تحقیق و توسعه مواد پرانرژی

سال دوم- شماره ۲- شماره پیاپی ۳- پاییز و زمستان ۱۳۸۵

بررسی فوم های انفجاری

علی سلمانی اسکلو[۱]، حسین فخرائیان[۲]

تهران - دانشگاه امام حسین(ع)

Fakhraian@yahoo.com

چکیده

فوم‌های انفجاری به آن دسته از فوم‌ها اطلاق می‌شود که از ترکیب مواد منفجره و افزودنی‌های مناسب به دست می‌آیند. خواصی مانند دانسیته، میزان پایداری، ویسکوزیته و قدرت انفجار فوم، متأثر از همهٔ اجزاء تشکیل دهندهٔ آن است. یکی از کاربردهای مهم این نوع فوم‌ها، مین زدایی و انفجار مهمات باقی مانده در مناطق جنگی است. در برخی کشورها، مطالعات زیادی در مورد فوم‌های مذکور صورت گرفته و فرمولاسیون‌های مختلف به صورت تجاری تولید شده اند. فوم‌های انفجاری را می‌توان به سه دستهٔ عمدهٔ امولسیونی، پلیمری و هیدروژل تقسیم کرد که هر کدام، فرمولاسیون و کاربردهای مختلف دارد. در این مقاله، انواع فوم‌های انفجاری، روش‌های تهیه، موارد استفاده و نحوهٔ به‌کارگیری آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین، با مطالعه و بررسی مراجع مختلف، کارآیی فوم‌های انفجاری به ویژه فوم‌های انفجاری مایع، در پاک‌سازی مین‌های به جامانده از عملیات جنگی مورد تأکید قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: فوم، فوم‌های انفجاری، فوم‌های انفجاری پلیمری، فوم‌های انفجاری هیدروژل، فوم‌های انفجاری امولسیونی، فوم های انفجاری ضد مین

۱. مقدمه

فوم‌ها دارای انواع مختلفی بوده و به طرق متفاوت تهیه و با شیوه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از موارد استفادهٔ آنها در زمینه‌های نظامی است. آسانترین و با ارزش‌ترین کاربرد مواد منفجرهٔ متخلخل، به وسیلهٔ فوم‌های انفجاری امکان‌پذیر است [۱]. وجود مواد منفجره در فوم‌های انفجاری، غالباً به صورت ژل، محلول در آب، سوسپانسیون و یا امولسیون می‌باشد. فوم‌های انفجاری در دماهای متفاوت به سه شکل مختلف *پلیمری*، هیدروژل و امولسیونی تهیه می‌شوند [۲ ۶].

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

بنابراین، می‌توان فوم‌های انفجاری را به سه دستهٔ مذکور تقسیم کرد.

فـومهـای انفجـاری، از واکـنش ترکیبـات اصـلی (ماننـد سـدیم نیتـرات، آمـونیم نیتـرات، متیـل‌آمونیـوم‌پرکلـرات، نیتـروپنتـان، متیـل‌نیتـرآمین، سـدیم‌نیتریـت و آمونیـوم‌لاریـل‌سـولفات) و افزودنـی‌هـای مختلـف (ماننـد پایدار کننده‌ها، ضد انجمادهـا، حـساس کننـده‌هـا، قـوام دهنـده‌هـا، اتـصال دهنـده‌هـای جـانبی، امولـسیون کننـده‌هـا، روغـن‌هـا، عوامـل فـوم‌سـاز، نـمک‌هـای معدنـی، مـواد فعـال سـطحی(Surfactant) و کنـترل کننـدهٔ ویـسکوزیتـه) تهیـه مـی‌شـوند [۱-۳ و ۵-۱۱]. در برخـی فرمولاسـیون‌هـا، آمـونیم نیتـرات بـیش از ۴۵٪ وزنـی ایـن نـوع فـوم‌هـا را تشکیل می‌دهد [۲و۳].

کـوپلیمر اتـیلن و پـروپیلن، مخلـوطی از اسـتئاریل‌آمـین و بنیـل‌آمـین (Bchcnylaminc) ، سـدیم‌لاریـل‌بنـزن‌سـولفونات و سـدیم میریـستیل بنزن‌سولفونات به عنوان پایدارکننده، گلیکول بـه عنـوان ضـد انجمـاد، پـودر آلومینیم، منـیزیم، گوگرد و کربن بـه عنـوان سـوخت در تهیـهٔ فـوم‌هـای انفجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱،۲،۵و۹].

یکـی دیگـر از اجـزاء فـوم‌هـای انفجـاری، حـساس‌کننـده‌هـا هـستند. اتیلن‌گلیکول‌منونیترات، یکی از این ترکیبات اسـت [۷]. فـوم انفجـاری، بـا افزایش هیدرازین یـا نمک‌ها و مشتقات آن و نیز افزایش اکسیـدکننده‌هایـی مانند آب اکسیژنه، اکسید کرم، پرسولفات‌ها، پرمنگنات‌ها، کلرات‌ها، برمات‌ها، یدات‌ها، کرومات‌ها و دی‌کرومات‌های آمونیم، نمک‌های فلزی محلول از جمله نمک مس که در حضور هیدرازین، فعال هـستند، حـساسیت بیـشتری پیـدا می‌کند [۲و۹]. افزودن ترکیباتی نظیر پنتااریتریتول‌تترانیترات (PETEN)، نیـتروگوانیـدین (NQ) ، سیـکلوتـری‌متـیلن‌تـری‌نیتـرآمین(RDX) ، آمونیم‌نیترات و تری‌نیتروتولوئن (TNT) به فرمولاسیون فوم انفجاری، باعـث افزایش قدرت آن می‌شوند [۶]. همچنین نمک‌هـای اکـسیژن‌دار در افـزایش حساسیت این نوع فـوم‌هـا مـؤثر هـستند [۲-۴، ۷و ۱۲]. حـساسیت مـادهٔ منفجرهٔ آمونیم‌نیترات به صورت ژل یا محلول در آب، در اثر به‌هـم زدن و یـا افزودن مقدار کمی حساس کننده به همراه محلول حـاوی نمک اکسیژن دار معدنـی، افزایش می یابد. برای جلوگیری از اثر آب روی آلومینیم، پوششی از روغن و کربوکسیلیک اسید آلیفاتیک استفاده می‌شود. در فرمولاسـیون ایـن فـوم‌ها، از اتـیلن‌گلیکول‌منونیـترات و صـابون کربوکسیلات آلیفاتیکی با جرم مولکولی زیاد نیز استفاده می‌کننـد [۴،۷و۱۳].

مواد کنتـرل کننـدهٔ ویـسکوزیته، یکـی دیگـر از اجـزاء فـوم‌هـای انفجـاری هـستند. ترکیـب پلـی‌ایزوبـوتیلن، بـه عنـوان کنتـرل کننـدهٔ ویـسکوزیته اسـتفاده مـی‌شـود [۶]. همچنـین، بـرای تهیـهٔ فـوم‌هـای انفجـاری بـا دانـسیتهٔ بـسیار پـایین، از مـواد منفجـرهٔ پنتـا اریتریتـول‌تتـرانیتـرات، سیـکلوتـری‌متیلن‌تـری‌نیتـرآمین، تـری‌نیتـروتولـوئن، نیـتروگوانیـدین و سیکلوتترامتیلن‌تترانیترآمین(HMX) استفاده می‌گردد [۱۴].

۲. فوم‌های انفجاری پلیمری

فـوم‌های پلیمری، از هیـدروکربن‌های مایع که شامل روغن معدنـی، عامـل مرطوب کننده، عامل چسبناک و اکسیـد کننـده‌ها هستند، تهیـه می‌شـوند. مـواد منفجره‌ای‌که دانسیـتهٔ کمتری دارند، به عنوان تنظیم کننـدهٔ دانـسیتهٔ فوم‌های انفجاری به کار می روند [۱۴]. فوم‌های ترموپلاستیک بـه دو بخـش گرمـازا و گرمـاگیر، تقـسیم شـده و بـه صـورت ذرات ریـز بـه کـار گرفتـه می‌شوند [۱۵]. در برخی از فوم‌های انفجاری، آمونیوم‌نیترات به عنوان عامـل انبساط استفاده می‌شود [۱۶].

یکی از کاربردهای فوم‌های انفجـاری، در تخریـب سـطوح اجـزاء سـاختمانی است. این فرآیند به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده اسـت. در ایـن شکل، مراحل a، b و c، نحوهٔ قرار گرفتن فوم روی سطح، ایجاد امواج انفجار و انهدام کامل سطح را نشان می‌دهند [۱۷].

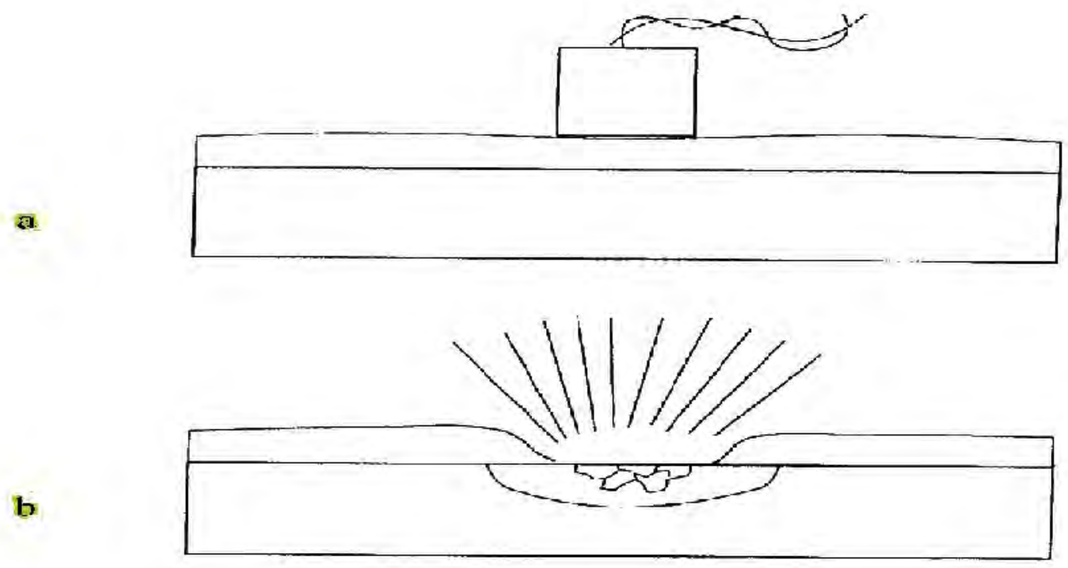
نتایج آزمایش‌های تجربی حـاصل از به کارگیری فوم، نشـان می‌دهـد که این روش، راهـی مؤثر و سریع برای انهدام و سوزاندن مهمات فاقـد پوشش است [۱۸]. شکل ۲، مراحل تهیهٔ فـوم انفجاری و به‌کـارگیری آن در پـاک‌سـازی میادین مین و انهدام مهمات عمل نکردهٔ جنگی را به صورت شماتیک نـشان می‌دهد. دو جزء تا زمانی‌که مخلوط نشده اند خاصیت انفجـاری ندارند، اما با توجه به قابل اشتعال بودن، حمل و نگهداری آنها باید با احتیاط لازم صـورت گیرد. این دو جزء بایـد بلافاصله قبل از به‌کارگیری بـا هـم مخـلوط شونـد (پیـشرانه به محـلول تـزریق شود) [۱۹].

بـه طـورکلی، برخـی از فـوم‌هـای انفجـاری در حـین حمـل و نقـل، از پـایداری مناسـبی برخوردارنـد و بـه‌کـارگیری آنهـا آسـان است. ایـن فـوم‌هـا سـمیت کمتـری دارنـد و بـه وسیـلهٔ تکنیـک‌هـای معمـولی در انفجار، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

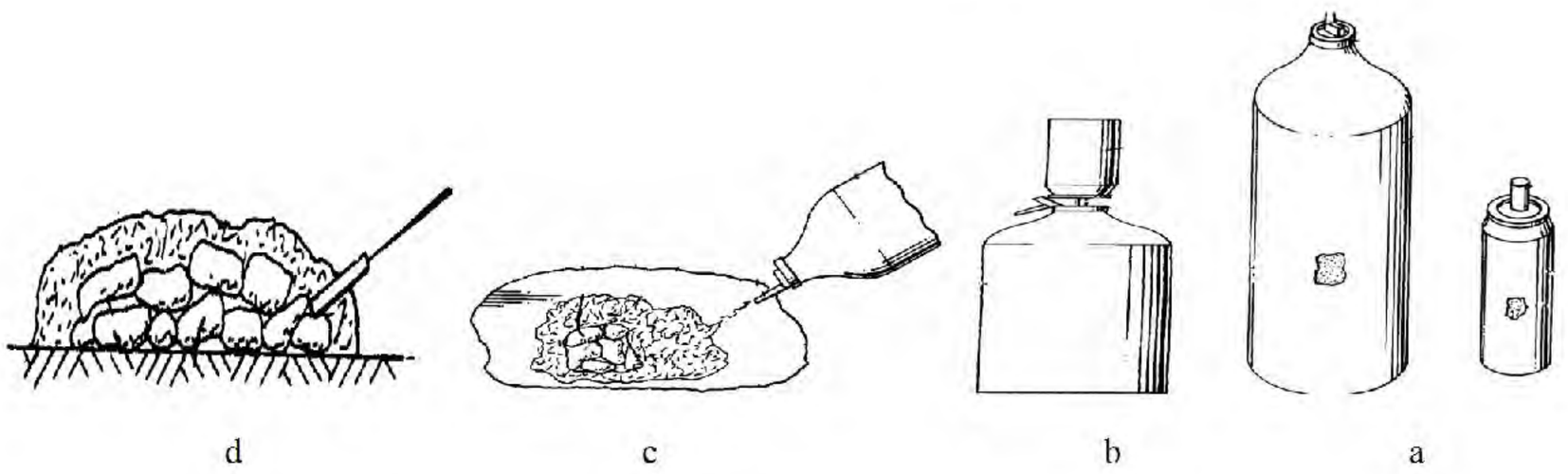
دو روش مهم برای تهیهٔ مادهٔ منفجرهٔ فوم شونده وجود دارد:

الف) روش هوا سفت کن

ب) روش ایجاد حباب شیمیایی



شکل ۱- نحوهٔ به‌کارگیری و نتیجهٔ عمل فوم‌های انفجاری بر روی سطوح اجزاء ساختمانی
a) قرار گرفتن آغازگر بر روی لایهٔ منفجر شونده و استقرار این لایه بر روی سطح مورد نظر
b) تولید محصولات و امواج انفجار در اثر عمل انفجار
c) انهدام کامل سطح



شکل ۲- مراحل تهیهٔ فـوم انفجاری و به‌کارگیری آن در انهدام مهمات عمل نکرده جنگی
a) ظروف حاوی محلول آماده فوم و پیشرانه هیدروکربنی (پروپـان مـایع)
b) تزریق پیشرانه در محلول آماده فوم
c) خروج فوم تشکیل شده در ظرف، برای انهدام مهمات منفجر نشده
d) انفجار فوم به کمک آغازگر و انهدام مهمات عمل نکرده

در روش هوا سفت کن، محلول مادهٔ منفجره در حلال آلی یا محلول پلی‌استر(رزین) با عامل اصلاح کننده و تسریع کننده، مخلوط شده و بهم زده می شود. سپس هوای فشرده شده، در محفظهٔ ایجاد کف به مخلوط به دست آمده دمیده شده و فوم تشکیل می‌گردد. فوم انفجاری مشبک و سفت، بعد از یک ساعت به دست می‌آید.

در روش حباب شیمیایی، مادهٔ منفجره، به صورت محلول اشباع یا ویسکوز در می‌آید و با رزین پلی‌استر یا آلکیدپراکسید ژل شده در حضور عامل تسریع کننده، به میزان ۱۰ تا ۳۰٪ حجمی مخلوط می‌شود و سپس ۱۰ تا ۳۰٪ حجمی، عامل ایجاد حباب شیمیایی نظیر دی‌آزوآمینوبنزن یا تولوئن‌دی‌ایزوسیانات به آن افزوده می‌شود. مخلوط حاصل، بهم زده شده و در قالب‌ها قرار می‌گیرد و در دمای $120\ ^{\circ}C$ حرات داده می‌شود [۲۰].

۳. فوم‌های انفجاری هیدروژل

فوم‌های هیدروژل، از هگزامین‌دی‌نیترات تهیه می‌شوند. هگزامین‌دی‌نیـترات از محلول هگزامین و اسید نیتریک در دمای کمتر از $30\ ^{\circ}C$ به دست می‌آیـد و در اثر مخلوط کردن بـا نمـک‌هـای اکـسیژن‌دار و سـایر افزودنـی‌هـا، فـوم انفجاری هیدروژل ساخته می‌شود [۲۱]. فوم‌های انفجاری هیدروژل، به طور ویژه در انفجار معادن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۱].

۴. فوم‌های انفجاری امولسیونی

در تهیهٔ فوم انفجاری امولسیون آب در روغن، یک معرف شیمیایی‌گازی بلافاصله قبل ازاستفاده کردن ترکیب به عنوان مادهٔ منفجره، به امولسیون اکسیژن‌دار اضافه می‌شود [۱۲]. داشتن عامل فوم ساز، انفجار فوری، قابلیت ذخیره سازی طولانی و هزینهٔ پائین در تولید نسبت به مواد مشابه، از ویژگی‌های فوم انفجاری امولسیونی نیترات محسوب می‌شود [۶، ۱۰، ۱۱ و ۲۲]. مکانیسم تهیهٔ فوم‌های‌شیمیایی امولسیونی انفجاری از موادی مانند آب، سدیم نیتریت و آمونیم نیترات، طی آزمایش‌های زیاد در pH و دماهای مختلف توضیح داده شده است [۲۳].

ترکیباتی‌که شامل ۴۰ قسمت وزنی آمونیوم نیترات در آب، ۶۰ قسمت امولسیون پایدار با ویسکوزیتهٔ بالا و ۰/۱الی ۱ قسمت عامل فوم‌ساز و مقاوم در مقابل ذخیره سازی هستند، به عنوان فوم‌های انفجاری برای معادن سنگ، صید و میادین مین استفاده می‌شوند [۲۴]. فوم‌های انفجاری امولسیونی را می‌توان با فناوری جدید که در آن، فوم‌سازی خیلی سریع انجام می‌شود، تولید کرد. در این فناوری، خاصیت انفجاری محصولات، بهبود یافته و فرآیند ساده‌تر شده است و نتیجهٔ کار مطلوب و رضایت بخش می‌باشد [۲۵و۲۶].

فوم‌های انفجاری حساس و سرعت زیاد امولسیونی را می‌توان با افزودن فلز قلیایی یا محلول نمک آن، ترکیب آلی حاوی‌گروه آمینو به عنوان عامل فوم‌ساز و اسید معدنی به عنوان کاتالیست تهیه کرد [۲۷].

اصول فرآیند، تکنیک‌های‌کلیدی و نیز امکانات لازم در روش پیوستهٔ تولید فوم‌های انفجاری امولسیونی و همچنین اجزاء مواد منفجرهٔ امولسیونی، استفادهٔ آنها و جنبه‌های ایمنی‌کار، توسط شرکت‌های شیودو آیرون (Shoudu Iron) و استیل (Steel) کشور چین مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۲۸].

امواج انفجار حاصل از گاز میادین نفتی و گاز محبوس شده در لوله‌ها، برای یافتن ارتباط بین سرعت انفجار و اندازهٔ حباب‌های فوم، مقایسه شده اند. همینطور، پارامترهای اصلی انفجار در دو محیط ذکر شده و انتقال حالت بین سوختن و انفجار فوم (DDT: Deflagration-To-Detonation Transition) بررسی شده است. گاز منفجر شونده، شامل اتیلن و اکسیژن است. در مخلوط‌های حاوی۱۶ الی ۴۰٪ سوخت که در آنها فرآیند DDT، آنی می‌باشد، درجهٔ پائینی از سرعت انفجار به دست آمده است. در این غلظت، تفاوت در اندازهٔ حباب‌های فوم، تغییر چندانی در سرعت انفجار نشان نمی‌دهد. همواره یک اندازهٔ بحرانی برای حباب وجود دارد که با زمان DDT برابر است. برای اندازه‌های بزرگتر حباب، زمان DDT کاهش می یابد و اندازهٔ بحرانی حباب فوم باکاهش مقدار سوخت در مخلوط، افزایش پیدا می‌کند [۲۹].

۵. چگونگی‌کاربرد فوم‌ها برای پاک سازی معابر، گذرگاهها و مناطق مین‌گذاری شده

از مهمترین کاربردهای فوم‌های انفجاری، پاک سازی معابر و گذرگاههای نواحی مین‌گذاری شده می‌باشد. مواد منفجرهٔ قابل انعطاف، به وسیلهٔ وسایلی مانند راکت در مکان‌های مورد نظر رها می‌شوند و پاک سازی با موفقیت به انجام می‌رسد. مادهٔ منفجره، ممکن است شامل یک گاز قابل انفجار باشد. با وجود این، نظر به پیچیدگی ها و خطراتی که در استفاده از یک گاز وجود دارد، استفاده از فوم انفجاری یا پودر پخش شده در گاز(آئروسل)، ترجیح داده می‌شود. هوا یکی از این گازها است که تحت فشار بالا یا به صورت مایع شده در کپسول‌ها با ایمنی مناسب، قابل ذخیره کردن وحمل و نقل است.

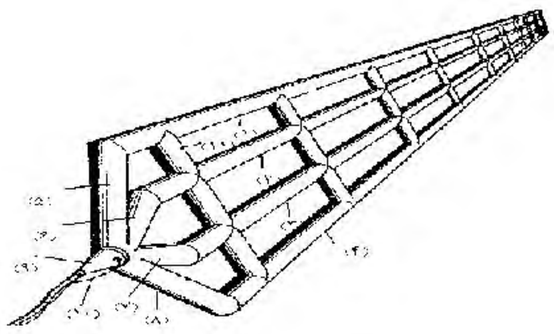
بطورکلی، در مورد ترکیبات انفجاری رایج از نوع سوخت و هوا نیز می‌توان گفت که وقتی یک مخلوط چند جزئی به عنوان مادهٔ منفجره استفاده می‌شود، اجزاء تا قبل از به‌کارگیری با هم مخلوط نمی‌شوند. به منظور ایمنی در حمل و نقل، یکی از گازها می‌تواند هوای فشرده باشد که در گازی مانند استیلن برای تشکیل یک مخلوط گازی منفجر شونده تزریق می‌شود. این کار، حمل اکسیژن را در سیلندرها بی‌نیاز می‌کند و لذا ایمنی حمل و نقل را بالا می‌برد. برای پاک سازی معابر مین‌گذاری شده، می‌توان از مواد مختلفی از جمله گاز منفجر شونده، مخلوط گازها، مخلوط گاز و مایع و یا مواد جامد استفاده کرد. مادهٔ منفجره شامل مقدار زیادی سوخت است که بعد از انفجار اولیه، به طور ناگهانی و سریع با اکسیژن‌هوا واکنش داده و انفجار ثانویه را ایجاد می‌کند. آنچه در انفجار اول واکنش نداده است، در انفجار دوم وارد عمل می‌شود. یک روش ساده و موفق در به‌کارگیری مادهٔ منفجره برای معابر، پخش مادهٔ منفجره به کمک تجهیزات پروازی، موشک‌ها و پرتابه‌ها است.

مادهٔ منفجرهٔ پخش شده، در اثر مخلوط شدن با اکسیژن هوا، منجر به یک مخلوط منفجره می‌شود که بلافاصله به دنبال انفجار آغازگر، بر روی مسیر مین‌گذاری شده، منفجر شده و باعث پاک‌سازی می‌گردد. معایب این روش، تشکیل قطراتی از مایع، حباب‌هایی از فوم یا تجمع مواد جامد توزیع شده در گاز، در حین فرو ریختن سریع مادهٔ منفجره بر روی زمین می‌باشد. ممکن است حرکت گازها در هوا باعث تغییر موقعیت انفجار شود.

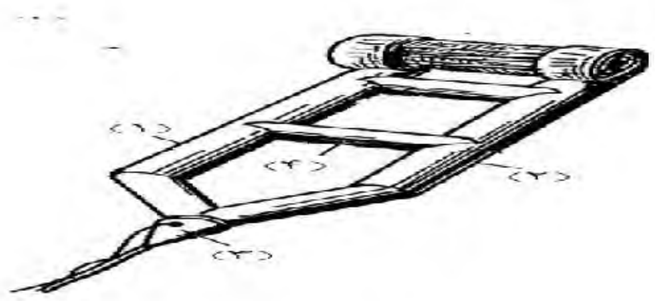
برای رفع این عیب، می‌توان از تیوب‌های انفجاری بهره جست. این تیوب‌ها به تعداد مختلف و به صورت موازی و مورب به یکدیگر متصل می‌شوند. برای پاک‌سازی مسیر تانک‌ها، تعدادی از این تیوب‌ها که هر کدام ۱۰۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر قطر دارند و فاصلهٔ آنها از یکدیگر ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌متر است، با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. تیوب‌ها با گاز یا فوم‌های قابل انفجار، پر شده و همراه آغازگر انفجار، روی معابر و مسیرهای دارای مین قرار می‌گیرند.

تست‌های میدانی زیاد نشان داده است که اگر تیوب‌ها حتی در فاصلهٔ بالاتر از زمین منفجر شوند، باز هم عمل پاک‌سازی میسر است. شمای تیوب‌های انفجاری و نحوهٔ به‌کارگیری آنها، در شکل‌های ۱- ۳ تا ۶-۳ ملاحظه می‌گردد. همانگونه که در شکل‌های ۱-۳ تا ۴-۳ دیده می‌شود بین تیوب‌های طولی، تیوب‌های عرضی و مورب قرار گرفته اند که در تعداد و نحوهٔ اتصال به هم، متفاوت هستند و در هر کدام از آنها، سیم انفجار و آغازگر به دهانهٔ تیوب متصل می‌شوند. شکل ۴-۳، حالتی را نشان می‌دهد که تیوب بر روی زمین و تانک بر روی آن قرار گرفته است. بعد از پر کردن تیوب با فوم انفجاری، لایه‌های تیوب بر روی میدان‌ها و یا مسیرهای مین‌گذاری شده قرار می‌گیرند. شکل ۵-۳ نیز یک موشک کنترل از راه دور را نشان می‌دهد که مجهز به نازل برای اسپری کردن فوم منفجره است. این پرتابه در مدت پرواز، لایه‌های فوم را بر روی مسیرهای مین‌گذاری شده اسپری می‌کند و سپس، انفجار فوم‌ها شروع می‌شود. شکل ۶ ۳، نوع دیگری از پخش فوم منفجره را نشان می‌دهد که ظرف حاوی مواد فوم‌ساز توسط وسیلهٔ نقلیه حمل می‌شود. در این روش، فوم از بالای وسیلهٔ نقلیه چه در حال حرکت و چه در حال سکون، قابل پخش شدن است [۳۰].

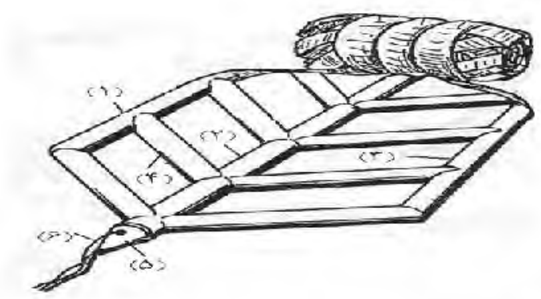
توسعهٔ نیترومتان با دانسیتهٔ پایین، منجر به تولید فوم انفجاری مایع (Lexfoam: Liq. Explosive Foam) شده است. این نوع فوم به منظور انفجار مین‌های کار گذاشته شده در زمین و مهمات منفجر نشده و عمل نکرده استفاده می‌شود. اجزاء تشکیل دهندهٔ فوم انفجاری مایع، در محل به‌کارگیری، با هم ترکیب می‌شوند که این امر، منجر به حمل و نگهداری آسان، ایمنی بالا و مشکلات کمتر می‌گردد. این نوع فوم ها جانشین مناسبی برای مواد منفجره TNT و C_4 در انفجار مین های عمل نکرده هستند. دانسیته فوم بر حسب دمای محیط از ۰/۲ تا ۰/۴ افزایش می یابد. سرعت انفجار نیز بر اساس میزان پیشرانه مایع (در شرایط تحت فشار) از ۳۸۰۰ تا ۴۲۰۰ متر بر ثانیه متغیر است.



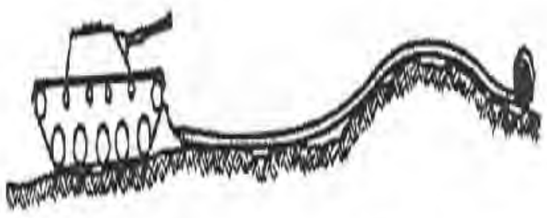
شکل۳-۱- چهار تیوب موازی که با تیوب‌های افقی به‌هم متصل شده اند و قابل پر شدن با فوم‌های انفجاری هستند



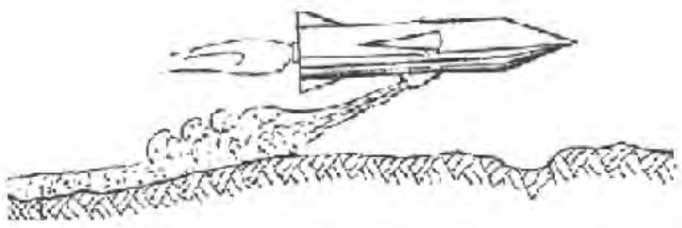
شکل۳-۲- دو تیوب موازی که با تیوب‌های مورب به‌هم متصل شده اند



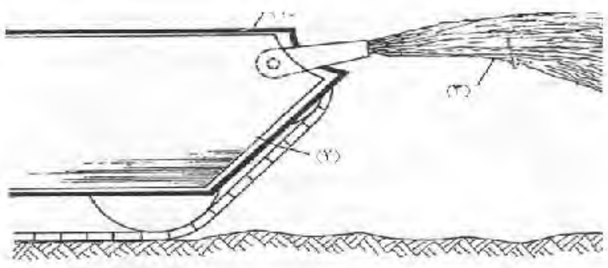
شکل ۳-۳- سه تیوب موازی متصل شده با تیوب‌های مورب



شکل ۳-۴- تیوب‌های انفجاری مستقر بر روی مسیرهای مورد نظر



شکل ۳-۵- موشک پخش‌کنندهٔ فوم انفجاری



شکل ۳-۶- پخش فوم انفجاری از داخل ظرف قرار گرفته بر روی یک وسیلهٔ نقلیه

بر پایهٔ ایـن داده‌هـا و نتـایج بـه دسـت آمـده از آزمـایش‌هـای انجـام شـده برای‌تعداد زیادی از مین‌هـای ضـد نفـر و ضـد تانـک، فـوم انفجـاری مـایع بـا دانـسیتهٔ $0/5\ g/cm^3$ و ضـخامت $5\ cm$ مطلـوب مـی‌باشـد. از بـین بردن خطرات ناشـی از مـین بـه میـزان ۱۰۰٪ ، ایمنـی، بـه‌کـارگیری سـهل و آسـان، انهـدام مـوثر مهمـات، سـادگی سیـستم و تجهیـزات مـورد استفاده در طول عملیـات پـاک‌سـازی مـین‌هـای ضـد نفـر، از ویژگـی‌هـا و مزایـای فـوم‌هـای انفجـاری مـایع مـی‌باشـد. ایـن تکنیـک در بوسـنی هرزگـوین، کـامبوج و دیگـر نقـاط جهـان بـرای مـین زدایـی از منـاطق جنگی مورد استفاده قـرار گرفتـه و مقولـه فـوم انفجـاری بـه مرحلـه تولیـد صنعتی نیز رسیده است.

اجزاء اصلی فوم انفجاری مایع عبارتند از نیترومتان (۹۰-۸۰٪)، استاریل الکل پلی اتوکسیلات (۴-۳٪)، اکتانول یا استاریل الکل (۳-۲٪) و پروپان مایع (حدود ۵٪). این اجزاء در ظرف تحت فشاری به هم مخلوط شده و با گاز ازت تحت فشار ۱۰ اتمسفر قرار می گیرند. سیستم های پاشش فوم های انفجاری در سال ۱۹۹۵ تکوین شدند. سیستم های پاشش عملیاتی می توانند ۱۵ کیلوگرم فرمولاسیون اولیه فوم را حمل کنند و وزن کل آنها به ۳۵ کیلو گرم می رسد. تنها مشکل این سیستم، وزن نسبتاً سنگین آن و خرطوم پاشش طویل (حدود ۲/۵ متر) است. به همین دلیل سیستم های پاشش سبک، قابل حمل و دستی توسط نفر نیز به بازار عرضه شده است. نمونه های تجاری فوم های انفجاری و نیز کاربرد آنها بر روی مین ضد نفر و ضد تانک در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده اند.

فوم انفجاری مایع همانند مواد منفجرهٔ معمولی در کارهای‌تروریستی استفاده نمی‌شود [۳۱]. برخی از فوم‌های انفجاری امولسیونی، برای انفجار صخره‌ها و معادن ذغال سنگ مناسب می‌باشند [۱۱،۱۰و۶]. از این نوع فوم‌ها برای برش و شکافتن نیز استفاده می‌کنند [۱۳].

۶. نتیجه گیری

با توجه به خطرات و مشکلاتی که معمولاً در انفجار مین و مهمات منفجر نشده در مناطق جنگی وجود دارد و از آنجائیکه فوم‌های انفجاری، دارای کارآیی، سرعت عمل، صرفهٔ اقتصادی و ایمنی بالا در این زمینه می‌باشند، استفاده از این نوع فوم‌ها، نتیجه‌ای رضایت بخش در پی داشته است. تحقیقات و پژوهش‌های زیادی در خصوص فوم‌های انفجاری طی سال‌های اخیر صورت گرفته است.

با مطالعهٔ مراجع مختلف و بررسی فرمولاسیون‌ها، شیوه‌های به‌کارگیری و استفاده‌های مناسب از فوم‌های انفجاری، مشخص است که فوم‌های انفجاری مایع، کارآیی مؤثر در پاک سازی مین‌های کار گذاشته شده و مهمات عمل نکرده دارند. ویژگی به‌کارگیری آسان، سریع، ایمن و مقرون به صرفهٔ فوم‌های انفجاری از یک طرف و گستردگی زیاد مناطق آلوده به مین، تأکیدی بر مزیت‌های به‌کارگیری آن در پاک سازی مناطق از وجود مین‌ها نسبت به دیگر روش ها است.

شکل ۴– دو نوع نمونه تجاری دستی از فوم های مایع : قدیمی (بـه نـام LEXFOAM) و جدید (به نام NMX foam) واحدهای A و B به ترتیب محتوی ۵۰۰ گرم از ماده منفجـره مایع و ۶۰ گرم پیشرانه از نوع هیدروکربن (با نقطه جوش پایین) هستند و قبل از استفاده بـا هم مخلوط می شوند.

شکل ۵– فوم انفجاری پخش شده بر روی یک مین ضد نفر و یک مین ضد تانک روس

۷. مراجع

[1].Lingens, Paul; Radzewitz, Hubert., Ger 1, 930, 503, (1971).

[2]. Chrisp, Joseph D., Chemical Foaming Of Water-Bearing Explosives, Us 3,706,607, (1972).

[3]. Tomic, Ernst A., Chemical Foaming Of Water-Bearing Explosives With N,N'-Dimitrosopentamethylene-Tetramine, Us 3,713,919, 1973; *Chem. Abstr.*, 78, 126468n (1973).

[4].Cook, Melvin A.; Hagmann, Mark J., Explosive Compositions Containing Metallic Fuel Particles, Us 3,926,698, 1975; *Chem. Abstr.*, 84, 108035p (1976).

[5].Prest, David William; Yorke, William John., Chemical Foaming Of Emulsion Explosive Compositions, Ep 327,205, 1989; *Chem. Abstr.*, 112, 39294c (1990).

[6].Villamagna, Fortunato; Lee, Ming Chung; Chattopadhyay, Arun Kumar., Explosive Comprising A Foamed Sensitizer, Ep 514,000, 1992; *Chem. Abstr.*, 118, 24664g (1993).

[7].Grigaitis, Benedict J.; Holden, Harold W.; Matts, Terrence C.; Miskow, Maurice H.; Richard, Jean P.; Seto, Philip F. L., Stabilized, Air Bubble-Containing Explosive Compositions, Ger 2,507,572, 1975; *Chem. Abstr.*, 84, 62037k (1976).

[8].Cil Inc., Water-Containing, Cross-Linked, Thickened Explosive Agent, Pol 101,868, 1979; *Chem. Abstr.*, 93, 28783b (1980)

[9].Kobayashi, Michio; Okitsu, Toshihiro., Water-In-Oil Emulsion Explosives Having High Gas Volume, Excellent Stability, And Air Gap, Jp 01,148,777, 1989; *Chem. Abstr.*, 111, 198089n (1989).

[10].Wang, Shengzhen; Wang, Chengyu; Qin, Guangyi; Sun, Yuhua; Xiong, Daibin; Bi, Yan., Permissible Emulsion Explosive Sensitized By Organic Foaming Agent, Cn 1,036,942, 1989; *Chem. Abstr.*, 113, 81660s (1990).

[11].Wang, Shengzhen; Wang, Chengyu; Qin, Guangyi; Et Al., Emulsified Explosives Sensitized By Organic Foaming Agent For Rock Blasting, Cn 1,036,384, 1989; *Chem. Abstr.*, 113, 81661t (1990).

[12].Venter, Paul Nicolass., Explosive Compositions, S. African Za 88 01,683, 1989; *Chem. Abstr.*, 111, 157032v (1989).

[13].Bocksteiner, G., Characterization And Performance Evaluation Of Two Commercial Foam Explosives, *Tech. Note-Mater. Res. Lab. (Aust.)*, Mrl-Tn-533, 16 Pp., 1988; *Chem. Abstr.*, 110, 98228t (1989)(Eng).

[14]. Guilermo Silva, (Can.), Ultra Low Density Explosives Containing Expanded Polymer Foam With Flowable Hydrocarbon And Particulate Uncoated Oxidizers, Us 6,425,965, 2002; *Chem. Abstr.*, 137, 127191r (2002).

[15]. Lubke, Gunther., Plastic Foaming With Chemical Propellants. Propellant Mixtures Determine Quality, *Kunststoffe-Synthetics*, 2, 15-17, 2002; *Chem. Abstr.*, 136, 341591u (2002)(Ger).

[16]. Zuliang, Liu; Zhiwen, Ye; Bingchen, Hu; Yilin, Wang., Study On Multifunctional Composite.Expanding Agent Of Ammonium Nitrate, *Proc. Int. Pyrotech. Semin*, 26, 334-343, 1999; *Chem. Abstr.*, 134, 282894d (2001)(Eng).

[17]. Bickes, Robert W., Jr.; Bonzon, Lloyd L., Removal Of Surface Layers Of Construction Materials By Application Of Foamed Explosives, Us 6,438,191, 2002; *Chem. Abstr.*, 137, 171939q (2002)(Eng).

[18].Ma, Zhong – Liang; Wang, Zhi – Qiang; Liu, Youping; Xiao, Zhong – Liang., Study On The Combustion Property Of Foamed Case Less Ammunition, *Huabei Gongxueyuan Xuebao*, 23, 157-160, 2002; *Chem. Abstr.*, 137, 372215z (2002)(Ch).

[19].Trocino, Joseph, Two-Component Disposable Hand-Held Delivery System For Dispensing Explosive Foam Field Detonation Of Exploded Ordnance, Us 6,112,633, 2000; *Chem. Abstr.*, 133, 195589u, (2000).

[20].Howard J. Stark, Arlington, Va., Low Density Cellular Explosive Foam And Products Made There From,Us 2,845,025, 1958.

[21]. Beitia Gomez De Segura, Fernand; Andrio Zabala, Juan Antonio; Gonzales Ocejo, Agustin., Explosive Composition Of The Hydro Gel Type And Process For Its Manufacture, Es 2,074,953, 1995; *Chem. Abstr.*, 125, 225972t (1996)(Span).

[22]. Wang, Liwen; Gao, Senke; Zhang, Yingjie., Rapid Chemical Foaming Sensitization Of Emulsified Explosives, *Baopo Qicai*, 25, 13-14, 1996; *Chem. Abstr.*, 126, 133210k (1997)(Ch).

[23]. Tang, Qiuming., High Temperature Chemical Foaming Of Emulsion Explosives, *Baopo Qicai*, 23, 7-11, 1994; *Chem. Abstr.*, 122, 110180d (1995)(Ch).

[24].Okitsu, Toshihiro; Suzuki, Atsushi; Yoshizawa, Satoshi., Heavy Anfo Explosive Compositions, Jp 07,144,990, 1995; *Chem. Abstr.*, 123, 174403g (1995).

[25].Li, Guozhong; Wang, Xuguang., New Technology Of Fast Foaming Without Followup Effect Used In Production Of Emulsion Explosives, *Kuangye (Beijing)*, 4, 1-5, 10, 1995; *Chem. Abstr.*, 124, 33106w (1996) (Ch).

[26].Guozhong, Li.; Xuguang, Wang., Foaming Technology For Production Of Emulsion Explosive Having Reliable Detonation Property, *Proc. Beijing Int. Symp. Pyrotech. Explos., 3rd*, 180-5, 1995; *Chem. Abstr.*, 124, 347524y (1996)(Eng).

[27]. Wang, Chunle, Chang, Xinyan; Yin, Yishum; Sui, Xiangbing; Liang, Jingang., Quick Chemical Foaming Sensitizing Method For Emulsive Explosive, Cn 1,127,239 1996; *Chem. Abstr.*, 131, 159430k (1999).

[28]. Ming, Jinggu; Zhang, Dengtai; Wang, Wenshu., Continuous Emulsifying System Of Emulsion Explosive With Chemical Foaming Agent, *Proc. Symp. Explos.*, 13, Vii57-Vii63, 1986; *Chem. Abstr.*, 109, 112941h (1988)(Eng).

[29].Hasson, Abraham; Siman, Menachem; Burcat, Alexander., Detonation Waves Through Foam, Symp. (Int.) Combust, (Pub. 1989), 22 Nd, 1751-6, 1988; Chem. Abstr., 111, 80914z (1989)(Eng).

[30]. Messerschmity Bolkow Blohm, Ger 1,259,319, (1969).

[31].Anderson, John; Trocino, Joseph; Murray, Steven., Proc. Annu. Conf. Explos. Blasting Tech., 24, 163-179, (1998) (Eng).