

مطالعه تجربی اثر پودر آلومینیوم نانو ساختار

بر خواص یک PBX پایه HMX

احمد ملائی^۱، محمد رضا رحیمی پور^{۲*}، محمد علی دهنوی^۳

۱- دانشجوی دکترا، پژوهشگاه مواد و انرژی

۲- استاد، پژوهشگاه مواد و انرژی

۳- دانشیار، دانشگاه امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۴/۴/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۱۳)

چکیده

پودر آلومینیوم از اجزای رایج مواد پراثری است. با کاهش اندازه ذرات، نسبت سطح به حجم افزایش یافته و در نتیجه واکنش پذیری این فلز بهبود می یابد. در این تحقیق اثر به کارگیری نوعی پودر آلومینیوم نانو ساختار بر خواص فیزیکی، حرارتی، مکانیکی و عملکردی یک ماده منفجره پلاستیکی بر پایه HMX بررسی شد. نتایج نشان داد که جایگزین کردن پودر آلومینیوم نانو ساختار به جای پودر میکرونیزه در فرمولاسیون، چگالی تجربی نمونه را به میزان ۲/۵٪ افزایش می دهد. این جایگزینی همچنین موجب افزایش سختی و استحکام کششی نمونه به ترتیب تا Shore D ۱۸ و ۰/۶۷ MPa می شود؛ اما مقدار کرنش در نقطه شکست از ۱۰/۵ به ۹/۸ درصد کاهش می یابد. بررسی رفتار حرارتی نمونه ها به روش DSC نشان دهنده اثر کاتالیستی پودر آلومینیوم نانو ساختار بر دمای انتقال فاز و دمای تجزیه خود به خودی ماده منفجره HMX است. این اثر کاتالیستی حساسیت به ضربه ترکیب انفجاری را حدوداً ۷/۷ درصد افزایش می دهد. در آزمون عملکردی به روش ایجاد دندان در صفحه، مشخص شد که استفاده از پودر آلومینیوم نانو ساختار تأثیر قابل توجهی در بهبود مشخصات انفجاری خرج PBX ندارد.

واژه های کلیدی: پودر آلومینیوم نانو ساختار، ماده منفجره پلاستیکی، سختی، استحکام، پایداری حرارتی، آزمون دندان.

Experimental Study on the Effect of Nano-Structured Aluminum Powder on the Properties of an HMX-Based PBX

A. Mollaei¹, M. R. Rahimipour^{2*}, M. A. Dehnavi³

1, 2- Materials and Energy Research Center, Karaj

3- Imam Hossein University, Tehran

(Received: 7/06/2015, Accepted: 10/05/2015)

Abstract

Aluminum powder is a common ingredient in energetic materials. Reactivity of this metal can be improved by reducing the particle size, due to their larger surface/volume ratio. In this research, the effects of nano-structured aluminum powder on physical, thermal, mechanical and explosive characteristics of an HMX-based PBX is investigated. The results have indicated that the experimental density increased up to 2.5 percent by replacement of the nano-structured aluminum powder instead of micronized aluminum. It has also been shown that this replacement caused the enhancement of hardness and tensile stress to 18 Shore D and 0.67 MPa, respectively. On the other hand, the elongation at maximum stress decreased from 10.5 to 9.8 percent. Furthermore, a catalytic effect has been shown in phase transition and self-decomposition temperatures of HMX in DSC analysis. This catalytic effect increased the impact sensitivity of composition up to 7.7 percent. Based on comparative dent test, it is established that the nano-structured aluminum powder has no considerable effect on detonation characteristics of PBX charge.

Keywords: Nano-Structured Aluminum Powder, PBX, Hardness, Strength, Thermal Stability, Dent Test.

* Corresponding Author E-mail: m-rahimi@merc.ac.ir

۱- مقدمه

مواد منفجره پلاستیکی^۱ (PBX) خانواده‌ای از کامپوزیت‌های پلیمری هستند که در آن‌ها ذرات ماده منفجره، سوخت، اکسیدکننده و دیگر اجزای جامد به عنوان فاز دوم به ماتریس پلیمری (بایندر) اضافه می‌شود. ترکیبات PBX در مقایسه با مواد منفجره متداول، دارای مزایایی همچون پایداری حرارتی بیشتر، خواص مکانیکی و عملکردی بهتر و حساسیت کمتر نسبت به محرک‌های محیطی (ضربه، اصطکاک و الکتریسیته ساکن) می‌باشند [۱].

تاکنون خواص حرارتی و مکانیکی این مواد از جمله دمای تجزیه، سینتیک واکنش، سختی، استحکام کششی و درصد افزایش طول به عنوان تابعی از متغیرهای گوناگون در ترکیبات PBX مورد مطالعه قرار گرفته است. این پارامترها عمدتاً شامل اندازه ذرات فاز دوم و ترکیب درصد اجزای فرمولاسیون بوده است [۲-۷]. یکی از اجزای مهم مواد پراثری که تاکنون موضوع تحقیقات مختلفی بوده، پودر آلومینیوم است. آلومینیوم به دلیل واکنش پذیری بالا، قیمت مناسب، گرمای سوختن زیاد و سهولت اشتعال در فرمولاسیون‌های انفجاری استفاده می‌شود. مطابق استاندارد، پودر آلومینیوم با کاربرد نظامی در مواد منفجره بایستی دارای اندازه ذرات کمتر از ۲۷ میکرون و خلوص بالاتر از ۹۹٪ باشد [۸]. پودر آلومینیوم به عنوان سوخت در ترکیبات منفجره موجب پیشرفت واکنش‌های پس‌سوزی^۲ در لحظه انفجار می‌شود. پس‌سوزی پودر آلومینیوم شامل واکنش‌های آن با محصولات گازی انفجار و همچنین اکسیژن محیط است. این واکنش‌ها همراه با حرارت زیاد و تشکیل موج فشار با زمان ماندگاری بالایی بوده که نهایتاً به افزایش قدرت انفجار می‌انجامد [۹-۱۰].

پودر آلومینیوم در فرمولاسیون مواد منفجره زیر آبی و خرج‌های بلست (به ویژه ترموباریک‌ها) کاربرد دارد. با کاهش اندازه ذرات، واکنش پذیری آلومینیوم در این ترکیبات بیشتر می‌شود. در خرج‌های زیر آبی، قدرت موج شوک و انرژی حباب با به‌کارگیری ذرات آلومینیوم نانو افزایش می‌یابد [۱۱]. اضافه کردن پودر آلومینیوم ریزتر به مواد منفجره، خواص حرارتی و قدرت بلست انفجار را بهبود می‌بخشد. این مشخصه معمولاً با سوختن پودر فلزی در حین انبساط محصولات گازی انفجار خرج‌های ترموباریک حاصل می‌شود [۱۲].

نانو ذرات آلومینیوم (n-Al) در مقایسه با پودر میکرونیزه (μ -Al) دارای ظرفیت گرمایی کمتر، حد اشتعال پذیری پایین‌تر و زمان سوزش کمتری است. واکنش پذیری n-Al در هوا نیز بیشتر از μ -Al است. از این رو ذرات نانو در دمای پایین‌تری اکسید شده و واکنش آن‌ها با هوا تا مراحل کامل‌تری پیش می‌رود [۱۳]. هرچند تمایل به استفاده از ذرات آلومینیوم نانو در فرمولاسیون مواد پراثری رو به افزایش است [۱۴] ولی این ذرات در فرمولاسیون‌های مختلف مواد منفجره رفتار ثابت و مشخصی ندارند. نتایج متفاوت و در برخی موارد متضاد استفاده از آن نشان‌دهنده این واقعیت است که مکانیسم

واکنش n-Al در مواد منفجره هنوز مشخص نیست و اثرات آن به سایر اجزای فرمولاسیون وابسته است. به همین خاطر تحقیقات فراوانی جهت مقایسه اثر ذرات آلومینیوم میکرونیزه و نانو در فرمولاسیون‌های انفجاری انجام شده است. مطالعه سیستم‌های انفجاری TNT/RDX/Al و TNT/Al نشان داد که استفاده از نانو پودر آلومینیوم موجب ارتقای سرعت انفجار و عمق گودی در آزمون ایجاد دندانه در صفحه^۳ می‌شود [۱۵ و ۱۶]. اما در مورد مخلوط‌های HTPB/RDX/Al و HTPB/RDX/AP/Al حاوی نانو ذرات آلومینیوم، کاهش سرعت انفجار و عمق گودی در آزمون ایجاد دندانه در صفحه گزارش شده است [۱۷].

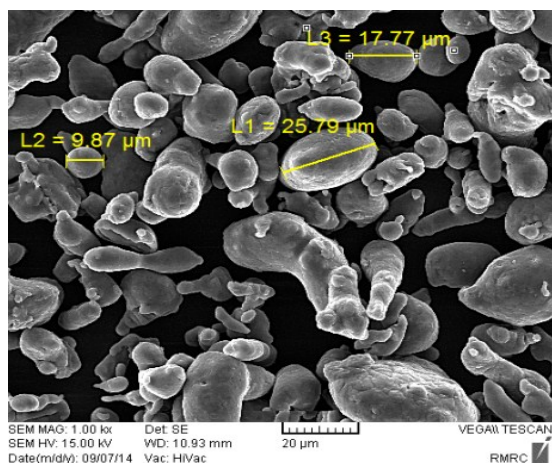
طبق تحقیقات بروسو و اندرسون [۱۸]، جایگزینی نانو پودر آلومینیوم Alex® (۲۰۰-۱۰۰ nm) به جای پودر میکرونیزه H-15 (۱۲ μ m) در PBX‌هایی بر پایه HTPB، تأثیری بر سرعت انفجار نداشته ولی این جایگزینی در PBX‌هایی دیگر بر پایه گلیسیدیل آزید پلیمر (GAP) تأثیر منفی بر سرعت انفجار دارد. استفاده از ذرات آلومینیوم نانو در مخلوط‌های آمونیوم دی‌نیترامد (ADN)/آلومینیوم منجر به افزایش سرعت انفجار مخلوط می‌شود [۱۹]. طبق بررسی‌های تولیس^۴ و همکارانش [۲۰]، سرعت انفجار مخلوط‌های لاکتوز/آلومینیوم/آمونیم پرکلرات، در صورت استفاده از نانو ذرات Alex® به جای پودر آلومینیوم میکرونیزه افزایش می‌یابد. پودر Alex® باعث افزایش سرعت انفجار ماده منفجره هگزوژن (RDX) می‌شود. اگرچه استفاده کم از این پودر تأثیر کمی بر سرعت انفجار دارد، ولی در غلظت ۵۰٪، موجب افزایش سرعت انفجار از ۵۴۰۰ به ۷۰۰۰ m/s می‌شود. به تازگی مشخص شد که افزایش پودر Alex® به مواد منفجره تریتونال و H-6 موجب بهبود سرعت و ضربه انفجار می‌گردد. در این مورد با جایگزینی پودر نانو به جای پودر میکرونیزه، افزایش ۳۰۰-۲۰۰ m/s در مقدار سرعت انفجار و افزایش ۲۷ درصدی در ضربه انفجار مشاهده شده است [۱۸].

نسبت سطح به وزن و چگالی بالک نانو ذرات بیشتر از پودر میکرونیزه است. در نتیجه استفاده از نانو ذرات در فرمولاسیون کامپوزیت‌های پلیمری نظیر PBX موجب افزایش گرانیوی مخلوط در انتهای فرایند اختلاط می‌شود [۲۱]. نتایج یک تحقیق نشان داد که به‌کارگیری نانو پودر آلومینیوم Alex® با ابعاد ۲۰۰-۱۰۰ nm به جای پودر آلومینیوم ۱۲ میکرونی در یک کامپوزیت پلیمری منفجره بر پایه HTPB، گرانیوی مخلوط نهایی مرحله اختلاط را بیش از ۵ برابر افزایش می‌دهد [۱۸].

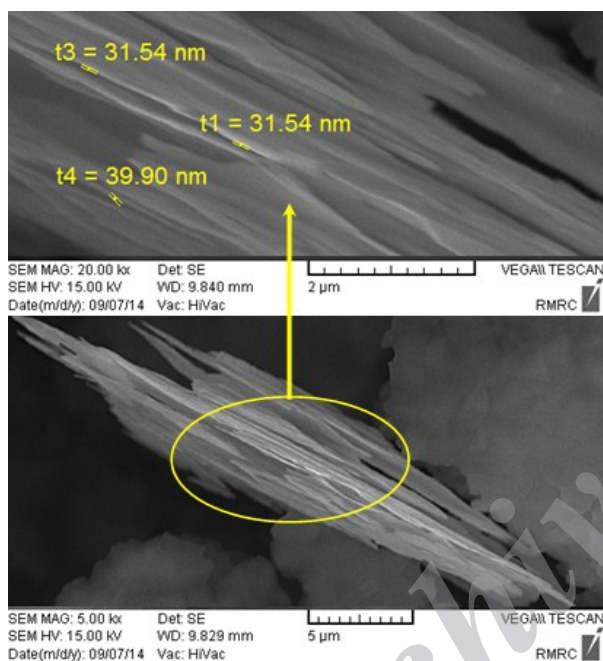
تا به حال اثر به‌کارگیری پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل^۵ با ضخامت نانو، در منابع علمی گزارش نشده است. بررسی‌های انجام‌گرفته در رابطه با نقش نانو ذرات کروی Alex® در مواد منفجره، عمدتاً فاقد انسجام منطقی بوده و در برخی موارد نتایج متضادی از آن‌ها ارائه شده است. از طرفی مشخص است که رفتار نانو ذرات در

3- Plate Dent Test
4- Tullis
5- Flake

1- Polymer Bonded Explosives
2- After-Burning



شکل ۱- تصویر SEM پودر آلومینیوم گرانولی میکرونیزه.



شکل ۲- تصویر SEM پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل با ضخامت نانو.

۲-۲- معرفی و روش تهیه فرمولاسیون‌های PBX

در این تحقیق دو ترکیب PBX قابل ریخته‌گری با مقادیر یکسان اجزاء ولی با نوع پودر آلومینیوم متفاوت، تهیه و ارزیابی شد. ترکیب درصد اجزاء و نقش هر جزء در جدول (۱) نشان داده شد. از آنجائی که نسبت سطح به حجم پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل نانو ساختار نسبتاً بالا است، بخش زیادی از بایندر را در سطح خود جذب کرده و به همین خاطر گرانروی فرمولاسیون افزایش می‌یابد. در غلظت‌های بالاتر از ۱۰ درصد، این افزایش گرانروی در حدی است که عمل اختلاط و متعاقب آن ریخته‌گری مخلوط با مشکل مواجه می‌شود. لذا بررسی اثر پودر نانو ساختار تنها در فرمولاسیونی حاوی ۱۰ درصد وزنی آلومینیوم انجام شد. در فرمولاسیون A10 از پودر آلومینیوم میکرونیزه و در A10F از پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل نانو ساختار استفاده شد. برای تهیه نمونه‌های ۵۰۰ گرمی از هر فرمولاسیون، ابتدا اجزاء بایندر شامل ۳۶/۸ گرم رزین پلی‌بوتادی‌ان با

فرمولاسیون‌های انفجاری، شدیداً به نوع و مقدار دیگر اجزا بستگی دارد. به همین خاطر در تحقیق حاضر، تغییرات ناشی از جایگزینی پودر آلومینیوم نانو ساختار به جای پودر گرانولی میکرونیزه بر روی خواص فیزیکی، رفتار حرارتی، حساسیت به ضربه، خواص مکانیکی و عملکردی یک ترکیب پلیمری قابل انفجار بر پایه HMX (سیستم عملکردهای HTPB/HMX/Al) مورد مطالعه قرار گرفت. این سیستم انفجاری در تحقیقات قبلی [۲۲] نشان داد که می‌تواند به عنوان یک خرج دو منظوره (با عملکرد زیر آبی و نفوذکننده) مورد استفاده قرار گیرد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

برای تهیه نمونه‌های PBX از پودر آلومینیوم صنعتی با اندازه ذرات کوچک‌تر از ۲۵ میکرون و سطح ویژه $3/187 \text{ m}^2/\text{g}$ (شکل ۱) و پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل پوشش‌دار با قطر متوسط ۵ میکرون، ضخامت ۳۰-۴۰ nm و سطح ویژه $7/272 \text{ m}^2/\text{g}$ تولیدی شرکت SCHLENK آمریکا (شکل ۲) استفاده شد. ماده منفجره HMX با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰ میکرون و حاوی ۵ درصد روغن دی‌اکتیل آدیپات از صنایع شیمیایی اصفهان تهیه شد. سایر مواد اولیه از جمله روغن دی‌اکتیل آدیپات، عامل پخت ایزوفورن دی‌ایزوسیانات، کاتالیزور دی‌بوتیل‌تین دی‌لورات، لیسیتین و آنتی‌اکسیدان ۲،۲ متیلن بیس (۴- متیل ۶- ترشیو بوتیل فنل) تولید شرکت Merck آلمان بودند. از ترکیب انفجاری C4 به عنوان خرج منهدم‌کننده در آزمون‌های عملکردی استفاده شد.

از یک همزن دو پروانه‌ای با چرخش سیاره‌ای و دارای حجم مفید ۲ لیتر با ظرف دوجداره و امکان ایجاد خلأ و گرمایش تا 100°C جهت اختلاط مواد اولیه استفاده شد. مخلوط حاصل پس از ریخته‌گری در آون ساخت شرکت Memmert آلمان پخت شد.

اندازه‌گیری چگالی به روش غوطه‌وری و با بهره‌گیری از ترازوی Mettler Toledo مدل AG285 ساخت سوئیس انجام شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) VEGA||TESCAN برای تصویربرداری از مواد اولیه پودری شکل و سطح محصول استفاده شد. برای اندازه‌گیری سختی از سختی‌سنج مدل INSIZE با قابلیت اندازه‌گیری سختی در مقیاس Shore D و برای آزمون کشش از دستگاه Hiwa 200 Ver. 3.0.6 استفاده گردید. آنالیز DSC-TGA با استفاده از کالری متر روبشی تفاضلی مدل DSC1 ساخت شرکت Mettler Toledo سوئیس انجام شد. از چاشنی الکتریکی M8 در آزمون عملکردی برای شروع انفجار خرج‌ها استفاده شد. ابعاد گودی ایجاد شده در آزمون ایجاد دندان در صفحه با کولیس دیجیتال مدل 1108-200-Q با دقت $0/01 \text{ mm}$ ساخت شرکت INSIZE اندازه‌گیری شد.

۰/۱۵ گرم کاتالیزور دی بوتیل تین دی لورات به مخلوط افزوده شد. مخلوط پس از اختلاط با دور ۴۵ rpm، به مدت ۴۰ دقیقه در فشار محیط و ۱۰ دقیقه تحت خلأ ۰/۳۵ bar به صورت دستی در قالب‌های مخصوص آزمون خواص مکانیکی و عملکردی ریخته‌گری و سپس به مدت یک هفته در دمای ۶۸ درجه آون پخت شد. از هر فرمولاسیون تعداد ۳ نمونه مستطیلی برای انجام آزمون‌های خواص مکانیکی و حرارتی و دو نمونه استوانه‌ای شکل برای انجام آزمون‌های عملکردی تهیه گردید.

انتهای هیدروکسیل (HTPB)، ۳۶/۸ گرم دی‌اکتیل آدیپات، ۰/۲۷ گرم آنتی‌اکسیدان و ۱ گرم لیسیتین در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و تحت خلأ ۰/۳۵ bar به مدت ۱۵ دقیقه در یک همزن سیاره‌ای گاز زدایی شدند تا محلولی کاملاً یکنواخت تهیه گردید. عمل گاز زدایی تا مرحله‌ای ادامه داشت که هیچ‌گونه حبابی ناشی از خروج گاز در سطح مخلوط مشاهده نمی‌شد. پس‌از آن به ترتیب ۳۷۰ گرم HMX و ۵۰ گرم پودر آلومینیوم طی سه مرحله و به تدریج به ظرف همزن اضافه شد. در ادامه، ۴/۸ گرم عامل پخت ایزوفورن دی‌ایزوسیانات و

جدول ۱- اجزاء فرمولاسیون در PBX های تهیه شده.

درصد وزنی	نقش	فرمول شیمیایی	مواد اولیه
۷/۳۶	بایندر		پلی‌بوتادی این با انتهای هیدروکسیل (HTPB)
۷/۳۶	نرم‌کننده		دی‌اکتیل آدیپات (DOA)
۷/۴	ماده منفجره		اکتوزن (HMX)
۱۰	سوخت فلزی	Al	پودر آلومینیوم (گرانولی میکرونیزه در A10 و ورقه‌ای نانو ساختار در A10F)
۰/۹۶	عامل پخت		ایزوفورن دی‌ایزوسیانات (IPDI)
۰/۰۳	کاتالیست پخت		دی‌بوتیل تین دی‌لورات (DBTDL)
۰/۰۹	آنتی‌اکسیدان		۲،۲ متیلن بیس (۴-متیل ۶-ترشیو بوتیل فنل)
۰/۲	ترکننده	-	لیسیتین

۳-۲- روش‌های تجربی مشخصه یابی و آزمون خواص

نمونه‌های استفاده شده به صورت استوانه‌ای شکل با قطر ۱۵ mm و ارتفاع ۱۰ mm بودند.

بررسی مورفولوژی سطح نمونه به روش SEM: از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) VEGA|TESCAN برای تصویربرداری از مواد اولیه پودری شکل و سطح محصولات PBX استفاده شد. در اینجا هدف بررسی یکنواختی سطح نمونه‌ها و ارزیابی کیفیت توزیع ذرات و اتصال آن‌ها با بایندر است. برای این منظور از سطح نمونه‌ها پس از پوشش‌دهی با طلا در بزرگنمایی مختلف تصویربرداری شد.

آنالیز حرارتی به روش کالریمتری روبشی تفاضلی: کالریمتری روبشی تفاضلی^۱ (DSC) یکی از انواع تجزیه حرارتی است که برای

اندازه‌گیری چگالی: تعیین چگالی تجربی و مقایسه آن با مقدار نظری، قدم اول در ارزیابی کیفیت نمونه‌های ترکیبی است. در این تحقیق، اندازه‌گیری چگالی مطابق استاندارد ASTM D792-91 در دمای محیط و با استفاده از ترازوی تجزیه‌ای ارشمیدوس انجام شد. در این روش، چگالی طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{W_a}{W_b - W_c} \times D_w \quad (1)$$

در این معادله، D چگالی نمونه (بر حسب g/cm^3)، D_w چگالی آب در دمای آزمون، W_a وزن نمونه در هوا یا وزن نمونه خشک، W_b وزن نمونه تر (اشباع) و W_c وزن نمونه در آب (وزن غوطه‌وری) را نشان می‌دهد. اختلاف W_c و W_b حجم نمونه را نشان می‌دهد.

1- Differential Scanning Calorimetry

شکلی استفاده شد. قالب نمونه‌ها به صورت سه لایه‌ای بوده که با پیچ‌هایی به هم متصل می‌شدند. لایه میانی قالب دارای ضخامت ۵ mm بوده که مستطیلی به طول ۲۲ سانتی‌متر و به پهنای ۲۵ mm درون آن خالی بود. مخلوط PBX پس از عمل اختلاط در همزن به صورت دستی درون این قالب ریخته‌گری و بعد از آن جهت پخت در آون قرار گرفت. پس از پخت، نمونه به صورت یک تسمه مستطیلی با طول ۲۲۰ mm، پهنای ۲۵ mm و ضخامت ۵ mm از قالب خارج شد. آزمون کشش در دمای محیط و با بهره‌گیری از دستگاه Hiwa200 و بر روی نمونه‌های مستطیلی با سرعت کشش ۱۰ mm/min انجام شد.

آزمون عملکردی به روش ایجاد دندان در صفحه: در آزمون عملکردی به روش ایجاد دندان در صفحه، عمق گودی حاصل از انفجار خرج در یک صفحه فولادی معیاری از قدرت مواد منفجره است. هر چه گودی حاصل بیشتر باشد، نشان دهنده قدرت بیشتر آن ماده منفجره خواهد بود. در این تحقیق نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل با قطر ۱۹ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm (حجم مساوی ۲۸ cm³) از دو فرمولاسیون A10F و A10 تهیه و با یکدیگر مقایسه شدند. نمونه‌ها در قالبی از جنس پلی‌اتیلن با ضخامت ۱ mm شارژ شدند و پس از پخت یک هفته‌ای در دمای ۶۸ °C مطابق شکل (۳) با استفاده از یک چاشنی الکتریکی آنی (M8) و ۵ گرم ماده منفجره C4 منفجر شدند. نقطه آغازش در بالای خرج استوانه‌ای بوده و نمونه به صورت عمودی بر روی صفحه فولادی قرارداد شد. متوسط وزن نمونه‌ها در آزمون حدود ۴۵ گرم بود. صفحه فولادی به صورت مربعی با طول و عرض ۱۰۰ mm بوده که ۱۶ mm ضخامت داشت. از هر فرمولاسیون ۲ نمونه برای آزمون تهیه شد. پس از اجرای آزمون، عمق دندان (گودی) ایجاد شده بر روی صفحه به کمک کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و میانگین نتایج ثبت شد.



شکل ۳- چیدمان آزمون عملکردی به روش ایجاد دندان در صفحه.

تعیین دماهای انتقال فازی مانند نقطه ذوب، شروع انجماد، شروع تبلور مجدد، دمای تبخیر و نیز برای تعیین آنتالپی، گرمای مخصوص (Cp) و انرژی فعال‌سازی استفاده می‌شود. این روش برای محاسبه میزان گرمایی که نمونه می‌گیرد یا آزاد می‌کند نیز کاربرد دارد. در این بررسی مقدار ۶/۷ میلی‌گرم از نمونه PBX با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه از دمای ۵۰ °C تا ۸۰۰ °C مورد آزمون DSC-TGA قرار گرفت. این آزمون پس از قرار گرفتن نمونه در تشتک آلومینا و تحت اتمسفر گاز آرگون با دبی ۷۰ ml/min انجام شد. همچنین تغییرات جرم نمونه با افزایش دما به روش TGA^۱ بررسی شد.

آزمون حساسیت به ضربه: در این آزمون نمونه بین دو سطح فولادی مسطح و موازی در معرض ضربه یک وزنه سقوط‌کننده با وزن مشخص قرار می‌گیرد. ضربه حاصل از سقوط وزنه ممکن است منجر به آغازش یا عدم آغازش انفجار نمونه شود. مطابق معادله (۲)، انرژی ضربه (E_I) تابعی از سنگینی وزنه (M_W) و ارتفاع وزنه (H) است. هر چه E_I آغازش یک ماده در آزمون حساسیت به ضربه بیشتر باشد، آن ماده نسبت به ضربه غیر حساس‌تر است [۲۳]. حساسیت به ضربه نمونه‌های A10F و A10 به روش BAM و با استفاده از وزنه ۵ کیلوگرمی انجام شد.

$$E_I = M_W \times H \quad (2)$$

اندازه‌گیری سختی: سختی از خواص مکانیکی مهم مواد منفجره پلاستیکی است که اندازه‌گیری آن در استانداردسازی فرمولاسیون‌های PBX اهمیت دارد. عوامل متعددی در PBXها بر مقدار سختی تأثیرگذار هستند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به درصد فاز جامد، نوع و اندازه ذرات فیلر اشاره کرد. در این تحقیق اندازه‌گیری سختی مطابق استاندارد DIN ۵۳۵۰۴ و با سختی‌سنج Shore D انجام شد. طبق این استاندارد، نمونه بایستی حداقل دارای ضخامت ۶ mm باشد. در سختی‌سنج Shore D، یک سوزن فرورونده با نوک تیز توسط یک فنر به طور عمودی بر سطح نمونه نیرو وارد می‌کند. میزان فرورفتگی سوزن به سختی Shore وابسته است که این مقدار بر روی صفحه مدرج عقربه‌ای قرائت می‌شود. برای انجام آزمون سختی تنها یک نمونه از هر فرمولاسیون با ابعاد ۱۰×۱۰×۶ mm کافی است. سطوح برش خورده نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری سختی Shore D با سمباده نرم (۱۵۰۰) پولیش شدند. بر روی هر نمونه، اندازه‌گیری در ۴ نقطه مختلف که فاصله آن‌ها از یکدیگر حداقل ۴ mm بوده تکرار و میانگین نتایج گزارش شد.

آزمون تنش-کرنش: آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D 412 انجام شد. برای تهیه نمونه‌های آزمون کشش از قالب‌های مستطیلی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج چگالی سنجی

چگالی تجربی محصول به روش غوطه‌وری و با استفاده از ترازوی تجزیه‌ای مجهز به اندازه‌گیری زیر آب اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول (۲) آمده است. در این جدول نتایج با مقادیر چگالی نظری محاسبه‌شده با نرم‌افزار CHEETAH 1.29 مقایسه شدند.

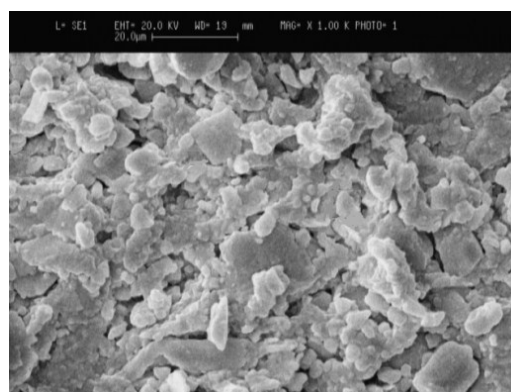
جدول ۲- نتیجه آزمون چگالی سنجی.

A10F	A10	فرمولاسیون
		شکل پودر Al
۱/۶۵۴	۱/۶۵۴	چگالی نظری (g/cm ³)
۱/۶۲۰	۱/۵۸۰	چگالی تجربی (g/cm ³)
۹۷/۹۰۰	۹۵/۵۰۰	TMD%

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پودر ورقه‌ای نانو ساختار به میزان ۲/۵ درصد چگالی تجربی فرمولاسیون را افزایش می‌دهد. این افزایش را می‌توان به لایه‌ای قرار گرفتن ذرات ورقه‌ای و تراکم پذیری بیشتر در مقایسه با ذرات گرانولی میکرونیزه نسبت داد.

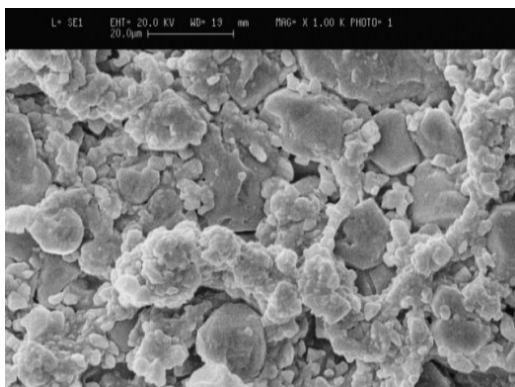
۳-۲- مورفولوژی سطح نمونه‌ها

تصاویر SEM سطح نمونه‌ها با بزرگنمایی ۱۰۰۰x، نشان‌دهنده پوشش مناسب و اتصال ذرات جامد در هر دو فرمولاسیون است. هیچ‌گونه ترک یا حفره‌ای که نمایانگر کیفیت پایین فرایند ساخت باشد، در تصاویر مشاهده نمی‌شود. در شکل (۴)، به دلیل نزدیکی بودن قطر ذرات HMX و ابعاد سطح پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل و همچنین اتصال آن‌ها با بایندر، تشخیص نوع ذرات از یکدیگر مشکل است.



شکل ۴- تصویر SEM از سطح نمونه A10F با بزرگنمایی ۱۰۰۰x.

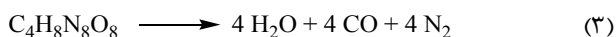
در تصویر SEM نمونه A10F با بزرگنمایی یکسان بیشتر از نمونه A10 است و از طرفی با کاهش اندازه ذرات، میزان تخلخل سطحی کاهش یافته است. به همین دلیل سطح این نمونه یکنواخت‌تر مشاهده می‌شود. نتیجه حاصل با تحقیقات مشابه مطابقت دارد. امانوئل دیاز و همکارانش [۲۴] نشان دادند که با جایگزینی نانو ذرات آلومینیوم Alex با ابعاد ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر به جای پودر آلومینیوم H-15 با ابعاد ۱۲ میکرونی در یک ترکیب پایه پلیمر، تصاویر SEM به دست‌آمده دارای سطح یکنواخت‌تری خواهند بود.



شکل ۵- تصویر SEM از سطح نمونه A10 با بزرگنمایی ۱۰۰۰x.

۳-۳- تأثیر نوع پودر آلومینیوم بر رفتار حرارتی نمونه‌های PBX

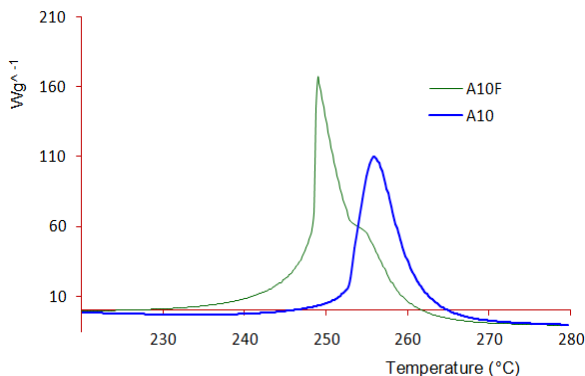
رفتار حرارتی نمونه A10 بر اساس طیف TGA-DSC در شکل (۶) نشان داده شده است. در این طیف، پیک گرماگیر مشاهده شده در دمای ۱۹۲/۸ °C مربوط به انتقال فرم بلوری مونوکلینیک HMX - β به فرم هگزاگونال HMX - δ است که شدت کمی دارد. HMX در فشار محیط دارای چهار پلی مورف بلوری مختلف است که با پیشوندهای α ، β ، γ و δ نشان داده می‌شوند. اختلاف این پلی مورف‌ها در سیستم بلوری، چگالی، پایداری و حساسیت آن‌ها به ضربه است [۲۵]. از بین پلی مورف‌های HMX، فرم β دارای بیشترین پایداری و فرم δ دارای کمترین پایداری در دمای محیط است [۲۶ و ۲۷]. HMX حدوداً در دمای ۲۶۲ °C ذوب‌شده و بلافاصله تجزیه می‌شود. در طیف حاصل، پیک گرماگیر ذوب HMX در محدوده ۲۵۶ °C به دلیل اثر همپوشانی با پیک گرماده بسیار شدید (تجزیه HMX) قابل مشاهده نیست. پیک گرماده در این محدوده مربوط به تجزیه HMX است [۲۸]. واکنش تجزیه خود به خودی HMX به صورت زیر انجام می‌شود:



تخریب بایندر با شیب ملایمی از دمای ۳۵۰ °C شروع می‌شود و ذوب آلومینیوم در محدوده دمایی ۶۵۱ تا ۶۶۲ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد که پیک آن در دمای ۶۵۶/۶۹ °C قابل مشاهده است [۲۹].

از آنجایی که پودر آلومینیوم میکرونیزه دارای ابعاد بزرگ‌تری نسبت به HMX است، به خوبی در تصویر SEM نمونه A10 (شکل ۵) قابل تشخیص است. در این شکل، اتصال ذرات HMX با بایندر بهتر از آلومینیوم انجام شده است. تصاویر SEM از سطح نمونه‌ها تأییدکننده یکنواختی بیشتر ترکیب A10F در مقایسه با A10 است. با کاهش اندازه ذرات پودر آلومینیوم، تعداد ذرات مشاهده شده در واحد سطح

شرایط گرمایش می‌گردد. چنین اثراتی پیش از این در تجزیه حرارتی HMX در حضور نانو ذرات مس و نیکل گزارش شده بود [۳] (۲۸ و ۳۰). شکل (۷) تأثیر کاتالیستی پودر آلومینیوم نانو ساختار را در تجزیه حرارتی HMX در فرمولاسیون A10F نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که تجزیه حرارتی HMX نمونه A10F حاوی ذرات آلومینیوم نانو ساختار در دمای پایین‌تر و با شدت بیشتری نسبت به نمونه A10 حاوی پودر میکرونیزه اتفاق می‌افتد.



شکل ۷- پیک تجزیه حرارتی HMX در نمونه‌های A10F و A10.

۳-۴- حساسیت به ضربه

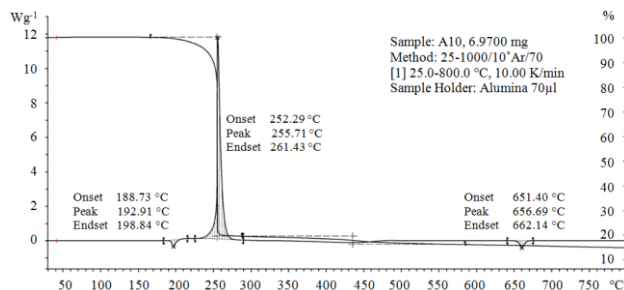
نتایج آزمون حساسیت به ضربه فرمولاسیون‌های A10F و A10 در جدول (۴) گزارش شده است. این آزمون که با وزنه ۵ کیلوگرمی انجام شد نشان می‌دهد که فرمولاسیون A10F در مقایسه با A10 از حساسیت بیشتری نسبت به ضربه برخوردار است؛ چرا که انفجار آن با سقوط وزنه از ارتفاع پایین‌تری آغاز می‌شود. به عبارتی دیگر A10F به انرژی ضربه کمتری برای تحریک نیاز دارد. بنابراین نقش کاتالیستی پودر آلومینیوم نانو ساختار در آغاز انفجار فرمولاسیون در آزمون حساسیت به ضربه همانند تجزیه حرارتی HMX در آزمون آنالیز حرارتی قابل توجه است.

جدول ۴- نتایج آزمون حساسیت به ضربه.

فرمولاسیون		
A10F	A10	جرم وزنه (kg)
۵	۵	ارتفاع وزنه برای آغازش (cm)
۶۰	۶۵	انرژی پتانسیل وزنه (N.m)
۲۹/۴۰	۳۱/۸۵	

۳-۵- نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی

یکنواختی بیشتر ذرات جامد در فرمولاسیون A10F در نتایج آزمون سختی نیز تأثیرگذار بوده است. طبق جدول (۵)، سختی نمونه A10F (حاوی ذرات آلومینیوم ورقه‌ای) در مقایسه با فرمولاسیون A10 (حاوی پودر آلومینیوم میکرونیزه) بیشتر است. دلیل این تفاوت را می‌توان به برهم‌کنش بیشتر بین ذرات و ماتریس به دلیل نسبت سطح به حجم بالای پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل موجود در ترکیب A10F نسبت داد. البته لایه‌ای قرار گرفتن ذرات ورقه‌ای شکل نیز در افزایش سختی نمونه‌های پلیمری بی‌تأثیر نیست [۳۱]. در نتیجه



شکل ۶- طیف DSC-TGA نمونه A10.

طیف به‌دست آمده از نمونه A10F دارای شکل کلی مشابهی است که البته با مقداری جابجایی در پیک‌ها همراه بوده است. جدول (۳) تفاوت محل ظهور پیک‌های دو نمونه A10F و A10 را در دماهای شروع (T_{Onset})، دمای پیک (T_{Peak}) و دمای پایان (T_{Endset}) نشان می‌دهد:

جدول ۳- مقایسه نتایج آزمون DSC نمونه‌های A10F و A10.

نتایج DSC			فرمولاسیون	تغییرات حرارتی
T_{Endset} (°C)	T_{Peak} (°C)	T_{Onset} (°C)		
۱۹۸/۸۴	۱۹۲/۹۱	۱۸۸/۷۳	A10	تغییر
۱۹۶/۹۰	۱۹۱/۸۰	۱۸۷/۳۱	A10F	شکل بلور HMX
۲۶۱/۴۳	۲۵۵/۷۱	۲۵۲/۲۹	A10	تجزیه
۲۵۵/۹۸	۲۵۲/۲۰	۲۴۸/۸۵	A10F	حرارتی HMX
۶۶۲/۱۴	۶۵۶/۶۹	۶۵۱/۴۰	A10	ذوب
۶۵۶/۶۸	۶۵۱/۷۸	۶۴۳/۵۹	A10F	آلومینیوم

طبق نتایج به دست آمده با جایگزین کردن پودر آلومینیوم نانو ساختار به جای پودر میکرونیزه، جابجایی قابل توجهی در نتایج DSC اتفاق می‌افتد. در نمودارهای DSC پارامترهایی همچون نرخ گرمایش، مقدار نمونه استفاده‌شده، حضور ناخالصی یا افزودنی‌ها و اندازه ذرات مواد بر میزان جابجایی پیک‌ها مؤثر است. در این تحقیق تنها شکل و اندازه پودر آلومینیوم تغییر کرده و دیگر پارامترها ثابت نگه داشته شد. استفاده از پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل نانو ساختار موجب جابجایی کلیه پیک‌ها به سمت دمای پایین‌تر شده است. پودر آلومینیوم نانو ساختار در دمای کمتری نسبت به پودر میکرونیزه ذوب می‌شود. حضور ذرات فلزی با ابعاد نانو، کسر تجزیه حالت چگال HMX را افزایش می‌دهد. این پدیده منسوب به اثر سایت‌های واکنش یا نقاط گرمایی موضعی بیشتر و سایت‌های جذب فیزیکی ایجادشده با نانو ذرات است [۲۸]. ضریب هدایت گرمایی بالای ذرات فلزی نانو ساختار منجر به تشکیل نقاط گرمایش موضعی در فرایند تجزیه HMX می‌شود. این نقاط واکنش گرمایی را سبب شده که نهایتاً منجر به ارتقاء فرایند تجزیه خود به خودی بلورهای HMX می‌شوند از طرفی ممکن است محصولات گرماکافت بیشتری به وسیله پودر فلزی نانو ساختار به دام افتاده و باعث ایجاد سایت‌های جذب فیزیکی بیشتری شود. چنین اثراتی منجر به ناپایداری بیشتر HMX تحت

جدول ۶- میانگین نتایج آزمون استحکام کششی.

فرمولاسیون	A10	A10F
پودر آلومینیوم استفاده شده	میکرونیزه	ورقه‌ای نانو ساختار
استحکام کششی (Mpa)	۰/۴۶±۰/۰۲	۰/۶۷±۰/۰۲
کرنش در نقطه شکست (%)	۱۰/۵±۱	۹/۸±۱

افزایش مقادیر سختی و استحکام نمونه A10F که حاوی ذرات آلومینیوم ریزتری است، با رابطه هال-پتچ^۱ مطابقت دارد. طبق معادله (۳)، با کاهش اندازه ذرات (D)، استحکام (σ_y) فرمولاسیون افزایش می‌یابد. نظیر چنین رابطه‌ای برای پارامتر سختی هم وجود دارد [۳۳ و ۳۴].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (۴)$$

اگرچه رابطه هال-پتچ اساساً در خصوص آلیاژهای فلزی کاربرد دارد ولی این تحقیق نشان داد که در ترکیبات پلیمری هم با کاهش اندازه ذرات فاز دوم، به مقادیر استحکام کششی و سختی نمونه افزوده می‌شود. نتایج مشابهی در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است [۳۵ و ۳۶]. به عنوان مثال استفاده از ذرات فیلر ورقه‌ای شکل در نانو کامپوزیت پلیمری بر پایه پلی‌آلفین ترموپلاستیک موجب افزایش استحکام می‌شود [۳۱].

۳-۶- آزمون عملکردی به روش ایجاد دندانه در صفحه

با انفجار چاشنی الکتریکی و به دنبال آن بوستر C4، خرج PBX منفجر شده و اثر آن به صورت یک گودی بر روی صفحه فولادی بجای می‌ماند. اثرات انفجار نمونه‌های A10 و A10F در شکل (۱۰) نشان داده شد.

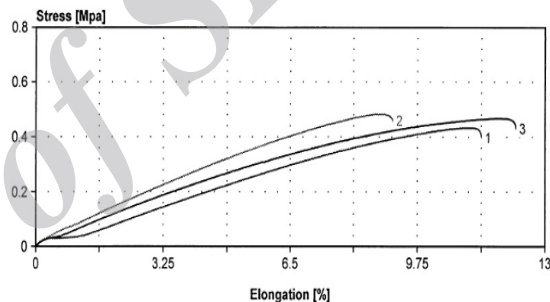
میانگین ابعاد گودی حاصل از انفجار نمونه‌ها در جدول (۷) ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده، برتری نمونه A10F حاوی پودر آلومینیوم نانو ساختار نسبت به نمونه A10 بسیار ناچیز و در برخی موارد کمتر از ۱ درصد است؛ به طوری که می‌توان ادعا کرد این دو فرمولاسیون در شاخصه آزمون ایجاد دندانه در صفحه با یکدیگر برابر هستند. از آنجائی که نتیجه آزمون دندانه با فشار انفجار مواد منفجره مرتبط است [۳۷]، لذا با این نتایج می‌توان PCJ این دو فرمولاسیون را نیز بسیار نزدیک به هم دانست. نتیجه حاصل با کارهای مشابهی که پیش از این انجام شده بود، هماهنگی ندارد. کلیف و همکارانش [۱۷] با مطالعه مخلوط‌های HTPB/RDX/Al و HTPB/RDX/AP/Al نشان دادند که سرعت انفجار و همچنین عمق گودی در آزمون ایجاد دندانه در صفحه با به‌کارگیری نانو ذرات آلومینیوم کروی (Alex® nm) ۲۰۰-۱۰۰ کاهش می‌یابد. از طرفی در سیستم‌های انفجاری TNT/Al و TNT/RDX/Al، استفاده از نانو پودر آلومینیوم موجب

نمونه مقاومت بیشتری در مقابل نفوذ سوزن فرورونده دستگاه سختی‌سنج از خود نشان خواهد داد. مقادیر سختی ثبت شده نشان می‌دهد که ترکیبات حاصل در دسته مواد پلاستیکی نرم قرار می‌گیرند.

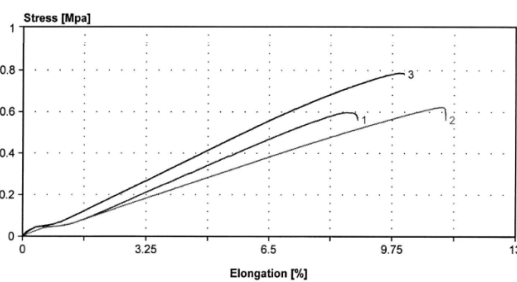
جدول ۵- نتیجه آزمون سختی‌سنجی.

فرمولاسیون	A10	A10F
شکل پودر Al	میکرونیزه	ورقه‌ای نانو ساختار
سختی (Shore D)	۱۶	۱۸

نمودارهای تنش-کرنش نشان می‌دهند که با جایگزین کردن پودر آلومینیوم ورقه‌ای نانو ساختار به جای پودر میکرونیزه در فرمولاسیون، تغییراتی در خواص مکانیکی نمونه اتفاق می‌افتد. مطابق شکل‌های (۸) و (۹)، با جایگزین کردن پودر آلومینیوم ورقه‌ای شکل نانو ساختار به جای پودر میکرونیزه از درصد کرنش (ازدیاد طول) در نقطه شکست کاسته می‌شود.



شکل ۸- نمودار آزمون کشش نمونه A10.



شکل ۹- نمودار آزمون کشش نمونه A10F.

میانگین نتایج به دست آمده از سه آزمون کشش انجام شده بر روی هر نمونه در جدول (۶) ارائه شده است. طبق این جدول، نمونه A10F حاوی ذرات ورقه‌ای آلومینیوم در مقایسه با نمونه A10 دارای استحکام کششی بیشتری است. ذرات آلومینیوم ورقه‌ای شکل به خاطر نسبت سطح به جرم بالا، دارای سطح تماس فیزیکی و برهم‌کنش بیشتری با ماتریس HTPB هستند. به همین دلیل استحکام ترکیب پلیمری مربوطه افزایش می‌یابد. از طرفی توزیع یکنواخت تر ذرات ریزتر هم ممکن است سبب افزایش استحکام نمونه شود [۳۲].

ساختار تأثیر چندانی بر عملکرد انفجاری سیستم HTPB/HMX/Al در شاخصه آزمون ایجاد دندانه در صفحه ندارد.

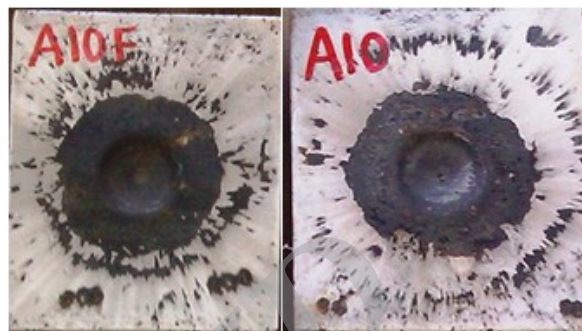
۵- سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مادی سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نرسا انجام شده است. از جناب آقای دکتر سهیل امامیان و سایر همکاران آن سازمان جهت تأمین مواد اولیه و تجهیزات آزمایشگاهی فرایند ساخت، تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Agrawal, J. P. "High Energy Materials, Propellants, Explosives and Pyrotechnics"; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010.
- [2] Antić, G.; Džingalašević, V. "Characteristics of Cast PBX with Aluminum"; Sci. Tech. Rev. 2006, LVI (3-4), 52-58.
- [3] Siviour, C. R.; Gifford, M. J.; Walley, S. M.; Proud, W. G.; Field, J. E. "Particle size effects on the mechanical properties of a polymer bonded explosive"; J. Mater. Sci. 2004, 39, 1255-1258.
- [4] Prakash, V.; Phadke, V. K.; Sinha, R. K.; Singh, H. "Influence of Aluminum on Performance of HTPB-based Aluminized PBXs"; Defence Sci. J. 2004, 54, 475-482.
- [5] Lee, J. S.; Hsu, C. K. "Thermal Properties and Shelf Life of HMX-HTPB Based Plastic-Bonded Explosives"; Thermochim. Acta 2002, 392-393, 153-156.
- [6] Behera, S. "Effect of RDX on Elongation Properties of AP/HTPB Based Case Bonded Composite Propellants"; DRDO Sci. Spectrum 2009, 31-36.
- [7] Colak, O. U. "Mechanical Behavior of PBXW-128 and PBXN-110 under Uniaxial and Multiaxial Compression at Different Strain Rates and Temperatures"; Turkish J. Eng. Environ. Sci. 2004, 28, 55-65.
- [8] Military Standard, A-A-59139 "Aluminum Powder, Atomized (For Use in Explosives)"; 25 September 1998.
- [9] Peuker, J. M.; Krier, H.; Glumac, N. "Particle Size and Gas Environment Effects on Blast and Overpressure Enhancement in Aluminized Explosives"; P. Combust. Inst. 2013, 34, 2205-2212.
- [10] Gelfand, B. E.; Medvedev, S. P.; Khomik, S. V.; Silnikov, M. V. "Comparative Study of Pressure-Temperature Effects from TNT and RDX-IPN-AL Explosions"; Mil. ASPECT Blast Shock - MABS20, Oslo, 2008, 1-8.
- [11] Kubota, N. "Propellants and Explosives, Thermochemical Aspects of Combustion"; Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- [12] Vadhe, P. P.; Pawar, R. B.; Sinha, R. K.; Asthana, S. N.; Rao, S. A. "Cast Aluminized Explosives (Review)"; Combustion, Explosion, and Shock Waves 2008, 44, 461-477.
- [13] Zhi, J.; Shu-Fen, L.; Feng-Qi, Z.; Zi-Ru, L.; Cui-Mei, Y.; Yang, L.; Shang-Wen, L. "Research on the Combustion Properties of Propellants with Low Content of Nano Metal Powders"; Propell., Explos., Pyrotech. 2006, 31, 139-147.
- [14] Kubota, N. "Propellants and Explosives, Thermochemical Aspects of Combustion"; Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- [15] Lu, J. P.; Dorsett, H. E.; Franson, M. D.; Cliff, M. D. "Near-Field Performance Evaluations of Alex Effect in Metallized Explosives"; Report DSTO-TR-1542, Published by DSTO Systems Sciences Laboratory, Edinburgh, Australia, 2003.

ارتقای سرعت انفجار و عمق گودی در آزمون ایجاد دندانه در صفحه می‌شود [۱۵ و ۱۶]. بنابراین مشخص است که اثر پودر آلومینیوم نانو ساختار بر عملکرد مواد منفجره کاملاً وابسته به سایر اجزای فرمولاسیون است و نمی‌توان این گونه تفسیر کرد که به‌کارگیری ذرات نانو سایز همواره موجب بهبود خواص عملکردی مواد منفجره می‌شود.



شکل ۱۰- اثر انفجار نمونه‌های تست شده بر روی صفحه فولادی هدف.

جدول ۷- مقایسه ابعاد گودی حاصل از انفجار نمونه‌ها در آزمون ایجاد دندانه در صفحه.

A10F	A10	فرمولاسیون
۲۵/۲۴	۲۵/۲۵	قطر گودی (mm)
۵۰۰	۴۹۵	مساحت (mm ²)
۸۳	۸۰	حجم گودی (mm ³)
۳/۰۶	۲/۹۸	عمق گودی (mm)

۴- نتیجه‌گیری

شکل و اندازه ذرات پودر آلومینیوم بر خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی ترکیب پلیمری قابل انفجار حاوی ۱۰ درصد آلومینیوم تأثیرگذار است. بررسی سطح برش خورده نمونه حاوی ذرات آلومینیوم ورقه‌ای شکل نانو ساختار (A10F) با میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده یکنواختی بیشتر آن نسبت به فرمولاسیون مشابه حاوی ذرات آلومینیوم میکرونیزه (A10) است. جایگزینی پودر آلومینیوم نانو ساختار به جای پودر آلومینیوم میکرونیزه از طریق لایه‌ای قرار گرفتن ذرات ورقه‌ای و افزایش تراکم پذیری موجب یکنواختی سطح نمونه در تصاویر SEM و ارتقاء چگالی تجربی می‌شود. طبق نتایج آنالیز حرارتی، پودر آلومینیوم نانو ساختار نوعی اثر کاتالیستی بر انتقال فرم بلوری و تجزیه حرارتی ماده منفجره HMX در فرمولاسیون داشته و موجب جابجایی پیک‌های DSC مربوطه به سمت دماهای پایین‌تر می‌گردد. این اثر کاتالیستی، حساسیت به ضربه PBX انفجاری را نیز کاهش می‌دهد. فرمولاسیون حاوی پودر آلومینیوم نانو ساختار دارای سختی و استحکام کششی بیشتر ولی درصد ازدیاد طول (کرنش) کمتری نسبت به فرمولاسیون مشابه حاوی پودر آلومینیوم میکرونیزه است. استفاده از پودر آلومینیوم نانو

- [26] Bedrov, D.; Smith, G. D.; Sewen, T. D. "Molecular Dynamics Simulations of HMX Crystal Polymorphs Using a Flexible Molecule Force Field"; CP620, Shock Compr. Condens. Mater. 2001, 403-406.
- [27] Miller, G. R.; Garroway, A. N. "A Review of the Crystal Structures of Common Explosives Part I: RDX, HMX, TNT, PETN, and Tetryl"; Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375-5320, NRL/MR/6120--01-8585, 2001.
- [28] Li, S.; Jiang, Z.; Yu, S. "Thermal Decomposition of HMX Influenced by Nano-Metal Powders in High Energy Fuel"; Fuel Chem. Div. Prep. 2002, 47, 596.
- [29] Yaws, C. L. "Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals"; Chemical Properties Handbook: McGraw-Hill, 1999.
- [30] Dubey, R.; Srivastav, P.; Kapoor, I. P. S.; Singh, G.; "Synthesis, Characterization and Catalytic Behavior of Cu Nanoparticles on the Thermal Decomposition of AP, HMX, NTO and Composite Solid Propellants"; Thermochim. Acta 2012, 549, 102-109.
- [31] Paul, D. R.; Robeson, L. M. "Polymer Nanotechnology: Nanocomposites"; Polymer 2008, 49, 3187-3204.
- [32] Onuegbu, G. C.; Igwe, I. O. "The Effects of Filler Contents and Particle Sizes on the Mechanical and End-Use Properties of Snail Shell Powder Filled Polypropylene"; Mater. Sci. Appl. 2011, 2, 811-817.
- [33] Morris, J. W. "The Influence of Grain Size on the Mechanical Properties of Steel"; Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.
- [34] Hansen, N. "Hall-Petch Relation and Boundary Strengthening"; Scripta Mater. 2004, 51, 801-806.
- [35] Zhang, S.; Cao, X. Y.; Ma, Y. M.; Ke, Y. C.; Zhang, J. K.; Wang, F. S. "The Effects of Particle Size and Content on the Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Al₂O₃/High Density Polyethylene (HDPE) Composites"; Express Polym. Lett. 2011, 5, 581-590.
- [36] Bose, S.; Mahanwar, P. A. "Effect of Particle Size of Filler on Properties of Nylon-6"; J. Min. Mater. Ch. Eng. 2004, 3, 23-31.
- [37] Suceska, M. "Test Methods for Explosives"; Springer-Verlag, New York, 1995.
- [16] Brousseau, P.; Cliff, M. D. "The Effect of Ultrafine Aluminum Powder on the Detonation Properties of Various Explosives"; 32nd International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, FRG, July 3-6, 2001.
- [17] Cliff, M. D.; Dexter, R. M.; Watt, D. S. "The Effect of Electroexploded Aluminum (Alex) on Detonation Velocity and Pressure"; Report DSTO-TR-0999 (Limited Release), DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne, Australia, 2000.
- [18] Brousseau, P.; Anderson, C. J. "Nanometric Aluminum in Explosives"; Propell., Explos., Pyrotech. 2002, 27, 300-306.
- [19] Miller, P. J.; Bedford, C. D.; Davis, J. J. "Effect of Metal Particle Size on the Detonation Properties of Various Metallized Explosives"; 11th Symposium (International) on Detonation, Snowmass Village, Village, Colorado, August 31-September 4 1998, pp. 214-220.
- [20] Tulis, A. J.; Sumida, W. K.; Dillon, J.; Comeyne, W.; Heberlein, D. C. "Submicron Aluminum Particle Size Influence on Detonation of Dispersed Fuel-Oxidizer Powders"; Arch. Comb. 1998, 18, 157-164.
- [21] Maggi, F. "Curing Viscosity of HTPB-Based Binder Embedding Micro and Nano-Aluminum Particles"; Propell., Explos., Pyrotech. 2014, 39, 1-7.
- [۲۲] ملائی، احمد؛ رحیمی پور، محمد رضا؛ دهنوی، محمد علی "اثر پودر آلومینیوم بر قابلیت نفوذ یک نمونه خرج گود خاص"، مجله علمی پژوهشی مواد پرانرژی، سال دهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۲۵، ۳۹-۳۱، بهار ۱۳۹۴.
- [۲۳] "اکتوزن (HMX) - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون"، ویرایش اول، استاندارد دفاعی ایران، پیش‌نویس ۱۹۵، (۱۳۸۶).
- [24] Diaz, E.; Brousseau, P.; Ampleman, G.; Prud'homme, R. E. "Polymer Nanocomposites from Energetic Thermoplastic Elastomers and Alex@"; Propell., Explos., Pyrotech. 2003, 28, 210-215.
- [25] Liu, S.; Chang, J.; Wei, D. Q.; Chen, X. R.; Zhang, Q. M.; Gong, Z. Z.; Ji, G. F.; Guo, Y. X. "Properties and Phase Transitions of the Solid β -HMX: Different Force Fields"; J. At. Mol. Sci., 2012, 3, 41-48.