

エマルション爆薬の銃撃感度試験（第2報）

— 衝撃起爆臨界エネルギーについて —

廣崎義一*, 石田俊男*, 時田和司*,
森 伸生*, 服部勝英*, 酒井 洋*

エマルション爆薬に対し、材質および大きさの異なる平頭弾丸を衝突させ爆・不爆の臨界弾速を求めた。エマルション爆薬の衝撃特性はそれを構成する酸化剤水溶液のそれで近似でき、また弾丸の衝撃インピーダンスも音響近似されるとの仮定のもとに両者の界面にインピーダンスマッチングを適用した。圧力 P 、粒子速度 u 、衝撃圧力の持続時間 t の積 Put は弾丸の材質や大きさに依らずほぼ一定の値となり、衝撃起爆臨界エネルギーが実験的に求められた。 t は弾丸の周囲からその中心へ希薄波が伝播するのに要する時間に等しいと仮定した。 E_c の値は爆薬の密度、すなわち気泡含有量で異なるが、気泡の大きさによっても大きく影響を受け、気泡径が小さいほど E_c は大きくなることが示された。

1. 緒言

産業用爆薬のなかでとくに含水爆薬は通常の落錘感度試験や摩擦感度試験に対してほとんど反応を示さないために、銃撃感度試験がこれら鈍感爆薬の衝撃感度評価法の一つとして広く用いられるようになった。この試験法によれば爆薬の衝撃感度を臨界爆速の値と比較評価できるだけでなく、衝撃起爆に要するエネルギーという定量的な値で評価しうる可能性を有する。

爆薬が一次元平面衝撃波によって起爆するためには、単位面積当りにある臨界値以上のエネルギーが加えられることが必要であり、その臨界エネルギー E_c は(1)式で表わされることが Walker ら¹⁾により提唱された。

$$E_c = Put = P^2t / \rho_0 U \quad (1)$$

ここで P 、 u および t はそれぞれ圧力、粒子速度およ

び衝撃圧力の持続時間であり、 ρ_0 は爆薬の初期密度、 U は衝撃波伝播速度である。この考え方は不均一系の爆薬の一次元的な起爆限界に対して提案されたものであるが、Andersen ら²⁾によって2次元である高級爆薬やPBXの銃撃感度試験結果の解析に応用されてきた。エマルション爆薬は、均一系に近いW/Oエマルションに気泡が分散された形態をしており、その気泡としてガラスマイクロバルーン（以後GMBと略す）を用いれば気泡の大きさと量を容易にコントロールすることができる。今回は産業用爆薬としてこのエマルション爆薬を用い、(1)式の適用可能性を検討した。

(1)式により E_c を求めるには P 、 u 、 t をそれぞれ推定しなければならないが、 P と u は弾丸と爆薬との衝突界面のインピーダンスマッチングから、 t は弾丸の

Table 1 Formulation of emulsion (wt. %)

	Oxidizer	Water	Fuel ^{c)}	GMB
A	83.1 ^{a)}	11.3	5.6	0-4
B	83.5 ^{b)}	10.8	5.7	0

a) Ammonium Nitrate and Sodium Nitrate

b) Ammonium Nitrate and Sodium Chlorate

c) Emulsifier and Paraffin

昭和60年3月20日受理

*日本油脂株式会社化学薬品研究所
〒470-23 愛知県知多郡武豊町西門 82
TEL 0569-72-1221

周囲からその中心まで希薄波が到達するのに要する時間に等しいとしてそれぞれ求めた。エマルション爆薬の衝撃特性すなわちウゴニオ曲線が得られていないた

Table 2 Projectiles used in this study.

material	size (mm) diam. × length	weight (g)	density (g/cm ³)
Steel	10 × 10	6.1	7.80
	15 × 15	20.5	
	20 × 20	49.0	
Aluminum	15 × 15	7.4	2.79
Teflon	15 × 15	5.7	2.15

め、その衝撃特性はエマルジョンの酸化剤水溶液のそれで置き換えられるとした。エマルジョンは酸化剤水溶液の微細 (μm オーダー) な液滴が数ナノメートルのごく薄い油膜で隔てられた構造をしている³⁾ことからこの仮定を設けた。さらにその衝撃特性に universal Hugoniot⁴⁾を適用した。

2. 実験

2.1 試料爆薬

実験に供したエマルジョン爆薬試料の組成を Table 1 に示す。酸化剤成分として硝安のほかに A は硝酸ナトリウムを、B は塩素酸ナトリウムを含有する。爆薬比重の調整には 3M 社製の GMB, B-15/250 およびそれを篩分して得られた平均粒径 $98\mu\text{m}$ (標準偏差 $6.1\mu\text{m}$) のものを用いた。GMB を含有しないエマルジョンの比重は A, B ともに 1.40 である。

2.2 弾丸および銃

弾丸の材質として軟鋼、アルミニウムおよびテフロン³の 3 種類を選び、形状は直径と長さなどが等しい円柱平頭弾とした。使用した各弾丸の寸法、重量、密度等をまとめて Table 2 に示す。銃は口径が 15.6mm および 20.6mm の試験銃を用いた。10mm 径の弾丸は、直径 15mm、長さ 15mm の柱状合成樹脂 (ポリエステル) に直径 10.5mm、深さ 10mm の穴をあけてサポットとし、

そこへ 10mm 径の弾丸を入れて 15mm ϕ 用の試験銃より発射した。

2.3 銃撃試験法

所定の大きさの塩ビ管あるいは鉄管に装填された爆薬試料を燗温後、銃身の延長方向に対して試料面が垂直になるように置き、弾丸を衝突させた。試料の位置は銃口から約 2m の距離とした。弾丸が試料に衝突する直前の位置には 10cm 間隔で 2 本のヘリウム-ネオンレーザー (NEC 製 GLG5000 型) 光線が発せられており、弾丸が両光線を横切る時間間隔を計測して弾丸の速度を求めた。試料の爆否の判定は反応に伴う爆音の有無によった。実験にさきだち、試料爆薬の位置に厚さ 10mm のアルミニウム板を置いて弾丸を衝突させてその衝突面を観察し、弾丸がほとんど傾かず衝突していることを確認したが、その傾き角度の定量的評価は行なわれていない。

2.4 硝安水溶液の音速測定法

Fig. 1 に示すように、プラスチック製の円筒容器に種々の濃度の硝安水溶液試料を入れ、下端を閉じられたステンレス管中に絶縁スリーブを通して鋼球を落下さ

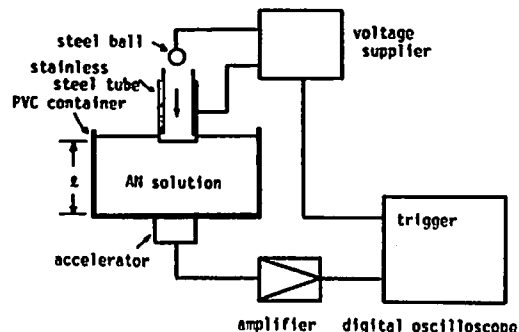


Fig. 1 Measuring system for sound velocity of ammonium nitrate solution.

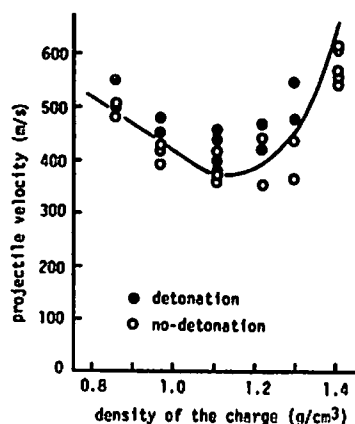


Fig. 2 Critical impact velocity of 15mm-diam x 15mm-long steel projectile versus explosive density.

せた。生じた音波が容器底面に達するまでの時間遅れをその距離 l の一次関数として求め、その傾きから音速を算出した。硝安水溶液の比重測定は比重びん法によった。測定温度はいずれも 25°C とした。

3. 結果

3.1 爆薬比重の影響

組成 A のエマルジョンに平均粒径 98 μm の GMB を添加量を変えて混和し、比重を 0.85 から 1.40 まで調整した。この試料を内径 40mm 長さ 50mm の塩ビ管に装填し、20°C に調整したのち 15mm ϕ の軟鋼弾丸を衝突させた。結果を Fig. 2 に示す。気泡を多量に含有する産業用爆薬の感度は、その気泡量すなわら爆薬比重によって変わることがカード・ギャップ感度試験でも示された⁹⁾が、銃撃感度試験においてもみかけ上感度が極大となる比重領域が存在し、この場合それは約 1.1 であった。爆薬比重が大きくなるにつれて爆薬

のみかけの衝撃インピーダンスが大きくなり爆薬に照射した衝撃波圧力が増大し、かつ気泡の圧縮に費やされるエネルギーが小さくなることから臨界弾速は低下していくが、一方では比重が大きくなることによる反応帯の長さの増大から塩ビ管の場合には希薄波の影響を受けやすくなり、爆轟を維持するために高い圧力が必要となる。したがって臨界弾速は大きくなっていくものと考えられる。両者のバランスにより感度の極大領域があらわれるのであろう。以上の結果から、以後の実験においては比重 1.10 の試料を主に用いることとし、また気泡を含む場合の試料温度は以後も 20°C とした。

3.2 試料径および長さの影響

爆薬が起爆するのに必要な弾丸の最小弾速すなわら臨界弾速 V_c を求める場合、弾丸の径に対して試料爆薬の径がある比率以上でなければ爆薬周囲からの希薄

Table 3 Effects of charge diameter and length on the critical projectile velocity.

diameter (mm)	30	40	50	40
length (mm)	50			100
projectile velocity (m/s) and result	359 ×	298 ×	342 ×	326 ×
	424 ×	326 ×	352 ×	357 ×
	437 ×	352 o	353 ×	361 o
	448 ×	353 ×	357 ×	362 ×
	448 o	355 o	360 o	386 o
	448 o	360 o	362 o	
	495 o	383 o	412 o	

Target : Emulsion explosive "A" ($\rho_0=1.10\text{g/cm}^3$) containing GMB of 98 μm

Projectile : Steel, 20mm ϕ \times 20mm^l

o : detonation × : no-detonation

Table 4 Effects of diameter and material of projectile on shock initiation of emulsion explosive.

diameter (mm)	15			10
material	steel	aluminum	teflon	steel
projectile velocity (m/s) and result	356 ×	322 ×	455 ×	410 ×
	372 ×	377 ×	521 ×	426 ×
	375 o	439 ×	532 ×	450 ×
	395 o	455 ×	532 ×	452 ×
	415 ×	459 o	549 o	455 ×
o : detonation	437 o	469 o	559 ×	469 o
× : no-detonation	455 o	508 ×	568 o	498 ×
	485 o	532 o	606 o	510 o

Target : "A" ($\rho_0=1.10\text{g/cm}^3$) containing GMB of 98 μm confined into

40mm ϕ \times 50mm^l PVC tube.

波の影響を受ける。また試料の長さも V_c に影響を与えないくらいに長くなければならぬ。そこで爆薬試料を入れる塩ビ管の内径と長さを変えて V_c に及ぼす影響を観察した。試料爆薬は平均粒径 $98\mu\text{m}$ の GM B を含有する組成 A で、比重 1.10 のものとした。弾丸としては一連の実験を通じて使用した弾丸のうちで最も大きい $20\text{mm}\phi$ の軟鋼弾を使用した。結果を Table 3 に示す。試料の長さを 50mm に固定して塩ビ管の内径を $30, 40, 50\text{mm}$ と変えた場合、 40mm 以上では V_c はほぼ一定となった。次に内径 40mm で長さを 100mm としたところ、 50mm の長さの場合と比較して差は認められなかった。

以上の結果から塩ビ試料管としては内径 40mm 、長さ 50mm のものを用いることにした。鉄管の場合には塩ビ管に比べ confinement の効果がきわめて大きいためその径および長さについての上述のような検討はとくに行わず、内径 36mm 長さ 50mm のものを用いた。

3.3 弾丸材質の影響

平均粒径 $98\mu\text{m}$ の GMB を含有する比重 1.10 の A を塩ビ管に装填し、3種類の材質の $15\text{mm}\phi$ 弾丸を衝突させた。結果を Table 4 に示す。爆発した最低弾速とその次に小さな不爆弾速との範囲を V_c とすれば V_c は弾丸の材質によって異なり、軟鋼で $372\sim 375$ 、アルミニウムで $455\sim 459$ 、テフロンで $532\sim 549\text{m/s}$ となった。

3.4 弾丸径の影響

3.3 で用いたのと同じ試料を用い、 $10\text{mm}\phi$ の軟鋼弾丸を衝突させたところ、Table 4 に併記した結果が得られた。3.2 ならびに 3.3 での結果を合わせると、弾丸径が 10mm 、 15mm および 20mm の軟鋼弾丸に対する V_c はそれぞれ $455\sim 469\text{m/s}$ 、 $372\sim 375\text{m/s}$ および $326\sim 352\text{m/s}$ となり、弾丸径が大きくなるにしたがって V_c は小さくなる傾向のあることがわかった。

3.5 硝安水溶液の音速

種々の濃度の硝安水溶液の比重および音速の測定結果を Fig. 3 に示す。溶液の比重と音速とはほぼ直線関係にあり、外挿して得られた比重 1.40 の水溶液に対する音速は 2100m/s であった。この測定法は比較的簡便な方法だが、この方法を用いて空気および水の音速を 25°C で測定したところ、それぞれ 344m/s (文献値⁶⁾ 347m/s) および 1500m/s (文献値⁶⁾ 1500m/s) という妥当な値が得られた。

4. 考 察

爆薬に弾丸が衝突したことにより衝撃波面は速度 U で進行し、そのあと爆薬自身は粒子速度 u で動く。(1) 式で与えられるエネルギー量は衝撃を受けた物質すなわち爆薬に対して加えられた運動エネルギーと内部エ

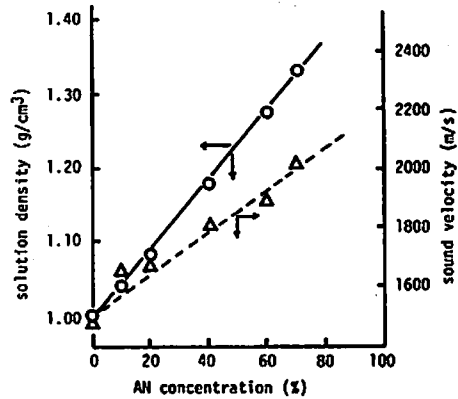


Fig. 3 Density and sound velocity of ammonium nitrate solution at 25°C

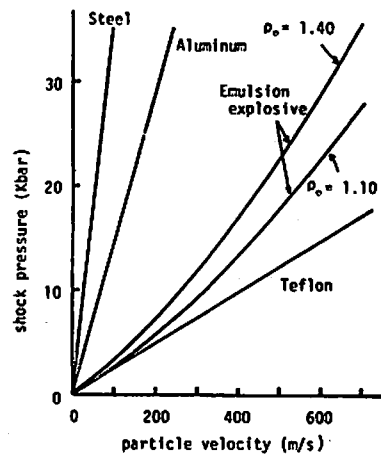


Fig. 4 $P-\mu_p$ curves of projectiles and explosives.

ネルギーの和であるが、起爆過程に寄与するのは後者だけであるとされている⁷⁾。爆薬が起爆するかしないかの限界(臨界)領域においては、弾丸の径によって定まるある一定の時間内にその衝突によって加えられたエネルギーが起爆過程の反応を持続させるかどうかを決定するものとなる。エネルギーが充分大きければ初期反応で放出されたエネルギーが反応波面の隣接領域に反応を誘起し安定した爆轟へと発達する。逆にエネルギーが不十分ならば周囲からの希薄波によって反応は弱められ中断してしまう。そしてこの臨界のエネルギー量は、爆薬の組成(反応速度)や密度、あるいは気泡径などによって影響されるが、これはそれらの因子によっていわゆる爆轟までの誘導時間(time to detonation)が異なることによるものであろう。

以下、上述した種々の実験によって得られた臨界弾速をもとに(1)式にもとづいて臨界エネルギーを求めて

Table 5 Critical conditions for emulsion explosive "A" ($\rho_0 = 1.10\text{g/cm}^3$) containing GMB of $98\ \mu\text{m}$.

Projectile	15mm ϕ \times 15mm t			10mm ϕ \times 10mm t	20mm ϕ \times 20mm t
	Steel	Aluminum	Teflon	Steel	
V_c (m/s)	372-375	455-459	532-549	455-469	326-352
u (m/s)	345	376	243-250	417-429	301-324
p (kbar)	10.9	12.2	7.1-7.3	13.9-14.4	9.2-10.1
t (μs)	1.63	1.44	3.57	1.08	2.17
E_c (cal/cm 3)	14.6	15.8	14.7-15.5	15.1-16.1	14.3-17.0

みた。なお臨界弾速として50%爆発確率となる弾速を用いる方法もあるが、ここでは最低爆発弾速と、その次に大きな不爆弾速との区間を臨界弾速とし、次のことを仮定した。

(1) 弾丸の材質のウゴニオは(2)式で近似できる。

$$P = (\rho_p)_0 C_b u_p \quad (2)$$

ここで P は圧力、 $(\rho_p)_0$ は弾丸材質の初期密度、 C_b は体積弾性波速度、 u_p は粒子速度である。 C_b の値は軟鋼、アルミニウムおよびテフロンについてそれぞれ 4600, 5210 および 1140 m/s t とした。

爆薬についてはそのウゴニオは(3)式で表わされ、

$$P = (\rho_e)_0 U u_p \quad (3)$$

ここで $(\rho_e)_0$ は爆薬の初期密度、 U は衝撃波伝播速度、 u_p は粒子速度である。また爆薬の衝撃特性はエマルションを構成する酸化剤水溶液、さらにはそれと同密度の硝安水溶液の衝撃特性で置き換えることができ、(4)式で示される universal Hugoniot $^{(4)}$ が適用できるものとする。

$$U/C_0 = 1.37 - 0.37 \exp(-2u_p/C_0) + 1.62 u_p/C_0 \quad (4)$$

ここで U , C_0 , u_p はそれぞれ水溶液中の衝撃波伝播速度、1気圧下での音速、粒子速度である。 C_0 の値は爆薬の初期密度によらず、それを構成するエマルションの酸化剤水溶液の密度で一義的に決まるものとする。

弾丸が衝突した場合の界面の状態は弾丸および爆薬の $P \sim u_p$ 曲線 (Fig. 4) からインピーダンスマッチング法で求められるとする。

(2) 衝撃圧力の持続時間 t は、弾丸の直径を d とすると(5)式で求められる。ただレテフロン弾丸の場合

$$t = d/2C_b \quad (5)$$

には爆薬中を伝わる音速 C_0 の方がテフロン中の C_b よりも大きいので C_0 を用いる。

以上の仮定のもとに、3.3 および 3.4 で得られた実験結果に対して E_c を計算した結果を Table 5 にまとめて示す。軟鋼、アルミニウムおよびテフロンの15mm

m ϕ 弾丸に対する E_c はそれぞれ 14.6, 15.8 および約 15 cal/cm 3 となった。一方、10mm ϕ および 20mm ϕ の軟鋼弾丸に対する E_c はそれぞれ 15.1~16.1 および 14.3~17.0 cal/cm 3 となった。弾丸の材質や大きさに関係なく E_c の値はほぼ一致しており約 15 cal/cm 3 である。また Table 5 には E_c の計算に用いられた種々の特性値も記してあるが、圧力はアルミニウム、軟鋼、テフロンの順に高く、15mm ϕ 弾丸ではそれぞれ約 11, 7 kbar である。

上述のように弾丸径が変化しても E_c はほぼ一定であるが、臨界弾速 V_c は弾丸径 d の増大とともに小さくなる。その関係は経験的に(6)式であらわされるとされている。ここ

$$V_c = A/\sqrt{d} + B \quad (6)$$

で A と B は定数である。Andersen $^{(5)}$ は(1)式と(6)式とが等価であることを示したが、本実験で得られた結果も(6)式で整理できた (Fig. 5)。

このようにエマルション爆薬の衝撃起爆に対してその起爆限界を(1)式で実験的に定量的に評価できることが示

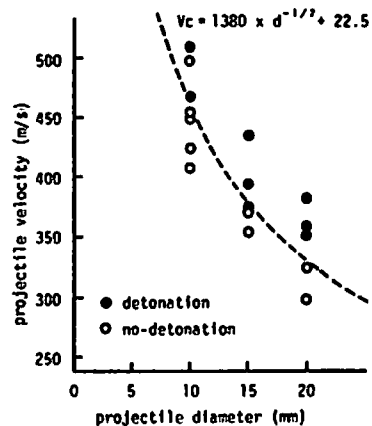


Fig. 5 Threshold curve for initiation of emulsion explosive ($\rho_0 = 1.10\text{g/cm}^3$) by flat-nosed steel projectile

Table 6 Critical conditions for emulsion explosive "A" at 20°C and emulsion "B" at 80°C.

Target	Emulsion explosive "A" containing unsieved GMB. $\rho_0 = 1.08 \text{ g/cm}^3$, $40 \text{ mm}\phi \times 50 \text{ mm}^l$ (PVC)		
Projectile	Steel	Aluminum	Teflon
V_c (m/s)	416–449	529–532	595–606
u (m/s)	382–412	432	271–275
p (kbar)	12.1–13.3	14.3	7.9– 8.1
t (μs)	1.63	1.44	3.57
E_c (cal/cm ³)	18.1–21.4	21.2	18.2–18.9

Target	Emulsion "B" of free bubbles $\rho_0 = 1.40 \text{ g/cm}^3$, $36 \text{ mm}\phi \times 50 \text{ mm}^l$ (steel)		
Projectile	Steel	Aluminum	Teflon
V_c (m/s)	323–383	382–400	529–562
u (m/s)	292–345	301–315	213–225
p (kbar)	11.3–13.9	11.7–12.4	7.7– 8.3
t (μs)	1.63	1.44	3.57
E_c (cal/cm ³)	12.8–18.6	12.2–13.4	13.9–15.9

projectile size : $15 \text{ mm}\phi \times 15 \text{ mm}^l$

されたので、応用として粒径をそろえられていない市販のままのGMBを含有するエマルジョン爆薬と、GMBを含有しないエマルジョンについて検討した。前者については爆薬比重1.08の組成Aを用い、3種類の材質の15mmφ弾丸で実験を行なった。実験結果および解析結果をTable 6の上段に示す。 E_c の値はテフロン弾丸では若干小さく約19cal/cm³、軟鋼弾丸とアルミニウム弾丸とでは約21cal/cm³となった。98μmのGMBを含有する場合に比べて E_c の値は大きくなっているが、後述するようにこれはGMBの平均粒径の差に原因するものであろう。未篩分のGMBの平均粒径は60μm程度(カタログ値)といわれているが、気泡径が小さいほど E_c は大きな値となる。次にGMBを含まない場合の例として組成Bのエマルジョンを用いて実験した。Fig. 2にも示されているように気泡を含まないエマルジョンは常温では600m/sの軟鋼弾丸でも爆発せず、また塩び管中では定常的に爆轟伝播しない⁵⁾。そこで試料を鉄管に装填し温度を80°Cとした。結果はTable 6の下段に示されている。各材質の弾丸に対して E_c は若干のばらつきがあるが、約14cal/cm³程度であろう。

さらに気泡の大きさの影響について検討した。筆者らは含有される気泡径が大きくなるにしたがってエマルジョン爆薬の感度が増大することを示したが^{10) 11)}、今回の実験と合わせてその結果を図示するとFig. 6のようになる。試料爆薬の組成はA、比重は1.10である。

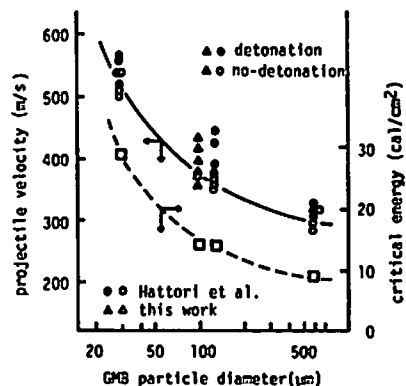


Fig. 6 Variation of critical projectile velocity and energy with particle diameter of bubbles.

エネルギー E_c は気泡径33μmで約30cal/cm³、98μmで約15cal/cm³、133μmで約14cal/cm³、およそ600μmで約9cal/cm³となった。気泡は密度の不連続点としてホットスポットの役割りを果たすが、爆薬の組成が同じでかつ同一比重ならば気泡径の大きい方がホットスポットへ与えられるエネルギー量は多く、高温となり、起爆しやすくなる¹²⁾。産業用爆薬において気泡の大きさがこのように感度に対して重要な因子となることがあらためて明らかとなった。

またエマルジョン爆薬に対して得られた E_c 値を他の高級爆薬やPBXに対する値と比べてみると、例えばpressed TNT ($\rho_0 = 1.645 \text{ g/cm}^3$)の34cal/cm³¹³⁾

コンポジション B ($\rho_0=1.73\text{g/cm}^3$) の 44cal/cm^3 ¹²⁾ LX-04 (plastic-bonded HMX, $\rho_0=1.860\text{g/cm}^3$) の 26cal/cm^3 ¹¹⁾ PBX9404 の 12cal/cm^3 ¹⁾ などと比較してほぼ同レベルであることは興味深い。

5. 結論

本研究においては(1)爆薬の衝撃特性はエマルションを構成する酸化剤水溶液のそれで置き換えられる。

(2) 弾丸と爆薬との衝突界面に対してインピーダンスマッチングが適用できることを仮定した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 衝撃起爆臨界エネルギーは弾丸の材質や大きさによらない。
- (2) 爆薬の起爆限界を示す弾速 V_c は弾丸直径 d の平方根に反比例するという過去の経験則⁹⁾に合致する。
- (3) 爆薬に含有される気泡径の大きさが小さいほど衝撃起爆臨界エネルギーは大きくなる。

文 献

- 1) F. E. Walker and R. J. Wasley, *Explosivstoffe*, 17, 9 (1969)
- 2) 例えば W. H. Andersen, *Comb. Sci. and Tech.*, 19, 259 (1979)
- 3) 竹内文雄, 山本頭一郎, 酒井洋, *工業火薬*, 43, 285 (1982)
- 4) R. W. Woolfork, Michael Cowperthwaite and Robert Shaw, *Thermochimica Acta*, 5, 409 (1973)
- 5) 広崎義一他, *工業火薬*, 43, 323 (1982)
- 6) 理科年表, 丸善 (1970)
- 7) W. H. Andersen, *Comb. Sci. and Tech.*, 24, 153 (1980)
- 8) S. P. Marsh "LASL SHOCK HUGONIOT DATA", University of California Press (1980)
- 9) 例えば K. H. Bahl et al. *Proc. 7th Symposium on Detonation*, p 858 (1981) の文献 5
あるいは Slade, D. C. and Dewey, *J Ballistic Research Laboratories, Report 1020* (1957) とともに入手不可能
- 10) 服部勝英他, *工業火薬*, 45, 143 (1984)
- 11) 服部勝英他, *工火協昭和59年度年会講演要旨集* p 57
- 12) H. Moulard, *Proc. 7th Symposium on Detonation*, p 182 (1981)

Projectile Impact Test of Emulsion Explosives (II)
Critical Energy for Shock Initiation of Emulsion Explosives

by Yoshikazu HIROSAKI*, Toshio ISHIDA*, Kazushi TOKITA*,
Nobuo MORI*, Katsuhide HATTORI* and Hiroshi SAKAI*

Projectile impact test of W/O emulsion explosives was carried out by using flat-nosed projectiles of several sizes and materials. Critical energy necessary per unit area for shock initiation of the charge, E_c , was evaluated from the minimum velocity of projectile enough for initiation. Impedance matching method was applied between projectile/explosive interface for evaluation of shock pressure and particle velocity under the assumptions of that (1) the shock characteristics of oxidizer solution which compose emulsion are applicable to the emulsion and that(2) the shock impedance of projectile is constant up to the shock pressure.

In this study, E_c values determined from the equation of $E_c = Put$ are nearly constant independent of projectile sizes and materials, where P , u and t are the pressure, the particle velocity and the duration of shock pressure respectively. However, E_c is affected by the particle size of gas bubbles contained in the charge. For instance, approximate E_c values for the explosives, density of which is 1.10g/cm³, containing gas bubbles of average diameters 33, 98 600 micron are 30, 15 and 9 cal/cm² respectively.

(* Chemicals & Explosives Laboratory, Taketoyo Plant, Nippon Oil & Fats Co. Ltd., 82 Nishimon, Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi, 470-23 Japan)