

بررسی تأثیر اکسید آهن بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های جامد مرکب

نواب فتحی^۱ و محمدعلی دهنوی^۲

۱- کارشناس ارشد پیشرانه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات موسم، navvab_fathi@yahoo.com
۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات موسم (نویسنده مخاطب)،
mdehnavi@iust.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۱/۸/۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۲/۲/۲۱، پذیرش: ۹۲/۲/۲۴)

حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های جامد مستقیماً بر دقت و عملکرد موتور راکت تأثیرگذار است. در این تحقیق، تأثیر مواد افزودنی از قبیل اکسید آهن (IO) بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های جامد مرکب بر پایه HTPB با انجام آزمون‌های سرعت سوزش، آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA)، دانسیته (براساس استاندارد نظامی) و دمای خوداشتعالی بررسی شده است. همچنین، تأثیر نسبت‌های متفاوت درشت به ریز ذرات اکسیدکننده آمونیوم پرکلرات (AP) بر حساسیت دمایی مطالعه شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که با افزودن اکسید آهن و همچنین کاهش نسبت درشت به ریز ذرات AP سرعت سوزش افزایش می‌یابد. تحلیل حرارتی دیفرانسیلی (DTA) نشان داد که دمای تجزیه AP با افزودن اکسید آهن کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به نتایج آزمون دمای خوداشتعالی، مشخص شد که دمای خوداشتعالی با افزودن اکسید آهن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج به‌دست آمده نشان داد حساسیت دمایی با افزودن اکسید آهن و همچنین با کاهش نسبت درشت به ریز ذرات AP کاهش می‌یابد. در پیشرانه‌های AP/HTPB/IO و AP/HTPB با نسبت‌های پایین درشت به ریز ذرات AP، افزایش دمای سطح سوزش سبب کاهش حساسیت دمایی می‌شود. کمترین مقدار برای حساسیت دمایی زمانی مشاهده می‌شود که ذرات ریز AP و IO با هم مخلوط شوند.

کلیدواژگان: پیشرانه‌های مرکب، سرعت سوزش، حساسیت دمایی، دمای خوداشتعالی، DTA

مقدمه

حساسیت دمایی سرعت سوزش به دمای اولیه پیشرانه به‌صورت درصد تغییر سرعت سوزش به‌ازای یک درجه تغییر دمای پیشرانه در یک محدوده دمایی در فشار ثابت محفظه احتراق تعریف می‌شود و با علامت σ_p نمایش داده می‌شود. حساسیت دمایی سرعت سوزش به دمای اولیه پیشرانه (σ_p) اثرات فرمولاسیون پیشرانه به وابستگی دمایی سرعت سوزش را اندازه می‌گیرد که مستقل از طراحی موتور است [۱-۴]. ضریب حساسیت دمایی سرعت سوزش در فشار ثابت محفظه احتراق با معادله (۱) نمایش داده می‌شود [۵-۷]:

$$\sigma_p = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial r}{\partial T_0} \right]_p = \left[\frac{\partial \ln r}{\partial T_0} \right]_p \quad (1)$$

که در اینجا r (m/s) سرعت سوزش پیشرانه جامد، T_0 (K) دمای اولیه پیشرانه و p (MPa) فشار تعادلی محفظه احتراق است. در این معادله، σ_p دارای واحد $1/K$ است. حساسیت دمایی سرعت سوزش یک متغیر مهم برای تولیدکنندگان پیشرانه و طراحان موشک است، چرا که به‌طور مستقیم بر دقت و عملکرد و هزینه سیستم پیشران‌ش تأثیر می‌گذارد. مشخص شده است که مقادیر پایین حساسیت دمایی علاوه بر اینکه باعث عملکرد مطلوب موشک‌ها و راکت‌ها در محدوده وسیعی از دماها می‌شود، در کاهش هزینه سیستم‌های تسلیحاتی و موشکی بسیار مؤثر است. نتایج مطالعات انجام‌شده نشان

می‌دهد که حساسیت دمایی سرعت سوزش در مکانیزم احتراق و نیز متناسب کردن ویژگی‌های بالستیکی پیشرانه نقش کلیدی ایفاء می‌کند، چرا که کاهش حساسیت دمایی سرعت سوزش، پایداری احتراق در موتورهای راکت را افزایش می‌دهد که نتیجه آن بهبود خواص بالستیکی است [۸-۶، ۵، ۳].

کوبوتا و آکوهارا در سال ۱۹۸۶ حساسیت دمایی پیشرانه‌های دویایه مرکب اصلاح‌شده حاوی سیکلوتترامتیلن‌ترانیتراآمین (CMDB-HMX) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد هنگامی که کسر جرمی HMX در فشار ثابت افزایش یابد، حساسیت دمایی سرعت سوزش کاهش می‌یابد [۹]. همچنین کوبوتا و میازاکی در سال ۱۹۸۷ اثر اندازه ذرات آمونیوم پرکلرات (AP) و کاتالیست بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های مرکب AP/HTPB را مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که حساسیت دمایی با ریزتر شدن اندازه ذرات AP کاهش می‌یابد. در ضمن حساسیت دمایی سرعت سوزش با افزودن ۲،۲- بیس (اتیل فروسنیل) پروپان (BEFP) در AP کاهش می‌یابد. شواهد حاکی از آن است که حساسیت دمایی با افزودن BEFP، در مقایسه با افزودن ذرات ریز AP، به طور مؤثرتری کاهش می‌یابد [۱۰]. کوبوتا و میاتا در سال ۱۹۹۰ اثر افزودن استرانسیم کربنات بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های AP/HTPB را مطالعه کردند و مشاهده کردند که با افزودن ۲ درصد استرانسیم کربنات در فشار ۱ MPa دمای سطح سوزش افزایش یافته و مقدار σ_p کاهش می‌یابد [۱۱]. در سال ۱۹۹۱، نگوین تأثیر متغیرهای فرمولاسیون پیشرانه از قبیل دما و فشار، درصد و توزیع اندازه ذرات AP، اندازه و درصد سوخت فلزی، بایندر^۱ و افزودنی‌ها بر حساسیت دمایی سرعت سوزش را در پیشرانه‌های آلومنیوم‌دار و بدون آلومنیوم و همچنین در پیشرانه‌های گلیسیدیل آزید پلیمر (GAP) مطالعه کرد. نتایج تحقیقات وی نشان داد که در پیشرانه‌های بر پایه AP با بایندر بی‌اثر و فاقد آلومنیوم، با پهن شدن توزیع اندازه ذرات AP، مقادیر σ_p افزایش می‌یابد، ولی هنگامی که گستره توزیع اندازه ذرات AP باریک باشد، با افزایش اندازه ذرات ریز یا کاهش اندازه ذرات درشت، مقدار σ_p کاهش می‌یابد. افزودنی‌ها، به‌ویژه تعدیل‌کننده‌های سرعت سوزش، حساسیت σ_p به توزیع اندازه ذرات AP را کاهش می‌دهند و هم‌زمان سبب کاهش خود σ_p نیز می‌شوند. تعدیل‌کننده‌های سرعت سوزش محتوی آهن مانند اکسیدهای آهن، فروسن‌ها و BEFP در کاهش مقادیر σ_p مؤثرند. در پیشرانه‌های AP با بایندر بی‌اثر و دارای آلومنیوم، ارتباط میان آلومنیوم و اندازه و درصد AP پیچیده است. افزودن آلومنیوم وابستگی σ_p به توزیع اندازه ذرات AP را کاهش می‌دهد. بور و افزودنی‌های حاوی بور به‌طور ویژه‌ای مقادیر σ_p را کاهش می‌دهند که در برخی موارد حتی به صفر می‌رسد. نوع بایندر اثر قابل توجهی بر σ_p داشته، به‌طوری که با تغییر نوع بایندر، σ_p با ضریب ۵ تغییر می‌کند. به‌طور کلی σ_p با افزایش دما یا با افزایش فشار کاهش می‌یابد. همچنین σ_p پیشرانه‌های GAP در مقایسه با پیشرانه‌های AP با بایندر بی‌اثر یا پیشرانه‌های دویایه به طور مشخصی بالاتر است [۳]. نگوین همچنین در سال ۱۹۹۶ تأثیر افزودن ترکیبات فروسنی (کاتوسن و بوتاسن) بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های AP/HTPB را مطالعه کرد و نتیجه گرفت که افزودن ترکیبات فروسنی منجر به کاهش حساسیت دمایی می‌شود [۱۲]. در سال ۱۹۹۹، آتوود و همکارانش اثر فشار بر حساسیت دمایی سرعت سوزش AP، HMX، آمونیوم دی‌نیتراآمید (ADN)، سیکلو تری متیلن تری نیتراآمین (RDX)، هگزا نیترو هگزا آزاترا سیکلو دودکان (CL-20) و هیدرازینیوم نیتروفرمات (HNF) را مطالعه کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد هنگامی که فشار افزایش یابد حساسیت دمایی سرعت سوزش کاهش می‌یابد و این مورد اغلب برای CL-20 مشاهده می‌شود و AP تنها استثناء برای این مشاهدات است. نتایج مطالعات نشان داد که RDX در فشارهای زیر ۴ MPa، کمترین مقدار حساسیت دمایی را داراست [۱۳]. در سال ۲۰۰۱، کولکاری و همکارانش تأثیر برخی افزودنی‌های فلزی از قبیل لیتیوم فلوراید، استرانسیم کربنات، کرومیت مس و اکسید آهن و همچنین تأثیر درصد این افزودنی‌ها بر حساسیت دمایی را مطالعه کردند. این محققان نتیجه گرفتند که افزودن اکسید آهن می‌تواند به‌طور هم‌زمان موجب افزایش

سرعت سوزش و کاهش حساسیت دمایی شود [۶]. در سال ۲۰۰۶، لی و همکارانش تأثیر افزودن آمونیوم اگزالات و مخلوط آمونیوم اگزالات/ استرانسیم کربنات بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانده‌های مرکب بر پایه AP/HTPB را مطالعه کردند. نتایج آزمایش‌ها آن‌ها نشان داد که در حضور آمونیوم اگزالات یا مخلوط آمونیوم اگزالات/ استرانسیم کربنات، حساسیت دمایی سرعت سوزش به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. شواهد حاکی از آن است که حساسیت دمایی با افزودن مخلوط آمونیوم اگزالات/ استرانسیم کربنات، در مقایسه با آمونیوم اگزالات، به میزان بیشتری کاهش می‌یابد [۷].

عوامل مؤثر بر حساسیت دمایی

به‌طور معمول در رابطه با عوامل مؤثر بر حساسیت دمایی توافق عمومی وجود ندارد، اما نتایج تجربی به‌دست آمده نشان می‌دهد که حساسیت دمایی با دمای اولیه تغییر می‌کند. حساسیت دمایی سرعت سوزش به‌وسیله برخی عوامل نظیر دمای اولیه پیشرانده، فشار، درصد و اندازه ذرات اکسیدکننده، درصد و اندازه ذرات سوخت فلزی، نوع بایندر و افزودنی‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. سرعت سوزش پیشرانده‌های جامد به دمای اولیه پیشرانده بستگی دارد. از آنجا که سرعت سوزش از طریق میزان حرارت منتقل شده از فاز گازی به سطح سوزش و حرارت تولید شده در سطح سوزش تعیین می‌شود، در نتیجه اثرات تغییرات دمای اولیه پیشرانده بر سطح سوزش به تعادل حرارتی در سطح سوزش پیشرانده بستگی دارد. به‌طور کلی سرعت واکنش‌های شیمیایی با افزایش دما افزایش می‌یابد و نشان‌دهنده این است که سرعت واکنش موج احتراق پیشرانده جامد با افزایش دمای اولیه پیشرانده افزایش می‌یابد [۱۴، ۱۰، ۳، ۲].

تأثیر دمای اولیه بر سرعت سوزش به صورت‌های زیر تحلیل می‌شود [۷]:

- ۱- هنگامی که دمای اولیه تغییر می‌کند، میزان حرارت جذب شده توسط پیشرانده نیز تغییر کرده که این امر به علت تغییر در حرارت خالص آزاد شده از فاز متراکم و تغییر سرعت سوزش است.
- ۲- هنگامی که دمای اولیه کاهش می‌یابد، دمای شعله نهایی و همچنین شار حرارتی از فاز گازی به سطح سوزش نیز کاهش یافته و در نتیجه سرعت سوزش کاهش می‌یابد.
- ۳- هنگامی که دمای اولیه پیشرانده کاهش می‌یابد، درصد تجزیه AP از طریق واکنش گرماگیر افزایش یافته و در نتیجه سرعت سوزش کاهش می‌یابد.

۴- هنگامی که دمای اولیه پیشرانده کاهش می‌یابد، ذرات اکسیدکننده حرارت داده شده، در مدت زمان کوتاه به‌سختی ذوب می‌شوند. این کاهش در کسر AP تجزیه شده در لایه زیرسطحی و همچنین کسر AP واکنش‌دهنده با بایندر باعث می‌شود حرارت آزاد شده از واکنش فاز متراکم کاهش یابد که نتیجه آن کاهش سرعت سوزش است.

به‌طور کلی سرعت سوزش مواد پرانرژی r با مشخص بودن دو پارامتر تعیین می‌شود. یکی پارامتر فاز گازی ϕ است که با خواص فیزیکی و شیمیایی در فاز گازی تعیین شده و دیگری پارامتر فاز متراکم ψ است که با خواص فیزیکی و شیمیایی در فاز متراکم تعیین می‌شود [۱۵، ۱۰، ۷].

$$r = \alpha_s \phi / \psi \quad (۲)$$

که مقادیر α_s ، ϕ و ψ با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\alpha_s = \lambda_s / \rho_p C_p, \quad \phi = (dT/dx)_{s,g}, \quad \psi = T_s - T_0 - Q_s / C_p$$

که در اینجا α_s (m²/s) نفوذپذیری حرارتی در سطح سوزش، ϕ (K/m) گرادیان دمایی در منطقه گازی در سطح سوزش، T_s (K) دما در سطح سوزش، ψ (K) دما در فاز جامد، Q_s (kJ/kg) گرمای واکنش در سطح سوزش، C_p (kJ/kg K) ظرفیت گرمایی در فاز متراکم، ρ_p (kg/m³) دانسیته فاز متراکم و λ_g (kJ/ms K) هدایت حرارتی در فاز گازی است. وقتی از شکل

لگاریتمی معادله سرعت سوزش نسبت به دمای اولیه در فشار ثابت مشتق‌گیری شود، معادله حساسیت دمایی مطابق با معادله (۳) تا (۵) به‌دست می‌آید.

$$\sigma_p = (\partial \ln \varphi / \partial T_0)_p - (\partial \ln \psi / \partial T_0)_p = \Phi + \Psi \quad (۳)$$

که در اینجا

$$\Phi = (\partial \ln \varphi / \partial T_0)_p \quad (۴)$$

$$\Psi = -(\partial \ln \psi / \partial T_0)_p = \frac{1 - (\partial T_s / \partial T_0)_p}{T_s - T_0 - Q_s / C_p} \quad (۵)$$

از معادله (۳) مشخص می‌شود که حساسیت دمایی شامل دو پارامتر Φ و Ψ است. در اینجا Φ حساسیت دمایی فاز گازی نامیده شده که با پارامترهای فاز گازی تعیین می‌شود و Ψ حساسیت دمایی فاز متراکم نامیده شده که با پارامترهای فاز متراکم تعیین می‌شود و در مقایسه با حساسیت دمایی فاز گازی نقش برجسته‌تری را در σ_p ایفا می‌کند. هر دو این پارامترها دارای واحد (۱/K) هستند [۱۵،۱۰].

تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که با افزایش درصد AP، کاهش اندازه ذرات AP و کاهش فشار می‌توان حساسیت دمایی را کاهش داد. این موضوع به ساختار شعله نفوذی ایجادشده در سطح سوزش نسبت داده می‌شود. از آنجا که شعله نفوذی اولیه برپایه برهم‌کنش میان گازهای حاصل از تجزیه اکسیدکننده و سوخت تشکیل می‌شود، اندازه ذره اکسیدکننده مستقیماً بر میزان حرارت برگشتی و همچنین سرعت سوزش تأثیرگذار است. در صورتی که درصد AP در فرمولاسیون پیشرانه ثابت بماند، سرعت سوزش با کاهش اندازه ذرات AP افزایش می‌یابد، هرچند که اثر اندازه ذرات در فشارهای بالاتر کاهش می‌یابد. افزایش در درصد AP و کاهش اندازه ذرات AP، علاوه بر افزایش سرعت سوزش، سبب افزایش دمای سطح و دمای شعله نیز می‌شود [۱۹-۱۷،۳،۱].

جایگزینی AP با آلومینیوم سبب افزایش σ_p می‌شود، چرا که دمای شعله نفوذی، سرعت سوزش و دمای سطح همگی کاهش می‌یابند که نتیجه کلی آن‌ها افزایش حساسیت دمایی است. با وجود این تأثیر درصد آلومینیوم به‌شدت به توزیع اندازه ذرات AP بستگی دارد [۱۶،۱۵،۳]. حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های AP/HTPB با افزودن اکسید آهن کاهش می‌یابد. با توجه به مطالعات گسترده، مشخص شده است که تعدیل‌کننده‌های بالستیکی عمدتاً در فاز متراکم فعالیت می‌کنند. بنابراین، حساسیت دمایی واکنش فاز متراکم نقش برجسته‌تری را در σ_p ، نسبت به واکنش‌های فاز گازی، ایفا می‌کند. حساسیت دمایی واکنش فاز گازی نسبتاً مستقل از خواص فیزیکی و شیمیایی اجزای ترکیبی پیشرانه است و در نتیجه اثر کمتری بر σ_p دارد [۱۱،۷].

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر اکسید آهن و نسبت درشت به ریز ذرات آمونیوم پرکلرات بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های جامد مرکب بر پایه AP/HTPB است.

جزئیات آزمایش‌های انجام‌شده

در این تحقیق، برای تولید فرمولاسیون‌های پیشرانه از آمونیوم پرکلرات به‌عنوان اکسیدکننده، HTPB به‌عنوان بایندر و از پودر آلومینیوم با اندازه ذرات $14 \mu\text{m}$ به‌عنوان سوخت فلزی استفاده شد. ذرات آمونیوم پرکلرات استفاده شده در این تحقیق در دو اندازه ذره $400 \mu\text{m}$ و $80 \mu\text{m}$ بود. اکسید آهن با بخشی از آمونیوم پرکلرات جایگزین شد. نسبت‌های درشت به ریز ذرات AP مورد مطالعه در این تحقیق «۲۰ به ۵۰» و «۵۰ به ۵۰» بود. در فرمولاسیون‌های B-1 و FB-2 نسبت درشت به ریز ذرات آمونیوم پرکلرات ۵۰ به ۵۰ است. فرمولاسیون‌های F-2 و FB-2 حاوی ۱/۳۶ درصد اکسید آهن‌اند. فرمولاسیون پیشرانه‌های تهیه‌شده و نحوه جایگزینی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- اجزا و ترکیب درصد فرمولاسیون پیشرانه‌های تهیه‌شده در این تحقیق

نام فرمولاسیون پیشرانه	اجزا	درصد جرمی
پایه	آمونیم پرکلرات	۶۸
	بایندر	۱۵
	آلومنیوم	۱۷
F-2	آمونیم پرکلرات	۶۶/۶۴
	بایندر	۱۵
	آلومنیوم	۱۷
	اکسید آهن	۱/۳۶
B-1	آمونیم پرکلرات درشت	۳۴
	آمونیم پرکلرات ریز	۳۴
	بایندر	۱۵
	آلومنیوم	۱۷
FB-2	آمونیم پرکلرات	۶۸
	بایندر	۱۵
	آلومنیوم	۱۷
	اکسید آهن	۱/۳۶

فرمولاسیون‌های پیشرانه تولیدشده مطابق با ترکیب درصد جدول ۱ در معرض آزمون‌های سرعت سوزش، دانسیته، دمای خوداشتعالی و آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA) قرار گرفتند. آزمون سرعت سوزش با دستگاه بمب کرافورد براساس استاندارد MIL-STD-286C در فشار ثابت ۷۰ bar و در سه دمای ۲۵-، ۲۵+ و ۶۰+ °C انجام شد. بدین منظور ابتدا چهار نمونه از هر فرمولاسیون تهیه شده و سرعت سوزش آن‌ها در سه دمای ذکرشده در بالا اندازه‌گیری شد. میانگین نتایج حاصل از چهار نمونه بیانگر سرعت سوزش فرمولاسیون مورد نظر در دمای مذکور است. حداکثر میزان خطای اندازه‌گیری برابر با مقدار میانگین ضرب در ۰/۰۲۸ mm/sec است و نتایج با سطح اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شده‌اند. برای انجام آزمون خوداشتعالی از فرمولاسیون‌های نیم‌گرمی استفاده شد و نرخ حرارت‌دهی °C/min ۱۰ بود. بدین منظور ابتدا سه نمونه نیم‌گرمی از هر فرمولاسیون تهیه شده و دمای خوداشتعالی آن‌ها اندازه‌گیری شد. میانگین نتایج حاصل از سه نمونه بیانگر دمای خوداشتعالی فرمولاسیون مورد نظر است. میزان خطای اندازه‌گیری حداکثر °C ۲/۲± است و نتایج با سطح اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شده‌اند. آزمایش‌های آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA) با دستگاه آنالیزکننده TG/6300DTA، ساخت شرکت ژاپنی SII نانوتکنولوژی انجام شدند. وزن فرمولاسیون مورد استفاده در این دستگاه حداکثر ۲۰۰ mg بوده و محدوده دمای عملکردی دستگاه از دمای اتاق تا °C ۱۳۰۰ است. آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA) به منظور تعیین نقش کاتالیست (اکسید آهن) بر فرایند تجزیه AP و همچنین بررسی اثر اکسید آهن بر سرعت سوزش پیشرانه‌های مرکب AP/HTPB به کار می‌رود. در این تحقیق، رفتار تجزیه حرارتی فرمولاسیون‌های پیشرانه تهیه‌شده با استفاده از آزمایش DTA، در محدوده دمایی ۳۰ تا °C ۶۰۰ تحت اتمسفر نیتروژن (۲۰ ml/min) و با نرخ حرارت °C/min ۵ بررسی شدند. محدوده اندازه‌گیری دستگاه DTA مورد استفاده $(\pm 0.06 / 1000 \mu V)$ است.

نتایج و بحث

دانسیته

نتایج اندازه‌گیری دانسیته برای فرمولاسیون‌های پیشرانه تولیدشده مطابق با ترکیب درصد اجزای داده‌شده در جدول ۱ در جدول ۲ آمده است. عدم قطعیت مبسوط اندازه‌گیری حداکثر (gr/cm^3) ± 0.002 است و براساس عدم قطعیت استاندارد ضرب در ضریب پوشش $K=2$ با سطح اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شده است.

جدول ۲- دانسیته فرمولاسیون‌های پیشرانه تولیدشده

نام فرمولاسیون پیشرانه	دانسیته نهایی (gr/cm^3)
پایه	۱/۷۱۲
F-2	۱/۷۲۸
B-1	۱/۷۲۰
FB-2	۱/۷۳۴

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، دانسیته فرمولاسیون «F-2»، $1/728 \text{ gr/cm}^3$ است که از دانسیته فرمولاسیون پایه $(1/712 \text{ gr/cm}^3)$ بیشتر است. این افزایش دانسیته ناشی از جایگزینی بخشی از ذرات آمونیوم پرکلرات با دانسیته کم $(1/950 \text{ gr/cm}^3)$ با ذرات اکسید آهن با دانسیته بالا $(5/242 \text{ gr/cm}^3)$ است که در نهایت سبب افزایش دانسیته نهایی می‌شود. دانسیته فرمولاسیون «B-1»، $1/720 \text{ gr/cm}^3$ است که از دانسیته فرمولاسیون پایه $(1/712 \text{ gr/cm}^3)$ بیشتر است. چون ذرات ریز آمونیوم پرکلرات فضاهای خالی بین ذرات درشت آمونیوم کلرات را پر کرده و سبب افزایش فشردگی و تراکم نمونه می‌شوند که نتیجه کلی آن افزایش دانسیته نهایی فرمولاسیون «B-1» در مقایسه با فرمولاسیون پایه است. دانسیته فرمولاسیون «FB-2»، $1/734 \text{ gr/cm}^3$ است که از دانسیته فرمولاسیون پایه $(1/712 \text{ gr/cm}^3)$ بیشتر است. این رفتار ناشی از اثر همزمان کاتالیست اکسید آهن و اثر اندازه ذره است. به دو دلیل این افزایش در دانسیته نهایی مشاهده می‌شود؛ دلیل اول ناشی از جایگزینی بخشی از ذرات آمونیوم پرکلرات با دانسیته کم $(1/950 \text{ gr/cm}^3)$ با ذرات اکسید آهن با دانسیته بالا $(5/242 \text{ gr/cm}^3)$ است و دلیل دوم آن است که ذرات ریز آمونیوم پرکلرات فضاهای خالی بین ذرات درشت آمونیوم کلرات را پر کرده و در نتیجه سبب افزایش فشردگی و تراکم نمونه می‌شوند و تلفیق این دو اثر سبب افزایش دانسیته نهایی فرمولاسیون «FB-2» نسبت به فرمولاسیون‌های پایه، «B-1» و «F-2» است.

دمای خوداشتعالی

از این آزمون جهت اندازه‌گیری دمای آتش‌گیری خودبه‌خود پیشرانه استفاده می‌شود و به دو طریق صورت می‌پذیرد.

۱- از طریق حرارت‌دادن منظم

۲- از طریق حرارت‌دادن ناگهانی

این آزمون‌ها حداکثر دمایی را که پیشرانه حین تولید یا مصرف می‌تواند در معرض آن قرار گیرد مشخص می‌کند. نتایج دمای خوداشتعالی فرمولاسیون‌های پیشرانه تولیدشده در جدول ۳ آمده است.

به‌طور کلی حضور تسریع‌کننده‌های سرعت سوزش در فرمولاسیون پیشرانه سبب کاهش دمای خوداشتعالی پیشرانه می‌شود. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، دمای خود اشتعالی فرمولاسیون «F-2» $(282/9^\circ\text{C})$ پایین‌تر از دمای خوداشتعالی فرمولاسیون پایه $(302/1^\circ\text{C})$ است. این کاهش نشان می‌دهد که افزودن اکسید آهن به فرمولاسیون پیشرانه،

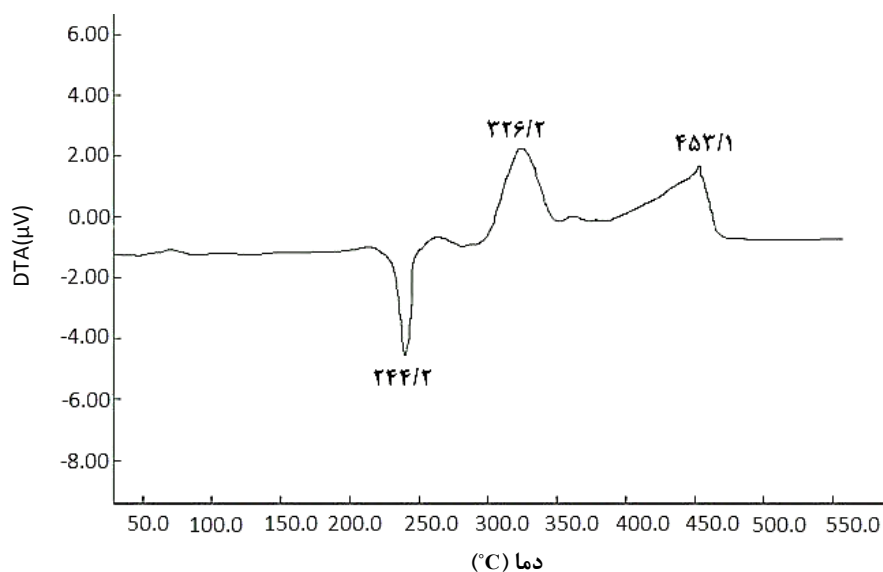
منجر به تسریع واکنش‌های هم‌فاز گازی و هم‌فاز متراکم شده و همچنین باعث جابه‌جایی دمای اشتعال و تجزیه حرارتی پیش‌ران به دماهای پایین‌تر می‌شود [۲۳]. دمای خوداشتعالی فرمولاسیون «B-1» ($297/0^{\circ}\text{C}$) پایین‌تر از دمای خوداشتعالی فرمولاسیون پایه ($302/1^{\circ}\text{C}$) است. به‌طور کلی با کاهش اندازه ذرات AP و یا به عبارت دیگر با کاهش نسبت درشت به ریز ذرات AP، انرژی فعالسازی واکنش تجزیه AP کاهش یافته و این مسئله سبب کاهش دمای اشتعال و دمای تجزیه حرارتی AP می‌شود که نتیجه کلی این تغییرات افزایش سرعت سوزش است. دمای خوداشتعالی فرمولاسیون «FB-2» ($277/7^{\circ}\text{C}$) بسیار پایین‌تر از دمای خود اشتعالی فرمولاسیون پایه ($302/1^{\circ}\text{C}$) است. این مشاهدات ناشی از اثر هم‌زمان کاتالیست اکسید آهن و اثر اندازه ذره است. چرا که از یک طرف افزودن اکسید آهن به فرمولاسیون پیش‌ران منجر به تسریع واکنش‌های فاز گازی یا متراکم شده و همچنین باعث کاهش دمای اشتعال و دمای تجزیه حرارتی پیش‌ران می‌شود و از طرف دیگر با کاهش اندازه ذرات AP و یا به عبارت دیگر با کاهش نسبت درشت به ریز ذرات AP، انرژی فعالسازی واکنش تجزیه AP کاهش یافته و این امر سبب کاهش دمای اشتعال و دمای تجزیه حرارتی AP می‌شود. نتیجه کلی این دو اثر کاهش زیاد دمای خوداشتعالی فرمولاسیون «FB-2» در مقایسه با فرمولاسیون‌های پایه، «B-1» و «F-2» است.

جدول ۳- دمای خوداشتعالی فرمولاسیون‌های پیش‌ران تولیدشده

نام فرمولاسیون پیش‌ران	دمای خوداشتعالی ($^{\circ}\text{C}$)
پایه	۳۰۲/۱
F-2	۲۸۲/۹
B-1	۲۹۷/۰
FB-2	۲۷۷/۷

آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA)

شکل ۱ منحنی DTA برای تجزیه فرمولاسیون پایه را نشان می‌دهد. آنالیز حرارتی دیفرانسیلی به منظور مطالعه اثر افزودن اکسید آهن بر دمای تجزیه آمونیوم پراکلرات و همچنین برای بررسی تأثیر افزودنی مذکور بر سرعت سوزش پیش‌ران‌های مرکب بر پایه AP/HTPB به کار می‌رود.



شکل ۱- منحنی DTA برای فرمولاسیون پایه با نرخ حرارت‌دهی $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تحت اتمسفر نیتروژنی با نرخ جریان $20\text{ml}/\text{min}$

با توجه به شکل ۱، در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۲۵۰°C بیشینه گرماگیری مشاهده می‌شود که مربوط به تغییر شکل فازی از ساختمان کریستالی آرتورومبیک به مکعبی است. در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰°C بیشینه گرمایی مشاهده شده متناظر با تجزیه جزئی AP و تشکیل حدواسط $\text{NH}_3:\text{HClO}_4$ است. در واکنش (۶) مکانیزم انتقال پروتون تجزیه مرحله اول آمونیوم پرکلرات نشان داده شده است [۲۱،۲۰].

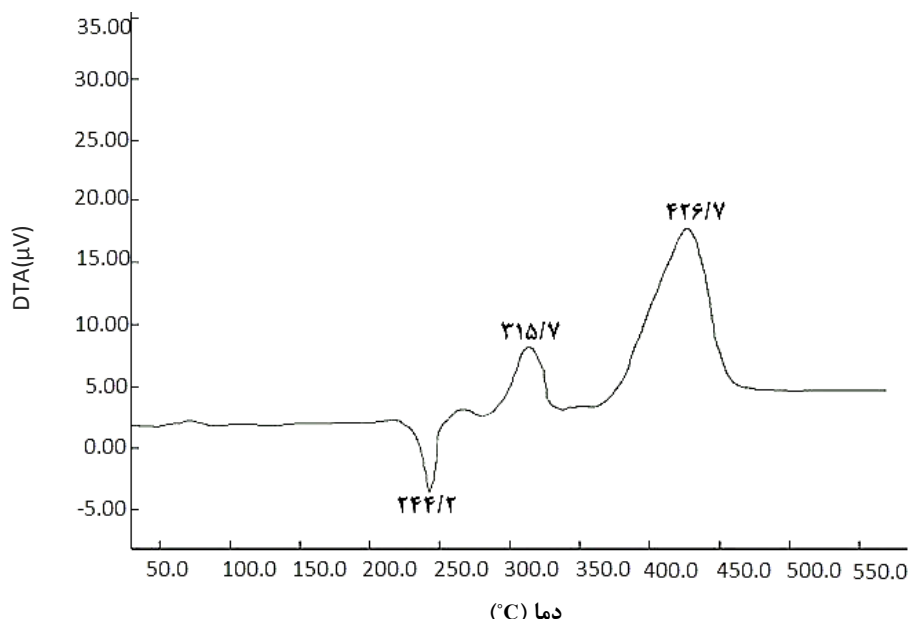


مطابق مکانیزم گزارش شده به وسیله محققان، مرحله اول شامل جفت شدن یون‌ها در شبکه آمونیوم پرکلرات است. مرحله دوم مرحله‌ای است که انتقال پروتون از کاتیون NH_4^+ به آنیون ClO_4^- شروع شده و یک کمپلکس مولکولی تشکیل می‌شود. در مرحله بعد این کمپلکس به آمونیاک و پرکلریک اسید تجزیه می‌شود. مولکول‌های NH_3 و HClO_4 هر کدام در لایه جذبی روی سطح پرکلرات واکنش داده یا دفع شده و برهم‌کنش تصعید در فاز گازی صورت می‌گیرد [۲۲].

بیشینه گرمایی مشاهده شده در دماهای بالای ۳۵۰°C مربوط به تجزیه کامل ترکیبات حدواسط به محصولات فرآری از قبیل CO ، N_2 ، CO_2 است که در واکنش (۷) نشان داده شده است که در اینجا C_mH_n پلیمر هیدروکربنی (HTPB) است [۱۵].



شکل ۲ منحنی DTA برای تجزیه فرمولاسیون پیشرانه «F-2» را نشان می‌دهد. به‌طور کلی محدوده دمایی تجزیه حرارتی پیشرانه با افزودن اکسید آهن به دماهای پایین‌تر جابه‌جا می‌شود و نشان‌دهنده آن است که اکسید آهن سبب پیشرفت واکنش شیمیایی در فازهای متراکم یا گازی پیشرانه می‌شود. از آنجا که فرایند تجزیه حرارتی مرحله اول AP فرایند انتقال پروتون است، لذا اثر کاتالیستی اکسید آهن به‌طور عمده در دماهای تجزیه بالا مشاهده می‌شود و بر مرحله اول تأثیرگذار نیست. بایستی توجه داشت که با افزودن اکسید آهن و همچنین با کاهش نرخ انتقال حرارت، دمای پیک تجزیه و دمای نهایی پیک تجزیه گرمازا کاهش می‌یابد. همچنین، افزودن اکسید آهن سبب افزایش شدت پیک گرمازا و کاهش شدت پیک گرماگیر DTA به‌ویژه در نرخ‌های حرارت پایین می‌شود.



شکل ۲ - منحنی DTA برای فرمولاسیون پیشرانه «F-2» با نرخ حرارت دهی ۵°C/min تحت اتمسفر نیتروژنی با نرخ جریان ۲۰ ml/min

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بیشینه گرماگیر مشاهده شده در $244/2^{\circ}\text{C}$ مربوط به تغییر شکل فازی آمونیوم پرکلرات از ساختمان کریستالی آرتورومبیک به مکعبی است و افزودن اکسید آهن در فرمولاسیون «F-2» باعث کاهش شدت این پیک در مقایسه با فرمولاسیون پایه شده است. بیشینه گرمای مشاهده شده در $315/7^{\circ}\text{C}$ مربوط به تجزیه جزئی AP و تشکیل حد واسط است. در اینجا نیز مشاهده می‌شود افزودن اکسید آهن در فرمولاسیون «F-2» سبب کاهش دمای این پیک به میزان $10/5^{\circ}\text{C}$ در مقایسه با فرمولاسیون پایه شده است. بیشینه گرمای مشاهده شده در $426/7^{\circ}\text{C}$ مربوط به تجزیه کامل ترکیبات حد واسط به محصولات فرآری از قبیل CO ، N_2 و CO_2 است. در اینجا نیز مشهود است که افزودن اکسید آهن در فرمولاسیون «F-2» سبب کاهش دمای این پیک به میزان $26/4^{\circ}\text{C}$ در مقایسه با فرمولاسیون پایه شده و از طرفی شدت این پیک نیز با افزودن اکسید آهن در مقایسه با فرمولاسیون پایه افزایش یافته است.

حساسیت دمایی

در جدول ۴ نتایج سرعت‌های سوزش و حساسیت دمایی (σ_p) برای فرمولاسیون «FB-2» و همچنین مقایسه با فرمولاسیون‌های «F-2» و «B-1» آمده است. یک نمونه از محاسبات ضریب حساسیت دمایی و درصد کاهش آن برای فرمولاسیون «FB-2» در ادامه آمده است:

$$\sigma_p = \left[\frac{\partial \ln r}{\partial T_0} \right]_p = \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{T_2 - T_1} = \frac{\ln(5.929) - \ln(4.960)}{60 - (-25)} = 0.0021$$

$$\text{درصد کاهش} = \frac{0.0021 - 0.0015}{0.0021} \times 100 = 28.57\%$$

جدول ۴- سرعت‌های سوزش و حساسیت دمایی (σ_p) برای فرمولاسیون «FB-2» و همچنین مقایسه با فرمولاسیون‌های «F-2» و «B-1»

نام فرمولاسیون تهیه شده	پایه	FB-2	F-2	FB-2	B-1	FB-2
درصد اکسید آهن	۰	۱/۳۶	۱/۳۶	۱/۳۶	۰	۱/۳۶
نسبت درشت به ریز	۲۰ به ۸۰	۵۰ به ۵۰	۲۰ به ۸۰	۵۰ به ۵۰	۵۰ به ۵۰	۵۰ به ۵۰
نتایج سرعت سوزش (mm/sec)، در فشار ۷۰ bar						
$+60^{\circ}\text{C}$	۵/۹۲۹	۹/۶۴۳	۸/۵۳۶	۹/۶۴۳	۸/۱۸۹	۹/۶۴۳
$+25^{\circ}\text{C}$	۵/۴۹۶	۹/۰۷۵	۷/۶۹۵	۹/۰۷۵	۷/۳۶۲	۹/۰۷۵
-25°C	۴/۹۶۰	۸/۴۹۱	۷/۳۶۶	۸/۴۹۱	۷/۰۲۰	۸/۴۹۱
$\sigma_p (1/^{\circ}\text{C})$	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۵
درصد کاهش حساسیت دمایی	٪۲۸/۵۷	٪۹/۵۲	٪۱۴/۲۸	٪۹/۵۲	٪۱۴/۲۸	٪۹/۵۲

همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، افزودن $1/36$ درصد اکسید آهن و کاهش نسبت درشت به ریز ذرات AP از «۲۰ به ۸۰» به «۵۰ به ۵۰»، در فرمولاسیون «FB-2»، سبب کاهش حساسیت دمایی سرعت سوزش (σ_p) به میزان $28/57$ درصد در مقایسه با فرمولاسیون پایه می‌شود. همچنین، فرمولاسیون «FB-2» نسبت به فرمولاسیون «F-2» حساسیت دمایی سرعت سوزش (σ_p) را به میزان $9/52$ درصد بیشتر در مقایسه با فرمولاسیون پایه کاهش می‌دهد که این میزان کاهش درصد در واقع بیانگر تغییرات نسبت درشت به ریز ذرات AP از «۲۰ به ۸۰» به «۵۰ به ۵۰» است (اثر اندازه ذره). از طرف دیگر، با توجه به نتایج دو ستون سمت چپ جدول ۴، مشخص می‌شود که فرمولاسیون «FB-2» نسبت به فرمولاسیون «B-1» حساسیت دمایی سرعت سوزش (σ_p) را به میزان $14/28$ درصد بیشتر در مقایسه با فرمولاسیون پایه کاهش می‌دهد که این

میزان درصد کاهش، تأثیر کاتالیست اکسید آهن در فرمولاسیون «FB-2» را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات بالا، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که اولاً حساسیت دمایی سرعت سوزش (σ_p) با افزودن کاتالیست اکسید آهن نسبت به افزایش درصد ذرات ریز AP به طور مؤثرتری کاهش می‌یابد؛ ثانیاً فرمولاسیون «FB-2»، در مقایسه با فرمولاسیون‌های «F-2» و «B-1»، حساسیت دمایی سرعت سوزش (σ_p) را به میزان بیشتری کاهش داده است که به دلیل اثر همزمان کاتالیست اکسید آهن و افزایش درصد ذرات ریز AP است.

تحلیل حساسیت دمایی

به‌طور کلی اساس مکانیزم‌های پیشنهادشده برای عمل اکسید آهن در پیشرانده‌های جامد این است که اکسید آهن طی فرایند احتراق در سطح سوزش انباشته شده و از این رو بر واکنش‌های سطح فاز متراکم تأثیر می‌گذارد که نتیجه آن انتقال حرارت بیشتر به سطح سوزش و افزایش دمای سطح سوزش (T_s) است. با توجه به معادله (۵)، مشاهده می‌شود که مقدار Ψ با افزایش دمای سطح سوزش کاهش یافته و در نهایت (مطابق معادله (۳)) منجر به کاهش حساسیت دمایی پیشرانده‌های AP/HTPB می‌شود. در مورد اثر اندازه ذره می‌توان گفت که حساسیت دمایی پیشرانده‌های AP/HTPB به فرایند واکنش در فاز متراکم بستگی دارد. با کاهش اندازه ذرات AP، σ_p ، به علت کاهش Ψ ، (معادلات (۳) و (۵)) کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش سطح مقطع سوزش و در نتیجه افزایش T_s است. این موضوع به ساختار شعله نفوذی ایجادشده در سطح سوزش نسبت داده می‌شود. از آنجا که شعله نفوذی اولیه بر پایه برهم‌کنش میان گازهای حاصل از تجزیه اکسیدکننده و سوخت تشکیل می‌شود، اندازه ذره اکسیدکننده مستقیماً بر میزان حرارت برگشتی و همچنین سرعت سوزش تأثیرگذار است. بنابراین، اثر همزمان کاتالیست اکسید آهن و افزایش درصد ذرات ریز AP سبب کاهش بیشتر حساسیت دمایی سرعت سوزش (σ_p) در نمونه «FB-2» می‌شود [۶، ۱۰، ۲۴]. در جدول ۵، نتایج تحقیقات انجام‌شده توسط سایر محققان آورده شده است. آمونیوم اگزالات، استرانسیم کربنات و مخلوط آمونیوم اگزالات/استرانسیم کربنات کاهنده‌های سرعت سوزش بوده، در حالی که اکسید آهن افزایش سرعت سوزش است. با توجه به جدول ۵، مشاهده می‌شود که کار مشابه در راستای تحقیق حاضر توسط کولکارنی و همکارانش انجام شده است. فرمولاسیون پخت‌شده^۱ توسط آن‌ها مشابه فرمولاسیون «FB-2» این تحقیق است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که درصد کاهش حساسیت دمایی توسط محققان مذکور ۲۵ درصد بوده، در حالی که میزان کاهش حساسیت دمایی در تحقیق حاضر ۲۸/۵۷ درصد است که این اختلاف به شرایط آماده‌سازی مواد اولیه، شرایط اختلاط و همچنین ریخته‌گری و پخت نمونه برمی‌گردد. علاوه بر این، در تحقیق حاضر، فرمولاسیون‌های «F-2» و «B-1» نیز بررسی شده‌اند تا اثر تغییر در نسبت درشت به ریز ذرات AP («۸۰ به ۲۰» در «F-2» و «۵۰ به ۵۰» در «B-1») بر حساسیت دمایی را نشان دهند.

جدول ۵- نتایج تحقیقات انجام‌شده توسط سایر محققان

تحقیقات قبلی	
افزودن ۲ درصد استرانسیم کربنات در پیشرانده‌های AP/HTPB فاقد آلومینیوم سبب کاهش حساسیت دمایی به میزان ۴۹ درصد شده است.	(۱) کوبوتا (۱۹۹۰) [۱۱]
افزودن ۲ درصد اکسید آهن در پیشرانده‌های AP/HTPB دارای آلومینیوم سبب کاهش حساسیت دمایی به میزان ۲۵ درصد شده است.	(۲) کولکارنی و همکارانش (۲۰۰۱) [۶]
افزودن آمونیوم اگزالات و مخلوط آمونیوم اگزالات/استرانسیم کربنات در پیشرانده‌های AP/HTPB/Al به ترتیب سبب کاهش حساسیت دمایی به میزان ۲۳/۸ درصد و ۴۷/۶ درصد شده است.	(۳) لی و همکارانش (۲۰۰۶) [۷]

نتیجه گیری

نتایج آزمون دمای خوداشتعالی نشان داد که اضافه کردن اکسید آهن به فرمولاسیون پیشرانه منجر به تسریع واکنش های همفاز گازی و همفاز متراکم شده و همچنین باعث جابه جایی دمای اشتعال و تجزیه حرارتی پیشرانه به دماهای پایین تر می شود. نتایج فرمولاسیون های «B-1» و «FB-2» نشان داد که کاهش اندازه ذرات AP و یا به عبارت دیگر کاهش نسبت درشت به ریز ذرات AP سبب کاهش دمای اشتعال و دمای تجزیه حرارتی AP شده که نتیجه کلی این تغییرات افزایش سرعت سوزش است. همچنین، نتایج دانسیته نشان داد که افزودن اکسید آهن یا کاهش نسبت درشت به ریز ذرات آمونیوم پرکلرات سبب افزایش دانسیته می شود. نتایج آزمون سرعت سوزش و حساسیت دمایی نشان داد که حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه های مرکب AP/HTPB با افزودن اکسید آهن یا کاهش نسبت درشت به ریز ذرات AP کاهش می یابد. حساسیت دمایی سرعت سوزش فاز متراکم نقش برجسته تری را در σ_p ایفا می کند و کوچک ترین مقدار برای حساسیت دمایی زمانی مشاهده می شود که ذرات ریز AP و اکسید آهن با هم مخلوط شوند. با توجه به معادله (۵)، مشاهده می شود که مقدار Ψ مطابق با معادلات (۲) تا (۵)، با افزایش دمای سطح سوزش، کاهش یافته و در نهایت (مطابق معادله (۳)) منجر به کاهش حساسیت دمایی پیشرانه های AP/HTPB می شود. در مورد اثر اندازه ذره می توان گفت که حساسیت دمایی پیشرانه های AP/HTPB به فرایند واکنش در فاز متراکم بستگی دارد. با کاهش اندازه ذرات AP، σ_p ، به علت کاهش Ψ ، (معادلات (۳) و (۵)) کاهش می یابد که دلیل آن افزایش سطح مقطع سوزش و در نتیجه افزایش T_s است.

مراجع

1. P. Thakre and V. Yang, "Solid Propellants," *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 1, 2010, pp. 1-10.
2. M. T. Gaunce and J. R. Osborn, "Temperature Sensitivity Coefficients of Solid Propellant Burning Rate," *Acta Astronautica*, 13, 1986, pp. 127-130.
3. T. T. Nguyen, "Burn Rate Temperature Sensitivity of Solid Rocket Propellants: an Overview of Current Status of Experimental Results," *22nd Int. Annual Conference of ICT*, Karlsruhe, Germany, 1991, pp. 41/1-18.
4. K. Kishore and K. Sridhara, "Effect of Temperature on the Burning Rate of Solid Propellants: A Review," *J. Propulsion*, 2, 1986, pp. 193-194.
5. J. P. Agrawal, *High Energy Materials Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010.
6. V. V. Kulkarni, A. R. Kulkarni, P. A. Phawade and J. P. Agrawal, "A Study on the Effect of Additives on Temperature Sensitivity in Composite Propellants," *Propellants Explos. Pyrotech.*, 26, 2001, pp. 125-129.
7. Y. L. Sun, S. F. Li and D. H. Ding, "Effect of Ammonium Oxalate/Strontium Carbonate on the Burning Rate Characteristics of Composite Propellants," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 86, 2006, pp. 497-503.
8. R. E. Hamke, M. T. Gaunce and J. R. Osborn, "The Effect of Pressure Exponent on Temperature Sensitivity," *Acta Astronautica*, 15, 1987, pp. 377-382.
9. N. Kubota and H. Okuhara, "Burning Rate Temperature Sensitivity of HMX Propellants," *J. Propulsion*, 5, 1986, pp. 406-410.
10. N. Kubota and S. Miyazaki, "Temperature Sensitivity of Burning Rate of Ammonium Perchlorate Propellants," *Propellants Explos. Pyrotech.*, 12, 1987, pp. 183-187.
11. N. Kubota and K. Miyata, "Inhibition Reaction of SrCO_3 on the Burning Rate of Ammonium Perchlorate Propellants," *Propellants Explos. Pyrotech.*, 15, 1990, pp. 127-131.
12. T. T. Nguyen, "New Insights into the Combustion of AP/HTPB Rocket Propellants: The Catalyst Active Sites and a Combustion Flame Model for the Ferrocene-Catalysed Combustion," *Defense Science & Technology Organization (DSTO)*, 1996, pp. 679-692.
13. A. I. Atwood, T. L. Boggs, P. O. Curran, T. P. Parr, D. M. Hanson-Parr, C. F. Price and J. Wiknich, "Burning Rate of Solid Propellant Ingredients, part 2: Determination of Burning Rate Temperature Sensitivity," *Journal of Propulsion and Power*, 15, 1999, pp. 748-752.
14. N. Kubota, K. Uchiyama and N. Hirata, "Combustion Wave Structure of Ammonium Perchlorate Composite Propellants," *J. Propulsion*, 2, 1986, pp. 296-300.

15. N. Kubota, *Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2002.
16. E. Cohen-Nir, "Temperature Sensitivity of the Burning Rate of Composite Solid Propellants," *Combustion Science and Technology*, 9, 1974, pp. 183-194.
17. N. S. Cohen and D. A. Flanigan, "Mechanisms and Models of Solid-Propellant Burn Rate Temperature Sensitivity: A Review," *AIAA Journal*, 23, 1985, pp. 1538-1547.
18. V. Yang, T. B. Brill and W. Z. Ren, *Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics*, American Institute of Aeronautics, Reston, Virginia, 2000.
19. T. D. Manship, "High Burn Rate Solid Composite Propellants," Master of Science Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2010.
20. K. K. Kuo and M. Summerfield, "Fundamentals of Solid Propellant Combustion," American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1984, pp. 100-120.
21. K. Kishore and M. R. Sunitha, "Effect of Transition Metal Oxides on Decomposition and Deflagration of Composite Solid Propellant Systems: A Survey," *AIAA Journal*, 17, 1979, pp. 1118-1125.
22. S. S. Joshi, P. R. Patil and V. N. Krishnamurthy, "Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate in the Presence of Nanosized Ferric Oxide," *Defense Science Journal*, 58, 2008, pp. 721-727.
23. S. R. Chacrarvarthy, E. W. Price and R. K. Sigman, "Mechanism of Burning Rate Enhancement of Composite Solid propellants by Ferric Oxide," *Journal of Propulsion and Power*, 13, 4, 1997, pp. 471-480.
24. K. K. Kuo and M. Summerfield, "Fundamentals of Solid Propellant Combustion," American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1984, pp. 53-106.

English Abstract

Investigation of the Effect of Iron Oxide on the Burning Rate Temperature Sensitivity of Solid Composite Propellants

Navab Fathi¹ and Mohammad Ali Dehnavi²

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Iran (Correspondent author)

2- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Iran

(Received: 2012.10.23, Received in revised form: 2013.5.11, Accepted: 2013.5.14)

The temperature sensitivity of solid propellant burning rate directly affects the accuracy and performance of the rocket motor. In this study, the effect of additives such as iron oxide (IO) on burning rate temperature sensitivity of solid composite propellants based on HTPB was investigated by burning rate, DTA, density and auto ignition temperature experiments. Also the effect of various coarse to fine ratios of oxidizer ammonium per chlorate on temperature sensitivity was studied. The experimental results showed that the burning rates of these propellants were increased by addition of iron oxide or decreasing coarse to fine ratios of ammonium per chlorate particles. DTA results indicated that decomposition temperatures of AP were decreased by addition of iron oxide. Also the auto ignition temperatures of AP with iron oxide were decreased according to the results of auto ignition temperature test. The results also showed that the burning rate temperature sensitivity of AP/HTPB based propellants was reduced by addition of IO or decreasing coarse to fine ratios of ammonium per chlorate particles. The enhancement of burning surface temperature of AP/HTPB/IO and AP/HTPB with low coarse to fine ratios is responsible for the reduced temperature sensitivity. Very small values of the temperature sensitivity are seen when fine AP particles and IO are mixed together.

Keywords: Composite propellants, Burning rate, Temperature sensitivity, Auto ignition temperature, DTA