

國造二〇公厘濕式導電藥底火之電阻調配

方淳民¹ 陳一葳² 趙嘉琦^{3*}

¹逢甲大學光電科學與工程學系

²空軍航空技術學院機械工程科

³陸軍軍官學校機械學系

摘 要

本文旨在優化二〇電底火製程，滿足 M52A3B1 電底火性能規格，較顯著者為調整電阻。配方中乙炔黑、矽化鈣與硝酸鋇均予以研究，操作中除水方法亦予改善，使符合預設之電阻要求。相關設計之實驗，將之介紹。濕式導電藥底火的設計不僅具先進之設備及採濕混藥特色，其更擁有發展成熟之導電路徑理論深藏其內。該等包括乙炔黑導電路徑、矽化鈣隔離、甚至可稱為電阻穩定佈局。底火藥配方含有乙炔黑用作導電劑，且單一使用其為之，並經裝藥、壓藥等道次置入底火盂待用。基於路徑矩陣理論，其粒徑分布、壓藥條件與點火條件密不可分，且須由實驗驗證。本研究有相關實測證實，並指出相關生產要因與製程控制要點。

關鍵詞：導電藥底火，路徑矩陣，電阻

Allocating Resistance on ROC 20mm Wet-mixed Conductive Mixture Primer

Chun-Min Fang¹, Yi-Wei Chen² and Chia-Chi Chao^{3*}

¹Department of Optoelectronic Science and Engineering, Feng Chia University

²Department of Mechanical Engineering, ROC Air Force Institute of Technology

³Department of Mechanics, ROC Military Academy

ABSTRACT

The process of manufacturing a conducting composition primer which meets the performance specifications of the M52A3B1 electric primer possesses significantly adjusted resistance to initiation has been examined. Three component mixes consisting of acetylene black, calcium silicide and barium nitrate were investigated. The de-watering procedure was assessed as alternatives to be satisfactory to desirable resistance. Further test results behind the design are recommended. The wet-mixed designs of conductive mixture primers go beyond a few advanced equipment and moist mixtures and have full-fledged path matrix principle inside them. These often include acetylene black path matrixes, isolated calcium silicide and in one case, a stable resistance arrangement. When only acetylene black is filled and compressed into the cup, the primer mix contains acetylene carbon black as the electrically conductive ingredient. The particle size distribution and compression condition of ignition process of electric primer is obtained from experiment which based on path matrix theory. The results indicate that the desired characteristics can be achieved by manufacture procedure control.

Keywords: conductive mixture primer, path matrix, resistance

一、前言

M52A3B1 式 20 公厘電底火通用裝配於各種 20 公厘全彈，適用於空用「M39 機砲(國造系統擴展為海、陸用 T75 機砲)」、空用 M61 機砲、陸航用 M197 機砲及海用方陣等系統，十分犀利。美制空優武器之開發，以朝向快速射擊、密集彈著、徹底破壞為發展指引，而任何要達此種效果之武器，則必須配合極快速之發火裝置，才能達到預期之功能。國造 20 公厘電底火之發展，即朝該目標邁進。明確掌握其發火的能量來源與控制條件是製程中亟待解決之問題，亦為本文研究之目的。

二、文獻回顧

電底火種類、程式甚多，但其概分為兩種(一)電熱絲式底火(Wired primer)，(二)導電藥式底火(Conductive mixture primer)。

回顧美軍電底火的發展演進，最先在二戰後改進德國電熱絲式底火，於射速較低系統有不錯之效果。然在 50 年代研發伺服馬達驅動速射機砲擊發機構使用時，因電流加熱電阻絲需較長時間，致有遲發火、不發火等毛病，且製程較繁複另成本亦高，故改朝導電底火藥式發展，經招商合約研究，測試比較，確認底火藥配方，命名為法蘭克福兵工廠 874 號配方(FA-874)、M52A3B1 電底火。後雖發展 FA-878 鋅系底火藥、M52A4(5)等電底火，然因過度發火、膛壓過高、口焰太大等系統匹配問題而放棄，仍維持 FA-874 配方、M52A3B1 電底火為 20 公厘彈藥標準底火[1]。

國軍使用美式裝備後，於 70 年代憬悟二〇電底火之重要，於焉始創研究，初由孔祥洪、徐聲亮、陳福盛等兵工前輩投入研究[2]，試造試誤，百折不回；續為求永續，戮力學理原則[3]，雖非創立新說，然綜合整理之餘，必有心得。時已知所謂導電藥即在底火藥內混配有一定量導電顆粒，當電流通入導電顆粒形成的通路後，導電粒開始發熱，然後再將其四周的起爆藥引爆。

更進一步表述導電藥發火機制者為蕭建生等對導電式點火頭之研究[4]，提出起爆機構為局部熱點，如何經由外來的能量已形成有效的熱點為其發火成功的關鍵，惟其製程為乾式製程。而其發火特性與導電物之物化性、粒徑，及起爆藥種類、發火電壓、電阻等參數須藉實驗找到最佳條件。整個點火頭導電藥之導

通電路如圖 1 所示，為一條由石墨顆粒間相互碰觸所形成不均勻的隨機電路，於是電流通過這些電路時，熱量集中在截面最小部份，形成許多熱點。粒狀與片狀石墨特性不同，當粗細兩種混在一起，利於熱點生成。

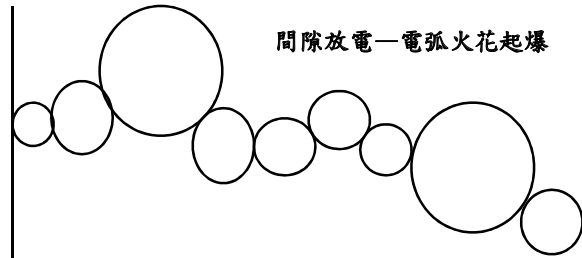


圖 1. 電點火頭之石墨導通電路

沿製電點火頭之乾式製程，宣仲華、吳宗欣等研製二〇電底火成功並量產[5]，針對發火特性，經由實驗認導電度由乙炔黑與矽化鈣所提供，電阻分佈範圍由矽化鈣的粒度所決定，矽化鈣的粒徑大小並關係到電底火的敏感度，當矽化鈣粒徑愈大，其敏感度愈高，但所製成之電底火，其電阻值個別差異也越大。與前電點火頭比較，同為乾式製法，但將石墨之電阻阻抗角色，改由乙炔黑與矽化鈣取代，甚至判斷矽化鈣之角色更重，因無乙炔黑時，亦能發火。

後政策指導，力求避免底火粉塵散落積垢以及靜電因素的影響，保障操作人員的安全並大幅降低工安事件發生的機會投資籌建「品質良好、產能大」的二〇電底火製造線，採用新法濕式製程，俾利自動化生產[6]。面對濕式配方製程，徐福臨論文[7]雖是壽限與電阻間關聯之研究，但提供許多發火機制的線索與基礎。黃宗輝等研究[8]擊發電壓並與硝酸鉍粒徑相關，使電功轉為熱能之過程，更為清楚。濕式電底火之研究都指出，電功生熱由乙炔黑獨自完成，專門設計避免矽化鈣之干擾，此與乾式電底火原理，大異其趣。

三、導電結構與路徑矩陣

M52A3B1 式 20 公厘電底火由火帽盂、墊片、絕緣環、底火藥、紙箔、襯盂等六種另件精密配合而成，其結構如圖 2。其發火系統乃由正極觸及墊片，經底火藥本身因電能付與後，因阻抗將電能轉為熱能，瞬間引爆起爆藥，整個底火作用時間低於萬分之三秒。已知裝配成 20 公厘全彈，使用於 M39 機砲，射速每分

鐘至少為 1,500 發，以 M61 機砲射擊更高達 5,500 發以上，故電底火品質要求特別高。

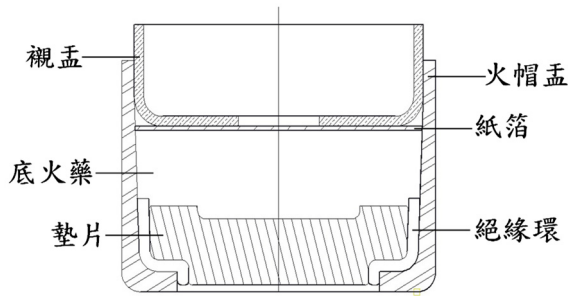


圖 2. 電底火結構圖

圖 1 中火帽盂、墊片、絕緣環先組裝成一次合成品，須承受 900 V、60 Hz 之高電壓，經 0.2 秒，而絕緣環無擊穿、邊緣燒灼、閃光等穿損現象。底火藥成品重量為 0.1720~0.1950 g，電阻值為 1,000~1,200,000 Ω ，最高擊發電壓為 160 V，平均擊發電壓小於 160 V，底火作用時間為 3×10^{-4} sec。底火藥組成採用 FA-874 配方，成份如表 1：

表 1. FA-874 底火藥配方

項次	成份	百分比%	功用
1	史帝芬酸鉛	40 $\pm$ 2.5	起爆劑[17]
2	硝酸鉍	44.25 $\pm$ 2.5	氧化劑
3	矽化鈣	13 $\pm$ 2.5	燃料 活性劑
4	乙炔黑	0.75 $\pm$ 0.25	導電劑
5	三硝基 間苯二酚	1 $\pm$ 0.25	傳爆劑 鈍化劑
6	阿拉伯膠	1 $\pm$ 0.25	結合劑

電底火不同於小口徑機械式及發底火，而是電流引發式，快速而作用力強。其作用過程為墊片作為導電座，與火帽盂之間隔以絕緣環，平時正負極不通。擊發時，正極通電，由擊針觸及墊片；負極經火帽盂、銅殼與砲身，構成通路；底火藥因電阻生熱使其中起爆藥引爆，達到高速射擊之要求。起爆藥本身敏感度是重要的，當電流通過電底火瞬間，產生電熱值 Q_1 ，高於起爆藥作用所需之 Q_2 值，則引爆起爆藥，傳播至底火藥，致半爆半燒，形成發火。其原理以基本電路學說明：

$$I = V/R \quad (1)$$

$$W = IV \quad (2)$$

$$Q_1 = Wt \quad (3)$$

其中 I 為電流、 V 為電壓、 R 為電阻、 W 為電功率、 t 為作用起爆藥起爆時間。

$$Q_2 = C_p V_c \rho (T_2 - T_1) \quad (4)$$

式中 C_p 為起爆藥比熱、 V_c 為起爆藥顆粒體積、 ρ 為起爆藥密度、 T_2 為起爆溫度、 T_1 為初始溫度。當 $Q_1 > Q_2$ 起爆藥引爆。

濕式底火藥以類似混凝土構造方式，將粗細顆粒狀材料炭入起爆藥與水、膠混合成的底火泥。在各顆粒縫隙間由粒徑最小者填充滲入，如其具有導電與電阻生熱效果，即成為設定之導電劑，其網絡式分布稱為路徑矩陣(Path matrix)，以圖 3~圖 6 說明。

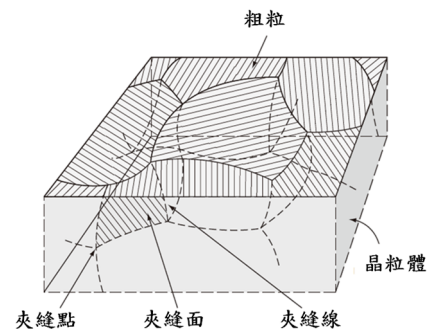


圖 3. 底火藥立體示意圖

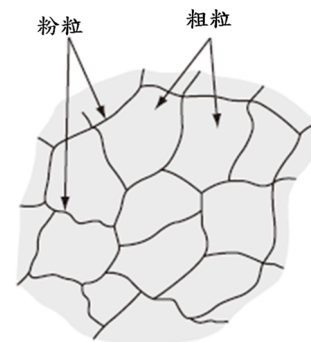


圖 4. 導電網絡切面示意圖



圖 5. 導電路徑鄰接示意圖

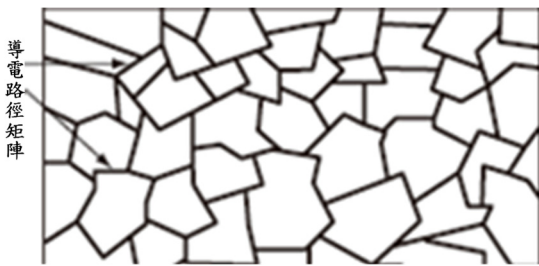


圖 6. 導電路徑矩陣示意圖

濕式底火配方選用係基於已知的實例，導電劑更是如此。不同於乾式底火者，濕式底火導電劑單獨使用乙炔黑，並設計阻止矽化鈣干擾乙炔黑之導電生熱。其中導電劑一定採用碳鏈者，因對其性質信賴與掌握，因乙炔黑與石墨同屬碳鏈成分，且粒徑更小，低於 $10\mu\text{m}$ ，且其電阻值在各種壓藥操作下，極為穩定，雀屏中選。乙炔黑之碳粒極小，使其能充填粗粒間隙，並且黏附其表面，其間微小孔洞或介面被碳粒佔據，經壓藥操作而成導電路徑。在裝藥局限空間內，卻也綿密如三度空間網絡。總之，眾多導電路徑形成一複雜而縱橫交錯網路，其中最小電阻路徑者，成為底火電阻，也決定底火性能，電流會沿此路徑瞬間集中。此時電流由這個導電粒子傳到下一個接觸的導電粒子，電流沿著這一條導電通路傳導，而熱的產生卻集中在這條導電通路的導電粒子接觸點上，如圖 7 所示。

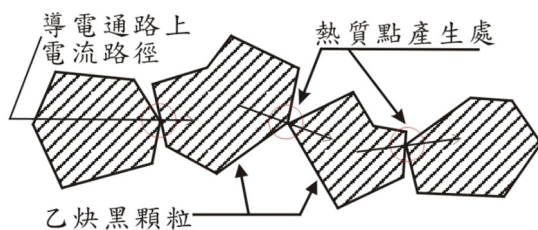


圖 7. 熱點集中示意圖

四、結果與討論

4.1 乙炔黑之電阻

濕式底火設計以單獨使用乙炔黑為導電劑，但其本身為鬆散之粉末，量測各種操作條件下乙炔黑電阻，尤其是不同壓縮程度下之預測，對濕式底火操作非常重要，將其裝入藥模，以油壓機壓成藥錠，測其電阻， Kg/cm^2 油壓機錶示單位，實驗結果如圖 8。

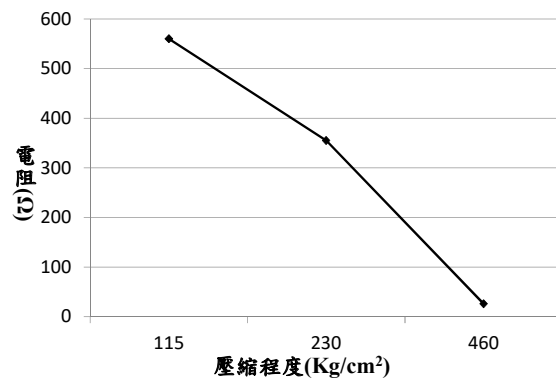


圖 8. 乙炔黑不同壓縮程度之電阻值分析

4.2 矽化鈣導電性之影響

二矽化鈣(Calcium Silicide, CaSi_2)常慣稱矽化鈣，須符合美軍規格 MIL-C-324C[9]，係一種無機化合物，熔點 1033°C 的白色或暗灰色至黑色固體物質。雖然相關物質安全資料表均顯示不溶於水，但同規格警告其遇到水時可能分解產生氫氣和生成氫氧化鈣，易燃。美軍研究[10]可在空氣中自燃，推測此可能粒徑小助長反應。反應式如下：



工業矽化鈣主要含有的雜質通常為鐵和鋁以及少量的碳和硫。更有重要者，有關電性之研究[11,12]，皆顯示其不穩定且不確定。文獻[1]亦記載，矽化鈣須經前處理，再加入底火藥混配。如是處理，濕底火藥於裝藥前有較長暫存期，且成品不致出現電阻漫遊幅度過大現象。故須對其實施鈍化處理，且借助阿拉伯膠對其抑制。惟處理方式略以史蒂芬酸[13]洗滌，細節未述。

國造濕式底火作法為混藥前，矽化鈣以史蒂芬酸水溶液(0.6 g/l)包覆，使之鈍化。其製備程序係將 11.793 Kg 矽化鈣及 0.666 g 史蒂芬酸加入裝有 110 公升去離子水之容器，接著在室溫下攪拌 8 小時並靜置 2 小時沉澱，將上層水排掉，在用磁漏斗和真空器抽濾，然後將得到之矽化鈣移至 60°C 烘房烘烘乾直到水份低於 0.5 % 以下，取出暫存待用。

對照將乙炔黑、矽化鈣及史蒂芬酸包覆矽化鈣在 300 Kg/cm^2 條件下量測電阻如圖 9。

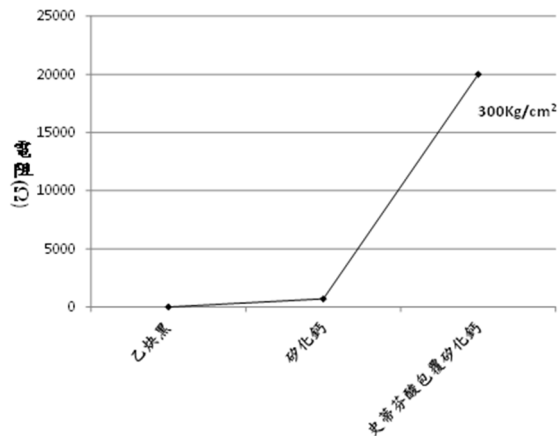


圖 9. 對照乙炔黑及矽化鈣處理前後電阻比較

更進一步，將包面矽化鈣、不包面矽化鈣及不含矽化鈣三者配方均以小批量製成底火，每種各隨機抽取 20 顆編號測試，量測全底火電阻如圖 10。

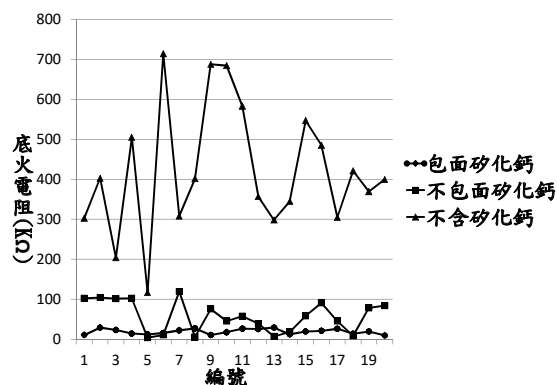


圖 10. 矽化鈣處理對底火電阻之影響

4.3 硝酸鉬粒徑分佈對電阻之影響

硝酸鉬本身非導體，但配方中比例最高，且粒徑影響底火之電阻。以標準作業程序，硝酸鉬採用 MIL-B-162 (class 1) 之合格品，使用前置於 50°C 電烘箱 72 小時以上，純度 98.5% 以上，粒徑大小原為小於 150μm 者 99.9% 以上、小於 105μm 者 40% 以上、小於 75μm 者 25% 以下。使用篩分機將其篩分 3 部分，第 1 部分 105-150 μm，第 2 部分 75-105 μm，第 3 部分 45-75 μm。45-150 μm 代表者為第 1 部分 30% 加第 2 部分 60% 加第 3 部分 10% 混合而成，75-105 μm 代表第 2 部分，105-150 μm 代表第 3 部分，三種規格之硝酸鉬製作成底火，驗證硝酸鉬粗粒徑、細粒徑與粗細混合微粒之硝酸鉬對導電通道之影響。依標準作業程序中

之自動化流程，攜行板分攜裝藥之火帽孟與襯孟，依序自動翻板循系進入襯孟壓裝道次，以 120TN 襯孟壓機將批量預合底火置入壓板之下，設定加壓時間 5 分鐘，檢查全高與外徑合格後，取其電阻量測如圖 11。

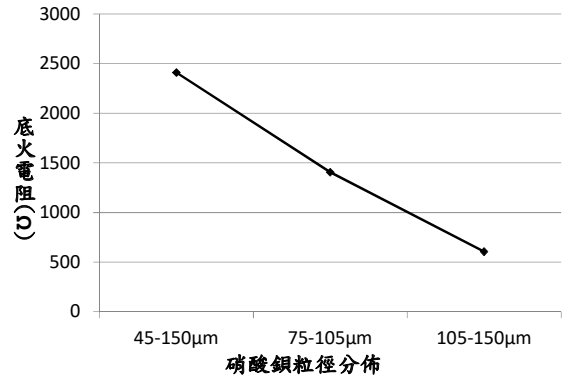


圖 11. 硝酸鉬粒徑與底火電阻之關連分析圖

4.4 壓藥操作對電阻之效果

裝藥密度的增加，會使底火電阻下降，一般藉由壓藥操作調控，其間力求避免有隨機與不可預測性，尋找穩定區域，為掌握實際壓力對底火之影響，以作為校正、檢整疵品之用。俟程序自動至襯孟壓裝時，改採手動程序，取出單顆底火，改以油壓機壓入襯孟，記錄操作壓力條件下之電阻，雖仍以硝酸鉬粒徑為樣品代表，但承受壓力測試者為全底火，包含矽化鈣本身及其包覆，乙炔黑、史蒂芬酸鉛等，實驗結果如圖 12。

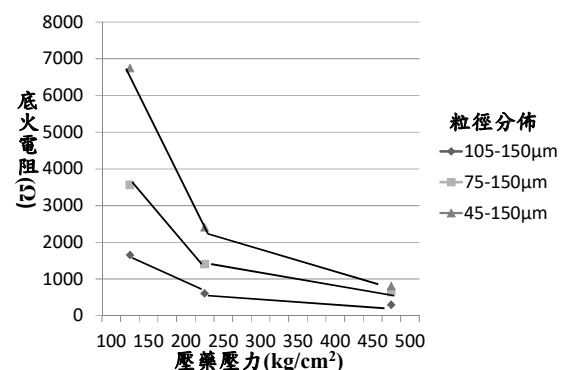


圖 12. 壓藥操作與底火電阻之關連分析圖

4.5 水份對電阻之影響

濕式底火製程中之水份對電阻的影響，決定最後烘藥操作條件的設定，並與品質有關，實驗結果如圖 13。

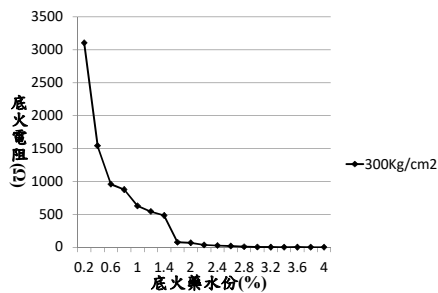


圖 13. 水分含量對底火電阻之影響

4.6 烘乾 (終烘) 與回壓對電阻之影響

美軍 MIL-DTL-1394G 規格[14]要求底火成品電阻以 1.4 mA 及 7.5 V 條件下測定，須在 1 KΩ 至 1,200 KΩ 之間，在襯盂、紙箔壓入底火盂密封底火藥之操作後，須實施烘乾及必要之襯盂重複回壓道次，作為成品電阻最後之調整，因其已非半成品且為自動化操作，改以烘乾時間與回壓次數觀察對電阻之影響。按原廠技轉人員之講解示範，生產經襯盂壓裝自動化道次後，抽驗外型尺寸，輸送帶進入 100% 電阻自動檢測機，剔除疵品，即為合格底火，並無終烘及回壓道次。後經檢討，自行增加此二道次，用於調整電阻，大量降低報廢率。其作法為自動化完成之底火，水份約為 0.3~0.5%，送入 60~65℃ 烘房，每日抽樣檢驗平均電阻與樣板篩檢尺寸，因尺寸有不合格情形，再視狀況運用氣壓機或油壓機將襯盂回壓，使全高與外徑處於規格中線，為達無損害檢驗之精神，凡經過電阻測試之底火，即予報廢，不再重複使用，實驗結果如圖 14。其中回壓 1 次及回壓 2 次，係指樣品經終烘 72 小時後，實施襯盂回壓 1 次及 2 次，再量測樣品的底火電阻值，橫軸標示之操作條件係指一連續系列的操作的各階段。

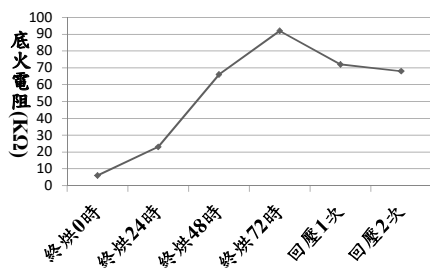


圖 14. 終烘回壓對底火電阻之影響

4.7 擊發敏感度與電阻之關聯

底火電阻除本身受規格規範外，與擊發敏感度有密切關聯。美軍規格要求電發火敏感度為使用 2 μF 電容放電，時間 10 ms，平均擊發電

壓加上 3 倍標準差需低於 160 V。電阻影響擊發電壓之因素頗為複雜，多藉實驗統計[15]，實驗結果如圖 15。

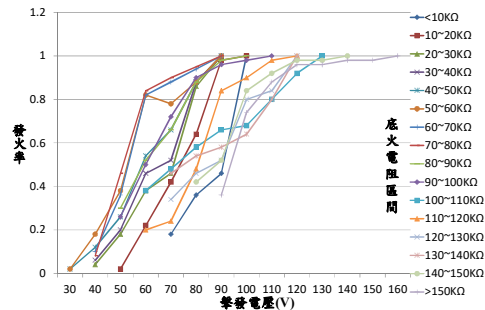


圖 15. 擊發敏感度與底火電阻之關聯

4.8 討論

本研究實驗 FA-874 導電底火藥，探討導電劑選優及調適濕式製程及發火電阻的影響，其討論要項如下：

- (1) 濕式底火從理論、實驗分析，碳鏈具有良好之導電性與可預測之熱功效率，故沿用碳鏈系列之導電劑。選擇乙炔黑係因其碳粒粒徑較石墨更小，僅少量即可形成符合設計之導電路徑矩陣，另其在壓縮狀況下，具有類線性之電阻性質，亦是優點。
- (2) 由於矽化鈣的導電性存在許多不確定因素，並且在熱水中會分解等狀況，顯示會在濕式底火中干擾導電路徑。惟其具燃料功用，且將其完全排除後，電阻雖合格但偏高。最有效的作法，仍是以前述包覆其表面，鈍化其活性，防止其干擾導電路徑，實驗證明有其效果。惟其確切的原因尚無法得知，但一般推測：乙炔黑為碳鏈結構，具有高度的異向性，亦即其電性質取決於測量之結晶方向，當電場施加於平行於某一平面方向時，由於非定域電子具有高度移動性，導致在此方向產生相對低的電阻率。復以矽化鈣為 P 型異質半導體，其在某些狀況下，易激發產生大量的電荷載體，干擾乙炔黑的結晶方向與導電性。
- (3) 圖 9 中矽化鈣電阻值高於乙炔黑，但圖 10 中不含矽化鈣配方的底火電阻較高乙節，其形成原因，討論如下：其一，乙炔黑本身成鬆散狀態，裝填密度低但可壓裝性高，藉濕混操作，易以膠溶液將其沾黏於硝酸鉍、史蒂芬酸鉛等大顆粒間，加壓後除水後，擠入狹小縫隙中，比較容易自行形成導電路徑；而矽化鈣密度較高，不易隨膠溶液擠入粗粒間隙縫，但配方中比例不低，

亦可形成另一導電路徑，並成並聯關係。因在導電路徑中，二電阻並聯在一起，總電阻會變小，因每個電阻都能提供一條路徑，讓電流通過，相當於增加了通路，電流容易通過電路中的各個電阻，從而總電阻變小。 $\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ 為其計算通式，學理上單獨導電路徑電阻值高於並聯電阻值。故不含矽化鈣配方的單一乙炔黑導電路徑底火電阻值較高。其二，或認並聯導電路徑僅為理想狀況，乙炔黑與矽化鈣實際上仍可能混雜形成複雜串聯導電路徑，在此情況下，乙炔黑的鬆緊程度成為關鍵，即受局限空間壓縮的狀態，極大地影響底火電阻值。乙炔黑在鬆散狀態，自身結構不緊密，電阻值較高；然在壓縮狀態，結構緊密，電阻值較低。在無矽化鈣配方狀態下，狹縫中僅有乙炔黑存在，受壓程度驟降，結構較不緊密，電阻值較高。反之，狹小空間同時擠入乙炔黑及矽化鈣，則促使乙炔黑受壓，結構緊密，電阻值變低。故不含矽化鈣配方的單一乙炔黑導電路徑底火電阻值亦較高。

- (4) 硝酸銀並非導體，在導電路徑中之佈置為構建狹縫，建立羊腸小徑，硝酸銀是腸壁，如圖 4、5、6，乙炔黑是粉粒，硝酸銀是粗粒之一且為硬度最高者。以粒徑分佈而言，粒徑範圍大，大小混雜之顆粒，最能產生崎嶇坎坷的導電通道，使電阻升高，產生熱點。以實驗推斷，粒徑分佈集中且大者 105~150 μm 最不易造成通道凹凸。反之，分布較不集中之 45~150 μm 易形成坑疤，兩隆起間，壓擠乙炔黑使之變細窄，電阻增加，故 45~150 μm 之粒徑分佈最佳。
- (5) 壓藥壓力對於底火的電阻值也有很大影響，當壓藥壓力變大時，乙炔黑的顆粒也就越容易靠近，導電粒子的分布密度較高，因此會產生更多的導電通路，造成電阻值會較低，所以壓藥壓力較大造成電阻較低，而壓藥壓力不足造成電阻升高。
- (6) 水份的存在與緩衝，大量減少操作危險性，此是濕式底火最大優勢；但水份的存在亦會干擾導電通路，影響電阻。水份因溶解硝酸銀，解離成銀離子和硝酸根離子，而產生導電性。根本解決之道仍須將其去除或降低至不影響品質範圍。
- (7) 熱風烘乾是最經濟安全之去除水份方式，然而烘乾後的底火非常敏感，致電阻品質

與操作風險必須相互配合。總結試造經驗，在混藥、掃藥、壓藥前，人工步驟難免，考量操作特性，水份應維持 10% 左右，以維安全。其因水份高，如同接地，且導電路徑與電流皆無法形成熱點，安全性高。接續烘底火時，底火藥已置入火帽孟與墊片中，操作自動化且須逐步達成電阻規格要求，水份應降至 2~3%，因尚有壓入紙箔、襯孟等加壓道次，仍須有一定水份存在，既可保持電阻於定值且不致過於敏感，妨礙加壓動作。最終烘底火道次，底火藥已成密封狀態，水份進出量微且慢，其最佳含水量應設定 0.3% 以下，回壓亦應間接以壓入襯孟方式微調。終烘時底火已為成品狀態，襯孟下均裝有箔紙，水分進出均有阻隔作用，應非主要影響，更重要者，判為底火之熟成、膨脹與消除應力等熱處理過程與冷擠作用，其間膠合劑之硬化、熟化，乙炔黑分子結構與晶相，底火藥體積熱脹等因素均使電阻值增加，冷卻後以回壓增加外部應力，又使電阻值降低。

- (8) 在電底火中，係靠著電阻來進行發熱點火的作用，然底火的電阻卻隨著壓藥壓力、不同成分混合比例、混合的製程不同、混藥攪拌均勻程度等諸多因素而改變。好的電阻，所需具備的特性為：①電阻特性：適當的電阻值、電阻溫度係數小、低殘餘電荷、高可靠性；②化學特性：化學安電性良好、低吸濕性、環境安定性佳；③溫度特性：熱安定性高、熱膨脹係數低、熱重量損失低、熱收縮低以及熱的傳導性高。
- (9) 參照美軍研究[16]與試造紀錄[6]，就擊發敏感度而言，電阻值設定 20~30 $\text{K}\Omega$ 為佳，因其擊發電壓 50~80 V 最為集中，標準差最低。

五、結論

國造 20 公厘電底火電阻之研究，標準配方條件不變動要求下，實驗主要影響因素，其結論可歸納如下：

- (1) 壓藥壓力對於底火的電阻值也有很大影響，當壓藥壓力變大時，乙炔黑的顆粒也就越容易靠近，導電粒子的分布密度較高，因此會產生更多的導電通路，造成電阻值會較低，所以壓藥壓力過大可能會造成電阻較低，而壓藥壓力不足造成電阻升高。
- (2) 實驗顯示在相同條件下，分布在底火藥的

非導電粒子粒徑越小，所產生的電阻值會越高，其原因是在相同重量的導電粒子條件下，粒徑小的粒子數量會較多，此時底火藥內非導電粒子的總表面積較大，造成非導電粒子兩接觸顆粒間的間隙會變小，於是導電通路變的越少，導電粒子的分布密度會降低，造成導電路徑相對變少，於是電阻值較高。

- (3) 導電劑以乙炔黑為主，矽化鈣仍應以史蒂芬酸包覆鈍化，將其功能侷限於燃料。
- (4) 所謂濕式底火之「濕」者，加入去離子水是也，雖增加操作安全，但制約品質，兩者應有配合與消長。察其自動化組裝製程，掃藥操作將底火藥裝入火帽盂，因仍須人工，加入較多水份，完成後藉風乾預烘道次，去除部分水份；轉入壓藥道次，批量操作，殉爆力道強，縱有安全防護，水份不宜過低，完成後須以輸送帶完成紅外線隧道烘藥；再轉入襯盂壓裝，雖仍有殉爆風險，但機率已低，水份可再低；最後終烘道次，水份可降至最低。水分含量關聯電阻固定與操作風險，應階段性降低其含量。

誌謝

本文承陸軍官校機械系埔光一〇〇專案管制暨資源挹注(計畫編號 ROCMA 112-WS-100-1-09)，特此誌謝。

參考文獻

- [1] Stiefel, L. (Ed), Gun Propulsion Technology, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.109, AIAA Inc., pp.13-16, 1988.
- [2] C43C 程序圖，二〇公厘機砲彈電底火，聯勤第二〇五廠，1988。
- [3] 潘明峯、蔡東容、鄭昌頻、孫耀強、陳爾活，輕兵器彈藥設計技術手冊，聯勤第二〇五廠，第 4-57~61 頁，1984。
- [4] 蕭建生、范宏知、蘇傾榮、宣仲華，“導電式底火頭發火特性及壓製之研究”，第二屆國防科技學術研討會，桃園大溪，第 211-217 頁，1993。
- [5] 宣仲華、吳宗欣，二〇電底火發火特性研究，中山科學研究院系統製造中心，1997。
- [6] 王三光，聯勤「二〇彈電底火生產製造工模具設備」案籌建紀實，(89)滴嚙自 0847 號，聯勤第二〇三廠，2000。
- [7] 徐福臨，二〇公厘電底火壽限與電阻值變化關聯之研究，國防大學理工學院應用化學研究所碩士論文，桃園，2002。
- [8] 黃宗輝、徐福臨、劉復龍，“硝酸鉍粒徑與溫度循環對二〇公厘電底火的擊發電壓影響”，火藥技術，第 20 卷，第 2 期，第 73-83 頁，2004。
- [9] U. S. Army Armament, Munitions and Chemical Command, Military Specification MIL-C-324C, 1983.
- [10] Anderson, P. E., Yee, K., Homentowski E., Cheng G., Mehta N., Chen G., Stec, D. III, Hash M. C., Pearsonand, T., Culter, R. A., and Hartvigsen, J., Effect of Chemistry and Particle Size on the Performance of Calcium Disilicide Primers, Part 1 – Synthesis of Calcium Silicide (CaSi₂) by Rotary Atomization, U. S. Army Armament Research, Development and Engineering Center, AD-E403 273, Technical Report, Armet-TR-09055, pp.6, 2010.
- [11] 邱志誠，鋰鋁/二硫化鐵電池峰壓產生原因之研究，國立臺灣大學化學工程研究所碩士論文，臺北，1997。
- [12] 劉淦璋，從二矽化鈣合成片狀矽在鋰電池負極的應用，國立臺灣大學化學工程研究所碩士論文，臺北，2022。
- [13] 潘旭輝、許柏鴻、陳幸郎、趙嘉琦、劉台傑，“史蒂芬酸研製”，火藥技術，第 25 卷，第 1 期，第 39-46 頁，2009。
- [14] U.S. Army Armament Research, Development, and Engineering Center, MIL-DTL-1394G(AR), Detail Specification, Primer, Electric: M52A3B1, 2006.
- [15] 方淳民、陳一葳、趙嘉琦，“國造二〇電底火之電阻調配”，第 32 屆國防科技學術研討會，桃園大溪，ND32-11210021，2023。
- [16] Bement, L. J., Holmes, C. J., McGrory, J., and Schimmel, M. L., An Investigation to Improve Quality Evaluations of Primers and Propellant for 20mm Munitions, Munitions Technology Symposium IV, Reno, Nevada, 1997.
- [17] 趙嘉琦、周壽錢、李世河、李建新、王寶龍，“國造傳火用史蒂芬酸鉛自動化生產之經驗”，火藥技術，第 17 卷，第 2 期，第 27-39 頁，2001。