

恐怖份子所用液體炸藥之探討

孟憲輝

中央警察大學鑑識科學系教授

摘要：本文探討恐怖份子可能使用的液體炸藥，根據成分和爆炸特性之不同，列舉常見的液體炸藥，介紹其基本特性和可能被使用之情況，並簡述晚近特別常被恐怖份子濫用的 TATP 之先進檢測技術和鑑識方法。各種液體炸藥分成單一成分液體炸藥、二元爆炸物和有機過氧化合物等三種類型，本文分別舉常見者加以介紹。部分液體炸藥有容易取得或合成製造簡易之特性，有的則在外觀上便於隱藏或偽裝成日常用品，另有些液體炸藥或其原料之化學成分和傳統爆炸物差異甚大，不易由常用的隱藏爆炸物檢測方法偵檢得知，故常被恐怖份子用來在公共場所和大眾運輸工具上製造爆炸事件。期望本文能引起情報治安機關、執法人員和鑑識人員的注意，正視利用液體炸藥製造恐怖攻擊之潛在威脅，投入資源研究各種防制之道，建立完善的預防和處理機制，加強人員訓練並建置有效的預防、檢測、處理和鑑識設備與方法。

關鍵字：恐怖分子、液體炸藥、二元爆炸物、有機過氧化物、爆炸物鑑識

綱要

壹、前言

貳、液體炸藥

參、結論

壹、前言

近年來國際恐怖攻擊活動頻繁，世界各國人人自危。雖然核子武器、生物戰劑和化學武器攻擊都是最令人擔憂，也是各國極力研究防制之道的恐怖攻擊類型，但基於各種現實條件之限制，恐怖份子採取核生化攻擊的實際案例並不多見。以各種「急造炸彈」(improvised explosive devices, IED)進行攻擊反而是最常見，且歷久不衰的恐怖攻擊類型。2006年8月10日，英國政府宣布逮捕數名企圖以液體炸藥攻擊航空班機的恐怖份子，他們計畫將爆炸物偽裝成一般液體帶上飛機，在大西洋上空炸毀客機。由於此一事件，美英兩國立即警告所有旅客，禁止在手提行李中攜帶任何液體，禁帶的液體包括：髮膠、洗髮精和飲料等旅客經常隨身攜帶的物品。顯然易於取得、偽裝、隱藏、使用及處理的液體炸藥已成為恐怖份子的新類型武器。究竟什麼是液體炸藥？常見的液體炸藥有哪些？都是負有國家安全、預防犯罪、偵查犯罪和物證鑑識的相關人員所必須徹底瞭解的。

爆炸物是一種固體或液體的化合物或混合物，於無外在氧化劑之情況下，經適當之刺激，可引起極快速之化學反應，瞬間產生大量之熱能和氣體，使周圍環境之溫度和壓力驟升，以產生巨大之能量和破壞作用。由於其強大之破壞作用，爆炸物常用於軍事目的、執法勤務、採礦業、土木工程、建築業和工業，恐怖份子或一般犯罪人也常使用爆

炸物從事恐怖活動或一般犯罪行爲，對社會治安和國家安全造成衝擊與威脅，故值得情報及治安人員深入探討。一般而言，爆炸物爆炸時涉及之反應爲氧化反應及裂解反應；除了行純裂解反應之爆炸物之外，爆炸物若爲混合物，需含燃料和氧化劑兩種成分；若爲純物質，則需同時含可供爲燃料之官能基和可裂解提供氧氣之官能基。有些物質雖和空氣混合時可造成爆炸，如麵粉及汽油，但爆炸時需外來氧氣，並非爆炸物。另有些物質可在不涉及化學反應之情況下爆炸，此類物質也非爆炸物，如將乾冰或液態氮置於密閉容器中，加熱後可引起爆炸，爆炸係由於乾冰昇華或液氮蒸發轉換成氣體，在狹小容器內壓力升高而導致爆炸，故乾冰和液態氮都不是爆炸物。爆炸時僅產生純裂解反應之爆炸物，爆炸時不需氧化劑，故不需氧化劑或可提供氧氣之官能基，如疊氮化鉛。有些爆炸物爆炸時雖產生大量熱能，但並不產生氣體產物，如乙炔化亞銅(Cu_2C_2)爆炸時裂解產生固體之銅和碳，僅釋放出熱能，並無氣體產物。

由上述可知，爆炸物並非如一般認爲的必定是固態物質，液體炸藥也非新穎的產物。只因固體爆炸物較易運送、儲存、處理與使用，故使用較爲廣泛。一般而言，液體炸藥並無明確的定義，只要外觀呈液體狀態，經過處理或引爆後可產生爆炸反應的物質都概稱爲液體炸藥。故可再分成數類：第一類是常溫下爲液體的單一成分爆炸物，例如硝化甘油和二硝基乙二醇；第二類是一種非爆炸物之液體和另一種非爆炸物之液體或固體，經均勻混合即可變成液體炸藥之組成，稱爲二元爆炸物(binary explosives)。常見的二元爆炸物的一個成分爲氧化劑，另一則爲還原劑（燃料），且爲便於混合通常至少有一個成分是液體，如硝酸和硝基苯(nitrobenzene)之組合，或硝基苯和氰酸鉀之組合；第三類是數種液態之原料，經混合攪拌即可合成爆炸物者，如丙酮、過氧化氫溶液和硫酸，低溫環境下混合攪拌可合成 TATP 爆炸物；有時將固體爆炸物溶解或懸浮於液體中使成爲液態，也稱爲液體炸藥。

1994 年 12 月 11 日菲律賓航空飛往東京的 PAL 434 次班機上發生爆炸案，炸死一名乘客，事後發現歹徒是美國當局列名的蓋達組織恐怖份子 Ramzi Yousef，他以假名登上飛機，將液態的硝化甘油偽裝成隱形眼鏡清潔液帶上飛機，製造小型炸彈後引爆，目的在測試他預計於 1995 年 1 月在 11 班往美國的班機上使用的炸彈之性能，在 PAL 434 班機上之炸藥使用量只有預備於 1995 年使用者的十分之一。1987 年韓國航空 KAL 858 班機被炸事件中，使用的炸藥包括塑膠炸藥 C4 和液態炸藥 PLX，PLX 是由硝基甲烷和乙二胺(ethylene diamine)兩種液態化合物所混合而成。由以上兩例可知，液態炸藥的確曾被恐怖份子用來從事恐怖活動，並非僅是杞人憂天的想像情節。本文將就常見之液體炸藥做一簡述，以提供相關基本知識，促使提高警覺，重視液體炸藥的潛在威脅。

貳、液體炸藥

爆炸物爲單一化合物或混合物，依化學性質分類，可分成無機爆炸物和有機爆炸物，常見的無機爆炸物包括含硝酸鹽、氰酸鹽、過氰酸鹽、疊氮鹽、雷酸鹽等化合物，金屬乙炔化物，無機過氧化物和四唑類(tetrazole)爆炸物等。有機爆炸物則可依官能基之不同分成芳香族硝基化合物(aromatic nitro compounds)、脂肪族硝基化合物(aliphatic nitro compounds)、硝酸酯(nitrate esters)、硝胺(nitramines)和有機過氧化物(peroxides)等。雖然

大部分液體炸藥都在上述種類之內，但有部分液體炸藥係利用氧化劑和還原劑混合而成，其部分主成分並不在前述化合物之列。液體炸藥因流動性好、密度均勻、可隨環境任意改變形狀、並可滲入被炸物體之縫隙。其攜帶、儲存、運送和處理也都方便。某些液體炸藥甚至可比等量的黃色炸藥(TNT)釋放出更巨大之能量，爆炸威力大，可應用於裝填地雷、航空炸彈、炸掃地雷、開闢隧道、開採礦產、移除土石、挖掘工事和掩體等用途，工業上也可用於金屬的爆炸加工，用途極為廣泛。但液體炸藥也具有揮發性大、安定性差而不耐久存、腐蝕性強以及某些組成成分具有毒性等缺點，因此在軍事武器或執法勤務上的用途較為罕見。

一、單一成分液體炸藥

1. 硝化甘油(nitroglycerin, NG)

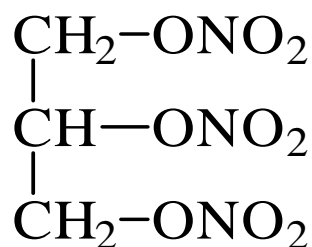
硝化甘油為最常見的單一成分液體炸藥，屬硝酸酯化合物。於 1846 年首先由義大利化學教授 Ascanio Sobrero 所合成，合成時係在低溫環境下，邊攪拌邊將甘油滴加入提濃之硫酸和硝酸混合液中。硝化甘油為無色、無嗅之黏稠液體，嚐之則有燒灼甜味，放置一段時間後呈淡黃色。硝化甘油之含氮量高達 18.5%，且為富氧型爆炸物，所含之氧超過將所含之碳和氫完全氧化所需之氧原子數量，爆炸時除產生一氧化碳、二氧化碳和氣體水分子外，尚釋放出氮氣，室溫下釋放之氣體體積極為原始體積之一千兩百倍，高溫下其壓力更大，故為爆炸威力極大之炸藥。

硝化甘油因揮發性高容易在液體內形成大量微氣泡，且因黏滯性高導致氣泡不易上升消散，一旦受到衝擊，氣泡絕熱壓縮，氣泡周圍溫度瞬間升高至爆炸臨界溫度，成為引發爆炸反應之熱點(hot spot)，因此極為敏感。由於其對衝擊、摩擦極為敏感，需與其他液體混合或吸附於其他固體，以防止微氣泡之產生，才能安全使用，例如代拿邁(dynamites)和雙基無煙火藥。硝化甘油之敏感度隨溫度降低而減小，於 13.2°C 凝固成固體；固態硝化甘油之衝擊敏感度較液態者低，但摩擦敏感度則增加，其乃因結晶化之固態硝化甘油易形成晶粒間摩擦、結晶缺陷摩擦等熱點，誘發熱點效應之故。溫度升高至 50-60°C 時，硝化甘油開始分解，至約 135°C 液體因吸附含氮氣體分解產物而變成紅色，145°C 時呈沸騰狀態，升高至 218°C 則引起爆炸。硝化甘油可以任何比例溶於甲醇、乙醚、丙酮、乙酸乙酯、冰醋酸、苯、甲苯、酚、氯仿和二氯甲烷等常見有機溶劑，於 20°C 時 100 公克之無水酒精可溶 54 公克之硝化甘油。硝化甘油具毒性，揮發性高，可經呼吸、口部或皮膚攝入體內，造成毒害，其症狀為頭痛、心悸、血壓降低、暈眩、嘔吐、心跳減弱等。欲銷毀之硝化甘油，可與氫氧化鉀之酒精溶液一同煮沸加以銷毀。

另有合成硝化甘油時甘油之三個醇基僅一個被硝化成硝酸酯的單硝基甘油(mononitroglycerin)和兩個醇基被硝化成硝酸酯的雙硝基甘油(dinitroglycerin)，也都是液體炸藥，雙硝基甘油為無色、無嗅之油狀液體，比硝化甘油更黏稠、更易揮發，可溶於水，亦可溶於酒精、乙醚、丙酮和氯仿，但較不易溶於苯，對衝擊僅較硝化甘油略不敏感，故單獨使用時仍極為危險。單硝基甘油為無色油狀液體，可以任何比例溶於水和酒精，微溶於乙醚，對衝擊不敏感。

Dinitrochlorohydrin 是甘油之三個醇基一個被氯取代、另兩個硝化成硝酸酯的黃色或棕色液體炸藥，其製備遠較硝化甘油安全。由於其極難凝固，故在歐洲常被用以與硝

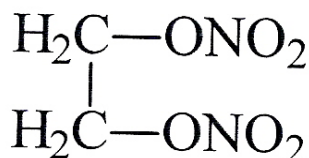
化甘油混合為抗凍爆炸物。Dinitrochlorohydrin 對衝擊遠較硝化甘油不敏感，且點火後只緩慢燃燒而不爆炸，故可單獨安全使用。硝化甘油之化學結構式如圖一所示。



圖一 硝化甘油之化學結構式

2.二硝基乙二醇(ethylene glycol dinitrate, EGDN)

EGDN 是透明無色之液體炸藥，屬硝酸酯化合物，合成方法與硝化甘油類似。其撞擊敏感度低於硝化甘油，加熱至 114°C 即引起爆炸，凝固點為零下 22.8°C，常與硝化甘油混合以製造耐低溫代拿邁。其毒性與硝化甘油類似，但較易揮發，故暴露其中可引發較嚴重之症狀。其於有機溶劑之溶解度類似硝化甘油，但於水之溶解度則較高。EGDN 之化學結構式如圖二所示。



圖二 EGDN 之化學結構式

3.硝酸甲酯(methyl nitrate)和硝酸乙酯(ethyl nitrate)

硝酸甲酯之分子式為 CH_3NO_3 ，其爆炸威力極強，為清澈無色之液體炸藥，黏滯性略低於水，揮發性極高，其蒸汽具強烈類似氯仿之味道，吸入後可導致頭痛。合成方式為碘化甲烷與硝酸銀之醇溶液共同加熱，或甲醇與濃硝酸在低溫下攪拌混合而成。硝酸甲酯爆炸威力稍強於硝化甘油，爆炸時可釋放出更多的能量，但因其極易揮發，無法正常使用，故作為正規爆炸物之實用價值不高。其於點火之敏感度大於硝化甘油，但衝擊敏感度則較低，極易燃燒，其蒸汽於溫度達 150°C 時發生爆炸。硝酸乙酯之分子式為 $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_3$ ，也是無色之液體炸藥，爆炸時僅釋放出硝化甘油 48% 之能量，其點火敏感度低於硝酸甲酯，衝擊敏感度低於硝化甘油。

4.硝酸異丙酯(isopropyl nitrate)和硝酸正丙酯(n-propyl nitrate)

硝酸異丙酯之分子式為 $\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{NO}_3$ ，是無色液體炸藥，屬硝酸酯化合物，敏感度低，常單獨用為火箭之液態推進劑，也曾用於噴射機引擎的啟動劑(starter)。硝酸正丙酯之分子式為 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NO}_3$ ，帶有醚般的芳香味，為較硝酸乙酯不敏感之液體炸藥。

5. 過氧化丁酮 (methyl ethyl ketone peroxide, MEKP)

常溫常壓下為無色油狀液態有機過氧化物，為高爆藥，其於衝擊和溫度之敏感度低於固體的 TATP（三過氧化三丙酮），儲存之穩定度也較高。TATP 非為液體，將於下文另詳述之。其稀釋溶液為合成聚酯樹脂之聚合反應之催化劑，對皮膚有刺激和腐蝕作用。有人推測，2006 年 8 月英國逮捕之恐怖份子可能就是打算使用 MEKP 來炸毀飛越大西洋的航空班機。過氧化丁酮之化學結構式如圖三所示。



圖三 過氧化丁酮之化學結構式

二、二元液體炸藥

1870 年代，Hermann Sprengel 首先將原非爆炸物之兩種化合物於使用前混合成爆炸物，通常一種是強氧化劑，另一則為燃料，此種作法可增加爆炸物運輸和儲存之安全性，同時降低運輸和儲存成本。為便於有效混合並增加兩者之接觸以提高爆炸速率，兩種化合物至少一種需為液體。Sprengel 建議使用硝酸、硝酸鹽、氯酸鹽為氧化劑，硝基苯為燃料，其他包括使用活性炭和液態氧混合之爆炸物，及燃油與硝酸銨混合之硝酸銨燃油炸藥（ANFO），此類炸藥通稱為 Sprengel 炸藥。20 世紀有許多公司又分別發展出多種二元爆炸物，其基本原理和使用方式與 Sprengel 炸藥類似，以下將分別一一描述。

1. Oxyliquit

Oxyliquit 係液態氧與適當燃料混合而成之二元爆炸物，常用之燃料有碳、有機化合物（如萘和煙煤之混合物）、木屑或鋁粉等。此等混合物之爆炸特性於 1895 年由德國之 Linde 教授發現，同時將其命名為 Oxyliquit。其製造簡單、便宜，可以導火索引爆，但須於將燃料浸入液態氧後 5 分鐘內引爆，否則氧氣將快速蒸發，超過 15 分鐘以上其爆炸威力即明顯降低。其另一缺點是一經混合，oxyliquit 對火花、衝擊和摩擦均十分敏感，甚至有自燃引爆之可能。

1899 年挖掘貫通阿爾卑斯山聯絡義大利和瑞士的 Simplon 隧道時，Oxyliquit 首次被大規模使用，使用方式係將浸過石油燃料的矽藻土於使用前與液態氧混合，或使用前將木炭浸入液態氧。由於製造液態氧需複雜龐大之機器設備，需求量夠大時使用 Oxyliquit 才符合成本。Oxyliquit 於第一次世界大戰期間曾在德國被大量使用，美國中西部礦場也大量使用至 1950 年代才被硝酸銨燃油炸藥所取代。Oxyliquit 也可能意外形成，如為客機添加液態氧時若濺溢至柏油路面，或運送液態氧之槽車發生意外而液態氧外洩至柏油路面，在氧氣完全蒸發前，柏油作為燃料吸附液氧而成為敏感易爆之爆炸物，極其危險。由於液態氧可以杜瓦保溫瓶(Dewar flask)安全攜帶，使用前將活性炭浸入即可變成爆炸物，雖早已不為工礦業所採用，但被濫用的可能性仍存在。

2. Panclastite

1881 年法國化學家 Eugene Turpin 所首次發明之二元爆炸物，氧化劑為四氧化二氮，燃料為二氧化硫，以體積比三比二之比例混合，其他如汽油、硝基苯、硝基甲苯、硝基甲烷均可做為燃料。由於其對衝擊非常敏感，不易處理，故在使用前才能混合。此外，四氧化二氮具高腐蝕性，且易和多種化合物接觸引爆，故雖其爆炸威力和爆速堪與黃色炸藥 TNT 相較，但目前已無使用者。1880 年代，德國曾試驗其為魚雷炸藥之可行性，兩種原料分別裝在玻璃容器內，魚雷發射後容器破裂，兩種原料即混合成炸藥。第一次世界大戰時，法國曾在部分空投炸彈中使用 Panclastite 炸藥，燃料與氧化劑分開裝填，炸彈投下後藉推進器導入氣流將兩成分混合，落地時即成為高爆藥，無須引爆裝置，撞擊地面即引爆；英國於二次大戰期間也曾在重型炸彈內裝填 Panclastite。

3. Astrolite

Astrolite 是一些工礦業用炸藥之商品名，1960 年代於研發火箭推進劑時所發明，常被錯誤誇大為世界上非核子爆炸物中威力最強之炸藥。又可分為 Astrolite G 和 Astrolite A 兩種，均為二元炸藥，氧化劑為硝酸銨，燃料則為聯氨(hydrazine, 肼)。硝酸銨(ammonium nitrate, AN, NH_4NO_3)是白色無味固體，無毒，化性穩定，對撞擊和摩擦均極不敏感，吸濕性高，常用為肥料。單一成分之硝酸銨爆炸威力不大，且難以引爆，故常用為混合爆炸物之氧化劑，如 Amatol、DBX、Ammonal 等軍用炸藥均含硝酸銨，許多工業用二級高爆藥也含硝酸銨，如硝酸銨燃油炸藥、乳膠炸藥和水膠炸藥等。聯氨為無色液體，易燃，有毒性，具腐蝕性，可當火箭燃料。

Astrolite G 為硝酸銨加入無水聯氨(anhydrous hydrazine)之二元炸藥，使用前才以二比一之重量比混合，硝酸銨和聯氨混合時發生反應形成氨氣和硝酸肼而成為透明之液態炸藥，其爆速可達近乎 TNT 爆速之兩倍。和其他二元爆炸物不同的是，混合後之穩定性較高，可持續其爆炸特性達四天以上。Astrolite A 為前述之 Astrolite G 再加入細鋁粉(直徑 100 mesh 以下)混合而成，混合時鋁粉與其他兩成分並不發生反應，雖其爆速降低，但整體密度增加，爆炸威力也增強。

4. Kinepak 及相關爆炸物

Kinepak 是一種二元炸藥之商品名，由液態的化合物硝基甲烷(nitromethane, CH_3NO_2) 和固體化合物硝酸銨(ammonium nitrate)於使用前混合而成，兩者分開裝於不同容器中，使用時將液體到入固體中，經 5 至 15 分鐘，液體即浸透固體使呈粉紅色，即成可以雷管引爆之高爆藥。硝基甲烷和硝酸銨分別都是不必以爆炸物之標準儲存和運送的化合物，硝基甲烷歸類為可燃液體(flammable liquid)，硝酸銨則歸類為氧化劑。

硝基甲烷是構造最簡單的有機硝基化合物，為略帶黏性之高極性有機溶劑，工業上用於有機合成、萃取、反應介質或清潔溶劑。也用於賽車燃料，因其燃燒時可分解出氧，不若碳氫化合物燃料需要大量的氧氣才能順利燃燒。硝基甲烷於 1872 年首先由 Kolbe 所合成，由於其非常不敏感，直到 1938 年才由 McKittrick 發現其爆炸特性。硝基甲烷之爆炸物特性在 1950 年代的一件意外事件中才為大眾所知，一列運送硝基甲烷之鐵路槽車，可能因為操作不當導致硝基甲烷內之微氣泡受到震動，引起氣泡之絕熱壓縮，進

而升高溫度誘發熱點效應，產生爆炸。純硝基甲烷非常鈍感，無法以雷管引爆，加入鹼以提高酸鹼值(pH)可增加敏感度。硝基甲烷也是貧氧型爆炸物，所含之氧於爆炸時不足以使所有的碳和氫完全氧化，故需要加入氧化劑以增強其爆炸威力。

硝基甲烷除了可與硝酸銨混合之外，也可加入加敏感劑成爲可以雷管引爆之二元炸藥，最常用之敏感劑爲胺類(amine)或多胺類(polyamine)，如二乙胺(diethylamine)、三乙胺(triethylamine)、乙二胺(ethylenediamine)和 1,4-氧氮六環(morpholine)，敏感劑具毒性，且兩者混合後數日即降解而喪失爆炸特性。二次大戰時期研發出許多以胺類爲敏感劑之硝基甲烷二元炸藥，1945 年 Ericksen 和 Rowen 列出十餘種硝基甲烷和胺類混合之炸藥及其爆炸特性。硝基甲烷也可加入非化學性，可抓住氣泡的物理性敏感劑，如塑膠或玻璃空心球和聚合物泡棉，使於遭受衝擊時形成熱點，但空心球會降低密度，進而降低爆速，且空心球不參與爆炸反應，一定體積的爆炸物所釋放之能量也因而減少。此外，空心球易上浮而喪失爆炸特性，故硝基甲烷需加入膠化劑以保持其性能，加入膠化劑尚可增加爆壓。

硝基甲烷、硝基乙烷和硝基丙烷等 nitroparaffins 化合物也可加入鋁顆粒當作燃料形成二元炸藥，鋁顆粒之直徑一般在 1/64 到 1/4 英吋之間，鋁顆粒外表尚可塗附一層硬脂酸，使具避水性，並可使其表面抓附微氣泡而增加爆炸物之敏感度。

有時含硝基甲烷之炸藥也可能加入膠化劑(gelling agent)使成爲半固體狀或膠狀，膠化處理可增加炸藥密度，進而提高爆壓，但也降低了液體炸藥特有之適應不同形狀容器及和多孔隙爆炸標的密合之特性。

5. Binex

是一種二元炸藥之商品名，由過氯酸鈉之水溶液和鋁粉所組成，前者爲氧化劑，後者爲燃料，兩者混合後即形成可以雷管引爆之炸藥，其爆速低於 Kinepak。

6. 其他

二元液體炸藥係由氧化劑與燃料混合而成，除了前述組合外，恐怖份子也可能自行將不同氧化劑與燃料配對混合，例如濃硝酸與硝基苯、濃硝酸與硝基甲烷、硝酸肼與肼等均是可能的組合。

三、固態有機過氧化物爆炸物

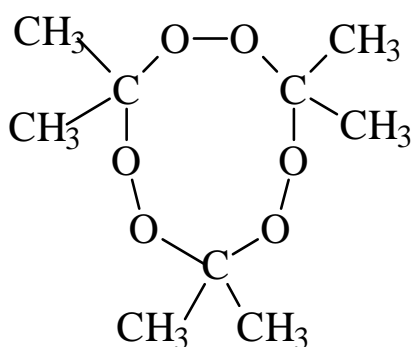
有機過氧化物爲固體爆炸物，並非新穎之爆炸物，早在 19 世紀已被合成出來，有些早期也曾被用爲工礦用途，但早已被其他爆炸物所取代。近年來因恐怖活動盛行，此類原料容易取得、合成步驟簡單、不易檢測和鑑識、容易引爆、且爆炸威力強大的爆炸物特性才因恐怖份子之偏愛，重新受到注意和重視。最常見的固態有機過氧化物爆炸物爲 TATP 和 HMTD，因其原料爲液體或產物可以溶液之形式攜帶，故視爲準液體炸藥，分別敘述如下：

1. Triacetone triperoxide (TATP)

1895 年德國化學家 Wolffstein 首先合成出過氧化丙酮(acetone peroxide) 爆炸物，其中最常見的是環形構造的三體(trimer)，也有環形構造的雙體(dimmer)，由於其只需將容易取得的丙酮、過氧化氫水溶液和硫酸攪拌混合即可獲得，因此有專家懷疑 2006 年 8

月逮捕之恐怖份子可能計畫將前述溶液偽裝成一般液體，帶上飛機後再合成引爆。雖然飛機上可能無法取得維持低溫條件所需之設備，導致產物為較不穩定之雙體 DADP，若恐怖份子採取的是自殺式攻擊，此種結果並不影響其目的之達成。TATP 雖屬固體爆炸物，但其原料均為非爆炸物之液態化合物，且其合成方法非常簡易，合成之爆炸物極為敏感，不需複雜之裝置即可引爆，恐怖份子只要攜帶液態原料即等同攜有炸藥，故可歸類為特別形式的液態炸藥。也有爆炸專家認為，恐怖份子可能將 TATP 溶於易揮發之有機溶劑中，帶上飛機後以簡單之裝置使溶劑揮發，回收取得爆炸物後加以引爆，下文將述及 TATP 在不同溶劑之溶解度，乙醚和丙酮都可能被用為攜帶 TATP 之溶劑。

TATP 屬有機過氧化物，呈白色結晶狀，具特殊之辛辣味。由於其分子結構不穩定，對熱、摩擦和衝擊均極敏感而易引爆，性質較似初級高爆藥，但一般被非法份子當作二級高爆藥使用；由於其不穩定之特性，又被稱為「撒旦之母」(Mother of Satan)。由於其不耐久存，目前 TATP 並無正常的工業用途，亦無正式的軍事用途。TATP 不溶於水，於各種常見有機溶劑之溶解度分別為：微溶於乙醇(0.15%)、溶於乙醚(5.5%)、丙酮(9.15%)、二硫化碳(9.97%)、苯(18.0%)、易溶於氯仿(42.5%)。熔點 94-95℃，比重 1.2。TATP 容易昇華，在 14-18℃ 下 24 小時損耗 6.5%，25℃ 下 14 天損耗 68%，50℃ 下 2 小時損耗 1.5%、40 天損耗 50%，100℃ 下迅速揮發再形成針狀結晶。對加熱、摩擦、撞擊極為敏感，爆炸時只有裂解反應，並不進行氧化反應，一個 TATP 分子爆炸產生之氣體包括三個丙酮分子和一個臭氧分子，TATP 爆炸產生氣體之壓力可較等重之 TNT 爆炸所產生之爆壓高約 80%。一個 DADP 分子爆炸則產生兩個丙酮分子和一個氧分子，爆炸所釋放之熱能並不多，爆炸產生之熱也可能進一步誘發丙酮和產物或空氣中氧分子的氧化反應。TATP 在常溫下為固體，但極易昇華，爆炸後的殘留物很快就消失，故其爆炸後殘跡之鑑識頗為困難。少於二公克之 TATP 在開放空間點火時只燃燒不爆炸，燃燒之產物為二氧化碳和水。較大量之 TATP 可產生爆炸，少量但在密閉空間的 TATP 也可產生爆炸。完全乾燥之 TATP 比含水分或丙酮之新鮮產物易爆炸。TATP 之化學結構如圖四所示。

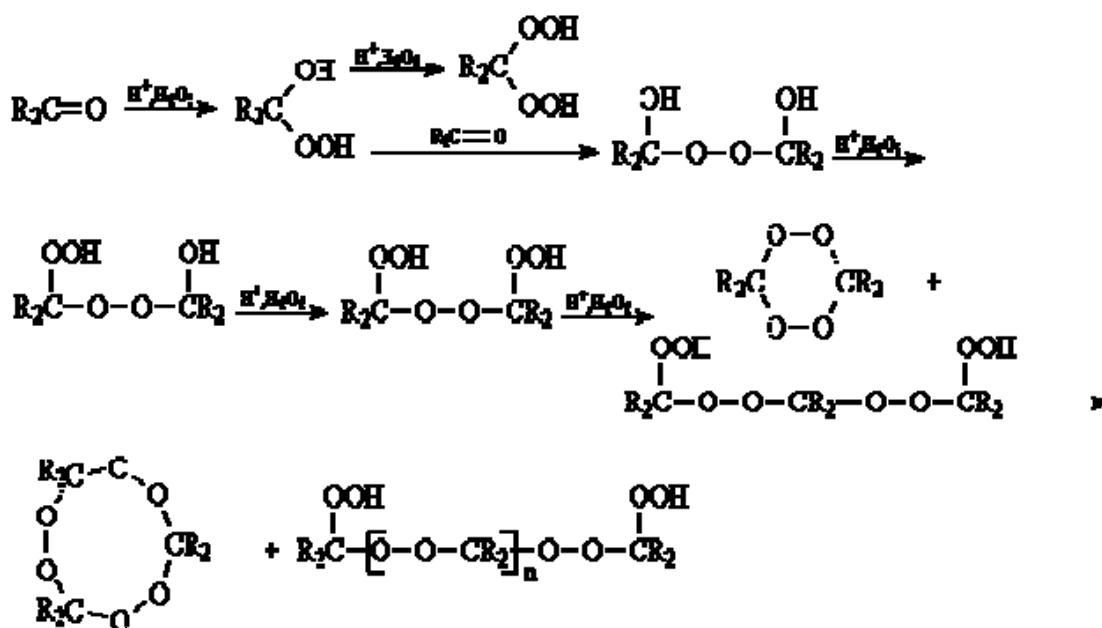


圖四 TATP 之化學結構

TATP 之合成方法簡單，將過氧化氫、丙酮和強酸於低溫條件下攪拌混合即可合成。故為恐怖份子所喜用，文獻報導之首件恐怖攻擊為 1980 年發生在以色列之鋼管炸彈事件，隨後以色列佔領區即常發生恐怖份子使用 TATP 製造人體炸彈和汽車炸彈攻擊之事件。2001 年 12 月 22 日美國航空 63 號班機上曾發生乘客 Richard Reid 企圖引爆藏於鞋

中之炸彈，隨後被空服人員和其他乘客制服，飛機降落後 FBI 逮捕嫌犯並取出藏於鞋內之爆裂物，後經鑑識分析發現含 TATP 和 PETN 兩種爆炸物，此即為有名的「鞋子炸彈客」(Shoe Bomber)。2004 年 5 月 16 日在摩洛哥的卡薩布蘭加也發生使用 TATP 的炸彈攻擊事件。此外，HMTD (hexamethylene triperoxide diamine)則是另一種比 TATP 稍不敏感之有機過氧化物爆炸物，也有被用於製造炸彈之案例。由於以偵測硝基爆炸物為主的檢測器常無法檢測到有機過氧化物和無機爆炸物，故恐怖份子特別喜愛使用此類非傳統性的爆炸物，值得執法人員特別注意。

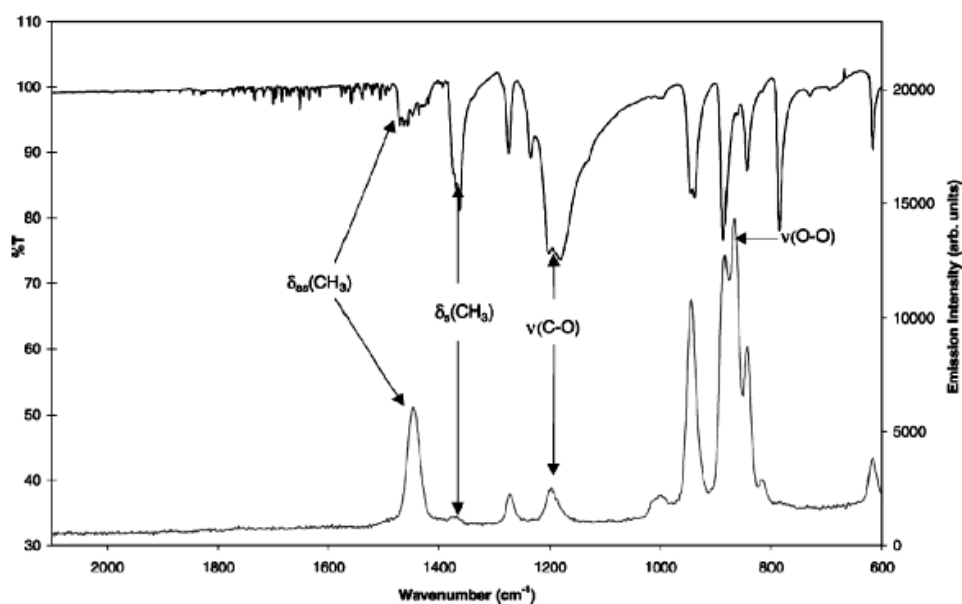
TATP 之合成方法為丙酮中加入 30%的過氧化氫水溶液，攪拌均勻，並冷卻至 5°C 以下再加入濃硫酸。混合攪拌完成後，將反應混合物置冰浴中一段時間，使產物結晶沈澱。以濾紙過濾晶體產物，再以水清洗產物，將產物溶於乙醚，以水浴加熱蒸乾乙醚，即得高純度產物。製造後需儘快使用，以免昇華散失或意外爆炸。合成反應為酸催化之親核加成反應，TATP 並非唯一之反應產物，另有環狀的雙體 DADP(diacetone diperoxide)產物，直鍊的單體(monomer)和雙體(dimmer)也是產物之一。低溫環境下，TATP 是主要產物，溫度高於 10 °C 時，較不穩定且爆炸威力較弱的 DADP 是主要產物。弱酸或中性環境下，單體是主要產物，單體亦不穩定。常溫下 TATP 逐漸昇華，並再凝結成較敏感且不穩定的 DADP，故儲存較久之 TATP 容易形成 DADP，而更易引爆。合成反應之反應式如圖五所示。



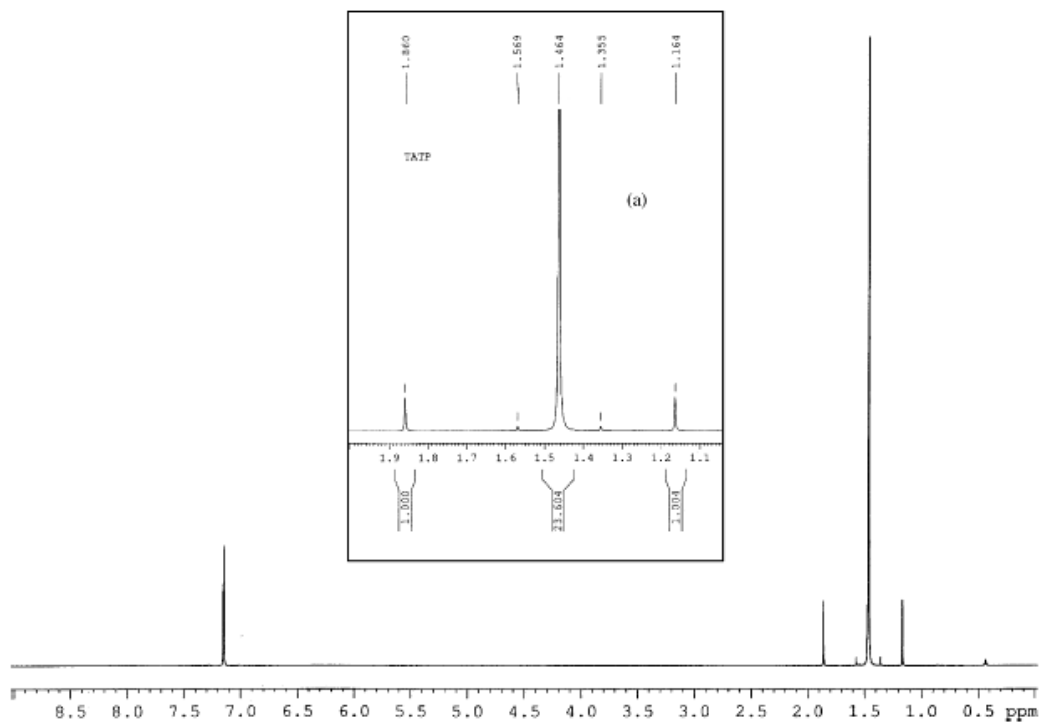
圖五 TATP 合成反應之反應式(引用自參考資料 11)

雖然早期因 TATP 易揮發之特性，對其爆炸殘留之鑑識常無法成功，但近年來許多爆炸物鑑識專家不斷發展出 TATP 之鑑識方法，包括空氣中樣品、爆炸殘跡、和頂空 (headspace) 樣品均可被檢測分析，其中空氣樣品和頂空採樣均係利用其易揮發之特性，

發展出之高效率採樣方法。常用之鑑識方法包括氣相層析質譜法(GC/MS)、高效液相層析/電化學檢測法、離子移動力圖譜/質譜分析法(IMS/MS)、傅氏轉換紅外吸收光譜法(FTIR)、拉曼光譜法(Raman)和核磁共振法(NMR)等，TATP 之紅外吸收和拉曼光譜圖及 NMR 圖譜分別如圖六和圖七所示。除儀器分析方法外，以色列有鑑識專家發展出可於現場進行初步試驗之呈色試劑，先用強酸將 TATP 或 DADP 分解，使產生過氧化氫，再使其與過氧化酶反應，使呈色試劑呈色。捷克警方也發展出檢測 TATP 的薄層層析法，但只用於監測 TATP 之降解情形，並不能定性確認其成分。



圖六 TATP 之紅外吸收(上)和拉曼(下)光譜圖(引用自參考資料 2)

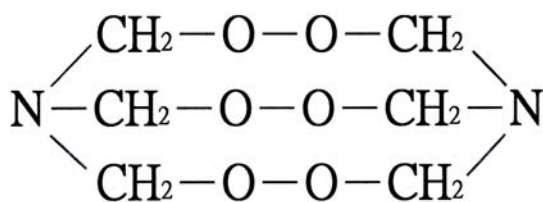


圖七 TATP 在 deuterated benzene 中之 $^1\text{H-NMR}$ 圖譜(引用自參考資料 2)

2. Hexamethylene triperoxide diamine (HMTD)

HMTD 於 1885 年首先由 Legler 合成，是唯一曾被當成正常用途炸藥使用的有機過氧化物，幾乎不溶於水，對金屬容器有腐蝕性。對摩擦和衝擊非常敏感，但點火後則只燃燒不爆炸，歸類為初級高爆藥，與雷汞相比是較安定且威力更大的起爆藥，且便宜易合成，故曾被用為採礦用的起爆藥，後來才被更穩定的特出兒(tetryl)所取代。雖然已非正常用途之炸藥，HMTD 還是常被用於自殺炸彈，有專家認為 2005 年七月七日的倫敦爆炸案用的就是 HMTD。千禧年前夕自加拿大進入美國的阿爾及利亞恐怖份子，被捕時即攜有大量的 HMTD、EGDN 和 RDX。

HMTD 並不耐久存，溫度略高時即開始蒸發和降解，文獻上的數據顯示，在 60°C 下存放 24 小時即損耗約 0.5%， 75°C 下存放 24 小時更損耗達 1.30%，故不適用於現代之工商業用途。HMTD 的結構式如圖八所示。



圖八 HMTD 的結構式

HMTD 的合成方法是將固體燃料 hexamine(又稱 methenamine，為一種雜環有機化合物)在低溫環境中邊攪拌邊溶入過氧化氫水溶液，再緩慢加入粉末狀檸檬酸(citric acid)，繼續在低溫下攪拌一段時間後，停止攪拌，室溫下靜置一段時間後，過濾回收白色結晶物，以水和酒精依序清洗並低溫乾燥，即得 HMTD。HMTD 之合成方法較 TATP 略微繁瑣，其原料也非全是液體，其於有機溶劑之溶解度也不如 TATP，故被當作液體炸藥之可能性比 TATP 為低，但因合成所需器材原料容易取得、合成步驟容易、且敏感容易引爆，故為恐怖份子所濫用之可能性仍甚高。

參、結論

液體炸藥的發明和使用雖已有百年以上的歷史，但因其在軍事和執法上之用途不如固體炸藥普遍，故一直鮮為人所知。近年來恐怖份子利用其原料易取得、製造步驟簡單、可隱藏或偽裝成日常用品、敏感易引爆、爆炸威力強大等特性，作為各種類型恐怖攻擊之武器，不僅造成生命、財產和經濟之損失，嚴重破壞社會治安，威脅國家安全，更導致全球性之恐慌，吾人應盡量瞭解各式恐怖武器之特性，研發或蒐集各種預防、反制、處理和鑑識的方法，做好萬全之準備，全面預防恐怖事件之發生，不幸發生時也需能有效處理，並偵查破獲，迅速將恐怖份子繩之以法，以遏阻類似事件之再度產生。

誌謝

本文部分內容為行政院國家科學委員會補助之專題研究計畫成果，特此致謝！計畫編號 NSC 93-2414-H-015-007。

參考文獻

1. Beveridge A, Forensic investigation of explosions, Taylor & Francis Ltd, London UK, 1998.
2. Buttigieg GV et al, Characterization of the explosive triacetone triperoxide and detection by ion mobility spectrometry, Forensic Science International, 2003, Vol 135, pp. 53-59.
3. Cooper PW, Explosive engineering, Wiley-VCH, NY USA, 1996.
4. Cooper PW & Kurowski SR, Introduction to the technology of explosives, Wiley-VCH, NY USA, 1996.
5. Davis TL, The chemistry of powder and explosives, Angriff Press, USA, reprinted from 1943 edition.
6. Muller D et al, Improved method for the detection of TATP after explosion, J Forensic Science, 2004, Vol 49, Paper ID: JFS2003003.
7. Schulte-Ladbeck R and Karst U, Determination of triacetone triperoxide in ambient air, Analytica Chimica Acta, 2003, Vol 482, pp. 183-188.
8. Stambouli A et al, Headspace-GC/MS detection of TATP traces in post-explosion debris, Forensic Science International, 2004, Vol 146S, pp. S191-S194.
9. Yinon J, Forensic and environmental detection of explosives, John Wiley & Sons, UK, 1999.
10. Yinon J & Zitrin S, Modern methods and applications in analysis of explosives, John Wiley & Sons, UK, 1993.
11. <http://en.wikipedia.org> 網站上相關條目。
12. <http://en.wikibooks.org> 網站上相關條目。