

مروری بر فلزات واکنشگر و افزودنی های مورد استفاده در ترکیبات ترموباریک

سجاد دمیری^{۱*}، حسن شکاری^۲

۱- اصفهان - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- زرین شهر - صنایع شیمیایی اصفهان

*Email: sajjad_damiri@yahoo.com

(تاریخ وصول: ۹۲/۷/۸، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۰)

چکیده

در این مقاله، ابتدا کلیه راهکارهای لازم برای افزایش فشار و دمای انفجار ترکیبات انفجاری بررسی شده و ضمن معرفی کلی مبانی عملکرد مواد منفجره ترموباریک (TBX)، انواع افزودنی های رایج در TBX ها شناسایی و خواص عمومی آنها معرفی و تحلیل شده است. همچنین محدودیت های موجود ناشی از احتراق ناقص فلز آلومینیوم در سیستم های انفجاری مذکور و رویکردهای اصلی در زمینه بهبود عملکرد افزودنی های فلزی مورد استفاده در ترموباریک ها تا حد مناسبی معرفی شده است. نتایج این بررسی ها حاکی از استفاده از آلیاژهای فلزی پرنرزی، بایندهای هالوژن دار، کاتالیست های اکسید فلزی یا مقدار کمی اکسیدکننده های معدنی چگال در مواد منفجره پلاستیکی (PBXs) ترموباریکی است.

واژه های کلیدی: مواد منفجره ترموباریک، افزودنی ها، آلومینیوم، آلیاژهای فلزی.

۱- مقدمه

منجر به ایجاد خلأ در محیط اطراف می گردند. همچنین واکنش های مربوط به این اجزاء در یک مرحله بعد از انفجار مواد منفجره اصلی (معروف به پس سوزش^۴) در ترکیب رخ می دهد و منجر به بزرگتر شدن کره آتش^۵، ایجاد حرارت بالا، افزایش تناوب زمانی انفجار و زمان اعمال موج شوک به هدف می گردد و کارایی آنها را تا حد قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. برای شروع واکنش احتراق فلز، بایستی دمای آن به دمای فعال سازی رسانده شود، لذا استفاده از مواد منفجره می تواند این نیاز را برطرف نماید. با توجه به خصوصیات

در دو دهه اخیر، استفاده و توسعه مواد منفجره ترموباریک^۳ (TBX) به طرز چشمگیری افزایش یافته است [۵-۱]. اصطلاح ترموباریک از دو کلمه یونانی therme (به معنی حرارت) و baros (به معنی فشار) مشتق شده است. TBX های کارآمد، حاوی اکسیدکننده نبوده یا محتوی اکسیژن آنها بسیار کمتر از حد متعارف می باشد. لذا برای اشتعال یا احتراق سوخت، که معمولاً یک سوخت فلزی مانند آلومینیوم است، از اکسیژن هوا به عنوان اکسنده استفاده می کنند و

4- Afterburning

5- Fireball

۱ - استادیار

۲- کارشناسی ارشد

3- Thermobaric Explosives (TBX)

مذکور، از ترموباریک‌ها به عنوان مهمات فشار و حرارت^۱ و بمب‌های خلاء^۲ نیز یاد می‌شود [۶-۷]. اثر تخریبی این مواد را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به صورت کمی بیان نمود:

$$D = \frac{1}{3}(CnE) = \frac{1}{3}(C.n.m.H_e) \quad (1)$$

در این رابطه، D فاصله بر حسب متر تا فشار ۱ psi می‌باشد. C یک ثابت تخریب است که برای تخریب ناشی از فشار ۱ psi بوجود می‌آید و تقریباً برابر با ۰/۱۵ می‌باشد. متغیر n یک فاکتور بازده برای انفجار ترموباریک می‌باشد که از بازده مکانیکی احتراق مشتق می‌شود. این پارامتر نزدیک به ۰/۱ تخمین زده می‌شود. همچنین (E) انرژی بر حسب ژول است که از حاصل ضرب وزن ماده (m) به کیلوگرم در انرژی احتراق ترکیب (H_c) بر حسب ژول بر کیلوگرم بدست می‌آید. معادله مذکور تنها یک تخمین برای ارزیابی توانایی تخریبی مهمات ترموباریک می‌باشد [۶/۸].

سراغاز ایجاد و توسعه ترکیبات ترموباریک امروزی، را می‌توان الهام گرفته از عملکرد مواد منفجره هوا- سوخت^۳ (FAE) دانست که از سال‌های ۱۹۶۰ میلادی توسط آمریکاییها و روس‌ها بکار گرفته شده است [۸-۱۰]. مواد منفجره FAE فقط حاوی سوخت بوده و برای آغازگری انفجار از هوای محیط به عنوان اکسیدکننده استفاده می‌کنند. در FAEها، سوخت‌های مایع هیدروکربنی یا موارد دیگر (مانند اکسید اتیلن و اکسید پروپیلن) بطور وسیعی در فضای بالای اهداف نرم پخش می‌گردد و بعد از آغازگری انفجار، تولد اشتعال و خلاء نسبتاً گسترده‌ای بر روی اهداف نظامی می‌نمایند. حذف اکسیدکننده از مخزن FAE یا افزایش مقدار سوخت منجر به بالا رفتن نسبتی انرژی خروجی مهمات مربوطه می‌گردد. در حالت ایده‌آل میزان انرژی خروجی سوخت FAE تا ۱۰ برابر TNT نیز می‌باشد. اما از آنجایی که اکسیژن فقط ۲۱٪ وزنی هوا را تشکیل می‌دهد، لذا بازده انفجار تا حد ۴۰٪ کاهش پیدا می‌کند. حضور نیتروژن در هوا نیز سیستم را رقیق نموده و مقداری از انرژی خروجی را جذب می‌نماید. از طرف دیگر، کنترل غلظت سوخت در هوا مشکل بوده و از مقدار ایده‌آل فاصله خواهد داشت. سرعت و فشار انفجار اولیه FAE نسبت به وزن معادل آن با یک ماده منفجره معمولی بسیار کمتر است. بنابراین اثر خردکنندگی و شکنندگی کمی دارد. با این وجود این مواد مزایای دیگری در انتشار انفجار در هوا دارند. مواد منفجره معمولی به صورت یک منبع نقطه‌ای منفجر می‌شوند و فشار انفجار به سرعت با فاصله گرفتن از خرج انفجاری کاهش می‌یابد. اما انفجار مهمات هوا- سوخت به صورت ابرهای بزرگ می‌باشد (برای یک وزن ۳۳ kg از سوخت، قطر ابر ۳۰ متر نیز می‌رسد). این امر موجب می‌شود که کاهش در فشار پیک با فاصله گرفتن از ابر، نسبت به مواد منفجره فشرده شده، با

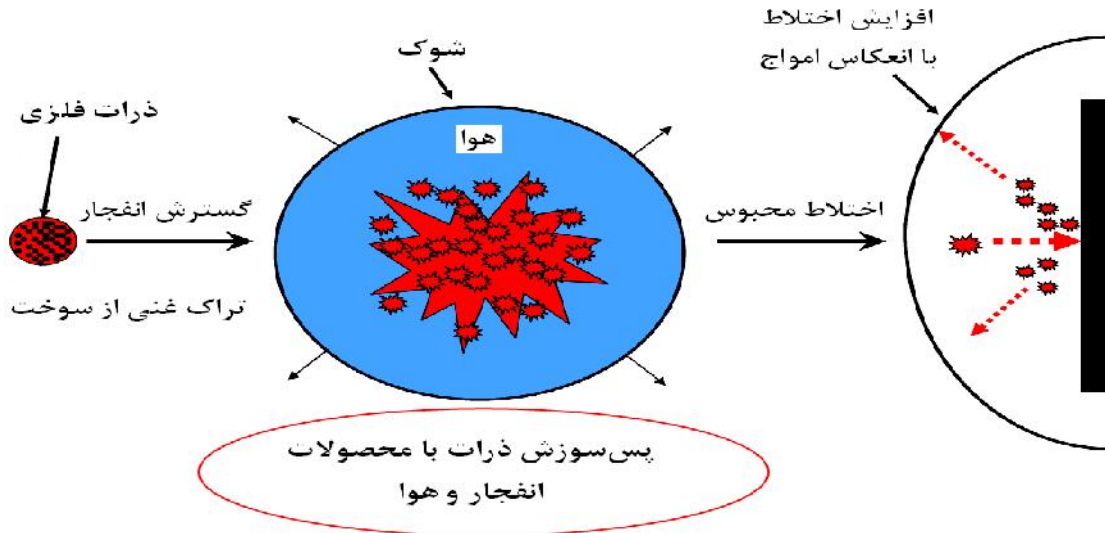
سرعت نسبتاً کمتری افت کند. بعلاوه، مدت زمان موج انفجار ناشی از FAE بیشتر از مواد منفجره فشرده شده است و موجب بالا رفتن ایمپالس FAE می‌گردد و پتانسیل لازم برای انجام کار بر روی محیط اطراف افزایش می‌یابد [۱۱].

با توجه به مشابهت مکانیزم عملکردی مواد منفجره ترموباریک و هوا- سوخت، امروزه به FAEهای بسیار کارآمدی که فشار و حرارت انفجار آنها بسیار بالاست نیز به عنوان ترموباریک اطلاق می‌شود. عده‌ای مواد TBX و FAEها را جزء منفجره‌های حجمی^۴ نیز تقسیم بندی نموده‌اند که علامت مشخصه آنها ایجاد یک کره آتش بزرگ و انفجار یا ترکاندن قوی^۵ می‌باشد [۱۲]. مواد ترموباریک امروزی در مقایسه با سوخت‌های FAE، دارای اثرات ضربه‌ای بالاتری هستند اما میزان خلاء ایجاد شده از آنها کمتر است. این امر با استفاده از یک ماده منفجره قوی در ترکیب (مانند HMX) و بکارگیری سوخت‌های فلزی و اجزای پلیمری کارآمد متنوع قابل حصول می‌باشد. از طرف دیگر، کاهش جزء منفجره TBXها و استفاده از اجزای غیرحساسی مانند فلز آلومینیوم و پلیمرها در ترکیب، منجر به افزایش چشمگیر ایمنی ترموباریک‌های جامد و برآورده‌سازی استانداردهای مربوط به مهمات غیرحساس می‌گردد و یک ویژگی ممتاز دیگر به این مواد می‌بخشد [۱۵-۱۳].

انفجار مهمات ترموباریک در سه مرحله اتفاق می‌افتد. شکل (۱)، شمایی از نحوه انفجار مواد منفجره ترموباریکی را نشان می‌دهد. در ابتدا، انفجار یک خرج بوستر کوچک از ماده منفجره‌ای مانند ترکیب CH-6 (یک ترکیب PBX بوستری حاوی ۹۷/۵٪ RDX، ۱/۵٪ استنارات کلسیم، ۰/۵٪ پلی‌ایزوبوتیلن و ۰/۵٪ گرافیت) گرمای لازم برای شروع یک انفجار بی‌هوازی که یک واکنش اکسایش- کاهش است را فراهم می‌آورد. در این واکنش‌ها، انتقالات الکترونی بین واکنشگرها صورت می‌گیرد. یک واکنش غیرهوازی به اکسیژن نیازی ندارد و در مدت زمان میکروثانیه‌ای که اتفاق می‌افتد منجر به ایجاد فشار بسیار بالا در یک ناحیه کوچک می‌شود و این امکان بوجود می‌آید تا مهمات به زره نفوذ نماید. در حین انجام این واکنش، ذرات فلزی (مانند آلومینیوم) نیز حرارت دیده و زمانی که دمای آنها به نقطه اشتعال (۶۷۷ °C) رسید، دچار یک واکنش شیمیایی با بخار آب، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن اطراف خود می‌شوند. پراکندگی توزیع اندازه‌های ذرات آلومینیوم در این زمینه مطلوب‌تر می‌باشد زیرا اجازه می‌دهد تا واکنش‌های چندگانه و پشت سرهم صورت گیرد. اگر اندازه ذرات آلومینیوم برابر باشند همه آنها در یک زمان مشتعل شده و سرعت انجام واکنش بسیار سریع‌تر خواهد شد. این افزایش سرعت واکنش، منجر به متوقف شدن فرایند انفجار تا این مرحله می‌گردد و اثرات تخریبی حداکثر نخواهد بود.

4- Volumetric Explosive
5 -High Blast

1- Heat and Pressure Weapons
2- Vacuum bombs
3- Fuel-Air Explosives



شکل ۱- شمایی از روند انفجار در مهمات ترموباریک [۱۶].

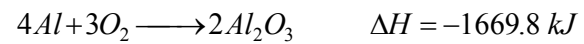
بیشتری با آلومینیوم مخلوط شده و مقدار واکنش افزایش یابد. افزایش در مقدار واکنش نیز ایمپالس بیشتر، حرارت بالاتر و انفجار بزرگتری ایجاد می‌نماید. وقتی که گونه‌های غنی از سوخت با هوای حرارت داده شده با شوک مخلوط می‌شوند منجر به ایجاد یک پس‌سوزش می‌شوند که زمان اضافه فشار انفجار و کره آتش را طولانی‌تر می‌نماید [۶]. در بخش‌های زیر ابتدا کلیه راهکارهای لازم برای افزایش فشار و دمای انفجار ترکیبات انفجاری بررسی شده و ضمن معرفی افزودنی‌ها رایج به ترکیبات ترموباریکی متداول، خواص عمومی آنها تحلیل شده است. همچنین رویکردهای اصلی در زمینه بهبود خواص افزودنی‌های فلزی مورد استفاده در ترموباریک‌ها تا حد مناسبی معرفی شده است.

۲- راهکارهای افزایش بلست و حرارت انفجار ترکیبات منفجره

ترکاندن (بلست)^۱، اثرات ناشی از انفجار^۲ بر محیط اطراف یا پدیده‌های ناشی از انبساط سریع در گازهای داغ پرفشار ایجاد شده از یک انفجار می‌باشد. مواد منفجره با قدرت بلست بالا^۳ (HBX)ها و TBXها معمولاً دارای کره آتش بزرگی می‌باشند که پس‌سوزش ناشی از افزودنی‌های فلزی و موارد دیگر این امر را محقق می‌کند. منشأ ابقای امواج شوک مخرب، طولانی‌تر شدن واکنش‌های مختلف انفجاری می‌باشد که منجر به افزایش قدرت تخریب و ایمپالس انفجار (سطح زیر منحنی فشار انفجار با زمان) می‌گردد. در این بخش کلیه رویکردهای موجود برای بهبود قدرت و حرارت انفجاری ترکیبات انفجاری مرور می‌گردد.

محفظه اولیه واکنشگرها، سرعت انبساط محصولات را کند می‌کند و قسمتی از انرژی صرف به جلو راندن ذرات می‌گردد. این کاهش در سرعت انبساط کمک می‌کند تا ذرات آلومینیومی بیشتر داغ شوند [۶]. در مرحله دوم، انفجار غیرهوازی مرحله دوم که صدها میکروثانیه طول می‌کشد، از احتراق سوخت‌های با اندازه ذرات بزرگ که در مرحله اول انفجار واکنش نداده‌اند، بوقوع می‌پیوندد. هیدروژن بوجود آمده از واکنش بخار آب و آلومینیوم، کربن ایجاد شده از واکنش‌های مونوکسید و دی‌اکسید کربن با آلومینیوم و باقیمانده ذرات آلومینیوم، مرحله دوم واکنش انفجاری را به پیش می‌برند. زمانی که محصولات منبسط شدند یک "کره آتش" ایجاد شده و یک موج فشاری واسطه فوران می‌کند که قابلیت شکستن دیوارها و زاغه‌ها را دارد. قسمت نهایی انفجار، احتراق گونه‌های غنی از سوخت می‌باشد که تنها در محیط‌های بسته اتفاق می‌افتد و به عنوان یک واکنش هوازی در نظر گرفته می‌شود. واکنش احتراق یک واکنشگر فلزی متداول مورد استفاده در مرحله سوم انفجار، آلومینیوم، که یک واکنشگر معمول مورد استفاده در مرحله سوم انفجار است عبارتست از:

(۲)



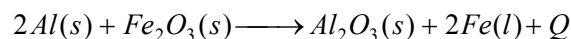
موج شوک ایجاد شده از این واکنش‌ها ساختارهای اطراف را پرانده و گونه‌های با غنای سوخت بالا را با هوای محیط اطراف مخلوط می‌نماید. موج شوک انعکاس یافته، دمای هوا و کره آتش را ثابت نگه داشته و حتی آن را تا یک حد مشخصی افزایش می‌دهد. موج شوک منجر به تغییر فلوی کره آتش نیز می‌شود و اجازه می‌دهد تا هوای

1 - Blast
2 - Explosion
3 - High Blast Explosive (HBX)

۲-۱- استفاده از ترکیبات ترمیتی در مخلوط مواد منفجره

در سال ۱۹۶۷ برای اولین بار ترکیبات ترمیتی به ماده منفجره سیکلوتول، که ترکیبی از مواد منفجره RDX:TNT با نسبت ۶۰:۴۰ می باشد، افزوده شد. ترمیت به واکنشی اطلاق می شود که بین یک اکسید فلز و یک فلز احیا کننده رخ می دهد. متداولترین ترمیت از واکنش بین اکسید آهن و فلز آلومینیم به وجود می آید. واکنش ترمیت بین آلومینیم و اکسید آهن از معادله زیر تبعیت می کند [۱۷].

(۳)



می توان از ترمیت های متنوع دیگری، از جمله Zr/B_2O_3 , Al/MoO_3 , Li/WO_3 , Li/Mn_3O_4 و موارد متنوع دیگری استفاده نمود که مشخصات ترمودینامیکی تعداد زیادی از آنها در مرجع [۱۸] ذکر شده است. این واکنش ها دارای حرارت خروجی بسیار بالایی می باشند و استفاده از آنها در ترکیبات انفجاری می تواند منجر به بزرگتر شدن کره آتش و تأثیر مثبت بر روی مرحله "پس سوزش" می گردد. برای شروع واکنش ترمیت بایستی دمای آن به دمای فعال سازی رسانده شود، و استفاده از مواد منفجره می تواند این نیاز را برطرف نماید. در این گزارش به مقدار نزدیک به ۸ الی ۱۰ درصد وزنی از ترمیت ها استفاده شده است که منجر به ارتقای ۵ الی ۱۵٪ در کارایی بلست ترکیبات می گردد، از طرفی این اجزاء، هیچگونه تأثیر منفی بر روی حساسیت به ضربه، پایداری در خلأ و سرعت انفجار سیکلوتول ایجاد نمی نماید در صورتیکه از مقدار بیشتری ترمیت استفاده شود میزان بارزه بلست کاهش می یابد، اما تأثیرات و حجم کره آتش بیشتر می گردد. برعکس این حالت نیز، در صورت استفاده از مقدارهای خیلی کم ترمیت صادق است.

جونز^۱ در سال ۲۰۰۴ میلادی، استفاده از ترمیت ها^۲ را برای ایجاد ترکیبات انفجاری با دانسیته انرژی زایی بالا^۳ (EDE) را پیشنهاد نمود. تعدادی از این فرمولاسیون ها حاوی زوج های ترمیتی مانند فلز آلومینیم و اکسید مس (EDE-1.002) یا اکسید تنگستن (EDE-1.003) یا ترمیت فلز زیرکونیم با اکسید تنگستن (EDE-1.001) می باشند. از مزایای اصلی این نوع فرمولاسیون ها، میزان حرارت خروجی بالا و دانسیته بالای ترکیبات است (جدول ۱) که موجب افزایش قابل ملاحظه در انرژی جنبشی و افزایش نفوذ سرچنگی ها می شود [۱۹].

بعضی از واکنش های ترمیتی مقداری انرژی بر واحد وزن یا حجم ارائه می دهند که میزان آن بیشتر از مواد پرنرژی کلاسیک است. ولی به دلیل پایین بودن سرعت آزاد سازی انرژی، استفاده گسترده از آنها

محدود شده است. با به کار بردن واکنشگرها در مقیاس نانو، فاصله بین ذرات کاهش یافته و میزان نفوذ به مقدار مؤثری افزایش می یابد در نتیجه سرعت آزادسازی انرژی افزایش می یابد. به این مواد و هر ماده منفجره ترکیبی که از اجزای در مقیاس نانو در آن استفاده شده باشد، کامپوزیت های بین مولکولی شبه پایدار^۴ (MIC) یا سوپر ترمیتها اطلاق می شود. سرعت واکنشها در این موارد می تواند دهها برابر سریع تر از فرمولاسیون های رایج باشد [۲۰].

جدول ۱- مقایسه دانسیته و انرژی بین فرمولاسیون های EDE و مواد منفجره متداول مورد استفاده در نفوذ کننده ها [۱۹].

ماده منفجره	ترکیب	دانسیته lb/in ³ ،	انرژی، Cal/cm ³
PBXN-109	RDX (٪۶۴)، Al (٪۲۰)، HTPB (٪۷/۳۵)، DOA (٪۷/۳۵)، additive	۰/۰۶۰	۱۷۴۸
AFX-757	RDX (٪۲۵)، AP (٪۳۰)، Al (٪۳۳)، HTPB (٪۴/۴۴)، DOA (٪۶)، additive	۰/۰۶۷	۲۲۷۰
EDE-1.001	RDX (٪۲۳/۳۰)، Zr (٪۲۱/۰۷)، WO ₂ (٪۴۹/۷۰)، Binder (٪۵/۹۳)	۰/۱۶۳	۳۱۲۰
EDE-1.002	RDX (٪۲۹/۲)، Al (٪۱۱/۵)، CuO (٪۵۰/۹)، Binder (٪۸/۴)	۰/۱۱۲	۳۳۲۰
EDE-1.003	RDX (٪۹/۳)، Al (٪۱۲)، WO ₂ (٪۶۲)، AP (٪۱۲/۲)، Binder (٪۴/۵)	۰/۱۳۸	۳۷۲۸

۲-۲- استفاده از اکسیدکننده های چگال و پرنرژی از

نمک های معدنی

بیشترین فشار انفجاری قابل دسترس از مواد منفجره آلی نیترودار، نزدیک به ۳۹۰ kbar می باشد. بعلاوه مواردی از این مواد که فشار آنها به مقدار مذکور می رسد دارای حساسیت بالایی نیز می باشند و استفاده از آنها با خطرات قابل توجهی همراه می باشد. از طرف دیگر

4- Metastable Intermolecular Composites (MIC)

1 -Jones

2 -Thermites

3 -Energy Dense Explosive

واکنشگری پائین با مواد منفجره نیترودار می‌باشد. از این نقطه نظر، نمک‌های حاوی NF_4^+ ، بسیار مناسب به نظر می‌رسند. اکسیدکننده‌های مورد استفاده در این تحقیق، محدود به ترکیبات فلئوئوردار نمی‌باشد و می‌توان از مواد بدون فلئور، مانند $Ti(ClO_4)_4$ ، با خواص مشابه نیز استفاده نمود. البته باید توجه داشت که استفاده از مواد فلئوئوردار در ترکیبات انفجاری حاوی فلز آلومینیوم اثرات مثبت دیگری نیز نشان می‌دهد. اکسیدکننده‌های فلئوئوردار منجر به تشکیل ماده فرارتر AlF_3 به جای Al_2O_3 می‌شوند که دارای نقطه تصعید بسیار کمتری (۱۲۷۰ درجه سانتیگراد) نسبت به Al_2O_3 (۲۲۵۰ درجه سانتیگراد) می‌باشد. فراریت بالاتر AlF_3 منجر به افزایش کارایی و فشار انفجاری ترکیبات انفجاری با اکسیدکننده‌های فلئوئوردار می‌شود [۲۱].

۲-۳- استفاده از بایندر و افزودنی‌های هالوژن دار

یک راه دیگر برای افزایش دما، بلست و زمان انفجار در کامپوزیت‌های انفجاری، استفاده از مواد هالوژن دار در ترکیب آنها می‌باشد. از نظر تئوری، از واکنش‌های فلز-هالوژن، انرژی نسبتاً زیادی قابل دستیابی است. این نوع واکنش‌ها، حرارت بسیار زیاد و پالس‌های انفجاری ماندگارتری، نسبت به مواد منفجره معمولی ایجاد می‌نمایند. اما، انرژی فعال‌سازی لازم برای آغازگری واکنش‌های فلز-هالوژن، نسبتاً زیاد می‌باشد. یکی از مشکلات ترکیبات انفجاری حاوی فلزات، عدم تکمیل واکنش احتراق فلز و در نتیجه کاهش کارایی آنها می‌باشد. اگرچه بیشتر مواد منفجره قوی با دمای انفجاری بالا، از واکنش‌های فلز-اکسیژن استفاده می‌نمایند، اما چون پلیمرهای هالوژن دار دارای دانسیته بیشتری از پلیمرهای نوع C-N-H-O می‌باشند، لذا کارایی آنها، از جمله میزان فشار، سرعت و دمای انفجار افزایش می‌یابد [۲۲ و ۲۳].

برای کنترل واکنش‌ها و ساده کردن فرایند تولید، می‌توان پلیمرهای هالوژنه و فلز را با هم مخلوط نمود. در اینصورت زمان واکنش کوتاه‌تر می‌شود. تعدادی از پلیمرهای هالوژنه مناسب در این زمینه، که با بعضی از فلزات واکنش‌های گرمازا ایجاد می‌نمایند می‌توان به؛ تفلون (تترافلئورواتیلن (TFE)، ویتون^۱، Kel-F®، PVC، پلی‌اترهای فلئوئوردار، پرفلئورواکریلات‌ها یا مخلوط‌های آنها اشاره نمود [۲۲].

۲-۴- ایجاد بلست با انرژی بالا با استفاده از واکنش گرمای

بور با فلزات دیگر در ترکیبات انفجاری

در سال ۱۹۸۲ میلادی، یک گزارش در مورد استفاده از انرژی واکنش‌های گرمای بور (B) با تعدادی از فلزات، برای تقویت انرژی و بلست مواد منفجره معرفی شده است. ماده فلزی دیگر باید توانایی

موادی که کارایی کمتری دارند نیز معمولاً دانسیته‌های پائینی، کمتر از $2/0 \text{ g cm}^{-3}$ ، نشان می‌دهند و بطور کلی کارایی آنها محدود می‌شود. مشخص شده است که می‌توان با افزودن یک سری از اکسیدکننده‌های چگال و پرنرزی از نمک‌های معدنی، مانند تترافلئوروآمونیم هگزاfluئوروتیتانات $((NF_4)_2TiF_6)$ ، تترافلئوروآمونیم تترافلئوروبورات (NF_4BF_4) ، تیتانیم پرکلرات $(Ti(ClO_4)_4)$ و تترافلئوروآمونیم هگزاfluئورونیکلات $((NF_4)_2NiF_6)$ ، فشار انفجاری را تا حد ۵۲۰ kbar افزایش داد. در جدول (۲)، بهبود حاصل از افزایش نمک‌های مذکور به تعدادی از مواد منفجره ارائه شده است. درصد اکسیدکننده‌های استفاده شده به اندازه‌ای انتخاب شده است تا ماده منفجره به طور کامل به گازهای CO_2 ، N_2 و HF یا COF_2 (برای TATB) تبدیل شود [۲۱].

جدول ۲- کارایی تئوری یک سری از اکسیدکننده‌های چگال و پرنرزی از

نمک‌های معدنی بر فشار انفجار مواد منفجره [۲۱].

شماره	ماده منفجره	درصد وزنی	فشار انفجار
۱	Nitroquandine (NQ)	۱۰۰	۲۵۵
۲	NQ + $(NF_4)_2TiF_6$	۴۳-۵۷	۳۴۹
۳	Triaminotrinitrobenzene (TATB)	۱۰۰	۲۸۰
۴	TATB + NF_4BF_4	۲۹-۷۱	۳۷۵
۵	TATB + $(NF_4)_2TiF_6$	۳۰-۷۰	۴۰۸
۶	HMX	۱۰۰	۳۸۲
۷	HMX + NF_4BF_4	۵۱-۴۹	۴۴۹
۸	HMX + $Ti(ClO_4)_4$	۷۰-۳۰	۴۵۶
۹	HMX + $(NF_4)_2TiF_6$	۵۲-۴۸	۴۷۱
۱۰	HMX + $(NF_4)_2NiF_6$	۵۶-۴۴	۵۲۷

آزمون‌های سازگاری و ایمنی نشان می‌دهد که مواد مذکور دارای سازگاری مناسبی می‌باشند. به عنوان مثال مخلوط HMX و NF_4BF_6 در دمای $150^\circ C$ پایدار بوده و حساسیت به ضربه آن نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد. شرایط اولیه افزودنی‌های اشاره شده در این گزارش، محتوی انرژی بالا، دانسیته بالا، پایداری حرارتی زیاد و

تشکیل آنها گرمزا می باشد. ذرات داغ اینترمتالیک تولید شده دارای دمایی نزدیک به $3000-4000$ K می باشند و هدروری انرژی به صورت تشکیل مواد گازی اتفاق نمی افتد [24].

به عنوان مثال، کل انرژی آزاد شده در حین واکنش اینترمتالیکی فلز اورانیوم با بور $32/2$ kCal/cc $2/3$ kCal/g)، برای ماده منفجره HMX تقریباً $6/1$ kCal/cc $4/5$ kCal/g) و برای یک مخلوط ۵۰:۵۰ از آنها $19/2$ kCal/cc $3/2$ kCal/g) تخمین زده شده است. با استفاده از این نوع ترکیبات انفجاری، می توان علاوه بر کاهش ۲۵ درصدی وزن سرچنگی نسبت به مواد منفجره متعارف، به قابلیت بلست بالاتری نیز دست یافت. این نوع مواد منفجره دارای کاربردهای نظامی از جمله: استفاده در موشک های تاکتیکی یا راهبردی کروز، اژدها و مهمات توپخانه ای با حجم محدود، بر علیه اهدافی مانند سازه های موجود در عمق و در سطح زمین، ماهواره ها و سازه های زیرآبی نظیر زیردریایی ها و کشتی ها می باشند [24 و 25].

۲-۵- استفاده از فلزات

یک رویکرد اصلی در افزایش حرارت انفجار (Q) ترکیبات انفجاری استفاده از فلزاتی در بافت ماده منفجره است که بعد از اکسایش انرژی زیادی آزاد می کنند. ماده افزودنی باید حرارت احتراق بالایی داشته باشد. همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است این قبیل سوخته در عناصر سبک جدول تناوبی یافت می شوند. در میان عناصر جامد، برلیوم بیشترین حرارت احتراق را دارد و به دنبال آن بور و آلومینیوم است. آلومینیوم یک عنصر نسبتاً مفید و ارزان است و از آن می توان برای افزایش عملکرد ترکیبات انفجاری استفاده کرد. ترکیبات هم خانواده HbXها (مانند H-6) از جمله پرکاربردترین موادی هستند که به دلیل کارایی انفجاری بالا، تا کنون کاربرد خود را در مهمات حفظ نموده اند. البته رویکردهای امروزی به سمت ترکیبات ایمن تر و با حساسیت کمتر، از جمله انواع PBXها، می باشد.

جدول ۳- حرارت احتراق برخی از عناصر سبک [26].

عنصر	جرم اتمی	ΔH (kJmol ⁻¹)	ΔH (kJg ⁻¹)
برلیوم	۹	-۶۰۲/۱	-۶۶/۹
بور	۱۰/۸	-۶۳۵	-۵۸/۸
لیتیم	۶/۹	-۲۹۳/۹	-۴۲/۶
آلومینیوم	۲۷	-۸۳۴/۳	-۳۰/۹
منیزیم	۲۴/۳	-۶۰۲/۶	-۲۴/۸
گوگرد	۳۲/۱	-۲۹۵/۳	-۹/۲
روی	۶۵/۴	-۲۵۳/۲	-۵/۴

انجام یک واکنش گرمزا، به منظور تشکیل یک ترکیب بین فلزی^۱ و آزادسازی انرژی ایی به میزان حداقل $1/0$ kCal/g را داشته باشد.

انرژی آزاد شده در نتیجه انفجار مواد منفجره قوی مانند TNT و HMX تنها در محدوده $1/0$ تا $1/5$ کیلو کالری بر گرم می باشد. سوزش ثانویه این مواد منفجره قوی در هوا و در درجه حرارت بالا، سبب افزایش انرژی حجمی آزاد شده در محدوده $5/6$ تا $6/1$ کیلوکالری بر سانتیمتر مکعب می شود. طبق تحقیقات صورت گرفته مشخص شده است که افزودن فلز آلومینیوم، فقط در مورد مواد منفجره با موازنه اکسیژن منفی، موجب بالا رفتن انرژی انفجار می گردد. در صورتیکه اگر موازنه اکسیژن مثبت باشد، افزودن آلومینیوم موجب کاهش حرارت انفجار می گردد. این موضوع با توجه به انرژی کمتر تشکیل Al_2O_3 (7220 Cal/g) نسبت به تبدیل اتم کربن به CO_2 (7800 Cal/g) قابل توجیه است. همچنین با حضور Al، محصولات دیگری مانند مونوکسید کربن (با گرمای اکسایش Cal/g 2200) و آب نیز ایجاد می گردد که به دلیل تولید گرمای کمتر، نمی توان به حداکثر انرژی پیش بینی شده دست یافت [24].

در بعضی از گزارش ها، میزان انرژی آزاد شده از انفجار ترکیبات منفجره، به عنوان معیاری از قدرت آن ماده اشاره شده است. لازم به ذکر است که "گرمای انفجار" یک معیار کاملی از کارآمدی و مؤثرتر بودن مواد منفجره با کاربردهای مختلف نمی باشد. در بعضی از کاربردها از جمله برای انفجار در محیط های بسته و تخریب استحکامات، گرمای انفجار تقریباً یک معیار کاملی از کارآمدی مواد منفجره محسوب می شود. در کاربردهای دیگر، از جمله ایربلست^۲، ترکش زایی، خرج های گود و موارد دیگر، "گرمای انفجار" نمی تواند به عنوان معیاری از تأثیرپذیری ترکیب انفجاری قلمداد شود. اما به هر حال، در همه گزینه ها، می توان از آن به عنوان یکی از ویژگی های تعیین کننده، یا حتی مهم ترین خصوصیت مواد منفجره نام برد. از ویژگی های دیگر با ارزش مواد منفجره، می توان به دانسیته ماده و فشار انفجاری آن اشاره نمود. "فشار انفجار" نیز پارامتر بسیار مهمی می باشد که بر روی سرعت انفجار، کارآمدی ترکش زایی و خرج های گود مؤثر است.

ادعا شده است که افزودن فلزات بور با فلزاتی که ایجاد واکنش گرمزای ترکیب بین فلزی در دمای بالا ایجاد می نمایند به مواد منفجره، می تواند تا حدی محدودیت های اشاره شده در مواد قبل را بکاهد و موجب ارتقای انرژی آزاد شده و کارایی بلست ترکیب انفجاری شود. در این مواد، فلز بور با فلزات دیگری مانند تیتانیوم (Ti)، زیرکونیم (Zr)، اورانیوم (U)، تانتالیوم (Ta)، لیتیم (Li) و هافنیوم (Hf)، در تناوب زمانی نزدیک به چند میلی ثانیه، پس از آغازگری با انفجار مواد منفجره اصلی، ترکیبات اینترمتالیکی تشکیل می دهد که واکنش

1 -Intermetallic
2 -Airblast

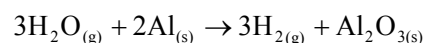
جدول ۴- تعدادی از ترکیبات ترموباریکی اصلی شناخته شده در دنیا [۲۸-۲۹].

ردیف	ترکیبات انفجاری	اجزاء	دانسیته g/cm ³
۱	PBXIH-135	HMX/Al/HTPB	۱/۶۸
۲	PBXIH-135EB	HMX/Al/PCP-TMETN	۱/۷۹
۳	PBXIH-136	HMX/AP/Al/PCP-TMETN	۲/۰۳
۴	HAS-4	HMX/Al/HTPB	۱/۶۵
۵	HAS-4 EB	HMX/Al/PCP-TMETN	۱/۷۳
۶	PBXIH-18	HMX/Al/Hytemp/DOA	۱/۹۲
۷	PAX-3	HMX/Al/CAB/BDNPF/A	۱/۸۶
۸	AFX-757	RDX/Al/AP/HTPB	-
۹	Talley Mix 5672	Al/Zr/IPN/Ethyl Cellulose	۲/۲۱
۱۰	Scheml	Mg/IPN	-

از جمله پرکاربردترین و غیرحساس‌ترین ترکیبات ترموباریکی معرفی شده تاکنون، می‌توان ترکیب قابل ریخته‌گری PBXIH-135 و ترکیبات پرسی PBXIH-118 و PAX-3 را معرفی نمود. برای انفجار مناسب این PBX‌های ترموباریک، استفاده از بوسترهای کارآمد بسیار ضروری می‌باشد. در منابع موجود، از ترکیبات غیرحساس و کارآمدی مانند PBXN-5 (95.5/4.5) HMX/Binder و CH-6 برای این منظور استفاده اشاره شده است. PBXIH-135 دارای اجزای HMX/Al/HTPB با نسبت ۴۵/۳۵/۲۰، دانسیته ۱/۶۸ g/cc و با استاندارد نظامی Mil-DTL-32091B می‌باشد. در صورتیکه از بایندر پراثری PCP و نرم کننده TMETN به جای HTPB استفاده شود، ماده مذکور تحت عنوان PBXIH-135 EB نامیده می‌شود که دارای کارایی بالاتر و دانسیته بیشتر، ۱/۷۹ g/cc، می‌باشد. ترکیب PBXIH-18 نیز حاوی ۶۴/۴ HMX، ۳۰٪ فلز Al، ۲/۴ DOA و ۱/۴ یک پلیمر اکریلات به نام HyTemp 4454 با استاندارد نظامی Mil-DTL-32156A می‌باشد. دانسیته پرس این ترکیب ۱/۹۱ و ۱/۹۵ گزارش شده است. اخیراً تولید ترکیبات PAX برپایه مواد منفجره مختلف نیز ارائه شده است که در آنها با استفاده از نرم‌کننده و غیرحساس کننده‌های مناسب، ترکیبات انفجاری بسیار کارآمد و غیرحساسی تولید می‌شود.

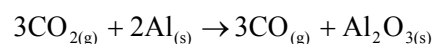
هاد و اشمیت^۱ نشان دادند که آلومینیوم نه تنها با اکسیژن (واکنش ۲) بلکه با نیتروژن نیز واکنش داده و تولید نیتريد می‌کند ($Al + N = AlN + 80 kcal$). این به معنی آن است که بر خلاف کاری که قبلاً در طی جنگ جهانی اول صورت می‌گرفت لازم نیست مواد منفجره حاوی آلومینیوم با موازنه اکسیژن مثبت ساخته شود و حتی بهتر است این موازنه مقداری منفی گردد. این فلز می‌تواند با محصولات گازی مختلف، خصوصاً ترکیباتی که کمبود اکسیژن دارند نیز ترکیب شود:

(۴)



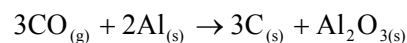
$$\Delta H_c = -866 \text{ kJ/mol } Al_2O_3$$

(۵)



$$\Delta H_c = -741 \text{ kJ/mol } Al_2O_3$$

(۶)



$$\Delta H_c = -1251 \text{ kJ/mol } Al_2O_3$$

در دو واکنش اول حجم گاز تغییر نمی‌کند، یعنی سه مول به سه مول تبدیل می‌شود. در نتیجه افزایش حرارت خروجی از اکسایش آلومینیوم حضور فشارهای بالا را طولانی می‌کند. از این اثر در ترکیبات انفجاری برای انفجار هوایی، بالا بردن و پرت کردن^۲ و ایجاد حبابهای بزرگ در زیر آب استفاده می‌شود. البته، برای افزایش مقدار آلومینیوم به ترکیب انفجاری محدودیت‌هایی از جمله کاهش سرعت انفجار ترکیب و احتراق ناقص فلز وجود دارد [۲۷].

۳- ترکیبات ترموباریکی متداول و اجزای آنها

متداول‌ترین ترکیبات انفجاری مطرح شده در دنیا که رفتار ترموباریک نشان می‌دهند در جدول (۴) ارائه شده است. البته اطلاعات منتشر شده در این زمینه بسیار محدود بوده و می‌توان به صورت ابتکاری انواع مختلفی از TBXها، با اجزای منفجره و فلزی متنوع را ایجاد نمود و مطابق با استانداردهای نظامی بین‌المللی کارایی و ایمنی آنها را برای استفاده در مهمات مختلف ارزیابی نمود. ترموباریک‌های متداول، به دو دسته اصلی ترکیبات جامد (انواع PBXهای ترموباریک، PACها و ...) و مخلوط‌های ژله‌ای (مانند اسکیم^۳ و تالی^۴) قابل طبقه‌بندی هستند که در بخش‌های زیر اجزای عمومی آنها بررسی می‌گردند [۲۸-۲۹].

1- Haid and Schmidt
2- Lifting and Heaving
3-Scheml
4-Talley

کار بیاندازد و این درحالی است که انجام چنین کاری با TNT به ۱۰ الی ۱۵ برابر مواد منفجره بیشتر نیاز دارد [۶-۷].

۳-۱-۲- سوخت های فلزی

پودرهای فلزی به عنوان مواد فعال پراثری در انواع پیشراندهای جامد، پیروتکنیک ها و مواد منفجره استفاده می شوند. این مواد دارای دانسیته بالا، دمای شعله بالا و انرژی خروجی زیاد و مطلوبی در واحد وزن و یا حجم مصرفی هستند. پودر فلز آلومینیوم به دلیل داشتن هزینه پائین و کارایی بالا، به عنوان مهم ترین افزودنی در انواع ترکیبات ترموباریک و مواد منفجره با ایمپالس بالا استفاده می شود. اما از فلزات دیگری مانند منیزیم، زیرکونیم، تیتانیم و بور نیز استفاده شده است. گرمای احتراق تعدادی از مواد مذکور در جداول (۳) و (۵) مقایسه شده است. ملاحظه می گردد که آلومینیوم بعد از بور در مرتبه دوم از مقدار انرژی بر واحد حجم قرار دارد. البته عدم اکسیداسیون کامل بور در فرایندهای احتراق و انفجاری، منجر به کاهش انرژی خروجی از این ماده می گردد. قابلیت واکنش بور با آلیاژ شدن آن با منیزیم و تیتانیم اصلاح می گردد. آنتالپی اکسیداسیون و آنتالپی تشکیل ترکیبات بین فلزی با آلیاژ شدن افزایش می یابد که منجر به بهبود خواص انفجاری می گردد [۳۰ و ۶].

جدول ۵- گرمای احتراق برای تعدادی از فلزات مورد استفاده در مهمات ترموباریک [۶].

سوخت فلزی	گرمای احتراق، cal/mL
بور	۳۳۱۰۰
آلومینیوم	۲۰۴۱۰
تیتانیم	۱۹۱۳۰
زیرکونیم	۱۸۳۹۰
سیلیکون	۱۷۷۲۰
کربن	۱۳۸۲۰
منیزیم	۱۰۵۳۰
هیدروکربن ها	۹۰۰۰

در واکنش های انفجاری حاوی سوخت های فلزی، فلز با یک واکنش گرمای شدید به یک اکسید پایدار نهایی تبدیل می شود. بررسی مکانیزم احتراق فلزات در اکسیژن نشان می دهد که فلزات با نقطه جوش پایین مثل منیزیم بخار می شوند و بخار در سطح فلز می سوزد،

در این میان، ترکیب پرسی PAX-3 که حاوی ۶۴٪ HMX کلاس ۵، ۲۰٪ AI، ۶/۴٪ CAB و ۹/۶٪ نرم کننده^۱ BDNPA و^۲ BDNPF (با نسبت ۱ به ۱) می باشد به عنوان یک ماده منفجره با بلست بالا و جایگزینی برای ترکیب A-3 مطرح شده است و با توجه به محتوی فلز بالا خواص ترموباریکی مناسبی از خود نشان می دهد.

۳-۱-۳- ترکیبات ترموباریک جامد

بطور کلی اجزای تشکیل دهنده ترکیبات ترموباریک های جامد را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:

الف- ماده منفجره قوی^۳ (HE)

ب- سوخت های فلزی

ج- افزودنی های دیگر

۳-۱-۱- مواد منفجره قوی

در این فرمولاسیونها برای تأمین انرژی فعال سازی شروع واکنش های احتراق مرحله پس سوزش، پخش نمودن و متمیز نمودن ذرات سوخت و ایجاد امواج شوک مخرب از یک ماده منفجره قوی (HE) استفاده می شود. مواد منفجره مورد استفاده در این فرمولاسیونها را می توان از بین مواد منفجره معمولی مانند RDX، HMX، CI-20، NTO یا سایر مواد منفجره انتخاب نمود. مطابق با جدول (۴) ملاحظه می گردد که منفجره رایج در این زمینه ماده منفجره HMX می باشد. البته CI-20 دارای فشار و قدرت انفجار بیشتری می باشد و هزینه بالای آن، استفاده گسترده از آن را محدود می نماید.

سرعت انفجار منفجره های معمولی (HE) بسیار زیادتر از منفجره های ترموباریک است. انفجار مواد HE انرژی را در محل مشخصی آزاد می کند و انفجار نقطه ای است در صورتی که در منفجره های ترموباریک، بدلیل پخش ذرات سوخت، انفجار نقطه ای نیست و منطقه وسیعی را در بر می گیرد. همچنین، فشار مثبت حاصل از انفجار در مواد HE بسیار زیادتر از منفجره های ترموباریک است. اما فشار ایجاد شده در منفجره های HE خیلی سریعتر از فشار مواد ترموباریک افت می کند. علاوه بر این، فشار منفی ایجاد شده در منفجره TBX بسیار بیشتر از منفجره های معمولی است. در اثر این فشار منفی یک موج رفت و برگشتی ایجاد می شود که اهداف نرم و متوسط در مقابل این موج رفت و برگشتی با دامنه زیاد شدیداً آسیب پذیر می باشند. این مسئله باعث می شود که بلست برگشتی در HEها قابل مقایسه با منفجره های ترموباریک نباشد و آنها نمی توانند خلأ زیادی را در محل انفجار ایجاد کنند. همچنین موج انفجار حاصل از سلاح های ترموباریک به دلیل داشتن دامنه نوسان بسیار شدید بین پیک فشار مثبت و منفی، قادر است تا فواصل بسیار دور قطعات الکترونیکی مخابراتی و راداری را از

1-Bis(2,2-dinitropropyl)Acetal (BDNPA)
2- Bis(2,2-dinitropropyl) Formal (BDNPF)
3- High Explosive (HE)

۳-۱-۳- افزودنی‌های دیگر

در PBXهای ترموباریک مشابه با ترکیبات PBX رایج، لازم است از بایندهای مفید پلیمری، نرم کننده و پایدارکننده‌ها استفاده شود. بایندها از موادی انتخاب می‌شود که قابلیت پوشاندن مناسب فلز و اکسیدها و پودر مواد منفجره را داشته باشد. ترجیحاً این ماده را می‌توان از بایندهای پرانرژی که دارای گروه‌هایی نظیر نیترو ($C-ONO_2$)، نیترامین ($N-NO_2$)، دی‌فلوروآمینو (NF_2)، گروه‌های آزیدو (N_3) و نیترات‌استرها ($O-ONO_2$) باشند انتخاب نمود. از جمله این موارد عبارتند از: کاپلیمر وینیلیدین فلوراید هگزافلوروپروپیلن، مانند $Viton^{\text{®}}$ ، GAP^1 ، پلی‌استرهای نیترات مانند $PolyNIMMO^2$ و $PolyGLYN^3$ یا یک پلیمر اکریلیک استر، مانند $Zeon^{\text{®}}$. بایندها مورد استفاده در PBXهای قابل ریخته‌گری ممکن است $HTPB^4$ ، PCP^5 ، $HTPE^6$ ، GAP ، $PCDE^7$ یا مخلوطی از آنها انتخاب شود. همچنین برای بهبود خواص مواد منفجره می‌توان مقداری از نرم کننده‌های مناسب پرانرژی که دارای گروه‌های نیترو، استر نیترات، آزیدو، نیترامینو می‌باشند استفاده نمود. تعدادی از این مواد عبارتند از: $FEFO^8$ ، $TEGDN^9$ ، $NENA^{10}$ ، $DEGDN^{11}$ ، $TMETN^{12}$ و $BTTN^{13}$. علاوه بر آن استفاده از بهبود دهنده‌های سرعت احتراق فلز، مانند اکسید آهن (با خاصیتی مشابه واکنش‌های ترمیتی) به عنوان کاتالیزور و اکسیدکننده‌هایی مانند پرکلرات آمونیم، برای افزایش راندمان احتراق سفارش شده است [۱].

۳-۲- مخلوط‌های ژله‌ای

نوع دیگری از TBXها، موسوم به فرمولاسیون‌های ژله‌ای^{۱۴} نیز مطرح هستند که تشابه بیشتری به FAEها دارند. این ترکیبات ژله‌ای مخلوطی از یک سوخت مایع و فلزات فعالی مانند منیزیم و آلومینیوم می‌باشند و در بعضی از موارد به آنها مواد منفجره جامد خیلی قوی (HE) نیز افزوده می‌گردد. بر خلاف PBXهای ترموباریکی غیرحساسی که در بخش‌های قبلی معرفی گردید، ماهیت این مواد آتشگیر بوده و نیازمندی‌های مربوط به تست‌های IM را برآورده نمی‌نمایند [۱۵-۱۳]. سرعت انفجار این مخلوط‌ها در محدوده ۵۰۰۰-۳۰۰۰ m/s است و به واسطه دمای انفجاری بالا، منجر به آتش‌سوزی در محیط اطراف انفجار

اما برای فلزات با نقطه جوش بالا مثل آلومینیوم ناحیه احتراق در نزدیکی سطح فلز واقع می‌شود. بخاطر اینکه نقطه ذوب آلومینیوم زیر دمای ناحیه احتراق است فلز ذوب شده روی سطح اکسید ذوب شده شناور شده و می‌سوزد [۳۱].

آلومینیوم دارای آنتالپی احتراق حجمی و جرمی قابل توجهی است، بخوبی می‌سوزد و دارای بازده احتراق بالایی است. در واقع اکسیداسیون کامل‌تری نسبت به بعضی از پودرهای دیگر دارد. این فلز دارای دانسیته مناسبی است، بنابراین می‌توان میزان سوخت فلزی بیشتری در سلاح بکار برد. لایه اکسیدی (Al_2O_3) روی آلومینیوم منجر به افزایش تأخیر در شروع احتراق آلومینیوم و افزایش دمای شروع احتراق می‌گردد. این موضوع با آلیاژ کردن آن با منیزیم قابل حل است. برای احتراق کامل یک پوند آلومینیوم، لازم است تا ۳ تا ۶ پوند هوا مصرف شود. همچنین باید حجم آن به ۴۰۰۰ برابر مقدار اولیه انبساط پیدا کند. موج فشاری ایجاد شده در حد ۱۰ اتمسفر، برای پاره کردن شش‌ها و پرده گوش و تعدادی دیگر از صدمات داخلی انسان کافی می‌باشد. حرارت و ایمپالس ناشی از این نوع انفجار نیز به مهمات اجازه می‌دهد تا تجهیزات و اهداف انسانی را نابود کند [۶].

پودر زیرکونیم نیز علاوه بر ترموباریک‌ها، در پیروتکنیک‌ها و ترکیبات آتش‌زنده استفاده دارد. رفتار احتراق این فلز از آلومینیوم متفاوت است. در احتراق زیرکونیم، اکسید (ZrO_2) تشکیل می‌شود که یک ترکیب پایدار بوده و در فلز زیرکونیم حل می‌شود و با نیتروژن یک ترکیب واسطه ناپایدار تولید می‌کند. زیرکونیم بسیار آسانتر از آلومینیوم آتش می‌گیرد. احتمالاً به دلیل اینکه اکسید زیرکونیم روی فلز پوشش محافظ ضعیف‌تری نسبت به Al_2O_3 می‌باشد. در حالیکه آلومینیوم قبل از احتراق ذوب می‌شود، ذرات زیرکونیم قبل از ذوب شدن آتش می‌گیرند. زیرکونیم با تغییر عوامل اکسید کننده بسیار فعال عمل می‌کند. برای مثال واکنش (۷) یک واکنش خودپیش رونده، گرمازا و در دماهای نسبتاً پایین شروع می‌شود [۳۰].



- 1- Glycidyl Azid Polymer
- 2- Poly(3-nitratomethyl-3-methoxyetane)
- 3- Poly(glycidyl nitrate)
- 4- Hydroxyl Terminated Polybutadiene
- 5- Hydroxy-Terminated Polycaprolactone (PCP)
- 6- Hydroxy-Terminated Poly-Athers (HTPE)
- 7- Trifluoroethyl-Terminated Poly (1-cyano-1-difluoramino)-Polyethylene Glycol (PCDE)
- 8- Bis-(2,2-ro-2fluoroethyl) Formal (FEFO)
- 9- Triethyleneglycol Dinitrate (TEGDN)
- 10- N-butyl-2-nitrateethyl-nitramine (NENA)
- 11- Diethyleneglycol Dinitrate (DEGDN)
- 12- Trimethylolethane Trinitrate (TMETN)
- 13- Butanetriol Trinitrate (BTTN)
- 14- Gelled Formulations

اشتعال EO در اتمسفرهای بی اثر و در حضور آب نیز می تواند ادامه یابد [۳۲].

IPN نیز یک مایع بی رنگ با نقطه جوش °C ۱۰۱/۵، یک پیشرانه تک جزئی^۵ است و به عنوان بهبود دهنده عدد ستان^۶ سوختها نیز قابل استفاده است. این ماده حساسیت دمایی نسبتاً بالایی دارد و با نقطه اشتعال ناگهانی °C ۲۲/۲ به شدت آتشگیر (با شعله های نامرئی) است و سرعت انفجار آن نیز ۵۴۰۰ m/s گزارش شده است [۳۳].

۴- محدودیت های استفاده از فلز آلومینیوم در ترکیبات ترموباریک

پودر آلومینیوم به عنوان یک ماده پرنرژی فلزی برای افزایش انرژی و تولید ایمپالس طولانی تر در ترکیب مواد منفجره استفاده می شود. اما به دلیل تأخیر در شروع احتراق آلومینیوم که ناشی از دمای شروع اشتعال بالا (۲۲۰۰ K)، نقطه ذوب بالای پوسته اکسیدی روی آلومینیوم و سرعت احتراق آهسته آلومینیوم می باشد، خواصی که از افزودن این فلزات انتظار می رفت کاملاً حاصل نشده است. نتایج حاصل از آزمایش تعداد زیادی از تست های سرجنگی های حاوی ترکیبات ترموباریک، کیفیت سوزش پائینی برای فلز Al نشان می دهند، بطوری که این امر می تواند منجر به عدم تأثیرپذیری و عملکرد مناسب سرجنگی های مربوطه گردد. سوزش همه ذرات فلزی، نیازمند بقای محیط داغ ناشی از انفجار می باشد. این محیط، در حضور افزودنی های اکسید کننده (مانند AP یا مایع ایزوپروپیل نیترات) که خیلی آسان تر مشتعل می شوند (دمای اشتعال AP؛ °C ۲۵۰ و برای IPN؛ °C ۲۲ می باشد)، پایداری بهتری دارد. با سوزش افزودنی های مذکور، گازهای دائمی ایجاد می شود که سوزش فلز را بهبود می بخشد و می توان به راندمان احتراق نزدیک به ۱۰۰٪ دست یافت [۳۰ و ۱].

اندازه ذرات آلومینیوم در ترموباریک های کارآمد معمولاً کمتر از ۵۰ میکرون می باشد. این امر منجر به کارایی بیشتر احتراق فلز و تولید ترکیبات انفجاری یکنواخت تر گردد. از طرفی دیگر، کاهش اندازه ذرات منجر به تبدیل مقدار نسبی بیشتری از فلز فعال به آلومینا شده و بر روی کارایی ترکیب اثر نامطلوبی دارد. البته این مورد وابسته به شرایط نگهداری و طول عمر مواد می باشد. رویکرد اصلی برای رفع این مشکل، پوشش دهی ذرات آلومینیوم با ترکیبات آلی و پلیمری مناسب است. با استفاده از ذرات آلومینیوم پوشش داده شده در فرایندهای گرانولاسیون آبی، مشکلات تولیدی ناشی از آزادسازی گاز هیدروژن بر روی فلز آلومینیوم نیز به حداقل می رسد [۳۴-۳۶].

می گردند. یک نمونه مرسوم از این مواد، ترکیب اسکیمیل است که در مهمات دوش پرتاب استفاده شده است و حاوی ۶۰٪ ایزوپیل نیترات^۱ (IPN) و ۴۰٪ پودر منیزیم می باشد. ترکیبات دیگری از طرف مرکز سیستم های دفاعی تالی با عنوان Talley Mix 5672 با اجزای Al/Zr/IPN/EC (درصد اجزاء: ۲۵/۷۵/۱:۳۲/۴۰) و دانسیته ۲/۲۱ g/cc گزارش شده است که در آن EC معرف اتیل سلولوز می باشد [۲۹]. نتایج مثبتی نیز با استفاده مایع پرنرژی نیترومتان (NM) در ترکیب NM/Al/HMX (۳۰/۳۰/۴۰) گزارش شده است. ترکیبات پایه نیترومتان در مقایسه با ترکیبات پایه IPN تکانه بالاتری از خود نشان می دهند [۲۸].

با توجه به ماهیت واکنش پذیری اجزای ترکیبات مذکور، انتظار می رود تست های رایج پایداری، ایمنی و عملکردی بر روی ترکیبات در شرایط محیطی مختلف انجام گردد تا از هرگونه خطرات احتمالی جلوگیری شود. روش های کنترل کیفی مربوط به ترکیبات انفجاری جدید با استفاده از استانداردهای ناتوی AOP-7 و STANAG 4170 قابل اجرا و ارزیابی است.

در سال ۲۰۰۷ میلادی، روس ها یکی از قویترین و بزرگترین بمب خلاً خود را که قادر به تخریب کامل یک ساختمان چند طبقه است آزمایش کردند. این بمب که به عنوان "پدر همه بمبها"^۲ (FOAB) نامگذاری شده است حاوی ۱۴۰۰۰ پوند خراج انفجاری، که مخلوطی از سوخت مایع اتیلن اکسید (EO) و نانوذرات آلومینیوم است، می باشد که در اطراف یک منفجرکننده از مواد منفجره قوی، قرار گرفته است. معادل FOAB روسی، بمب "مادر همه بمبها" یا "انفجار هوایی مهمات سنگین"^۳ (MOAB) آمریکایی می باشد که ترکیب انفجاری آن در سال ۲۰۰۳، ماده منفجره H-6 عنوان شده است و دارای قدرت انفجاری ۱/۳۵ برابر TNT می باشد. اگر ادعای روس ها درباره قدرت این بمب درست باشد آنها توانسته اند با استفاده از نانو تکنولوژی، ماده منفجره جدید و بسیار قدرتمندی بسازند که قدرت ۷/۸ تن از آن معادل انرژی آزاد شده از انفجار ۴۴ تن TNT است.

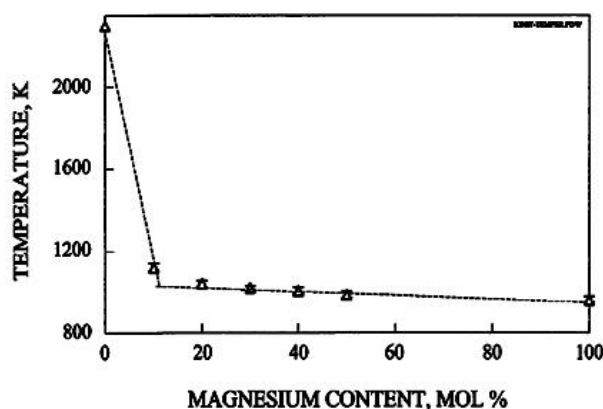
اتیلن اکسید (EO) با نقطه جوش °C ۱۰/۷ در دمای محیط به صورت گاز و در دمای صفر درجه سانتیگراد تقریباً ۵/۵ برابر ویسکوزتر از آب می باشد. با وجود اینکه این ماده در عدم حضور کاتالیستها تا دمای °C ۳۰۰ نیز تفکیک نمی شود و دمای اشتعال خودبخودی آن °C ۴۲۹ گزارش شده است، ولی طبق گزارشات موجود، EO با دمای اشتعال ناگهانی^۴ °C ۲۰- به شدت قابل اشتعال و در معرض هوا منفجره است. حداقل غلظت مجاز آن برای اشتعال در هوا ۲/۷٪ گزارش شده است.

5- MonoPropellants
6- Cetane Number

1- Isopropyl Nitrate
2- Father of All Bombs (FOAB)
3- Mother of All Bombs or Massive Ordnance Air Blast (MOAB)
4- Flash Point

۵- آلیاژهای پراثری به عنوان افزودنی‌ها جدید در ترکیبات ترموباریک

فلز Al دارای آنتالپی احتراق حجمی و جرمی قابل توجهی است، بخوبی می‌سوزد و دارای بازده احتراق بالایی است. در واقع اکسیداسیون کامل تری نسبت به بعضی از پودرهای دیگر دارد. این فلز دارای دانسیته مناسبی است، بنابراین می‌توان میزان سوخت فلزی بیشتری در سلاح بکار برد. البته لایه اکسیدی (Al_2O_3) روی آلومینیم منجر به افزایش تأخیر در شروع احتراق آلومینیم و افزایش دمای شروع احتراق می‌گردد. این موضوع با آلیاژ کردن آن با منیزیم قابل حل است. همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود با افزودن ۱۰ درصد منیزیم دمای شروع احتراق آلومینیم از بالای ۲۰۰۰ درجه کلوین به کمتر از ۱۰۰۰ درجه کلوین کاهش می‌یابد. این موضوع منجر به تسهیل سوزش آلومینیم می‌گردد. افزودن منیزیم منجر به تغییر نمودار فشار- زمان بر حسب درصد‌های مختلف منیزیم نیز می‌گردد که بر حسب نیاز به ایمپالس و فشار پیک مختلف برای ترکیب انفجاری می‌توان آلیاژ مورد نظر را انتخاب نمود [۳۷].



شکل ۲- دمای شروع احتراق آلومینیم بر حسب درصد منیزیم [۳۷].

در حال حاضر تغییر اندازه ذرات فلزی بخصوص استفاده از پودرهای فلزی نانو در فرمولاسیون مواد منفجره به عنوان متغیری برای شروع احتراق سریع‌تر و نرخ آزاد شدن بیشتر گرما استفاده می‌شود. اما پودرهای نانو دارای حساسیت زیادی است و دچار استحاله می‌گردد و بنابراین استفاده از این نانو ذرات نیز دارای مشکلاتی است. آنچه هم اکنون ضرورت دارد این است که مواد فلزی پراثری ساخته شود که دارای خصوصیتی زیر باشد:

- دمای شروع احتراق پایین‌تر
- سرعت احتراق بالاتر
- احتراق کامل‌تر
- قابلیت کنترل احتراق به منظور کنترل پارامترهای انفجار

- وجود کیفیت مناسبی در مکانیزم احتراق (برای کاربردهایی همچون مواد منفجره ترموباریک)

برای دستیابی به چنین خواصی لازم است مواد فلزی جدیدی طراحی و ساخته شود که توانایی ایجاد چنین خواص را داشته باشد. رویکرد اصلی برای بهبود بیشتر کیفیت سوزش فلز، استفاده از فلزات فعال‌تر به عنوان قسمتی یا کل جزء سوخت فلزی در ترکیب ترموباریک‌های جامد می‌باشد. در این میان استفاده از فلزات فعال جدیدی مانند نانوذرات آلومینوم برای افزایش واکنشگری، آلیاژ تیتانیم- بور برای افزایش گرمای خروجی و آلیاژ Al/Mg برای کاهش دمای اشتعال، در بین روش‌های برگزیده برای افزایش راندمان سوزش فلز مطرح می‌باشند. مواد منفجره قدرتمندی مانند CI-20 نیز قابلیت افزایش فشار و دمای انفجار را تا حد قابل ملاحظه‌ای دارند و استفاده از آنها بسیار مفید واقع می‌شود. هم اکنون بررسی آلیاژهای فوق اشباع پراثری بر پایه فلزات بخصوص تولید آلیاژهای Al-Mg-H, Al-Mg, Al-Ti, Ti-B, Al-B, B-Mg برای بهینه‌سازی خواص انفجاری در رأس عناوین تحقیقاتی قرار گرفته است و کاربرد آنها به منظور طراحی مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشراندهای نوین در حال تحقیق و توسعه است [۳۸-۳۹].

۶- نتیجه‌گیری

بررسی‌های متنوع صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از فلزات کارآمدی مانند آلومینوم یا آلیاژهای فلزی مختلف، استفاده از ترکیبات ترمیتی، استفاده از اکسیدکننده‌های چگال و پراثری معدنی، بهره‌گیری از بایندها و نرم‌کننده‌های پراثری و هالوژن‌دار یا استفاده از واکنش گرمای تشکیل ترکیبات اینترمتالیک بور با فلزات دیگر، حرارت و ایمپالس خروجی از ترکیبات انفجاری تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. با توجه به اینکه مهم‌ترین مشخصه‌های TBXها ایجاد فشار انفجاری بالا و حرارت خروجی شدید می‌باشد، نکات مذکور برای ارتقای کیفیت آنها مفید خواهد بود. فلز آلومینوم جزء پرکاربردترین سوخت‌های فلزی مورد استفاده در TBXها می‌باشد که کیفیت احتراق پائین آن باعث شده است در رویکردهای جدید از آلیاژهای فلزی مختلف مانند Al/Mg استفاده شود. همچنین در مواردی مقدار کمی اکسیدکننده و کاتالیستی از اکسیدهای فلزی به نمونه‌ها افزوده شده است. انتظار می‌رود مواد پیشنهادی برای تولید و استفاده گسترده در مهمات، علاوه بر برآورده‌سازی ویژگی‌های عمومی ایمنی و خواص عملکردی مورد انتظار از TBXها، نیازمندی‌های مربوط به مواد منفجره غیر حساس را نیز برآورده نماید. با توجه به رویکردهای عمومی برای تولید PBXهای غیرحساس در بافت‌های پلیمری، به نظر می‌رسد که PBXهای ترموباریک مناسب‌ترین گزینه برای تولید و استفاده در مهمات آینده باشند.

- [1] Chan, M. L.; Bui, D. T.; Meyers, G.; Turner, A. "Castable Thermobaric Explosive Formulations." ; US Patent 6,969,4334 B1, 2005.
- [2] Chan, M. L.; Turner, A. D. "High Energy Blast Explosives for Confined Explosives." ; US Publication No. 2007/0113939 A1, 2007.
- [3] Chan, M. L.; Bui, M. G. "Advanced Thermobaric Explosive Compositions." ; US Patent 6,955,732 B, 2005.
- [4] Baker, J. J. "Thermobaric Explosive, Articles of Manufacture, and Methods Comprising the Same." ; US Patent 7,807,000 B, 2010.
- [5] Newman, K. E.; Riffe, V.; Jhones, S. L.; Lowell, D. "Thermobaric Explosives and Compositions, and Articles of Manufacture, and Methods Regarding the Same." ; US Patent 7,754,036 B, 2010.
- [6] Conley, J. "Thermobaric Weapons: They will Blow Your Minds." ; University of Pittsburgh, Eighth Annual Freshman Conference, 2008.
- [7] Wildegger-Gaissmaier, A. E. "Aspects of thermobaric weaponry." ; ADF Health, Vol. 4, 2003.
- [8] Fuel Air Explosives (FAE), <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/dumb/fae.htm>, 2010.
- [9] Dearden, P. "New Blast Weapons." ; J. R. Army Med. Corps., 2001, 147, 80-86.
- [10] Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies, National Research Council, "Advanced Energetic Materials." ; The National Academies Press, Thermobaric Explosives, pp. 16-19, 2004.
- [11] Blagden, P. "Fuel Air Explosive (FAE) Systems." ; Technical Notes for Mine Action (TNMA), Technical Note 09.30 /04, Version 1.0, USA BLU-72/B, Kuwait, 1991.
- [12] Balas, W. "Process Development for High Blast PAX Explosives at Holston Army Ammunition Plants." ; Holston Army Ammunition Plant, Picatinny Arsenal, 2003.
- [13] Daniels, A. S.; Balas, W. A.; Franz, M. C. "Development of PAX-3 Explosive for the Bunker Defeat Munition." ; Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium Maintaining Performance and Enhanced Survivability Throughout the Lifecycle Bristol, United Kingdom, 2006.
- [14] Hazard Assessment Test for Non-Nuclear Munitions, MIL-STD-2105C, 2003.
- [15] Johansen, Q. H.; Smith, K. T.; Olsen, J. C. "Qualification of an Enhanced Blast Explosive (DPX-6)." ; IMEMTS, Miami, Florida, 2010.
- [16] Dunning, M.; Andrews, W.; Jaansalu, K. "The Fragmentation of Metal Cylinders Using Thermobaric Explosives." ; Defence Research and Development, Canada, 2005.
- [17] Hoffmann, P.O.; Kintish, I. L. "Cyclotol and Thermite Explosive Composition." ; US Patent 3, 297, 503, 1967.
- [18] Fischer, S. H.; Grubelich, M. C. "A Survey of Combustible Metals, Thermites, and Intermetallics for Pyrotechnic Application." ; 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Lake Buena Vista, FL, July 1-3, 1996.
- [19] Jones, J. W. "Energy Dense Explosives." ; US Patent 6, 679, 960, 2004.
- [20] Ferguson, J. D.; Buechler, K. J.; Weimer, A. W.; George, S. M. "SnO₂ Atomic Layer Deposition on ZrO₂ and Al Nanoparticles: Pathway to Enhanced Thermite Materials." ; Powder Technology, 2005, 156, 163-167.
- [21] Christe, K. O. "High Detonation Pressure Explosives." ; US Patent 4, 207, 124, 1980.
- [22] Lund, G. K.; Braithwaite, P. C. "Enhanced Performance, High Reaction Temperature Explosive." ; US Patent 5, 467, 714, 1995.
- [23] Frankel, M. B.; Lo, G. A. "Thermally Stable High Density Impulse Energetic Compositions of Matter." ; US Patent 3, 784, 420, 1974.
- [24] West, M. M.; Zavitsanos, D. "Composite High Explosives for High Energy Blast Applications." ; US Patent 4, 331, 080, 1982.
- [25] Brunauer, S. "High Explosive Mixtures." ; US Patent 3, 111, 439, 1963.
- [26] مؤمنیان، حسین "شیمی مواد منفجره."؛ چاپ اول، انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)، ۱۳۸۰.
- [27] Fedoroff, B. T.; Shiffeld, O. E. "Encyclopedia of Explosives and Related Items." ; part 2007, Vol.1, A140, 1978.
- [28] Vadhe, P. P.; Pawar, R. B.; Sinha, R. K.; Asthana, S. N.; Rao, A. S. "Cast Aluminized Explosives (Review)." ; Combust., Explo. Shock Waves, 2008, 44, 461-477.
- [29] Johnson, N.; Carpenter, P.; Newman, K.; Jones, S.; Schlegel, E.; Gill, R. "Evaluation of Explosive Candidates for a Thermobaric M72 LAW Shoulder Launched Weapon." ; NDIA 39th Annual Gun & Ammunition/Missiles & Rockets Conference, Naval Surface Warfare Center, Indian Head Division, 2004.
- [30] Shtessel, E.; Dreizin, E. L. "High Energy Metallic Mechanical Alloys for New Explosives and Incendiary Devices Controllable Explosion Parameters." ; Defence Threat Reduction Agency, USA, 2001.
- [31] ASM Metals Handbook, "Powder Metal Technologies and Applications." ; p. 2700, 1998.
- [32] Ethylene Oxide, Material Safety Data Sheet, <http://www.anpro.com/support/MSDS.pdf>, 2014.
- [33] Isopropyl Nitrate, Material Safety Data Sheet, <http://www.coleparmer.com/Assets/Msds/10869.htm>, 2014.
- [34] Gromov, A.; Ilyin, A.; Tieple, U. "Characterization of Aluminum Powders: II. Aluminum Nanopowders Passivated by Non-Inert Coatings." ; Propell. Explos. Pyrotech., 2006, 31, 401-408.
- [35] Wang, H. Z.; Leung, D. Y. C.; Leung, M. K. H.; Ni, M. "A Review on Hydrogen Production Using Aluminum and Aluminum Alloys." ; Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009, 13, 845-853.
- [36] Smith, K. T. "Pressable Explosive Composition." ; US Patent Publication No. 2006/0060273 A1, 2006.
- [37] Shoshin, Y. L.; Mudryy, R. S.; Dreizin, E. L. "Preparation and Characterization of Energetic Al-Mg Mechanical Alloy Powders." ; Combust. Flame, 2002, 128, 259-269.
- [38] Dreizin, E. L. "Metal-Based Reactive Nanomaterials." ; Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35, 141-167.
- [39] Yen, N. H.; Wang, L. Y. "Reactive Metals in Explosives." ; Propell. Explos. Pyrotech., 2012, 37, 143-155.