

ژل‌های نیترومتان و کاربردهای آنها

علی سیف‌اله زاده^{۱*}، سمانه محمدی^۲، ایرج کهساری^۳، علی صابری مقدم^۴

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*E-mail : ali.seifolazade@gmail.com

(تاریخ وصول: ۸۹/۱۱/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۱۰)

چکیده

نیترومتان ماده‌ای پُرانرژی، قابل انفجار و ترکیب نیترودار آلی مایع است که ممکن است به عنوان تک پیشرانه، جزء سازنده‌ی یک پیشرانه‌ی دوتایی و یا یک ماده منفجره استفاده گردد. طبیعت نسبتاً غیرسمی نیترومتان، محتوای بالای انرژی، ویسکوزیته‌ی پایین، سهولت ساخت و استعمال آن، دور نمای جالب توجهی جهت استفاده از این ماده در فناوری‌های پیشرانش و مواد منفجره در حال حاضر و آینده را ارائه کرده است. نیترومتان ایمپالس ویژه‌ی بالایی ارائه می‌دهد. این ماده پتانسیل بالایی جهت ساخت ژل‌های پُرانرژی دارد. ژل‌های نیترومتان دو کاربرد عمده دارند. این ژل‌ها به عنوان پیشرانه به کار می‌روند، همچنین به عنوان مواد منفجره نیز استفاده می‌شوند. پیشرانه‌های ژل ایمپالس ویژه‌ی قابل مقایسه‌ی با پیشرانه‌های مایع ارائه می‌دهند و کارایی آن‌ها با اضافه کردن افزودنی‌هایی مانند ذرات فلزی افزایش می‌یابد. پیشرانه‌های ژل حساسیت کمتری نسبت به پیشرانه‌های مایع و جامد دارند. ژل نیترومتان با محیط زیست سازگار است. در این مقاله کاربردهای انواع ژل‌های نیترومتان و تاثیر برخی افزودنی‌ها بر روی خواص آن‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: نیترومتان، ژل، پیشرانه، ژل انفجاری.

۱- مقدمه

دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند ماهیت نسبتاً غیرسمی و سازگار بودن با محیط زیست می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های سمی مانند هیدرازین و مشتقات آن به شمار رود [۱ و ۲].

در دهه‌ی اخیر پیشرانه‌های ژلی به دلیل عملکرد مناسب و ایمنی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. نیترومتان ترکیبی آلی و پُرانرژی است که به

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

۳- پژوهشگر

۴- دانشیار

است و مفهوم آن این است که ویسکوزیته‌ی ژل در یک سرعت برش^۲ ثابت، با گذشت زمان کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ژل‌ها معمولاً دارای خاصیت نازک شونده‌ی برشی^۳ می‌باشند یعنی با افزایش سرعت برش ویسکوزیته‌ی ژل کاهش می‌یابد [۸ و ۹]. ژل کردن مایعات پیرانرژی منجر به کاهش تبخیر نسبت به مایع شده و تبخیر دیرتر اتفاق می‌افتد. همچنین ساخت ژل از مایعات پیرانرژی میزان تراوش و ریزش را کاهش داده و از بروز خسارت و آتش سوزی‌های ناگهانی جلوگیری می‌نماید و انبار کردن و حمل و نقل آن‌ها نیز آسان تر است [۸].

۳- کاربردهای ژل نیترومتان

ژل نیترومتان دو کاربرد عمده و مهم دارد:

۱- پیشرانده‌ی موشک [۱۰ و ۱۱]: ژل کردن مایعات پیرانرژی مانند نیترومتان و استفاده از افزودنی‌های لازم نه تنها منجر به افزایش انرژی این سوخت می‌شود، بلکه منجر به کوچک شدن اندازه‌ی موشک، افزایش دانسیته سوخت و بالا رفتن حاصلضرب ایمپالس ویژه و دانسیته که بر روی برد موشک تاثیر گذار است، خواهد شد [۱۲]. علاوه بر این خاصیت تیکسوتروپیک ژل منجر به آن می‌شود که سوخت، رفته رفته و با گذشت زمان راحت تر به جریان درآید. همچنین طول عمر پیشرانده‌ها با ژل شدن آن‌ها افزایش می‌یابد و ذخیره سازی آن‌ها نیز آسان تر می‌باشد [۸].

پیشرانده‌های ژل معایبی نیز دارند. افزودن عوامل ژل کننده منجر به تغییر در خواص رئولوژیکی مایع می‌گردد و ژل‌ها غالباً سیالاتی غیرنیوتنی می‌باشند. رفتار مشابه با سیال غیر نیوتنی پیشرانده‌های ژلی روی فرآیند اتمایز کردن آن‌ها تاثیر گذار بوده و گاهی منجر به کاهش عملکرد و افزایش مقیاس محفظه‌ی احتراق می‌گردد. قیمت پیشرانده‌های ژلی در حدود ۳۰٪ گران‌تر از پیشرانده‌های جامد می‌باشد. همچنین در فرآیند تغذیه، پیشرانده‌های ژل در مقایسه با پیشرانده‌های مایع به فشار خوراک بیشتری برای ایجاد جریان مشابه نیاز دارند [۸]. در برخی از روش‌های تولید پیشرانده‌های ژل نیترومتان به دلیل وجود اکسیژن کافی در ساختار ژل تولید شده، عمل سوختن به طور کامل صورت گرفته و نیازی به اکسیدکننده نخواهد بود [۱۰ و ۱۳]. اما در

ژل کردن مایعات پیرانرژی مانند نیترومتان، زمینه را برای افزودن ذرات پیرانرژی در یک ساختار همگن فراهم آورده و منجر به افزایش ایمپالس ویژه می‌گردد. انواع مختلفی از ژل کننده‌ها بر روی برخی از سوخت‌ها و اکسیدکننده‌ها بر آزمایش شده است. طی دهه‌ی اخیر در رابطه با افزودن نانو ژل کننده‌ها روی انواع ژل‌ها تحقیقاتی صورت گرفته است. در این زمینه اثر نانو ذرات دی اکسید سیلیسیم روی ژل نیترومتان و خواص رئولوژیکی آن بررسی گردیده است [۳ و ۴]. امروزه به دلیل خواص مطلوب نانو ذرات پیرانرژی، تلاش‌های فراوانی در جهت بهره بردن از نانو ذرات فلزی در ساختار ژل‌ها صورت گرفته است و تحقیقات بر روی ژل‌ها حاکی از این مطلب است که در صورت به کاربردن این ذرات پیرانرژی، غالباً نانو ذرات می‌توانند به عنوان عامل ژل کننده عمل کنند [۵]. اثر فلز آلومینیوم و ترکیبات حاوی آلومینیوم در اندازه‌های مختلف (میکرو و نانو) بر روی انواع متفاوتی از ژل‌ها آزمایش شده است. ژل نیترومتان از این امر مستثنی نبوده و اثر اندازه ذرات فلز آلومینیوم در مقیاس نانو و میکرو بر روی برخی پارامترهای این ژل مانند احتراق و ایمپالس مخصوص و قدرت انفجار بررسی شده است [۲ و ۶]. ژل‌های نیترومتان به دلیل انرژی‌دهی بالا، پایداری و قابلیت انفجار مناسب از جمله ترکیباتی هستند که به منظور تهیه ترکیبات انفجاری نیز به کار می‌روند. بسته به نوع کاربرد، انواع مختلفی از این ژل‌ها همراه با افزودنی‌های متفاوت موجودند. در این مقاله ضمن اشاره به انواع کاربردهای ژل‌های نیترومتان، به بررسی ساختار انواع پیشرانده‌های ژلی نیترومتان و ترکیبات انفجاری حاوی ژل نیترومتان پرداخته می‌شود.

۲- ژل و خواص رئولوژیکی

طبق تعریفی که برینکر و اسپرر در سال ۱۹۹۰ ارائه داده‌اند: "ژل ماده‌ای با ساختمان پیوسته جامد است که یک فاز پیوسته‌ی مایع را محصور کرده و پیوستگی ساختار جامد، خاصیت کشسانی به ژل می‌بخشد" [۸]. از نقطه نظر مکانیکی ژل‌ها سیالاتی غیر نیوتنی هستند که رفتاری وابسته به زمان دارند و عموماً جزو سیالات تیکسوتروپ^۱ محسوب می‌شوند. تیکسوتروپی، پدیده‌ای رئولوژیکی و وابسته به زمان

2- Shear rate
3- Shear thinning

1- Thixotrop

از ژل نیترومتان در تهیه‌ی مواد محترقه و آتش بازی نیز بهره می‌گیرند. این نوع ترکیبات شامل نیتروسولوز (عامل ژل کننده)، ترکیبات نیترودار (مانند نیترومتان)، عوامل اکسیدکننده، عوامل ایجاد کننده‌ی احتراق و عوامل تولید کننده‌ی رنگ می‌باشد [۱۶]. علاوه بر پیشرانه و ترکیبات انفجاری ژلی نیترومتان همچنین نوعی ژل نیترومتان وجود دارد که به عنوان ترکیبات چسبنده (چسب) به کار می‌رود. این ترکیب برای ایجاد پیوند قوی بین مواد کاربرد دارد. این ژل مرکب از نیترومتان، کمی استات سلولز و یک آمین مانند اتیلن-دی‌آمین می‌باشد. به علاوه برای افزایش پایداری و تاخیر در پدیده هم افزایی از مقدار کمی عوامل پایدار کننده مثل متانول، اتانول و یا حتی آب نیز بهره می‌گیرند [۱۷].

گونه‌ای از چسب ژلی نیترومتان موجود است که به عنوان پوشش چسبنده برای سطوح قیری به کار می‌رود بدون آن که سطوح دچار تغییر شکل و خرابی گردند و یا سطوح قیری در آن حل شود و این ترکیب ضد آب نیز می‌باشد. نوعی از این چسب ژلی حاوی نیترومتان و نیتروسولوز می‌باشد [۱۸].

۴ - روش‌های ساخت ژل نیترومتان

روش کلی ساخت برای انواع ژل‌های نیترومتان مشابه می‌باشد. در تمام این روش‌ها نیاز به سیستم مخلوط کردن است و تهیه ژل مورد نظر در دمای اتاق در حدود ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد [۱۰] صورت می‌گیرد و تفاوت روش‌های ساخت در نوع عوامل ژل کننده و افزودنی‌هایی است که به کار می‌رود. همچنین اجزای تشکیل دهنده‌ی ژل نیترومتان بسته به کاربرد آن متفاوت خواهد بود. دو جز اصلی به منظور تهیه‌ی پیشرانه‌های ژلی، پیشرانه‌ی مایع و عامل ژل ساز می‌باشد. علاوه بر این دو جزء جدایی ناپذیر، معمولاً از افزودنی‌هایی مثل پودر فلزی و ماده فعال کننده سطح در ساخت ژل‌ها بهره می‌گیرند. روش کلی جهت تهیه‌ی یک پیشرانه‌ی ژل عبارت است از: تهیه ترکیبات، اضافه کردن ترکیبات با ترتیبی مناسب، بهم زدن مخلوط برای مدت زمان مناسب با توجه به ماهیت و نوع مواد، دست نخورده گذاشتن مخلوط برای مدت مناسب جهت تکمیل عمل ژل شدن [۱۹]. از جمله مهمترین عوامل تاثیر گذار بر روی ساخت و خواص رئولوژیکی پیشرانه‌های ژلی و بهینه سازی آن‌ها، غلظت عامل ژل ساز،

برخی دیگر نیز نیاز به اکسیدکننده می‌باشد. پیشرانه‌های ژل شده حاوی ذرات فلزی کاربردی عمده در اکتشافات فضایی داشته و مورد توجه وزارت دفاع کشورها می‌باشند و در جهت بهبود سیستم‌های پیشران به منظور بالا بردن ایمنی و افزایش دانسیته انرژی به کار می‌روند [۲].

۲- مواد منفجره: تهیه‌ی ژل نیترومتان به منظور استفاده در مواد منفجره، امکان افزودن برخی مواد پراثری مثل آلومینیوم و یا نمک برخی فلزات را فراهم می‌آورد که با افزودن یک چاشنی انفجاری، امکان ایجاد انرژی بالایی فراهم آورده می‌شود. در حال حاضر ترکیبی انفجاری حاوی ژل نیترومتان موجود است که جهت اکتشاف لرزه‌ای برای ذخایر نفت، روغن و گاز طبیعی در زیر اقیانوس‌ها استفاده می‌شود [۱۰ و ۷].

بخشی از انرژی حاصل از انفجار این مواد منفجره به سطح دریا منعکس می‌شود و توسط دستگاه‌ها دریافت شده و ثبت می‌گردد. این اطلاعات ثبت شده به متخصصان ژئوفیزیک این امکان را می‌دهد تا ساختار زمین شناسی اقیانوس‌ها را بررسی کرده و مکان‌هایی که روغن و گاز تجمع یافته‌اند، مشخص نمایند [۱۴]. انفجار این مواد در عمق و فشار زیاد گاهی ممکن است با شکست مواجه شود. لذا برای رسیدن به انفجار و حساسیت مناسب، ترکیبی انفجاری با دانسیته‌ای بیش از یک، تولید می‌کنند که برای به کار رفتن در زیر دریا مناسب می‌باشد. مواد و ترکیب درصد مناسب برای تولید این نوع ژل انفجاری عبارت است از: ۲۰٪ نیترومتان ژل شده، ۶۰٪ نیترات آمونیم، ۱۵٪ سولفات باریم طبیعی، ۳٪ بالون‌های رزینی یا میکروبالون‌ها و ۲٪ مواد پرکننده‌ی خنثی [۱۴].

یکی از پروژه‌ها و برنامه‌هایی که ژل نیترومتان در آن مورد استفاده قرار گرفته است، برنامه‌ی "ای اس ای ایکس" می‌باشد که توسط آژانس هسته‌ای دفاع و "اسی اچ ۲" سرمایه‌گذاری شده است. در این سیستم هدف جایگزینی ژل نیترومتان به جای سیستم‌های دوغابی پراثری می‌باشد. از آن جایی که حفره حاصل از انفجار ترکیبات دوغابی مورد استفاده بسیار بزرگ بوده و راه حلی برای این مشکل پیشنهاد نشده است، ژل نیترومتان جایگزین مناسبی برای آن به شمار می‌رود [۱۵].

پنتامین و ذرات ریز شیشه‌ای^۱ کاربرد انفجاری پیدا خواهد کرد. وقتی از این ژل‌ها به عنوان پیش‌رانه استفاده می‌شود اجزای سوخت (مانند گرافیت، دوده پارافین‌های حلقوی) در صورت نیاز اکسیدکننده‌ها (مانند اکسیدکننده‌های آلی جامد مثل گوانیدین نیترات و اکسیدکننده‌های جامد غیر آلی شامل نیترات آمونیوم و نیترات لیتیم) و کاتالیزور (مانند استنات استیل کروم، اکسید آهن) نیز افزوده می‌شود [۲۲].

اندازه ذرات ژل‌کننده و پودر فلزی، دما، سرعت اختلاط و زمان مخلوط کردن می‌باشد [۲۰]. در صورت ساخت ژل انفجاری علاوه بر عوامل نام برده، از حساس‌کننده نیز استفاده می‌شود که اندازه و نوع حساس‌کننده روی برخی پارامترهای انفجاری مثل سرعت انفجار اثر گذار است [۲۱].

۵ - انواع ژل‌های نیترومتان

همان‌طور که بیان شد ژل نیترومتان هم به عنوان پیش‌رانه و هم به عنوان ماده‌ی منفجره کاربرد دارد. بنابراین بسته به کاربرد، نوع افزودنی‌ها متفاوت خواهد بود. البته ژل نیترومتانی که به عنوان پیش‌رانه به کار می‌رود با افزودن عوامل حساس‌کننده‌ای مثل آمین‌های آلی شامل: آمین‌های آروماتیکی مثل آنیلین، دی فنیل اتیلن دی آمین و آمین‌های آلیفاتیک مثل دی فنیل آمین، تترا اتیلن

۵-۱ - انواع ژل‌کننده‌ها و ترکیبات به کار رفته جهت تهیه‌ی پیش‌رانه‌ی ژل نیترومتان و تاثیر افزودنی‌های فلزی بر روی ژل نیترومتان

در جدول ۱، مواردی که عمدتاً برای تهیه‌ی پیش‌رانه‌ی ژل نیترومتان گزارش شده، ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ترکیبات مورد استفاده برای تهیه پیش‌رانه‌های ژل نیترومتان.

ردیف	عامل ژل‌کننده	میزان ژل‌کننده مورد استفاده (درصد وزنی)	افزودنی‌ها	مزایا و معایب ژل‌کننده‌های نام برده	مرجع
۱	نیتروسولوز	۵ تا ۷۵٪	برای بهبود احتراق ۳٪ کاتالیزور استنات استیل کروم اضافه می‌شود.	نیتروسولوز ماده‌ای سمی و آتش‌گیر بوده و برای رسیدن به ژلی با غلظت بالا مقدار زیادی از آن باید به کار برده شود.	[۱۰]
۲	نیترات دکستران و یا سولفات نیترات‌های دکستران	۵ تا ۱۵٪	برای بهبود احتراق ۳٪ کاتالیزور استنات استیل کروم اضافه می‌شود.	برای رسیدن به غلظت بالا نسبت به نیتروسولوز میزان عامل ژل‌کننده‌ی کمتری مورد نیاز بوده و خطرات نیتروسولوز را ندارد.	[۱۳]
۳	پلی‌اکسیداتیلن (پلیمر)	۱ تا ۱۰٪	استفاده از پایدارکننده مثل پلی (متیل وینیل اتر/ مالئیک انیدرید)، که یک کوپلیمر است. مقدار مورد استفاده ۰/۱ تا ۰/۵ می‌باشد.	میزان ژل‌کننده‌ی مورد استفاده کم می‌باشد. همچنین ژل حاصله در برابر مایع شدن پایداری می‌کند.	[۲۳]
۴	N-COCO-HYDROXYBUTYR AMIDE	۰/۱ تا ۲۰٪	اکسیدکننده، کاتالیزور، اجزای سوخت	به کاربردن مقدار کمی از این ماده منجر به افزایش غلظت نیترومتان مایع می‌گردد و ژل حاصله پایدار می‌باشد.	[۲۲]
۵	سیانو اتیل اتر با درجه‌ی استخلاف بزرگتر از ۱/۹	۲٪	-	استفاده کمی از این ماده خاصیت ژلی به نیترومتان می‌بخشد. ژل‌کننده‌ی نام برده گران بوده و چندان در دسترس نمی‌باشد [۲۵]	[۲۴]
۶	پلی آن وینیل پیرولیدن پیوند یافته ^۲	۰/۳ تا ۱۰٪	-	ژل حاصله دارای قابلیت احتراق بالایی بوده و در عملیات‌های انفجاری و خاک برداری به کار می‌رود.	[۲۶]

1- Glass microballoon

2- Cross-linked poly-(N-vinylpyrrolidone)

است. انتظار می‌رود با به کارگیری هیدرید آلومینیوم و تشکیل هیدروژن در اثر احتراق، وزن ملکولی گازهای حاصل از احتراق کاهش یابد. هیدرید آلومینیوم برای پیشران‌ش مافوق صوت نیز به کار می‌رود. محاسبات ترمودینامیکی نشان داده است که استفاده از آلفا هیدرید آلومینیوم^۱ (در مقیاس میکرو) در پیشران‌های موشک، بیش از ۱۰۰ نیوتن - ثانیه بر کیلوگرم در مقایسه با آلومینیوم، ایمپالس ویژه بالاتری تولید می‌کند. اثر افزودن آلفا هیدرید آلومینیوم بر روی ژل نیترومتان بررسی شده است. محاسبات ترمودینامیکی و آزمایش‌ها موید این مطلب است که به کار بردن ذرات فلزی آلومینیوم و هیدرید آلومینیوم، منجر به افزایش دمای آدیاباتیک شعله (تا حدود ۵۰۰ درجه ی کلون و بیشتر) و افزایش سرعت سوختن^۲ (نسبت به ژل نیترومتان خالص) می‌گردد. به کار بردن این ذرات منجر به افزایش ایمپالس ویژه نیز می‌شود [۶]. اما تحقیقات به همین جا ختم نشده است. امروزه استفاده از نانو ذرات فلزی دریچه‌های روشنی را به سوی تولید ژل‌های پراثری گشوده است. به کار بردن نانو ذرات فلزی در پیشران‌ها در مقایسه با ذرات میکرونی مزایایی دارد. استفاده از ذرات میکرونی نیازمند صرف زمان بیشتری برای احتراق کامل می‌باشد. علاوه بر این، به کار بردن ذرات نانو، منجر به تاخیر در احتراق کوتاه تری می‌شوند. نانو ذرات فلزی مساحت سطح مخصوص بالاتری دارند و حتی می‌توانند به عنوان عوامل ژل کننده عمل کرده و جایگزین عوامل ژل کننده‌ی کم انرژی مثل ذرات ریز دی‌اکسید سیلیسیم شوند [۵]. آزمایش‌ها نشان می‌دهد استفاده از نانو ذرات آلومینیوم (الکس^۳) و هیدرید آلومینیوم بازدهی بالاتری در مقایسه با به کارگیری ذرات میکرونی دارند. در آزمایش‌هایی که روی ژل نیترومتان صورت گرفته، نتایج نشان می‌دهند که نانو ذرات آلومینیوم ممکن است به عنوان عامل ژل ساز عمل کنند که در این صورت نیازی به عوامل ژل کننده‌ی کم انرژی مثل ذرات ریز دی‌اکسید سیلیسیم و دیگر اکسیدها نمی‌باشد. حذف این عامل ژل کننده امکان افزودن مقدار بیشتری از ذرات فلزی آلومینیوم را فراهم آورده و علاوه بر ژل شدن نیترومتان، دانسیته‌ی انرژی، سرعت سوختن، حساسیت به فشار افزایش می‌یابد [۲]. در شکل ۱، سرعت سوختن خطی در فشارهای مختلف بررسی گردیده است.

در ساختار ملکولی ژل موارد ۱ و ۲ میزان اکسیژن به مقدار کافی وجود دارد. بنابراین احتراق به صورت کامل بوده و نیازی به اکسیدکننده نمی‌باشد [۱۰ و ۱۳].

نکته‌ی قابل توجه در مورد عامل ژل کننده‌ی نیتروسولوز آن است که این ژل کننده، نه تنها در تهیه‌ی پیشران‌های ژلی نیترومتان [۱۰] بلکه در ساخت ژل‌های انفجاری [۲۷]، فوم‌های انفجاری [۲۸] و حتی چسب [۱۸] بر پایه‌ی نیترومتان نیز به کار می‌رود. جدول (۱) نمایان گر انواع ترکیبات پیشران‌های ژل نیترومتان ساخته شده، مربوط به دهه‌های گذشته می‌باشد. اما امروزه تلاش‌ها در جهت استفاده از نانو ژل کننده‌ها و افزودن ذرات فلزی به منظور بالا بردن ایمپالس ویژه و افزایش انرژی ژل حاصله می‌باشد. در این زمینه اثر نانو ژل کننده‌ی دی‌اکسید سیلیسیم به عنوان عامل ژل ساز بر روی نیترومتان بررسی شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد با استفاده از اکسیدکننده‌ها و افزودنی‌های مناسب، ژل نیترومتان تولیدی به این روش ایمپالس ویژه‌ای بزرگتر از ۲۴۰۰ نیوتن - ثانیه بر کیلوگرم تولید می‌کند و این ژل با محیط زیست سازگار می‌باشد.

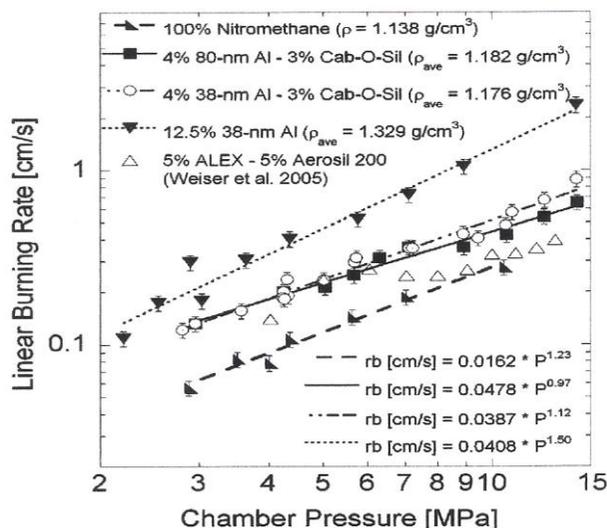
آزمایش‌ها بر روی ژل نیترومتان با عامل ژل کننده‌ی دی‌اکسید سیلیسیم در مقیاس نانو در دو حالت ۱- جریان برشی پایا به منظور بررسی رفتار نازک شوندگی و بررسی خواص رئولوژیکی و ۲- جریان برشی نوسانی برای بررسی خواص ویسکوالاستیکی ژل انجام گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که به کار بردن نانو ذرات ژل ساز دی‌اکسید سیلیسیم جهت تهیه‌ی ژل نیترومتان منجر به تولید ژلی با خاصیت نازک شوندگی برشی مناسب می‌گردد که در فرکانس‌های پایین خاصیت الاستیک از خود نشان می‌دهد [۳ و ۴].

اثر افزودن ذرات فلزی پراثری مثل آلومینیوم، منیزیم، برلییم، تیتانیوم و تنگستن [۲۹] و بور [۳۰] بر روی پیشران‌های ژلی و جامد بررسی شده است. از جمله فلزاتی که هم بدلیل در دسترس بودن و هم قیمت مناسب و مهمتر از همه انرژی حاصل از احتراق نسبتا بالا مورد توجه قرار گرفته است، ذرات آلومینیوم می‌باشد. اثر افزودن ذرات آلومینیوم بر روی ژل نیترومتان در چندین مقیاس بررسی گردیده است [۲ و ۶]. هیدرید آلومینیوم نیز ماده‌ای مناسبی برای به کار رفتن در مواد پراثری محسوب می‌شود که دارای ذخیره‌ی هیدروژن بالایی

1- Alane
2- Burning rate
3- Alex

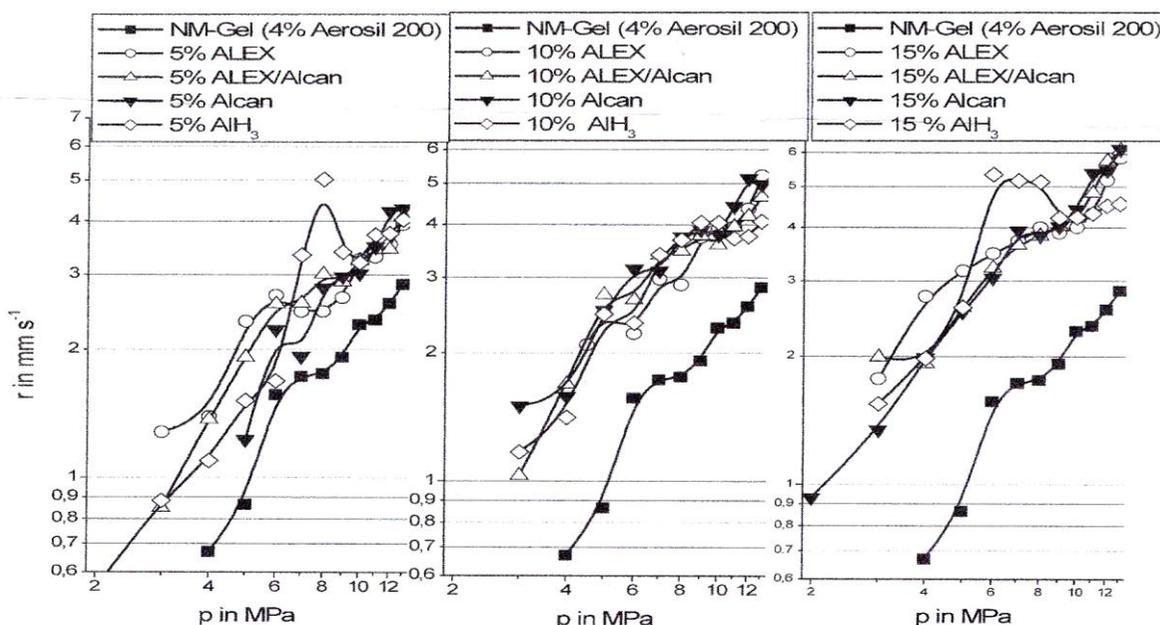
از ذرات ۳۸ نانو متری، ما را بی‌نیاز از به کار بردن عامل ژل‌کننده می‌نماید. شکل ۲، اثر به کار بردن ذرات فلزی آلومینیوم (مقیاس نانو و میکرو) و هیدرید فلزی (در مقیاس میکرو) بر روی سرعت سوختن در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد (فشار محفظه بر روی سرعت سوختن اثر گذار است) [۶]. همان طوری که در شکل ۲ مشخص شده، استفاده از نانو ذرات آلومینیوم (الکس) و هیدرید آلومینیوم (میکرونی) در مقایسه با به‌کارگیری ذرات میکرونی سرعت سوختن بالاتری ایجاد می‌نماید. همچنین افزایش فشار منجر به بالا رفتن سرعت سوختن می‌گردد. در شکل ۳، اثر افزودن ترکیبات حاوی آلومینیوم (در مقیاس نانو و میکرو و همچنین آلفا هیدرید آلومینیوم) بر روی دمای شعله‌ی ژل‌نیترومتان بررسی شده است.

شکل ۳، نشان دهنده‌ی این مطلب است که افزودن ترکیبات پرانرژی منجر به افزایش دمای شعله در فشارهای مختلف می‌شود. همچنین رقابت قابل توجهی بین استفاده از نانو ذرات آلومینیوم و آلفا هیدرید آلومینیوم در رسیدن به دمای شعله‌ی بالاتر وجود دارد (به‌خصوص در ترکیب درصدی بالا).

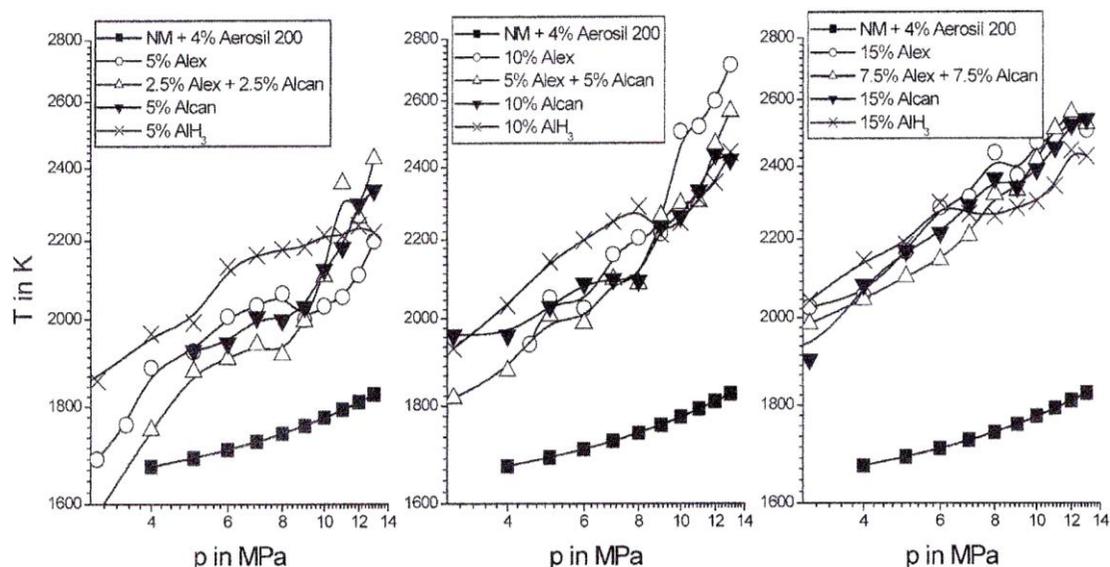


شکل ۱- سرعت سوختن خطی ژل نیترومتان حاوی نانو ذرات پر انرژی آلومینیوم در فشارهای مختلف محفظه احتراق (عامل ژل‌کننده: دی‌اکسید سیلیسیم) [۲].

با توجه به شکل کمترین سرعت سوختن مربوط به نیترومتان خالص بوده و بالاترین سرعت سوختن مربوط به ژل نیترومتان حاوی نانو ذرات فلزی با اندازه ۳۸ نانومتر می‌باشد (بدون عامل ژل‌ساز). خط مربوط به مثلث توپر بیانگر آن است که به کار بردن حدود ۱۲/۵ درصد



شکل ۲- نمودار سرعت سوختن ژل نیترومتان در حضور میزان مختلفی از ذرات فلزی در فشارهای مختلف محفظه‌ی احتراق [۶].



شکل ۳ - نمودار دمای شعله‌ی ژل نیترومتان در فشارهای مختلف برای ترکیب درصدهای متفاوتی از افزودنی‌های فلزی (نتایج تجربی) [۶].

قیمت کمتری دارند. این مواد جایگزین مناسبی برای دینامیت به شمار می‌روند [۳۱].

دو روش کلی برای تهیه این نوع آب-ژل^۲ وجود دارد که در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده‌اند. در شکل ۴، دو مخلوط داریم یکی محیط آبی ژل شده و دیگری نیتروپارافین ژل شده و نهایتاً مخلوط این دو که ژل انفجاری را می‌سازند. بنابراین دو بخش اصلی برای اختلاط در مرحله‌ی اول لازم است. یکی برای محیط آبی ژل شده که در این راکتور ابتدا اتیلن گلیکول و عامل ژل کننده مخلوط می‌شوند سپس آب و در نهایت نیترات آمونیوم افزوده می‌شود و در بخش دوم مخلوط آمید و عامل ژل ساز با مخلوط ذرات ریز شیشه‌ای و نیتروپارافین مخلوط می‌گردد و نهایتاً نیز نیترومتان ژل شده و ترکیب آبی ژلی به همراه ترکیبات موجود در آن‌ها با یکدیگر مخلوط می‌گردند. در شکل ۵ نیز ابتدا عامل ژل کننده‌ی نیتروپارافین در آمید به مخلوط ذرات ریز شیشه‌ای و نیتروپارافین افزوده شده و مخلوط حالت ژلی به خود می‌گیرد و سپس مخلوط نیترات آمونیوم و آب افزوده می‌شود و در نهایت عامل ژل کننده برای آب اضافه می‌گردد. روش الف، به منظور تولید پیوسته مناسب نیست و برای سیستم‌های ناپیوسته به کار می‌رود.

۵-۲- ترکیبات انفجاری بر پایه‌ی ژل نیترومتان

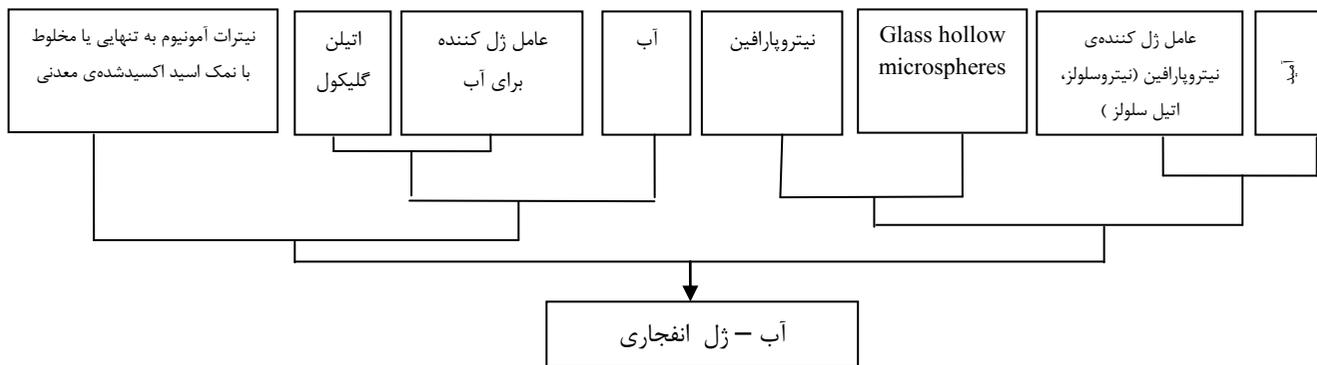
معمولاً به منظور تهیه ژل انفجاری نیترومتان، علاوه بر نیترومتان از سیال دیگری مانند آب و یا الکی مانند متانول استفاده می‌شود. بنابراین غالباً از دو عامل ژل کننده یکی برای نیترومتان و دیگری برای محیط سیال (آب و یا الکل) بهره می‌برند. همچنین به منظور پایداری بیشتر این ژل‌ها عموماً از عوامل اتصال دهنده‌ی عرضی^۱ نیز بهره می‌گیرند. در ادامه مختصراً به ترکیبات ژل انفجاری شامل نیترومتان اشاره می‌گردد.

۵-۲-۱- آب - ژل (ژل آبی) انفجاری نیترومتان

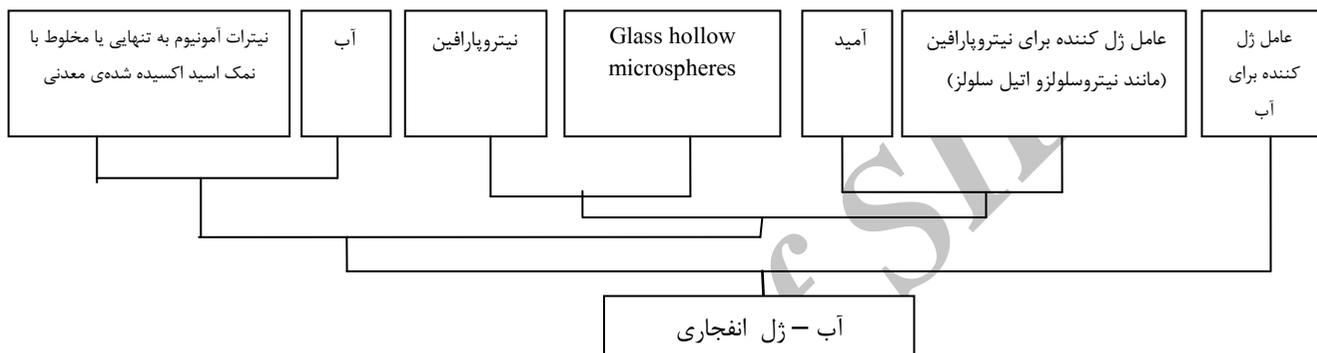
این نوع ژل انفجاری شامل: نیترات آمونیوم به تنهایی یا به صورت مخلوط با نمک اسید اکسید شده معدنی، نیتروپارافین‌های ۱ تا ۳ کربنه (مانند نیترومتان)، آب، عامل ژل کننده برای آب، عامل ژل کننده برای نیترو پارافین، یک آمید که دارای حساسیت آغازگری بالایی حتی در دمای پایین است و ذرات ریز شیشه‌ای می‌باشد [۲۷]. یک ژل آبی انفجاری، مخلوطی (دوغابی) شامل محلول آبکی اشباع از یک سوخت و یک اکسید کننده می‌باشد. خطرات و سمی بودن این مواد نسبت به دینامیت کمتر بوده و از لحاظ ساخت، انتقال و ذخیره-سازی ایمن تر هستند. همچنین در مقایسه با مواد منفجره‌ی مرسوم

2- Water gel

1- Cross linking



شکل ۴- روش تهیه ژل آبی انفجاری حاوی ژل نیترومتان - روش الف [۲۷].



شکل ۵- روش تهیه ژل آبی انفجاری حاوی ژل نیترومتان - روش ب [۲۷].

گوار^۱، یا متیل سلولز و همچنین در حدود ۱ تا ۱۵٪ وزنی عامل هوادهنده و حساس کننده مانند ذرات ریز شیشه‌ای می‌باشد [۳۲].

حلالیت نمک فلزی پرکلرات در الکل بالا است و تا حدی حساس کننده‌ی محلول است. با افزودن مقدار کمی از محلول غلیظ پراکسید هیدروژن به محلول الکل از یک نمک از اسید پرکلریک، می‌توان قدرت بالایی برای مایعات انفجاری فراهم کرد. محلول مایع انفجاری که شامل پراکسید هیدروژن باشد توان اکسیدکنندگی بالایی دارد و به پوست آسیب می‌زند. همچنین محلول غلیظ پراکسید هیدروژن ناپایدار است و امکان تجزیه شدن دارد و ممکن است باعث از بین رفتن خاصیت انفجاری شده و گاهی منجر به آتش سوزی شود. بنابراین به جای استفاده از این ماده می‌توان از نیتروپارافینی مثل نیترومتان استفاده کرد که پایدار است و تحت شرایط خاصی قابلیت انفجار دارد. به همین دلیل ترکیب انفجاری شامل نیترومتان پیشنهاد می‌گردد.

زیرا آب ژل شده و مخلوط آن با نمک اسیدی دارای ویسکوزیته بالایی است، بنابراین زمان زیادی لازم است تا یک مخلوط همگن حاصل شود (بیش از ۱ دقیقه).

اما در روش ب، عامل ژل کننده‌ی آب در خاتمه به محلول دارای ذرات معلق افزوده می‌شود. بنابراین عامل ژل کننده آب به صورت همگن، حتی در غیاب اتیلن گلیکول در محلول دارای ذرات معلق به سبب اصطکاک بین ذرات، پراکنده خواهد شد. لازم به ذکر است روش (ب) روش جدیدتری می‌باشد [۲۷].

۲-۲-۵ - ژل نیتروپارافین و پرکلرات فلزی شامل ترکیبات انفجاری

ساخت این ژل انفجاری، فرآیندی ایمن و آسان است. این ژل انفجاری شامل ۲ تا ۴۰٪ وزنی فرم‌آمید، ۲ تا ۴۰٪ وزنی الکل، ۳ تا ۷۰٪ وزنی نیتروپارافین، ۱۰ تا ۸۰٪ وزنی نمک فلزی از اسید پرکلریک، ۲ تا ۲۰٪ وزنی عامل غلیظ کننده‌ی آلی مانند پلی وینیل الکل، صمغ

1- Guar gum

۵-۲-۳ - سایر ترکیبات انفجاری شامل ژل نیترومتان

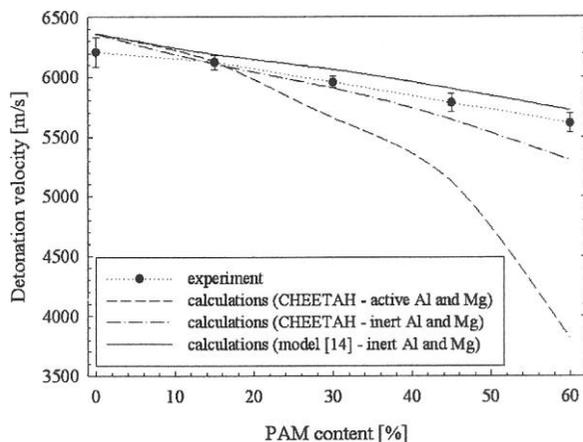
علاوه بر آن چه بیان شد روش‌های دیگری برای تهیه ترکیبات انفجاری بر پایه ژل نیترومتان وجود دارد. در یکی از این روش‌ها از پلیمرهایی مثل استرهای آلی سلولز، پلیمرهای متاکریلات^۱ و کopolymerهای وینیلیدن کلراید و اکریلونیتریل به عنوان عامل غلظت بخش برای نیترومتان بهره گرفته شده است. میزان عامل ژل کننده به کار رفته برای نیترومتان در حدود ۰/۵۰ تا ۰/۲ وزنی می‌باشد. این ژل انفجاری شامل نیترات‌های معدنی، آب، ژل نیتروپارافین (مانند نیترومتان)، عامل ژل کننده برای آب و مواد حساس کننده‌ی غیر انفجاری مانند رزین بالون‌ها می‌باشد. ژل انفجاری تهیه شده از این روش دارای قابلیت انفجار بالا و قابلیت انبار داری مناسب می‌باشد. مواد لازم برای تهیه این ژل از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه و در دسترس است. تهیه این ژل نیاز به صرف زمان بالایی برای مخلوط کردن ندارد [۲۵].

همچنین نوع دیگری ترکیب انفجاری به نام ژل انفجاری نیترومتان - نیترات معدنی وجود دارد که شامل: نیترومتان، نیترات معدنی و محیط سیالی شامل آب یا متانول به همراه عوامل ژل کننده می‌باشد. عامل ژل ساز به کار رفته برای محیط آبی می‌تواند صمغ گوار یا صمغ عربی باشد و اگر سیال مورد استفاده متانول باشد، متیل سلولز به عنوان عامل ژل کننده محیط سیال به کار می‌رود. ژل ساز به کار رفته برای نیترومتان سیانو اتیل اتر است [۳۳].

۵-۲-۴ - تاثیر افزودنی‌ها بر روی ژل انفجاری نیترومتان

تحقیقاتی روی پارامترهای انفجاری، ویژگی‌های موج انفجار و فشار شبه استاتیک^۲ بر روی ژل نیترومتان حاوی پودر آلیاژ فلزی آلومینیوم-منیزیم^۳ (در مقیاس ۶۳ میکرون) صورت گرفته است. نتایج محاسبات و آزمایش‌ها بر روی ژل نیترومتان با عامل ژل ساز پلی متیل متاکریلات نشان می‌دهد که با افزایش میزان آلیاژ فلزی، سرعت انفجار^۴ کاهش می‌یابد (شکل ۶). همچنین ظرفیت بالستیک^۵ ماده انفجاری شامل ۱۵٪ و ۳۰٪ از پودر آلیاژ فلزی، برابر، و حتی بیشتر از ژل نیترومتان منفرد می‌باشد [۳۴]. علاوه بر این آزمایش‌ها نشان می-

دهد ایمپالس ویژه ترکیب انفجاری ژل نیترومتان/آلیاژ فلزی، نسبت به ژل نیترومتان خالص بیشتر خواهد بود [۳۴].



شکل ۶- سرعت انفجار ژل نیترومتان / آلیاژ فلزی بر اساس درصد وزنی پودر آلیاژ به کار رفته [۳۴].

علاوه بر این، نوعی ژل انفجاری نیترومتان وجود دارد که شامل عامل ژل ساز پلی متیل متاکریلات و ذرات ریز شیشه‌ای به عنوان حساس کننده می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اندازه‌ی عوامل حساس کننده بر روی مشخصه‌های انفجاری مانند سرعت انفجار و قطر بحرانی^۶ اثر گذار است [۲۱].

۶- مقایسه‌ی سوخت نیترومتان با هیدرازین و مشتقات آن

سمی بودن: یکی از مهمترین دلایلی که نیترومتان در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. ماهیت نسبتاً غیرسمی آن است و حتی از این سوخت به عنوان سوختی سبز نام برده‌اند و آن را جایگزین مناسبی برای هیدرازین و مشتقات سمی آن دانسته‌اند [۱ و ۲]. ایمپالس ویژه: یکی دیگر از ویژگی‌های مثبت نیترومتان آن است که ایمپالس ویژه بالایی ارائه می‌دهد به طوری که نمونه‌ای از مقایسه‌ی نیترومتان با برخی از سوخت‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. (فشار بحرانی ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع):

6- Critical diameter

1- PMMA
2-Qasi- static pressure
3- Aluminium - Magnesium alloy (Al₃Mg₄)
4- Detonation velocity
5- Ballistic Capability

جدول ۲- مقایسه ایمپالس ویژه نیترومتان با برخی سوخت‌های موجود [۱].

نام سوخت	ایمپالس ویژه (ثانیه)
نیترومتان	۲۸۲/۱
هیدروکسیل آمونیوم نیترات	۲۶۹/۴
هیدرازین	۲۶۶/۴
هیدروژن پر اکسید	۱۸۸/۳

اکسیژن (ماده‌ی اکسیدکننده)، نسبت به هیدرازین و مشتقات آن نیازمند است. هیپرگول^۱ بودن (آتشگیری خود به خودی بین سوخت و اکسید کننده): هیدرازین و مشتقاتش که جزء پیشراشه‌های دوتایی می‌باشند، هیپرگول هستند [۳۵] اما نیترومتان که عموماً به عنوان تک‌پیشراشه مورد استفاده قرار گرفته است، هیپرگول نمی‌باشد.

۷- نتیجه گیری

ژل کردن مایعات پرنانژی، علاوه بر بالا بردن ایمنی سیستم منجر به بهبود برخی خواص ماده نسبت به حالت مایع می‌گردد. نیترومتان با توجه به ویژگی‌های مطلوب بیان شده، جایگزین مناسبی برای پیشراشه‌های سمی پر کاربرد مانند هیدرازین به شمار می‌رود. ژل کردن این ماده و افزودن مواد پرنانژی به آن منجر به بالا رفتن ایمپالس ویژه، افزایش دمای شعله، و افزایش سرعت سوختن می‌گردد. استفاده از نانو ذرات فلزی درجه‌ای نو برای رسیدن به انرژی‌های بالاتر بوده و این نانو ذرات پرنانژی خواص مطلوب‌تری نسبت به ذرات میکرونی ارائه می‌دهند. تحقیقات و آزمایش‌ها بر روی اثر افزودن ذرات فلزی آلومینیوم در اندازه‌های مختلف و همچنین هیدرید فلزی آلومینیوم نوید دهنده‌ی آینده‌ای روشن در بهره‌گیری از انواع مختلف پیشراشه‌های ژلی نیترومتان می‌باشد. همچنین به دلیل محتوای انرژی بالای موجود در نیترومتان، این ترکیب برای تهیه‌ی ژل‌های انفجاری بسیار مناسب می‌باشد. تهیه‌ی ژل‌ها و ترکیبات انفجاری حاوی نیترومتان ایمن، آسان، و به‌صرفه است. اغلب این ترکیبات با گذشت زمان به حالت پایداری می‌رسند، انواع ژل‌های نیترومتان عموماً با محیط زیست سازگارند.

با نیم نگاهی به جدول ۲ درمی‌یابیم که نیترومتان ایمپالس ویژه‌ی بالاتری نسبت به سه ترکیب دیگر ارائه می‌دهد.

حساسیت دمایی: دمای جوش نیترومتان در حدود ۱۰۳ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده و نسبت به هیدرازین دمای جوش کمتری دارد (۱۱۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) ولیکن دمای جوش آن از مشتقات هیدرازین مانند دی متیل هیدرازین نامتقارن (۶۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) و مونومتیل هیدرازین (۸۷ درجه‌ی سانتی‌گراد) بالاتر می‌باشد. دمای اشتعال خود به خودی آن نیز در حدود ۴۱۳ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. نقطه‌ی اشتعال (نیترومتان خالص) این ماده در حدود ۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد (در ظرف بسته) و ۴۴/۴۴ درجه‌ی سانتی‌گراد (در ظرف سر باز) است و این به این معنی است که در دمایی بالاتر از ۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد نباید در حضور شعله و منابع اشتعال قرار گیرد. فرآیند احتراق نیترومتان نیز با نوساناتی همراه است که افزایش ویسکوزیته‌ی نیترومتان منجر به بهبود فرآیند احتراق آن می‌گردد [۱]. بنابراین ساخت ژل نیترومتان فرآیند احتراق را بهبود می‌بخشد. همچنین از آنجایی که نیترومتان در ساختار ملکولی خود حاوی اکسیژن می‌باشد در طی فرآیند احتراق به میزان کمتری

مراجع

- [1]. Boyer, E.; Kuo, K. K. *Characteristics of Nitromethane for Propulsion Applications*; 44th AIAA Aerospace Sciences, 2006.
- [2]. Sabourin, J. L.; Yetter, R. A. *Effect of Nano-Aluminum and Fumed Silica Particles on Deflagration and Detonation of Nitromethane*. *Journal of Propellants, Explosive, Pyrotech*, 2009, 34, 385-393.
- [3]. Teiple, U.; Foerter, U. *Rheological behavior of nitromethane gelled with nanoparticles*; *Journal of Propulsion and power*, 2005, 21(1), 40-43.
- [4]. Teiple, U.; Foerter, U. *Mechanical properties of gel propellants with nanoparticle*; *Journal of Energetic Material*, 2004, 22, 69-82.
- [5]. Yetter, R. A.; Risha, G. A.; Son, S. F. *Metal particle combustion and nanotechnology*. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32, 1819-1834.

- [6]. Weiser, V.; Eisenreich, N.; Koleczko, A., Roth, E. پ On the Oxidation and Combustion of AlH₃ a Potential Fuel for Rocket Propellants and Gas Generators. پ Journal of Propellants, Explosives, Pyrotechnic 32, 2007, 32(3), 213-221.
- [7]. Evans, D. J.; Milne, A. M.; Softley, I. پ The burning rate of aluminium particles in cylinder tests. پ Shock compression of condensed matter, 2001.
- [8]. Natan, B.; Rahimi, S. پ The status of gel propellants in year 2000. پ Combustion of energetic material, 2001.
- [9]. Rahimi, R.; Peretz, A. پ On Shear Rheology of Gel Propellants. پ Journal of Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2007, 32, 165-174.
- [10]. Maisner, H. پ Propellant composition comprising nitroparaffin gel. پ US Patent 2,712,989, 1955.
- [11]. Maisner, H. پ Process for gelling liquid nitroparaffins. پ US Patent 2,690,964, 1954.
- [12]. Munjal, N. L.; Gupta, B. L. پ Preparative and mechanistic studies on unsymmetrical dimethyl hydrazine-red fuming nitric acid liquid propellant gels. پ Journal of Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 1985, 10, 111-117.
- [13]. Novak, L. J. پ Thickened or gelled normally liquid nitroparaffin propellants. پ US Patent 2,921,846, 1960.
- [14]. Ballard, C. E.; McMillan, T. D. پ Gelled nitroparaffin explosive composition containing air-entrappor plus inert weighting material. پ US Patent 3,762,970, 1973.
- [15]. Reed, H. H. پ Explosive Evaluation: Gelled nitromethane and slurry as military bulk explosive systems. پ Accession Number ADA026955, 1976.
- [16]. Muneno, Y.; Matsuzawa, T. پ Explosive composition for fireworks and method for manufacturing the same. پ US Patent 6,982,014 B1, 2006.
- [17]. Audrieth, L. F.; Axelrod, S. پ Gelled organic solvents. پ US Patent 3,334,053, 1967.
- [18]. Meyer H. Hecht.; Allenton. پ Adhesive and adherent coating composition for bituminous surfaces. پ US Patent 2,338,846, 1945.
- [19]. صابری مقدم علی، حاجیلری نسیبه، " پیشرانه های ژل " مجله ی تحقیق و توسعه ی مواد پرنرزی، سال چهارم، شماره ی ۱، ص ۳۱ - ۳۹، بهار و تابستان ۱۳۸۷.
- [20]. Varma, M.; Pein, R. پ Optimization of processing conditions for gel propellant production. پ International journal of energetic material and chemical propulsion, 2009, 8, 501-513.
- [21]. Presles, H. N.; Vidal, P.; Gois, J. C.; Khasainov, B. A.; Ermolaev, B. S. پ Influence of glass micro balloons size on the detonation of nitromethane based mixtures. پ Shock Waves, 1995, 4, 325-329.
- [22]. Jones, L. R.; Haute, T. پ Nitro-paraffins thickened with N-coco-hydroxybutyramide. پ US Patent 3,383,252, 1968.
- [23]. Jones, L. R.; Haute, T. پ Thickened nitroparaffin containing stabilizer. پ US Patent 3,318,741, 1967.
- [24]. Jordan, W. L. پ Thickened nitroparaffins. پ US Patent 3,666,577, 1973.
- [25]. Mully, J. J. پ Method for gelling nitroparaffins in explosive compositions. پ US Patent 4,097,316, 1978.
- [26]. Atkins, B. L.; Jackson, L.; Bashaw, R. N. پ Gelled nitroalkane compositions for blasting. پ US Patent 3,242,022, 1966.
- [27]. Hattaori, K.; Takahashi, M. پ Water-Gel explosive and method of producing the same. پ US Patent 4,175,990, 1979.
- [28]. Baker, M. A.; Anderson, C. J. پ Foamed nitroparaffin explosive composition. پ US patent 4,925,505, 1990.
- [29]. Thompson, D. M. پ Tungsten as a hypergolic fuel gel additive. پ US patent 5,747,665, 1998.
- [30]. Fawls, C. H.; Fields, J. P.; Dunn, T. J.; Elstrodt, D.; Hudson, M. L.; Wagaman, K. L.; Kuo, K. پ propellant composition comprising nano-sized boron particles. پ US Patent 6,652,682 B1, 2003.
- [31]. پ Water gel explosive. پ http://en.wikipedia.org/wiki/Water_gel_explosive, 2009.
- [32]. Katsuta, T.; Ikeda, Y. پ Liquid or gelled nitroparaffin and metal perchlorate containing explosive composition. پ US Patent 4,317,691, 1982.
- [33]. Edwardes, D. W. پ Gelled nitromethane composition. پ US Patent 3,765,966, 1973.
- [34]. Trzcinski, W. A.; Paszula, J.; Grys, S. پ Detonation and Blast Wave Characteristics of Nitromethane Mixed with Particles of an Aluminium Magnesium Alloy. پ Journal of Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 2010, 10(1), 1-8.
- [35]. پ Hypergolic propellant. پ http://en.wikipedia.org/wiki/Hypergolic_propellant, 2011.