

分子間ポテンシャルモデルによる爆轟特性の研究 (第8報)

アルミニウム爆薬の爆轟特性

田 中 克 己

アルミニウムを含む爆薬の爆轟特性を木原一正田一田中式 (KHT) により計算し, アルミニウムの反応性について検討した。爆轟生成物中のアルミニウム及び酸化アルミニウムの状態式は衝撃圧縮実験より求められた Hugoniot と常圧下での熱膨張率より求めた。その結果固体のアルミニウム爆薬の計算による C-J 特性値はアルミニウムが爆轟波面で反応していないとした場合に近い事, 爆轟波の通過後アルミニウムは徐々に反応し数マイクロ秒程度で数10%のアルミニウムが燃焼する事が計算値とシリンダーテストや水中爆発試験による実験値との比較より推定された。

1. 緒 言

アルミニウムを含む爆薬は爆発熱が高いので高強度爆薬として主に軍用に使用されてきた。最近含水爆薬にアルミニウムが鋭感剤や燃料として利用されるようになった。また固体推進薬にも多量のアルミニウムが用いられている。爆薬組成物としてのアルミニウムの効果についての研究は重要である。ある意見 (例えば Cook¹⁾, Finger 等²⁾) ではアルミニウムは爆轟波面では燃焼していないとし, 別の意見 (Mader³⁾) ではアルミニウムを含む爆薬は理想的な爆轟をしておりアルミニウムは爆轟波面で燃焼しているとしている。もちろん爆薬の種類, アルミニウムの形状, 表面の酸化被膜, 粒径, コーティング剤等の要素により異なるであろうが, どちらの意見が正しいかはわかっていない。アルミニウムの反応性は発破や推進薬の爆発等における爆薬の性能評価に大きな影響を与えるものである。本報告では KHT による爆轟特性の計算結果と実験結果の比較からアルミニウムの反応性について検討する。

2. アルミニウムの状態式

爆薬中のアルミニウムは酸化されて主に Al_2O_3 になる。Al あるいは Al_2O_3 の Hugoniot は比較的よくわかっている。 Al_2O_3 が発生する場合爆轟温度は4000~5000Kと高温になる。前報⁴⁾で固体炭素の状態式として 0K 等温圧縮式 $P_c(V)$ を用いた Mie-Grüneisen 式を使用した。これは多孔性の固体炭素の Hugoniot

から推定したものであった。アルミニウムにもこの式を適用するため $P_c(V)$ を求めた。Fig. 1 に多孔度, つまり初期密度を変えたアルミニウムの圧力-体積 Hugoniot の実験値を示す。Grüneisen 定数 Γ は次式

$$P = P_H(V) + \frac{\Gamma}{V} (E - E_H(V)) \quad (1)$$

より求めた。添字 H は空隙のない理論密度の物質の Hugoniot 値を示し, P, E はそれぞれ圧力と内部エネルギーを示す。したがって Rankine-Hugoniot 式より

$$E_H(V) = \frac{1}{2} P_H(V_0 - V) \quad (2)$$

多孔性物質の初期体積を V_{00} とした場合, Hugoniot エネルギーは

$$E = \frac{1}{2} P(V_{00} - V) \quad (3)$$

である。(1)~(3)式と Fig. 1 の実験値より求めた Grüneisen 定数と体積の関係は Fig. 2 に示すようになる。実験値のバラツキが大きい, これは多孔度が増すにつれて不均一性が増大するため Hugoniot の測定誤差が大きくなるためである。ここで求められた Grüneisen 係数と体積の関係は Kormer⁵⁾ の結果に近い。Fig. 1 と Fig. 2 より前報の方法を用いてアルミニウムの状態式

$$P = P_c(V) + \frac{\Gamma(V)}{V} (E - E_c(V)) \quad (4)$$

を求めた。酸化アルミニウム (コランダム) の状態式は Fig. 3 の実験値⁶⁾より求めた。Fig. 3 のコランダムの実験値は多孔度の変化量が小さいので Grüneisen 係

昭和59年11月8日受理

*化学技術研究所保安環境化学部二課
〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1
TEL 0298-54-4788

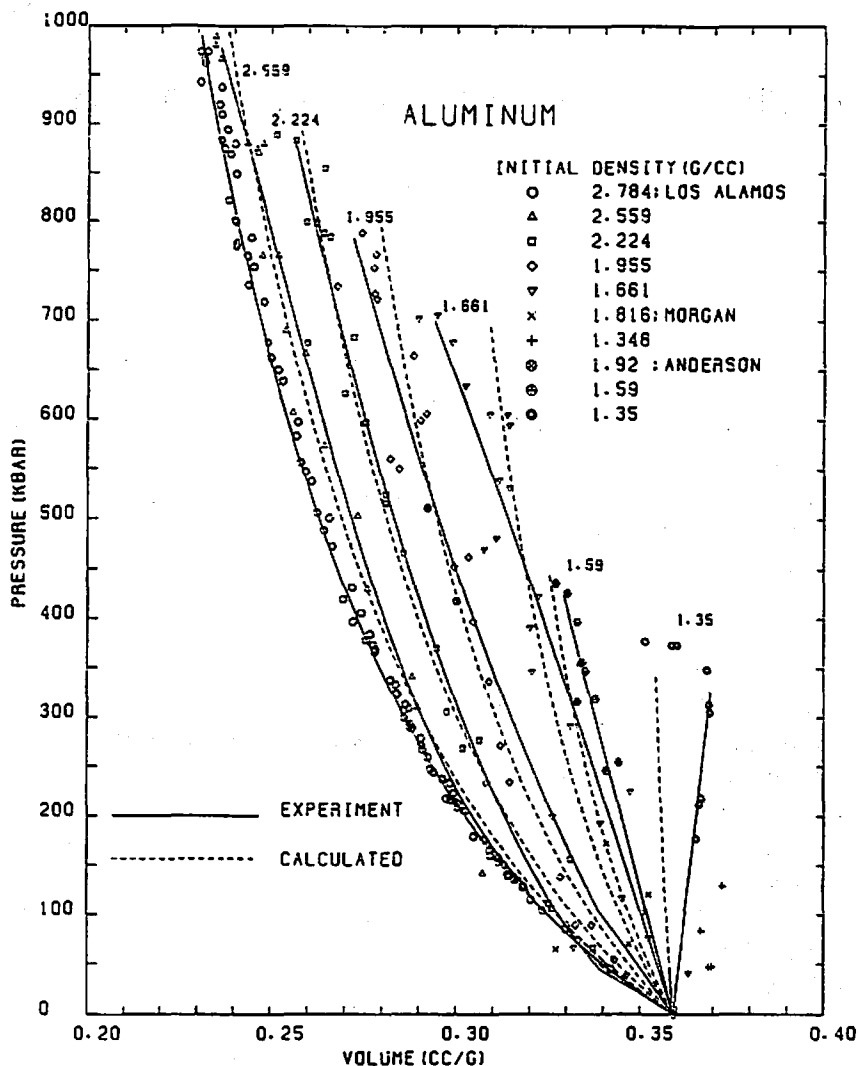


Fig. 1 Experimental Hugoniot data for solid aluminum⁶⁾. Hugoniot for porous aluminum are calculated using complete compaction model assuming Mie-Grüneisen equation shown in Table 1.

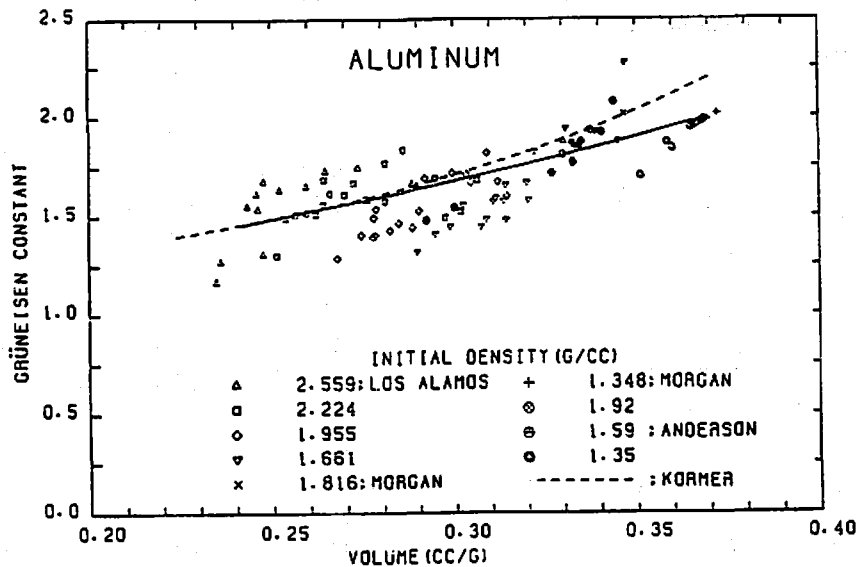
数は

$$\frac{\Gamma}{V} = \frac{\alpha}{C_v K} \quad (5)$$

により求め Γ/V を一定とした。アルミニウムと酸化アルミニウムの状態式の定数を Table 1 に示す。Fig. 1 の点線は Table 1 の値より多孔性アルミニウムの Hugoniot を逆算したものである。

Table 1 の数値よりアルミニウム爆薬の C-J 特性値を計算した⁷⁾。計算においてはアルミニウムを有する気体生成物は無視した。(4)式と Table 1 の数値より爆轟特性を求める場合、 Al_2O_3 を生ずるとした時いくつかの問題が生じた。アルミニウムが反応する場合酸

素バランスが負の爆薬では多量の固体炭素を発生し又爆発熱が大きいため C-J 温度も 5000 K 前後となる。その結果 Al_2O_3 は高压下でも常温での体積 V_0 以上に膨張する。(4)式の $P_c(V)$ は V_0 以上では 0 とするので圧力は(4)式右辺の第二項の熱圧力のみとなる。そうするとアルミニウムが反応した場合の C-J 特性値は Al_2O_3 の Grüneisen 係数と内部エネルギー E に大きく依存する。Grüneisen 係数や内部エネルギーは熱膨張率、圧縮率、比熱と圧力、温度、体積の関係に



F Fig. 2 Grüneisen constant vs specific volume calculated from experimental Hugoniot data in Fig. 1

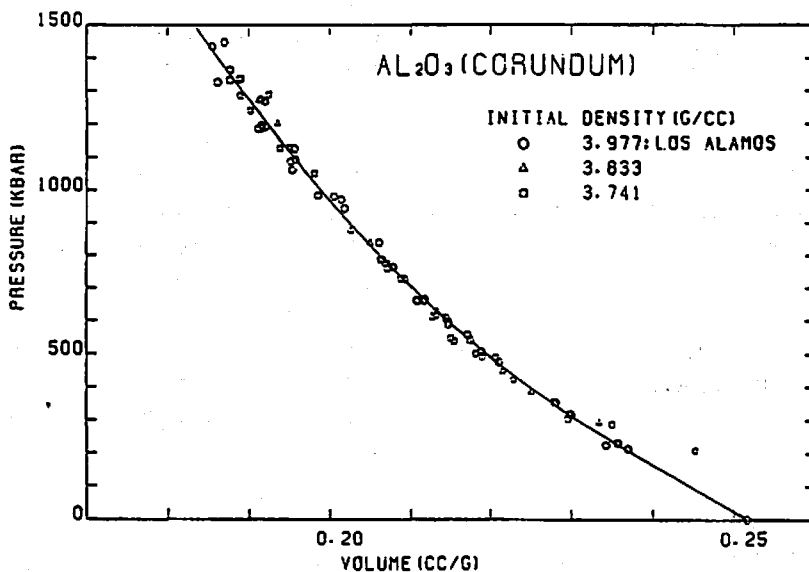


Fig. 3 Experimental Hugoniot data of Al_2O_3 ⁶⁾

より与えられるが不明な点が多い。また Al_2O_3 の圧力増加による融点の変化も明らかでない。パラメータ試験を行った結果熱膨張率が最も強い効果を与え、融解熱はあまり影響しない事がわかった。

そこで固体の状態式に適用する不明確な因子を減らすため、固体生成物に関する圧力-体積 Hugoniot を直接利用する方法を検討した。固体の Hugoniot は衝撃波速度 U_s と粒子速度 U_p の実験により求められた

線型関係

$$U_s = C + S U_p \quad (6)$$

より Rankine Hugoniot 式を用いて

$$P_H = \frac{C^2 (V_H - V_0)}{[V_0 - S(V_0 - V_H)]^2} \quad (7)$$

で与えられる。一般の爆薬の爆轟圧力は高くても 300 kbar 程度でこの程度の衝撃圧力に対する温度増加は

Table 1 Constitutive equation of state for solid aluminum oxide.

Al	
ρ_0 :	2.784 g/cm ³
$P_c(\text{Mbar})$ =	$32.245 - 368.11 V + 1628.6 V^2$ $- 3279.5 V^3 + 2512.9 V^4$
$\Gamma/V(\text{cm}^3/\text{g})$ =	$10.476 - 27.22 V + 36.499 V^2$
α :	$6.95 \times 10^{-5} (\text{K}^{-1})$
$T_H(\text{K})$ =	$-167.75 - 597.69 V_H - 767.38 V_H^2$ $- 433.30 V_H^3 - 90.205 V_H^4$
$u_s(\text{cm}/\mu\text{s})$ =	$0.5328 + 1.338 u_p$
Al ₂ O ₃ (corundum)	
ρ_0 :	3.977
$P_c(\text{Mbar})$ =	$-30.655 - 783.22 V - 6353.0 V^2$ $+ 21310 V^3 - 25868 V^4$
$\Gamma/V(\text{cm}^3/\text{g})$ =	5.75
α :	$2.28 \times 10^{-5} (\text{K}^{-1})$
$T_H(\text{K})$ =	$-4909.8 - 9479.5 V_H - 6841.8 V_H^2$ $- 2189.2 V_H^3 - 261.85 V_H^4$
$u_s(\text{cm}/\mu\text{s})$ =	$0.5173 + 1.473 u_p$
V, V_H : cm ³ /g. u_p : cm/ μ s	

アルミニウムで400K程度である。この程度の温度では体積変化は等温圧縮の場合の2~3%以下である。そこで0K圧縮式を(7)式で近似し、圧力、体積、温度、内部エネルギーを

$$T_H = f(V_H) \quad (8)$$

$$V = V_H (1 + \alpha (T - T_H)) \quad (9)$$

$$E = H^0(T) - P_0 V_0 + E_c(V) \quad (10)$$

$$E_c = - \int_{V_0}^V P_H dV_H \quad (11)$$

により求めた。(8)式はWalsh-Christianの方法により求めた衝撃温度の体積に関する多項式である。(8)~(11)式より圧力 P と温度 T を与えれば体積 V と内部エネルギーが求められる。エントロピー S は熱力学公式

$$(\partial S / \partial P)_T = - (\partial V / \partial T)_P = - \alpha$$

を用い、熱膨張率 α を一定として

$$S = S^0(T) - \alpha \int_{P_0}^P V dP \quad (12)$$

より求めた。(7)~(12)式に必要な数値はHugoniot定数の C と S 比熱、熱膨張係数である(Table 1)。熱膨張係

数は常温、常圧下のものを用いたが高温、高圧下での値はわからない。(8)~(11)式とTable 1の熱膨張係数を用いて計算した多孔性アルミニウムの衝撃圧縮曲線は同一圧力で体積を2~3%大きく与える程度であった。

3. 計算結果と考察

(8)~(11)式により求めたアルミニウム爆薬の爆轟特性値をTable 2に示す。アルミニウムが反応しないと仮定した場合はTable 1の P_c , Γ/V を用いた結果と(8)~(11)式を用いた結果に差異はほとんどない。 Al_2O_3 が生ずる場合は(8)~(11)式による結果の方がTable 1による結果より爆轟速度が実験値に近い結果を与えている。

(8)~(11)式では0K圧縮式を必要としないので他の鉛や塩化ナトリウムといった固体生成物を考慮する場合便利がよい。

Table 2からはアルミニウムが反応しないと仮定した方がC-J特性値は実験値とよくあうようである。Table 2に示した計算の他にもHMXやRDX/TNTとアルミニウムの混合物についても計算したがアルミニウムが反応しないとした場合の方がC-J特性値は実験とよく一致する。Mader⁹⁾のBKWによる結果ではアルミニウムが反応するとした方が実験値に近い。KHTとMaderのBKWによる違いはKHTに使用した固体炭素の式がMaderのものより圧縮式が高いことに起因している。アルミニウムが反応した場合、Table 2の爆薬は多量の固体炭素を生じ、その結果KHTでは固体炭素の圧縮体積をBKWより低く評価しているのでBKWより低い爆速を与える。Maderは固体炭素を多量に生ずるTNT等に対しては状態式を変えているがアルミニウム爆薬に対しては通常のRDXパラメータを使用している。もしTNTパラメータをアルミニウム爆薬に適用するならBKWも我々と同じ結果を与えるであろう。

次に等エントロピー膨張によるアルミニウム爆薬のエネルギー放出について検討した。Fig. 4にH-6のエネルギー放出量⁸⁾をKHTによるものと実験により求めたJWL (Jones-Wilkins-Lee)の式によるものを示した。この場合アルミニウムが反応すると考えないと実験値を説明できない。同様の事はHMX/Al, RDX/TNT/Alのシリンダーテストや水中爆発試験にあてはまる。CHNOの理想爆薬のシリンダーテストにより測定されたエネルギーはシリンダーが完全に円筒状に膨張するとした場合の爆轟生成物の膨張体積に対するC-Jエントロピー膨張の放出エネルギーに爆薬の初期密度を乗じた値と相関を有する。HMX/Alにもこの経験則を適用してみた。Fig. 5にKHTにより計算したHMX/Alのシリンダーテスト値とFinger等²⁾の実測値をアルミニウムが反応した場合と反応しな

Table 2 Detonation properties of aluminum loaded explosives. In KHT results, the aluminum is assumed to be inert for (1) and to be reactive for (2). BKW (M) denotes results calculated by Mader³⁾ assuming aluminum to be reactive.

Explosive	C-J Param.	Expt'l	KHT		BKW (M) RDX Param.	
			(1)	(2)		
Alex 20.44/32.2/19.8/4	D	7530	7523	7348	7496	
RDX/TNT/Al/Wax	P	230	230	245	252	
$\rho = 1.801$	T		2869	5202	5166	
$\Delta H_f = -0.66/100$ g	γ	3.44	3.43	2.97	3.01	
Alex 32.37.4/27.8/30.8/4	D	7300	7398	6991	7066	
RDX/TNT/Al/Wax	P	215	222	197	213	
$\rho = 1.88$	T		2615	5930	5928	
$\Delta H_f = -0.87/100$ g	γ	3.64	3.73	3.66	3.40	
HBX-1.40/38/17/5 RDX/TNT	D	7224	7234	7132	7270	
/Al/Wax	P		209	222	229	
$\rho = 1.72$	T		2916	4864	4839	
$\Delta H_f = -1.83/100$ g	γ		3.32	2.94	2.99	
HBX-3. 31/29/35/5	D	6917	6833	7181	6853	
RDX/TNT/Al/Wax	P		174	205	195	
$\rho = 1.81$	T		2473	6238	5690	
$\Delta H_f = -1.95/100$ g	γ		3.86	3.64	3.54	
Tritonal.80/20 TNT/Al	D	6475	6636	6407	6583	
$\rho = 1.72$	P		173	184	191	
$\Delta H_f = -5.0/100$ g	T		2922	5292	5330	
	γ		3.37	2.84	2.90	
H-6.45/30/20/5 RDX/TNT/Al	D	7194	7170	7072	7235	
/Wax	P		202	216	225	
$\rho = 1.71$	T		2874	5127	5138	
$\Delta H_f = -0.95/100$ g	γ		3.46	2.96	2.96	
Torpex. 42/40/18 RDX/TNT	D	7495	7618	7447	7492	
/Al	P		239	248	259	
$\rho = 1.81$	T		3053	5303	5261	
$\Delta H_f = 0.70/100$ g	γ		3.39	3.05	2.92	
PBXC-117.71/17/12 RDX/AL	D	7700	7618	7630	7680	
/Binder	P		231	251	249	
$\rho = 1.75$	T		2699	4612	4237	
$\Delta H_f = -7.26/100$ g	γ		3.40	3.05	3.14	
PBXN-1.68/20/12 RDX/Al	D	7930	7638	7634	7436	
/Binder	P	245	230	250	242	
$\rho = 1.77$	T		2700	4959	4635	
$\Delta H_f = -12.60/327$ g	γ	3.54	3.48	3.06	3.05	

い場合に分けて示した。Fig. 5の横軸はシリンダーが5mmおよび19mm円筒状に膨張した場合の体積に対するKHTで計算した放出エネルギーと初期密度の積で実線は経験則である。白丸と黒丸は各々アルミニウムが反応しない場合と反応した場合のKHTによる放出エネルギーとシリンダーテストの運動エネルギーを示す。Fig. 5ではアルミニウムは部分的に反応したような結果となっている。Fig. 5では銅シリンダーが5

mmおよび19mm膨張した場合について示したが、膨張に要する時間はそれぞれ約4~5 μ sおよび12~14 μ sである。したがって、爆轟波面通過後5 μ s前後までに部分的にアルミニウムが燃焼し、その後は燃焼は進まないと考えられる。Finger等²⁾はRUBYコードによる計算結果によりHMX/Al系では約12 μ s後アルミニウムが50%程度まで燃焼しその後はアルミニウムの燃焼は進まないと推定している。Fig. 5の結果は

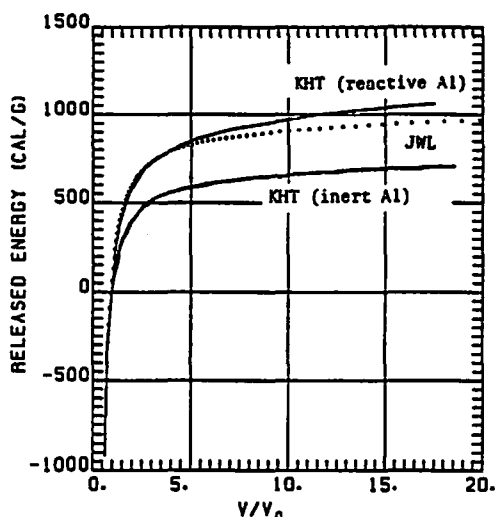


Fig. 4 Released energy of H-6 (RDX 45/TNT 30/Al 5wt. %). Dotted curve is JWL equation estimated from cylinder test results.

Finger 等の主張に近いものと考えられる。KHT および KHT による等エントロピー膨張式を用いた流体力学計算の結果と実験値の比較からアルミニウム爆薬では30~70%程度アルミニウムが燃焼していると考えられる。またアルミニウムが完全に反応した場合でも爆轟温度が極めて高いため大気圧まで爆轟ガスが膨張してもガスの温度が高く爆轟ガス中には数 100cal/g の熱エネルギーが残っており周囲に完全にエネルギーを放出しない。

Table 2 に示した結果は固体爆薬についてのものであるが液体爆薬であるニトロメタンとアルミニウム¹⁰⁾ の場合はアルミニウムが反応するとした方が実験値に近い計算結果を与える。液体爆薬はアルミニウムの表面に密着しているからアルミニウムが燃焼しやすいのかもしれない。しかし類似の含水爆薬やアルミニウムスラリー爆薬に対しては検討しうるデータがないのでどちらかはわからない。ANFO とアルミニウムの混合物の場合はアルミニウムが燃焼すると考えた場合⁹⁾ に近い結果を与えている。

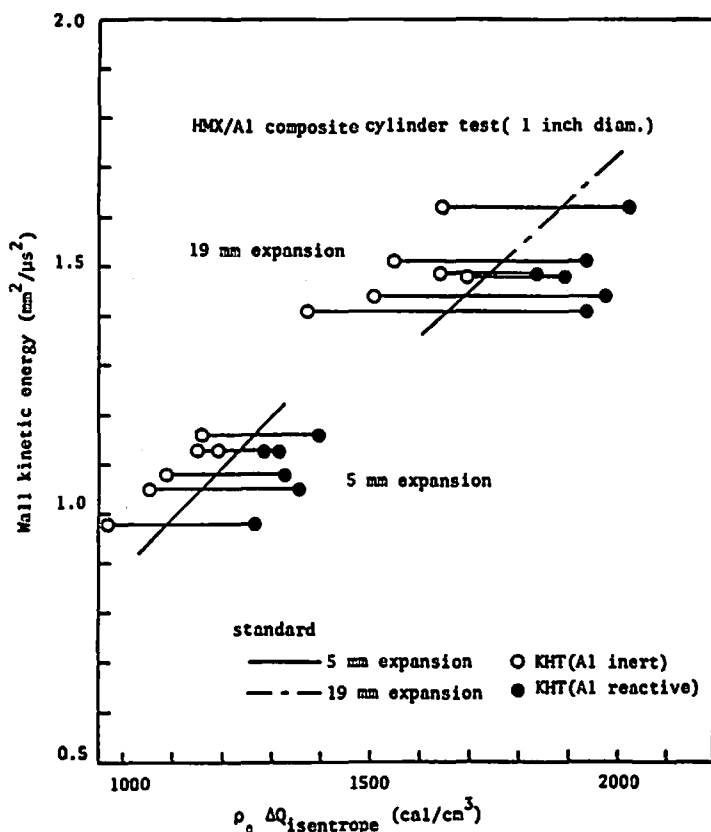


Fig. 5 Cylinder test results for HMX/Al composite⁹⁾. Energy per unit volume is the product of initial density and KHT-released-energy per unit mass of C-J isentrope.

4. 結 論

アルミニウムは重要な爆発組成物としてひろく利用されているが条件や薬種によっては燃料としての役割を完全にはたしていない。KHTによる計算結果からは

- (1) 固体のアルミニウム爆薬は爆轟波面ではアルミニウムを不活性物質とした方がよい。
- (2) 固体のアルミニウム爆薬ではアルミニウムの燃焼に5~10 μ s程度の時間を要する。
- (3) アルミニウム爆薬ではアルミニウムは完全には燃焼していない。

と推論される。

文 献

- 1) Cook, M., "Science of High Explosives", Reinhold, (1958)
- 2) Finger, M. et al, Sixth Symp. (International) on Detonation, 137, ONR, ACR-184 (1970)
- 3) Mader, C. L., "Numerical Modeling of Detonation", Univ. Calif. Press (1979)
- 4) 田中克己, 工業火薬協会誌, 36, 44 (1983)
- 5) Kormer, S. B. et al, Sov. Phys. JETP, 477, 15 (1962)
- 6) Marsh, S. P., "LASL Shock Hugoniot Data", Univ. Calif. Press (1980)
- 7) 田中克己, "爆薬の爆轟特性解析", 化学技術研究所 (1983)
- 8) Dobratz, B. M., "LLNL Explosives Handbook", UCRL-52997 (1981)
- 9) Kato, Y. et al, Sixth Symp. (International) on Detonation, 124, ONR, ACR-221 (1976)
- 10) McGuire, R. R. et al, Seventh Symp. (International) on Detonation, 940, NSWC, MP 82-334 (1981)

The Study of Detonation Properties of High Explosives Using the Intermolecular Potential Model

VIII. Aluminum loaded explosives.

by Katsumi TANAKA*

Detonation properties of aluminum loaded explosives are calculated by using the Kihara-Hikita-Tanaka equation of state to study the reactivity of aluminum. The equation of state of aluminum and aluminum oxide was derived from the experimental Hugoniot data and thermal expansion coefficient. The agreement between calculated and measured detonation velocities in solid explosives with aluminum is better for assuming aluminum to be in non-equilibrium state, i. e., inert. The comparison of detonation energies between calculations and measurements by cylinder test, however, indicates the continuous reaction of aluminum behind the detonation front.

(*National Chemical Laboratory for Industry,
Yatabe, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan)