



سوخت جامد

مشخصات مقاله اصلی

Solid propellants, K.O.Hartman (Alliant techsystems, Allegancy ballistics laboratory), Scott morrow (U.S. Army).

مترجمین

نوید توسلی

اسدالله بهمنی

خواهشمندیم که انتقادات و نظریات و پیشنهادات خود را به آدرس ایمیل Elvisf35@yahoo.com ارسال بنمایید.

تابستان ۱۳۹۱

ELVISF35@yahoo.com

۱.	واژه‌نامه	۱
۲.	خصوصیات	۲
۳.	فرآیند سوزش	۵
۳-۱.	نرخ سوزش	۵
۳-۲.	اصلاح نرخ سوزش	۷
۴.	پیشران‌های تفنگ	۹
۴-۱.	انواع کالیبر کوچک	۹
۴-۲.	انواع کالیبر بزرگ	۱۲
۴-۳.	ساخت پیشران تفنگ	۱۳
۵.	پیشران‌های ژنراتورهای گازی	۱۵
۶.	پیشران‌های راکت	۱۶
۶-۱.	کاربردهای پیشران‌های راکت	۱۸
۶-۲.	نیازمندی‌های پیشران راکت	۱۹
۶-۳.	مهمات غیرحساس	۱۹
۶-۳-۱.	پیشران‌های غیرحساس کامپوزیتی	۲۱
۶-۳-۲.	پیشران‌های غیرحساس با حداقل دود	۲۱
۶-۴.	مقدار انرژی پیشران	۲۳
۶-۵.	خواص مکانیکی	۲۵
۶-۶.	گاز یا دود خروجی	۲۵
۶-۷.	عمر خدمتی	۲۶
۸-۶.	فرآوری و آماده‌سازی پیشران راکت	۲۷
۷-	ملاحظات زیست محیطی	۲۹
۸-	ایمنی	۳۰

۱. واژه نامه

زمان فعالیت^۱: کل زمان سوزش یا حداکثر زمانی که راکت موتور رانش تولید می نماید.

انفجار با سرعت و نور بسیار زیاد^۲: واکنش انفجاری با سرعتی مافوق صوت که موجب انتشار یک موج شوک^۳ در ماده منفجره همراه با واکنش شیمیایی می گردد، را می گویند؛ که در نهایت انرژی لازم برای تداوم انتشار موج شوک را در حالتی پایدار فراهم می نماید. انفجار با سرعت و نور بسیار زیاد، همچنین فشار بسیار زیادی را همراه با موج انفجار به صورت ناگهانی ایجاد می نماید.

اشتعال فرسایشی^۴: با افزایش سرعت گاز در نزدیکی سطح یک پیشرانه جامد، نرخ سوزش افزایش می یابد. عوامل مؤثر بر آن شامل هندسه دانه و ترکیب شیمیایی پیشرانه می باشد.

اسب بخار گازی^۵: عبارتی است که برای بیان توان تولیدی یک گاز در هنگام خروج از نازل مورد استفاده قرار می گیرد.

اسب بخار: واحدی است که برای اندازه گیری میزان کار انجام شده مورد استفاده قرار می گیرد. یک اسب بخار معادل ۷۴۵/۷ وات، ۵۵۰ فوت در پوند بر ثانیه و یا ۲۵۴۵ بی تی یو^۶ بر ساعت (بی تی یو واحد بریتانیایی گرما) می باشد.

نیروی یا انرژی محرک^۷: عبارتی است که معنای آن با آنچه که در فیزیک به صورت رایج و معمول استفاده می شود، متفاوت است. کاربرد آن در سوخت های تفنگ و توپ می باشد و با استفاده از معادله

$$F = nRT_v$$

تعریف می گردد. که در این معادله F نیرو و انرژی محرک بر حسب کالری بر گرم، n تعداد مول های گاز در واحد وزن بر حسب گرم در مول بر گرم، R ثابت گاز معادل با ۱/۹۸۷ کالری بر مول بر کلوین و T_v دمای شعله هم حجم بی درو (بر حسب کلوین) در حجم ثابت می باشد (سوخت درون یک محفظه بسته به صورت بی درو محترق می گردد و در این شرایط حداکثر دمای ممکن معادل دمای شعله هم حجم بی درو می باشد). لازم بذکر است که مقدار نیرو و انرژی محرک بر حسب نوع تفنگ ها و توپ ها از ۱۱۲۱ – ۸۲۲ ژول بر گرم و یا ۳۷۵۰۰۰ – ۲۷۵۰۰۰ (فوت. پوند) بر پوند، متغیر می باشد.

ضربه ویژه^۸: مقدار ضربه در واحد جرم پیشران را می گویند و یا به مقدار تراست – پوند تولیدی یک راکت موتور، به ازای سوختن ۱ پوند از پیشرانه در واحد زمان (۱ ثانیه) گفته می شود که با استفاده از معادله زیر تعریف می گردد:

$$I_{sp} = F / (dm/dt)$$

^۱ - Action time

^۲ - Detonation

^۳ - Shock wave

^۴ - Erosive burning

^۵ - Gas horsepower

^۶ - BTU (British thermal unit)

^۷ - Impetus

^۸ - Specific impulse

که در آن I_{sp} ضربه ویژه بر حسب پوند نیرو بر (پوند جرم در زمان)، F تراست (رانش) بر حسب پوند و dm/dt دبی جرمی پیشراانه بر حسب پوند بر زمان می‌باشد. این معادله باید برای راکت‌ها با ارتفاع‌های گوناگون تطبیق داده شود، چراکه تراست و وزن با ارتفاع و میدان گرانش مختلف تغییر پیدا می‌کند. بنابراین داریم:

$$I_{sp} = \{RT_c/M[2\gamma/(\gamma-1)][1 - (P_e/P_c)^{(\gamma-1)/\gamma}]\}^{1/2}$$

که در آن γ نسبت گرمای ویژه محصولات خروجی یعنی C_p/C_v (که C_p و C_v به ترتیب ظرفیت گرمایی در فشار ثابت و حجم ثابت می‌باشند)، M وزن مولکولی محصولات خروجی، T_c دمای محفظه، P_e فشار خروجی و P_c فشار محفظه می‌باشد.

I_{sp} ، ضربه ویژه در شرایطی است که فشار محفظه و خروجی به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۴/۷ پوند بر اینچ مربع می‌باشد، که از آن به عنوان یک استاندارد برای مقایسه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت،

$$I_{sp} = g_c V_e$$

است که در آن V_e سرعت خروجی مؤثر، و g_c ضریب تبدیل گرانشی می‌باشد. لازم بذکر است که ضریب تبدیل گرانشی در سیستم مهندسی انگلیسی برابر ۳۲/۱۷ (پوند جرم بر پوند نیرو) در (فوت بر مربع زمان) می‌باشد.

از آنجا که غالباً بخش زیادی از جرم کل را جرم پیشران تشکیل می‌دهد، دارا بودن ضربه ویژه کاملاً زیاد مناسب به نظر می‌رسد.

رانش^۱: می‌توان آن را بر حسب پوند و یا واحدهای معادل آن اندازه‌گیری نمود، و به صورت تجربی و تئوری برای یک راکت موتور تعیین می‌گردد. لازم بذکر است که راکت موتورهای بر حسب رانششان مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

ضخامت وب^۲: به فاصله سطح بیرونی یک روزنه و یا مجرای داخلی احتراق با محیط بیرونی مواد قابل احتراق گفته می‌شود. لازم بذکر است که نرخ احتراق و زمان فعالیت وابسته به مقدار ضخامت وب می‌باشند.

سوخت‌های جامد: مواد شیمیایی بسیار واکنش پذیر به صورت فشرده شده و حالت جامد می‌باشند که می‌توان آن‌ها را مشتعل نمود و به صورت کنترل شده برای مدت کوتاهی سوزاند، که در نتیجه آن مقدار بسیار زیاد و حجیمی از گازهای بسیار داغ تولید می‌گردد؛ که بدین صورت توان لازم برای انجام کار مورد نظر فراهم می‌گردد. این سوخت‌ها در شدت انفجار که به واسطه آن انرژی‌شان را آزاد می‌نمایند با یکدیگر متفاوت می‌باشند، به گونه‌ایی که در فرآیندهای احتراق کُندتر^۳، نرخ انتشار واکنش عمود بر سطح به واکنش سطحی در حدود ۲-۱ سانتیمتر بر ثانیه و در انفجار مواد شدید الانفجار^۴ در حدود ۱۰-۵ کیلومتر بر ثانیه می‌باشد.

۲. خصوصیات

کاربرد مهم پیشراانه‌های جامد، به حرکت درآوردن یک پرتابه با سرعت بالا از یک تفنگ یا وسیله‌ای مشابه، تأمین توان و رانش یک راکت موتور، و تولید گاز برای بکار انداختن تجهیزات مکانیکی است. انواع بسیار متنوعی از پیشراانه‌های جامد برای پاسخ‌گویی به

^۱ - Thrust

^۲ - Web thickness

^۳ - Slower burning process

^۴ - High explosive

این کاربردها نیاز می‌باشد. پیشرانۀ جامد ابتدایی باروت سیاه^۱ بود که برای مدت کوتاهی به عنوان خرج اسلحه^۲ مورد استفاده قرار گرفت.

با استفاده از خصوصیات فیزیکی دانه‌های پیشرانۀ^۳، می‌توان آن‌ها را به حالتی خاص در کنار یکدیگر قرار داد و با یکدیگر ترکیب نمود؛ به گونه‌ای که فرآیند احتراق آن‌ها متناسب باشد با انتظاراتی که از مجموعه وجود دارد. نرخ سوزش^۴ با توجه به شرایط خاصی که مدنظر می‌باشد، انتخاب می‌گردد. ضریب پخش حرارتی^۵ به داخل پیشرانۀ، عامل مهمی در کنترل نرخ پسروی^۶ می‌باشد. در شرایط شرایط عادی احتراق سوخت، فرآیند احتراق در یک شرایط کنترل شده ایجاد می‌گردد. این امکان وجود دارد تا در شرایطی خاصی فرآیند احتراق شتاب پیدا کند که در این شرایط یک موج فشار ایجاد می‌گردد که آن به صورت یک موج شوک انتقال پیدا می‌نماید که در نهایت منجر به ایجاد یک انفجار ناگهانی می‌گردد. به فرآیند تبدیل احتراق ناگهانی به انفجار ناگهانی، DDT گفته می‌شود. این امر برای یک پیشرانۀ که در آن آزاد شدن انرژی به صورت کنترل شده مورد نظر و مطلوب می‌باشد، نامطلوب خواهد بود. علی‌رغم تفاوتی که پیشرانۀ‌های جامد و مواد منفجره در آزاد نمودن انرژی خود تحت شرایط نرمال کاری دارند، هر دوی آن‌ها با هم به لحاظ شیمیایی پیوستگی نزدیکی دارند. هر دوی آن‌ها حاوی سوخت و اکسیدکننده^۷ از پیش مخلوط شده می‌باشند. تفاوت آن‌ها بیشتر به لحاظ نیروی محرکه جنبشی است تا ترمودینامیکی. در حقیقت ترکیبات بسیاری هستند که می‌توانند به عنوان یک پیشران یا ماده منفجره بکار برده شوند، که این امر تنها به حالت شروع آن‌ها بستگی دارد. علاوه بر پرکلرات آمونیوم^۸ و آلومینیوم اجزای ترکیبی بسیاری هستند که در هر دو بکار می‌روند؛ مانند سیکلومتیلن‌تری‌نیترامین^۹ RDX، سیکلومتیلن‌ترانیترامین^{۱۰} HMX، نیتروگوانیدین^{۱۱}، نیترات آمونیوم. پیشرانۀ‌های جامد تقریباً همیشه به صورت مخلوط می‌باشند، در حالی که مواد منفجره، بسته به کاربردها، می‌توانند طیف گسترده‌ای از ترکیبات منفرد (غیرمخلوط) مانند RDX یا HMX باشند. با وجود اینکه قابلیت انفجار ناگهانی و سریع^{۱۲} یک ویژگی مهم و اساسی در مواد منفجره است، اما همین ویژگی برای پیشرانۀ‌ها نامطلوب می‌باشد. لازم بذکر است که مقیاس و نسبتی که اکسندۀ و سوخت با یکدیگر ترکیب می‌شوند، اثر عمیقی بر خاصیت پیشران می‌گذارد. در ترکیباتی مانند HMX و نیتروگلیسرین، سوخت و اکسندۀ در ساختار مولکولیشان از پیش مخلوط می‌باشند (در مقیاس آنگستروم). این مواد یک موج انفجار ناگهانی پایدار را ایجاد می‌نمایند که سرعت آن در حدود ۱۰ کیلومتر بر ثانیه و قطر بحرانی آن کمتر از یک سانتیمتر می‌باشد. در مقابل در پیشرانۀ‌های کامپوزیت^{۱۳} (اغلب از پرکلرات آمونیوم و بایندهای پلیمری ساخته می‌شوند) اکسندۀ و سوخت در مولکول‌های مجزا قرار گرفته‌اند و اختلاط آن‌ها در مقیاس میکرومتر می‌باشد. این ترکیبات دارای قطر بحرانی در حدود ۵ فوت هستند. لازم بذکر است که فشار شوک مورد نیاز برای آغاز یک انفجار ناگهانی، نسبت به پیشرانۀ‌های کامپوزیتی بسیار بیشتر می‌باشد.

¹- Black Powder

²- Gun propellant

³- Propellant grains

⁴- Burning rate

⁵- Thermal diffusivity

⁶- Regression rate

⁷- Oxidizer

⁸- Ammonium Perchlorate

⁹- Cyclomethylenetrinitramine (RDX)

¹⁰- Cyclomethylenetetranitramine (HMX)

¹¹- Nitroguanidine

¹²- Detonability

¹³- Composite Peropellants

پیشران‌های تفنگ^۱ از نیتروسلولز^۲ و پاره‌ای اجزای دیگر تشکیل شده‌اند. پیشران‌هایی که نیتروسلولز جزء ترکیبی اصلی آن‌ها به شمار می‌رود، سوخت تک‌پایه^۳ نامیده می‌شوند، در حالی که پیشران‌های دوپایه^۴ حاوی نیتروسلولز به صورت پلاستیک همراه با نیتروگلیسرین می‌باشند، و پیشران‌های سه‌پایه^۵ با افزودن نیتروگوانیدین به یک ترکیب دو پایه بدست می‌آیند. از دی‌فنیل‌آمین^۶ یا اتیل‌سنترالیت^۷ به عنوان پایدارکننده در این پیشران‌ها استفاده می‌شود. دی‌نیتروتولون^۸، دی‌بوتیل‌فتالات^۹، اتیلن دی‌متاکریلات^{۱۰}، و متیل‌سنترالیت به عنوان بازدارنده و برای جلوگیری از نرخ سوزش اولیه دانه‌های پیشران به آن افزوده می‌شوند. دیگر افزودنی‌ها به عنوان روان‌کننده‌ها، بازدارنده‌های خوردگی، اصلاح‌کننده‌های سرعت سوزش و عواملی برای بهبود ویژگی‌های پروسه آماده‌سازی مخلوط‌های پیشران و برای تسریع فرآیند تبدیل آن‌ها به ترکیباتی با وزن مولکولی بالاتر بکار برده می‌شوند. پیشران‌های تجربی تفنگ^{۱۱} به گونه‌ای فرموله شده‌اند که در آن‌ها بجای نیتروسلولز پُرانترژی، از بایندر پلیمری اکریلیکی^{۱۲} غیرانترژی‌زا استفاده شده است. از پیشران‌های دو پایه به عنوان یک بایندر در پیشران برخی راکت‌ها استفاده می‌شود، و این در حالی‌ست که نمونه‌های پلاستیکی، رزینی یا پلیمری آن‌ها رایج‌تر می‌باشد. در بیشتر اوقات از بایندهای پلی‌اورتان^{۱۳} و پلی‌بوتادی‌ان^{۱۴}، برای پیشران‌های کامپوزیتی موشک‌ها استفاده می‌شود. بسیاری از پیشران‌های کامپوزیتی حاوی پرکلرات آمونیوم پودر شده (پودری شکل) به عنوان اکسیدایزر، و ذرات فلز آلومینیوم با اندازه ریز به عنوان سوخت می‌باشند. این پیشران‌ها دارای ساختاری ناهمگن^{۱۵} هستند که در آن ذرات اکسیدایزر توسط نواحی غنی از سوخت احاطه شده‌اند. هنگامی که به یک پیشران دو پایه، پرکلرات آمونیوم و فلز آلومینیوم اضافه گردد، به آن پیشران کامپوزیتی دو پایه اصلاح شده^{۱۶} گفته می‌شود. در پیشران‌های راکت و تفنگ، استحکام مکانیکی بسیار مهم می‌باشد. در مورد تفنگ‌ها، چنانچه در دانه‌های پیشران در هنگام احتراق جدایش رخ دهد، نرخ سوزش می‌تواند به شکلی خطرناکی شتاب بگیرد که به نوبه خود موجب افزایش بیش از حد فشار و احتمالاً انفجار و ترکیدن لوله تفنگ می‌گردد. ترک‌ها و یا عیوب ریز در دانه‌های یک راکت موتور می‌تواند معمولاً به نتایج خطرناک و فاجعه آمیزی منجر گردد.

پیشران‌های مورد استفاده در دستگاه‌های ژنراتورهای گازی به دو دسته تقسیم می‌شوند، آن‌هایی که دارای زمان سوزش کوتاه هستند و آن‌هایی که دارای زمان سوزش زیاد (طولانی مدت) هستند. زمان‌های سوزش از کسری از ثانیه تا ۲۰ دقیقه متغیرند. از وسایلی که به شکل کارتریج هستند، می‌توان به وسیله‌ای که با گاز فشنگ کار می‌کند^{۱۷} و یا تجهیزات فعال‌شونده با پیشران^{۱۸} اشاره کرد. انواع دیگری نیز موجود است که در صنعت هواپیمایی و صنعت راکت بکار می‌روند. ژنراتورهای گازی کاربردهای مهمی در زیر آب دارند. گوناگونی زیادی از فرمولاسیون‌های پیشران برای این کاربردها وجود دارد. در تجهیزاتی که با گاز فشنگ کار می‌کنند، از

¹ - Gun Propellants

² - Nitrocellulose (NC)

³ - Single-base propellant

⁴ - Double-base propellant

⁵ - Triple-base propellant

⁶ - Diphenylamine

⁷ - Ethyl centralite

⁸ - Dinitrotoluene

⁹ - Dibutyl phthalate

¹⁰ - Ethylene dimethacrylate

¹¹ - Experimental Gun Propellants

¹² - Acrylic

¹³ - Polyurethane

¹⁴ - Polybutadiene

¹⁵ - Heterogeneous

¹⁶ - Composite Modified Double – Base (CMDB)

¹⁷ - Cartridge – Actuated Devices (CADS)

¹⁸ - Propellant – Actuated Devices

پیشرا نه‌های یک و دو پایه استفاده می‌گردد. از باروت سیاه در زمانی که نیروی محرکه کمی مورد نیاز می‌باشد، می‌توان استفاده کرد و فرمولاسیون‌های مربوط به سوخت کامپوزیتی پرکلرات آمونیوم برای کاربردهایی که به نیروی تولیدی بیشتری نیاز است، قابل استفاده‌اند. چنانچه به زمان سوزش بیشتری نیاز باشد، از نیترات آمونیوم به عنوان اکسیدایزر استفاده می‌گردد.

۳. فرآیند سوزش

مرحله اشتعال در احتراق سوخت جامد باید تا حد امکان به صورت یکنواخت در کل سطح پیشرا نه که در معرض اشتعال قرار دارد، روی دهد. در این فرآیند سه فاز وجود دارد. فاز اول شامل در معرض شعله قرار گرفتن پیشرا نه می‌باشد، که این شعله به عنوان مثال بوسیله یک ماده آتش‌زا، یا گاز داغ و یا جرقه‌زدن ایجاد می‌گردد. زمانی که دمای سطح پیشرا نه به نقطه خوداشتعالی برسد، اشتعال روی می‌دهد. در فاز دوم شعله در طول نواحی مشتعل نشده از سطح پیشرا نه منتشر می‌گردد. در طول فاز سوم، محفظه با محصول ناشی از احتراق پیشرا نه پر می‌گردد، تا زمانی که فشار به حالت یکنواخت برسد.

۳-۱. نرخ سوزش

پیشرا نه‌ها به طور معمول و در حالت نرمال به صورت لایه‌های موازی می‌سوزند. مطابق با معادله زیر مقدار مصرف شده و مقدار گاز تولید شده در واحد زمان، با مساحت سطحی از پیشرا نه که در معرض شعله قرار دارد، متناسب است.

$$\frac{dm}{dt} = r\rho A_b \quad (1)$$

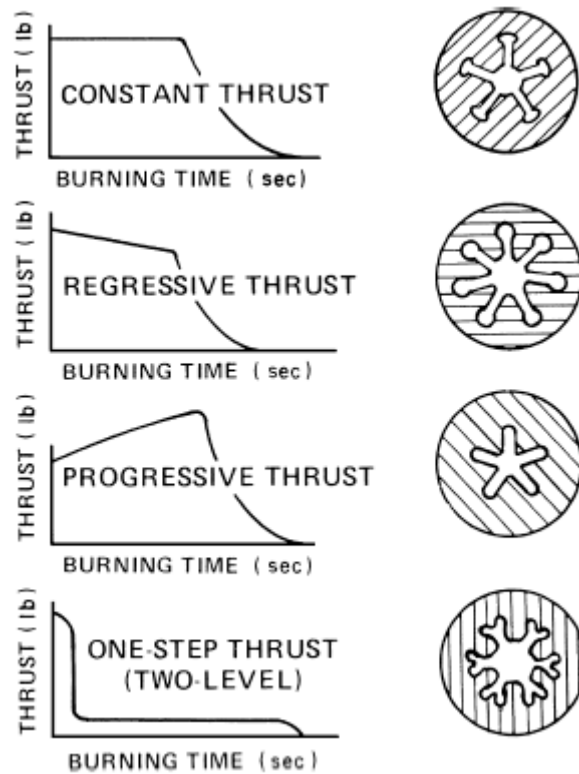
که در آن، dm/dt نرخ سوختن جرمی (g/sec)، r نرخ سوزش (cm/sec)، ρ چگالی (g/cm³)، و A_b مساحت سطح پیشرا نه (cm²) می‌باشد. نرخ سوزش متأثر از دمای محیطی پیشرا نه، فشاری که همزمان با سوختن پیشرا نه ایجاد می‌گردد، ترکیب، آرایش هندسی و اندازه دانه‌ها و راهی که گازهای حاصل از احتراق از سطح پیشرا نه جریان می‌یابد، می‌باشد. سوزش فرسایشی زمانی رخ می‌دهد که گازهای داغ به موازات سطح سوزش حرکت کنند. این نوع سوزش، نرخ سوزش را شتاب می‌دهد. سوزش فرسایشی می‌تواند بوسیله جریانی از گازهای خروجی از طریق سوراخ‌هایی (منافذی) به فضای آزاد بزرگتری در محفظه احتراق تولید گردد؛ همانند آنچه در یک راکت یا تفنگ روی می‌دهد.

اساساً سه حالت برای سوزش پیشرا نه وجود دارد، که آن‌ها عبارتند از پس‌رونده^۱، خنثی^۲، و پیش‌رونده^۳. در اشکال ۱ و ۲ نمایی از آن‌ها نشان داده می‌شود.

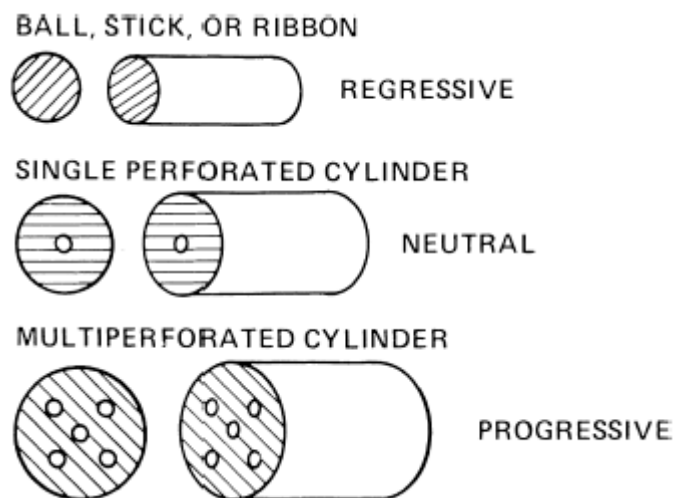
¹- Regressive

²- Neutral

³- Progressive



شکل ۱- پیکربندی و نمودارهای تراست - زمان دانه‌های پیش‌رانه‌های راکت.



شکل ۲- مقطع عرضی دانه‌های پیش‌رانه تفنگ و انواع سوزش مرتبط به آن‌ها.

همانطور که از این عبارات فهمیده می‌شود، سوزش پس‌رونده نشان‌دهنده کاهش مساحت سطح سوزش با مصرف پیش‌رانه است، خنثی یعنی مساحت سطح سوزش در طول فرآیند احتراق ثابت می‌ماند، و پیش‌رونده به این معنی است که سطح سوزش با زمان افزایش می‌یابد. همانطور که در اشکال ۱ و ۲ دیده می‌شود، هندسه دانه پیش‌رانه به شدت بر زمان سوزش اثر می‌گذارد. احتراق سوخت در تفنگ‌ها در فشارهای بالا، معمولاً در گستره $552 - 138$ MPa ($80000 - 20000$ psi) رخ می‌دهد، این در حالی است که در راکت موتورها در محدوده فشار $20/7 - 3/45$ MPa ($3000 - 500$ psi) رخ می‌دهد. سوخت‌های بدون دود تفنگ بر پایه نیتروسولونز (تک، دو و سه پایه) برای سوختن در فشارهای بسیار بالاتر و در مدت زمان کمتری، نسبت به آنچه در راکت‌ها می‌باشد،

طراحی می‌شوند. نرخ سوزش پیشرانه دوپایه اصلاح نشده به شدت، به فشار وابسته است. آگاهی دقیق از نرخ احتراق و دما و فشار محفظه، برای طراحی پیشرانه یک راکت یا تفنگ مورد نیاز است. از مشعل‌های استرند^۱ و بمب‌های بسته^۲ برای تعیین نرخ سوزش پیشرانه‌ها به صورت تجربی استفاده می‌شود؛ چراکه نتایج تئوری نمی‌توانند معتبر باشند. از رابطه زیر (قانون وایلیز^۳) می‌توان برای محاسبه نرخ سوزش در فشار پایین و دمای ثابت برای بسیاری از پیشرانه‌ها استفاده کرد

$$r = bp^n \quad (2)$$

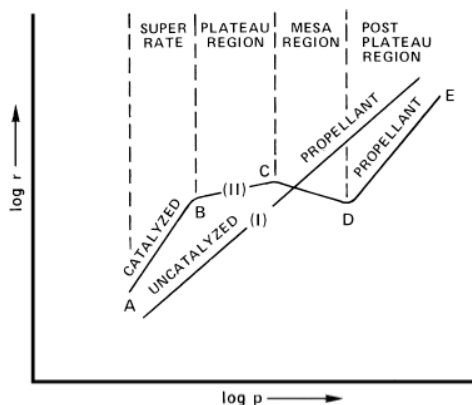
که در آن r نرخ سوزش بر حسب in/sec ، p فشار بر حسب psi ، b و n (نمادهای فشار) ثوابتی هستند که مقدار آن‌ها با دما تغییر می‌کند. در جدول چهار برای انواع پیشرانه‌های تفنگ نشان داده شده، که مقادیر نماد فشار تمایل دارند که در محدوده $0.6 - 0.8$ قرار داشته باشند. برای سوزش پیشرانه‌های تفنگ در فشارهای بالا می‌توان از معادله زیر استفاده نمود

$$r = a + bp^n \quad (3)$$

که در آن r نرخ سوزش خطی، p فشار، و a ، b و n ثوابتی هستند که با دما تغییر می‌کنند.

۳-۲. اصلاح نرخ سوزش

اصلاح کننده‌های نرخ سوزش در پیشرانه‌های جامد برای اصلاح (۱) رابطه نرخ سوزش در مقابل فشار و (۲) نرخ سوزش مطلق در یک فشار معین مورد استفاده قرار می‌گیرند. جلوگیری از نرخ سوزش اولیه پیشرانه‌های گلوله سلاح‌های کوچک (سبک) با استفاده از بازدارنده‌های شیمیایی سطح تلقیح شده^۴ نمونه مهمی از مورد اول می‌باشد. سوزش مسطح^۵ در پیشرانه‌های دوپایه راکت‌ها از طریق افزودن مقادیر اندکی از ترکیبات سری گوناگون مانند اکسیدها و نمک‌های اسیدهای آلی بدست می‌آید. این امر نرخ سوزش را در فشار پایین افزایش می‌دهد (بخش A-B منحنی ۲ در شکل ۳).



شکل ۳- رفتار احتراقی یک پیشرانه راکت کاتالیز شده در مقابل یک پیشرانه راکت کاتالیز نشده.

در منطقه‌ای با فشار بالاتر (منحنی بخش B-C)، نرخ سوزش تقریباً مستقل از فشار است؛ به عنوان مثال، یک خط صاف زمانی مشاهده می‌شود که نماد فشار n دارای مقدار پایینی باشد. از آنجا که نرخ سوزش به فشار حساس نیست، ایمنی کناره‌های آن افزایش می‌یابد،

¹- Strand burners

²- Closed bombs

³- Vieille's law

⁴- Surface - impregnated chemical deterrents

⁵- Plateau burning

π_K کاهش می‌یابد و در نتیجه می‌توان از یک راکت موتور سبک‌تر استفاده نمود. در منطقه^۱ (بخش C – D) مشاهده می‌شود، که نرخ سوزش با افزایش فشار مقدار اندکی نزول می‌یابد. این رفتار با مقداری منفی یا صفر برای نماد فشار n همراه است. در منطقه مسطح، نرخ‌های سوزش به سرعت با افزایش فشار برای هر دو پیشران کاتالیزه شده و غیر کاتالیزه شده شتاب می‌گیرد. افزودنی‌های متفاوت منجر به این اثرات می‌شوند؛ نمک‌های سرب آلیفاتیک و آروماتیک اسیدهای مونوکربوکسیلیک (سالیسیلات سرب، استئارات سرب و غیره) منجر به ایجاد این تأثیرات در منطقه^۲ می‌گردند. یک نمونه از موادی که نرخ سوزش پیشران‌ها در فشار ثابت اصلاح شده است، مشتق دی‌فلوئوروآمینو^۳ از ۱-ایزوپروپنیل کربوران^۴ است. این ماده سرعت سوزش را ۱۷٪ در فشار ۱۰۰۰ psi (۶/۸۹ MPa) در یک فرمولاسیون کامپوزیتی، نسبت به یک پیشران کنترلی مشابه افزایش می‌دهد. یک اصلاح‌کننده نرخ سوزش دیگر که حاوی بور می‌باشد، ۱-نیترو ۲-کربورآنیل پروپن^۵ است که نرخ سوزش یک پیشران کامپوزیتی را از ۲/۰۰ in/sec به ۵/۹۰ in/sec در فشار ۲۰۰۰ psi افزایش می‌دهد، به شرطی که میزان استفاده از آن در فرمولاسیون ۱۲/۲٪ باشد. در مقابل این نرخ‌های سوزش برای پیشران‌های راکت با کارآیی و بازدهی بالا، انواع ژنراتورهای گازی ممکن است مقادیری کمتر از ۰/۲۵ in/sec داشته باشند.

ویژگی‌های پیشران‌ها به لحاظ انرژی آن‌ها در یک محفظه کالریتری^۶ سنجیده و تعیین می‌گردد که در آن گرمای انفجار آن‌ها Q ، اندازه‌گیری می‌شود. گستره مقادیر از حدود ۲/۰۹ KJ/g (۵۰۰ cal/g) برای انواع انرژی کم تا ۶/۲۷ KJ/g (۱/۵ kcal/g) برای انواع پُرانرژی‌تر (با قدرت بیشتر) متغیر است. دمای شعله برای پیشران‌های با سوزش خنک^۶ ۱۵۰۰ K، و برای نوع داغ آن تا حداکثر ۴۰۰۰ K می‌باشد. دمای سطحی یک پیشران دو پایه در حال سوختن کم می‌باشد و در حدود ۵۷۳ K است و مقدار آن نسبت به یک پیشران کامپوزیتی که دارای ذرات آلومینیوم است کمتر است که مقدار آن در حدود ۱۲۷۳ K – ۷۷۳ K می‌باشد. در یک مدل یک بُعدی از یک پیشران دو پایه در حال سوختن پنج منطقه تعریف می‌گردد، (۱) پیشران نسوخته، (۲) منطقه کفی واکنش فاز جامد، (۳) منطقه واکنش فاز گاز غیر نورانی، (۴) منطقه شعله که در آن واکنش شعله همراه با انتشار نور انجام می‌شود، (۵) منطقه تعادلی شعله نهایی. پروفایل‌های دما در آغاز هر منطقه به ترتیب تقریباً ۳۰۰ K، ۶۰۰ K، ۱۵۰۰ K و ۳۰۰۰ K می‌باشند.

مدل‌های توسعه یافته در طی ۳۰ سال گذشته برای احتراق پیشران در حالت یکنواخت، به سه دسته تقسیم می‌شوند، (۱) مدل‌های جنبشی کلی، (۲) مدل‌های نیمه کلی بر پایه یک مکانیزم جنبشی محدود، هم در فاز گازی و هم در فاز میعان، و (۳) مدل‌های چند فاز با جزئیاتی از مکانیزم‌های جنبشی. هر سه گونه عموماً نرخ سوزش را صحیح محاسبه می‌نمایند و وابسته به فشار می‌باشند. مدل‌های چند فاز شامل جزئیات مکانیزم‌های واکنش در فاز گازی به همراه مکانیزم‌های واکنش در فاز مایع (میعان) می‌باشد. این مدل‌ها می‌توانند نرخ سوزش را پیش‌بینی نمایند و آن‌ها وابسته هستند به دما، دمای سطح و همچنین وابسته هستند به پروفایل دما و پروفایل اجزای منطقه واکنش.

¹ - Mesa

² - Difluoramino

³ - 1-Isopropenylcarborane

⁴ - 1-nitro-2-carboranylpropene

⁵ - Calorimetric bomb

⁶ - Cool burning propellants

۴. پیشران‌های تفنگ

۴-۱. انواع کالیبر کوچک

باروت سیاه، که برای چندین سده تنها پیشران تفنگ و نیز تنها خرج انفجاری برای زره‌ها بوده است، به آسانی با یک جرقه مشتعل می‌گردد. به عنوان یک پیشران، باروت به لحاظ اینکه به سرعت در فشار محیط می‌سوزد، منحصر به فرد و یکتا است. پودرهای بدون دود^۱ نه به آسانی مشتعل می‌شوند، و نه با سرعت بالا و مناسبی در فشار اتمسفری می‌سوزند. باروت سیاه برای استفاده در تفنگ‌های پیشرفته مناسب نیست؛ نه تنها به دلیل اینکه به قدر کافی قدرتمند نیست، بلکه به این دلیل که به شدت به رطوبت حساس است، هنگام آتش گرفتن ابرهای بزرگی از دود متصاعد می‌کند، لوله‌های تفنگ‌ها را کثیف می‌کند و بقایای آن خورنده است و می‌تواند موجب خوردگی گردد. از آنجایی که باروت سیاه به راحتی مشتعل می‌گردد و در فضای آزاد به شدت می‌سوزد، ماده‌ای خطرناک نیز به شمار می‌رود. در تفنگ‌های^۲ مدرن، تفنگ‌های شکاری^۳، مسلسل‌ها و تیربارها^۴، هفت تیرها^۵ و مسلسل‌های چرخان^۶، پودرهای تک یا تک یا دو پایه بدون دود جایگزین باروت سیاه شده‌اند. باروت سیاه هنوز به عنوان پیشران در اسلحه‌های گرم آنتیک^۷ مشهور که در حال تولید می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پودرهای بدون دود (غیردودزا) پیشرفته را نمی‌توان برای این اسلحه‌ها به صورت ایمن استفاده نمود. در جدول ۱- فهرستی از انواع باروت سیاه که از طریق برخی از تولیدکنندگان آمریکایی در دسترس قرار دارند، ارائه شده است.

جدول ۱- انواع باروت سیاه (با تشکر از فرانک فهرینگر^۸)

انواع	موارد استفاده
انفجاری نوع A (۷ دانه‌بندی مختلف)	در انفجارات
انفجاری نوع B (۴ دانه‌بندی استاندارد)	بریدن و کندن سنگ‌های مختلف از معادن
باروت آتش‌بازی (۱۰ دانه‌بندی)	آتش‌بازی
باروت‌های نظامی	
MIL-P-223 B, Class I-VIII	ساز و برگ جنگی، اشتعال توپخانه، سیگنال چاشنی، مواد آتش‌بازی
JAN-P-663A	فیوزهای نوع I و II
JAN-P-362	-----
باروت فیوزها (۹ سرعت مختلف از ۸۵ تا ۱۶۵ یارد بر ثانیه)	برای تولید فیوز ایمنی
پودرهای ورزشی^۸	
Goex	توپخانه

^۱ - Smokeless powders

^۲ - Rifles

^۳ - Shotguns

^۴ - Machine guns

^۵ - Pistols

^۶ - Revolvers

^۷ - Frank Fahringer

^۸ - Sporting powders

تفنگ فیتله‌ای	F_g
تفنگ و توپ	FF_g
تیانچه	FFF_g
چاشنی تفنگ‌های سرپر چخماقی قدیمی	$FFFF_g$

انواع F_g تا $FFFF_g$ با اندازه دانه بسیار ریز، عموماً در سلاح‌های آنتیک استفاده می‌شوند. نوع معمولی باروت سیاه از پتاسیم نترات، زغال چوب، و گوگرد با نسبت وزنی ۷۵:۱۵:۱۰ ساخته شده است. گرانول‌های باروت سیاه معمولاً با گرافیت، لعاب داده می‌شوند.

پیشرانده‌های سلاح‌های سبک و کوچک^۱ عموماً به سه صورت می‌باشند که عبارتند از: کره‌های کوچک، استوانه‌های کوچک که ممکن است در آن‌ها سوراخی ایجاد شده باشد و یا به صورت صفحات گرد نازک (به شکل پولک‌ها). پودرهای تک پایه تجاری عموماً برای تیراندازهایی که مهمات خود را به صورت دستی می‌سازند و پُر می‌کنند، کاربرد دارد. پودرهای دوپایه گلوله در هر ۳ بخش نظامی، تجاری و دست ساز بکار می‌روند. از پودر دوپایه گلوله در طیف گسترده‌ای از مهمات سلاح‌های سبک نظامی استفاده می‌شود. در جداول ۲ و ۳ فهرستی از درجه‌بندی نظامی پودرهای سلاح‌های سبک ارائه شده است.

جدول ۲- انواع پودرهای سلاح‌های سبک با مشخصاتشان.

Powder	Nominal dimensions, diameter (mm)	Bulk density (g/cm ³)	Relative quickness (%)	Use
1	0.813	0.570	100	12-Gauge, 1-oz. target load, handgun loads
2	1.47	0.465	96	Handgun loads, shotgun loads
3	1.47	0.480	94	Handgun loads, shotgun loads
4	1.55	0.590	92	Handgun and reduced rifle loads, shotgun loads
5	1.55	0.575	73	Heavy handgun loads, heavy shotgun loads
6	1.27	0.795	55	Magnum handgun and reduced rifle loads, magnum shotgun loads
7	0.762	0.855	45	Some rifle and shotshell loads, magnum handgun loads
8	0.965	0.900	18	Silhouette target loads, rifle loads

¹ - Small – arms propellants

جدول ۳- انواع پیشرانه‌های سلاح‌های سبک ایالات متحده آمریکا همراه با مواد تشکیل دهنده آن‌ها.

Designation:	IM45010	WC818	SR7970	HP C-2	HP C-1
Type:	Single base	Double base	Single base	Double base	Double base
Configuration:	Tubular	Spherical	Flake	Flake	Flake
Supplier:	Radford Arsenal	Olin	Radford Arsenal	Hercules	Hercules
Nitrocellulose	Remainder	Remainder	Remainder	Remainder	Remainder
Nitrogen in nitrocellulose	13.15 ± 0.05	13.05–13.20	13.15 ± 0.05	13.25 ± 0.05	13.25 ± 0.05
Nitroglycerin	0	8.00–12.00	0	12.0–18.0	37.5–40.0
Diphenylamine	0.50–1.25	0.75–1.50	0.50–1.25	0.65–1.25	0
Graphite	0.40	0.30	0.4	0.4	0.4
Dinitrotoluene	6.5–10.0	0–1.0	0.0–5.0	0	0
Dibutyl phthalate	0	1.50	0	0	0
Potassium sulfate	0.10–1.0	0–0.10	0	0	0.50–2.00
Potassium nitrate	0	0–0.1	0	0	0
Calcium carbonate	0	1.00	0	0	0
Sodium sulfate	0	0.50	0	0	0
Ethyl centralite	0	0	0	0.00–5.00	0.0–1.50
Use	50 caliber	7.62 mm	45 caliber, M-1	7.62 mm	38, 45 caliber, M-1

سلاح‌های سبک نظامی شامل سلاح‌هایی با کالیبر حداکثر ۴۰ میلیمتر می‌گردند. بزرگترین کالیبر ورزشی^۱ بسیار شبیه به تفنگ شکاری با خشاب ۸ تایی می‌باشد.

به دلیل طیف گسترده کالیبر تفنگ‌های ورزشی، انواع و وزن‌های گوناگون فشنگ‌ها، و علایق تیراندازها به شکار و غیره، به انواع گوناگونی از پودرها نیاز می‌باشد. به عنوان مثال، یک تولیدکننده به تنهایی ۱۱۸ نوع مختلف از پودرهای مربوط به سلاح‌های سبک را تولید می‌کند. کنترل کیفی این محصولات در سطح بالایی نگه داشته می‌شود؛ زیرا تیراندازهای حرفه‌ای حداکثر کارایی و قابلیت اطمینان و کارکرد مطمئن را از پیشرانه‌های موجود در کارتریج‌ها (خشاب‌ها) انتظار دارند. سرعت گلوله‌های تجاری و دست‌ساز، متناوباً به وسیله تیراندازهایی با استفاده از تجهیزات کروماتوگراف (زمان سنج) چک می‌شود. تولیدکنندگان پودر (پیشرانه)، از گریدی از نیتروسلولز استفاده می‌کنند، که دارای غلظت اسمی نیروژن نسبتاً بالایی در حدود ۱۳/۲٪ وزنی می‌باشد. گرید دیگری از نیتروسلولز که در پیشرانه‌های سلاح‌های سبک بکار می‌رود، حاوی ۱۲/۶٪ وزنی نیروژن می‌باشد. کنترل سوزش پیشرانه‌های سلاح‌های سبک اساساً از طریق استفاده از پوشش‌های بازدارنده یا کُندکننده دانه‌های پیشرانه انجام می‌شود. افزودنی‌های دیگر شامل پایدارکننده‌ها، کمک اشتعال‌ها و ضد جرقه زدن می‌باشند. بر خلاف باروت سیاه، انواع بدون دود به آسانی تحت تأثیر آب قرار نمی‌گیرند. به طور مثال می‌توان یک دسته از پودر دو پایه را به مدت ۸۴ سال در زیر آب انبار نمود، و هنگامی که آن درون پوکه گلوله تفنگ شکاری قرار داده شود، به گونه شگفت‌انگیزی عملکرد و کارایی یکنواختی از آن مشاهده می‌گردد. در مهمات مربوط به شکار، تأکید در بسط و انتشار یافتن گلوله می‌باشد. همچنین، گلوله‌هایی با سرعت بیشتر از ۳۰۰۰ فوت بر ثانیه، برای فراهم نمودن مسیر پرتابی صاف و قدرت انهدام در فواصل زیاد، مطلوب می‌باشند؛ بنابراین پیشرانه‌هایی با مقادیر نیروی محرک بالا مورد نیاز می‌باشند.

^۱ - Sporting caliber

زیان‌های زیست‌محیطی مهمات نظامی نسبت به سایر مهمات به مراتب بیشتر می‌باشد. مهمات سلاح‌های سبک نظامی برای کار در دمای بالاتر از ۲۳۰ درجه فارنهایت و محدوده دمایی ۶۵- تا ۱۶۵ درجه فارنهایت تست شده‌اند. پودرهای تک پایه عموماً رسوب کمتری در لوله تفنگ باقی می‌گذارند که این امر در مسلسل‌ها و تیربارها بسیار حائز اهمیت می‌باشد و رسوب باقی مانده، از ترک برداشتن لوله تفنگ در هنگام شلیک در دماهای پایین جلوگیری می‌نماید. تجزیه پیشران در هنگام سوختن نامطلوب می‌باشد، زیرا می‌تواند منجر به افزایش بیشتر نرخ سوزش و بالا رفتن بیش از حد فشار تفنگ گردد. پودرهای دوپایه در شلیک گلوله‌هایی با کالیبرهای پایین‌تر، مانند ۵/۵۶ و ۷/۶۲ میلیمتر مناسب‌تر می‌باشند، چون منجر می‌شوند دانسیته حجمی^۱ کارتریج بارگذاری شده در این حالت نسبت به پیشران اکستروود شده بیشتر باشد. در سلاح‌های سبک با کالیبر بزرگتر، مانند ۲۰ و ۵۰ میلیمتر، چگالی حجمی گلوله و پیشران اکستروود شده تفاوت بارزی ندارند.

تلفیق نیتروگلیسرین با نیتروسولوز برای تهیه سوخت دوپایه، منجر به افزایش نرخ سوزش و نیروی محرک می‌گردد. این نوع پودر معمولاً با یک بازدارنده پوشش داده می‌شود تا نرخ سوزش آن کاهش یابد و منجر می‌گردد که منحنی نرخ سوزش خنثی گردد تا اینکه پس‌رونده باشد. مواد شیمیایی که برای کند کردن نرخ سوزش اولیه به کار برده می‌شوند، عبارتند از دی‌بوتیل فتالات^۲، دی-نیتروتولون^۳، اتیلن دی‌متاکریلات^۴، یا متیل یا اتیل سنترالایت^۵. این مواد یک پودر با نرخ سوزش پس‌رونده را به یک پودر با نرخ سوزش پیش‌رونده تبدیل می‌کنند. دی‌فنیل آمین^۶ برای پایدارسازی نیتروسولوز و سدیم کربنات^۷ برای جلوگیری از اسیدی شدن، افزوده می‌شوند. از سولفات پتاسیم^۸ به عنوان بازدارنده برق دهانه توپ و یا تفنگ استفاده می‌شود. گلوله‌های دوپایه و پودرهای اکستروود شده تک و دوپایه را می‌توان در هر فشنگ سلاح‌های سبک استفاده نمود. برخی از پودرهای دوپایه پولکی شکل مانند HPC-1، دارای مقدار واقعاً زیادی نیتروگلیسرین هستند که برای تهیه پودری با نرخ سوزش سریع‌تر استفاده می‌شوند، به ویژه در مسلسل‌های چرخشی، تپانچه‌ها یا تفنگ‌های شکاری و گلوله‌های سلام^۹.

در مهماتی مانند ۲۰ میلیمتر و انواع مختلفی با کاربردهای هوا به هوا، زمین به هوا و ضد زره، تمایل به داشتن مقدار قابل ملاحظه‌ای پیشران می‌باشد تا سرعت خروج گلوله از دهانه لوله از انواع ورزشی آن‌ها بسیار بیشتر باشد. انرژی جنبشی بالای مرمی‌ها و مسیرهای پرتاب صاف دارای اهمیت ویژه‌ای در سلاح‌های سبک نظامی می‌باشند.

۴-۲. انواع کالیبر بزرگ

باروت سیاه هنوز در مهمات توپ‌های پیشرفته استفاده می‌شود، ولی نه به صورت قبل که پیشران اصلی خرج آن‌ها باشد. آن را در کیسه‌های مشتعل‌کننده می‌ریزند و به کمک آن خرج اصلی پیشران را فعال می‌سازند. از باروت سیاه همچنین در خرج پرتاب‌کننده نیز استفاده می‌شود. پوسته‌های بزرگ ۱۰۵ میلیمتری یا ۸ اینچی که حاوی تجهیزات انفجاری ضد نفر یا ضد مواد و تجهیزات هستند، در هنگام پرواز با استفاده از اشتعال باروت سیاه خرج پرتاب‌کننده، پرتاب می‌شوند. از باروت سیاه هنوز برای توپ‌های آنتیکی که

¹ - Bulk density

² - Dibutyl phthalate

³ - Dinitrotoluene

⁴ - Ethylene dimethacrylate

⁵ - Methyl or ethyl centralite

⁶ - Diphenylamine

⁷ - Sodium carbonate

⁸ - Potassium sulfate

⁹ - Blank cartridges

برای شبیه‌سازی سازمان‌های شبه‌نظامی جنگ شهری و انقلابی بکار می‌روند، استفاده می‌شود. تفنگ‌هایی با قطرهایی بزرگتر از ۴۰ میلیمتر، از نظر ارتش ایالات متحده آمریکا کالیبر بزرگ در نظر گرفته می‌شوند. پیشران‌های یک و سه پایه در تفنگ‌های کالیبر بزرگ مانند تفنگ‌های بدون لگد^۱ و توپ‌ها بکار می‌روند. از پیشران‌های سه پایه زمانی که به نیروی محرک بالایی نیاز است، استفاده می‌شود. مزیت پیشران سه پایه حاوی نیتروگوانیدین^۲ M-30، نه تنها پر قدرت بودن آن‌ها است، بلکه موجب کاهش فرسایش لوله توپ به حداقل ممکن می‌شود. پیشران‌های تک پایه از پیشران‌های سه پایه ارزان‌تر هستند. پیشران‌های تک پایه به قدر کافی قدرتمند نیستند، اما برای استفاده در دوره‌های آموزشی و تمرینی، خمپاره‌ها و خمپاره‌اندازها مناسب می‌باشند. پیشران‌های تفنگ‌های استوانه‌ای کالیبر بالا، معمولاً حاوی سوراخ‌های بیشتری نسبت به نمونه‌های مشابه از کالیبرهای کوچک می‌باشند. مهمات خمپاره‌ها می‌توانند به شکل مربع‌های نازک و کوچکی باشند که یک سوراخ در مرکز آن‌ها وجود دارد.

پیشران تک پایه M-6 معمولاً در خمپاره‌اندازهای ۱۵۵ میلیمتری استفاده می‌شوند. (جدول ۴). پیشران تک پایه M-10 در خمپاره‌های ۶۰ و ۸۱ میلیمتری کاربرد دارند. پیشران‌های دوپایه M-2 به عنوان پیشران در پوکه‌های تخریبی انفجاری بُرد کوتاه ۱۶۵ میلیمتری استفاده می‌شوند. پیشران خمپاره‌های ۴/۲ اینچی یک سوخت ورقه‌ای دوپایه است.

جدول ۴- انواع پیشران‌های تفنگ‌های کالیبر بالا ارتش ایالات متحده آمریکا و مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها.

Designation: Type:	M-2 Double base	M-6 Single base	M-8 Double base	M-10 Single base	M-30 Triple base	M30-A-1 Triple base
Nitrocellulose	77.45	87.00	52.15	98.00	28.00	28.00
Type	II	I	II	I	I	I
Grade	C	C	C	C	A	A
Nitroglycerin	19.50	0	43.00	0	22.50	22.50
Nitroguanidine	0	0	0	0	47.70	47.00
Ethyl centralite	0.60	0	0.60	0	1.50	1.50
Barium nitrate	1.40	0	0	0	0	0
Potassium nitrate	0.75	0	1.25	0	0	0
Potassium sulfate	0	1.00	0	1.00	0	1.0
Diphenylamine	0	1.00	0	1.00	0	0
Dinitrotoluene	0	10.00	0	0	0	0
Dibutyl phthalate	0	3.00	3.00	0	0	0
Graphite	0.30	0	0	0	0	0
Graphite glaze	0.15	0	0	0	0.2	0.15
Other	0	0	0	0.10 ^b	0.3 ^c	0

۴-۳. ساخت پیشران تفنگ

فرآیندهای تهیه و ساخت پیشران‌های تفنگ و راکت حداقل از یک جهت مهم، به لحاظ اسمی، در تعداد و اندازه دانه‌های تولیدی تفاوت دارند. فرآیندهای مربوط به پیشران تفنگ برای تولید حجم انبوهی از دانه‌های نسبتاً کوچک طراحی می‌شوند، که اندازه و آرایش آن از کره‌های کوچک، پولک‌ها، یا سیلندرها برای سلاح‌های سبک تا سنگین، تیوب‌ها و مربع‌های بارگذاری توپ و خمپاره متغیر است. از طرف دیگر دانه‌های راکت‌ها می‌توانند بسیار بزرگتر باشند. یک دانه منفرد را می‌توان ریخته‌گری کرد و به صورت

^۱- Recoilless rifles

^۲- Nitroguanidine

درجا در راکت موتور یک موشک تاکتیکی یا استراتژیک (راهبردی) یا موتور بوستر یک وسیله نقلیه فضایی، عمل آورد تا سخت گردد.

پیشرانهای استاندارد برای تفنگ‌ها و راکت‌های کوچک، بیشترین بخش آن، به وسیله فرآیند اکستروژن با یک حلال^۱ ساخته می‌شوند. با توجه به اینکه محصول یک پیشران تک پایه، دوپایه یا سه پایه است، دستورالعمل‌ها و روش‌های ساخت تا حدی متفاوت خواهند بود. با این حال، به عنوان یک دستورالعمل کلی، فرآیند ساخت با آب‌زدایی نمودن مناسب نیتروسولولز و خیس نمودن آن با الکل آغاز می‌شود. اگر نیتروگوانیدین به یک سوخت سه پایه افزوده می‌شود، باید نیمی از مقدار مورد نظر با نیتروسولولز در آغاز کار مخلوط گردد. اما چنانچه محصول مورد نظر دوپایه یا سه پایه باشد، اگر مخلوط مرکب مورد نظر با محلولی از نیتروگلیسرین - استون تر شود، اختلاط ماده مورد نظر بهتر و بیشتر می‌گردد. در مورد پیشران سه پایه، نیمه دیگر نیتروگوانیدین همزمان با افزودن دیگر اجزای فرمول شیمیایی، به آن افزوده می‌گردد. مقدار کافی از حلال، برای ساخت دوغاب کلوئیدی استفاده می‌شود که کاملاً اکستروود خواهد شد. محصول تک پایه به طور مشابه از طریق اختلاط مواد افزودنی و حلال اِتر - الکل به نیترو سلولز تهیه و ساخته می‌شوند. پیش از اکستروود کردن، کلوئید پرس می‌شود و به نحوی چگال و متراکم می‌گردد. رشته‌های اکستروود شده با طول مناسبی از دانه‌ها برش داده شده و تقسیم می‌شوند، خشک می‌گردند و با گرافیت پوشش داده می‌شوند.

یک فرآیند حلال - اکستروژن پیوسته برای پیشرانهای تک پایه در کارخانه مهمات رادفورد^۲ ارتش ایالات متحده آمریکا ایجاد و راه‌اندازی شده است. پیشران‌هایی با ضخامت جان^۳ بیشتر از ۱/۲۷ سانتیمتر و پیشران‌های ورقه‌ای برای خمپاره‌ها، با فرآیند اکستروژن بدون حلال ساخته می‌شوند. با این حال، این فرآیند از مراحل بیشتری نسبت به فرآیندی که در آن از حلال استفاده می‌شود، برخوردار است. در فرآیند اکستروژن بدون حلال، چون هیچگونه انقباضی در دانه‌های پیشران ایجاد نمی‌گردد، محصول نهایی یکنواخت‌تر و با پایداری بالستیکی بالقوه طولانی‌تر می‌باشد. اختلاط اجزای سازنده (مواد اولیه) در دوغابی از آب داغ انجام می‌شود. بیشتر آب آن پس از تهیه گل از آن گرفته می‌شود و هرگونه اجزای مورد نیاز قابل حل در آب، به آن افزوده می‌شود و محصول پس از عبور دادن دوغاب از رول‌های داغ با اختلاف دمای زیاد و پر سرعت، به صورت کلوئید درآورده می‌شود. ورقه حاصل به صورت نوارها و فرش‌رول شده بریده می‌شوند تا مقدار کافی برای انجام فرآیند پرس اکستروژن فراهم گردد. در این مرحله، دانه‌های منفرد یا رشته‌های چندگانه پیشران راکت ساخته می‌شوند.

یک فرآیند مهم برای ساخت مهمات سلاح‌های سبک، منحصر بفرد می‌باشد برای پودر گلوله‌ها. محصول به شکل کره یا گروی تخت شده با قطری در حدود ۰/۰۴ تا ۰/۰۹ سانتیمتر می‌باشد. یک لاک تشکیل می‌شود از نیتروسولولز و اتیلن استات^۴، که ممکن است حاوی افزودنی‌های دیگری مانند کربنات کلسیم برای خنثی کردن حالت اسیدی و پایدارکننده دی‌فنیل‌آمین باشد. یک امولوسیون آبی از لاک داغ تهیه و بوسیله یک محافظت‌کننده، پایدار می‌شود. سولفات سدیم^۵ برای تسریع در آب‌زدایی گلبول‌های لاک - از طریق ایجاد یک اختلاف فشار اسمزی - به آن افزوده می‌شود. در دمای ۷۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد اتیل استات از گره‌ها تقطیر می‌گردد. سپس در دوغاب تا حدودی مرطوب می‌گردند و محلولی از نیتروگلیسرین در اتیل استات به آن افزوده می‌شود. اتیل

^۱ - A solvent extrusion

^۲ - Radford

^۳ - Web thickness

^۴ - Ethyl acetate

^۵ - Sodium sulfate

استات تحت خلاء در دمای ۷۰ تا ۸۵ درجه سانتیگراد خارج می‌گردد و گره‌های اشباع شده نیتروگلیسرین را برجای می‌گذارد که بعداً می‌تواند در دوغاب با یک ماده بازدارنده مانند دی‌نیتروتولون حل شده در دی‌بوتیل فتالات، پوشش داده شود. فرآیندهای اضافی ممکن است شامل غلطک کردن، آب‌زدایی، افزودن اصلاح‌کننده‌های بالستیکی به سطح دانه‌ها، تنظیم رطوبت و لعاب‌دهی با گرافیت باشد.

۵. پیشراندهای ژنراتورهای گازی^۱

پیشراندهایی که برای بکار انداختن تجهیزات مکانیکی یا انجام کار از راه‌های دیگر، گاز تولید می‌کنند، می‌توانند تقریباً فوری و آنی عمل کنند و یا به صورت کاملاً گند و آرام. وسایلی که با فشار گاز فشنگ کار می‌کنند^۲، در آغاز در داخل کاتابولت^۳ که برای خروج خلبانان از هواپیماهای پُرسرعت بکار می‌رفتند، استفاده شدند. هواپیماهای جنگنده آلمانی در جنگ جهانی دوم به این سیستم مجهز شده بودند. کاربردهای فرعی ژنراتورهای گازی به بسیاری از زمینه‌های دیگر نیز گسترش یافته است. کاربردهای آن‌ها از باد کردن سریع کیسه‌های هوای خودروها تا وسایل و تجهیزات تولید نیرو برای کار در زیر دریا را شامل می‌شود.

انواع پیشراندهای مورد استفاده در بسیاری از وسایلی که با فشار گاز فشنگ کار می‌کنند، تک پایه یا دوپایه هستند. از باروت سیاه نیز زمانی که به نیروی محرک کمتری نیاز باشد، می‌توان استفاده کرد. عموماً در کاربردهای با نیروی محرک بالا، از کامپوزیتی که در آن پرکلرات آمونیوم بکار رفته است، استفاده می‌شود. نیترات آمونیوم می‌تواند منجر به سوزش کند یک پیشرانه جامد گردد و عمدتاً برای استفاده در یک چرخه کاری گسترده بسیار مناسب می‌باشد. حالت کاری تجهیزاتی که با نیروی گاز کار می‌کنند، به گونه‌ای است که توان آن‌ها از گازی با فشار و دمای بالا که به یک توربین، ایمپلر^۴ یا پیستون منبسط‌کننده^۵ برخورد می‌کند، ایجاد می‌گردد؛ که از آن توان برای ایجاد کار استفاده می‌شود. انرژی حرارتی به توان هیدرولیکی، مکانیکی یا الکتریکی تبدیل می‌گردد. از گازها می‌توان مستقیماً در سیستم‌های پنوماتیکی استفاده نمود. از ژنراتورهای گازی برای ایجاد فشار در تانک‌ها، باد کردن پوشش‌های ویژه شناورسازی روی آب و خارج کردن مایعات استفاده می‌شود. پیشراندهای با انرژی پایین به صورت تجاری در کارتریج‌هایی با حدود ۰/۱ تا ۳/۵ کیلوگرم فراهم می‌شوند. آنگونه که مهندسان پیشرانه به صورت سرانگشتی محاسبه می‌کنند، ۱ پوند (۰/۴۵۴ کیلوگرم) پیشرانه جامد، توانی در حدود ۱۰۰۰ اسب بخار گازی^۶ را در یک ثانیه، و یا ۱۰۰ اسب بخار گازی را در ۱۰ ثانیه تولید خواهد کرد.

ژنراتورهای گازی در طول چرخه‌های کاری کارتریج‌ها، خروجی نسبتاً ثابتی را تولید می‌نمایند. نرخ سوزش پیشراندها و دمای گاز حاصل از آن‌ها از طریق کنترل نوع دانه‌ها و هندسه کارتریج‌ها، یکنواخت نگه داشته می‌شود. فشارهای عملیاتی از طریق طراحی مناسب محفظه احتراق و نازل کنترل می‌گردند. گازهای داغ بلافاصله پس از تولید مصرف می‌شوند، تا حداکثر انرژی حرارتی از آن‌ها گرفته شود؛ به جای اینکه در اثر ذخیره کردن در یک تانک، انرژی حرارتی آن‌ها از طریق اتلاف‌های زیان‌بار انرژی از دست برود.

¹ - Gas generator propellants

² - Cartridge – Actuated Devices (CADs)

³ - Catapult

⁴ - Impeller

⁵ - Piston expander

⁶ - Gas HorsePower (GHP)

یک پیشرانه با دمای شعله پایین که برای استفاده در تجهیزات و ادوات تولید نیرو و نیز وسایل کنترلی مورد استفاده در کاربردهای مربوط به زیر دریا توسعه داده شده است، حاوی اسید اکسالوهیدروکسی آمیک^۱ می باشد، که آن را دی هیدروکسی گلیوگسیم^۲ نیز می نامند. این ترکیب، در ترکیب با پرکلرات آمونیوم، دماهای پایینی در حدود ۱۰۴۰ درجه سانتیگراد را تولید می کند، که مقدار آن بطور قابل ملاحظه ای کمتر از دماهایی است که پیشرانه نیترات آمونیوم (۱۳۷۰ درجه سانتیگراد) تولید می کند.

۶. پیشرانه های راکت

دانه های پیشرانه راکت نسبت به دانه های پیشرانه تفنگ، از لحاظ اندازه و شکل بندی متفاوت می باشند. یک راکت معمول و رایج، دانه ای است تک که مستقیماً به محفظه راکت موتور چسبیده^۳ یا به یک جداره میانی متصل شده است که خود این جداره نیز توسط محفظه و جداره موتور محافظت می گردد^۴. نازل به قسمت انتهایی و عقب جداره متصل می شود. دانه ها نوعاً دارای یک هسته پوک می باشند، که احتراق در آن جا روی می دهد، هر چند برخی از آن ها جامد هستند و از انتها شروع به سوختن می کنند. انواع بسیاری برای شکل بندی و هندسه دانه وجود دارد، که بر اساس الزامات و نیازهای گوناگون مأموریت و پروفایل رانش مورد نظر، شکل بندی خاصی تعیین می گردد.

از لحاظ تاریخی، پیشرانه های جامد راکت ها در دو جهت (مسیر) مهم توسعه داده شده اند؛ پیشرانه های دو پایه یا کلئیدی و پیشرانه های کامپوزیتی. خانواده پیشرانه های دو پایه از پیشرانه های بدون دود تفنگ حاصل شده اند و حاوی نیتروسلولز با وزن مولکولی بالا می باشند، که با استرهای آلیفاتیک نیترات مایع^۵، به صورت پلاستیکی یا ژلاتینی درآورده شده اند. نیتروگلیسرین و دی اتیلن گلیکول دی نیترات^۶ پلاستی سائزهای رایج می باشند.

پیشرانه های دو پایه به دو روش ساخته می شوند؛ اکستروژن^۷ یا ریخته گری با حلال^۸. اکستروژن روش رایج برای ساخت پیشرانه های با اندازه کوچکتر می باشد؛ هر چند دانه ای با قطری به بزرگی ۱۵ اینچ را می توان اکستروود کرد و سپس با پرس های متعدد (در چند مرحله) پیشرانه ای با وزن ۴۰۰ پوند تهیه کرد. ریخته گری پیشرانه های دو پایه با فرآیندی کاملاً متفاوت انجام می شود. در این روش، لایه ای از پودر ریخته گری شونده در یک قالب و یا در محفظه راکت موتور قرار داده می شود. سپس این لایه با حلال ویژه ریخته گری پُر می شود. پودر ریخته گری شونده، مایع حلال را جذب می کند و در اثر متورم شدن، یک دانه یکپارچه محکم را تشکیل می دهد. پودر ریخته گری شونده حاوی گرانول های ریز و کوچک پیشرانه دو پایه، همراه با پایدارکننده، پودر آلومینیوم، آمونیوم پرکلرات و/ یا در صورت نیاز نیتروآمین های^۹ جامد می باشد. حلال ریخته گری شامل نیتروگلیسرین رقیق شده با پلاستی سائزهای غیر قابل انفجار مانند تری آستین^{۱۰} می باشد.

¹- Oxalohydroxamic acid

²- Dihydroxyglyoxime

³- Case bonded

⁴- Cartridge loaded

⁵- Liquid aliphatic nitrate esters

⁶- Diethylene glycol dinitrate

⁷- Extrusion

⁸- Solvent casting

⁹- Nitramines

¹⁰- Triacetin

توسعه پیشران‌های کامپوزیتی در جریان جنگ جهانی دوم آغاز شد. پیشران‌های کامپوزیتی از یک اکسند جامد بسیار ریز (۸۸٪-۶۵) که در یک بایندر پلیمری (۱۴-۸) پراکنده شده، تشکیل شده‌اند که نقش سوخت را بازی می‌کنند. در برخی کاربردها، سوخت‌هایی مانند آلومینیوم پودر شده (پودر آلومینیوم) (۲۲-۵) نیز به عنوان سوخت به آن افزوده می‌گردد. این پیشران‌ها معمولاً در میکسرهای عمودی با قدرت برشی بالا ساخته، به صورت دوغاب‌های ویسکوز (غلیظ و با گرانروی بالا) به داخل راکت موتور ریخته، و در خشک‌کن حرارت داده و در دمای خاصی نگه داشته می‌شوند تا یک دانه یکپارچه بدست آید.

پیشران‌های دوپایه با اتصالات عرضی^۱ در دهه ۱۹۷۰ میلادی توسعه داده شدند و از ادغام دو گونه اصلی حاصل شده‌اند. این پیشران‌ها در میکسرهای با برش بالا و با فرآیند یکسانی با فرآیند ساخت پیشران‌های کامپوزیتی ساخته می‌شوند. مقدار اندکی نیتروسلولز نیز به عنوان عامل اتصال عرضی چندکاره اصلی، عمل می‌نماید. با این حال، این پیشران‌ها هنوز دارای غلظت بالایی از پلاستی ساینر نترات استر هستند و پیری^۲ و پایداری شیمیایی آن‌ها بسیار به پیری و پایداری شیمیایی پیشران‌های دوپایه نزدیک است و کاملاً متفاوت با موارد مشابه فرمولاسیون‌های پایه پلی‌بوتادی‌ان^۳ می‌باشد.

نمونه‌هایی از ترکیب‌ها و برخی از ویژگی‌های مهم و برجسته انواع پیشران‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- جزئیات انواع پیشران‌های جامد راکت‌ها.

Propellant	Metal content (wt%)	Density (lb/in. ³)	Flame temperature (°F)	I_{sp} (lb _f · sec/lb _m)	Burning rate (in./sec)	Pressure exponent n^b
DB	0	0.058	4100	220–230	0.45	0.30
DB/AP/Al	20–21	0.065	6500	260–265	0.78	0.40
DB/AP-HMX/Al	20	0.065	6700	265–270	0.55	0.49
XLDB/AP-HMX/Al	19	0.067	6060	269	0.35	0.50
PVC/AP	0	0.061	4600	230–240	0.45	0.38
PVC/AP/Al	21	0.064	5600	260–265	0.45	0.35
PS/AP	0	0.062	4700	230–240	0.35	0.43
PS/AP/Al	3	0.062	5000	240–250	0.31	0.33
PU/AP/Al	16–20	0.064	5400–6000	260–265	0.27	0.15
NEPE	19	0.067	6060	269	0.60	0.50
PBAN/AP/Al	16	0.064	5800	260–263	0.55	0.33
CTPB/AP/Al	15–17	0.064	5600–5800	260–265	0.45	0.40
PBAA/AP/Al	14	0.064	5400–6000	260–265	0.32	0.35
HTPB/AP/Al	4–17	0.067	5600–5800	260–265	0.40	0.40
Oxidizers			Binders			
AP (ammonium perchlorate)			CTPB (carboxy-terminated polybutadiene)			
HMX (cyclotetramethylene tetranitramine)			HTPB (hydroxy-terminated polybutadiene)			
Fuel			PBAA (polybutadiene-acrylic acid polymer)			
Al (aluminum)			PBAN (polybutadiene-acrylic acid-acrylonitrile terpolymer)			
High-energy additives			PS (polysulfide)			
DB (double base)			PU (polyurethane)			
XLDB (cross-linked double base)			PVC (polyvinyl chloride)			
NEPE (nitrate ester plasticizer)						

¹- Crossl

²- Aging

³- Polybutadiene

۶-۱. کاربردهای پشرانه‌های راکت

بیشتر اطلاعات پشرانه‌های نظامی مربوط به موشک‌ها و راکت‌های در حال خدمت، فاش و همگانی نشده است. در هر حال، پژوهش‌های بسیاری از سال ۱۹۵۵ در این باره انجام، و فرمولاسیون‌های بسیاری در مراجع علمی آزاد به صورت مکتوب در دسترس عموم قرار داده شده است. پشرانه‌های جامد به صورت گسترده‌ای در موشک‌ها با طیفی از اندازه‌های مختلف، از موشک‌های دوش-پرتاب گرفته تا موشک‌های بالستیک بین قاره‌ای^۱، که به قدرتمندترین کلاهک‌های هسته‌ای مجهز شده‌اند، استفاده می‌گردد.

کاربرد اولیه پشرانه‌های جامد در هوانوردی، استفاده از آن‌ها در دستگاه‌های، برخاست به کمک جت^۲ بود. این دستگاه‌ها در واقع یک واحد توان کمکی، برای کمک به برخاستن هواپیما می‌باشند. یک واحد از این نوع، حاوی ۹۰ پوند پشرانه کامپوزیت آسفالتی در یک تیوب به قطر ۹/۶ اینچ و طول ۳۶ اینچ می‌باشد. وزن کل آن ۲۰۵ پوند است و به مدت ۱۲ ثانیه می‌سوزد، که رانشی برابر با ۱۰۰۰ پوند تولید می‌نماید.

پشرانه‌های جامد، کاربرد غیر نظامی مهمی نیز در برنامه‌های فضایی یافتند. دو راکت بوستر سوخت جامد به قطر ۱۲ فوت و طول ۱۴۹ فوت، در مأموریت شاتل فضایی استفاده می‌شوند. هر راکت بوستر سوخت جامد حاوی ۱/۱ میلیون پوند پشرانه است، که در ۴ بخش جداگانه ریخته‌گری شده است. این بخش‌ها در پایگاه پرتاب، که در آنجا مجموعه مخروط خروجی نازل نیز افزوده می‌شوند، مونتاژ می‌گردند. اطلاعاتی درباره موتورهای پشرانه سوخت جامد شاتل فضایی در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- موتورهای پشرانه سوخت جامد شاتل فضایی.

Nominal weight percent of constituents	
Ammonium perchlorate	69.9
PBAN binder and curing agent	14.0
Aluminum	16.0
Iron oxide	0.1
Ballistic properties	
Burning rate	
$r \text{ (mm/sec)} = 5.807 P^{0.33}$ at 298 K for $P = 1.4\text{--}11.7 \text{ MPa}$	
$r \text{ (in./sec)} = 0.04424 P^{0.33}$ for $P = 200\text{--}1700 \text{ psia}$	
Specific impulse $I_{sp} = 2568 \text{ N} \cdot \text{sec/kg}$ (261.9 sec) (standard sea-level optimum expansion)	

ضربه ویژه راکت‌های با کارآیی بالا، از ۲۴۵۵ تا ۲۷۰۰ نیوتن/(کیلوگرم.ثانیه) متغیر می‌باشد.

^۱- Intercontinental ballistic missiles (ICBMs)

^۲- Jet – assisted takeoff (JATO)

۶-۲. نیازمندی‌های پیش‌رانه راکت‌ها

تنظیم‌کننده‌های پیش‌رانه‌های جامد راکت‌ها، باید بین هزاران الزام و پارامترهای گوناگون تعادل برقرار کنند. همچنان که دکتر سی. اچ. جانسون، در سال ۱۹۵۹ گفت: «به زمان زیادی برای آن لازم است که بتوان به یک ترکیب جامد، عنوان پیش‌رانه را اطلاق نمود. پیشرفت در جهت رسیدن به کارآیی بالاتر حتماً کند و دشوار خواهد بود. در این مسیر تنگناها و بن‌بست‌های متعدد و متناوبی بوجود خواهد آمد، اما چنین موانع و موارد ناچیزی یک صنعتگر واقعی را از مسیر و خواسته‌های خود و بالاخره جادوی با شکوه‌شان باز نمی‌دارد». درستی این دیدگاه پس از گذشت بیش از ۴۰ سال، بیش از پیش آشکار شده است. محدودیت‌ها و ویژگی‌های مربوط به این امر در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول ۷- محدودیت‌ها و جزئیات انواع پیش‌رانه‌های جامد راکت‌ها.

Property	Typical range	Comments
Impulse ($\text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot \text{sec}$)	240–270	Maximized for each given application
Volumetric impulse ($\text{lb}_f/\text{in.}^3 \cdot \text{sec}$)	13.5–18.5	Critical in volume-limited motors
Burning rate (in./sec)	0.2–2.0	Tailored for each application
Pressure exponent	0–0.7	Minimized for motors with fixed-area throats
Mechanical properties		Tailored to carry mechanical loads over the motor operating and storage conditions; low-temperature thermal and ignition strain are critical for tactical motors
Modulus (psi)	400–1000	
Stress (psi)	80–150	
Strain (%)	30–60	
Processibility		Mix, cast, and cure within minimal times; process conditions and ingredients controlled
Pot life (hr)	8–20	
Viscosity (kp)	2–10	Important for mold filling
Service life (Years)	> 10	Failure modes must be understood and predicted
Exhaust plume	Smokey–smokeless	Minimize signature for short-range tactical rocket motors, minimize toxic products
Acoustic stability	Stable	Minimize tendency for pressure oscillations
Cost, cast in place (\$/lb)	5–10	Minimize life cycle cost
Sensitivity	Class 1.1–1.3	Formulate for Class 1.3; minimize in-process initiation sensitivity
Insensitive munitions	In progress	Meet Mil Std-2105B for tactical rockets
Environmental impact	Assessments underway	Minimize environment impact during manufacture, use, and/or demilitarization

میزان انرژی، عامل محرک و اصلی در بیشتر تلاش‌های مربوط به فرمولاسیون‌ها می‌باشد، چرا که مستقیماً بار قابل حمل (وزن محموله)، برد، و یا زمان هدف‌گیری یا اصابت به هدف بسیار متأثر از آن می‌باشند. با این حال، عوامل و فاکتورهای فهرست شده دیگری نیز برای موفقیت حیاتی می‌باشند. در ۱۵–۱۰ سال گذشته الزامات و محدودیت‌های زیست‌محیطی مهمات غیرحساس، اهمیت بسیار بیشتری یافته‌اند، که چالش پیش روی تهیه‌کنندگان فرمولاسیون‌ها را افزایش می‌دهد.

۶-۳. مهمات غیرحساس

در دهه ۱۹۸۰ وزارت دفاع آمریکا برنامه سلاح‌های (مهمات) غیرحساس را آغاز نمود، که در واقع تلاش گسترده‌ای بود، برای کاهش حساسیت سامانه‌های تسلیحاتی آمریکا. هدف از این برنامه، توسعه مهمات به منظور تأمین کارآیی و عملکرد و الزامات عملیاتی مورد نظر می‌باشد؛ در شرایطی که اگر مهمات در معرض تحریک پرنرژری برنامه‌ریزی نشده قرار بگیرند، شدت واکنش و

آسیب و تخریب محیط مجاور حداقل مقدار ممکن باشد. در طی بیش از ۳۵ سال گذشته، وقوع یک سری از حوادث مانند آتش-سوزی مهمات در زمان انتقال، آتش‌سوزی مهمات در دپوهای ذخیره‌سازی، و یا در زمان تصادف در بزرگراه‌ها و یا راه‌آهن‌ها در هنگام انتقال، نیاز به مهماتی با حساسیت کمتر را حائز اهمیت نمود.

در این میان استانداردهایی در ایالات متحده آمریکا (MIL - STD - 2105B) و در دیگر کشورها، همانند استاندارد ناتو (IM STANAG 4439)، وضع گردید که در آن‌ها الزامات مهمات غیرحساس تعریف گردید. به طور کلی ۷ تست جداگانه، هر یک با معیارهای ویژه خود، باید با موفقیت انجام شوند تا همچنانکه در جدول ۸ نشان داده شده است، به عنوان یک مهمات غیرحساس، شرایط لازم را دارا باشند.

جدول ۸- ضوابط و معیارهای تعیین واکنش مهمات غیرحساس.

Test/threat	Condition	Criteria	Critical response factors
Sympathetic detonation	Detonate one of two units in shipping configuration	No detonation of acceptor	1. Propellant shock sensitivity 2. Case fragmentation 3. Shipping container—attenuation
Fast cookoff	Jet fuel fire 1600°F	Burning	1. Case venting
Bullet impact	Three .50 cal at 2800 ft/sec at 50-msec intervals	Burning	1. Propellant extinguishability 2. Case configuration
Fragment impact	Two 1/2-in. fragments at 8300 ft/sec	Burning	1. Propellant—shock sensitivity, toughness 2. Shipping container—attenuation
Slow cookoff	6°F/hr	Burning	1. Case venting—temp/pressure 2. Propellant stability
Shaped charge jet	81-mm or M42/M46 shape charge	No Detonation	1. Propellant shock sensitivity
Spall	81-mm shape charge through armor plate	No Burning	1. Propellant stability 2. Case, container thickness

این امری پیچیده و چالش‌برانگیز است؛ زیرا طبیعت واکنش در برابر نیروی محرک پُرانرژی به عوامل و ویژگی‌های مختلف راکت موتور بستگی دارد که در جدول ۸ نشان داده شده‌اند. آشکارا به یک نگرش نظام‌مند (سیستماتیک) برای توسعه موتورهای مهمات غیرحساس نیاز است و در این میان خصوصیات پیشران‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. در نتیجه، پیشگامی در مهمات غیرحساس اثر عمیقی بر پیشران‌های معاصر داشته است.

پیشران‌های با حداقل دود، مثل فرمولاسیون‌های پیشران‌های دو پایه یا پیشران‌های دو پایه با اتصالات عرضی، واکنش‌های مختلفی دارند به نیروی محرک مهمات غیرحساس نسبت به پیشران‌های دودزا یا با دود کاهش یافته، مثل پیشران‌های کامپوزیتی پرکلرات آمونیوم/پلی‌بوتادی‌ان. مشکل اساسی در پیشران‌های با حداقل دود، که حاوی استرهای نیترات و نیتروآمین‌های جامد هستند، حساسیت به شوک می‌باشد. برای رفع این مشکل، با تخلیه مقدار کافی از مواد ذکر شده، پیشگیری و از بین بردن شوک نسبتاً آسان خواهد بود. از این رو، چنانچه نیروی محرک اولیه نتواند منجر به گذر به محدوده احتراق با سرعت و نور زیاد و یا انفجار ناگهانی گردد، پیشران‌ها تمایل پیدا می‌کنند که به آرامی شروع به سوختن کنند. از طرفی دیگر، پیشران‌های کامپوزیتی بر پایه پرکلرات آمونیوم و بایندهای پلی‌بوتادی‌ان، تقریباً نسبت به شوک غیرحساس می‌باشند (در غیاب افزودنی نیتروآمین)، اما آن‌ها در فشارهای پایین به

شدت محترق می‌گردند و خاموش کردن آن‌ها بسیار سخت می‌باشد. بر همین اساس در هنگام برخورد ترکش انفجار و یا محرک-های حرارتی، به منظور پیشگیری در ایجاد واکنش‌های شدید، پیشراشه‌ها باید به سرعت تخلیه گردند.

هر سامانه تسلیحاتی باید علیه تهدیدات مربوطه آزمایش گردد، که آن از طریق ارزیابی خطر هر تهدید، بر چرخه عمر سلاح تعیین می‌گردد. این امر معمولاً منجر می‌گردد، به ارزیابی حداقل واکنش در برابر انفجار القایی^۱ و ضربه ناشی از برخورد گلوله یا ترکش. شکل‌بندی مناسب سلاح‌ها در این آزمایش‌ها، به چگونگی ارزیابی تهدید بستگی دارد. معیارهایی که در جدول ۸ نشان داده شده‌اند، شدیدترین واکنش‌هایی هستند، که برای محرک پُرانرژی معینی، قابل قبول می‌باشند. معیارهای سنجش مهمات غیرحساس به گونه‌ای می‌باشد، که تمام واکنش‌های سلاح را در برابر حالت عدم انفجار تا انفجار بسیار شدید را در بر می‌گیرد. کاربرد مناسب مهمات غیرحساس به یک ارزیابی دقیق از نتایج تست‌ها نیاز دارد، تا اینکه بتوان با استفاده از نتایج حاصل آن را قبول یا رد کرد. ممکن است یک سلاح در یک تست معین با یک اشتعال سریع مردود گردد، اما هنوز بهبود قابل توجهی نسبت به گونه موجود آن و یا حتی طرح جایگزین آن، که ممکن است در برابر محرک مشابهی به شدت منفجر گردد، از خود نشان دهد.

۱-۳-۶. پیشراشه‌های غیرحساس کامپوزیتی

یکی از نتایج تلاش‌های صنعت و دولت، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در فرمولاسیون پیشراشه‌هایی می‌باشد، که شدت واکنش موتور به ضربه محرک حرارتی تعریف شده در استاندارد مهمات غیرحساس، کاهش یافته است. در جستجوی پیشراشه‌هایی که واکنش آن‌ها در برابر ضربه کم باشد، خانواده‌ای از پیشراشه‌ها با اکسندگی پرکلرات آمونیوم بر پایه بایندهای پلیمری (پیشراشه‌های HTPE^۲) همراه با پلاستی سائزهای پُرانرژی ارائه شدند. به علاوه، این پیشراشه‌ها تمایل دارند تا در دمای پایین‌تری نسبت به فرمولاسیون‌های بر پایه پلی‌بوتادی‌ن مشتعل گردند، که به طور کلی با کاهش شدت گل‌شدگی^۳، واکنش پیشراشه از انفجار به سمت سوزش و یا اشتعال پیش می‌رود. این فرمولاسیون‌ها اساساً دارای ضربه یکسانی با پیشراشه‌های پرکلرات آمونیوم / HTPB رایج هستند. این پیشراشه‌ها نیز الزامات فراوانی را که همه پیشراشه‌های راکتی باید دارا باشند، گذرانده و برآورده می‌سازند (جدول ۷).

۲-۳-۶. پیشراشه‌های غیرحساس با حداقل دود

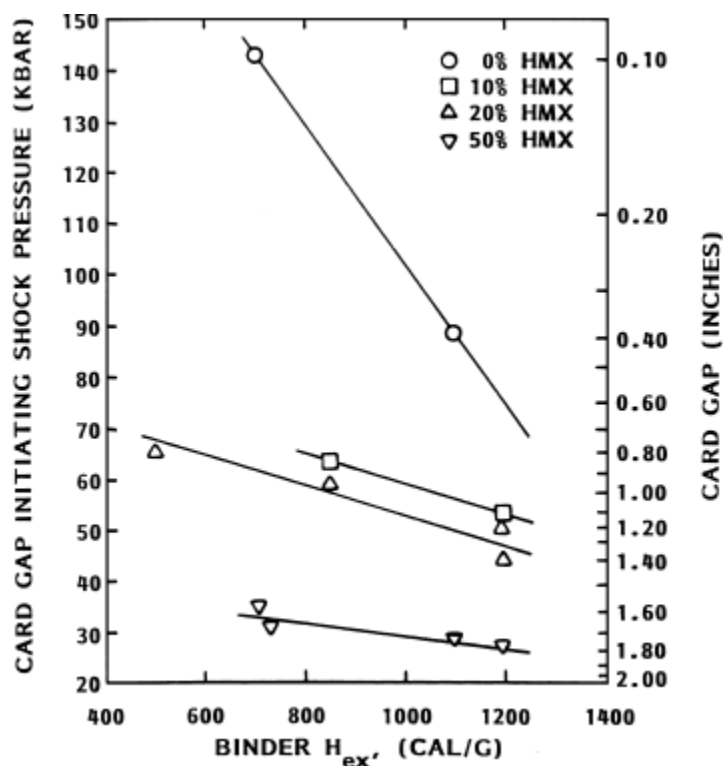
حساسیت به شوک پیشراشه‌های با حداقل دود، که یک نگرانی اساسی در ارتباط با پیشراشه‌های غیرحساس می‌باشد، اصولاً به میزان نیتروآمین و اندازه و انرژی باینده (حرارت انفجار^۴، که یک شاخص رایج و معمول در این مورد است) بستگی دارد. نمودار وابستگی فشار شوک مورد نیاز برای آغاز یک احتراق با سرعت و نور بسیار بالا، در یک پیشراشه دوپایه با اتصالات عرضی، به صورت تابعی از غلظت سیکلومیلن‌ترانیتروآمین (۴ میکرومتر وزن با قطر متوسط) و حرارت انفجار باینده، در شکل ۴ نشان داده شده است.

^۱- Sympathetic detonation

^۲- Hydroxyl Terminated polyButadiene (HTPB)

^۳- Cookoff

^۴- Heat of explosion (H_{ex})



شکل ۴- تأثیر بایندها بر روی حساسیت پیشرانه‌های با حداق دود، که حاوی مقادیر مختلفی از سیکلومتیلن تترانیترامین می‌باشند.

بدون حضور سیکلومتیلن تترانیترامین، حساسیت به شوک، به شدت به حرارت انفجار باینده وابسته است. به عنوان مثال، با افزایش حرارت انفجار باینده از ۷۰۰ به ۱۱۰۰ کالری بر گرم، فشار اولیه از ۱۴۲ به ۸۸ کیلو بار می‌رسد؛ یعنی ۳۸٪ کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار سیکلومتیلن تترانیترامین، به طور قابل توجهی فشار اولیه و حساسیت آن در برابر حرارت انفجار کاهش می‌یابد. به ازای ۵۰٪ از سیکلومتیلن تترانیترامین، فشار اولیه از ۲۸ تا ۳۲ کیلو بار تغییر می‌کند، در حالی که رنج حرارت انفجار در بازه ۷۰۰-۱۱۰۰ کالری بر گرم می‌باشد. نوع یکسانی از وابستگی در پیشرانه‌های دوپایه ریخته‌گری شده، نیز دیده می‌شود (با افزودن نیتراآمین جامد به پیشرانه‌های کامپوزیتی، حساسیت در برابر شوک به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد).

تست NOL card gap، عموماً استفاده می‌شود، برای اندازه‌گیری حساسیت به شوک پیشرانه‌ها و مواد منفجره. در این تست، نمونه پیشرانه در یک لوله فولادی مدرج شده با قطر ۱/۵ اینچ و طول ۶ اینچ قرار می‌گیرد. نمونه در برابر یک موج شوک ناشی از یک بوستر با قدرت انفجاری بالا قرار داده می‌شود، که استحکام آن از طریق عبور دادن آن از یک تضعیف کننده پلاستیکی با ضخامت قابل تنظیم کنترل می‌گردد. احتراق با سرعت و نور بسیار بالای نمونه مورد بررسی، می‌تواند یک حفره کامل را در یک ورق فولادی با ضخامت ۰/۲۵ اینچ ایجاد بنماید. مقدار اندازه حساسیت به شوک در پیشرانه‌ها و مواد منفجره با عنوان کارت^۱ بیان می‌گردد. کارت با سطح ۷۰ (~ فشار آغازین ۷۰ کیلو بار) خط جدایش میان انفجارات کلاس ۱/۱ و ۱/۳ می‌باشد، که یک طبقه‌بندی مهم با توجه به ساختار تولید و استفاده مواد پرانرژی و یا مهمات مورد استفاده است. بنابراین، پیشرانه‌های در حال توسعه، به ویژه پیشرانه‌های با حداقل دود، با طبقه‌بندی ۱/۳، هدف اساسی تلاش‌های اخیر برای تهیه فرمولاسیون‌های جدید می‌باشد.

^۱ - Card

هدف کلی بهبود ویژگی حساسیت پیشرانه‌های با حداقل دود، با جایگزینی نیتروآمین‌های جامد با نیترات آمونیوم برای کاهش حساسیت در برابر شوک از کلاس ۱/۱ به کلاس ۱/۳ امکان‌پذیر می‌شود. این امر به نوبه خود، به افت ۵ درصدی ضربه ویژه و افت ضربه حجمی تقریباً ۱۰ درصدی، در مقایسه با پیشرانه‌های کلاس ۱/۱ که در حال حاضر استفاده می‌شوند، منجر می‌گردد. چنانچه اندازه ذرات نیتروآمین به حدود ۲ تا ۳ میکرومتر کاهش یابد، می‌توان تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از نیتروآمین در پیشرانه‌های با حداقل دود بر پایه نیترات آمونیوم استفاده کرد؛ در حالی که حساسیت در برابر شوک در حد قابل قبولی باقی می‌ماند. ضمناً با استفاده از سیکلومتیلن‌تری‌نیتروآمین امکان بازیابی نیمی از اتلاف در کارآیی وجود دارد، مثلاً ۲۰ درصد ضربه ویژه.

نیاز به برآورده ساختن الزامات مهمات غیر حساس و به حداکثر رساندن ضربه و تکان، منجر به تلاش‌های گسترده‌ای برای ایجاد و خلق اجزای ترکیبی جدیدی شده است، که می‌توانند انرژی بالاتری را از احتراق آن‌ها تولید بنمایند، در حالیکه حساسیت آن‌ها کاهش یافته است.

۴-۶. مقدار انرژی پیشرانه

تلاش‌های اساسی در زمینه پیشرانه‌های راکتی، در طی بیش از ۳۰ سال گذشته، برای افزایش چگالی انرژی پیشرانه‌های جامد انجام شده است. مباحث حائز اهمیت در این تلاش‌ها شامل جستجو برای اکسندرها و سوخت‌های جدید، پلاستی‌سایزرهای پُرانرژی و پلیمرهایی با تکنیک‌های تولید جدید می‌باشد. صدها ترکیب جدید شناسایی شدند، که تعداد زیادی از آن‌ها برای رسیدن به ضربه و تکان‌های بالاتر سنتز شدند. مشکلاتی از قبیل انطباق‌پذیری، حساسیت، پایداری، جذب رطوبت از طریق هوا و سمی بودن، مانع از بکارگیری و استفاده از تعداد زیادی از این ترکیبات گردید، که از جمله آن‌ها می‌توان به پرکلرات نیترونیوم^۱، پرکلرات هیدرازین^۲، پرکلرات هیدروکسی آمونیوم^۳، بریلیم و هیدرید بریلیم^۴ اشاره نمود؛ که عموماً آن‌ها در دهه ۱۹۶۰ تولید و تکامل یافتند. همچنین در همان زمان در مورد ترکیبات پُرانرژی بر پایه گروه دی‌فلوئوروآمینو، که مجدداً در دهه ۱۹۹۰ مورد توجه قرار گرفتند، تحقیق و بررسی صورت گرفت.

از میان ترکیبات بسیاری که مورد مطالعه قرار گرفتند، موارد زیر به منظور ایجاد سود همه‌جانبه تولید شدند و در فرمولاسیون‌های گوناگون پیشرانه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. به طور مثال از ADN در تولید موتورهای استفاده گردید.

Acronym	Name	State	Density
ADN	Ammonium dinitramide	Solid	1.81
C120	Hexazahexanitroisowurtzitane	Solid	2.04
TNAZ	Trinitroazetidine	Solid	1.7
HNF	Hydrazinium nitroformate	Solid	1.86

¹ - Nitronium perchlorate

² - Hydrazinium perchlorate

³ - Hydroxyl ammonium perchlorate

⁴ - Beryllium hydride

این ترکیبات می‌توانند بسته به کاربردها تا ۱۰٪ ضربه ویژه را افزایش دهند و به طور بالقوه امکان رسیدن به گازهای خروجی عاری از کلر را فراهم می‌نمایند. این در حالی است که، هر یک از این ترکیبات مشکلات خاص خود را دارند، همه آن‌ها از نواقص برجسته‌ای نیز برخوردار می‌باشند؛ به عنوان مثال، افزایش حساسیت به شوک. نگهداری و انبارداری یک پیشرانه کلاس ۱/۳، هنگامی که در آن از این مواد با غلظت بالا استفاده شود، خود یک چالش بزرگ می‌باشد. جستجو برای ترکیباتی با انرژی بالا همچنان ادامه دارد.

گام دیگر برای افزایش مقدار انرژی، استفاده از پلیمرهای پُرانرژی^۱ است. به طور کلی، در پلیمرهای پُرانرژی گروه‌های نیترو و آزید^۲ را با نسبت‌های مساوی با پیش - پلیمرها ترکیب می‌نمایند، که در نهایت ترکیب شبکه پلیمری (ساختار پلیمری) پیشرانه تشکیل می‌گردد. برخی از پیش - پلیمرها با پلاستی‌سایزهای پُرانرژی تطبیق پذیر هستند؛ مانند نیترات استرها^۳، ترکیبات نیترودار، و/یا ترکیبات آزیدو^۴. این امر ضربه ویژه را ۱-۲٪ افزایش می‌دهد و اغلب موجب می‌گردد که، محدوده نرخ سوزش نیز افزایش یابد. نمونه‌ای از پلیمرهای پُرانرژی به شرح زیر ارائه می‌گردد.

GAP	Glycidal azide polymer
PGN	Polyglycidal nitrate
BAMO	Bis 3,3(azidomethyl)oxetane
Nitramine polymers	Poly(diethylene glycol dinitrazadecanedioate)
PolyNIMMO	3-Nitratomethyl,3-methyl oxetane

استفاده از سوخت‌های فلزی برای افزایش انرژی امری رایج در کاربردهایی است، که در آن‌ها اثر یا تضعیف سیگنال موتور قابل توجه نمی‌باشد. از پودر آلومینیوم به دلیل گرمای احتراق بسیار بالا و چگالی بالای آن استفاده می‌گردد. همچنین، بین پودرهای فلزی مختلف، با توزیع اندازه ذره مورد نیاز، در تهیه فرمولاسیون پیشرانه‌ها با قابلیت شکل‌دهی و خواص مکانیکی خوب، به راحتی در دسترس می‌باشد. بریلیم، ضربه ویژه بیشتری را ایجاد می‌نماید که این امر به دفعات مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته است، ولی سمیت بیش از حد آن مانع استفاده گسترده و عمومی از آن شده است. هیدرید آلومینیوم^۵ ضربه ویژه بیشتری نسبت به آلومینیوم ایجاد می‌نماید و در برخی از موتورهای آن استفاده شده است. استفاده از آن دو معایب اصلی دارد: (۱) چگالی کم، که مزیت عملکردی آن را در موتورهای با حجم محدود^۶ بی‌اثر می‌نماید؛ (۲) واکنش پذیر بودن در تماس با رطوبت.

^۱ - Energetic polymers
^۲ - Nitro and Azide groups
^۳ - Nitrate esters
^۴ - Azido
^۵ - Aluminum hydride
^۶ - Volume-limited motors

۶-۵. خواص مکانیکی

پیشران‌های جامد باید یکپارچگی ساختاری خود را در محدوده شرایط عملیاتی (کاری) و انبارداری حفظ کنند. به عنوان مثال، دماهای کاری برای بیشتر موتورهای تاکتیکی در محدوده ۶۰- تا ۶۵+ درجه سانتیگراد، و فشارهای کاری نوعاً بیش از ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشند. این شرایط موجب می‌شود، بارهای مکانیکی قابل توجهی بر پیشران، به ویژه بر دانه‌های متصل به بدنه وارد گردد. از خواص مکانیکی برجسته پیشران‌ها، قابلیت کرنش و تغییر شکل^۱ در دمای پایین، در شرایط نرخ تغییر شکل خیلی پایین (خنک شدن موتور در دمای پایین انبارداری) و نرخ تغییر شکل بالا می‌باشد. قدر مطلق قابلیت کرنش و تغییر شکل باید به اندازه کافی بالا باشد، تا از تغییر شکل بیش از حد پیشران تحت شرایط اشتعال در دمای بالا و نیز خزش^۲ در شرایطی که به مدت طولانی در معرض دمای بالا قرار بگیرد، جلوگیری نماید. چقرمگی^۳ نیز جهت مقاومت در برابر شکست و تکه‌تکه شدن در اثر گسیختگی ناشی از نرخ-های تنش یا کرنش بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تکه‌تکه شدن منجر به افزایش مساحت سطح تماس می‌گردد، که به نوبه خود می‌تواند منجر به ایجاد واکنش انفجاری در حضور یک منبع (عامل) اشتعال و محدود کردن بدنه راکت موتور گردد.

عواملی که خواص مکانیکی را در یک پیشران معمولی کنترل می‌کنند عبارتند از، ساختار و غلظت پلیمر، چگالی اتصالات عرضی^۴، مقدار جامدات و توزیع اندازه ذرات. غالباً عوامل متصل کننده برای تسریع چسبندگی جامدات (به ویژه ذرات بزرگ) به بایندر، مورد نیاز می‌باشند. بیشتر فرمولاسیون‌های کامپوزیت و دوپایه با اتصالات عرضی از پیش-پلیمرهای منقّضی شده با هیدروکسی همراه با ایزوسیانات‌های چندعاملی^۵ به روش ریخته‌گری دوغابی ایجاد می‌گردند. وزن مولکولی پیش-پلیمر و عاملیت^۶ آن، اگر به صورت و مقدار مناسب با عاملیت بهبودبخش و استوکیومتری (نسبت هیدروکسیل به ایزوسیانات) ترکیب گردند؛ در آن زمان خواص مکانیکی به حد بهینه می‌رسد. در مقابل، در پیشران‌های دوپایه، پیوندهای عرضی از نوع پیوندهای کووالانسی نمی‌باشند و اساساً استحکام مکانیکی آن‌ها به سختی زنجیره‌های نیتروسلولز بستگی دارد.

۶-۶. گاز یا دود خروجی

دودهای خروجی از راکت موتورها، سه مشکل اساسی را ایجاد می‌نمایند:

- آشکار شدن راکت و سایت پرتاب آن، که عامل مهمی برای بسیاری از سلاح‌های تاکتیکی به شمار می‌رود.
- تضعیف و میرایی سیگنال‌های هدایتی / ارتباطی با موشک.
- سمیت.

شماری از راکت موتورهای مورد استفاده در ارتش (نیروی زمینی) آمریکا، الزامات پیشران‌های با حداقل دود را دارا می‌باشند، به معنی قابلیت جابجایی بالای ۹۰ درصد دود خروجی در یک محدوده مرئی و بدون دود ثانویه (بخار آب میعان شده)، در محدوده دمای کاری. به همین دلیل پیشران‌های دوپایه با اتصالات عرضی و یا پیشران‌های دوپایه، گزینه‌های مناسبی برای پیشران‌های ویژه این مأموریت‌ها می‌باشند.

¹- Strain capability

²- Creep

³- Toughness

⁴- Crosslink density

⁵- Polyfunctional isocyanates

⁶- Functionary

علاوه بر دود، تشعشع ناشی از گاز خروجی نیز به آسانی قابل ردیابی و آشکارسازی می‌باشد. تشعشع تابعی از دما می‌باشد و می‌توان با حذف نمودن پس‌سوز آن‌را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. به همین دلیل مقداری از نمک فلزات قلیایی به عنوان بازدارنده شعله به پیش‌رانه اضافه می‌گردد.

میرایی و تضعیف سیگنال‌های هدایت و امواج اکثر رادارها، تابع دما و ظرفیت فلز می‌باشند. از طرفی بازدارنده‌های پس‌سوز به مقدار قابل توجهی دما و یونیزاسیون گازهای خروجی را کاهش می‌دهند، که این امر در نهایت منجر به بهبود کیفیت سیگنال‌های ارسالی می‌گردد. مدل‌های ساده‌ای که در بردارنده دینامیک سیالات، ترمودینامیک، سینتیک شیمیایی و مشخصات طیف‌نگاری نمونه‌های گازهای خروجی هستند، برای پیش‌بینی ویژگی‌های تشعشع و جذب گازهای خروجی راکت موتور از محدوده فرابنفش تا رادار از طیف الکترومغناطیس، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها سرعت موشک، اختلاط و پس‌سوزی، موج‌های فشاری، تشعشع ذرات ریز، و اثرات گوناگون دیگر را محاسبه می‌کنند.

سمی بودن محصولات خروجی خود یک مشکل است. اخیراً تلاش گسترده‌ای شروع شده است برای حذف سرب از پیش‌رانه‌های با حداقل دود، حتی با غلظت‌های پایین (۱-۲ درصد) که عموماً به عنوان اصلاح‌کننده نرخ سوزش مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ که علت این امر سمی بودن این فلز می‌باشد.

۶-۷. عمر خدمتی

الزامات مربوط به عمر خدمتی برای بیشتر راکت موتورهای نظامی بیش از ده سال است. این امری حیاتی در توسعه فرمولاسیون‌های جدید و یا معرفی و ارائه اجزای شیمیایی جدید می‌باشد. پیش‌بینی عمر خدمتی به دانش و آگاهی یافتن درباره حالت‌های بالقوه از کارافتادگی و درک مکانیزم‌های شیمیایی و فیزیکی که فرآیندهای پیرشدگی را کنترل می‌کنند، نیازمند است. ضرایب نفوذ و سینتیک‌های تجزیه باید به صورت تابعی از زمان و دما شناخته گردند. برای فرمولاسیون‌های جدید ثوابت نرخ تجزیه که از مطالعات مربوط به پیرشدگی شتابدار^۱ بدست آمده‌اند، مانند حساسیت به دما (انرژی اکتیواسیون آرنیوس^۲) در دماهای بالاتر از رنج گسترش مورد انتظار اندازه‌گیری، و سپس از آنان برای پیش‌بینی نرخ تجزیه در محدوده مورد نظر استفاده می‌گردد. این روش به این دلیل مورد نیاز می‌باشد که نرخ تجزیه در محدوده گسترش دما، برای اندازه‌گیری در یک بازه (پریود) زمانی قابل قبول، بسیار پایین است.

حالات بالقوه خرابی زیادی وجود دارند، که می‌توانند عمر خدمتی راکت موتورهای جامد را محدود نمایند. با سود حاصل از فرآیندهای اکتشافی که در بیش از نیم قرن اخیر رخ داده است، ما اکنون می‌توانیم بیشتر آن‌ها را شناسایی نماییم. برخی از حالات حائز اهمیت بالقوه خرابی عبارتند از:

- خود اشتعالی ناشی از خود گرمایشی.

- ترک خوردگی به دلیل تولید گاز یا اتلاف قابلیت کرنش.

- نشست^۳ به دلیل افت مدول.

^۱- Accelerated aging

^۲- Arrhenius activation energy

^۳- Slump

- گسیختگی اتصال به بدنه.

- افت عملکرد و کارآیی ناشی از تغییرات نرخ سوزش.

- افزایش حساسیت اولیه.

- تخریب‌های مکانیکی به دلیل تناوب و سیکل دمایی.

یک حالت بالقوه خرابی ویژه ارتباط زیادی با نوع سوخت دارد. به عنوان مثال، خوداشتعالی و ترک خوردگی ناشی از ایجاد گاز باید در مورد پیشرانه‌های حاوی پلاستی‌سایزرهای پُرانرژی، به ویژه نیترات استرها، در نظر گرفته و لحاظ شود، اما معمولاً در مورد پیشرانه‌های حاوی پرکلرات آمونیوم / پلی‌بوتادی‌ان این حالت مهم نمی‌باشد. برعکس پیشرانه‌های حاوی پرکلرات آمونیوم / پلی‌بوتادی‌ان به دلیل حمله اکسایشی به پیوندهای دوگانه در پلیمر بوتادی‌ان، مستعد سخت‌شدگی و افت قابلیت کرنش می‌باشند، که این حالت‌ها در پیشرانه‌های دوپایه با اتصالات عرضی حائز اهمیت نمی‌باشند.

حالت بالقوه خرابی در یک پیشرانه تابع خواص شیمیایی و فیزیکی پیشرانه می‌باشد، که با شناخت بهتر و دقیق‌تر این خواص می‌توان فرمول‌های ثابت در این زمینه را گسترش داد. خودگرمایشی و تولید گاز بوسیله نرخ تجزیه طبیعی (ذاتی) اجزای شیمیایی پُرانرژی و/یا واکنش‌های آن‌ها با دیگر اجزای سازنده که ممکن است تجزیه را تسریع نمایند، کنترل می‌گردد. سینتیک این واکنش‌ها باید برای پیش‌بینی طول عمر پیشرانه تعیین گردند. افت قابلیت کرنشی ممکن است ناشی از چندین عامل، از جمله حمله ماده اکسایشی به پلیمر که منجر به ایجاد پیوندهای دوگانه عرضی بیشتر و در نهایت ایجاد یک پلیمر با استحکام بالا، اتلاف و از دست رفتن پلاستی‌سایزر به دلیل نفوذ، متبلور شدن پلاستی‌سایزرها در دماهای پایین و تجمع و انباشتگی عیوب ناشی از سیکل حرارتی باشد. به طور مشابه، پیشرانه‌ها ممکن است در اثر پیوند عرضی سخت گردند و یا به دلیل برش و گسیختگی زنجیر از محصولات هیدرولیز یا حمله محصولات ناشی از تجزیه، نرم گردند. مهاجرت پلاستی‌سایزر یا وقوع واکنش‌های تجزیه، ممکن است موجب کاهش استحکام اتصال به بدنه گردند. چنانچه اکسند یا اصلاح‌کننده نرخ سوزش به صورت جزئی در بایندر قابل حل باشند، پتانسیل رشد بلور در اثر سیکل دمایی وجود دارد. این امر ممکن است منجر به تغییر نرخ سوزش و نیز تجزیه اجزای شیمیایی پُرانرژی گردد. برخی اصلاح‌کننده‌های نرخ سوزش، به ویژه آن‌های که حاوی بخش‌های فروسن^۱ هستند، نسبت به ترکیبات حساس به ضربه و اصطحکاک که عموماً در سطح یک پیشرانه قرار می‌گیرند، در مقابل اکسیداسیون‌های ناشی از هوا تحمل و استقامت بیشتری از خود نشان می‌دهند. این امر موجب مشتعل شدن راحت‌تر دانه‌های پیشرانه می‌گردد.

عمر خدمتی یک پیشرانه معین بسیار به کاربرد آن وابسته است. الزامات مربوط به موتورهای تاکتیکی نسبت به الزامات موتورهای استراتژیک (راهبردی) و یا فضایی بسیار متفاوت است. از طرفی دیگر عمر خدمتی یک پیشرانه معین، وابسته به گستره دمایی آن در شرایط انبارداری و عملیاتی می‌باشد. این موتورها باید قابلیت باقی‌ماندن و گذراندن سیکل‌های دمایی کویری و قطبی را داشته باشند.

۶-۸. فرآوری و آماده‌سازی پیشرانه راکت

پیشرانه‌های جامد راکت‌ها به ۳ روش اساسی ساخته می‌شوند

^۱ - Ferrocene moieties

- اکستروژن^۱.
- فرآیند ریخته‌گری به کمک حلال^۲.
- ریخته‌گری دوغابی^۳.

فرآیند اکستروژن در پیشرانه راکت‌ها، مشابه روش اکستروژن مورد استفاده در ساخت پیشرانه‌های تفنگ می‌باشد و به طور کلی برای دانه‌های کوچک بکار می‌رود. فرآیند ریخته‌گری به کمک حلال، برای شماری از موتورهای راهبردی و تاکتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال امروزه، بیشتر پیشرانه‌های جامد از طریق فرآیند ریخته‌گری دوغابی ساخته می‌شوند.

پیشرانه‌های ساخته شده بوسیله ریخته‌گری دوغابی معمولاً در مخلوط‌کن‌های عمودی با برش بالا^۴ همراه با قابلیت ایجاد خلاء، مخلوط می‌شوند. ظرفیت این مخلوط‌کن‌ها از ۱ پوند در مقیاس آزمایشگاهی تا ۲۵۰۰۰ پوند در مقیاس تولیدی و صنعتی متغیر است. دوغاب مورد نظر حاوی اکسندها/ترکیبات پُرانرژی جامد (پرکلرات آمونیوم و/یا سیکلومتیلن تری‌نیترامین/سیکلومتیلن تترا‌نیترامین)، سوخت‌های جامد (آلومینیوم)، پیش- پلیمرها (پلی‌اترها، پلی‌بوتادی‌ان‌ها، یا پلی‌استرها) با گروه‌های هیدروکسی در دو سر زنجیر پلیمری)، پلاستی‌سایزرها، موادی که موجب به عمل آمدن و تبدیل و سخت شدن لاستیک‌های مصنوعی در سوخت‌های جامد می‌گردند (ایزوسیانات‌ها یا اپوکسی‌های چندکاره)، کاتالیست‌های عمل‌آورنده^۵ (ویژة تسریع فرآیند سخت شدن)، اصلاح‌کننده‌های نرخ سوزش، و پایدارکننده‌ها می‌باشد. این دوغاب‌ها به مقدار بسیاری حاوی درصد ماده جامد (درصد ماده خشک)، به عنوان مثال ۸۵-۹۱٪ برای پیشرانه‌های پایه پرکلرات آمونیوم و ۶۵٪ برای پیشرانه‌های دوپایه حاوی نیترا‌مین با پیوند عرضی می‌باشند. این دوغاب‌ها معمولاً شبه‌پلاستیک‌هایی^۶ به شدت ویسکوز (با گران‌روی بالا) با تمایل به تیکسوتروپ^۷ بودن می‌باشند. در نرخ‌های برشی نسبتاً بالا همراه با اختلاط، این ویژگی منجر به اعمال بارهای شدید به میکسر می‌گردد و نیاز است که چرخه اختلاط با دقت طراحی گردد. ویسکوزیته بالا در نرخ‌های برشی پایین می‌تواند منجر گردد، که قالب به خوبی پُر نشود. به عنوان آخرین راه حل، می‌توان از طریق ریخته‌گری تحت فشار و با استفاده از ارتعاش بر این مشکل غلبه نمود. توزیع اندازه دانه در این پیشرانه‌ها با بارگذاری بالا، به گونه‌ای انتخاب می‌شود؛ که ضمن برآورده شدن الزامات مربوط به خواص مکانیکی و نرخ سوزش، ویسکوزیته به حداقل برسد. توزیع جامدات چندوجهی موجب می‌شود که نسبت (کسر) فشردگی^۸ بهینه گردد. برای رسیدن به توزیع اندازه دانه بهینه، به پرکلرات آمونیوم یا نیترا‌مین با اندازه ذرات ریز نیاز می‌باشد؛ که این اندازه دانه از طریق سایش این مواد در آسیاب‌های انرژی سیال^۹ بدست می‌آید. (مشکل دیگر دوغاب‌های با فشار بالا، جدایش ناشی از القای جریان^{۱۰} این ذرات جامد در هنگام ریخته‌گری در قالب‌های پیشرانه است. این امر می‌تواند منجر به ایجاد گرادیان‌های نرخ سوزش در سرتاسر دانه‌ها گردد). بنابراین سیکل اختلاط که خود تحت تأثیر افزودن اجزای شیمیایی، زمان‌های اختلاط، و پریودهای خلاء می‌باشد، باید به دقت تدبیر گردد؛ تا فرآیندی مناسب و ماندنی داشته باشیم. ماده عمل‌آورنده، عموماً برای به حداکثر رساندن زمان گیرش^{۱۱} (زمان پس از پایان اختلاط تا جایی که سخت شدن تا

¹ - Extrusion

² - Solvent cast process

³ - Slurry cast

⁴ - High – shear vertical mixer

⁵ - cure catalysts

⁶ - pseudoplastics

⁷ - Thixotropic

⁸ - Packing fraction

⁹ - Fluid energy mills

¹⁰ - Flow – induced segregation

¹¹ - Pot life

مرحله‌ای پیشرفت می‌کند که دوغاب دیگر جریان نمی‌یابد) در انتها افزوده می‌گردد. پیشرانه باید زمان گیرش مناسبی داشته باشد تا موتورها را بتوان ریخته‌گری کرد و برخی اوقات اجازه داده شود که بنا به ضرورت‌هایی، زمان گیرش در هنگام تولید افزایش یابد. لازم بذکر است که تعادلی موجود است، مابین حداقل زمان عمل‌آوری مورد نیاز و اطمینان یافتن از رسیدن به خواص مکانیکی نهایی مناسب. زمان گیرش و زمان سخت‌شدن را می‌توان از طریق تغییر در دماهای اختلاط و عمل‌آوری و تغییر در غلظت کاتالیزور (کاتالیست) تنظیم نمود.

دوغاب‌ها معمولاً تحت خلاء ریخته‌گری می‌شوند تا هوا و هر گونه گاز تولید شده در اثر واکنش در هنگام سیکل اختلاط، که در داخل دوغاب حبس شده است، از آن خارج گردد. بیشتر پیشرانه‌ها مستقیماً در داخل بدنه (محفظه) موتور ریخته‌گری می‌شوند، که در داخل این محفظه یک لایه عایق داخلی تعبیه شده است که به یک رشته متصل کننده، برای اطمینان از اتصال و چسبندگی دانه‌ها به بدنه، مجهز شده است.

حساسیت در فرآیند^۱، پارامتر مؤثر دیگری است که در توسعه یک پیشرانه باید مورد توجه قرار گیرد. حساسیت آغازین به ضربه یا اصطکاک، اغلب برای دوغاب‌های سخت نشده، بیشتر از پیشرانه‌های سخت شده می‌باشد. برای اطمینان از قابل قبول بودن ریسک این کار، آستانه سطوح آغازین دوغاب باید برای ضربه، اصطکاک و تخلیه بار الکتریکی اندازه‌گیری گردد و سپس با پتانسیل داخل فرآیند، هم برای شرایط معمولی و هم برای شرایط فوق‌العاده (غیرعادی) مقایسه گردد. سپس می‌توان احتمال وقوع یک حادثه را به صورت عددی مشخص کرد و قضاوت محکمی را درباره ریسک‌پذیری آن انجام داد.

۷. ملاحظات زیست محیطی

مواد و فرآیند ساخت سبز، به واژگان مهمی در صنعت پیشرانه در دهه ۱۹۹۰ تبدیل شدند. پیشگامی‌ها و برنامه‌های زیادی با حمایت-های دولتی و صنعتی در جهت به حداقل رساندن آلودگی در مدت چرخه عمر پیشرانه‌ها در جریان است. حلال‌های فرآیند ساخت عاری از اُزن، از فرآیند ساخت پیشرانه در بسیاری از کارخانه‌های دولتی و خصوصی (صنعتی) حذف گردیدند. سوزاندن زباله پیشرانه در فضای آزاد، در حال جایگزینی با فرآیندهای سوزاندن آن‌ها در مکان‌هایی هست که در آن‌ها گازهای خروجی تصفیه می‌گردند.

غیرنظامی‌سازی چالش ویژه‌ای را ایجاد کرده است. علاوه بر سوزاندن آن‌ها، کارهای زیادی به منظور استخراج اجزای سازنده پیشرانه برای فروش و یا استفاده مجدد انجام شده است. هر چند هزینه بازیابی به صورت اجتناب‌ناپذیری بیشتر از هزینه استفاده از اجزای شیمیایی اصلی (بازیافت نشده) می‌باشد، اما اجتناب از هزینه‌های دفع و امحاء موجب می‌شود، این روش‌ها در برخی مواقع اقتصادی باشند. واکنش پیشرانه‌ها برای تبدیل آن‌ها به ترکیباتی بی‌خطر و اقتصادی‌تر از طریق کاهش هزینه‌های دفع و امحاء زباله‌ها، روش دیگری است که در حال توسعه می‌باشد.

علاقه و توجه به سیکل عمر پیشرانه سبز^۲، کار بر روی فن‌آوری فرآیند ساخت پیوسته را تقویت کرده است. به ویژه، اکسترودرهای دو محوره خلاف‌گرد، که تاریخ طولانی در ساخت و فرآوری مواد منفجره دارند، در حال آزمایش به عنوان وسیله‌ای جهت ساخت پیشرانه‌های راکتی است که بسیار راحت‌تر می‌توان آن‌ها را غیرنظامی‌سازی کرد. (این میکسرها پیش‌تر به عنوان ابزار کاهش ریسک

^۱- In – process sensitivity

^۲- Green propellant

مورد ارزیابی قرار گرفتند، زیرا پیشرانه کمتری در یک زمان مشخص در میکسر وجود دارد و موجب کاهش هزینه می‌گردد؛ چرا که عملیات به صورت پیوسته و خودکار انجام می‌شود. هیچ یک از این طرح‌ها به آزمون نرسیده‌اند؛ زیرا به نظر می‌رسد در معرض کمتر قرار گرفتن، با احتمال بیشتر وقوع یک حادثه در تعادل است و از نظر اقتصادی نرخ تولید بیشتر پیشرانه‌ها به اندازه کافی برای به سوددهی رساندن فرآیند ساخت پیوسته بالا نیست.) با این حال اکسترودرهای دو محوره برای کار با الاستومرهای ترموپلاستیک^۱ و یسکوز (با گرانروی بالا)، به عنوان بایندهای پیشرانه، سازگاری بسیاری دارند. از آنجایی که این بایندها از طریق کریستالیزاسیون در نواحی بلوک سخت^۱ پلیمر به عمل آورده و سخت می‌گردند، تا از طریق تشکیل پیوندهای کووالانت در پیشرانه‌های رایج که به روش ریخته‌گری دوغابی ساخته می‌شوند، امکان ذوب شدن آن‌ها در اثر افزایش دما به دمایی بالاتر از دمای کریستالیزاسیون وجود دارد. بنابراین به لحاظ مفهومی، امکان بازیابی و استفاده مجدد از پیشرانه یا از هم جدا کردن اجزای آن و استفاده دوباره از آن‌ها به صورت مفید وجود دارد.

یک دهه پیش، نگرانی‌های زیست محیطی به دلیل اثر منفی بوسترهای راکت سوخت جامد بر تخریب اُژن لایه استراتوسفر^۲ جو، بارش باران‌های اسیدی محلی و گرم شدن کره زمین، برانگیخته شده و افزایش یافت. مدل‌سازی‌ها و مطالعات تجربی نشان داده‌اند، که سهم گازهای خروجی راکت‌های سوخت جامد در تمام موارد مذکور، نسبت به دیگر مکانیزم‌های طبیعی و یا صنعتی قابل چشم‌پوشی است. گزارش‌های مغایر با نتایج فوق، در خبرگزاری‌ها و رسانه‌های همگانی به صورت مغالطه‌آمیزی برجسته و نشان داده می‌شود.

بیشتر نگرانی موجود در مورد راکت‌های سوخت جامد، ناشی از تجمع مقادیر زیادی از اسید کلریدریک در محصولات احتراق همراه با کاهش و از بین رفتن اُژن می‌باشد. با این حال، اثبات شده است که راکت موتورهای تنها به مقدار ۰/۰۰۱ درصد از اسید کلریدریک تولید شده توسط اقیانوس‌ها، اسید کلریدریک تولید می‌کنند. در سال‌های اخیر از طریق پرواز از داخل دود راکت‌ها (گازهای خروجی) در لایه استراتوسفر جو، اندازه‌گیری‌های تجربی انجام شده است. سطوح (مقادیر) اُژن، نمونه‌های کلردار، و ذرات اندازه‌گیری شدند. این اندازه‌گیری‌ها نشان داده‌اند که آسیب و تخریب میزان موضعی اُژن در چند دقیقه اولیه پس از پرتاب بالا می‌باشد (بیشتر از ۹۰ درصد)، اما مطابق مدل‌های نظری، غلظت اُژن چند ساعت پس از پرتاب به حالت اولیه بر می‌گردد. اندازه‌گیری‌ها همچنین نشان داده‌اند که تخریب اُژن در میدان نزدیک به گاز خروجی، زمانی که از موتورهای نفت سفید/اکسیژن مایع به صورت موازی با بوسترهای سوخت جامد استفاده شود، در مقایسه با همه وسایل محرک کمکی سوخت جامد بسیار بیشتر می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که عواملی به غیر از نمونه‌های کلردار، مانند ناکس و دوده، در تخریب اُژن نقش دارند، و این مغایر با فرضیه رایج می‌باشد که اسید کلریدریک ناشی از راکت‌های سوخت جامد منجر به تخریب موضعی بیشتر اُژن نسبت به گازهای خروجی از موتورهای سوخت مایع می‌گردد.

۸. ایمنی

برای مدت طولانی ایمنی شرط لازم و لاینفک جامعه فرآیند ساخت پیشرانه جامد بوده است. مقدار انرژی پیشرانه‌های سوخت جامد رایج برابر و یا بیشتر از بسیاری از مواد منفجره است. بنابراین، پتانسیل اتلاف و کاهش عمر و آسیب به تأسیسات ساخت همیشه وجود

^۱- Hard block
^۲- Stratospheric

دارد. به همین دلیل، روش و دستورالعمل‌ها، طراحی تجهیزات، آموزش در کارخانه‌ها و تأسیسات تولید پیش‌رانه، همیشه بر کارکرد و عملکرد ایمن متمرکز بوده است. شعاع ایمن عموماً بر اساس روابطی که فشار-فاصله را به صورت تابعی از جرم ماده بالقوه قابل اشتعال پیش‌بینی می‌نمایند، در محدوده‌ای که اجزای شیمیایی پُرانرژی و پیش‌رانه‌ها قرار گرفته‌اند، تعیین می‌گردد. در بیشتر کارخانه‌های تولید مواد منفجره/پیش‌رانه، تأسیسات/دستورالعمل‌های زیر برای اطمینان یافتن از عملیات و کارکرد ایمن، در محل باید اجرا گردند:

- ساختمان‌های کاری (عملیاتی) بر روی زمین مستحکم و تقویت شده‌ای قرار گرفته باشند.
- مشخصات مربوط به حساسیت اولیه در مورد تمام مواد و بخارهای پروسه ساخت باید موجود باشند.
- پایداری و سازگاری در آزمایشگاه چک شوند.
- دستورالعمل‌های عملیاتی عمومی و استاندارد در همه بخش‌ها جاری باشند.
- تابلوهای ایمنی همیشه مرور و بازدید شوند و موافقت‌های مورد نیاز برای مواد جدید اخذ گردند.
- تجزیه و تحلیل خطرات مربوط به فرآیندها و حوادث عادی و غیرعادی انجام شوند.
- از پرسنل کنترلی سخت‌گیر در محدوده‌های عملیاتی استفاده گردد.
- در محدوده عملیاتی از تلویزیون‌های کنترل از راه دور استفاده گردد.
- در محدوده‌های بحرانی از سیستم آشکارساز حریق استفاده گردد.
- راکت‌موتورها به صورت بصری و با استفاده از اشعه ایکس مورد بازرسی قرار گیرند.
- و ...