

図 1 長い金属線を挿入するための螺旋圧伸の装置



図 2-1 6本の銀線を挿入した直径45mmのグレインのX線写真

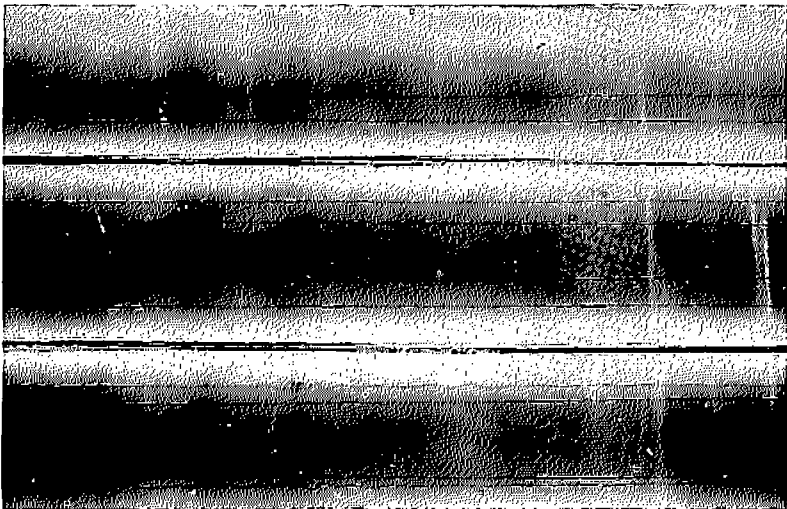


図 2-2 直径45mmのグレイン内の長い金属線の曲った状況を示すX線写真

(p-t) 曲線から確認できた。つまりこの推進薬の燃焼の再現性がよいことが確認できた。

ダブルベース推進薬に長い金属線を挿入するための圧伸製造法の登場はダブルベース推進薬の応用範囲の拡大のため及びこのような推進薬を最近発展している単一燃焼室で二段推力を得るために応用できることを見出した。

2. 製造工程と装置

2.1 挿入される長い金属線の螺旋圧伸機成形体中の位置決め

螺旋圧伸製造工程中での捏和薬の流れの性質から見れば成形体の拡張段に長い金属線を挿入するのはよくない。そのわけは拡張段での捏和薬の流れは減速と拡張効果があるためである。もしこのところに長い金属線を挿入するならば金属線が曲りやすく、同時にグレイン内の金属線の位置も固定しにくいことになる。収縮段で捏和薬が軸方向の推進力を受けるばかりでなく収縮段の容器壁の径方向の圧力を受ける。捏和薬の流動方向の円錐体の断面積がしだいに小さくなるために捏和薬の供給速度が一定である場合に捏和薬が加速運動を呈することになり、しかも内部集中作用力を持つことになる。もし収縮段のところに長い金属線を挿入するなら、径方向の圧力が金属線を中心に集中するのでグレイン内の金属線の位置の固定が保証しにくくなる。それと同時に捏和薬が軸方向に沿う流れの速度の違うため金属線が捏和薬の流れにつれて捏和薬の流れの速度差の存在によって張力を受けることになる。もし張力が金属線の固有強度より大きいと金属線が切断されることになる。したがって収縮段に金属線を挿入することはできない。

捏和薬の流れの解析結果によると成形体に長い金属線を挿入するのが一番適当である。その原因は成形体の断面積が軸方向につれて変化しないことである。つまり捏和薬が成形体内で軸方向に沿って平行的に流れるためである。このようなところに長い金属線を挿入すると、長い金属線の位置の固定が保証できるばかりでなく、長い金属線が引切られないことと曲らないことも保証できる。

しかし捏和薬が等しい断面積の成形体内での流れでは内部集中がないので金属線がしっかり挟みにくい。これは圧縮比の増大と針保持具の型を変えることによって解決することができる。所定の金属線を挿入したグレインを挿入するために成形体に長い金属線を挿入するのが最適であると考えられる。

2.2 実験装置

この実験で使われた装置は直径が80mmである螺旋圧伸機と直径150mmの円錐体及び直径45mmの成形

体である。円錐体の収縮段と成形体の間に6本モデル針を持つ一つの針保持具をつける。金属線が表面処理されてから金属線を捲く保持具から針保持具の内穿孔を通して成形体の針に入ってさらに針の上の金属成形体の針を使って推進薬のグレインに挿入される。

図1に示すように金属線を推進薬のグレインの固定位置に挿入させるためにしかもグレインを押し出す前に成形体の針が推進薬に押し曲がらないことを保証する必要がある。成形体の針の上に挿入管をつけてそしてこの挿入管と定位環の後にゴム栓をつける。その目的は挿入管を推進薬の捏和薬を挿入するための力を増加するためである。

もしグレインの押し出しの力がゴム栓の阻止力より大きいと、推進薬のグレインが挿入管と定位環を同時に押し出すことになる。したがって金属線がまっすぐに推進薬のグレインに挿入することが保証できる。この方法によって要求に合う金属線を挿入した推進薬のグレインが得られる。

3. 長い金属線挿入の螺旋圧伸によるグレインの品質におよぼす諸要素

数多くの実験を通じて、長い金属線を挿入する螺旋圧伸によるグレインの品質に影響する要素が多いことがわかった。しかし一番重要なのは被加工捏和薬、モデル、挿入される金属線の種類、幾何学的形状、製造条件などである。具体的にいえばつぎのとおりである。

3.1 成形体の影響

所定の金属線を挿入したグレインを挿入することができるかどうかのもっとも重要な要素は成形体の設計である。その設計の基本的な原則としては圧伸の過程で成形体が捏和薬の阻止力に対して適当であることである。

グレインの圧伸の時にできるだけ捏和薬を正常な流れの状態を保たせなければならない。しかも捏和薬を一定の流動状態で成形体をとらせなければならない。もし成形体が捏和薬の阻止力に対して不均一であれば流れの過程での捏和薬が阻止力の影響によって波動運動がおこり易い。同一の断面積に対していえば成形体の阻止力が小さいところでは捏和薬の流れ速度は速く、逆に成形体の阻止力が大きいところでは捏和薬の流れ速度がおそい。こうすれば捏和薬が金属成形体の針から持ってくる金属線の長さは違ってくる。長い金属線がグレインに対して曲りを持つことになる。それゆえに所定の金属線を挿入したグレインを挿入するためによい成形体を設計しなければならない。

3.2 成形体の針の幾何学的形状の影響

グレイン内の長い金属線の状態は金属線を導入する成形体の針の長さ及び粗さと密接な関係がある。成形

体の針が短すぎると、金属線が引切り易く、針が長すぎると、金属線が曲りやすい。成形体の針のサイズが決られたあと、所定のグレインを押し出すためには針の粗さが関係してくる。成形体の針が細すぎると金属線が曲りやすい、粗すぎると金属線が捏和薬にしっかり挟むことはできない。そのほか成形体の針の設計の際に捏和薬の性質を考えなければならない。即ち捏和薬の固さによって合理的に針のサイズを選択しなければならない。捏和薬の性質が違うから螺旋圧伸機の圧力を伝達する能力と圧力を受けてからの流れ状態とも違うことになる。

成形体の収縮段の円錐角は針の長さの選択にも対しても影響するものと考えられる。円錐角が小さいほど針の長さの調節の余地も大きい。SDP-10の捏和薬に対する要求はつぎのとおりである。つまり針の外径は0.8mmであり、針の長さは13mmである。

3.3 金属線の予張りの影響

所定の金属線を挿入したグレインを圧出するために金属線を捏和薬に挿入する前に金属線に一定の予張りを加えることが必要である。その方法はいろいろあるがこの実験で採用されたのは発条圧縮法である。加えられる予張力ができるだけ適当である必要がある。予張りが大きすぎると、金属線が引切れやすく、もし予張りが小さすぎると、あるいは加えなければ金属線がまっすぐに挿入されない。

3.4 金属線の直径の影響

捏和薬と成形体の針の長さ及び直径ばかりでなく長い金属線を挿入したグレインの品質は金属線の直径によっても影響される。一般的に言えば金属線が細いほど曲りにくいが細すぎると捏和薬にしっかりと挟まることができない。金属線の直径は軸方向の燃焼速度の大きさと関係がある。もし燃焼速度の大きさが決められてから、即ち金属線の直径が決られてから所定の金属線を挿入したグレインを圧出するために適当な成形体の針を選択する必要がある。

3.5 成形体の長さの影響

グレイン内に挿入される金属線の状態は成形体の長さとの関係がある。成形体の定形段が長いほどグレイン内の金属線が曲りやすい。その原因は成形体内の捏和薬が径方向の内部集中心と後の捏和薬が前の捏和薬に対する推力を受けるためである。そのうえ定形段の長さの増加につれて金属線がしっかりと挟まれる力も大きくなる、同時に後の捏和薬は前の捏和薬を押し、しっかりと挟まれる金属線が後の捏和薬の推力を受けて前面の捏和薬と一緒に流れ変形して曲りになる。その故に所定の金属線を挿入した推進薬のグレインを押し出すために必ず金属線がしっかりと挟まれることを保証すると同

時に短い定形段の成形体を選ぶことも必要である。SDP-10の捏和薬に対していえば成形体の収縮段の円錐角は $5 \sim 10^\circ$ であり成形体の定形段と直径の比は $L/D = 4 \sim 6$ である。

3.7 被加工捏和薬の影響

被加工捏和薬は直接に成形体を流れる変化特性に影響する。さらにこれは成形過程で挿入される金属線の受圧（圧力を受ける）の状態及び金属線の捏和薬内での分布におおいに影響する。もし被加工捏和薬の成分が均一でなければ成形過程で捏和薬が金属線に対する圧力も均一ではなく、したがって金属線を曲り易くする。同時に金属線を挿入する推進薬の溶剤比は最適に選択されねばならない。もし捏和薬が固すぎると流れ性能が悪く、金属線がしっかりと挿入されにくい。また捏和薬が柔らかすぎると、挿入される金属線と捏和薬がともに成形体内を流れ、変形してしまう。

3.7 製造工程による影響

螺旋圧伸機の製造工程のうち工程の温度は直接に捏和薬が螺旋圧伸機と成形体中とを流れる状態に影響をおよぼす。したがって金属線を挿入する螺旋圧伸機は製造の安定性に対してよりきびしい条件が要求される。

螺旋圧伸機の本体とスクリュレーパーとの工程温度が長い金属線を挿入したグレインの圧伸に対してきわめて重要である。これらの間の温度差を適当に保つことによって温度の変動を小さくすることができる。もし圧伸している途中で捏和薬が螺旋圧伸機の本体内に一つ或は二つの膠化領域を保つことができるなら捏和薬をおだやかに本体を通させることができる。

捏和薬の温度ができるだけ一定であることが望ましい。そうでなければ成形過程で捏和薬の変形が一定とならないため金属線がまっすぐに押し出されなくなる。SDP-10 捏和薬の最適な条件はつぎのとおりである。

本体の温度	70℃
スクリュレーパーの温度	82℃
成形体の温度	82℃~83℃
円錐体の温度	82℃~83℃
捏和薬の温度	78℃~80℃

製造工程の温度が適当に制御されることは捏和薬が成形体内を流れる成形体に対して有利と考えられる。温度がすこし高いと成形体容器壁と捏和薬の間の摩擦が小さくなるので成形体の断面上の各点での捏和薬の速度差が減少する。したがって挿入される金属線がまっすぐに押し出されることができる。

4. 実験の結果と検討

直径80mmの螺旋圧伸機でSDP-10推進薬を捏和薬とする6本の銀線を挿入した直径45mmのグレインを押し出す実験をとおして最適な製造条件、成形体の形

状、成形体の針のサイズ及び金属線の干張りなどについて検討した。X線の撮影の観察によってグレイン内の6本の銀線はまっすぐであり、しかも繰返しの実験をとおしてその結果が非常に良好であることを確認した。

所定の金属線を挿入したグレインを直径50mmのモーターにに入れてスロート直径4.4mmの条件のもとに燃焼した結果、燃焼はきわめて安定していることを確認した(図3, 図4参照)。そのp-t曲線の例を図5, 図6に示す。

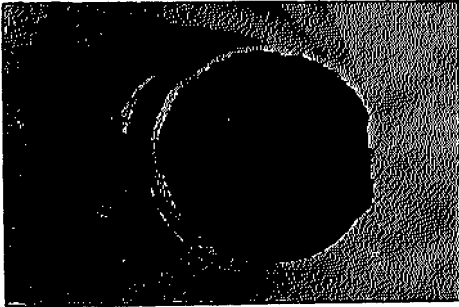


図3 6本の銀線を挿入した端面燃焼推進薬の燃焼中
断後の写真

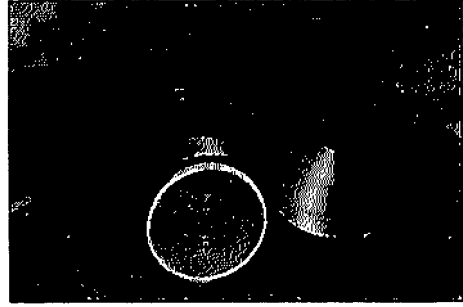


図4 6本の銀線を挿入した端面燃焼推進薬が直径50
mmのモーター内で組立られた状況を示す。

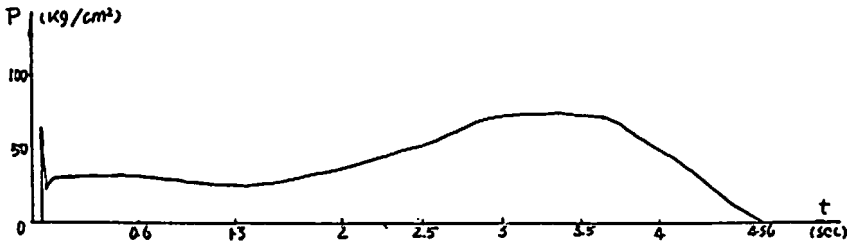


図5 6本の銀線を挿入した端面燃焼推進薬の燃焼によるp-t 曲線 (15mmの側面のコーティングを削ぎつた)

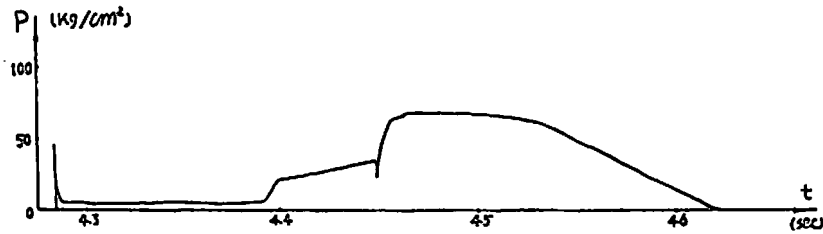


図6 6本の銀線を挿入した端面燃焼推進の燃焼によるp-t 曲線

なお、実験条件を表1に示す。燃焼試験では初期形状の異なったタイプの推進薬を用いて初期燃焼面積の効果を求めた。一つははじめの燃焼面が円端面であるこの場合には図6に示すように長い金属線を挿入したグレインがモーター内で燃焼した時に三つの圧力段階を示した。つまり初段、平衡段、末段である。もう一つははじめの燃焼面が円端面であることと長さの15

mmである円柱側面とのp-t曲線である。この場合には図5に示すように15mmの側面のコーティングを削ぎつたあと、推進薬の点火と早く平衡段に達することに対して十分に有利な方法である。その他の数多くの試験結果によると試験の結果が同じであれば記録の曲線の形状もほとんど一致することを確認した。

この実験で用いたSDP-10推進薬は104~208kg/

表1 モーターによる燃焼実験の条件

番号	モーター			火 薬		点 火 薬		備 考	
	D _K	d _K	点火空間	火薬の番号	D	L	タイプ		重量
1	50	4.30	20	1	45.50	116.10	2# + Mg	1.2/0.8	端面に二つの溝付
2	50	4.50	60	7	45.50	118.50	2#	5/0	端面に五つの溝付
3	50	4.50	3	4	45.50	106.20	2#	2.5/0	端面に二つの溝付
4	50	4.50	3	6	45.50	106.60	2#	3.0/0	端面に二つの溝付, 15mmの側面のコーティングを削る
5	50	4.20	3	2	45.50	116.90	2# + Mg	3.0/0.5	端面に二つの溝付, 10mmの側面のコーティングを削る
6	50	4.40	3	5	45.50	112.30	2#	3.0/0	端面に二つの溝付, 15mmの側面のコーティングを削る
7	50	4.40	0	3	45.50	115.60	2#	3.0/0	端面に二つの溝付, 15mmの側面のコーティングを削る

cm² の範囲内での燃焼速度と圧力指数との間には $r = 0.3665 P^{0.7084}$ (1) なる関係が成立する。平衡圧力と K_N (燃焼面積とスロート面積の比) との間には $P_{max} = 2.9382 \times 10^{-9} K_N^{3.43}$ (2) なる関係が成立する。

次にモーターによる燃焼データを使って6本銀線を押入した直径45mmであるグレインの燃焼面積の増加の倍数を求めてみる。モーターのデータの実験条件すなわちスロートの直径 $d_K = 4.4\text{mm}$ グレインの外径 $D = 45.5\text{mm}$, 端面燃焼の $K_N = 106.9$ においては最大圧力は $P_{max} = 120\text{kg/cm}^2$ となる。長い金風線を押入した推進薬のモーターの $p-t$ 曲線中で、定常燃焼に達する最大圧力は(2)式で示される平衡圧力である。(2)式によって次の式が得られる。

$$K_N = 3.872 \sqrt{\frac{120}{2.9382 \times 10^{-9}}} = 550.14$$

$$\text{燃焼面の最大比 } \Delta S = \frac{550.14}{106.9} = 5.14$$

すなわち、計算によって求められた金風線を押入したグレインの燃焼面の増大比は5.14である。モーターの実験の条件が同じであれば燃焼速度の増大比も同じである。これは螺旋圧伸方法で圧出した金風線を押入したグレインの品質と繰返し性能が設計の要求に満足することを示している。燃焼面の増大比は押入した金風線の種類および推進薬の母体の燃焼速度と関係がある。これは金風線を押入したグレインの燃焼が推進薬の燃焼面に対して直角の方向となるためである。金風線に沿う燃焼速度を r_f , 推進薬の燃焼速度を r とすると、 r_f は r より大きいから金風線を軸心とする円錐形となる。

$$\sin \theta = \frac{r \cdot dt}{r_f \cdot dt} = \frac{r}{r_f} \quad (3)$$

もし金風線に沿う燃焼速度 r_f と燃焼チャンバーの圧力 P との関係指数関係で現れると、つまり $r_f = a_f P^{n_f}$ 推進薬の燃焼速度 $r = a P^n$ 。それでは $\sin \theta = \frac{a}{a_f} \cdot P^{n-n_f}$ この関係から円錐形の角度 θ は推進薬の圧力指数 n 及び金風線に沿う燃焼速度 r_f の圧力指数 n_f と関係があることがわかる。即ち圧力 P の変化につれて θ も変化する。 θ の変化の範囲は n と n_f によって左右される。したがって、必要な燃焼面の増大比が求められると $\sin \theta = 1/\Delta S$ から $\sin \theta$ を求めることができる。

金風線を押入した推進薬の母体が決定されていればその $r = a P^n$ もわかる。さらに(3)式によって r_f 値をを求めることができる。さらに異なった材料の金風線を選択する(あるいは異なった表面のコーティングの選択)ことによって本報告の方法でモーターの要求に満足する長い金風線を押入したグレインを押出すことができる。

5. 結 び

本研究で開発した螺旋圧伸方法でロケット推進薬に長い金風線を押入したグレインを押出すことができる。このグレインによって燃焼性能が穏やかで、かつ繰返し性能のよい端面燃焼装薬が得ることができる。

螺旋圧伸機で長い金風線を押入したグレインを押出す方法によって現在は直径45mmのグレインの製造方式の研究を行なっている。今後さらに生産工程の拡大実験の研究と長い金風線を押入したグレインの燃焼方式の研究を行うことが必要と考えられる。さらに推進薬の母体、金風線の材料、直径、コーティングの異なっ

た推進薬の燃焼性能との間の関係などを求める必要がある。

文 献

- 1) L. H. Caveny, and R. L. Glick, "The influence of embedded metal fuels on solid propellant rocket." *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1967, Vol. 4, No. 1.

- 2) N. Kubota, M. Ichida and T. Fujisawa, "Combustion Processes of the Propellants with Embedded Metal Wires", AIAA Paper No. 80-1207, June 1980.
- 3) BP. 1172, 221, 1969.
- 4) BP. 994, 184.
- 5) USP. 3567, 805.

Screw Extruding Process of Double-Base Propellant Grain Embedded Continuous Metal Wires

by XIE Yu-Li, YANG Xi-You

This paper relates to a process of producing double base propellant grains embedded with continuous metal wires by the screw extruder. It is based on the mechanical analysis of rheological properties of propellant matrix in the screw extruder. By this process, the continuous metal wires embedded in grain are made straight and arranged properly to meet the design demands. The grain are able to burn steadily in the standard experimental motor of 50 mm diameter. The axial burning rate of the end-burning grain embedded with six silver continuous wires of 0.13 mm diameter is 5 times as great as that of the propellant matrix.

This paper also provides the apparatus of screw extruding process for producing grains embedded with continuous metal wires and analyzes the factors effecting the quality of the grains.

Finally, this paper discusses how to select suitable propellant matrix and the sort, diameter and coatings of wires according to the thrust requirement of the rocket motor, and then to proceed a perfect grain embedded with continuous metal wires through extruding which satisfies the thrust programme of the rocket motor.