

HMX/HTPB発射薬の圧力指数に及ぼすDHEDの効果

伊東 威*, 萩原 豊*, 原 吉孝*

DHED(Dihydrazirum ethylene dinitramine)は燃焼温度の低いニトラミン火薬であるが、これがHMX(Cyclotetramethylene tetranitramine)/HTPB(Hydroxyl-terminated polybutadiene) (90/10)発射薬の圧力指数に及ぼす効果をしらべた。密閉ボンブ法によって圧力と燃焼速度の測定を行なった結果、圧力指数はDHEDの添加と共にわずかながら低下することを知った。

155mm榴弾砲と弾丸を仮定し、試料発射薬DH3(DHED/HMX/HTPB, 30/60/10)について砲内弾道特性を計算し、現用発射薬M30のそれと比較した。この結果、DH3ではM30のような弾道性能を現実的に出すことができないとわかった。DHEDは圧力指数を低下させるけれども、DH3装薬の着火直後の燃焼速度はかなりおおいものであることがわかる。

1. 序 論

著者らは、HMX(Cyclotetramethylene tetranitramine)系発射薬の着火と燃焼の観察結果に基づき、密閉容器内における当発射薬の着火から燃焼への移行状態が無煙火薬系発射薬のそれと、近似的に一致することを既に報告した¹⁾。これに基づいて、HMX系発射薬の砲内弾道計算についても無煙火薬系と同じ計算法の適用が許されるようになった。また、本研究室では、以前よりHMXの高火薬力と低燃焼温度の特徴に着目する一方、各種の物質添加によって、高圧力指数の低下の試みを行ってきた²⁾。HMXにとって高圧力指数が最大の欠点であることはよく知られた事柄であるが、未だにこの問題は解決されていない。今回は、かつて米国において注目をうけたニトラミン化合物類の中から、DHED(Dihydrazirumethylene dinitramine)をとりあげ、その低エネルギー性がHMXの圧力指数低下に何らかの効果とを期待して実験を試みた。なお、得られた測定値の中から圧力指数の最も低い試料をとりあげ、仮りにこれを使用するとして、砲内弾道計算の上からその発射薬としての価値について吟味を行った。本論文ではこれらの結果について述べる。

2. 発射薬類のエネルギー的評価

各種発射薬類の燃焼温度(定容断熱火災温度, T_v)とエネルギー含量(慣用上、火薬の力とよぶ、 f)との

関係をFig. 1に示す。同図に示されるように、現用発射薬類は、ほぼ一本の直線上にのる。一方、HMX, EDNA, (Ethylene dinitramine) TAGN (Triaminoguanidine nitrate) およびDHEDなどのニトラミン類をHTPB (Hydroxyl-terminated polybutadiene)の10%で成型した試製発射薬類については、もう一本の直線上にのる。それによれば、ニトラミン類の直線の位置は現用発射薬類の直線の下にあり、ニトラミン類が現用薬と

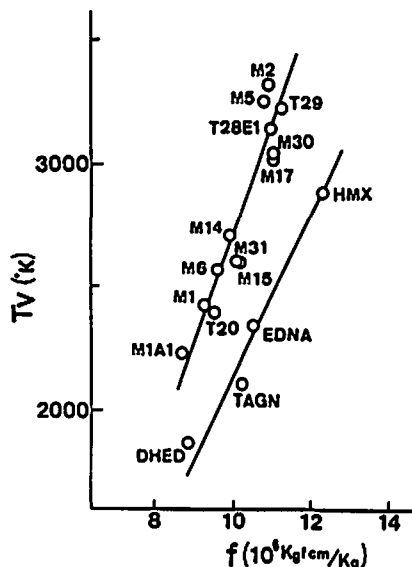


Fig. 1 Relationships between isochoric flame temperature (T_v) and force of explosives (f) for the conventional propellants and nitramines

昭和61年7月29日受理

*防衛大学校 化学教室

〒239 横須賀市走水1-10-20

TEL 0468-41-3810(内2408)

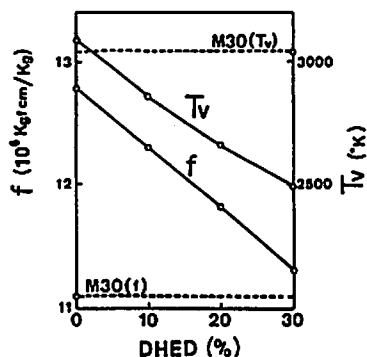


Fig. 2 Correlations of T_v and f to DHED concentration (%) in DHED/HTPB propellants

同じ f 値をもちながら、より低い T_v 値をもつという特質を示す。特に DHED のような低エネルギー物質を使って、HMX を希釈した場合には、HMX 本来の燃焼挙動にも何らかの効果を及ぼすことが期待される。それが圧力指数の低下につながるものであるなら、砲内弾道学的にみてもまた興味ある問題である。

3. 実験

3.1 試料

試料 HMX (中国火薬製品) の粒度はクラス A (粒径 $55 \sim 180 \mu\text{m}$) である。DHED は旭化成 KKK で試作されたものを使用した。同社の試験結果によれば、落槌感度および摩擦感度の 1/6 爆点はそれぞれ 8 級および 6 級に相当し、かなり鈍感で安全な物質といえる。本実験ではバインダーとして HTPB (米国アルコ社製品 R-45M) を使用しており、配合の際に化学反応は認められなかった。DHED/HMX/HTPB 混合試料の組成比としては、HTPB をすべて 10% とし、90% の残量を DHED と HMX で 0/90、10/80、20/70 および 30/60 のように分けた。これら四種の試料薬の T_v と f を DHED 含量% に従って示せば、Fig. 2 の通りである。なお、本実験では現用発射薬の代表として M30 をとりあげ、これと比較を行った。同図には、M30 の T_v と f のレベルをそれぞれ点線で記入した。試料薬は何れも M30 の T_v より低く、 f より高い値をもつことがわかる。なお、密閉ポンプ実験に使用した成型試料薬の形状と作成法については既報に述べた通りである¹⁾。

3.2 実験法

内容積 175cc のデュポン型密閉ポンプ内で試料薬を燃焼させ、時間に対するポンプ内圧力の上昇変化をピエゾ素子を用いて測定する。測定値は一旦デジタルメモリー (岩通 DM-305) に入れ、必要に応じて圧力-時間 ($P-t$) 曲線から圧力-燃速 ($P-r$) 両対数関係に変換される。この関係導出に米国防軍弾道研究所の

方法³⁾(BRL 法) が使われた。密閉ポンプ実験の装填比重、点火薬量および方法などについては既報^{4) 5)}の方法に準じた。

4. 実験結果

4.1 M30 の $P-r$ 関係

無煙火薬系発射薬の中でも薬質が不均質で、ニトラミン系のそれと近似するトリプルベース M30 (ニトロセルロース 28%、ニトログリセリン 22.5%、ニトログアニジン 47.7%) を用いて、先ず予備試験を行った。M30 については燃焼性能のデータが公表されており、これに基づいて本研究室の密閉ポンプ測定値から $P-r$ 関係導出方法の信頼性をも確かめることができる。

密閉ポンプ試験では M30 の装填比重 (Δ) を 0.12、0.13 および 0.15 のように変えて実験を行った。一回の実験から導出された $P-r$ 関係の測定値 (丸印) と公表値⁶⁾ (直線) とを Fig. 3 に示す。 $P-r$ 関係は両対数軸に対し直線を示し、次式を満足する。

$$r = \beta P^n$$

これより圧力指数 (n) と燃速係数 (β) を算出するが、各装填条件の下で三回の実験を行い、それらのデータから回帰分析によって n と β を定めた。

本来、密閉ポンプ試験では装填条件と無関係に n 、および β は一定の値が得られるべきものであるが、アーベル・ノーブル状態式を適用する限り、自ら装填条件にも制限が入る。即ち、 $\Delta < 0.4$ および $P < 3000$ 気圧であれば上式は満足されるといわれている⁷⁾。本研究室では既にシングルベース M1 について Δ が 0.12 から 0.16 の範囲を好ましい領域として選定している⁸⁾。従って本実験においてもこれにならって M30 に対し、上記三種の Δ を選んだわけである。測定の結果は Table 1 のようであった。これらの文献値と比較すれば、 Δ が 0.13 の場合、最も好ましく、0.13 から 0.15 の

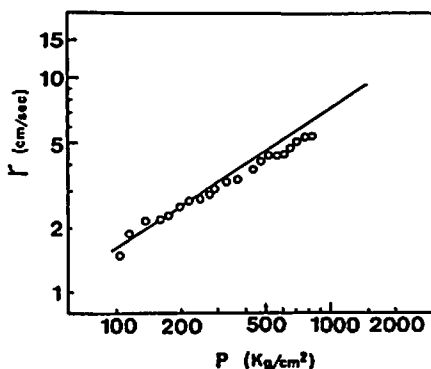


Fig. 3 Relation of burning rate (r) to pressure (P) for M30 propellant
circle: observed, line: published

Table 1 Comparison of the published data on pressure exponent (n) and burning rate coefficient (β) of M30 propellant with experimental results

| | Published data | Experiment | | |
|----------|----------------|------------|-------|-------|
| Δ | — | 0.12 | 0.13 | 0.15 |
| n | 0.65 | 0.63 | 0.67 | 0.65 |
| β | 0.083 | 0.060 | 0.085 | 0.074 |

範囲において実験すれば、信頼性のある測定値がえられることがわかる。また、M30のような粒子混合型の無煙火薬についても、上述の圧力測定とBRL法との結合処理が適切であることを示唆する。

4.2 HMX系発射薬の圧力指数に及ぼすDHED添加の効果

前述の四試料薬について $\Delta=0.14$ の装填条件にて、それぞれ3回の密閉ポンプ試験を行い、 $P \rightarrow r$ 両対数関係を導出した。測定点の回帰分析結果をFig.4に示す。同図によれば、HMXにDHEDを10%添加すると、燃速が増加するが、更に20%から30%と添加するに従って燃速は徐々に低下すると共に、傾斜が次第に緩やかとなることがわかる。なお、同図にもとずき圧力指数を算定し、DHED添加量(%)に対しプロットしたものがFig.5である。同図によれば、DHED添加量に従って n が低下する状況がわかる。すなわち、DHEDはHMXの高圧領域(500~1000気圧)の燃速を低下させる作用をもつといえる。

HMXの燃速に触媒的な効果を及ぼす物質は未だ得られていない²⁾。しかし、本実験のごとく、10~30%量のHMXをDHEDに置換することによって燃速が変動し、火薬力を著しく低下せず、燃焼温度を大巾に下げるといふ薬は珍らしい。従って、DHED/HMX/HTPBの30/60/10組成薬(仮りにDH3と名付く)について砲内弾道計算を行ない、初速と最大圧力を吟味することも必要であろう。これについては第5節で論議する。

4.3 試料薬の吸湿性、落槌感度および発火点³⁾

四種試料(10mm×6mmφの円柱状)ならびにDHED粉末(粒径88~210 μ m)およびHMX粉末について、実験室内の湿度約50%室温20~25℃の環境下で、72時間展開放置し、吸湿量を測定した。その結果、何れのものについても吸湿による重量変化は全く認められなかった。

HMX粉末、DHED粉末および10/80薬試料について落槌試験を行なった結果、それぞれ3級、8級および7級と測定され、DHEDはHMXの感度を大巾に

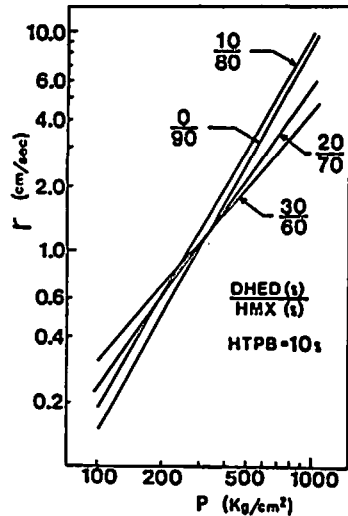


Fig. 4 Relations of burning rate (r) to pressure (P) for various DHED/HMX/HTPB propellants

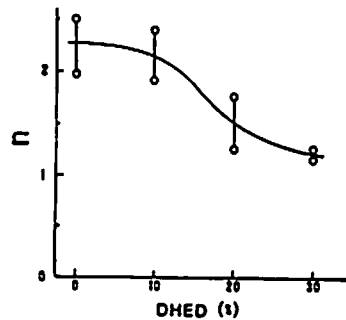


Fig. 5 Variation of pressure exponent (n) with DHED concentrations (%) in DHED/HMX/HTPB propellants

鈍化させるとみられた。

また上記試料のクルップ発火点試験による4秒発火点の値は、DHED185℃、HMX287℃、10/80薬265℃であった。

5. 論 議

5.1 試作薬の砲内弾道性能の吟味

DH3について次の条件下で砲内弾道計算を行ない、発射薬としての性能を吟味した。即ち、現用の155mm榴弾砲および弾丸を使用し、発射薬としてM30を許容圧力範囲内で用いた場合の砲内弾道曲線を、目標の基準においた。砲、弾丸、M30およびDH3の計算諸元をTable 2に示す。

M30は7孔管状薬であるが、これを砲の許容圧力範囲内に於て使用した場合、砲内圧力および弾速の曲

Table 2 Standard parameters for the 155-mm Howitzer and the test propellants

| 155-mm Howitzer requirements | | |
|------------------------------|---|--------|
| Bore diameter | (cm) | 15.5 |
| Bore length | (cm) | 401.3 |
| Chamber volume | (cc) | 13150 |
| Max. permissible press. | (atm) | 3100 |
| Projectile weight | (Kg) | 43.1 |
| Projectile travel (cm) | Resistance (atm) | |
| 0.00 | 250 | |
| 1.4 | 450 | |
| 2.54 | 261 | |
| 3.81 | 150 | |
| 5.08 | 130 | |
| 12.7 | 52 | |
| 25.4 | 52 | |
| 50.8 | 52 | |
| 400.0 | 52 | |
| Propellants | | |
| | M 30 | DH 3 |
| Force | ($10^8 \text{ Kgfc}/\text{Kg}$) | 11.095 |
| Isochoric flame temp. | ($^{\circ} \text{K}$) | 3040.0 |
| Ratio of specific heats | | 1.2385 |
| Covolume | ($10^3 \text{ cm}^3/\text{Kg}$) | 1.057 |
| Specific gravity | ($10^{-3} \text{ Kg}/\text{cm}^3$) | 1.66 |
| Pressure exponent | | 0.71 |
| Burning rate coefficient | ($10^{-3} \text{ cm}/\text{s} < \text{Kg}/\text{cm}^2 >$) | 8.26 |
| | | 0.0522 |
| Propellant geometry | | |
| Cylinder with 7 perforations | Sphere | |
| Cylinder length 0.6685 (cm) | Dia. 0.1 (cm) | |
| Cylinder dia. 1.5409 (cm) | | |
| Perforation dia. 0.0675 (cm) | | |

線は Fig. 6 の点線のようになる。この時の装薬量は4.7 kgであり、圧力曲線の丸印は装薬の燃焼完了点を示す。いま、DH3 試作薬の薬形を同じ7孔管状とし、同じ薬量を使用すると仮定して計算すると、装薬は燃焼未完了を示し、弾道効率は極めて低い。一方、これを避けるために薬形を小さくすると、砲内圧力は容易に許容圧力を越えてしまう。この現象は HMX 系発射薬の本性であるが、これを改善するためには、弾丸起動直後に必要な圧力を継続保持させる対策が必要である。これを試みるために、上記7孔薬を減じ、減量分を1mm径の球状で補う混合装薬方式をとりあげた。即ち、

両者の混合割合を4.7kgの範囲内で変化して各種の弾道曲線を求めた。この結果、最適と思われる曲線を同図に実験で示した。この場合、薬量の比は7孔薬3.7kg、球状薬1kgである。そこに示されるようにDH3の最大圧力はM30よりも低く、初速はM30の580(m/sec)に対し、DH3は551(m/sec)を示した。この試みに於ては、如何に組み合わせても同薬量では、M30の初速より大きくするとはできなかった。

5.2 HMX 系発射薬の改善策

M30のP- γ 関係 (Fig. 3)と HMX 系発射薬のそれ (Fig. 4)とを比較すれば、M30の燃速は200から1000

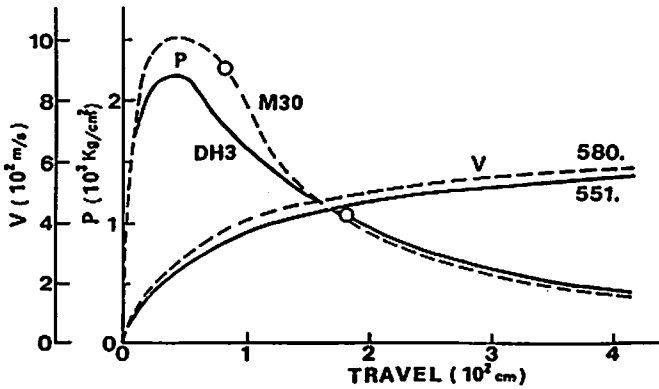


Fig. 6 Bore pressure (P)-travel and projectile velocity (v)-travel curves for M30 propellant (dashed lines) and DH3 propellant (solid lines), respectively

気圧の範囲内において、HMX系よりもはるかに高燃速であることがわかる。この圧力範囲は、砲内弾道学的にみれば、弾丸起動直後の圧力急昇曲線を形成し、弾速の急加速曲線を誘導する時期の圧力に相当する。従ってこの時期、薬としては高燃速を呈し、或は発生ガスとしては急膨張を發揮しなければ、必要な弾底圧力を持続しえないことになる。HMX系にとってこの領域の燃速が低いことは、開発を阻害する最大の原因であるといえる。

当研究室では、HMX系発射薬のこの領域の燃速を上げて、 $P \rightarrow$ 直線の傾斜を緩やかにする(n を低下)ことが最短コースと見ていたが、序論にのべた通り未だ成功していない。そこでもう一つの考案として期待される試みは、前述の小球粉状薬を混用する方法である。本法は前項でわかる通り、必ずしも巧みな方法ではないが、HMX系発射薬を使用レベルまで上げうる可能性を示すものである。

前項の考察はHMX系の燃焼性の難問を棚上げにし、燃焼表面積の分散化という物理的手段によって、HMX系は使用しうることを示したものである。もちろんこの考察は今後、圧力砲身長曲線の囲み面積の最大化を目標に、案を捏るべきであろう。その場合、当然、粉薬と固型薬の混合方式をとることになる。薬形状としては単純形であるのが望ましいが、必要に応じて燃速の異なる層状薬も試みる価値があろう。また現用の発射薬粒を燃焼初期に使うことも一案である。かくて、HMX系発射薬の実現はそう遠いものではない

ような気がする。

6. 結論

HMXに種々の割合のDHEDを添加して発射薬を作り、圧力指数に及ぼすDHEDの添加効果を調べた結果、DHEDはわずかながら圧力指数を低下させることを知った。

そのうちの一発射薬を選び、現用の砲と弾丸を用いて発射する場合を想定し、砲内弾道計算によって圧力と弾速の曲線を求めた。その結果、HMX本来の高圧力指数を下げたとはいえ、薬自体の燃速が低過ぎて有効な性能曲線が得られないことを知った。

しかしながら、このような場合、装薬の初期燃焼面を増加する操作が加われば、曲線形状が変りうることに気づき、実際に小球状薬と7孔薬の混合装薬の計算によってこれを実証した。このことはHMX系発射薬の今後の改善策を示唆する。

終りに、本実験のDHED試料を提供して下さった旭化成KK大分研究室の諸兄に厚く感謝する。

文献

- 1) 萩原 豊, 若松義文, 伊東 威, 工業火薬協会誌, 44, 6 (1983), 320-326
- 2) 山本多喜男, 伊東 威, 防大理工学研究報告, 22, 1 (1984), 25-33
- 3) A. A. Juhasz & C. F. Price, "The Closed bomb technique for burning rate measurement at high pressure", *Progress in Astronautics & Aeronautics*, Vol. 63, AIAA (1978), 129-151
- 4) 柏木重道, 伊東 威, 工業火薬協会誌, 42, 6 (1981) 384-387
- 5) 高瀬保典, 小野弘法, 伊東 威, 工業火薬協会誌, 45, 6 (1984) 351-356
- 6) MIL-9-46489
- 7) 山本裕徳, "火薬学実験法", 実験化学講座9, 共立社 (1940), P48
- 8) 伊東 威, 森 三信, 防大理工学研究報告, 18, 3 (1980), 325-332
- 9) 小野弘法, 防衛大学校理工学研究科卒業論文 (1985)

The Effect of DHED on the Pressure Exponent
of the Burning Rate for HMX/HTPB Propellants

by Takeshi ITO*, Yutaka HAGIHARA* and Yoshitaka HARA*

Dihydrazinium ethylene dinitramine(DHED)is a kind of coolburning nitramine powders. The effect of DHED on the pressure exponent for the HMX/HTPB (90/10) propellants was examined by means of a closed bomb technique. As a result, it was shown that the pressure exponent of the propellant is slightly lowered as DHED is added.

Assuming the 155mm howitzer and projectile, the internal ballistic characteristics of the sample propellant DH3 (DHED/HMX/HTPB, 30/60/10) were compared with those of the triple-base propellant M30. The result showed that the good performance like M30 propellant could not be realized for DH3 propellant. It can be seen that an instantaneous burning after ignition of DH3 charge is rather slow, though the DHED lowered the pressure exponent.

(*Department of Chemistry, The National Defense Academy, Hashirimizu 1-10-20, Yokosuka, 239 JAPAN)
