکسیژن دارد و روش آغاز شیمیایی انفجار توسط گاز کلر با موفقیت در لوله انفجار (آزمایشگاه) انجام می شود. البته نتایج حاصل از این تست ها قدری متفاوت بوده و حتی در تست های تکراری نیز نتایج قدری با هم تفاوت دارند. شکل ۲ یک نمونه از گراف های ثبت شده در این تست ها را نشان می دهد.



شکل ۲- یک نمونه از گراف های ثبت شده (تست های آغازش شیمیایی انفجار)

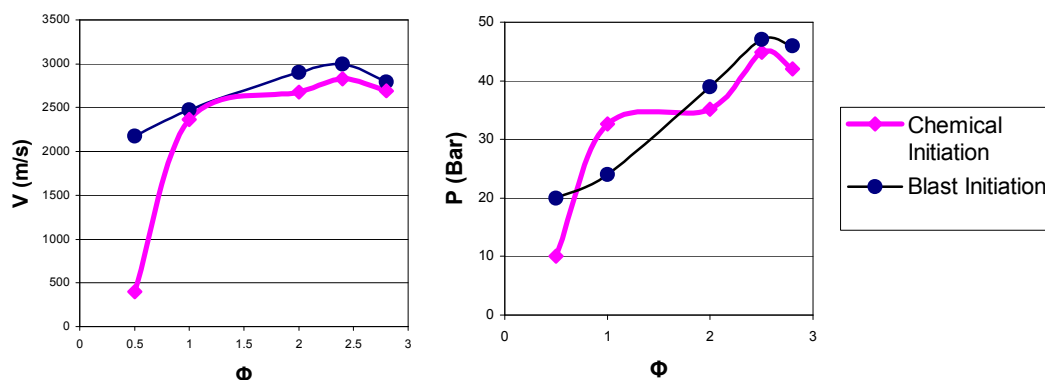
طی تحلیل نتایج تست ها و مقایسه مقادیر تجربی با داده های تئوری موجود در این زمینه می توان گفت که در تست انجام شده با $\Phi = 0.5$ ، پدیده آغازش مستقیم انفجار (Direct Initiation) رخ نداد بلکه همچون مکانیسم انتقال از اشتعال به انفجار (DDT)، در ابتدا یک شعله سریع با فشاری نسبتاً کم به وجود آمد که با حرکت این شعله، در انتهای لوله (در مجاورت سنسور چهارم) این فشار افزایش یافت و به فشار انفجار نزدیک شد. از آنجا که در تمامی تست ها از حجم نسبتاً یکسانی از آغازگر کلر استفاده شده است می توان نتیجه گرفت این مخلوط سوخت-اکسیژن رقیق توانایی ایجاد انفجار از روش آغازش مستقیم را نداشته و پدیده ای شبیه روش آغازش خودبخودی در لوله رخ داده است .

همچنین در دیگر تست های انجام شده با نسبت های Φ برابر ۱ ، ۲ ، ۲/۵ و ۲/۸ ، اولین سنسور نصب شده بر روی لوله انفجار یک افزایش فشار ناگهانی را نشان می دهد که دلیل بر وقوع پدیده آغازش مستقیم انفجار (Direct Initiation) از روش آغازش شیمیایی (Chemical Initiation) می باشد. مقادیر فشار بدست آمده در این تست ها متنوع بوده و بیشترین فشار و سرعت انفجار در $\Phi = 2/5$ بدست آمد . شکل ۳ نمودارهای $P-\Phi$ و $V-\Phi$ را نشان می دهد.



شکل ۳ - نمودارهای رابطه سرعت و فشار انفجار با مقدار Φ

پیش از انجام تست های آغازش شیمیایی انفجار، طی روش آغازش توسط بلاست (با ایجاد انفجار در مخلوط استیلن-اکسیژن توسط چاشنی الکتریکی) چندین سری تست آزمایشگاهی انجام شد و نتایج آن ثبت گردید. در اینجا با مقایسه نتایج حاصل از این دو نوع تست، تفاوت ها و شباهت های این دو روش بررسی می شود. شکل ۴ نمودارهای مقایسه ای نتایج این دو نوع تست انفجار را نشان می دهد. مقایسه نتایج این دو نوع تست نشان می دهد که پارامترهای انفجار ثبت شده بسیار نزدیک و مشابه بوده و در روش آغاز شیمیایی، مقادیر فشار و سرعت انفجار اندکی کمتر از روش آغازش توسط بلاست می باشند .



شکل ۴ - مقایسه نتایج تست های آغازش شیمیایی انفجار (توسط کلر) و تست های آغازش بلاست (توسط چاشنی)

همچنین با استفاده از نرم افزار Stanjan، سرعت و فشار انفجار C-J آزمایشات انجام شده محاسبه گردید که در قالب جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه نتایج این محاسبات با آزمایشات تجربی انجام شده نشان می دهد که داده های موجود شباهت ها و تفاوت هایی با هم دارند. به عنوان مثال پیک سرعت و فشار بدست آمده (بدون در نظر گرفتن مقدار Φ) تقریباً معادل هم می باشند ولی در Φ متناظر این مقادیر یکسان نیستند. به عنوان مثال بیشترین مقدار سرعت و فشار در آزمایشات تجربی Chemical Initiation و Blast Initiation در $\Phi = ۲/۵$ بوده است که در محاسبات Stanjan بیشترین مقادیر در $\Phi = ۱$ بدست آمده است.

جدول ۲- نتایج محاسبات توسط نرم افزار Stanjan

$\Phi = ۲/۸$	$\Phi = ۲/۵$	$\Phi = ۲$	$\Phi = ۱$	$\Phi = ۰/۵$	
۲۳/۵۶	۲۴/۵۲	۲۷/۳۴	۴۹/۹	۳۱/۲۷	فشار انفجار (بار)
۱۹۷۲	۲۰۱۵	۲۱۳۹	۲۸۹۹	۲۴۱۰	سرعت انفجار (m/s)

۴- مکانیزم شیمیایی انفجار مخلوط استیلن - اکسیژن توسط کلر

همانند هر واکنش رادیکالی دیگر، انفجار مخلوط استیلن - اکسیژن توسط آغازگر کلر، دارای سه مرحله اصلی آغازین، انتشار و اختتام می باشد. کسر بزرگی از رادیکالهای کلر در اثر اندرکنش بین گاز کلر با سایت های فعال موجود در سطح داخلی لوله انفجار تشکیل می شود. اعتقاد بر این است که افزایش دما به صورت کوتاه مدت در اثر ورود گاز کلر از محفظه انژکتور (با فشار بالا) به درون محیطی دیگر که در آن فشار کمتر است، سبب جهش از سد انرژی برای فعال سازی این واکنش می شود. واکنش هایی از این نوع در کلریناسیون هیدروکربن ها رایج است [۸،۹].



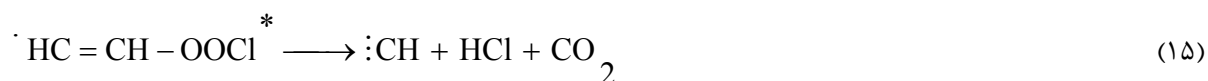
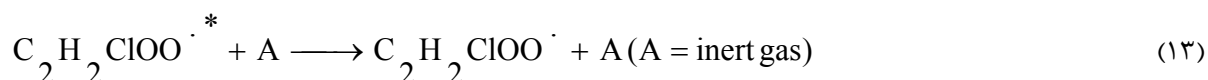
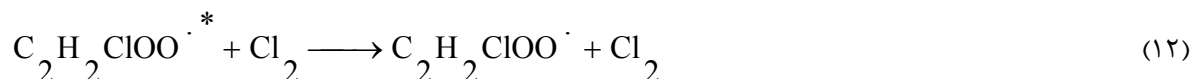
واکنش مستقیم اکسیژن با کلر هم می تواند تولید رادیکال کلر کند:



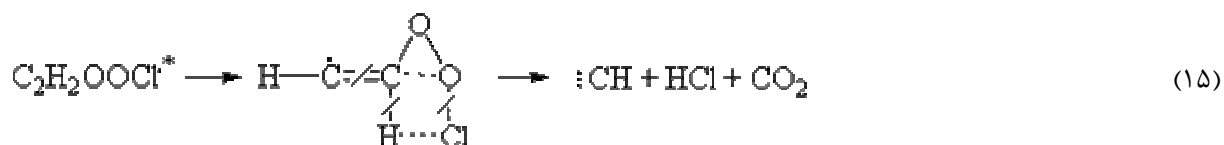
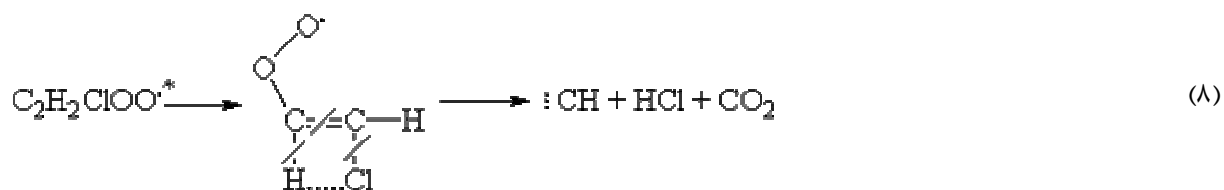
اکسیژن می تواند به عنوان یک کاتالیزور در تجزیه Cl_2 عمل کند، چونکه انرژی فعال سازی این واکنش در حدود ۸ کیلو کالری کمتر از انرژی تفکیک کلر تنها است. واکنش های (۱) و (۲) واکنش های مرحله آغازین این انفجار می باشند. برای رادیکال کلر حاصله می تواند چندین اتفاق بیافتد. مرحله انتشار در انفجار مربوطه شامل واکنش های رادیکالی بسیاری می باشد که در ذیل به بخشی از آنها اشاره می شود:



برای هر یک از این رادیکالها، مسیرهای فراوانی در پیش رو خواهد بود، بطوریکه در مجموع ممکن است در چنین انفجاری بالغ بر دهها واکنش رادیکالی انجام شود. در زیر به برخی از واکنش‌های ممکن اشاره می‌شود:



مشخص شده‌است که واکنش‌های (۸) و (۱۵) از نوع تجزیه‌ای بوده و بصورت زیر انجام می‌شوند [۸,۹]:



این دو واکنش از این نظر قابل توجه می‌باشند که در آنها شکست پیوند دوگانه C=C انجام شده است. چنین واکنش‌هایی بسیار نادر می‌باشند. چند نمونه از این گونه واکنش‌ها توسط Gunning و Sherwood مورد مطالعه قرار

گرفته‌اند. لازم به ذکر است که واکنش‌های ذکر شده در این مقاله تنها بخشی از فرایندهای شیمیایی را در طی انفجار مربوطه منعکس می‌کند و این احتمال وجود دارد که دهها واکنش دیگر در کنار این چند واکنش بطور تصادفی اتفاق بیافتد. واکنش‌های اختتامی در انفجار مخلوط اکسیژن-استیلن توسط گاز کلر، همانند مرحله انتشار آن می‌تواند شامل واکنش‌های متفاوتی باشد. جهت نمونه، مرحله اختتام می‌تواند از طریق جذب گونه‌های رادیکالی توسط دیواره انجام شود. نظیر چنین پدیده‌هایی در ذیل آورده شده است:



۵- نتیجه‌گیری

انجام تست‌های آغاز شیمیایی انفجار نشان داد که آغازگر شیمیایی کلر می‌تواند با ایجاد واکنش‌های شیمیایی زنجیره‌ای به عنوان نوعی منبع احتراق عمل کرده و مخلوط‌های حساس سوخت هیدروکربنی-اکسیژن را منفجر نماید. پارامترهای انفجار ایجاد شده در اثر جت یک آغازگر شیمیایی مشابه انفجار در روش آغازش توسط بلاست (چاشنی) می‌باشند. در این تحقیق با مقایسه مقادیر حاصل از انفجار، در دو روش آغازش شیمیایی و آغازش توسط بلاست (در نسبت اکی والان ۰/۵ تا ۲/۸)، مشخص شد که در قویترین انفجارات (در مخلوط استیلن-اکسیژن) در هر دو روش آغازش انفجار در $\Phi = ۲/۵$ به وجود می‌آید (شکل ۴).

با توجه به نزدیک بودن مقادیر فشار و سرعت انفجار، روشن است که برای آغاز انفجار مخلوط‌های سوخت-هوا امکان جایگزینی روش آغازش بلاست با روش آغازش شیمیایی وجود دارد و بنابراین آغازگر شیمیایی کلر می‌تواند همچون یک چاشنی عمل کند و با ایجاد انرژی لازم (طی واکنش‌های گرمای زنجیره‌ای) برای تشکیل فرآیند احتراق در گازها، فرآیند شیمیایی احتراق را آغاز نموده و توسعه دهد و در مخلوط هوا-سوخت تولید انفجار (Detonation) نماید [۴,۱۰].

مراجع

1. John Pike , "Fuel/Air Explosive (FAE)" , <http://www.globalsecurity.org> .
2. John H.S. Lee , "Initiation of Gaseous Detonation" , Ann. Rev. Phys. Chem. , Department of Mechanical Engineering , McGill University , Canada , 1977 .
3. J. H. Lee , R. Knystautas , "Photochemical Initiation of Gaseous Detonation" Department of Mechanical Engineering , McGill University , Canada , 1977 .
4. Von Elbe , McHale , "Chemical Initiation of FAE Clouds" , Atlantic Research Corporation Combustion and Phphysical Science Department , AFOSR-TR-81-0255 , 1980 .
5. R. Knystautas , J. H. Lee , I. O. Moen , "Fundamental Mechanism of Unconfined Detonation of Fuel-Air Explosions" , Department of Mechanical Engineering , McGill University , AFOSR-TR-80-0323 , 1980 .
6. A.F. Revsin , "Mechanism of Acetylene-Chlorine Mixture Explosion Initiated by Small Addition of Oxygen" , Int. J. Chem. Kinetics , Vol. 15 , 1983 .
7. Stella M. Resende , "Free Radical Mechanism of the Cl_2 Addition to Acetylene" , J. Chem. Soc., 1998 .
8. A.F.revsin , International Journal of Chemical Kinetics , Vol.15 , 1- 4 (1983)
9. A.F.revsin , E.I. Rokolova , International Journal of Chemical Kinetics , Vol.5 , 593-613 (1973)
10. Bernard Lewis ,Guenther Von Vlbe , "Combustion , Flames and Explosions of Gases" , Combustion and Explosives ResearchInc , Academic Press Inc ,1987 .