

Polymerization
Quarterly, 2013
Volume 2, Number 4
Pages 61-69
ISSN: 2252-0449

Energetic Polymers: Introduction and Applications

Fatemeh Pashaei Sorbaghi

Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-114, Tehran, Iran

Received: 15 January 2013, Accepted: 23 February 2013

Abstract

In recent years considerable efforts have been devoted to develop intrinsically energetic polymers as explosives. These polymers are extensively employed as binders in polymer bonded explosives (PBX) to enhance the total energy release. Polymers are principally used to impart mechanical strength in energetic materials and increase their impact, friction and heat resistance by producing protective matrices around the low molecular weight energetic crystals. A variety of inert polymers including cured elastomers, thermoplastics and thermoplastic elastomers are used as binders. Energetic polymers are developed as binders in energetic systems in order to decrease energy dissipation from the application of inert polymers.

Key Words

energetic polymer,
binder,
propellant,
inert polymer,
application

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pashaei@modares.ac.ir

پلیمرهای پرانرژی: معرفی و کاربردها

فاطمه پاشائی سوری

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۵

در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای گسترش پلیمرهای ذاتا پرانرژی انجام گرفته است. این مواد به‌طور گسترده همراه با مواد منفجره، به عنوان محمل پلیمری با هدف افزایش مقدار رهایش انرژی استفاده می‌شوند. پلیمرها اصولاً برای ایجاد مقاومت مکانیکی در مواد پرانرژی و افزایش مقاومت آنها به ضربه، اصطکاک و گرما با ایجاد زمینه محافظ در اطراف بلورهای مواد پرانرژی کوچک‌مولکول استفاده می‌شوند. گستره وسیعی از پلیمرهای بی‌اثر شامل الاستومرهای پخت شده، گرمانرم‌ها و الاستومرهای گرمانرم به عنوان محمل به کار می‌روند. برای کاهش اتلاف انرژی ناشی از کاربرد پلیمرهای بی‌اثر، پلیمرهای پرانرژی به عنوان محمل در سامانه‌های پرانرژی گسترش یافته‌اند که در مقاله حاضر این پلیمرها به‌طور اجمالی مرور می‌شوند.

بسیار

فصلنامه علمی-ترویجی

سال دوم، شماره ۴

صفحه ۶۹-۶۱، ۱۳۹۱

ISSN: 2252-0449

چکیده



فاطمه پاشائی سوری

واژگان کلیدی

پلیمر پرانرژی،
محمل،
پیش‌رانه،
پلیمر بی‌اثر،
کاربرد

مقدمه

پلیمر پرانرژی عبارت از درشت مولکولی است که در ساختار آن گروه‌های عاملی پرانرژی مانند گروه نیترات وجود داشته باشد [۱]. نیاز به مواد پرانرژی با حساسیت کم برای کاربرد در مهمات جنگی، باعث گسترش کاربرد پلیمرها و نرم‌کننده‌های پرانرژی در کامپوزیت‌های پیشرفته موشک و مواد منفجره با محمل پلیمری شده است. همان‌طور که از نام آن پیداست، محمل پلیمری است که برای به هم چسباندن اجزای جداگانه فرمول‌بندی به کار می‌رود. مواد منفجره با محمل پلیمری متداول شامل سامانه محمل بی‌اثر هستند و کارایی محدودی دارند. به عنوان نمونه، پلی‌بوتادی‌ان با گروه انتهایی هیدروکسیل (HTPB) دارای خواص فیزیکی عالی است. ولی این پلیمر محملی بی‌اثر است که انرژی کل خروجی از ترکیب را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش کارایی سامانه می‌شود. برای ارتقای کارایی سامانه‌های حاوی پلیمرهای بی‌اثر دو روش به کار رفته است. روش اول، کاهش مقدار پلیمر محمل و دوم به کاربردن پلیمرها یا نرم‌کننده‌هایی (معمولاً اولیگومرهای پلیمرهای پرانرژی) که به مقدار انرژی ترکیب می‌افزایند [۲].

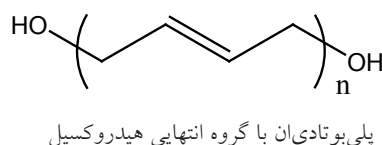
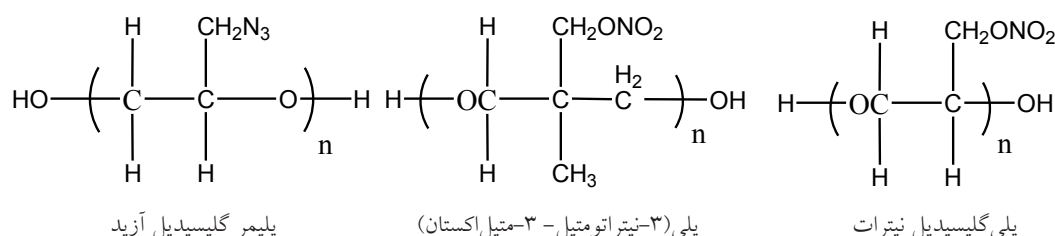
روش دوم در ساخت مواد منفجره کارآمد و پیشرفته‌های موشک پیشرفته موثر است. این کار با قراردادن گروه‌های عاملی پرانرژی مثل آزیدو (N_3)، نیترو ($C-NO_2$)، استر نیترات (ONO_2)، نیتروآمین ($N-ONO_2$) و دی‌فلوئوروآمین (NF_2) در پیکره اصلی زنجیر پلیمر و در نرم‌کننده تامین می‌شود. قراردادن این گروه‌ها باعث افزایش مقدار انرژی داخلی و تعادل اکسیژن در ترکیب می‌شود [۳]. پژوهش‌های بسیاری در زمینه گسترش فرمول‌بندی‌های پرانرژی جدید شامل محمل‌های پرانرژی انجام شده است. پلی‌اتر دارای

گروه‌های عاملی آزیدو یا نیتراتو مثل پلی (۳-نیتراتومتیل-۳-متیل اکستان)، poly(NIMMO)، پلی‌گلیسیدیل نیترات، polyGlyn، و پلیمر گلیسیدیل آزید، GAP، دارای بیشترین اهمیت در میان پلیمرهای پرانرژی هستند [۴].

سه نمونه از این پلیمرهای پرانرژی به همراه پلیمر بی‌اثر HTPB در طرح ۱ آمده است. برخی پلیمرهای پرانرژی به شکل پیش‌پلیمر با جرم مولکولی نسبتاً کم (در حدود 3000 g/mol) سنتز می‌شوند و در دمای معمولی به حالت مایع‌اند. این پیش‌پلیمرها می‌توانند به عنوان نرم‌کننده در ساخت سامانه‌های پرانرژی به کار روند. به‌منظور استفاده از این نوع پلیمرها به عنوان محمل، باید آنها را پس از خشک کردن به وسیله ماده‌ای مناسب در شرایط بهینه، شبکه‌ای کرد. از این راه الاستومر گرمانرم پرانرژی به دست می‌آید [۵]. با توجه به راهبردی بودن مباحث مربوط به پلیمرهای پرانرژی و انحصاری بودن دانش فنی مربوط، تا کنون مقالات پژوهشی اندکی در این زمینه انتشار یافته و اکثر اطلاعات به شکل ثبت اختراع در دسترس است.

پلیمرهای پرانرژی جدید شامل چهارگروه اصلی هستند:

- ۱- پلیمرهای شامل گروه آزیدو، مانند پلیمر گلیسیدیل آزید،
- ۲- پلیمرهای شامل گروه پلی‌اتر نیترات (ONO_2)، پلی‌گلیسیدیل نیترات، پلی (۳-نیتراتومتیل-۳-متیل اکستان)،
- ۳- سایر محمل‌های پرانرژی مثل فلئوروپلیمرها و پلی‌وینیل نیترات‌ها و
- ۴- نرم‌کننده‌های پرانرژی شامل اولیگومرهای پلیمرهای یاد شده به علاوه گستره وسیعی از استرهای نیترات، نیتروآروماتیک‌ها و نرم‌کننده‌های آزیدو هستند.



طرح ۱- ساختار شیمیایی پلیمرهای پرانرژی [۴].

جدول ۱- خواص گلیسیدیل آزید پلیمر [۴].

نوع GAP		خواص
دو عاملی	سه عاملی	
۱/۲۹	۱/۲۹	چگالی (g/cm^3)
مایع زرد رنگ	مایع زرد رنگ	رنگ
۲۸۰	۲۸۰	گرمای تشکیل، ΔH_f (cal/g)
1700 ± 300	≥ 900	M_n
۲	۲/۵-۳	عاملیت
≥ 3	≥ 3	پایداری در خلأ در دمای 100°C و 200h
		(mL/g)
-۴۵	-۴۵	دمای انتقال شیشه‌ای، T_g ($^\circ\text{C}$)

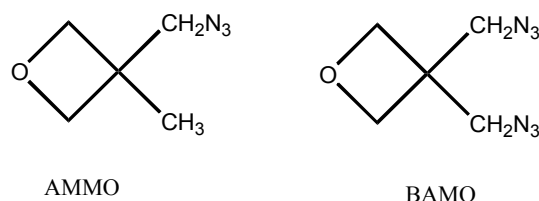
در ادامه تعدادی از این پلیمرها که کاربرد بیشتری دارند، بررسی می‌شوند [۵،۶].

پلیمر گلیسیدیل آزید

در دهه ۱۹۸۰، پلیمرهای دارای گروه آزیدو مثل پلیمر گلیسیدیل آزید به عنوان محمل‌های پرانرژی گزارش شدند [۴]. این پلیمر نخستین بار در ۱۹۷۲ از واکنش آزید سدیم در دی‌متیل فرمامید با پلی‌ایپیلوکلرویدرین تولید شد. این پلیمر معمولاً به حالت پیش‌پلیمر مایع با جرم مولکولی کم، به دو شکل شاخه‌ای و خطی تهیه می‌شود و با استفاده از عامل شبکه‌ای‌کننده به شکل الاستومر درمی‌آید. خواص این پلیمر در جدول ۱ آمده است [۷،۸].

پلیمرهای اکستان

پلی اکستان‌های پرانرژی از مونومرهای مثل ۳-نیترا تومتیل-۳-متیل اکستان (NIMMO)، ۳ و ۳-بیس (آزیدومتیل) اکستان (BAMO) و ۳-آزید متیل-۳-متیل اکستان (AMMO) سنتز می‌شوند (طرح ۲). NIMMO، مونومری با T_g کم است که کاربرد فراوانی در ساخت مهمات دارد. BAMO، مونومری متقارن و جامد (دمای ذوب 80°C)



طرح ۲- ساختار مونومرهای BAMO و AMMO [۴].

است که برای استفاده به عنوان توده سخت در ساخت الاستومرهای گرمانرم مطلوب است، در حالی که AMMO مونومری نامتقارن است که ساختار بی‌شکل ایجاد می‌کند.

این مونومرهای پرانرژی با استفاده از شروع‌کننده تری فلئوئورید بور-۱،۴-بوتان‌دی‌ال به پیش‌پلیمری که به آسانی قابل پخت است، تبدیل می‌شود. پراهمیت‌ترین پلیمر این گروه poly(NIMMO) است [۳].

پلی (۳-نیترا تومتیل-۳-متیل اکستان)

پلیمرهای بر پایه اکستان مثل پلی (۳-نیترا تومتیل-۳-متیل اکستان) دارای دمای انتقال شیشه‌ای کم و امتزاج پذیری با نرم‌کننده‌های مشابه هستند و با ایزوسیانات‌های مرسوم در گرما پخت می‌شود. جدول ۲، خواص هر دو نوع poly(NIMMO) دو عاملی و تک عاملی را نشان می‌دهد. poly(NIMMO) دارای محتوای انرژی ذاتی 818 kJ/kg است و به عنوان ماده غیرمحترقه طبقه‌بندی می‌شود [۳،۹].

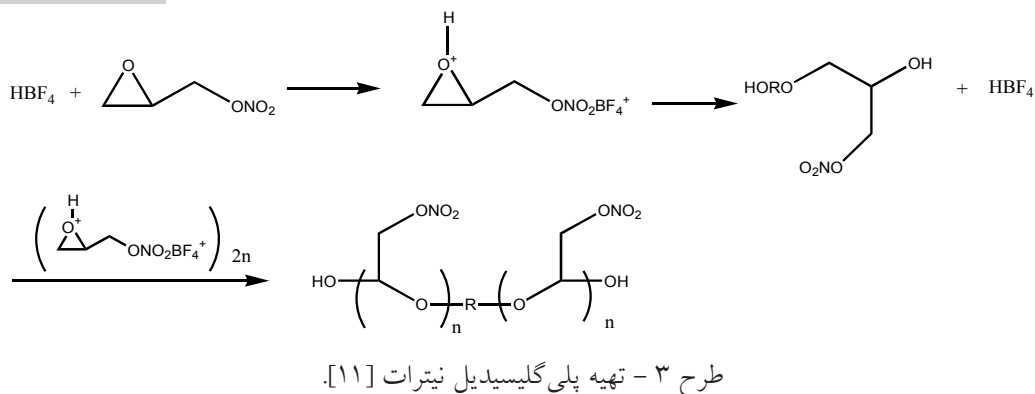
پلیمرهای اکسیران

پلیمرهای اکسیران دارای خواص مشابه فیزیکی و شیمیایی با پلیمرهای اکستان (طرح ۱) هستند. تفاوت اصلی پلیمرهای اکستان

جدول ۲- خواص poly(NIMMO) [۴].

poly(NIMMO)		ماده
دو عاملی	سه عاملی	
۱۷۰۰	۶۵۰۰	M_w
۱۲۵۰۰	۴۲۰۰	M_n
۱/۳۶	۱/۵۵	M_w/M_n
≤ 2	≤ 3	عاملیت
-۳۰	-۳۵	T_g ($^\circ\text{C}$)
۱۸۷	۱۸۴	دمای شروع تخریب ($^\circ\text{C}$)
بسیار پایدار	بسیار پایدار	پایداری در خلأ
غیرحساس	غیرحساس	حساسیت به ضربه (Rotter)
۱۶۰۰	-	گرانروی در 30°C

۱- به کمک DSC با سرعت گرمادهی 5°C/min به دست آمده است.



انرژی زیاد و دمای انتقال شیشه‌ای کم است. حساسیت این پیش‌پلیمر کمتر از آن است که در گروه مواد منفجره قوی قرار گیرد. پلی گلیسیدیل نیترات دارای انرژی ذاتی ۲۶۶۱ kJ/g است که نسبت به GAP و poly(NIMMO) بیشتر است. خواص پلی گلیسیدیل نیترات در جدول ۳ آمده است.

پیش‌پلیمر پلی گلیسیدیل نیترات پایداری شیمیایی زیادی دارد. در حالتی که این ماده با ایزوسیانات پخت شود، لاستیک حاصل پایداری کمی‌نشان می‌دهد و پیرسازی طولانی مدت منجر به تجزیه لاستیک می‌شود. طرح ۴، ساختار لاستیک پلی گلیسیدیل نیترات را نشان می‌دهد.

وجود پایدارکننده‌ها باعث پیش‌گیری از تجزیه می‌شود. تجزیه لاستیک پلی گلیسیدیل نیترات به انرژی فعال‌سازی اندک تجزیه، ناشی از شکست پیوند یورتان مربوط است و کمتر با تجزیه معمولی نیترات استر انجام می‌گیرد. چنین گسستگی در poly(NIMMO) ممکن نیست، زیرا اتم غیرثابت برای انتقال ندارد. به نظر می‌رسد، این ناپایداری مشکل ذاتی پیش‌پلیمر پلی گلیسیدیل نیترات است و به ایزوسیانات مورد استفاده وابسته نیست. غلبه بر این مشکل با اصلاح انتهای زنجیر برای ایجاد پلی گلیسیدیل نیترات با انتهای دی‌ال امکان‌پذیر است. آزمون‌های پیرسازی شتاب‌یافته (accelerated aging) در ۶۰°C و اندازه‌گیری سختی پلی گلین پخت شده نشان می‌دهد، لاستیک پخت شده از پلی گلین اصلاح نشده به سرعت تجزیه می‌شود. در حالی که لاستیک اصلاح شده با سولفوریک اسید-تتراهیدروفوران ساختار خود را حفظ می‌کند و مقاومت خوبی در برابر کشش دارد. آزمون‌های پایداری در خلأ نشان می‌دهد، لاستیکی که در آن انتهای زنجیر با سولفوریک اسید-تتراهیدروفوران اصلاح شده، دارای پایداری حدود ۲ mL/g است [۱۲].

پلیمرهای نیتروژن‌دار

پلیمرهای نیتروژن‌دار که به عنوان محمل‌های پیرانتری کاربرد

با پلیمرهای اکسیران در کمترین یک گروه متیلن در واحد تکراری است. مهم‌ترین عضو این گروه پلی گلیسیدیل نیترات (پلی گلین) است [۱۰].

پلی گلیسیدیل نیترات

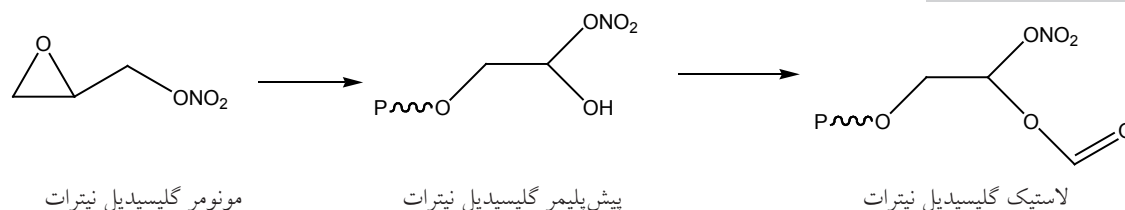
از پلیمر شدن گلیسیدیل نیترات (Glyn) پیش‌پلیمری با گروه انتهایی هیدروکسیل به دست می‌آید. ایجاد اتصال عرضی یورتان با ایزوسیانات‌ها منجر به ایجاد لاستیک پخته شده پلی گلیسیدیل نیترات می‌شود.

پلیمر شدن پیش‌پلیمر نیازمند شروع‌کننده اسیدی مثل تری فلئوروبوریک اسید اترات ترکیب شده با یک الکل دوعاملی (گلیکول) برای ایجاد پلیمری دوعاملی است. افزودن آرام محلول مونومر به شروع کننده، واحد مونومر فعال شده‌ای ایجاد می‌کند که طی فرایند حلقه‌گشا با الکل ترکیب شده، دوباره پروتون تولید می‌کند. پروتون واحد مونومر دیگری را فعال می‌کند که به زنجیر پلیمر افزوده می‌شود (طرح ۳). این واکنش پس از سرد شدن با آب و غیرفعال سازی خاتمه می‌یابد [۱۱].

پیش‌پلیمر پلی گلیسیدیل نیترات مایعی زردرنگ با چگالی و

جدول ۳- خواص پلی گلیسیدیل نیترات [۳].

مقدار	کمیت
۱/۴۶	چگالی (g/cm ³)
-۳۵	T _g (°C)
-۶۸	گرمای تشکیل، ΔH _f (cal/g)
~۲	عاملیت
~۳۷	عدد هیدروکسی (mg KOH/g)
-۶۰/۵	تعادل اکسیژن
۱۷۰	دمای شروع شعله (°C)



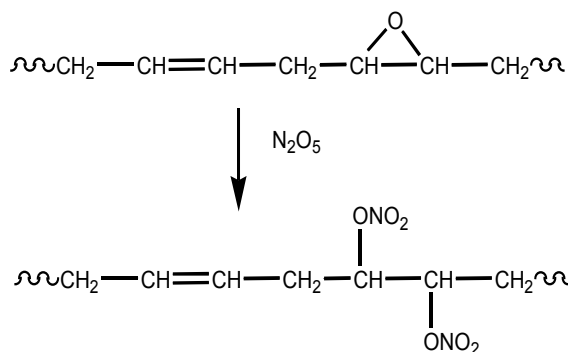
طرح ۴- روند پخت لاستیک پلی گلیسیدیل نیترات [۳].

پلیمرهای پرانرژی تهیه شده با استفاده از دی‌نیتروژن پنتوکسید

گروه‌های عاملی نیترو ($C-NO_2$)، نیتروآمین ($N-ONO_2$) و استرنیترات ($C-NO_2$) گروه‌های ساختاری پایه برای مواد پرانرژی هستند و عموماً با نیترات‌دار شدن به دست می‌آیند. به‌طور کلی، روش سنتی نیترات‌دار شدن با استفاده از مخلوط اسید (10% نیتریک اسید یا مخلوطی از نیتریک اسید با سولفوریک اسید) برای زنجیر اصلی پلی‌اتر بسیار شدید است و انتخابی نیست. به هر حال، واکنش با دی‌نیتروژن پنتوکسید (N_2O_5)، (که با ازون‌دار کردن N_2O_4 یا آبکافت آندی در نیتریک اسید 10% به دست می‌آید) سریع است و به‌طور معمول در چند دقیقه در دمای محیط کامل می‌شود. به علاوه N_2O_5 بنا به محیطی که اعمال می‌شود، دارای رفتار نیترات‌دار شدن متفاوتی است.

در نیترات‌دار شدن N_2O_5 ، پلیمر می‌تواند بدون بریدگی زنجیر اصلی، نیترات‌دار شود. این مورد در نیترات‌دار شدن جزئی پلی‌بوتادی‌ان هم قابل مشاهده است، به طوری که فقط یک قسمت از پیوندهای دوگانه به گروه‌های اپوکسی تبدیل می‌شود. اگر مقدار هم‌ارزی برای نیترات‌دار کردن گروه‌های اپوکسی استفاده شود، بدون حمله به گروه‌های اولفین فقط باز شدن حلقه مشاهده می‌شود، طرح ۵ نیترات‌دار شدن پلی‌بوتادی‌ان را نشان می‌دهد.

نیترات‌دار شدن HTPB در دو مسیر واکنش انجام می‌شود، مسیر سنتی که نیترات‌دار شدن به کمک جیوه انجام می‌شود. روش دیگر ایجاد گروه اپوکسی بر پلی‌بوتادی‌ان‌های با انتهای هیدروکسی و



دارند، شامل پلی‌وینیل نیترات، پلی‌نیتروفلین، نیتروآمین پلی‌اتر و اپوکسی‌های دارای پیوند N-N هستند. پلی‌فورفوریل گلیسیدیل اتر بی‌اثر نیز به عنوان راهی برای دستیابی به محمل‌های پرانرژی شناخته شده است. به نظر می‌رسد، پلیمرهای پرانرژی می‌توانند با ترکیب گروه‌های پرانرژی (همانند آزیدو (N_3))، نیترو ($C-NO_2$))، استرنیترات (ONO_2)، نیتروآمین ($N-ONO_2$) و دی‌فلوئوروآمین (NF_3) با پلی‌(فورفوریل گلیسیدیل اتر) ایجاد شوند [۴].

پلی‌وینیل نیترات

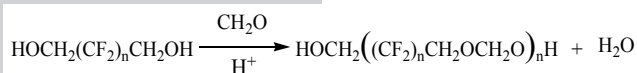
نخستین بار پلی‌وینیل نیترات، $-CH_2CH(ONO_2)-$ ، برای جایگزینی محمل‌های نیتروسولوز تهیه شد. این ترکیب، با نیترات‌دار شدن پلی‌وینیل‌الکل با اسیدهای مخلوط نیتریک اسید در اتر یا نیتریک اسید در حلال‌های کلردار به دست می‌آید. این پلیمر دارای چگالی $1/5 \text{ g/cm}^3$ و وزن مولکولی بیش از 10^6 است. پلی‌وینیل نیترات خالص در آزمون‌های پایداری خلأ، پایدارتر از نیتروسولوز است و به پیشران‌های کامپوزیت دوتایی برای بهبود خواص مکانیکی افزوده می‌شود [۳، ۴].

پلی‌نیتروفلین

پلی‌نیتروفلین پلیمری بی‌شکل با پایداری گرمایی و جرم مولکولی نسبتاً کم (در حدود 2000) است. این پلیمر ذوب نمی‌شود، حلال آن محلول استون-تانول است و کاربردهایی به عنوان محمل مقاوم در برابر گرما برای پیشران‌ها دارد [۳].

پلی‌اترهای نیتروآمین

پلیمر شدن استر پلی‌اترهایی که دارای عامل نیتروآمین هستند با یک واکنش در حالت مذاب و بدون حلال انجام می‌گیرد. محصول، پلیمری با دمای انتقال شیشه‌ای و گرانش کم و مقاوم در برابر آبکافت است. این پلیمرها قابلیت زیادی برای استفاده در فرمول‌بندی پیشران‌ها دارند. عاملیت نزدیک به ۲ و دمای انتقال شیشه‌ای نسبتاً کم می‌تواند در وزن‌های مولکولی 500 تا 10^4 با تغییر استوکیومتری دی‌ال و مونومر به دست آید [۳، ۴].



طرح ۷- تهیه پلی فرمال [۳].

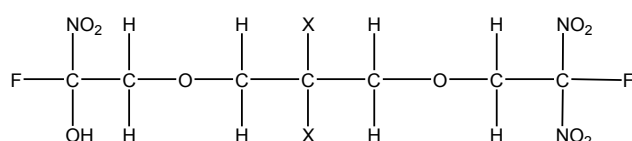
NHTPB دارای گرانروی و دمای انتقال شیشه‌ای کم است و به راحتی با ایزوسیانات‌ها پخت می‌شود. برخی خواص کلی NHTPB با ۱۰٪ نیترات‌دار شدن در جدول ۴ آمده است [۳].

پلیمرهای فلئوردار

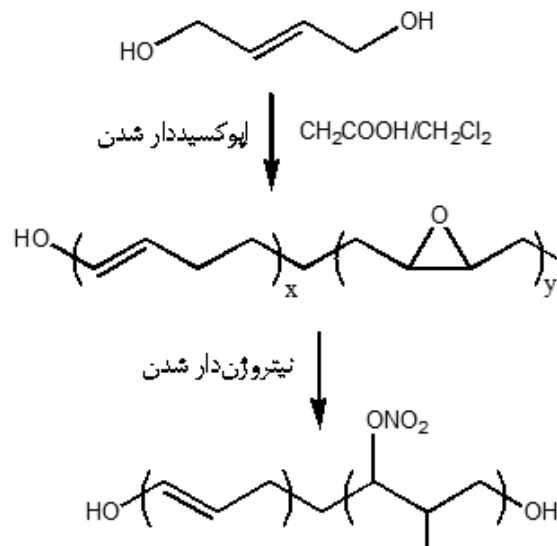
این پلیمرها نسبت به هیدروکربن‌های بی اثر مثل HTPB برتری ذاتی دارند. فلئوروکربن‌ها دارای چگالی‌های بیشتری هستند که منجر به فرمول‌بندی‌های با انرژی و کارایی بیشتر می‌شود. جایگزینی سوخت هیدروژن روی زنجیر پلیمر با فلئور که اکسیدکننده است، تعادل اکسیژن ترکیب را بیشتر کرده، سبب افزایش کارایی می‌شود. از مهم‌ترین انواع پلیمرهای فلئوردار پلی‌فرمال‌ها هستند، پلی‌فرمال‌ها با واکنش دی‌هیدریک الکل با فرمالدهید به دست می‌آیند و منجر به پلیمرهای با انتهای هیدروکسیل می‌شوند. بدین ترتیب، زنجیرهای با طول متغیر ایجاد شده و پلیمری با دمای انتقال شیشه‌ای کم به دست می‌آید که به عنوان کوپلیمر با سایر مونومرهای با T_g کم به کار می‌رود. نمای کلی واکنش برای تولید پلی‌فرمال‌ها در طرح ۷ آمده است.

پلیمرهای فلئوردار دارای پایداری شیمیایی و گرمایی بیشتری نسبت به پلیمرهای نیترو هستند. افزون بر فلئور گروه‌های عاملی دیگری نیز به عنوان عامل پیرانتری از جمله دی فلئوروآمین مورد توجه قرار گرفته‌اند. گروه دی فلئوروآمین گروه عاملی اکسیدکننده است. فلئور تک‌ظرفیتی نصف اکسیژن دوظرفیتی در ایجاد تعادل استوکیومتری احتراق دخیل است، به این معنا که اتم فلئور دارای یک اربیتال نیمه‌پر در لایه آخر است و فقط پیوند یگانه ایجاد می‌کند، در حالی که اتم اکسیژن دو اربیتال نیمه‌پر دارد. گروه‌های دی فلئوروآمین به ضربه نسبتاً حساس‌اند. کاربرد این گروه‌های عاملی در مولکول‌های با نام تجاری SYEP ($X=\text{NF}_2$) و FDNA ($X=\text{NO}_2$) در طرح ۸ نشان داده شده است.

SYEP دارای دمای ذوب کمتر، چگالی و تعادل اکسیژن بیشتری



طرح ۸- ساختار پلیمر فلئوردار [۳].



طرح ۶- تهیه HTPB نیترات‌دار شده (NHTPB) [۳].

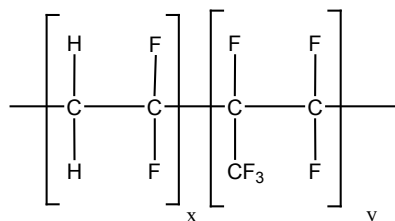
سپس نیترات‌دار شدن با دی نیتروژن پنتوکسید است، این روش در طرح ۶ نشان داده شده است.

درجه نیترات‌دار شدن، پایداری گرمایی و خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ۱۰٪ نیترات‌دار شدن در پیکره اصلی پلیمر منجر به ایجاد ترکیب متعادلی از انرژی، خواص مکانیکی و امتزاج پذیری با نرم‌کننده‌های پیرانتری می‌شود. در این مقدار از نیترات‌دار شدن (۱۰-۱۵٪) دمای انتقال شیشه‌ای پایین نگه‌داشته می‌شود و با بسیاری از نرم‌کننده‌های پیرانتری نیز امتزاج‌پذیری کامل ایجاد می‌شود.

جدول ۴- خواص NHTPB [۳].

مقدار	خاصیت
۸۰۰۰	M_w
۳۰۰۰	M_n
۲/۶۶	M_w/M_n
-۵۸	دمای انتقال شیشه‌ای، T_g (°C) ^۱
۱۵۰	دمای شروع تخریب، (°C) ^۲
خوب	پایداری در خلأ
خارج از محدوده اندازه‌گیری	حساسیت به ضربه (Rotter)
۱۲۸	گرانروی در ۳۰°C (Rotter)

۱- به کمک DSC و ۲- به کمک DSC با سرعت گرمادهی ۵°C/min به دست آمده است.



طرح ۹- ساختار کلی کوپلیمرهای فلوئوردار [۳].

است که در طرح ۹ آمده‌اند [۳]. این پلیمرها دارای چگالی زیاد به همراه مقداری زیاد فلوئورید و پایداری گرمایی خوبی هستند.

نتیجه‌گیری

پلیمرهای پرانرژی دارای خواص فوق العاده‌ای هستند که کاربرد آنها را در سامانه‌های پرانرژی مطلوب می‌سازد. بدین دلیل که افزون بر ایفای نقش محمل برای اجزای پرانرژی کوچک مولکول، مانع از افت انرژی سامانه هم می‌شوند. از میان پلیمرهای پرانرژی، پلی‌گلیسیدیل نیترات، پلیمر گلیسیدیل آزید و poly(NIMMO) دارای بیشترین خواص انرژی‌زایی هستند که از لحاظ کاربردی مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. از این‌رو، سنتز و بهینه‌سازی روش‌های سنتز این پلیمرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مراجع

- Desai H.J., Cunliffe A.V., Hamid J., Honey P.J., Stewart M.J., and Amass J., Synthesis and Characterization of α,ω -hydroxy and Nitrate Telechelic Oligomers of 3,3-(nitratomethyl) Methyl Oxetane (NIMMO) and Glycidyl Nitrate, *Polymer*, **37**, 3401-3409, 1996.
- Provates A., Energetic Polymers and Plasticizers for Explosive Formulations. A Review of Recent Advances, Weapons System, Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTO-TR-0966, 1-37, 2000.
- Provates A., Characterization and Polymerization Studies of Energetic Binders, Weapons System Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTO-TR-1171, 1-36, 2001.
- How Ghee A. and Sreekumar P., *Energetic Polymers*, Wiley-

جدول ۵- خواص پلیمرهای فلوئوردار [۳].

SYEP (X = NF ₂)	FDNA (X = NO ₂)	ماده / خواص
۱/۶۹۱	۱/۶۴۰	چگالی (g/cm ³)
-۲/۵	۲۱	دمای جوش (°C)
۱۴۱	۱۵۸	حساسیت به ضربه ۲/۵ (kg/cm)

نسبت به FDNA است. حساسیت ضربه SYEP کمی بیشتر است [۴].

کوپلیمرهای فلوئوردار

کوپلیمرهای فلوئوردار به عنوان محمل‌های پرانرژی بی‌اثر چگال برای ترکیبات پرانرژی به کار می‌روند. کوپلیمرهای فلوئوردار استفاده شده به عنوان محمل بدون ازدست دادن کارایی به روش اکستروژن و قالب‌گیری فشاری فراورش می‌شوند. عیب اصلی این کوپلیمرها کاربرد حلال اشتعال‌پذیر در فرایند این کوپلیمرها با اجزای پرانرژی سامانه است. از لحاظ ایمنی و زیست‌محیطی خارج کردن این حلال‌های اشتعال‌پذیر برای داشتن فرایندی بدون حلال برای سامانه پرانرژی توصیه شده است، نمونه‌ای از این کوپلیمرها وینیلیدن فلوئورید و هگزاfluoropropylene با نام تجاری Viton

- VCH, Weinheim Germany, 81-115, 2012.
- Diaz E., Brousseau P., and Ampleman G., Polymer Nanocomposites from Energetic Thermoplastic Elastomers and Alex, Propellant. Explosive. *Pyrotechnics*, **28**, 4, 210-215, 2003.
- Willer R., Stern A.G., and Day R.S., Poly(glycidyl nitrate) Plasticizers, *US Patent 5380777*, 1995.
- Selim K., Ozkar S., and Yilmaz L., Thermal Characterization of GAP-Based Binders for Composite Propellant, *J. Appl. Polym. Sci.*, **77**, 538-546, 2000.
- Kubota N., Combustion of GAP/HMX and GAP/TAGN Energetic Composite Materials, Propellant. Explosive. *Pyrotechnics*, **25**, 86-91, 1997.
- Desai H.J., Cunliffe A.V., Hamid J., and Amass A.J., Synthesis and Characterization of α,ω -hydroxy and Nitrate Telechelic

- Oligomers of 3,3-(nitratomethyl) Methyl Oxetane (NIMMO) and Glycidyl Nitrate (GLYN), *Polymer*, **5**, 15, 5401-5409, 1996.
10. Biedron T., Brezinski K., Kubisa P., and Penczek S., Macromonomer by Activated Polymerization of Oxiranes: Synthesis and Polymerization, *Polym. Internat.*, **3**, 36, 73-80, 1995.
 11. Paraskos A.J., Sanderson A.J., and Cannizzo L.F., Polymerization of Glycidyl Nitrate Via Catalysis with BF₃.THF: Compatibility with the Activated Monomer (AM) Mechanism, *2004 IM/EM Technical Symposium*, San Francisco, 2004.
 12. Provates A., Characterization and Binder Studies of Energetic Plasticiser- Glyn Oligomer, Weapons System Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTO-TR-1422, 1-37, 2003.