

推進薬の信頼性と物性

鈴木 健一*

1. まえがき

ロケットエンジンの信頼性保証のために、各分野において信頼性計画という名の下に多くの努力がなされつつある。この計画の中にあつて信頼性そのものを向上させる技術は極めて大切であつて、そのためには、充分な研究開発によるデータに基にして、優れた設計がなされなくてはならない。

推進薬の信頼性を向上させるには、

- 1) 各工程において起こる可能性のある故障についての解析
- 2) 再現性を確保するための要因の解析

二点の検討が重要である。特に第一項は、ロケットの飛行任務に対して影響を与える大小さまざまな故障について、その形態、原因、影響を検討し、システムデザインの段階から、研究、試作、製造、検査、更にランチングにいたるまで、すべての段階においてこれを取り除く努力であつて、非常に大切である。ここでは、この内特にロケットの機能に対して影響の大きい力学的故障について述べる。

固体推進薬の物性に関連して設計上問題となる力学的故障は、気泡、クラック、欠損、形状の経時的変化、接着部の剝離である。その原因となる外力は、

- 1) 推進薬の製造、貯蔵、運搬中の周囲の温度差によつて生ずる熱応力。
- 2) 運搬中の振動。
- 3) 貯蔵中の自重。
- 4) 点火後の燃焼ガスによる圧力。
- 5) 飛昇中の加速度。

などが考えられる。これらの力に耐えるためには、物性の優れた推進薬、ライナー、耐熱材、接着剤、およびエンジンケースが必要である。

推進薬の設計に当たつては、前述の故障除去の観点から、次の諸点の検討が行なわれるべきである。

- 1) 推進薬および接着剤の破壊特性
- 2) 推進薬、ライナー、エンジンケースなどのヤング率、ポアソン比、熱膨張率、その他の物理的性質。

3) 推進薬の形状による、各部の応力集中係数。

4) 熱応力その他の諸外力により発生する、推進薬内部や接着部の応力、歪、変位の実測値および理論計算値。

5) 推進薬の破壊に関する限界値。

以下、ポリブタジエン推進薬について、これらに関して得られている知見の二三を紹介する。

2. 破壊特性について

通常は、定速度の引張りによる単軸の破壊強度と伸び率を測定する。この値は温度によつて異なるので $-50^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で数点測定する。また経

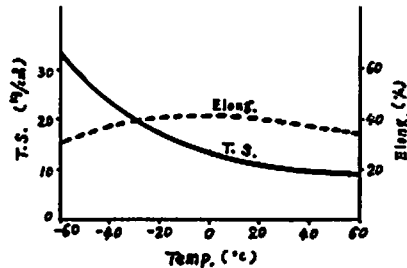


Fig. 1 Temperature-tensile properties of propellant, strain rate=1.
T. S. ...Tensile Strength

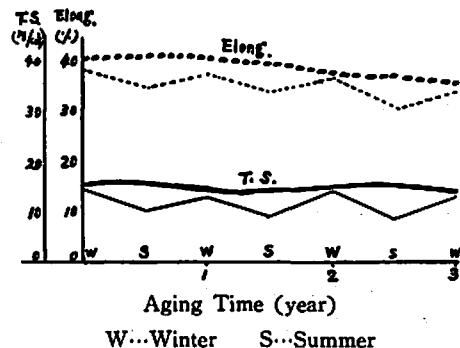


Fig. 2 Aging properties of propellants, at natural conditions. Specimen thickness=5mm
T. S. ...Tensile properties.
Thick line for dried specimen.
Thin line for specimen in natural condition.

昭和44年5月22日受理

* 旭化成工業株式会社 坂ノ市工場 大分市大字里2620

時の変化は是非知つて置く必要がある。Fig. 1, 2, に代表的な測定例を示す。ポリブタジエン推進薬はこのような温度特性、耐経時性が特にすぐれている。

次に固体推進薬は、粘弾性といわれる特性を持つていて、加えられる外力のスピードによつて、いいかえると力が加わつてから破壊するまでに要する時間 (tb) によつて、破壊特性が変わつてくる。更に力の種類が定速歪、一定歪、定荷重の何れであるかによつても、破壊の特性が異なる。これらの値の一例を Fig. 3, 4, に示す。

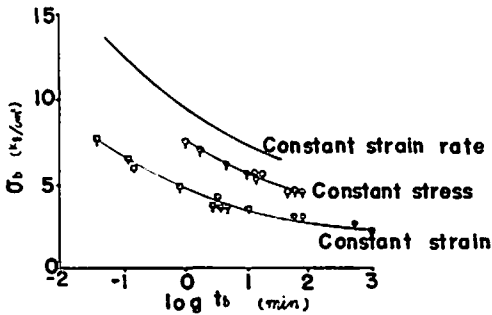


Fig. 3 Comparison of tensile failure strength at 20°C σ_b ...Failure strength t_b ...Time for stress applied

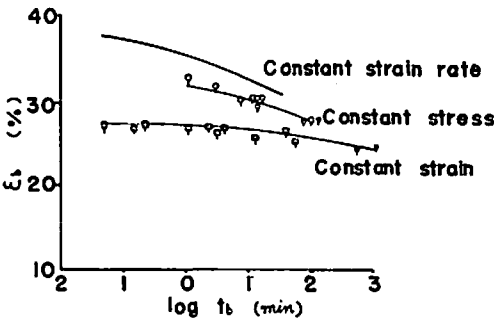


Fig. 4 Comparison of tensile elongation at 20°C ϵ_b ...Tensile Elongation t_b ...Time for stress applied

また実際の推進薬に対しては、外力は一方からだけでなく同時に多方向から加わる。このようなケースではこれまでに述べてきた単軸での引張り破壊とは異なつた特性を示す。その一例を Table 1 に示す。

この他、温度、周囲の圧力も破壊特性に影響を与える。一般に含有水分の増加は、推進薬の引張り強度、伸び率共に著しく減少させる。また周囲の圧力の増加は、それらの値をやや増加させるようである¹⁾。

破壊特性は、前記の引張特性の他、圧縮、衝撃など

Table 1 Failure properties of propellants by uniaxial and biaxial tension (at 20°C)

	Tensile Strength (kg/cm ²)		Elongation (%)	
	Uniaxial	Biaxial	Uniaxial	Biaxial
Uniaxial	21.6	15.0	36	28
Biaxial	17.6	14.2	24	20

による破壊も考慮する必要がある。以上は、推進薬の薬粒についてであるが、推進薬とレストリクターとの間その他の接着部についても同じような考え方で検討されるべきである。

3. 材料の物理的性質

破壊や変形の問題を理論的に取扱うには、推進薬その他の物理的性質をくわしく知つておく必要がある。この場合に問題になるのは、ヤング率、ポアソン比、熱膨張率、熱伝導率、比熱、比重などである。代表的な値を Table 2 に示す。

Table 2 Physical properties of propellants

Young's modulus	60~140 kg/cm ²	Heat conductivity	$1\sim 5 \times 10^{-3}$ cal/cm sec°C
Poisson ratio	0.47~0.50	Specific heat	0.25~0.35 cal/g°C
Heat expansion ratio	$1.0\sim 1.3 \times 10^{-4}$ cm/cm°C	Density	1.60~1.75

この内特に力学的な故障に対して影響の大きなものは、ヤング率、ポアソン比、熱膨張率である。

4. 応力集中について

固体推進薬は、通常 Fig. 5 のような中空円筒状に成形する。このような形状では、内孔の先端部に応力が集中しやすい。この集中係数は、Fig. 5 の W/b, W/r 内孔先端の致 (N), 先端の形状 (一般的に楕円が好ましいとされている²⁾) などの要因によつて変化する。それらの値は、光弾性法により、ポリウレタン

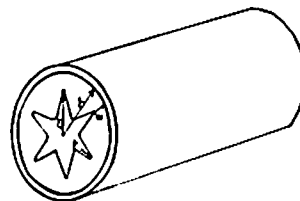


Fig. 5 Shape of propellant
a: inner hole radius
b: outer radius
w: web
r: radius of curvature

ラバーのような透明弾性体で作ったモデルを用いて測定され、すでに数多くの報告がなされている²³⁾²⁴⁾。要因に対する変化の様子を知るために、一、二の例を引用すると Fig. 6.7 の如くである。これらの資料を基

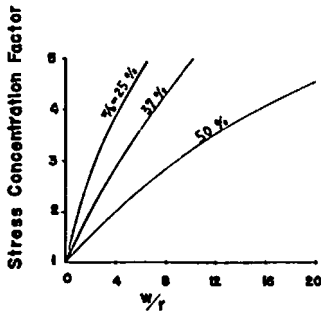


Fig. 6 Stress concentration factor at top of slot for thermal stress slot number=4

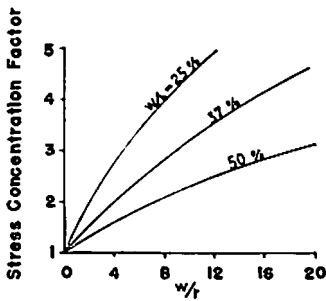


Fig. 7 Stress concentration factor at top of slot for thermal stress slot number=6

にして、要求される燃焼の特性を満しつつ、応力集中のなるべく少ないグレインの形状設計を行なう必要がある。

5. 推進薬の内部に発生する応力, 歪, 変位について

力学的な故障の解析を行なうためには、第2項の破壊特性と共に、種々の外力によって推進薬内部に発生する応力, 歪, 変位を知ることが重要であることは明らかである。しかし推進薬が一般的には、粘弾性体であつて弾性法則に従わないために、これらの値を実測するのにも、また理論的に計算するのにも非常に困難にぶつかる。

推進薬の表面, 内部, 界面に発生する応力や歪を測定する方法としては、ストレングージ法を始め多くの方法が提案されている²⁵⁾けれども、十分に満足すべき結果は得られていないようであり、現在の開発研究上

の問題点の一つであろう。

理論的な計算式としては、推進薬, レストリクターエンジンケースを弾性体とみなした式が幾つか提案され⁶⁾⁷⁾⁸⁾、電子計算機のためのプログラムもできている。これらの計算値は多くの仮定を含み、もちろん正確な値を与えるわけではないが、故障解析に当たつて見当を付けるには十分に役立つと思われる。第3項に述べた、物理的性質の内特に影響力の大きいポアソン比を変数とする場合の計算結果の一例を Fig. 8, 9 に示す。

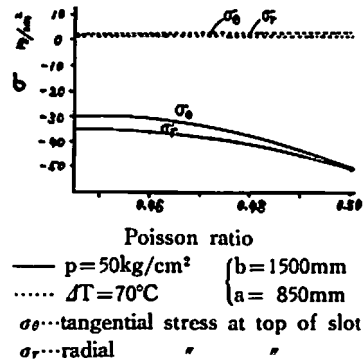


Fig. 8 Internal stress in propellant by calculation with pressure or thermal stress

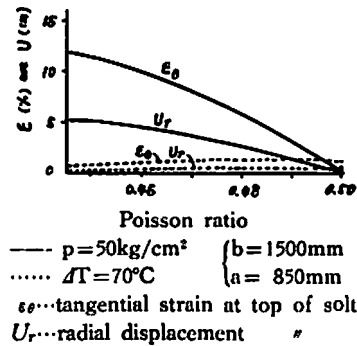


Fig. 9 Internal strain in propellant by calculation with pressure or thermal stress

6. 推進薬の破壊に関する限界値

試作された推進薬について、所定の条件の外力によって生ずる、推進薬内部の応力や歪の実測値または理論計算値に対して、どの程度の破壊性を有する推進薬であれば安心して使用できるか、その限界条件の探究は非常に重要である。ごく概略的には、発生すると考えられる歪に対して、単軸引張りの破壊伸び率が約倍以上、あるいは応力最大時の歪が約1.5倍以上の推

進薬なれば使用してよいようにいわれている。エンジンケースも推進薬も弾性法則に従うとして、有限長の二重円筒について求めた理論計算⁹⁾式から得た、推進薬内孔の先端の熱応力による歪に対しては、使用する推進薬の単軸破壊伸び率は、従来の諸試験の結果からは、3倍位は欲しいと考えられる。

7. むすび

力学的な故障の検討を中心に、設計上の問題点、それに関連のある推進薬の物性について述べたが、信頼性の高い故障のない推進薬を設計するためには、材料の破壊特性、物理的性質を充分知つた上で特性の優れた資材を用いて、応力、歪、変位の少ない構造設計を行ない、試作された推薬について、極力実使用に近い条件で、内部応力、歪、変位を実測および理論計算によつてよく把握し、資材の破壊特性と充分に比較検討を重ねることが大切である。

ロケットエンジンの信頼性を向上させるには、以上の他、原材料、製品検査、工程管理などの品質管理技

術や、製造後の環境の調整、ランチング技術など多くの検討すべき事項があり、強力な組織を基にした開発努力が必要である。

文 献

- 1) I. G. Hazelton; High Speed Testing 5, 217~'65
- 2) R. C. Sampson; AIAA, 6th Solid Propellant Rocket Conference, No. 65-190 (1965)
- 3) M. L. Williams; ARS-Journal 261, Apr. '59
- 4) D. D. Ordahl; Jet-Propulsion, 27, 6, 657, '57
- 5) A. C. Eringen; Mechanics and Chemistry of Solid Propellant, p. 381 (1967)
- 6) M. Summerfield; Solid Propellant Rocket Research p. 101 (1960)
- 7) C. H. Parr; ARS-Journal., 778. Aug. '60
- 8) J. E. Fitzgerald; AD-408799 (1963)

工業火薬協会 昭和44年度年会
昭和44年5月12日

Reliability and Mechanical Propellants

by K. Suzuki

In order to get a higher reliability for the solid propellants the exact analysis for a possible failure and for the reproducibility of the performance is of essential importance.

In this paper a failure analysis of propellants was described. In propellants design, the following items should be considered.

- 1) failure characteristics of propellants
- 2) physical propellants, liners and engine cases.
- 3) stress concentration in the grain
- 4) internal stress and strain
- 5) margin for a failure of propellants

Some informations regarding these items are presented in case of polybutadiene propellants.

To achieve the high reliability, the qualities of materials as well as the design of the structures should be good, besides a cycle of the test to compare the actual stress and strain in the grain with the failure characteristics of the materials, should be made.

(Sakanoichi Plant, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., Oita, Japan)