

تعیین پارامترهای انفجاری ترکیب‌های منفجره RDX آلومینیوم‌دار با استفاده از روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری

امیرحسین رضائی^۱، سید جبار موسوی^۲، امیرحسین فرهادیان^۲، محمد حسین کشاورز^۱، مسعود کاوش تهرانی^۲، سید محمدرضا
دربانی^۲

^۱ دانشکده شیمی کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر

^۲ پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر

چکیده - در این پژوهش، بیناب پلاسمای ترکیب‌های منفجره RDX آلومینیوم‌دار با استفاده از روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری (LIBS) در اتمسفر محیطی آرگون ثبت گردید. خطوط اتمی Al ، C ، H ، N و O و گسیل‌های مولکولی AIO و CN شناسایی و از شدت‌های نسبی Al/O برای رسم منحنی کالیبراسیون بر حسب نسبت‌های استوکیومتری Al/O استفاده گردید. با بررسی وابستگی شدت نسبی Al/O به پارامترهای سرعت و فشار انفجار و رسم منحنی کالیبراسیون با ضریب رگرسیون بسیار خوب، قابلیت روش LIBS برای تعیین پارامترهای انفجاری نمونه‌های مجهول RDX/Al به خوبی نشان داده شد. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد که انرژی آزاد شده در پلاسمای القائیده لیزری ترکیب‌های منفجره RDX آلومینیوم‌دار به گرمای انفجار و ترکیب درصد آلومینیوم آن مربوط می‌شود.

کلید واژه- بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری، پارامترهای انفجاری، ترکیب‌های منفجره RDX آلومینیوم‌دار، منحنی کالیبراسیون.

Determination of explosives parameters of aluminized RDX explosives compositions by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) method

A. H. Rezayi¹, S. J. Mousavi², A. H. Farhadian², M. H. Keshavarz¹, M. Kavosh Tehrani², S. M. R. Darbani²

¹ Department of Applied Chemistry, Malek Ashtar University of Technology, Shahin shahr

² Optics & Laser Science and Technology Research Center, Malek Ashtar University of Technology, Shahin shahr

Abstract- In this research, plasma spectrum of aluminized RDX explosives compositions were recorded using the laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) method under an argon ambient atmosphere. The atomic lines of Al , C , H , N and O and molecular bands of AIO and CN were identified and relative intensities of Al/O were used to plot calibration curve versus stoichiometric ratios of Al/O . By investigation of the dependence of relative intensity of Al/O to detonation velocity and pressure and by plotting the calibration curve with very good regression coefficient, the capability of LIBS method for determining the explosives parameters of RDX/Al unknown samples are well demonstrated. Also, the results of this research indicate that the energy released in the laser induced plasma of aluminized RDX explosives compositions is related to the heat of explosion and percentage of aluminum.

Keywords: Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Explosives parameters, Aluminized RDX explosives compositions, Calibration curve.

۱- مقدمه

مواد منفجره ترکیبی آلومینیوم دار جزء مواد منفجره غیر ایده آل طبقه بندی می شوند و علاوه بر چهار عنصر اصلی موجود در ترکیبات منفجره (کربن، هیدروژن، نیتروژن و اکسیژن) آلومینیوم را نیز در ترکیب خود دارند. پودر آلومینیوم در مواد منفجره برای بهبود خواصی از قبیل تشدید انفجار هوایی، افزایش حباب در موتورهای جنگ افزارهای زیر سطحی، بالا بردن دمای انفجار و ایجاد اثرات آتش زایی مورد استفاده قرار می گیرد. از جمله پارامترهای انفجاری که به عنوان ملاک های اصلی برای ارزیابی مواد منفجره مورد بررسی قرار می گیرند می توان به سرعت، فشار، دما و گرمای انفجار اشاره نمود [۱ و ۲]. پودر آلومینیوم گرمای انفجار را افزایش داده و به عنوان عامل حساسیت حد واسط عمل می کند. تمامی این خواص ارتباط مستقیم با محتوای آلومینیوم موجود در این ترکیبات دارند. تحقیقات نشان می دهد، تا حد مشخصی افزودن پودر آلومینیوم به ترکیبات منفجره سبب افزایش دما و گرمای انفجار و افزودن بیشتر آن موجب کاهش این پارامترها می گردد [۳]. بنابراین دانستن مقدار مجاز افزودن پودر آلومینیوم و تاثیر آن بر پارامترهای انفجاری (از قبیل سرعت، فشار، دما و گرمای انفجار) عامل بسیار مهمی برای ارزیابی عملکرد ترکیبات منفجره می باشد. بیناب نمایی فروشکست القایی لیزری (LIBS)^۱ یک روش آنالیز چند عنصری برای شناسایی و تحلیل نمونه های جامد، مایع و گاز بوده که عدم نیاز به آماده سازی نمونه و پاسخ های سریع و با دقت از مهمترین ویژگی های آن است [۴]. در این تحقیق ابتدا از روش LIBS برای شناسایی خطوط اتمی Al, C, H, N و O و گسیل های مولکولی AlO و CN در نمونه های استاندارد ترکیب های منفجره آلومینیوم دار در اتمسفر آرگون استفاده شد. سپس رابطه بین شدت نسبی Al/O (بدست آمده از LIBS) به نسبت مولی Al/O (بدست آمده از فرمول شیمیایی ماده منفجره) بررسی شد. در ادامه به منظور بررسی قابلیت روش LIBS برای تعیین پارامترهای انفجاری ترکیب های منفجره RDX آلومینیوم دار، وابستگی شدت نسبی Al/O حاصل از بیناب LIBS به پارامترهای سرعت و فشار انفجار مورد بررسی قرار گرفت. نهایتاً با

بررسی روند تغییرات شدت نسبی گسیل های مولکولی به خطوط اتمی با افزایش ترکیب درصد آلومینیوم و با استفاده از منحنی های تجربی دما و گرمای انفجار، ارتباط بین شدت های نسبی مذکور و پارامترهای دما و گرمای انفجار ارائه شد.

۲- مواد و چیدمان آزمایش

برای انجام این پژوهش از ترکیب انفجاری RDX^۲ (با قطر ذرات کمتر از ۸۵۰ میکرومتر) با پودر آلومینیوم با قطر کمتر از ۷۵ میکرومتر از شرکت Sigma-Aldrich با درصدهای وزنی مختلف (مندرج در جدول ۱) استفاده شد. همچنین به منظور ثبت بیناب LIBS سامانه LIBSCAN100 ساخت شرکت Applied Photonic مورد استفاده قرار گرفت. این سامانه مجهز به یک لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm، انرژی خروجی ۱۰۰ تا ۲۰۰ پهنای تپ ۲ ± ۷ نانوثانیه و نرخ تکرار متغیر ۱ تا ۲۰ هرتز می باشد. تابش گسیلی از پلاسما توسط المان های اپتیکی جمع آوری و به آشکار ساز سامانه که قابلیت ثبت بیناب در ناحیه ۱۸۲ تا ۱۰۵۷ نانومتر با دقت ۰/۰۴ نانومتر را دارا می باشد، منتقل گردید. جدول ۱: فرمول شیمیایی و ترکیب درصد ترکیب های منفجره RDX/Al (درصدها بصورت وزنی گزارش شده است).

نمونه	Al%	RDX%	فرمول شیمیایی
۱	۱۰	۹۰	C _{1.215} H _{2.43} N _{2.43} O _{1.43} Al _{0.371}
۲	۲۰	۸۰	C _{1.081} H _{2.161} N _{2.161} O _{2.161} Al _{0.715}
۳	۳۰	۷۰	C _{0.945} H _{1.89} N _{1.89} O _{1.89} Al _{1.11}
۴	۴۰	۶۰	C _{0.81} H _{1.62} N _{1.62} O _{1.62} Al _{1.483}
۵	۵۰	۵۰	C _{0.675} H _{1.35} N _{1.35} O _{1.35} Al _{1.853}

۳- بحث و تحلیل

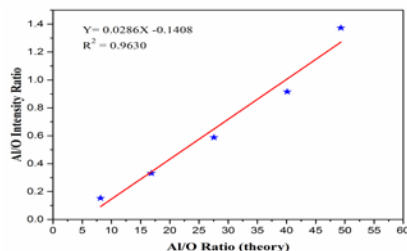
۳-۱- شناسایی خطوط اتمی و گسیل های مولکولی

بیناب LIBS نمونه (60/40) RDX/Al در اتمسفر آرگون در بازه طول موجی ۲۴۵ تا ۸۰۰ نانومتر در شکل ۲ نشان داده شده است. تزریق گاز آرگون بر روی نمونه های استاندارد به منظور حذف اثر اکسیژن هوا صورت گرفت. خطوط بینابی با استفاده از پایگاه اطلاعاتی NIST

^۲ Cyclotrimethylenetrinitramine

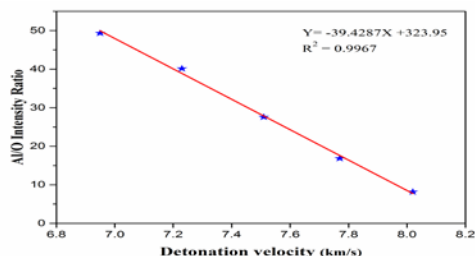
^۱ Laser Induced Breakdown Spectroscopy

مولی Al/O (بدست آمده از فرمول شیمیایی ماده منفجره) در اتمسفر آرگون بررسی شده است.

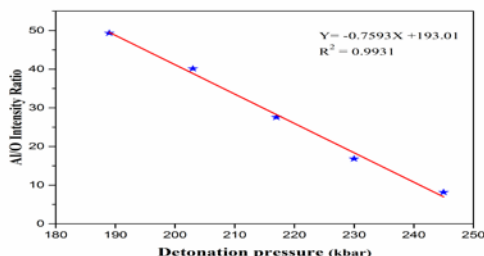


شکل ۳: منحنی کالیبراسیون برای شدت نسبی Al/O حاصل از بیناب LIBS بر حسب نسبت تئوری Al/O

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، شدت نسبی Al/O بدست آمده از تکنیک LIBS در اتمسفر آرگون با نسبت Al/O بدست آمده از فرمول شیمیایی یک رابطه‌ی خطی با ضریب رگرسیون بسیار مناسبی ($R^2=0.9630$) دارد. در ادامه به منظور بررسی وابستگی شدت نسبی Al/O حاصل از بیناب LIBS به پارامترهای سرعت و فشار انفجار، روند تغییرات شدت نسبی Al/O با سرعت و فشار انفجار آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، تغییرات نسبت شدت Al/O بدست آمده از بیناب LIBS نمونه‌های استاندارد با سرعت و فشار انفجار رابطه خطی مناسبی (به ترتیب با ضریب رگرسیون 0.9967 و 0.9931) دارد.



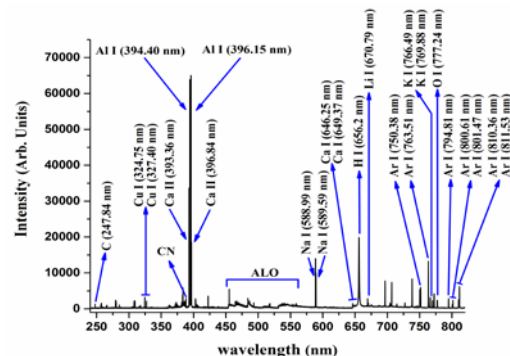
شکل ۴: تغییرات شدت نسبی Al/O با سرعت انفجار.



شکل ۵: تغییرات شدت نسبی Al/O با فشار انفجار.

با توجه به این شکل‌ها یک روند کاهشی در شدت نسبی Al/O با افزایش سرعت و فشار انفجار مشاهده می‌شود. بنابراین از این نمودارها می‌توان به عنوان منحنی

شناسایی و نامگذاری گردید. هر یک از بیناب‌ها حاصل از میانگین ۲۰ پالس لیزری بر روی هر نمونه می‌باشد.



شکل ۲: بیناب LIBS نمونه استاندارد RDX/Al (60/40).

سرعت و فشار انفجار مواد منفجره غیر ایده‌آل آلومینیوم‌دار را می‌توان تابعی از پارامترهای اصلی از قبیل اجزای عنصری، موازنه اکسیژن، گرمای تشکیل و دانسیته اولیه مخلوط بیان کرد. با افزایش درصد آلومینیوم در ترکیب ماده منفجره، دانسیته اولیه افزایش یافته و در بیشتر حالات باعث کاهش سرعت و فشار انفجار می‌گردد. جدول ۲ مقادیر سرعت و فشار انفجار محاسبه شده با روابط گزارش شده توسط کشاورز و همکاران [۵] با استفاده از فرمول شیمیایی ترکیبات انفجاری آلومینیوم‌دار ($C_aH_bN_cO_dAl_e$)، به همراه مقادیر تجربی دما و گرمای انفجار [۶] و همچنین نسبت مولی Al/O حاصل از فرمول شیمیایی نمونه‌های استاندارد RDX/Al را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر سرعت، فشار، دما، گرمای انفجار و کسر مولی Al/O حاصل از فرمول شیمیایی نمونه‌های استاندارد RDX/Al

Al/O	دما (K)	گرمای (kJ/kg)	فشار (kbar)	سرعت (km/s)	نمونه‌ها
۰/۱۵	۳۶۰۰	۶۰۶۹	۲۴۵	۸/۰۲	نمونه ۱
۰/۳۳	۴۹۷۲	۷۹۰۴	۲۳۰	۷/۷۷	نمونه ۲
۰/۵۹	۵۴۴۷	۹۶۱۱	۲۱۷	۷/۵۱	نمونه ۳
۰/۹۲	۴۰۱۷	۸۲۰۴	۲۰۳	۷/۲۳	نمونه ۴
۰/۳۷	۲۳۱۶	۶۶۷۳	۱۸۹	۶/۹۵	نمونه ۵

۳-۲- بررسی پارامترهای سرعت و فشار انفجار

در مطالعات انجام شده از نسبت Al/O بدست آمده از فرمول شیمیایی، جهت بررسی اثرات اجزاء ترکیبات منفجره بر روی پارامترهای انفجار نظیر سرعت و فشار انفجار استفاده شده است [۷]. در این پژوهش، ابتدا رابطه بین شدت نسبی Al/O (بدست آمده از LIBS) به نسبت

انرژی فرودی بر سطح نمونه برابری می‌کند [۸]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که انرژی آزاد شده در پلاسمای القائیده لیزری ترکیب‌های منفجره RDX آلومینیوم‌دار به گرمای انفجار و ترکیب درصد آلومینیوم آن مربوط می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

از روش LIBS برای شناسایی خطوط اتمی Al، C، H، N و O و گسیل‌های مولکولی AIO و CN در نمونه‌های استاندارد ترکیب‌های منفجره آلومینیوم‌دار در اتمسفر آرگون استفاده شد. منحنی کالیبراسیون برای شدت نسبی Al/O (بدست آمده از LIBS) به نسبت مولی Al/O (بدست آمده از فرمول شیمیایی ماده منفجره) بدست آمد. با بررسی وابستگی شدت نسبی خطوط اتمی بیناب LIBS به پارامترهای سرعت و فشار انفجار و رسم منحنی کالیبراسیون با ضریب رگرسیون بسیار خوب، قابلیت روش LIBS برای تعیین پارامترهای انفجاری نمونه‌های مجهول RDX/Al به خوبی نشان داده شد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که انرژی آزاد شده در پلاسمای القائیده لیزری ترکیب‌های منفجره RDX آلومینیوم‌دار به گرمای انفجار و ترکیب درصد آلومینیوم آن مربوط می‌شود.

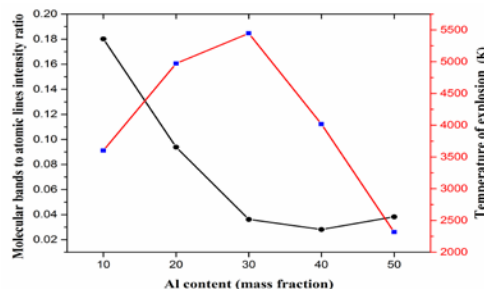
مراجع

- [1] JP Agrawal. High energy materials: *propellants, explosives and pyrotechnics*. John Wiley & Sons. 2010.
- [2] MH Keshavarz. Research progress on heats of formation and detonation of energetic compounds. Hazardous Materials: Types, Risks and Control, Nova Science Publishers, Inc, New York, 339-59, 2011.
- [3] Z. Q. Zhou, J. X. Nie, et al. Effects of the aluminum content on the shock wave pressure and the acceleration ability of RDX-based aluminized explosives Citation: Journal of Applied Physics, 116, 144906, 2014.
- [4] Miziolek A W., Palleschi V., Schechter I., Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Cambridge University Press, New York, 2006.
- [5] M. H. Keshavarz, et al. A New Computer Code to Evaluate Detonation Performance of High Explosives and their Thermochemical Properties, Part I, J. Hazard. Mater., 172, 1218, 2009.
- [6] Q Zhang, Y CHANG. A Predictive Method for the Heat of Explosion of Non-ideal Aluminized Explosives. Central European Journal of Energetic Materials, , 10(4), 541-554, 2013.
- [7] D Xiang, J Rong, J Li. Effect of Al/O Ratio on the Detonation Performance and Underwater Explosion of HMX based Aluminized Explosives. Propellants Explosives Pyrotechnics, 39, 65 – 73, 2014.
- [8] P. Lucena, A. Doña 1, L.M. Tobaría, J.J. Laserna. New challenges and insights in the detection and spectral identification of organic explosives by laser induced breakdown spectroscopy. Spectrochimica Acta Part B, 66, 12–20, 2011.

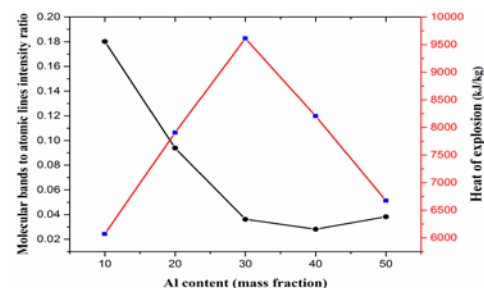
کالیبراسیون جهت یافتن سرعت و فشار انفجار نمونه‌های مجهول RDX/Al با استفاده از روش LIBS استفاده نمود.

۳-۳- بررسی پارامترهای دما و گرمای انفجار

روند تغییرات شدت نسبی گسیل‌های مولکولی AIO به مجموع شدت خطوط اتمی Al و O در اتمسفر آرگون با افزایش ترکیب درصد آلومینیوم و همچنین منحنی‌های تجربی دما و گرمای انفجار در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، با افزایش ترکیب درصد آلومینیوم تا ۳۰ درصد، یک روند کاهشی شدید در شدت نسبی گسیل‌های مولکولی به خطوط اتمی دیده می‌شود. اما برای ترکیب‌های با درصد آلومینیوم بیشتر از ۳۰ درصد، تغییرات این شدت نسبی بسیار کم و تقریباً ثابت می‌شود. از طرفی با توجه به منحنی‌های تجربی دما و گرمای انفجار، با افزایش ترکیب درصد آلومینیوم تا ۳۰ درصد، یک روند افزایشی و پس از آن یک روند کاهشی در پارامترهای دما و گرمای انفجار دیده می‌شود.



شکل ۶: منحنی مقادیر تجربی دمای انفجار (قرمز رنگ) در مقایسه با شدت نسبی گسیل‌های مولکولی به اتمی (مشکی رنگ)



شکل ۷: منحنی مقادیر تجربی گرمای انفجار (قرمز رنگ) در مقایسه با شدت نسبی گسیل‌های مولکولی به اتمی (مشکی رنگ)

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزایش ترکیب درصد آلومینیوم تا ۳۰ درصد و بالطبع آن افزایش دما و گرمای انفجار باعث می‌شود که گونه‌های درون پلازما به جای اینکه بیشتر بصورت مولکولی بوده، بیشتر به صورت اتمی باشند. در صورتی که تمام پارامترهای دیگر یکسان باشد این مطلب با فرضیه پدیده فروشکست با افزایش چگالی