

بررسی پدیده ناپایداری فاز در سوخت‌های FAE ژله‌ای و پایدار سازی آن

احمد عبدی‌وش^۱، مرتضی غفوری^{۲*}، احمد ملایی^۳

تهران - دانشگاه امام حسین (ع)

*E-mail: dr.mghafoori@gmail.com

(تاریخ وصول: ۹۱/۵/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۳۰)

چکیده

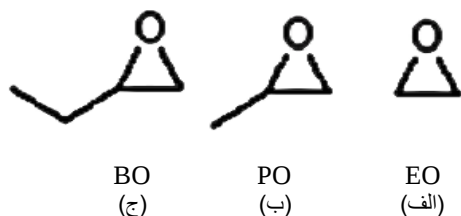
با اضافه کردن ذرات جامد پرنرزی فلزی و غیرفلزی به مواد منفجره هوا سوخت (FAE)، سطح انرژی و در نتیجه کارایی آنها به میزان فوق‌العاده‌ای افزایش می‌یابد. اهمیت توزیع یکنواخت و همگن این ذرات جامد درون سوخت مایع موجب شده که مشخصه کلونیدی ژل‌ها و ژله‌ای نمودن این نوع سوخت‌ها به عنوان یک مزیت مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر به دلیل اختلاف چگالی وزنی ذرات جامد با سوخت مایع، معمولاً پدیده‌ای به نام ناپایداری فاز و ته‌نشین شدن ذرات جامد که عمدتاً ناشی از تأثیر نیروهای خارجی (جاذبه، شتاب سلاح و ...) می‌باشد در این نوع ترکیبات رخ می‌دهد. در این مقاله پس از معرفی مواد منفجره هوا سوخت و مزایای ژل نمودن آنها، عوامل مختلف مؤثر بر پایداری فاز در سوخت‌های ژله‌ای ساده و سوخت‌های ژله‌ای حاوی ذرات جامد پرنرزی، مانند اندازه ذرات ژل‌کننده و مقدار آن، اندازه و دانسیته ذرات جامد اضافه شده و نیز چگونگی پایدارسازی و تثبیت فاز در این نوع سوخت‌های ژله‌ای بررسی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: سوخت ژل، FAE، عامل ژل‌کننده، سورفکتانت، جدایی فاز، تثبیت فاز.

۱- مقدمه

مواد منفجره هوا- سوخت^۴ یا سوخت‌های FAE ترکیبات مایعی هستند که به عنوان سوخت اصلی در مهمات FAE بکار گرفته می‌شوند [۱ و ۲]. معمولاً در این مهمات از دو نوع سوخت در دو فاز مختلف استفاده شده و فرآیند انفجار آنها نیز در دو مرحله انجام می‌شود. یک سرچنگی هوا- سوخت شامل یک مخزن استوانه‌ای پر شده از سوخت (مایع و یا پودر)، یک خرج میانی (غالباً جامد) در وسط این مخزن و یک سیستم تأخیری انفجار (خرج ثانویه یا آغازگر شیمیایی) می‌باشد.

ابتدا خرج اولیه میانی موجود در سرچنگی منفجر شده و سوخت مایع به صورت توده‌ای ابر مانند در هوا پخش شده و اصطلاحاً اتمایز می‌شود که موجب اختلاط سوخت (به صورت آئروسل یا پودر) با اکسیژن هوا می‌شود و به این ترتیب یک ابر هوا- سوخت قابل احتراق به وجود می‌آید (شکل ۱ الف). سپس با عملکرد سیستم تأخیری انفجار یا همان خرج ثانویه، این ابر هوا- سوخت محترق شده و یک گوی آتشین بزرگ ایجاد می‌کند که موجب اعمال یک افزایش فشار قابل توجه با ایمپالس بالا بر محیط اطراف خود می‌گردد (شکل ۱ ب) [۳].



شکل ۲- سه نمونه از سوخت‌های اپوکسیدی متداول؛ الف) اتیلن اکساید، ب) پروپیلن اکساید، ج) بوتیلن اکساید [۵].

به علاوه اپوکسی آلکان‌ها به علت داشتن حلقه اپوکسیدی در ساختار خود بسیار فعال هستند زیرا این حلقه سه تایی تحت فشار زاویه‌ای بوده و به آسانی با آزاد کردن انرژی باز می‌شود. اما عیب بزرگ سوخت‌های اپوکسیدی سمی بودن آنها می‌باشد که با ژل کردن و در نتیجه کاهش فراریت آنها این نقیصه تا حد زیادی برطرف می‌شود [۴]. در جدول (۱) برخی از خواص شیمی فیزیکی از جمله وزن مولکولی، دانسیته، نقاط ذوب و جوش، ویسکوزیته و فشار بخار برای این سه نوع سوخت اپوکسیدی با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- مقایسه برخی از خواص شیمی فیزیکی اتیلن اکساید، پروپیلن اکساید و ۲- بوتیلن اکساید.

خصوصیات	اتیلن اکساید [۶]	پروپیلن اکساید [۷]	۲- بوتیلن اکساید [۸]
فرمول مولکولی	C ₂ H ₄ O	C ₃ H ₆ O	C ₄ H ₈ O
وزن مولکولی	۴۴/۰۵	۵۸/۰۸	۷۲/۱۲
شماره ثبت CAS*	۷۵-۲۱-۸	۷۵-۵۶-۹	۱۰۶-۸۸-۷
رنگ	بی رنگ	بی رنگ	بی رنگ و زلال
بو	مانند اتر	مانند اتر	الکل شیرین
حالت استاندارد	گاز	مایع	مایع
نقطه جوش (میعان) (°C)	۱۰/۷	۳۴/۱	۶۳/۲
نقطه ذوب (انجماد) (°C)	-۱۱۳/۷	-۱۰۴/۴	-۶۰/۰
چگالی بخار نسبت به هوا (هوا=۱)	۱/۵۲	۲/۰۰	۲/۴۹
دانسیته (g/ml)	۰/۸۸۲	۰/۸۳	۰/۸۲۹۷
چگالی نسبی (۲۵ °C) (۱=H ₂ O)**	-	۰/۸۳	۰/۸۳۱۲
ویسکوزیته (mPa.s) (۲۵ °C)	-	۰/۲۸	-
فشار بخار (mmHg) (۲۵ °C)	۱۲۹۲	۵۶۹	۲۰۷

* CAS (Chemical Abstract Service) registry No.

** Specific gravity



(الف)



(ب)

شکل ۱- مراحل انفجار مهمات هوا- سوخت؛ الف) انفجار خرج میانی و ایجاد ابر هوا- سوخت، ب) عملکرد سیستم تأخیری انفجار و تشکیل گوی آتشین [۱].

سوخت اصلی در اکثر این مهمات یک ترکیب مایع آتش‌گیر می‌باشد که قادر است پس از انفجار و پخش شدن در هوا سریعاً تبخیر شده و انرژی حاصل از انفجار نسبتاً بالایی تولید کرده و دما و فشار مطلوب را ایجاد نماید. از جمله پارامترهای مهم در انتخاب یک سوخت جهت استفاده در سلاح‌های FAE می‌توان به مواردی چون غلظت انفجارپذیر آن در هوا، فشار بخار، ساختار شیمیایی، سمیت کم و راحتی استفاده اشاره کرد. از بین سوخت‌های مناسب و پرمصرف برای استفاده در سرچنگی‌های هوا- سوخت می‌توان به چهار گروه زیر اشاره کرد [۴و۵]:

الف) آلکان‌ها و مخلوط آنها (نظیر پنتان، هگزان، هپتان، اکتان، بنزین و ...)

ب) آلکین‌ها (نظیر استیلن)

ج) اپوکسی آلکان‌ها (نظیر اتیلن اکساید، پروپیلن اکساید و ۲- بوتیلن اکساید)

د) الکیل نیترا تها (مانند پروپیل نیترا ت، بوتیل نیترا ت و ...)

از بین سوخت‌های استفاده شده برای مهمات هوا- سوخت، اپوکسی آلکان‌ها و خصوصاً ۲- بوتیلن اکساید (BO) به علت وسیع بودن دامنه غلظت انفجارپذیری آن در هوا کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (شکل ۲).

باشد، سوخت‌های ژل از مایع بهتر می‌باشند. با توجه به اینکه سطح ژل در برخورد با محیط گازی سخت می‌شود لذا چنانچه در هنگام بهره‌برداری و یا در طول انبارداری، در مخزن شکست رخ دهد نرخ تراوش در مقایسه با مایعات بسیار کمتر است. در این مورد خاصیت رئولوژیکی ژل‌ها از جاری شدن بیشتر جلوگیری نموده و از رخداد آتش‌سوزی و پیشرفت آن ممانعت می‌کند [۱۴]. فراربت سوخت‌های ژل نیز به طور قابل توجهی از فراربت سوخت‌های مایع کمتر است و در صورت نشت و ریزش، بخارات خیلی کمتری آزاد شده و بنابراین خطرات ناشی از سمیت آن نیز کاهش خواهد یافت [۱۸]. علاوه بر موارد فوق، سوخت‌های ژل قابلیت انبارداری طولانی مدت (تا بیش از ۱۰ سال) را نشان داده‌اند [۱۳]. آن‌ها را می‌توان مانند مایعات به راحتی بسته بندی کرد و در مقایسه با سوخت‌های دوغابی^۲، ته‌نشینی ذرات در آنها به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است و جدایی فاز تنها در شتاب‌های بسیار بالا رخ می‌دهد [۱۱].

از طرف دیگر، همانند آنچه که در بحث پیش‌رانه‌ها مشاهده می‌شود، در مقایسه با سوخت‌های جامد که نسبت به ضربه، اصطکاک و الکتریسیته ساکن حساس می‌باشند و در صورت مواجهه با هر یک از این موارد احتمال ترکیدن^۳، انفجار یا سوزش شدید^۴ در آنها وجود دارد، سوخت‌های ژل در این موارد معمولاً مانند اکثر مایعات حساسیت بالایی ندارند [۱۸]. از نقطه نظر عملکرد می‌توان گفت که قدرت انفجار در ژل‌ها عمدتاً مشابه مایعات است و با افزایش ذرات جامد پُرانرژی به ساختار ژل‌ها می‌توان کارایی آن‌ها را افزایش داد. اما برای سوخت‌های ژل حاوی ذرات پُرانرژی، دانسیته در مقایسه با سوخت‌های مایع به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد که البته به نوع ماده پُرانرژی افزوده شده و مقدار بارگیری وابسته می‌باشد [۱۰]. با توجه به مطالب فوق، با ژل کردن و به دلیل کاهش فراربت، سمیت سوخت‌های ژله‌ای در مرحله انبارداری و بهره‌برداری کاهش می‌یابد. اهمیت بالای موارد ایمنی مذکور و همچنین افزایش کارایی و توان انفجاری باعث شده که موضوع ژل نمودن در مهمات FAE بسیار مورد توجه قرار گیرد [۱۱].

علیرغم مزایای ذکر شده، معایبی را نیز می‌توان برای سوخت‌های FAE ژل شده بیان نمود. خواص رئولوژیکی ژل‌ها در هنگام عملکرد، می‌توانند بر روی عملکرد آنها تأثیر گذاشته و باعث ایجاد مشکلات گوناگونی شوند. به دلیل وجود این مشکلات بود که در اوایل پیدایش پیش‌رانه‌های ژل (تقریباً از

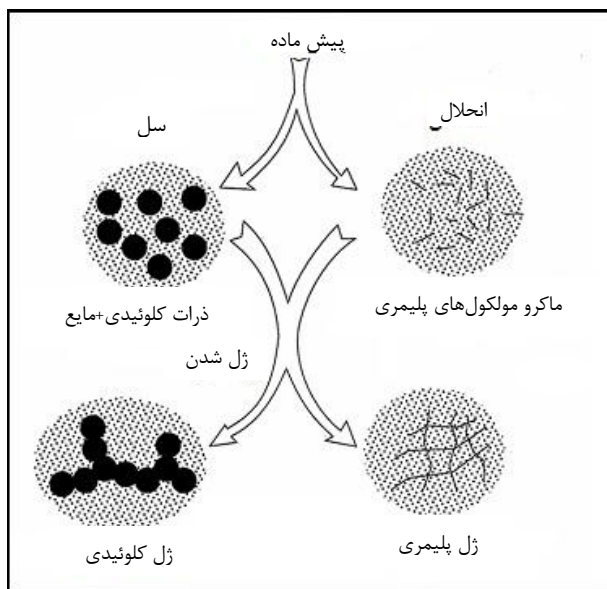
مطالعه بر روی سوخت‌های FAE از دهه ۶۰ آغاز شد [۵]. اما در همه تحقیقات منتشر شده تا سال ۱۹۸۱ تنها سوخت‌های مایع مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۹]. از آنجایی که در پیش‌رانه‌های مایع، به منظور افزایش انرژی این مواد، از ذرات جامد فلزی نظیر آلومینیوم و منیزیم استفاده می‌شد [۱۰]، لذا ایده بکارگیری ذرات جامد پُرانرژی مانند پودرهای فلزی یا مواد منفجره نیترامینی به عنوان مکمل در سوخت‌های FAE جهت افزایش سطح انرژی و قدرت انفجاری این ترکیبات نیز مطرح گردید. به دلیل اینکه چگالی وزنی این ذرات جامد معمولاً از چگالی سوخت مایع خیلی بیشتر می‌باشد، لذا ته‌نشینی شدن آن‌ها و عدم توزیع یکنواخت درون سوخت مایع نه تنها دستیابی به راندمان و کارایی مطلوب را غیر ممکن می‌ساخت، بلکه موجب بروز خطرات زیادی نیز می‌شد. لذا به منظور توزیع یکنواخت و عدم ته‌نشینی ذرات و همگن بودن سوخت حاوی ذرات جامد، ژل نمودن سوخت‌های FAE می‌تواند به عنوان یک راه حل مناسب مطرح شود [۱۱]. با توجه به اینکه ژل نمودن پیش‌رانه‌های مایع توانسته است امتیازاتی را به محصول اضافه نموده و کارایی آن‌ها را افزایش دهد [۱۳ و ۱۲] و همچنین به دلیل خواص و ویژگی‌های منحصر بفرد پیش‌رانه‌های ژل شده، در سال‌های اخیر ایده استفاده از سوخت‌ها و مهمات هوا-سوخت ژل شده نیز مورد توجه قرار گرفته است [۹]. از آنجا که استفاده از سوخت‌های با کارایی بالا و ایمنی بیشتر برای کاربردهای گوناگون دائماً در حال افزایش می‌باشد، لذا استفاده از سوخت‌های ژله‌ای به دلیل داشتن برتری‌های نسبی، از جمله امکان افزودن پودرهای پُرانرژی فلزی (آلومینیوم، منیزیم و بور) و غیرفلزی (کربن، RDX و HMX) به آنها، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این حالت ویژه از سوخت‌ها، مزایای سوخت‌های جامد با مزایای سوخت‌های مایع ترکیب شده و سوخت نسبتاً بهینه‌ای حاصل می‌شود و به این ترتیب دانسیته و سطح انرژی سوخت افزایش می‌یابد. در واقع سوخت‌های ژل حالت تکامل یافته سوخت‌های مایع هستند که با افزودن ماده ژل‌کننده^۱ (ژلانت) به سوخت یا اکسید کننده مایع ساخته می‌شوند [۱۴]. به علاوه ژل‌ها به عنوان پیش‌رانه در انواع سیستم‌های موشکی و راکت‌ها به کار گرفته شده‌اند که به دلیل مزایای خوبی مانند افزایش کارایی به عنوان ایده‌ای جهت ژل نمودن سوخت‌های FAE مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷ و ۱۶ و ۱۵].

۲- مزایا و معایب ژل کردن سوخت‌های FAE

ژل نمودن این مواد منفجره مایع می‌تواند مزایا و معایبی را نیز به همراه داشته باشد. گذشته از بحث سطح انرژی، از نقطه نظر ایمنی در مواردی که خطر نشت کردن و ریزش وجود داشته

2-Slurry Fuels
3- Detonation
4-Deflagration

1-Gellant



شکل ۳- فرایند تشکیل ژل از ذرات کلونیدی و یا از ماکرو مولکول‌های پلیمری [۲۳].

به طور کلی ترکیبات ژل ممکن است تحت تأثیر عوامل فیزیکی و شیمیایی در حین نگهداری یا استفاده، دچار تغییراتی در ماهیت شوند و در نتیجه ساختار شبکه‌ای آنها متلاشی شده و یا تغییر شکل دهند که تحت عنوان ناپایداری مطرح می‌گردد و این ناپایداری بسته به نوع مواد تشکیل دهنده، نوع شبکه تشکیل یافته و نوع برهم‌کنش اجزاء تشکیل دهنده متفاوت می‌باشد. در ترکیب‌های ژله‌ای حاوی ذرات جامد این مسئله حادتر است. به دلیل اختلاف چگالی وزنی اجزاء، به مرور زمان و در طول نگهداری، در اثر نیروی گرانش زمین ممکن است پدیده ته‌نشینی ذرات جامد و جدایی فاز رخ دهد. همچنین فعالیت شیمیایی گروه‌های فعال مواد استفاده شده می‌تواند سبب انجام تغییرات در ساختار ژل گردد [۲۴]. به منظور همگن نگه داشتن ذرات جامد درون ژل و عدم ته‌نشینی آنها باید پایداری فیزیکی مناسبی فراهم گردد. جهت کاهش سرعت ته‌نشینی ذرات و نتیجتاً افزایش پایداری فیزیکی ژل می‌توان یکی یا ترکیبی از روش‌های زیر را به کار گرفت: الف) افزایش ویسکوزیته سیالی که ذرات جامد در آن پراکنده شده‌اند؛ ب) کاهش اندازه ذرات پراکنده شده (پودرهای پراورزی یا عامل ژل‌کننده)؛ ج) تغییر دانسیته سیال؛ د) بهبود کیفیت پراکنده شدن با به کار بردن ماده فعال سطحی در سیال؛ ه) بهبود کیفیت پراکنده شدن با استفاده از دافعه الکترواستاتیک برای محلول‌های دارای بارهای الکتریکی [۱۲ و ۲۵].

۳-۱- مبانی ناپایداری در ژل‌ها

ناپایداری در سوخت‌های ژله‌ای عبارت از به هم ریختن ساختار همگن

سال ۱۹۶۰ تا اواخر دهه ۸۰ میلادی) توسعه این دسته از سوخت‌ها سرعت چندانی نداشت و حتی در بعضی از موارد ادامه کار متوقف گردید. از جمله این موارد می‌توان به بروز مشکل در فرآیند اتمایز نمودن آن‌ها، پخش نامناسب در محیط و در نتیجه عدم حصول اشتعال و احتراق مطلوب قطرات سوخت ژله‌ای اشاره نمود [۱۴]. همچنین جدایی ذرات، جدایی فاز و ناپایداری فیزیکی که ممکن است در طول انبارداری یا تحت شتاب حاصل از پرواز سامانه رخ دهند اگرچه در مقایسه با مواد اسلاری به طور قابل توجهی کمتر است اما در سطوح شتاب بالا، ذرات جامد موجود در ساختار سوخت ژل و حتی فاز جامد ژل‌کننده نیز ممکن است از فاز مایع جدا شوند (خاصیت سینرسیس^۱ ژل‌ها) [۱۹ و ۱۰]. چنانچه شرایط محیطی و عملیاتی حالت ژل همگن را تغییر داده و آن را به یک مخلوط دو یا چند فاز نسبتاً جدا از هم تبدیل سازد علاوه بر کاهش راندمان، خطرات زیادی نیز به همراه خواهد داشت. لذا یکی از مشکلات مهم در بکارگیری سوخت‌های FAE ژل شده پدیده ناپایداری در سوخت‌های ژل ساده و سوخت‌های ژل حاوی ذرات پرانرژی است که هدف اصلی این تحقیق شناخت این پدیده و پارامترهای مؤثر در آن، چگونگی تثبیت حالت ژله‌ای در محصول و روش‌های پایدارسازی آنها می‌باشد.

۳-۲- پدیده ناپایداری در سوخت‌های ژله‌ای FAE

ژل‌ها را می‌توان مایعاتی در نظر گرفت که خواص رئولوژیکی آنها با افزودن عوامل ژل‌کننده تغییر یافته و بسته به ساختار شیمیایی، مقدار و نوع عامل ژل‌کننده و سایر افزودنی‌های مورد استفاده، رفتار آنها از یک مایع ویسکوز تا یک جامد سخت تغییر می‌کند [۲۰]. از دیدگاه علم پلیمر، ژل یک شبکه پلیمری دارای پیوندهای عرضی متورم شده در یک فاز مایع واسط می‌باشد [۲۱]. می‌توان گفت ژل شدن حاصل شبکه‌ای شدن جزء پراکنده شده (عامل ژل‌کننده) است و برای شبکه‌ای شدن تشکیل پیوند کوالانسی ضروری نیست و این امر می‌تواند از طریق پیوندهای دیگری مانند پیوندهای هیدروژنی، یونی، کئوردیناسیونی و نظایر آن و یا حتی توسط عوامل فیزیکی مثل درگیر شدن مولکول‌ها با هم صورت گیرد. به عبارت دیگر ژل‌ها شبکه‌هایی هستند که با جذب حلال به میزان خاصی متورم می‌شوند و این عمل بدون حل شدن در حلال رخ می‌دهد (شکل ۳) [۲۲]. بدین ترتیب هر عاملی که این ارتباط یا پیوندهای درون شبکه را جدا سازد باعث از بین رفتن حالت ژله‌ای می‌گردد.

1- Syneresis property

بسیار زیادی در ژل شدن و طول عمر آن دارد. در یک ژل باردار، بارهای سیستم در کنار یکدیگر قرار گرفته و به یک تعادل می‌رسند. حال اگر تغییری در pH ایجاد شود این توازن بار به هم خورده و ساختار وابسته به آن متلاشی می‌گردد [۲۹].

غلظت عامل ژل‌کننده نیز به میزان بسیار زیادی در ناپایداری ترکیب ژل تأثیرگذار می‌باشد. هرچه غلظت ژل‌کننده در سوخت مایع اصلی بیشتر شود شبکه ژل مستحکم و منسجم‌تری تشکیل می‌شود و به تبع آن ویسکوزیته ژل نیز افزایش می‌یابد. برعکس، با کاهش غلظت ژل‌کننده، رشته‌های تشکیل دهنده شبکه در سوخت مایع کمتر شده و در نتیجه تشکیل پیوند یا درگیری مولکولی بین این رشته‌ها نیز کمتر می‌گردد و ژلی با ویسکوزیته پایین‌تر تشکیل می‌شود. اگرچه با افزایش غلظت عامل ژل‌کننده می‌توان به ژلی پایدارتر دست یافت [۳۰]، اما استفاده از سوخت‌های ژله‌ای با ویسکوزیته بالا به دلیل عدم اتمیزاسیون مطلوب موجب کاهش راندمان انفجار می‌شود. همچنین در مورد ژل‌کننده‌های غیرآلی مانند سیلیکای فومی، افزایش غلظت آن، اثرات نامطلوبی بر روی عملکرد سوخت ژل خواهد داشت [۱۲]. نوع عامل ژل‌کننده و چگونگی مشارکت آن در تشکیل پیوندهای بین مولکولی و سازگاری آن با سایر اجزاء ترکیب ژل نیز می‌تواند در پایداری ترکیب ژل مؤثر باشد [۳۱].

۳-۳- عوامل فیزیکی مؤثر بر ناپایداری ژل

از مهمترین عوامل فیزیکی مؤثر بر ناپایداری ژل می‌توان به دما، فشار و تحریکات مکانیکی اشاره کرد. دما عامل بسیار مهمی در پایداری اکثر ژل‌ها می‌باشد. اثر دما در هر سیستم ژل با دیگری متفاوت است و گاهی اثری کاملاً متفاوت را نشان می‌دهد. به این صورت که در مورد بعضی از ژل‌های شیمیایی با افزایش دما واکنش ژل شدن بیشتر انجام گرفته و یک ژل ایجاد می‌شود (مانند آلومین یا همان پروتئین تخم مرغ) و برعکس در مورد ژل‌های فیزیکی که در اثر نیروهای ضعیف بین مولکولی تشکیل شده‌اند ممکن است با کاهش دما ساختار پایداری از ژل تشکیل گردد (مانند ژل‌های خوراکی یا آگار) [۳۰ و ۱۴]. فشار و تحریکات مکانیکی نیز می‌توانند به راحتی ساختار یک ژل را متلاشی کنند. هنگامی که یک ژل با کارد بریده شود، ساختار آن تغییری نمی‌کند و فقط ژل به چند تکه تقسیم می‌شود، اما زمانی که یک ژل تحت فشار قرار گیرد، به جز در مورد ژل‌های صلب که دارای شبکه‌هایی متشکل از پیوندهای کووالانسی قوی هستند و تنش‌های بسیار قوی را نیز تحمل می‌کنند، دچار تغییراتی در ساختار خواهد شد [۳۰]. این پدیده را می‌توان به این صورت توجیه نمود که اعمال فشار باعث می‌گردد پیوندهای عرضی بین رشته‌های تشکیل دهنده شبکه ژل نتوانند حالت قبلی خود را تحمل نمایند و در نهایت گسسته شوند. این گسستگی پیوند به گونه دیگری نیز ممکن است رخ دهد. وقتی که یک شبکه بیش از حد حلال جذب نماید، به علت فشاری که

ژل و غیر یکنواخت شدن توزیع اجزاء در ترکیب ژل در اثر عوامل مختلف می‌باشد به طوری که ماهیت رئولوژیکی (غیر نیوتنی بودن) آن تغییر کرده و دیگر قابل استفاده نباشد. در مورد ژل‌های ساده که هیچ نوع افزودنی به آنها اضافه نشده است، تنها مورد ناپایداری مسئله جدایی فاز است. جدایش فاز به این معناست که در تمامی سوخت‌های ژل به ویژه در آنهایی که سازگاری خوبی بین سوخت مایع اصلی و عامل ژل‌کننده وجود ندارد، در زمان نگهداری (انبارداری) و یا به هنگام عمل (در شتاب‌های بسیار بالای حاصل از پرتاب موشک یا راکت) و همچنین تحت تأثیر شرایط محیطی مانند دما، دو فاز تشکیل دهنده ژل (فاز جامد پیوسته که شبکه را تشکیل می‌دهد و فاز مایع پیوسته که این شبکه جامد را دربر می‌گیرد) تا حدی از هم جدا شده و فاز مایع در بالای ژل جمع می‌شود که باعث کاهش راندمان و عملکرد سیستم می‌گردد [۲۶ و ۱۳]. برای سیستم‌های ژل فلزدار شده یا حاوی ذرات جامد پیرانرژی علاوه بر مسئله جدایش فاز، ته‌نشینی ذرات نیز مشکل ساز خواهد بود. برای مثال در یک سرچنگی حاوی سوخت FAE ژل شده در نتیجه تأثیر شتاب پرتابه، ذرات جامد پیرانرژی درون ترکیب ژل ته‌نشین شده و نه تنها احتراق یا انفجار مناسب صورت نمی‌گیرد بلکه این ته‌نشینی منجر به تغییر مرکز ثقل پرتابه شده و تعادل آن را به هم می‌زند و مانع از هدفگیری دقیق سامانه می‌گردد [۲۷ و ۱۰]. به علاوه سوخت ژل به دلیل از دست دادن خواص فیزیکی و رئولوژیکی مورد نیاز، کارایی خود را از دست خواهد داد [۱۲].

علاوه بر این موارد، وقوع تغییرات فیزیکی و شیمیایی در سیستم ژل نیز باعث تغییر در ساختار آن شده و ماهیت ژل را به هم می‌ریزد. هر عاملی که باعث به هم ریخته شدن و تغییر در ساختار شیمیایی شبکه ژل یا حلال شود و بر ماهیت ژل اثر بگذارد، یک اثر شیمیایی خواهد بود. اما عوامل فیزیکی مانند تغییر در شرایط محیط و یا سایر عوامل فیزیکی نیز می‌توانند بر روی برهم‌کنش‌ها در ژل‌های فیزیکی اثر بگذارند [۲۰].

۳-۲- عوامل شیمیایی مؤثر بر ناپایداری ژل

عوامل شیمیایی عواملی هستند که تشکیل شبکه و پیوندهای شیمیایی در ژل را تحت تأثیر قرار داده و موجب تغییر در آنها می‌شوند. از مهمترین این عوامل ماهیت شیمیایی اجزاء، اثر pH و اثر غلظت عامل ژل‌کننده می‌باشند. ماهیت شیمیایی اجزاء ترکیب به میزان زیادی در پایداری ترکیب ژل مؤثر می‌باشد. وجود گروه‌های شیمیایی فعال و یا نسبتاً ناپایدار در ترکیب ژل ممکن است در دراز مدت باعث تجزیه شیمیایی و ناپایداری ترکیب گردند. همچنین در برخی موارد ممکن است پیشرفت فرایند ژل شدن موجب تغییر خواص نهایی محصول شود [۲۸ و ۱۴]. عامل pH در مورد سیستم‌های باردار و یا سوخت‌های ژل تشکیل شده توسط پیوندهای هیدروژنی، اثر

از درون بر شبکه ژل وارد می‌شود موجب از هم پاشیدن شبکه می‌گردد [۳۱]. اثر فشار و تحریکات مکانیکی برای مهمات هوا- سوخت یا سامانه‌های پیش‌رانه مایع که در آنها تغییرات شتاب شدید صورت می‌گیرد بسیار با اهمیت می‌باشد.

عواملی که در بالا ذکر شدند هرکدام به تنهایی می‌توانند بر پایداری ژل تأثیر گذار باشند. علاوه بر آن برهم کنش و تلفیق این عوامل نیز می‌تواند پایداری سوخت‌های ژل را تحت تأثیر قرار دهند. مثلاً در مورد عوامل فیزیکی و شیمیایی برای ژل آگار، بالا رفتن دما همراه با کاهش غلظت منجر به متلاشی شدن سریع‌تر شبکه می‌شوند. موارد مشابه بسیاری وجود دارند که نشان می‌دهند وجود دو یا سه عامل تخریب یا تشکیل می‌توانند اثر خود را تک تک اعمال کنند [۳۰].

۴-۲- روش‌های تثبیت فاز در سوخت‌های FAE ژله‌ای

راهکارهای متفاوت و زیادی برای جلوگیری از رخ دادن جدایش فاز توسط محققین پیشنهاد شده است که به تنهایی و یا در ترکیب با یکدیگر تأثیر اساسی و غالباً چشمگیری در پایداری فازی سوخت‌های ژل بر جا می‌گذارند.

۴-۱- استفاده از مواد اولیه سازگار با یکدیگر

سوخت مایع اصلی و ژل کننده مورد استفاده در فرآیند ژل کردن باید سازگاری بالایی با یکدیگر داشته باشند. به این صورت که به هنگام تهیه سوخت ژل، زمانی که ژل کننده به سوخت مایع اصلی اضافه می‌شود با ایجاد شبکه‌ای منسجم و تا حد ممکن متراکم بتواند بخوبی فاز مایع را دربر گرفته و تحت فشار و در شتاب‌های بالای پرتابه نیز از جدایش فاز جلوگیری کند [۱۴]. حال اگر علاوه بر نیروهای ضعیف بین مولکولی، بین ژل کننده و سوخت مایع پیوندهای شیمیایی نیز برقرار گردد مقاومت سوخت ژل حاصل در برابر این تغییرات بیشتر شده و استحکام آن افزایش می‌یابد [۲۶].

۴-۲- تهیه سوخت ژل با استفاده از پیوندهای شیمیایی (ژل‌های شیمیایی)

وجود پیوندهای شیمیایی بین اجزاء تشکیل دهنده یک سیستم ژل موجب افزایش استحکام ژل شده و مقاومت این سیستم را در برابر جدایش فاز بالا می‌برد. بنابراین همواره استفاده از ژل‌های شیمیایی نسبت به ژل‌های فیزیکی (حاصل از نیروهای ضعیف بین مولکولی) و ژل‌های حاصل از درگیری‌های بین رشته‌های مولکولی ارجحیت دارند [۳۲].

۴-۳- استفاده همزمان از چند عامل ژل کننده

اخیراً محققین توانسته‌اند با استفاده از ترکیب چند عامل ژل کننده در

تهیه سوخت‌های ژل، به ژلهایی با استحکام بالا و مقاومت زیاد در برابر جدایش فاز دست یابند. از جمله این موفقیت‌ها می‌توان به استفاده از Cab-O-Sil به عنوان ژل کننده مکمل در کنار پودر ناپالم^۱ برای تهیه یک نمونه سوخت ژل اشاره کرد. ناپالم نام عمومی نمک آلومینیوم اسیدهای چرب است که دارای فرمول عمومی $Al(OH)_2R$ می‌باشند و به عنوان غلیظ کننده و یا ژل کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. Cab-O-Sil به علت مقاومت خیلی خوب در برابر سل شدن، مقاومت در برابر جاری شدن، ایجاد کلاف و از همه مهمتر اثر ضد ته-نشینی فوق العاده آن تا حد زیادی مانع از جدا شدن دو فاز سوخت ژل و ته‌نشینی ذرات جامد پراثرژی موجود در آن از یکدیگر می‌شود [۲۶].

۴-۴- استفاده از ذرات با دانسیته کمتر

یکی از روش‌های پیش‌گیری از ته‌نشینی ذرات جامد در یک سیستم حاوی سوخت ژل، استفاده از ذرات جامد با دانسیته پایین و تا حد امکان نزدیک به دانسیته ژل مورد استفاده می‌باشد [۱۰]. هرچه دانسیته ذره جامد اضافه شده به سوخت ژل کمتر باشد سیستم حاوی ذره پایدارتر بوده و مقاومت بیشتری در برابر عوامل محیطی به ویژه شتاب حاصل از پرتاب داشته و در طول مدت انبارداری نیز ترکیب ژل ثابت باقی می‌ماند [۳۲].

۴-۵- تهیه ژل با دانسیته بیشتر

این روش دقیقاً نقطه مقابل روش قبل می‌باشد. به این صورت که این بار دانسیته سوخت ژل افزایش داده می‌شود تا به دانسیته ذرات بکار رفته نزدیکتر باشد. افزایش دانسیته ژل معادل با افزایش ویسکوزیته آن می‌باشد و با استفاده از مقدار ژل کننده بیشتر حاصل می‌شود؛ بنابراین ژل کننده در داخل سوخت مایع اصلی شبکه‌ای منسجم‌تر و متراکم‌تر تشکیل داده و در نتیجه ذرات جامد در داخل این سیستم نسبتاً صلب پایداری بهتری می‌یابند [۳۳]. شایان ذکر است که استفاده از این روش به ویژه در مورد سیستم‌های پیش‌رانه‌ای توصیه نمی‌شود زیرا استفاده از پیش‌رانه ژل با ویسکوزیته بالا منجر به بروز مشکلاتی در فرآیند تغذیه و آمیزش‌سیون شده و مانع احتراق مطلوب در محفظه احتراق می‌گردد [۲۶].

۴-۶- استفاده از سورفکتانت‌ها یا مواد فعال کننده سطح

از این مواد جهت ایجاد پایداری در سیستم‌های سوخت ژله‌ای حاوی پودرهای پراثرژی و نیز دست‌یابی به یکنواختی بیشتر در این نوع سوخت‌ها استفاده می‌شود. مواد فعال کننده سطح^۲ از یک انتهای خود به سطح ذرات موجود در ژل چسبیده و به دلیل زنجیره‌ای بودن مانع از نزدیک شدن این ذرات به یکدیگر، ایجاد لخته و در نهایت ته‌نشینی

1- Napalm
2- Surfactants

سطح مؤثر یا سطح مرطوب شوند آنها افزایش می‌یابد. در نتیجه با بکار بردن ذرات جامد ریزتر در سیستم سوخت ژل، به دلیل افزایش سطح ذرات، سطح تماس ذره با سوخت مایع اصلی بیشتر شده و با افزایش سطح تماس بین این دو فاز سرعت ته‌نشینی ذرات به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به علاوه در اثر افزایش سطح تماس ذرات جامد با سوخت مایع اصلی، ویسکوزیته فاز مایع نیز افزایش می‌یابد [۳۴].

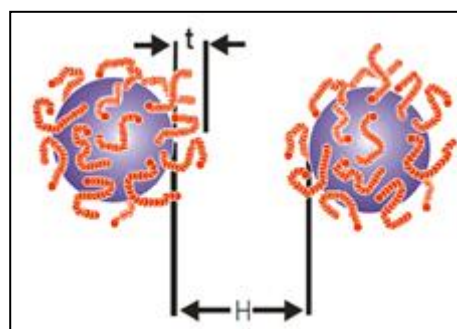
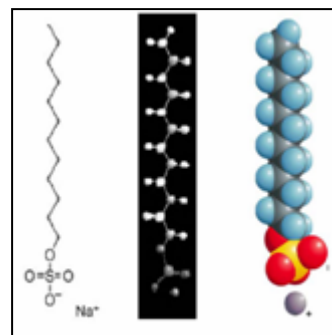
این اثر افزایش ویسکوزیته تا حدی است که گاهی ذرات جامد در مقیاس نانو خود به عنوان یک عامل ژل‌کننده اصلی یا کمکی (بسته به اندازه ذره) مطرح می‌شوند. برای مثال نانو آلومینیوم گرید Alex به عنوان یک شبه ژل‌کننده عمل می‌کند در حالی که گرید L-Alex آن بدون کمک عامل ژل‌کننده دیگر، قادر به تولید ژلی با ویسکوزیته پایین با هر نوع سوخت مایع می‌باشد [۱۸].

۵- نتیجه گیری

با افزودن پودرهای جامد فلزی و نیترامینی به سوخت مایع اصلی در یک سرچنگی هوا- سوخت، کارایی و راندمان عملکرد سیستم حاوی سوخت مایع FAE افزایش می‌یابد. اما در مقابل ته‌نشینی و ناهمگنی ناشی از اضافه شدن این ذرات موجب بروز مشکلاتی در فرآیند پرتاب شده و در نهایت مانع از هدف‌گیری دقیق در این سلاح‌ها می‌شود. مناسب‌ترین راهکار پیشنهادی برای پیشگیری از این مشکل ژل کردن سوخت مایع حاوی ذرات جامد پرنرژ می‌باشد.

اگرچه ژل کردن سوخت مایع تا حد زیادی مانع از ته‌نشینی ذرات جامد افزوده شده به آن می‌شود اما احتمال ته‌نشینی این ذرات در طول انبارداری و یا تحت شتاب‌های بالای ناشی از پرتاب همچنان وجود خواهد داشت که ناپایداری فاز نامیده می‌شود. برای مقابله با این نقص روش‌های گوناگونی توسط محققین بکار گرفته و توصیه شده است که از مهمترین آنها می‌توان به استفاده از مواد اولیه سازگار با یکدیگر، استفاده همزمان از چند عامل ژل‌کننده، استفاده از ذرات با دانسیته کمتر، تهیه ژل با دانسیته بیشتر و استفاده از مواد فعال کننده سطح اشاره نمود.

ذرات در سوخت ژل می‌شوند [۳۳]. در شکل ۴ یک نمونه از این مواد فعال کننده سطح مورد استفاده برای سیستم‌های هیدروژل و نحوه پایدارسازی ذرات توسط آن نشان داده شده است.



شکل ۴- سدیم دودسیل سولفات به عنوان یک عامل سورفکتانت (بالا) و نحوه پایدارسازی ذرات جامد توسط آن (پایین) [۳۴].

زمانی که از ماده فعال کننده سطح برای پایدار سازی ذرات جامد اضافه شده به سوخت ژل استفاده شود باید ابتدا این ماده به سوخت مایع افزوده شده و مخلوط گردد، سپس ذرات جامد پرنرژ اضافه شوند و در نهایت ژل‌کننده مورد نظر اضافه گردد [۳۴].

۴-۷ استفاده از ذرات جامد ریز با سطح مرطوب شونده

بیشتر

در مقیاس‌های زیرمیکرون هرچه اندازه ذرات کاهش یابد در مقابل

مراجع

- [1] Zhang, Q.; Lin, D.; Bai, Ch. "Motion State of Fuel within Shell in Projection Acceleration Process."; Def. Sci. J. 2003; Vol. 53, No. 3, pp. 259-265.
- [2] Zhang, Q.; Ji, Y.; Bai, Ch.; Yan, H.; Zhao, Y.; Luo, A.; Fu, Zh. "Adiabatic Compression of Pores in Mixed Fuel Medium During Launching."; Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004; Vol. 18, No. 3, pp. 237-244.
- [3] Wang, D.; Shen, Zh.; Zhou, T. "Experimental Study on Single Ignition Characteristics of Mixed Solid and Liquid Fuel."; J. of Beijing Institute of Technology, 2005; Vol. 14, No. 4, pp. 477-480.
- [۴] ممبینی، جهانبخش "ژل کردن سوخت ۱،۲- بوتیلین اکساید مورد استفاده در سلاح های هوا- سوخت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)، زمستان ۱۳۸۶.
- [5] Stull, B. O. "Gelled Fuel-Air Explosive Method."; U. S. Patent; No. 4,293,314, 1981.
- [6] Ethyleneoxide; "Material Safety Data Sheet."; CAS No. 75-21-8; Matheson TRI-GAS, INC.; Parsippany, New Jersey, USA, 07054-0624; 2001.
- [7] Propyleneoxide; "Material Safety Data Sheet."; CAS No. 75-56-9; Sigma-Aldrich, 3050 Spruce Street, SAINT LOUIS MO 63103, USA; 2010.
- [8] 1,2- Butyleneoxide; "Material Safety Data Sheet."; CAS No. 106-88-7, MP Bio medicals, LLC, 29525 Fountain Parkway Solon, OH 44139, 2006.
- [9] AppaRoa A. "Fuel Air Explosive."; Def. Sci. J., 1987; Vol. 1, No. 37.
- [10] Palaszewski, B.; Zakany, J. S. "Metallized Gelled Propellants: Oxygen/RP-1/Aluminum Rocket Heat Transfer and Combustion Measurements."; AIAA, 1996; pp. 96-2622.
- [11] Chen, Zh.; Yang, R. "Evaluation on Performance of Metallized Gelled Propellant."; J. of Propulsion Technology, 1998; Vol. 19, NO. 1.
- [12] Rahimi, S.; Natan, B. "On the Thixotropic Effect of Inorganic Gel Fuels."; J. of Propulsion and Power, 2000; Vol. 16, NO. 3, pp. 459-470.

- [13] Tillotson, T. M.; Hrubesh, L.W.; Simpson, R.L.; Lee, R.S.; Swansiger, R.W. "Sol-Gel Processing of Energetic Materials."; J. of Non-Crystalline Solids 225, 1998; pp. 358-363.
- [14] Natan, B.; Rahimi, S. "The Status of Gel Propellants in Year 2000."; J. of Combustion of Energetic Materials; Eds: Kuo, K. K. and deLuca, L.; Begell House, USA, 2002; pp. 172-194.
- [15] Sumio, S. "Handbook of Sol-Gel Science and Tecknology."; Hirakata, Osaka, Japan, 2005.
- [۱۶] صابری مقدم، علی؛ حاجیلری، نسیبه و محمدی، مرتضی "ساخت و بررسی رفتار رئولوژیکی پیشرانه ژل دی متیل هیدرازین نامتقارن"، مجله تحقیق و توسعه مواد پرنرژزی، سال سوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۸۷.
- [۱۷] قبادی، نرگس؛ صابری مقدم، علی؛ شیخی نارانی، مجید؛ شفیق زاده، حجت "تهیه سوخت ژل UDMH با استفاده از ذرات نانو آلومینیوم و بررسی خواص رئولوژیکی آن"، مجله تحقیق و توسعه مواد پرنرژزی، سال ششم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۰.
- [18] Hodge, K.; Crofoot, T.; Nelson, S. "Gelled Propellants for Tactical Missile Applications."; AIAA, 1999; pp. 99-2976.
- [۱۹] محمدی، سمانه؛ کهساری، ایرج؛ سیف اله زاده، علی و صابری مقدم، علی "بررسی پارامترهای مؤثر بر فرآیند تهیه پیشرانه نانو ژل نیترومتان"، مجله علمی پژوهشی "مواد پرنرژزی"، سال هفتم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱.
- [20] Brinker, C. J.; Sckerer, G.W. "Sol-Gel Science."; Academic Press, Inc., Boston, 1990.
- [21] Asakura Sh. "Dictionary of Polymers."; Society of Polymer Science, Japan, 1988.
- [22] Shaw, D. J. "Introduction to Colloid and Surface Chemistry."; 4th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992.
- [23] Hunter, R. J. "Foundations of Colloid Science."; Clarendon, Oxford; Vol. 1; 1989.
- [24] Parker, R. P.; May, F. G. "Stability of Single-Base Propellant With Low Residual Stabilizer Content."; Department of Defense, Melbourne, AUS.
- [25] Flory, P. J. "Introductory lecture in gels and Gelling Processes."; Faraday Discussions of the Chemical Society, Vol. 57; 1974.
- [26] Scott, L. C. "Synthesis of Highly Loaded Gelled Propellants."; Resodyn Corporation, 1901 South Franklin, Butte MT (406), 2009; 723-2222.
- [27] Palaszewski, B.; Powell, R. "Launch Vehicle Performance Using Metallized Propellants."; J. of Propulsion and Power, 1994; Vol. 10, No. 6, pp. 828-833.
- [۲۸] صابری مقدم، علی و حاجیلری، نسیبه "پیشرانه‌های ژل"، مجله تحقیق و توسعه مواد پرنرژزی، سال دوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۸۶.
- [29] Osada, Y.; Kajiware, K. "Gels Handbook.", Academic Press, volume 1: 0-12-394961-0, 2001.
- [30] Matsuda, A.; Sato, J.; Yasunaga, H.; Osada, Y. "Macromolecules."; Vol. 27, 7695, 1994.
- [31] Evans, D. F.; Wennerström, H. "The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology and Technology Meet."; 2nd Ed., Wiley-VCH, New York, 1999.
- [32] Gun'ko, V. M.; Voronin, E. F.; Guzenko, N. V.; Pakhlov, E. M.; Nosach, L. V. and Leboda, R. "Interaction of poly (ethylene oxide) with fumed silica."; J. of Colloid and Interface Science, 2004; Vol. 279, No. 2, pp. 326-340.
- [33] Hutter, M. "Brownian Dynamics Simulation of Stable and Coagulating Colloids in Aqueous Suspension."; Diss. ETHNo. 13107, Zurich, 1999.
- [34] Starkovch, J.; Adams, S.; Palaszewski, B. "Nanoparticulate Gellants for Metallized Gelled Liquid Hydrogen with Aluminum."; AIAA, 1996; pp. 96-3234.