

اکسیدکننده‌ی ژل IRFNA

علی صابری مقدم^{۱*}، مجید شیخی نارانی^۲، نگار ذکری^۳، مهدی عادل‌نسب^۴

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*E-mail: sab-mog@yahoo.com

(تاریخ وصول: ۹۰/۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۲۸)

چکیده

پیشرانده‌های ژل، پیشرانده‌های جدیدی هستند که دارای مزایای پیشرانده‌های متعارف موشکی جامد و مایع می‌باشند. اکسیدکننده‌ی اسید نیتریک دودکننده‌ی قرمز حفاظت شده^۵، به علت نقطه‌ی جوش خوب، نقطه‌ی انجماد مطلوب و چگالی بالا، اکسیدکننده‌ی مناسبی جهت ژل‌سازی می‌باشد. در این مقاله، ژل‌کننده‌های مختلفی که برای ساخت ژل IRFNA مورد استفاده قرار گرفته‌اند، معرفی شده، روش‌های ساخت این ژل مورد بررسی قرار گرفته و افزودنی‌هایی که جهت بهبود خواص به آن اضافه شده ارائه شده‌اند. در بین ژل‌کننده‌های مختلف، فیوم‌سیلیکا مناسب‌ترین عامل ژل‌کننده جهت ساخت ژل IRFNA می‌باشد. مکانیزم ژل‌شدن از طریق ایجاد پیوند هیدروژنی بین ژل‌کننده و IRFNA صورت می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: اکسیدکننده‌ی ژل، IRFNA، ژل IRFNA، فیوم سیلیکا، کربن بلک.

۱- مقدمه

انرژی بالاتر (با افزودن مواد پرنرزی) نسبت به هر دو سیستم پیشرانده‌ی متعارف مایع و جامد، ایمنی بیشتر در انبارداری، کاهش خطرات اشتعال، سمیت کمتر، کاهش نشتی و نیز خوردگی پیشرانده در مخازن نگه‌دارنده، رفع مشکلات تلاطم در مخازن به هنگام مانور موشک و قابلیت مدیریت تراست می‌باشد [۱۱]. با توجه به این مزایا، اولین موشک ژلی در سال ۱۹۹۹ توسط ایالات متحده‌ی آمریکا ساخته شد که در آن از سوخت ژل MMH^۶ و اکسیدکننده‌ی ژل IRFNA استفاده شده بود. شکل ۱، نمایی از موتور FMTI^۷ مورد استفاده در این موشک و شکل ۲، نمایی باز از این موشک را نشان می‌دهند [۱۲ و ۱]. این موشک در سال ۱۹۹۹ توسط شرکت TRW ساخته شد. همان گونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد دو آنالوس هم محور وظیفه‌ی انتقال سوخت و اکسیدکننده به یک انژکتور میله‌ای و از آنجا

پیشرانده‌های ژل، پیشرانده‌های جدید و پیشرفته‌ای هستند که با توجه به داشتن نقاط قوت پیشرانده‌های متعارف جامد و مایع و نداشتن نقاط ضعف آن‌ها در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. کثرت منابع انتشار یافته طی یک دهه‌ی گذشته به وضوح تأییدی بر این ادعا می‌باشد [۱۰-۱]. پیشرانده‌های ژل، با افزودن عامل ژل‌کننده به همراه افزودنی‌های بهبود دهنده به پیشرانده‌های مایع متعارف ساخته می‌شوند. از آنجا که پیشرانده‌های ژل در حالت سکون رفتاری شبیه به جامد و در حال حرکت و اتمی شدن، رفتاری مشابه مایع دارند، این پیشرانده‌ها دارای مزایای پیشرانده‌های مایع و نیز پیشرانده‌های جامد هستند. برخی از مزایای پیشرانده‌های ژل نسبت به پیشرانده‌های متعارف مایع و جامد عبارتند از چگالی بالاتر نسبت به پیشرانده‌ی مایع،

۱- دانشیار

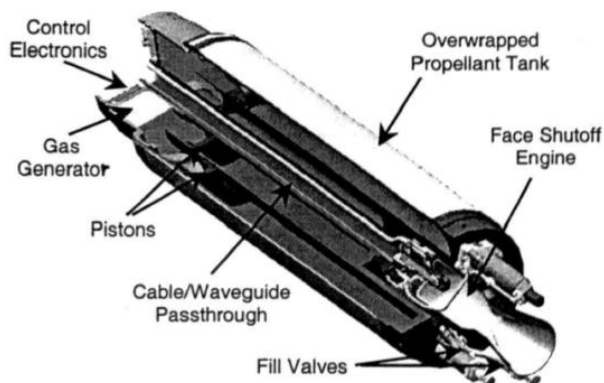
۲- مربی

۳ و ۴- کارشناس ارشد

5- IRFNA

6- Mono-Methyl Hydrazine

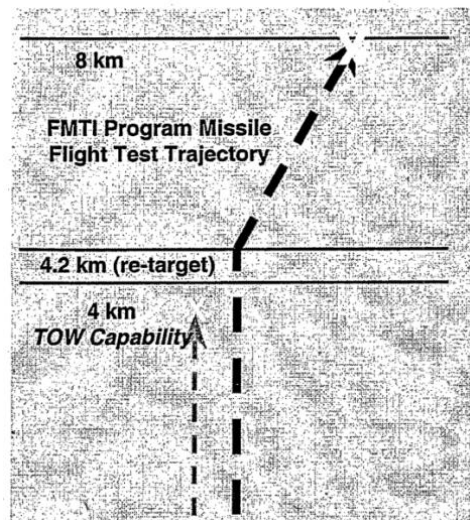
7- Future Missile Technology Integrated



شکل ۲- نمایی باز از موشک ژلی ساخته شده با موتور FMTI [۱].



شکل ۳- پرتاب موشک FMTI با استفاده از لانچر تاو [۱۳].



شکل ۴- مقایسه برد موشک جامد با موشک FMTI که هر دو توسط لانچر تاو پرتاب شده‌اند [۱۳].

به محفظه‌ی احتراق را بر عهده دارند. شکل ۳، نمایی از شلیک آن توسط لانچر موشک تاو و شکل ۴، نمای مسیری طی شده توسط موشک ژلی و مقایسه‌ی آن با مسیری که معمولاً موشک‌های تاو طی می‌شود را نشان می‌دهد [۱۳]. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود موشک ژلی پس از طی مسافت متعارف قابل پیمایش توسط یک موشک تاو، یعنی 4 km، قادر است مجدداً هدف‌گیری نموده و معادل همین مسافت را طی نماید که نشانه‌ای از افزایش قدرت و کارایی موشک ژلی نسبت به موشک‌های متعارف است. در سال ۲۰۰۹، محققین آلمانی با موفقیت راکت ژلی را پرتاب کردند. شکل ۵، نمایی از پرتاب راکت ژلی که توسط شرکت آلمانی بایرن-شیمی^۱ ساخته شد و مورد تست قرار گرفت را نشان می‌دهد [۱۴]. در رابطه با ساخت سیستم‌های موشکی هوازی، با بهره‌گیری از پیشرانده‌های ژلی نیز موفقیت‌های خوبی کسب گردیده است [۱۵]. این تحقیقات، بیان‌گر حرکت سریع مراکز تحقیقاتی موشکی برای ساخت سیستم‌های پیشرانژلی موشکی می‌باشد. گرچه جهت ساخت تک‌پیشرانده‌های ژل، تحقیقات خوبی، تاکنون، صورت گرفته است [۱۶]، با این وجود معمولاً موشک‌های با تراست بالا و تاکتیکی از سیستم‌های پیشرانده‌ی دوتایی (سوخت و اکسیدکننده) استفاده می‌کنند. در این مقاله، ساخت اکسیدکننده‌ی ژل IRFNA مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۱- نمای موتور FMTI [۱۲].

1- Bayern-Chemie

65°C و نقطه‌ی انجماد آن 65°C - و چگالی آن مقدار قابل ملاحظه $1/6\text{ g/cm}^3$ در دمای 20°C می‌باشد.

۲- ساخت ژل IRFNA

در سال ۱۹۶۹ تاریلی از افزودن $4/5$ درصد وزنی کربن بلک برای ژل‌سازی IRFNA استفاده نمود. افزودن ژل‌کننده‌ی همراه با هم زدن مایع انجام پذیرفت و کل مدت زمان افزایش ژل‌کننده، ۲ دقیقه بود. در این گزارش ادعا شد که برای اضافه نمودن کربن بلک به IRFNA باید ابتدا برخی مواد ترکنده، از جمله استون یا ماده‌ای فلئوئوردار که با نام اختصاری FC-95 معرفی شد، به کربن بلک اضافه شوند و سپس محلول یا سوسپانسیون حاصل با IRFNA ترکیب گردد. تاریلی اظهار نمود که ژل حاصل به لحاظ خصوصیات رئولوژیکی بسیار مطلوب می‌باشد و هیچ‌گونه فعل و انفعالی میان IRFNA و کربن بلک بروز نمی‌نماید. همچنین به دلیل وجود کربن بلک، ژل حاصله دارای ایمپالس ویژه و چگالی- ایمپالس ویژه‌ی بالاتری است. وی اظهار داشت که کربن بلک موجب ایجاد یک تنش تسلیم مناسب می‌شود که باعث عدم حرکت پیشران به هنگام ذخیره‌سازی می‌گردد. کاهش شدید ویسکوزیته‌ی ظاهری با افزایش شدت برش، از دیگر مزایایی بود که با افزودن کربن بلک نانو‌سایز به سیستم ژل حاصل گشت. تاریلی ادعا نمود که استفاده از دستگاه پخش‌کننده و یکنواخت‌ساز تشدیدکننده‌ی صوتی^۶ به همراه هم‌زن مکانیکی موجب اختلاط بهتر کربن بلک با اکسیدکننده می‌گردد. به ویژه زمانی که همراه با کربن بلک برخی مواد جامد دیگری نیز می‌بایست وارد اکسیدکننده‌ی مایع شوند و به طور یکنواخت پخش گردند [۲۶]. مونجال و همکارانش در سال ۱۹۸۵، ژل RFNA را با استفاده از $4/25$ درصد وزنی ژل‌کننده سدیم سیلیکات (۱۲ درصد Na_2O و ۳۰ درصد فیوم سیلیکا) تهیه کردند. این عمل در دمای $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ انجام پذیرفت. برای ژل‌سازی IRFNA، حاوی $0/7$ درصد HF، نیز از این ژل‌کننده استفاده شد و مشاهده گردید که هر چند در ابتدا ژل تشکیل می‌شود اما بعد از مدتی این ژل از بین می‌رود که ممکن است به دلیل واکنش شیمیایی بین HF و شبکه‌ی هیدروسیلیک اسید باشد. در این مقاله تاکید شده است که اندازه ذرات ژل‌کننده‌ی سدیم سیلیکات، قطر ظرف ژل‌سازی و دمای راکتور ژل‌سازی بر زمان ژل‌سازی موثرند. مونجال و همکارانش جهت توضیح علت تأثیر قطر ظرف بر زمان ساخت ژل اظهار داشتند که کاهش قطر ظرف موجب کاهش فاصله شبکه‌های مایسلی ایجاد شده می‌گردد و وقوع برخورد بین آن‌ها را تسهیل می‌نماید به نحوی که در نهایت تعداد مولکول‌های جا مانده از شرکت در واکنش‌های



شکل ۵- پرتاب راکت ژلی توسط محققین آلمانی [۱۴].

۱-۱- مهم‌ترین اکسیدکننده‌های موشکی

از مهم‌ترین اکسیدکننده‌های مورد استفاده در سیستم‌های پیشران موشکی می‌توان به اکسیژن مایع، پراکسید هیدروژن، تتراکسید نیتروژن، اسید نیتریک و IRFNA اشاره نمود. اکسیژن مایع در فشار معمولی با سوخت‌های آلی به صورت هایپرگول نمی‌سوزد و نقطه‌ی جوش آن در فشار یک اتمسفر، 90 کلین می‌باشد و در نتیجه ذخیره سازی طولانی مدت آن به سادگی امکان پذیر نمی‌باشد [۱۹-۱۷]. پراکسید هیدروژن^۱ در طولانی مدت فاقد پایداری مطلوب است و همچنین در دمای 1°C منجمد می‌شود [۲۲-۲۰]. تتراکسید نیتروژن^۲، هرچند دارای مزایایی از جمله قابلیت نگهداری طولانی مدت و دانسیته بالا می‌باشد، اما تنها در محدوده‌ی دمایی 11 - تا 21 درجه سانتی‌گراد به صورت مایع باقی می‌ماند و در خارج از این محدوده تغییر فاز می‌دهد و بنابراین دامنه‌ی استفاده از آن بسیار محدود می‌باشد [۲۳ و ۲۱]. ترکیبات اسید نیتریک^۳ مانند WFNA (یا IFWNA) دارای فشارهای تجزیه تعادلی بالایی هستند (75 بار در 700°C) و بنابراین برای کاهش فشار به آن‌ها 13 درصد تتراکسید نیتروژن اضافه می‌شود تا فشارهای تعادلی به 2 بار در 700°C کاهش یابد و به این ترتیب RFNA یا IRFNA حاصل می‌شوند [۲۵ و ۲۴]. برای ساخت اکسیدکننده‌ی ژل، خصوصاً سیستم‌های موشکی تاکتیکی، باید اکسیدکننده‌ی مایعی برای ژل‌سازی استفاده شود که قابلیت انبارداری خوب در دراز مدت داشته باشد، محدوده‌ی دمایی‌ای که در آن به حالت مایع باقی می‌ماند و تغییر فاز نمی‌دهد تا حد امکان زیاد باشد و نیز چگالی بالایی داشته باشد. در میان بهترین اکسیدکننده‌های مایع موشکی که در بالا ذکر گردید، IRFNA چنین ویژگی‌هایی دارد. قابلیت انبارداری آن بسیار خوب، نقطه‌ی جوش آن

۶- به دلیل وجود تنش تسلیم در ژل ساخته شده با کربن بلک، این ژل می‌تواند در مقابل تنش‌های برشی حاصل از تکان خوردن مخزن مقاومت کند و در طول مدت نگهداری همانند یک جامد رفتار نماید.

7-Resonant Acoustic

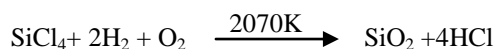
1- H_2O_2
2- N_2O_4
3- HNO_3
4- White Fuming Nitric Acid
5- Inhibited White Fuming Nitric Acid

از بین برده و یا کاهش دهند و در عین حال باعث بهبود ایمنی، تسهیل پمپاژ در جاذبه صفر و افزایش ایمپالس ویژه و چگالی-ایمپالس ویژه گردند. آن‌ها ادعا نمودند که نقش لیتیوم نیترات در ژل IRFNA، تطبیق خصوصیات رئولوژیکی ژل حاصله با خصوصیات رئولوژیکی سوخت ژل همراه و نیز کاهش مقدار ژل‌کننده‌ی مورد نیاز برای ژل‌سازی می‌گردد. آن‌ها نشان دادند که افزودن لیتیوم نیترات از ۱۰ تا ۴۰ درصد وزنی موجب تغییر چندانی در ایمپالس ویژه‌ی ژل IRFNA نمی‌گردد؛ اما مقدار چگالی-ایمپالس ویژه را اندکی افزایش می‌دهد [۲۹]. تامپسون در سال ۲۰۰۰ از ژل IRFNA حاوی ۹۵/۵ درصد وزنی IRFNA و ۴/۵ درصد سیلیکا ژل برای سیستم پیش‌رانش ژل استفاده نمود و ملاحظه کرد که هر چند مقدار ایمپالس ویژه‌ی حاصل از احتراق این ژل در مقایسه با مایع IRFNA کمتر اما مقدار چگالی-ایمپالس ویژه آن بالاتر می‌باشد [۳۰]. وی در همین سال، طی تحقیق دیگری با همکاری خود به بررسی روش تهیه ژل اکسیدکننده IRFNA با دانسیته بالاتر پرداختند. او گزارش نمود که استفاده از ژل اکسیدکننده IRFNA با دانسیته بالا (۲۸ درصد تترا اکسید نیتروژن) باعث بهبود ایمپالس ویژه به میزان ۰/۵ تا ۱ درصد در مقایسه با فرمولاسیون پایه حاوی ۱۴ درصد تتراکسید نیتروژن می‌شود و همچنین چگالی-ایمپالس ویژه را به میزان ۳ تا ۶ درصد بیشتر می‌نماید [۳۱]. رحیمی و همکارانش در سال ۲۰۰۱، ترکیب ۳الی ۴/۵ درصد وزنی ژل‌کننده‌ی فیوم سیلیکا و ۲۸ درصد وزنی افزودنی لیتیوم نیترات را با اکسیدکننده‌ی IRFNA (حاوی ۰/۵ الی ۳ درصد وزنی پنتا اکسید فسفر یا اسید هیدروفلوریک^۱ به عنوان حفاظت‌کننده) جهت ژل‌سازی IRFNA معرفی نمودند [۱]. آن‌ها ابتدا IRFNA را با لیتیوم نیترات مخلوط نموده و سپس سوسپانسیون حاصله را به ژل‌کننده اضافه نمودند و اظهار داشتند که اکسیدکننده‌ی ژل IRFNA تولید شده از لحاظ خصوصیات رئولوژیکی دارای هماهنگی خیلی بالایی با سوخت ژل مونومتیل هیدرازین می‌باشد. از جمله اهداف ذکر شده توسط رحیمی و همکارانش در ساخت ژل IRFNA، دستیابی به چگالی-ایمپالس بالاتر بود. در تحقیق دیگری، رحیمی و همکارانش با ریختن IRFNA در داخل راکتور و افزودن ۴/۵ درصد وزنی عامل ژل‌کننده‌ی فیوم سیلیکا با استفاده از همزن مکانیکی اقدام به تهیه‌ی ژل IRFNA نمودند. در این مطالعه، عمل هم زدن به مدت چندین ساعت ادامه یافت تا از همگن شدن مخلوط اطمینان حاصل شود. یکی از کارهایی که در این تحقیق توسط رحیمی و همکارانش انجام گرفت ساخت سیمولنت ژل بود [۳۲]. در سال ۲۰۰۴ رحیمی و همکارانش

فیزیکی به شدت کاهش یافته و در نتیجه یک شبکه‌ای ژلی مستحکم‌تر و با ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی بهتر تولید می‌گردد [۲۷]. هالیت و همکارانش در سال ۱۹۹۵ برای تهیه‌ی ژل IRFNA ابتدا ژل‌کننده‌ی فیوم سیلیکای دارای اندازه‌ی ذره‌ی کوچک‌تر از ۱۲۰ nm را درون یک ظرف استوانه‌ای (راکتور) ریخته و سپس اکسیدکننده‌ی IRFNA را در یک استوانه‌ی مدرج به میزان مورد نظر اندازه‌گیری کرده و به ظرف حاوی این ژل‌کننده اضافه نمودند. مواد درون راکتور توسط یک همزن دارای پروانه‌ی دو پرهای دریایی^۲ با حداقل دور ۵۰ rpm و حداکثر دور ۳۰۰ rpm مخلوط شدند تا ذرات ژل‌کننده درون IRFNA کاملاً پخش شوند. رنگ ژل، شبیه یک مارمالاد^۳ نارنجی رنگ شد. سپس مخلوط وارد یک ظرف آلومینیومی ۱۱۰۰ و ۲۰۱۴ شد. هدف از این کار، بررسی میزان مقاومت مخازن آلومینیومی ۱۱۰۰ و ۲۰۱۴ در مقابل خوردگی توسط ژل IRFNA بود. ملاحظه شد که اختلاف قابل تشخیصی بین مقاومت این دو نوع مخزن وجود ندارد. آن‌ها ادعا کردند که برای داشتن ژلی با قدرت خوردگی کمتر باید پس از ساختن ژل، مقداری پنتاکسید فسفر^۴ را در در همان ظرف راکتور به آن اضافه نمود و به مدت ۱۵ دقیقه تحت هم زدن قرار داد و به مدت یک شب تا صبح نگاه داشت و دوباره تحت هم زدن قرار داد. در این مقاله اشاره شده که بعضی گازها ممکن است به صورت حباب‌هایی درون ژل دیده شود. این حباب‌ها شامل گازهای اتمسفری و یا حاصل تجزیه‌ی تتراکسید نیتروژن به دی‌اکسید نیتروژن^۵ هستند. ژل‌های شامل پنتاکسید فسفر، دارای حباب کمتری کمتری بودند. آن‌ها اظهار داشتند که پس از تهیه‌ی ژل باید آن را تحت عمل سانتریفیوژ قرار داد تا تمامی حباب‌ها از آن خارج شوند و فضاهای خالی ناپدید گردند. این عمل به مدت ۱۰ دقیقه و با دور rpm ۱۱۰۰ (۲۰۰'g) انجام شد. پس از عمل سانتریفیوژ، مقداری مایع در سطح ژل جمع شد که در حین ذخیره‌سازی به مرور زمان جذب گردید. هالیت و همکارانش اظهار داشتند که پنتاکسید فسفر استفاده شده در ژل با جداری داخلی مخزن نگهداری لایه‌ای ایجاد می‌نماید که موجب محافظت از خوردگی بیشتر توسط اکسیدکننده‌ی IRFNA می‌گردد [۲۸]. آلن و همکارانش در سال ۲۰۰۰ از ۴ تا ۵ درصد وزنی فیوم سیلیکا با اندازه ذره ۰/۱۵ میکرون و ۱۰ تا ۴۰ درصد وزنی لیتیوم نیترات با اندازه ذره ۳ تا ۳۰ میکرون در دماهای بین ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای تهیه ژل IRFNA استفاده کردند. آن‌ها بدین ترتیب توانستند اختلاف ویسکوزیته‌ی سوخت مونومتیل هیدرازین^۶ ژل شده حاوی ذرات آلومینیوم و اکسیدکننده‌ی IRFNA ژل شده را

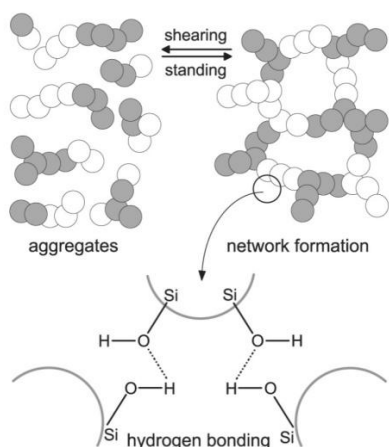
7-HF

1-Cab-O-Sil
2-Marine Impellers
3-Marmalade
4- P₄O₁₀
5- NO₂
6-MMH



مجاورت ذرات فیومسیلیکا با مولکول‌های IRFNA موجب ایجاد ژل IRFNA می‌گردد. زیرا سطح سیلیکا دارای ویژگی‌های آب دوستی می‌باشد و قادر است پیوندهای هیدروژنی^۴ میان مولکول‌های سیلیکا و اکسیدکننده IRFNA برقرار نماید. گروه‌های آب‌دوست هیدروکسی، به واسطه‌ی پیوند هیدروژنی با گروه‌های سیلوکسانی (که در طول ژل نمودن، با سطح مولکول‌های فیومسیلیکا در تماس می‌باشند) واسطه‌ی میان مولکول‌های اکسیدکننده IRFNA و سیلیکا هستند. در نتیجه‌ی ایجاد پیوند هیدروژنی میان مولکول‌های سیلیکا با اکسیدکننده IRFNA، ویسکوزیته و تیکسوتروپی سیال IRFNA افزایش می‌یابد. با به کارگیری نیروی برشی در ژل، این پیوندهای هیدروژنی شکسته شده و ویسکوزیته‌ی ژل کاهش می‌یابد. میزان کاهش ویسکوزیته‌ی ژل به مقدار نیروی برشی وارده و نیز مقدار ژل‌کننده‌ی افزوده شده به سیال اکسیدکننده IRFNA بستگی دارد. پس از حذف تنش برشی از سیستم دوباره پیوندهای هیدروژنی در کل سیستم ژل گسترش یافته و ویسکوزیته‌ی ژل تا مقدار اولیه‌ی آن افزایش می‌یابد [۳۵ و ۳۶]. در شکل ۶ می‌توان روند تشکیل شبکه‌ی ژل را در اکسیدکننده IRFNA مشاهده نمود.

کیفیت شبکه‌ی ایجاد شده میان مولکول‌های سیلیکا با اکسیدکننده IRFNA تابع پارامترهای اصلی همچون طبیعت مایع اکسیدکننده IRFNA، غلظت ژل‌کننده‌ی فیومسیلیکا، میزان پخش ژل‌کننده در محیط اکسیدکننده (روند هم زدن در هنگام ژل‌سازی)، دمای سیستم ژل و ماده‌ی افزودنی مورد استفاده می‌باشد.



شکل ۶- مولکول‌های فیومسیلیکا، پیوندهای هیدروژنی و تشکیل شبکه‌ی ژل IRFNA [۳۵].

برای تهیه‌ی ژل IRFNA از ۳ تا ۵ درصد ژل‌کننده‌ی فیوم سیلیکا استفاده کردند. در این تحقیق، برای تهیه‌ی ژل IRFNA از همزنی با پروانه‌ی دارای چهار پره‌ی دریایی استفاده کردند و برای ایزوله نمودن مواد از محیط، گاز نیتروژن مورد استفاده قرار گرفت. ژل IRFNA با توزین پودر فیوم سیلیکا ۱۲ nm در ظرف و افزودن مایع IRFNA در حین هم زدن در طول مدت ۱/۵ ساعت تهیه شد [۳۳]. در سال ۲۰۰۷ رحیمی و همکارانش از ۳ تا ۵ درصد فیوم سیلیکا برای ژل‌سازی IRFNA استفاده کردند. یکی از اهداف مهم ساخت این ژل، درک خصوصیات رئولوژیکی ژل IRFNA با استفاده از رئومتر چرخشی^۱ بود. آن‌ها برای بهبود روند تولید ژل IRFNA و سوخت ژل همراه، سیمولنت ژل را با استفاده از ماده‌ی پلی‌ساکارید^۲ تهیه نمودند. مدل رئولوژیکی به دست آمده از نتایج حاصل از رئومتري ژل IRFNA، هرشل- بالکلی معرفی شد. سیمولنت ساخته شده با پلی‌ساکارید، سیالی شبه پلاستیک بود که دارای رفتار نازک شونده‌ی برشی با تنش تسلیم بسیار پایین بود. در صورتی که ژل IRFNA تولیدی رفتار تیکسوتروپیک با تنش تسلیم بالا را از خود نشان داد [۳۴]. بر اساس تحقیقات انجام گرفته می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی از دو نوع ژل‌کننده‌ی فیوم سیلیکا و کربن بلک برای ژل‌سازی IRFNA می‌توان استفاده کرد؛ هرچند که در اکثر کارهای انجام شده به دلیل تسهیل فرایند اختلاط از ژل‌کننده‌ی فیومسیلیکا استفاده شده است.

۳- مکانیسم ژل شدن IRFNA با نانو ذرات سیلیکا

بر اساس تحقیقات انجام گرفته می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی از دو نوع ژل‌کننده‌ی فیوم سیلیکا و کربن بلک برای ژل‌سازی IRFNA می‌توان استفاده کرد؛ هرچند که در اکثر کارهای انجام شده به دلیل تسهیل فرایند اختلاط از ژل‌کننده‌ی فیومسیلیکا استفاده شده است. هر چند ژل‌کننده‌های متعددی برای تولید اکسیدکننده‌ی ژل IRFNA وجود دارند ولی فیومسیلیکا به دلیل بهبود خصوصیات رئولوژیکی، از جمله ویسکوزیته و نیز خاصیت نازک‌شوندگی برشی و تیکسوتروپی ژل که منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی و نیز نوع پیوندهای تشکیل شده می‌گردد نسبت به سایرین دارای برتری است. فیومسیلیکا از واکنش تتراکلرید سیلیسیم^۳ با هیدروژن و اکسیژن به صورت یک جامد کلوخه‌ای توخالی پرحجم با اندازه‌ی ذرات حدود ۴۰ μm همراه با مقدار کمی هیدروژن کلراید بدست می‌آید. این واکنش به صورت زیر است [۳۵]:

4 -Hydrogen Bonding

1-Rotational Rheometer

2-Polysaccharide

3- SiCl₄

این جهت، لیتیوم نیترات به تنهایی در بسیاری از اسیدها می‌تواند به عنوان یک شبه ژل‌کننده عمل نماید [۴۶].

ژل IRFNA حاوی لیتیوم نیترات نسبت به نوع عاری از ذرات افزودنی لیتیوم نیترات به لحاظ خصوصیات رئولوژیکی بهتر می‌باشد. اندازه‌ی ذرات لیتیوم نیترات در تحقیقات انتشار یافته میکرونی بوده است. یک دلیل مهم در عدم به کارگیری ذرات نانو سایز لیتیوم نیترات در ژل نمودن IRFNA در تحقیقات قبلی، مشکلات مربوط به تولید ژل همگن IRFNA می‌باشد [۲۹]. نانوذرات لیتیوم نیترات به شدت رطوبت را جذب نموده و خودشان نیز در رطوبت هوا حل می‌شوند. مولکول‌های آبی که از این طریق وارد سیستم ژل‌سازی می‌گردند، هم به ساختار فیزیکی ژل آسیب وارد می‌نمایند و هم ایمپالس و چگالی-ایمپالس ویژه‌ی اکسیدکننده‌ی IRFNA را کاهش می‌دهند [۴۶]. از آنجا که استفاده از لیتیوم نیترات نانو سایز به دلیل مزایایی چون فعالیت بیشتر نانو ذرات و نیز جذب بیشتر مایع اکسیدکننده دارای ارجحیت می‌باشد لذا یافتن روش‌هایی برای اختلاط همگن ذرات نانو لیتیوم نیترات با اکسیدکننده و نیز ممانعت از جذب رطوبت توسط ذرات نانو لیتیوم نیترات از اهمیت غیر قابل اجتنابی برخوردار می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

یک پیشرانه ژل برای استفاده در سیستم پیشرانش موشکی باید دارای خواص رئولوژیکی مورد نیاز یعنی تنش تسلیم، نازک شونده‌ی برشی و تیکسوتروپی باشد. بر این اساس، بهره‌گیری از یک سیستم پیشرانش ژل صرفاً در صورتی امکان پذیر می‌شود که بتوان با یافتن یک ژل کننده و روش ساخت مناسب، به پیشرانه ژلی با خواص مذکور دست یافت. لازم به تاکید است که هر چند ژل نمودن پیشرانه با استفاده از عوامل ژل کننده و روش‌های ساخت متعدد امکان پذیر است ولی هیچ تضمینی وجود ندارد که ژل ساخته شده قادر به تأمین خواص مورد انتظار باشد و حتی ممکن است ویژگی‌هایی مغایر با خواص مورد انتظار حاصل شوند. بررسی گزارشات مختلف مشخص کرد که ژل‌کننده‌های مناسب برای ژل‌سازی IRFNA وجود دارند و ژل‌های ساخته شده دارای ویژگی‌های رئولوژیکی مورد نیاز برای استفاده در سیستم پیشرانش موشکی می‌باشند. بدین ترتیب، توسعه یک سیستم پیشرانش موشکی بر مبنای ژل IRFNA کاملاً امکان پذیر است. بر اساس اطلاعات موجود، موشک‌هایی با استفاده از اکسیدکننده‌ی ژل IRFNA، با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در بین ژل‌کننده‌های مختلف مورد استفاده برای ژل‌سازی IRFNA به نظر می‌رسد که ژل‌کننده‌ی فیوم‌سیلیکا نتایج موفق‌تری را نسبت به سایرین داشته است. یکی از نکات مهم در تهیه‌ی ژل IRFNA، کیفیت اختلاط

کیفیت شبکه‌ی ایجاد شده میان مولکول‌های سیلیکا با اکسیدکننده‌ی IRFNA تابع پارامترهای اصلی همچون طبیعت مایع اکسیدکننده‌ی IRFNA، غلظت ژل‌کننده‌ی فیوم‌سیلیکا، میزان پخش ژل‌کننده در محیط اکسیدکننده (روند هم زدن در هنگام ژل‌سازی)، دمای سیستم ژل و ماده‌ی افزودنی مورد استفاده می‌باشد.

فیوم‌سیلیکا هرچند برای ژل نمودن هیدروکربن‌ها یک ژل‌کننده‌ی مطلوب به شمار می‌آید [۳۵-۴۷] اما برای ژل نمودن اکسیدکننده‌های معدنی از جمله اسیدهای نیتروژن‌دار که دارای پیوندهای هیدروژنی می‌باشند یک ژل‌کننده‌ی ایده‌آل به شمار نمی‌آید زیرا نوع پیوندهای تشکیل شده چندان منسجم و مطلوب نمی‌باشند. اما با این وجود تا حال حاضر فیوم سیلیکا در مقایسه با سایر ژل‌کننده‌های مورد استفاده برای ژل نمودن اکسیدکننده‌های معدنی-مانند کربن بلک یا سیلیکات سدیم- به دلیل سادگی فرایند مناسب‌تر عمل نموده است. فیوم سیلیکا به دلیل ساختار معدنی خود از سازگاری بیشتری با اکسیدکننده معدنی IRFNA برخوردار است و لذا ژل IRFNA ساخته شده با این ژل‌کننده از پایداری بیشتری به هنگام انبار داری بلند مدت برخوردار می‌باشد [۳۵].

۴- اثر افزودنی لیتیوم نیترات بر کیفیت ژل IRFNA

یکی از نکات مهم در بهره‌گیری از پیشرانه‌های ژل، هماهنگی خواص رئولوژیکی سوخت ژل و اکسیدکننده‌ی ژل می‌باشد. جهت تحقق این منظور عموماً از یک ماده افزودنی استفاده به عمل می‌آید از جمله دلایل دیگر برای استفاده از ماده‌ی افزودنی می‌توان به افزایش ایمپالس ویژه، افزایش حاصل ضرب چگالی-ایمپالس ویژه، افزایش ویسکوزیته و یا پایداری‌سازی ژل اشاره نمود. ماده‌ی افزودنی باید به گونه‌ای انتخاب شود که سازگار با IRFNA باشد و واکنشی با آن صورت ندهد. بر اساس مقالات و گزارشات ثبت اختراع موجود، تنها ماده‌ی افزودنی مورد استفاده در ساخت ژل IRFNA، لیتیوم نیترات می‌باشد [۲۹]. سانگیتا و همکارانش در سال ۲۰۰۵ ادعا کردند که ذرات افزودنی همچون لیتیوم نیترات، سرعت واکنش‌های فیزیکی درون ژل‌ها را افزایش و در نتیجه زمان ژل نمودن را کاهش می‌دهند. در سیستم‌های اسیدی این ماده‌ی افزودنی به خوبی عمل می‌نماید. سانگیتا و همکارانش اظهار داشتند که در سیستم‌های ژلی با ژل‌کننده‌ی سیلیکونی یا سیلیکاتی به واسطه‌ی پیوندهای عرضی ایجاد شده توسط ماده‌ی افزودنی، برخی پیوندهای فیبری^۱ جایگزین برخی پیوندهای کریستالی^۲ حاصل از واکنش فیزیکی ژل‌کننده سیلیکونی یا سیلیکاتی با اسید می‌گردند. این پیوندهای فیبری به صورت یک پوشش شبکه‌ای عمل نموده و باعث ویسکوزتر شدن ژل می‌گردند. از

1-Fibrous Bonding
2-Crystalline Bonding

هندسی و ابعاد راکتور از جمله پارامترهای مهمی هستند که باید جهت ساخت یک ژل مناسب مورد توجه قرار گیرند. افزودنی لیتیوم نیترات باعث بهبود کیفیت ژل و افزایش ویسکوزیته‌ی آن می‌گردد. از افزودن لیتیوم نیترات به منظور سازگار نمودن خواص رئولوژیکی اکسید کننده ژل IRFNA با سوخت ژل UDMH، که شرطی ضروری برای عملکرد موفق یک موتور ژلی است، استفاده می‌شود. کاربرد نانو ذرات لیتیوم نیترات نسبت به ذرات میکرونی آن، به علت فعالیت شدید نانو ذرات و میل بیشتر آن‌ها به جذب مایع، ارجحیت دارد.

ژل‌کننده با اکسیدکننده‌ی مایع است، به گونه‌ای که بتوان ذرات ژل‌کننده را به نحو مطلوبی در مایع توزیع کرد و ژلی همگن و پایدار به دست آورد. بدین منظور بهره‌گیری از یک روش ساخت مناسب و موثر کاملاً ضروری است. بر اساس اطلاعات انتشار یافته می‌توان تا حد قابل ملاحظه‌ای به ویژگی‌های یک روش ساخت مناسب پی برد. در این رابطه مقدار هر یک از اجزاء، ترتیب و نحوه افزودن مواد به یکدیگر، سیستم اختلاط، مدت زمان‌های به کار گرفته شده برای هر یک از مراحل ساخت، دمای ساخت ژل، افزودنی‌های مورد استفاده و شکل

مراجع

- [1] Natan B.; Rahimi S. "The Status of Gel Propellants in Year 2000."; In Kuo, K.K. and Deluca, L.(Ed), Combustion of Energetic Materials, Begell House, Boca Raton, 2001, 172-194.
- [2] صابری مقدم، ع؛ افشاری، ع؛ شهسوار، ح؛ خاج محمدی، ع؛ پیشرانهای جدید جلد اول: پیشرانهای مایع و ژل و روند توسعه‌ی آن‌ها، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بهار ۱۳۸۳.
- [3] حاجیلری، ن؛ "بررسی اثر اندازه و مقدار پودر آلومینیوم بر رفتار رئولوژیکی پیشران‌های ژل UDMH"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بهار ۱۳۸۶.
- [4] Varghese, T. L.; Prabhakaran, N.; Thank, K. P.; Subramanian, S.; Rao, S. S.; Ninan, K. N.; Krishnamurthy, V. N. "Performance Evaluation and Experimental Studies on Metallized Gel Propellants."; Defence Science Journal, January 1999, 49, 1, 71-78.
- [5] Eltron Research & Development Inc. "High Impulse Nanoparticulate- Based Gel Propellant."; Http://Eltron Research & Development Inc, 2007.
- [6] Glenn R. "Nano Gellant Material."; NASA, FBO Daily Issue of January, 09, 3, 2002.
- [7] Starkovich J. "Nanoparticulate Gellants for Metalized Gelled liquid Hydrogen with Aluminum."; NASA, TM-100951, 2000.
- [8] Coguil S. L. "Synthesis of Highly Loaded Gelled Propellants."; Resodyn Corporation, 1901 South Franklin, Butte MT (406) 723-2222, 2004, 2089-2098.
- [9] Ulrich T.; Forther-Barth U. "Rheological Behavior of Nitromethane Gelled with Nanoparticles."; Journal of Propulsion and Power, 2005, 21, 1, 40-43.
- [10] Xiang-Cui L.; Wei Z.; and Hui Z. "Study on Dispersion of Nano-Aluminum Powder in Kerosene."; Journal of Propulsion Technology, April 2007, 26, 2, 184-187.
- [11] صابری مقدم، علی؛ حاجیلری، نسبیبه؛ محمدی، مرتضی "ساخت و بررسی رفتار رئولوژیکی پیشران‌های ژل دی متیل هیدرازین نامتقارن"، مجله علمی - پژوهشی مواد پرنرزی، بهار و تابستان ۱۳۸۷، سال سوم، پیاپی ۵، شماره ۱، صفحه ۱۳.
- [12] Dressler G.A.; Bauer J.M. "TRW Pintle Engine Heritage and Performance Characteristics."; 2000, AIAA 3871.
- [13] Hodge K.; Crofoot T.; and Nelson S. "Gelled Propellant for Tactical Missile Applications."; 1999, AIAA 2976.
- [14] Bayern Chemie Inc. "Gel Rocket, Gel propellant."; www.OnlineDefenseMagazine.com/Defense Update: Bayern-Chemie Offers Gel-Based Rocket Propellant, Last modified 23 October 2010.
- [15] Kuznetsov I. A.; Solomon Y.; and Natan B. "Development of a Lab-Scale Gel Fuel Ramjet Combustor."; 2010, AIAA 7124.
- [16] Marlowe B.; Tannenbaum S. "Thixotropic Monopropellant Containing Inorganic Phosphides or Phosphide Alloys."; U S Patent, 3,944,448, 1976.
- [17] William L. J. "Inorganic Synthesis."; University of California, Berkeley, California, 1978, 5, 87-90.
- [18] Wickman, S.; James, E. "Gelled Liquid Oxygen/Metal Powder Monopropellants."; AIAA, July 1992, 92-105.
- [19] Douglas C. M. "Chemical and process technology encyclopedia."; New York: McGraw-Hill, 1974, 719-720.
- [20] Huzel S.; Huang Z. "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines."; pub. AIAA, 1992.
- [21] Tannenbaum S. "Heterogeneous Monopropellant Compositions and Thrust Producing Method."; US Patent 3,921,394, patented Nov. 25, 1975.
- [22] Sutton G. "History of Liquid Propellant Rocket Engines."; pub. AIAA, 2005.
- [23] Addison C. C. "Dinitrogen Tetroxide, Nitric Acid, and Their Mixtures as Media for Inorganic Reactions."; Chemical Reviews, 80, 21-39, 1980.
- [24] Bayern Chemie Inc. "Acid Nitric and its details."; http://en.wikipedia.org/Acid Nitric and its details, 2010.
- [25] Urbanski T. "Chemistry and technology of explosives."; Oxford: Pergamon Press, 1965, 85-86.
- [26] Tarpley, W. B.; "Thixotropic Oxidizer Propellant Mixtures."; U S Patent, 449,178, 1969.
- [27] Munjal N. L.; Gupta B. L.; Varma M. "Preparative and Mechanistic Studies on Unsymmetrical Dimethyl Hydrazine-Red Fuming Nitric Acid Liquid Propellant Gels."; Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1985, 10, 4, 111-117.
- [28] Hallit R. E.; Hawk C. W. "Compability of 1100 and 2024 Aluminium Alloys with several Gelled IRFNA Systems."; AIAA 2533, 1995.
- [29] Barry D. A.; Huntsville, A. "Thixotropic IRFNA gel."; U S Patent, 6165293, 2000.
- [30] Tompson D. M. "Tertiary Amine Azides in Hypergolic Liquid or Gel Fuels Propellant Systems."; U. S. Patent, No. 6,013,143, 2000.
- [31] Tompson D., Allan B., "Higher Density Inhibited Red Fuming Nitric Acid (IRFNA) Oxidizer Gel."; U S. Patent, 6,063,219. 2000.
- [32] Rahimi S.; Hasan D.; Peretz A. "Preparation and Characterization of Gel Propellants and Simulants."; AIAA 3264, 2001.
- [33] Rahimi S.; Hasan D.; Peretz A. "Development of laboratory-scale gel-propulsion technology."; Journal of propulsion and power, 20, 1, 2004.
- [34] Rahimi S.; Peretz A.; Natan B. "On Shear Rheology of Gel Propellants."; Faculty of Aerospace Engineering, Technion-Israel Institute of

- Technology, Haifa 32000 Israel, 2007.
- [35] Richard A.; Santos P. H. S.; Kubal T.; Campanella O.; Anderson W. E. "Investigation of Gelled JP-8 and RP-1 Fuels."; Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, 2009.
- [36] "Properties & Functions, Mechanisms of CAB-O-SIL."; Cabot Corporation, Product data sheet, 2009.
- [37] Varghese T. L.; Gaidhar S. C.; John D.; Josekutty J.; Muthiah R.; Rao S. S.; Ninan K. N. Krishnamurthy, V. N. "Developmental Studies on metallized UDMH and Kerosene Gels." ; Defense Science Journal, January 1995, 45, 1, 25-30.
- [38] Robbins J. M. ; Feist R. W. "The China Lake Propulsion Laboratories."; AIAA paper 3612, July 1992.
- [39] Rapp D. C.; Zurawski R. L. "Characterization of Aluminum/RP-1 Gel Propellant Properties." ; AIAA paper 2821, (also) NASA TM-100951, July 1988.
- [40] Starkovich J.; Palaszewski B. "Technology for Gelled Liquid Cryogenic Propellants: Metallized Hydrogen/Aluminum."; AIAA paper 1878, June 1993.
- [41] Palaszewski B.; Powell R. "Launch Vehicle Performance Using Metallized Propellants."; J. of Propulsion and Power, 1994, 10, 6, 828-833.
- [42] Palaszewski B. "Metallized Gelled Propellants: Oxygen/RP-1/Aluminum Rocket Engine Calorimeter Heat Transfer Measurements and Analysis."; AIAA paper 2974, July 6-9, 1997.
- [43] Palaszewski B.; Zakany J. S. "Metallized Gelled Propellants: Oxygen/RP-1/Aluminum Rocket Heat Transfer and Combustion Measurements."; AIAA paper 2622, July 1996.
- [44] Palaszewski B.; Zakany J. S. "Metallized Gelled Propellants: Oxygen/RP-1/Aluminum Rocket Combustion Experiments."; AIAA paper 2435, July 1995.
- [45] Schmidt E. W. "Hydrazine and its Derivatives, Preparation, Properties, Applications."; John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [46] Sangeeta D.; Graff J. R. "Inorganic materials chemistry desk reference."; CRC Press, International Standard Book Number 0-8493-0910-7, Library of Congress Card Number 2004051930, Printed in the United States of America 2005.

Archive of SID