

土壤中高能火炸藥污染處理研究

作者簡介

作者張進福少校，畢業於中山醫學院公共衛生學系 87 年班、元智大學化工材料研究所碩士 94 年班、化學兵學校正規班 96-1 期，歷任化學兵技術研究官、副組長、分隊長、放射安全官，現任本校核生化防護研究中心緊急防護組組長。

提要

- 一、本校防研中心自民國 95 年起進行營區靶場土壤之火炸藥及重金屬污染檢測調查。歷年來檢測結果顯示，在靶場背彈牆附近採取的土壤樣品常有火炸藥與重金屬銅鉛的殘留現象。
- 二、以生物移除法處理火炸藥污染的土壤，僅能進行表面分解或轉移處理，仍不能達到完全分解的功效；化學還原法為目前有效運用的整治技術之一，以鐵粉(零價鐵)還原方式整治土壤污染¹；1996 年更藉由此法將水中的芳香苯類污染物還原²。由此可知，零價鐵可使用於整治土壤或水中的火炸藥成份。
- 三、本文先簡述執行火炸藥污染防治之重要性，再論硝基火炸藥污染特性與土壤中火炸藥污染的整治技術，並說明選用奈米零價鐵處理硝基火炸藥污染原因，以及奈米零價鐵降解硝基火炸藥反應途徑及副產物，最後以奈米零價鐵降解硝基火炸藥之效益，並及早擬定污染整治方案，厚植日後整治之基礎。

關鍵字：高能火炸藥、土壤污染、零價鐵

前言

我國「土壤及地下水污染防治法」已於 89 年 2 月 2 日完成立法公布，明文規定為預防及防治土壤與地下水污染，必須制定相關防治、評估與復育作為，正式邁入國土污染防治的時代。「國土復育」口號響徹雲霄，在在顯示政府管理國土污染問題的決心。政府推展國土污染控制的策略與過去美國執行經驗類似，初期以民間與政府機構為重心同步進行，待見成效後，才將軍事機關用地列為防治重點。

鑑於國家環保政策推行，國防部資源司於 96 年 9 月配合環保署實施「軍事營區受污染地下水來源調查計畫」，以調查國軍營區所在地是否造成污染。調查項目包括了「營區內地下燃料儲槽」、「保修廠」、「加油站」等，總計受調查之七十餘處營區中，十處有地下水受到軍事設施污染情形；另預劃執行國軍大型營區土壤污染調查，調查項目包括了「營區內地下燃料儲槽」、「保修廠」、「加油站」等軍事設施是否造成軍事營區土壤污染；未來也將持續推動軍事演訓基地火炸藥污染稽核與整治專案。陸軍司令部化學兵處肩負全軍環保政策訂定與推行之責，宜及早投入此類相關整治技術之研究，以利未來執行國土污染防治與復育任務。

1 E. K. Wilson (1995); "Zero-valent metals provide possible solution to groundwater problem." Chemical and Engineering News, 73, 19-22.

2 A. Agrawal, P. Tratnyek, G. (1996); "Reduction of nitroaromatic compounds by zero-valent iron metal." Environmental Science and Technology, 30, 153-160.

依據核生化防護研究中心（以下簡稱防研中心）自民國95年起進行靶場土壤火炸藥及重金屬污染檢測調查（如圖1）檢測結果顯示，在靶場背彈牆附近採取的土壤樣品常有火炸藥與重金屬銅鉛的殘留現象。鑑於國家環保政策，陸軍司令部下轄多數包括「靶場」在內的軍事演訓基地，勢必成為首要稽核對象。建議應及早擬定污染整治方案，未來亦應持續推動軍事演訓基地火炸藥污染稽核工作，避免肇生環保污染問題。

執行火炸藥污染防治之重要性

近年來土壤污染事件層出不窮，從早期汞污泥污染，二仁溪底泥戴奧辛污染，直至近期加油站油槽漏油污染土壤及地下水等，致使環保污染問題廣受國家及全民重視。國防部資源司96年實施「軍事營區受污染地下水來源調查計畫」，總計受調查之七十餘處營區中，十處有地下水受到軍事設施污染情形³，未來也將持續推動軍事演訓基地火炸藥污染稽核與整治專案。

陸軍司令部化學兵處防研中心下轄環境污染物分析檢測單位，負有執行國軍營區排放水、土壤等環境污染物檢測，協助國軍各部隊解決環保問題之任務，並已於民國 87 年取得環保署水質檢測類認證。歷年來多次執行各項國軍營區污染檢測與評估案件，但是土壤污染檢測技術須再加強，尤其是土壤中毒化物與火炸藥成份分析與鑑定方面，更是亟待建立之能量。如此，才能使化學兵在煙幕作戰與偵檢消除等作戰任務外，在國軍各級部隊中具有專業分析檢測領先地位，並可建立化學兵專業形象。

此外，國外已積極地投入火炸藥廢水與污染土壤處理技術的研究工作。美國環保署更動用「超級基金」有計畫地針對五十多個高能硝化物污染廠址進行整治。本研究希望藉由新處理技術的開發，找出效能更高、處理費用更便宜的方法來處理火炸藥土壤污染，並將獲得之分析技術，應用於未知毒化物檢測與鑑定，以提升化學兵專業偵檢能力，並達成「為戰而訓」之建軍目的。



圖 1 靶場土壤殘留火炸藥彈包

資料來源：作者拍攝

3 行政院環境保護署，(2008 年 3 月)；軍事營區受污染地下水來源調查計畫期末報告。

硝基火炸藥污染特性

火炸藥工業是工業生產中的重要污染源之一，生產過程中產生各種污染物，以氣體、液體和固體等形態排入環境。火炸藥工業排放的污染物有以下特點：

一、成份複雜：

火炸藥的原料、中間產物、副產物及其在環境中形成的轉化物，有上百種之多，其中大部分有毒。排放的氣污染物，包括氮氧化物（NO_x）、硫酸霧、四硝基甲烷（TNM）、硝基甲苯和甲醛等 40 多種；排放的水污染物，包括 DNT、TNT、RDX 等 60 多種；排放的粉塵，包括 TNT、RDX 和棉塵等；在環境中變成穩定的化合物，如二硝基苯（DNB）和三硝基苯（TNB）等成了土壤污染物。還有許多物質至今尚未分析鑑定出來。

二、排放量大：

依據中國 1979 年的粗略統計⁴來看，廢氣排放量約 2.4GM³；隨廢氣排入大氣的硫酸近 10 千噸，黑索今廢水 200 千噸，精製棉廢水和硝化棉廢水 21 百萬噸；隨廢水流入環境的芳烴硝基化合物約 110 噸、硝化棉 1.2 千噸。全年流入環境的有用物價值 815 萬元，其中廢水流失物價值約 628 萬元，占 77%；廢氣流失物價值占 23%；廢氣中硫酸損失最大，占 18.4%。此外，有相當數量的未反應完全的物質、副反應形成的物質，以及廢藥排入環境，有些甚至長期累積在土壤中。

三、毒性：

排入環境的火炸藥污染物大多有毒。美國根據哺乳動物的口服半致死量（LD₅₀）和吸入半致死濃度（LC₅₀）將毒性物質分為六級（如表 1）。

表 1 有毒物的毒性分類

毒物等級	毒性程度	LD ₅₀ (mg/Kg)	LC ₅₀ (μlochg/L)
1	劇毒	≤1	<10
2	高毒	1~50	10~100
3	中毒	50~500	100~1000
4	輕毒	(0.5~5)×10 ³	(1~10)×10 ³
5	實際	(5~15)×10 ³	(10~100)×10 ³
6	相對	>15×10 ³	>100×10 ³

資料來源：作者參考 B. H. Carpenter and R. Liepins (1978)整理

卡本特(Carpenter)等人⁵根據上述原則，將火炸藥工業排放的大氣污染物進行毒性分級，DNT、RDX屬中毒物質；硝基甲苯則屬輕毒物質。硝基火炸藥為

4 孫榮康 瞿美林 陸才正，孫榮康，〈海掃更與奧克托今〉，《火炸藥工業的污染及其防治》，（北京：兵器工業出版社，1990 年 4 月），3 頁。

5 B. H. Carpenter and R. Liepins (1978); “ADA060354”.

非常穩定的物質，不易於自然環境中自然的被分解。在 2000 年美國國家研究研討會中，提出一份「地下水整治的自然衰減研究報告」⁶中指出，僅藉由自然衰減法將現今流布於環境水體中的 TNT 與 RDX 裂解到對於人體健康無虞之程度的可能性則很低；目前美國環保署已將高爆性炸藥列為重要環境有害污染並將環保法規標準中 TNT 與 RDX 的含量限定為 17.2 mg/kg 及 5.8 mg/kg，足見此一類物質對於人體為毒性物質，除對環境造成衝擊，若不慎藉水體進入人體，將造成莫大的傷害。

土壤中火炸藥污染的整治技術

一、直接焚燒法：

直接焚燒法（如圖 2）是最常被使用的整治方式，因其價格昂貴且其燃燒後的難聞氣味易遭受民怨，因而刺激諸多研究者尋求其他有效的整治技術。



圖 2 直接焚燒法示意圖

資料來源：陸軍官校 85 週年校慶暨第 16 屆三軍官校基礎學術研討會論文⁷

二、化學還原法：

學者將鐵粉還原法運用於土壤中得到的結果，發現 TNT 的分解速率比 RDX 的分解速率快；而且實驗發現，在 24 小時之內，可將 TNT 的含量降至 17.2 mg/kg、在 48 小時之內，可將 RDX 的含量降至 5.8 mg/kg，此法亦能擁有降解火炸藥的能力⁸。依據此結果，從 1991 年 Gillham 研究團隊在加拿大安大略省，設置第一個零價鐵滲透性反應牆（如圖 3）野外現地驗證，經過十幾年的發展過程，至 2002 年為止，目前已經有 48 個實廠設施完成，其中 40 個在美國，7 個在歐洲，另 1 個在日本，同時另有 21 個試驗模型廠在進行現地驗證與整治作為。

6 Rittmann B. E. (2000), Natural attenuation for groundwater remediation, A report of the National research Council, 5-8.

7 林耀東，〈土壤中火炸藥污染先端整治方法報告〉，陸軍官校八十五週年校慶暨第十六屆三軍官校基礎學術研討會論文。

8 同註 5。

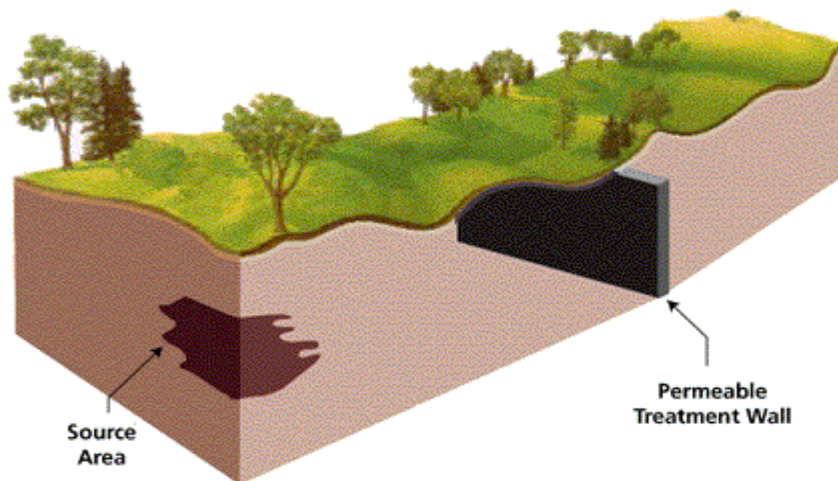


圖 3 零價鐵滲透性反應牆示意圖

資料來源：經濟部工業局「土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」

三、過氧化鈣(CaO_2)氧化法：

1993 年 Venkatadri 等人發現 TNT 不易被生物氧化分解，其有效的分解則可利用過氧化鈣移除 TNT 上的硝基的方式處理⁹；因為氫氧化鈣是過氧化鈣反應的副產物，所以 TNT 的氧化程度可利用氫氧化鈣的產生得知。而將過氧化鈣氧化法用於土壤的整治時，可達到不錯的效果。在含有 TNT 700 mg/Kg 的土壤中，於 0.2% 至 2% 的過氧化鈣處理下，可降至 20 mg/Kg 以下；而且過氧化鈣的濃度越高，分解效率越好。

四、生物降解法：

微生物被應用在廢棄物處理已經有十多年¹⁰。生物降解廢棄物（如圖 4）的優點包括所需花費較少、容易操作且較為大眾所接受。生物降解通常會在需氧的條件下進行，如此可促進有機化合物分解為二氧化碳及水。在 1994 年，Crawford 等人就已證明厭氧菌具有將 TNT 分解為甲苯的能力¹¹。

堆肥法是生物降解法最常使用的方式，以微生物來分解污染物，將 TNT 或 RDX 分解成水、二氧化碳及一些無害的鹽類；在 1997 年美國的環保署報告中指出¹²：奧勒崗州漢彌斯頓的 Umatilla 陸軍補給部隊營區利用堆肥法，成功整治遭受 TNT 與 RDX 污染的土壤，不但處理效果良好，而且花費低廉，利用此技術在

9 Venkatadri, R., Peters, R. W. (1993); "Chemical oxidation technologies: ultraviolet light/hydrogen peroxide, Fenton's reagent and titanium dioxide assisted photocatalysis." Hazard. Waste Hazard. Master., Vol.2, pp.107-149.

10 Gray, N. F. (1989); "Biology of Wastewater Treatment." Oxford University Press, New York, pp.3-104; Simonsson, D. (1997); "Electrochemistry for a cleaner environment." Chem. Soc. Rev., Vol.26, pp.181-189.

11 Crawford, R. L. (1994); "Biodegradation of Nitroaromatic Compounds.", Plenum Press, New York, pp.87-97.

12 United States Environmental Protection Agency (October 1997); "Soil Waste and Emergency Response (5306w)", EPA530-F-97-045.

15,000 噸的污染土壤中，可將TNT與RDX的含量降至低於 30 mg/kg。而此方法的缺點是所需處理時間長，但對於大量的污染土壤的處理，確實是一個值得參考的方法，目前已實際運用於美國許多兵工廠的營區整治中。



圖 4 生物降解整治場址

資料來源：經濟部工業局「土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」

五、植生復育法：

植生復育法（如圖 5）乃利用植物來復育被污染的水或土壤¹³。其為人所推崇的原因包括花費不高和所需的生物技術維持能力較低，且植物對污染物的容忍能力通常大於微生物。美國陸軍愛荷華州(Iowa)彈藥廠即以利用溼地種植水草對TNT做分解，每日的分解量高達 0.019 mg/L¹⁴。

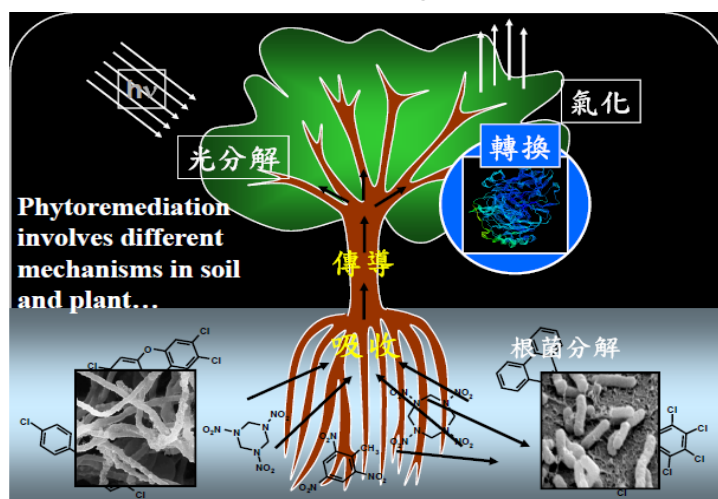


圖 5 植生復育法示意圖

資料來源：經濟部工業局「土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」

-
- 13 Cole, S. (1997); "The emergence of treatment wetlands: as constructed wetlands for wastewater treatment grow in popularity; regulators and researchers strive to better understand this treatment option.", Environ. Sci. Technol., Vol.9(1), pp.218A-223A.
- 14 Betts, K. S. (1997); "Native aquatic plants remove explosives.", Environ. Sci. Technol., Vol.31(7), pp.304A.

植生復育法和生物降解法一樣，都會面臨不可預期的氣候變化，將影響其對污染物分解的作用。在北美或加拿大的冬天來臨時，使得火炸藥污染的分解率難以評估。除此之外，植生復育法比生物降解法面臨更嚴峻的挑戰，在於植物無法在污染程度過高的環境中生長，故增強植物生長在高污染環境的能力，以更能保證藉植生復育法將火炸藥分解的效能¹⁵。

六、電動力整治技術：

近十年來，電動力法在歐美各國之土壤/地下水復育發展技術領域中頗受重視。電動力技術為一種經濟有效之土壤整治方法，主要係利用施加電場所造成之離子遷移及電滲透流等效用，將土體中離子性物種或溶解態物質移除。該技術亦獲美國環保署列為整治地下水層污染黏質土壤場址之可行技術之一¹⁶。

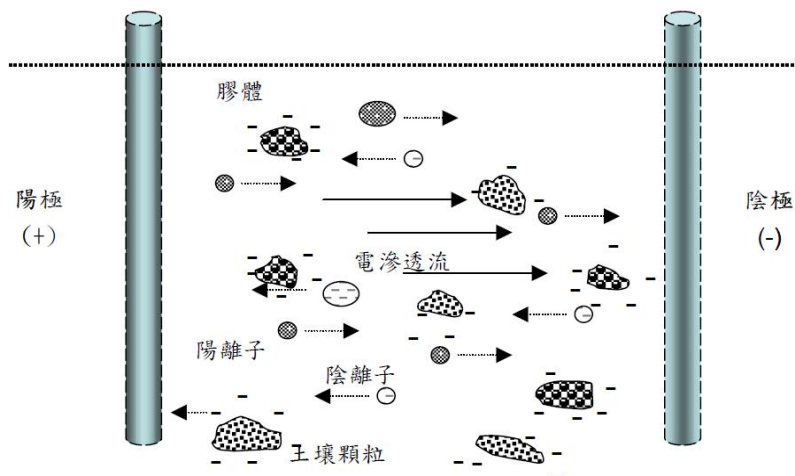


圖 6 電動力原理示意圖

資料來源：經濟部工業局「土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」

電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，施加適當大小之直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場作用，驅使帶正電荷之離子被吸引到負極（陰極）；相反地，帶負電荷之離子則向正極（陽極）移動；此外，實驗證實溶解性非離子物種另可藉由電滲透流之傳輸，引導土壤中電解質溶液之移動，進而達到去除土壤中污染物的目的，其原理示意圖如圖 6 所示¹⁷。

在現地復育應用上，電動力法除可適用於各種污染土壤外，對於低滲透性之土壤（例如：淤泥及黏土等）尤具優勢；此外，適用之污染種類相當廣泛，包括：重金屬、有機污染物、輻射核種及具毒性陰離子等，此整治技術可同時處理飽和層及不飽和層土壤；其處理費用亦較一般傳統技術為低。此外，電動力技術亦具有水文控制功能及可與其他整治方法組合之特點。

15 Kling, J. (1997); "Phytoremediation of organics moving rapidly into field trials." Environ. Sci. Technol., Vol.31(3), pp.129A.

16 "Hazardous Waste Clean-Up Information.", (2000). <http://www.cluin.org>.

17 Vane, M. L. and Zang, G. M. (1997); "Effect of Aqueous Phase Properties on Clay Particle Zeta Potential and Electro-osmotic Permeability: Implications for Electro-kinetic Soil Remediation Processes." Journal of Hazardous Materials, Vol. 55, No. 3, pp. 1-22.

選用奈米零價鐵處理硝基火炸藥污染之原因

近年來，國內已積極地投入火炸藥廢水與污染土壤處理技術的研究工作，但其研究範疇僅限於傳統昂貴且有二次污染之虞的焚燒法¹⁸。但自 1959 年起，Kasten與Kaplan¹⁹利用鐵粉來還原三硝基苯酸衍生物，如將TNT與鐵粉直接進行反應，會產生 2,4,6-三羰基甲苯；而在 1992 年，Jenkins與Walsh²⁰發表利用鋅粉來促進RDX分解成硝酸；而在 1996 年，Agrawal與Tratnyek²¹以鐵粉來促進硝基苯的還原；而在 1997 年的Hundal則採用 Fe^0 ， $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ 或 Fe^0 與生物處理法合用之各種搭配方式，可有效地分解RDX與TNT。由前人的研究可以知道，零價鐵確能使用於整治土壤或水中的火炸藥成分。零價鐵技術為目前簡單、有效且不會對環境造成二次污染的處理方法。當零價鐵與受高能火炸藥污染水體反應時，完全不需花費任何動力裝置，便可將此一類水體中污染的高能火炸藥去除²²；此外比表面積大小將影響及決定零價鐵的去除污染物的能力，零價鐵的粒徑愈小比表面積越大，其活性越大，因此將會提高對污染物的去除效果。奈米零價鐵的比表面積遠比其他商用微米級零價鐵來的大，因此其表面活性基也就較多且活性變大，其與水體中污染物反應也將大為提升。若以奈米零價鐵搭配土壤中電動力處理技術處理土壤中火炸藥污染，將為一深具發展力與實用性的土壤整治技術。

奈米零價鐵降解硝基火炸藥反應途徑及副產物

在奈米零價鐵降解硝基火炸藥的反應途徑研究實驗中，以 TNT 與 RDX 等不同的硝基火炸藥進行研究，並以 LC/MS/MS 及 GC/MS 鑑定其中間產物。由實驗發現：

- 一、TNT 反應中間產物是趨向於 NO_2 官能基團被取代 NH_2 的單取代反應。
- 二、RDX 反應中間產物是趨向於 NO_2 官能基團被取代不同數量的 NO ，其取代的趨勢為單取代 > 雙取代 > 三取代。

在以上數種不同中間產物會因 NO_2 官能基團被還原為 NO 或 NH_2 ，將導致結構不穩定而開環水解作用形成長鏈烷類，最後分解成 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 。由中間產物可推測出以奈米零價鐵降解TNT與RDX等火炸藥可能路徑如圖 7 及圖 8 所

18 黃振家，〈TNT 製程減廢及其廢水焚燒效率提昇研究〉《聯勤 203 廠與中正理工學院學術合作研究計畫》，1977，頁 6-10。

19 Kasten, M. L., Kaplan, J. F. (1959); "TNT into phoroglucinol: a staff-industry collaborative." Industrial and Engineering Chemistry, 42, 402-413.

20 Jenkins, T. F., and Walsh, M. E. (1992); "Development of field screening methods for TNT, 2,4-DNT, and RDX in soil." Talanta, 39, 419-428.

21 A. Agrawal, P. Tratnyek, G. (1996); "Reduction of nitroaromatic compounds by zero-valent iron metal." Environmental Science and Technology, 30, 153-160.

22 Mishra D., and Farrell J. (2005); "Understanding Nitrate Reactions with Zerovalent Iron Using Tafel Analysis and Electrochemical Impedance Spectroscopy." Environ. Sci. Technol., 39(2), 645-650; Su C., and Puls R. W. (2004); "Nitrate Reduction by Zerovalent Iron: Effects of Formate, Oxalate, Citrate, Chloride, Sulfate, Borate, and Phosphate." Environ. Sci. Technol., 38(9), 2715-2720.

示：

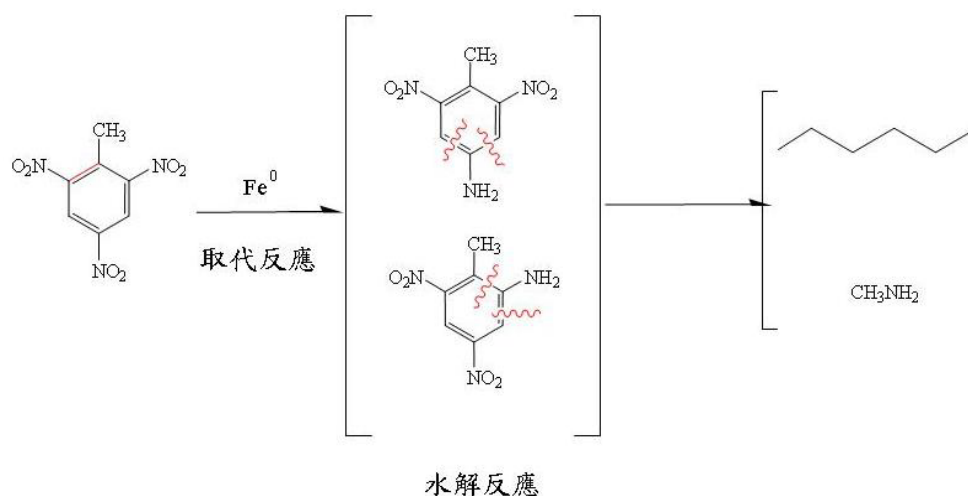


圖 7 奈米零價鐵降解 TNT 可能反應路徑

資料來源：元智大學化學工程與材料科學學系碩士論文²³

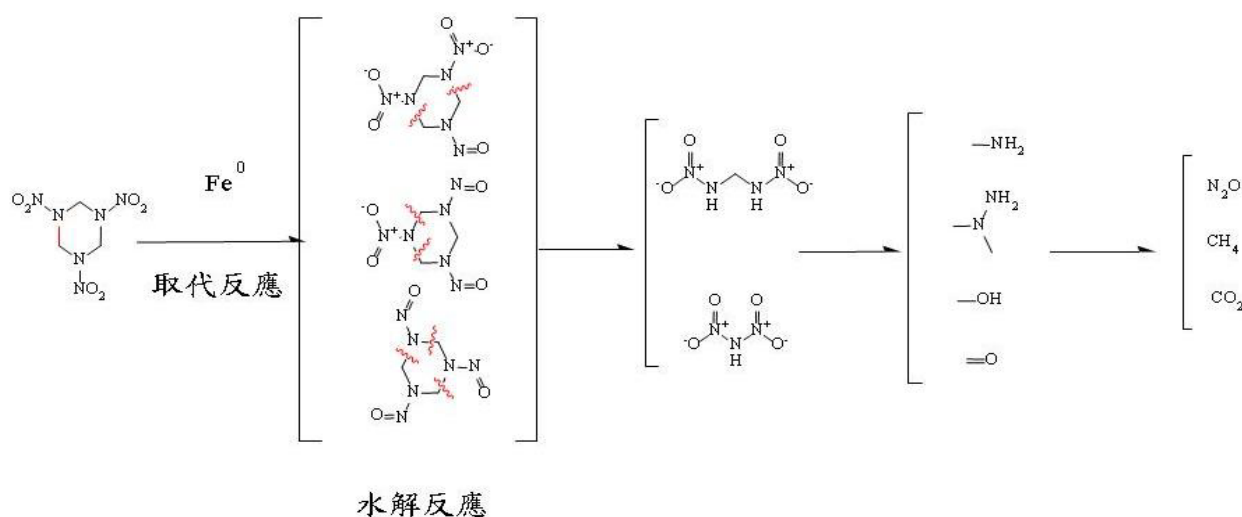


圖 8 奈米零價鐵降解 RDX 可能反應路徑

資料來源：元智大學化學工程與材料科學學系碩士論文²³

奈米零價鐵降解硝基火炸藥之效益

在研究中，作者以 0.1 g 奈米零價鐵粉降解 90、80 及 70 ppm 的三種不同濃度的 TNT 溶液皆於 40 分鐘內完全降解完畢；以 0.1 g 奈米零價鐵粉降解 35、25 及 15 ppm 的三種不同濃度的 RDX 溶液皆於 1 小時內完全降解完畢。比較不同學者以零價鐵降解高能火炸藥的研究，其 1 g 零價鐵可處理的硝基火炸藥量整理如下：

一、在 1997 年學者的研究中是以 1% 的市售零價鐵粉與 70ppm 的 TNT 與 3ppm 的

²³ 謝明君，元智大學化學工程與材料科學學系碩士論文，中華民國九十六年七月。

RDX進行反應，結果顯示TNT 在 8 小時內可完全移除；而RDX則需要在 96 小時後才能完全分解²⁴，經過計算，1 g 零價鐵可處理 7 ppm 的 TNT、0.3 ppm 的 RDX。

二、在 2005 年學者的研究中以 17g比表面積為 1.54 m/g的市售零價鐵粉與 76ppm 的 TNT進行反應，其研究顯示需要 400 才能完全分解 76ppm的 TNT²⁵。經過計算，1 g 零價鐵可有效處理 TNT 的量為 4.5 ppm。

三、筆者的研究結果顯示，經過計算，1 g 奈米零價鐵可處理 900 ppm TNT、350 ppm RDX，顯示零價鐵比表面積的增加及尺度的減少可有效的促進分解硝基火炸藥的效果。

結語

針對火炸藥污染場址，美國環保署早已動用超級基金投入大量人力、物力與財力從事研究，積極投入環境殘存量評估調查作業，並與相關研究機構合作開發各類型火炸藥整治技術；依據防研中心歷年來執行靶場土壤火炸藥及重金屬污染檢測調查檢測結果，靶場土壤常有火炸藥與重金屬銅鉛的殘留現象。有鑑於世界潮流趨勢，國內實有必要即時投入此一領域的研究工作，並及早擬定污染整治方案，厚植日後整治之基礎。

參考文獻：

1. E. K. Wilson (1995); "Zero-valent metals provide possible solution to groundwater problem." Chemical and Engineering News, 73, 19-22.
2. A. Agrawal, P. Tratnyek, G. (1996); "Reduction of nitroaromatic compounds by zero-valent iron metal." Environmental Science and Technology, 30, 153-160.
3. 孫榮康 瞿美林 陸才正，孫榮康，〈海掃更與奧克托今〉，《火炸藥工業的污染及其防治》，（北京：兵器工業出版社，1990 年 4 月）。
4. B. H. Carpenter and R. Liepins (1978); "ADA060354".
5. Rittmann B. E. (2000), Natural attenuation for groundwater remediation, A report of the National research Council, 5-8.
6. Bier E. L., Singh J., Li Z.M., Comfort S.D., and Shea P. J. (1999); "Remediating Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,2,5-triazine-contaminated Water and Soil by Fenton Oxidation." Environ. Toxicol. Chem., 18(6), 1078-1084.
7. 行政院環境保護署，〈軍事營區受污染地下水來源調查計畫期末報告〉，2008 年 3 月。
8. Venkatadri, R., Peters, R. W. (1993); "Chemical oxidation technologies: ultraviolet light/hydrogen peroxide, Fenton's reagent and titanium dioxide assisted

24 Hundal L. S., Singh J., Bier E. L., Shea P. J., Comfort S. D. and Powers W. L. (1997); "Removal of TNT and RDX from Water and Soil Using Iron Metal." Environ. Pol., 97(1), 55-64.

25 Joel Z. Bandstra, Rosemarie Miehr, Richard L. Johnson, and Paul G. Tratnyek (2005); "Reduction of 2,4,6-Trinitrotoluene by Iron Metal: Kinetic Controls on Product Distributions in Batch Experiments." Environ. Sci. Technol., 1(39), 230-238.

- photocatalysis.” Hazard. Waste Hazard. Master., Vol.2, pp.107-149.
9. Gray, N. F. (1989); “Biology of Wastewater Treatment.” Oxford University Press, New York, pp.3-104.
 10. Simonsson, D. (1997); “Electrochemistry for a cleaner environment.” Chem. Soc. Rev., Vol.26, pp.181-189.
 11. Crawford, R. L. (1994); “Biodegradation of Nitroaromatic Compounds.”, Plenum Press, New York, pp.87-97.
 12. United States Environmental Protection Agency (October 1997); “Soil Waste and Emergency Response (5306w)”, EPA530-F-97-045.
 13. Cole, S. (1997); “The emergence of treatment wetlands: as constructed wetlands for wastewater treatment grow in popularity; regulators and researchers strive to better understand this treatment option.”, Environ. Sci. Technol., Vol.9(1), pp.218A-223A.
 14. Betts, K. S. (1997); “Native aquatic plants remove explosives.”, Environ. Sci. Technol., Vol.31(7), pp.304A.
 15. Kling, J. (1997); “Phytoremediation of organics moving rapidly into field trials.” Environ. Sci. Technol., Vol.31(3), pp.129A.
 16. (2000) “Hazardous Waste Clean-Up Information.”, <http://www.cluin.org>.
 17. Vane, M. L. and Zang, G. M. (1997); “Effect of Aqueous Phase Properties on Clay Particle Zeta Potential and Electro-osmotic Permeability: Implications for Electro-kinetic Soil Remediation Processes.” Journal of Hazardous Materials, Vol. 55, No. 3, pp. 1-22.
 18. 黃振家, (1977); “TNT 製程減廢及其廢水焚燒效率提昇研究”, 聯勤 203 廠與中正理工學院學術合作研究計畫, 6-10, 中正理工學院應化系。
 19. Kastens, M. L., Kaplan, J. F. (1959); “TNT into phoroglucinol: a staff-industry collaborative.” Industrial and Engineering Chemistry, 42, 402-413.
 20. Jenkins, T. F., and Walsh, M. E. (1992); “Development of field screening methods for TNT, 2,4-DNT, and RDX in soil.” Talanta, 39, 419-428.
 21. Mishra D., and Farrell J. (2005); “Understanding Nitrate Reactions with Zerovalent Iron Using Tafel Analysis and Electrochemical Impedance Spectroscopy.” Environ. Sci. Technol., 39(2), 645-650.
 22. Su C., and Puls R. W. (2004); “Nitrate Reduction by Zerovalent Iron: Effects of Formate, Oxalate, Citrate, Chloride, Sulfate, Borate, and Phosphate.” Environ. Sci. Technol., 38(9), 2715-2720.
 23. Hundal L. S., Singh J., Bier E. L., Shea P. J., Comfort S. D. and Powers W. L. (1997); “Removal of TNT and RDX from Water and Soil Using Iron Metal.” Environ. Pol., 97(1), 55-64.
 24. Joel Z. Bandstra, Rosemarie Miehr, Richard L. Johnson, and Paul G. Trantnyek (2005); “Reduction of 2,4,6-Trinitrotoluene by Iron Metal: Kinetic Controls on Product Distributions in Batch Experiments.” Environ. Sci. Technol., 1(39), 230-238.