

端面燃烧药柱的燃速增大特性

李兆民

摘 要

本文综述了近年来国外研究端面燃烧固体火箭发动机中药柱的燃速增大特性所取得的最新成果。在一些端面燃烧装药的固体火箭发动机中,平面的燃烧端面往往演变成锥形燃烧面。实验表明:产生这种现象的主要原因是推进剂中可移动组分的迁移,细颗粒在界面高度集中,以及推进剂的应变造成的。文中还介绍了控制燃速增大,避免在燃烧过程中出现瞬态锥面的各种方法及其实验结果。

主题词: 1.固体推进剂——燃烧速率 2.推进剂燃速 3.推进剂包覆——设计

一、引 言

多年来,人们在研究端面燃烧装药发动机时,从测得的发动机内弹道性能曲线中观察到压力随工作时间的变化是逐渐增加的。近年来,由于对发动机的压力、推力和工作时间要求越来越严格,不允许这些参数过多的偏离设计值,必需考虑发动机压力、推力的增加和燃烧时间的缩短对性能造成的影响。因此,一些学者对此现象进行了深入的研究。他们通过端面燃烧装药发动机的中止燃烧试验,发现了平面端面药柱在燃烧过程中演变成锥面的特性,最初是平端面,逐渐变成截头锥形燃烧面,直至最后形成全锥体,如图1所示。

实验表明^[1],在推进剂和包覆层界面处,燃速一般增加5~30%。燃烧面的增加,必然引起压力和推力的增加。当药柱周边燃速增加很大时,会使发动机的参数严重地偏离设计值,甚至发生危险。实验还表明,在双基推进剂和复合推进剂的端面燃烧装药中,都显示出锥面燃烧的特性。

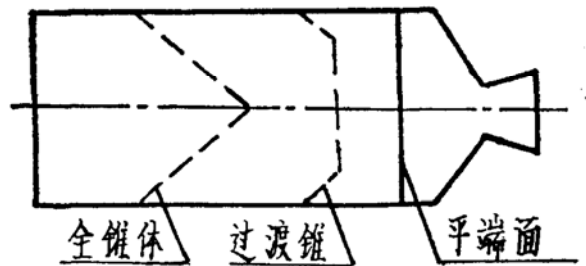


图1 端面燃烧药柱燃烧面的演变

二、理论计算

平面端面燃烧药柱燃烧面的变化过程分为三个阶段,如图2所示。

第一阶段: $0 \sim L_1$ (L_1 为从平端面演变成全锥体的装药长度),

第二阶段: $L_1 \sim (L_1 + L_2)$ (L_2 为全锥体平行推进段的装药长度),

第三阶段: $(L_1 + L_2) \sim (L_1 + L_2 + L_3)$, (L_3 为后效段的装药长度)。

根据出现全锥体所需的时间和装药的燃速可求出从平端面演变成全锥体的装药长度 L_1 ,产生全锥体所需的时间 t_c 。由下式求得,

$$t_c = \frac{D_0 \cdot t_{gQ}}{2(\dot{r}_w - \dot{r}_b)}$$

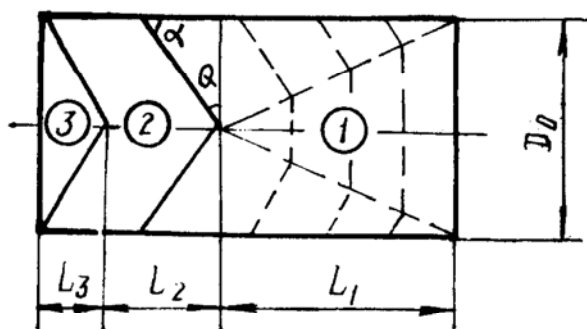


图2 燃烧面变化的三个阶段

式中:

- $\dot{r}_b$ ——主体推进剂的燃速
- $\dot{r}_w$ ——靠包覆层壁面推进剂的燃速
- D_0 ——装药直径
- Q ——锥面和垂线的夹角(如图2所示)
- α ——锥面和包覆层之间的夹角(如图2所示), $\alpha = \arcsin(\dot{r}_r/\dot{r}_w)$

我们假设推进剂的所有自由表面都同时点火, 并且不管燃烧时间和工作压力的数值是多少, 比值 $\frac{\dot{r}_b}{\dot{r}_w}$ 都是常数。于是可以计算燃烧面

随时间的变化 $A(t)$ 。

(1) 第一阶段: 从平端面逐渐变成全锥体。装药呈增面燃烧, 燃烧面随时间的变化由下式计算:

$$A(t) = \left[\frac{D_0}{2} + (L_1 - L) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right] \frac{\pi(D_0 - D)}{2 \sin \alpha} + \pi \left[(L_1 - L) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right]^2$$

(2) 第二阶段: 全锥体燃烧面平行推进。装药呈恒面燃烧, 燃烧面随时间的变化由下式计算。

$$A(t) = \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 \frac{\pi}{\sin \alpha}$$

(3) 第三阶段: 后效段。圆锥体随底部直径不断减小而减小, 装药呈减面燃烧, 燃烧面随时间的变化由下式计算,

$$A(t) = \frac{D_0}{4} \frac{\pi}{\sin \alpha} D$$

式中: D ——任一瞬时的底部直径, L ——任一瞬时, 装药烧去的长度。

$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{2L_1}{D_0} \right)$, 几何关系如图3所示。

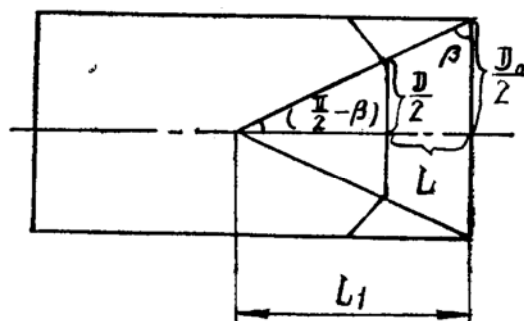


图3 β 角的几何关系图

求出各阶段燃烧面随时间的变化后, 就可计算压力随时间的变化规律。

三、机 理

端面燃烧药柱燃速增大的机理比较复杂, 现将一些学者的研究成果归纳如下:

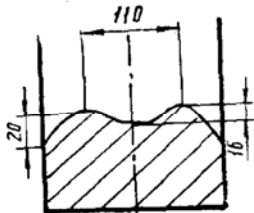
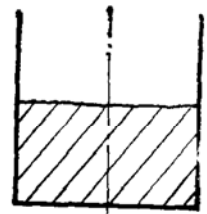
1. 推进剂可移动组分迁移到包覆层中

(1) 药柱中增塑剂的迁移

在复合推进剂中, 常用聚氨酯类包覆层。当聚氨酯类包覆层对已固化好的复合药柱包覆后, 药柱中的增塑剂可通过界面发生迁移(药柱中其它组分在固化期间已连结成网状组织)。由于包覆层大量地吸收药柱的增塑剂, 结果在界面引起推进剂燃速变化, 使燃速增大。

Gonthier, B. 等人^[2]在研究中使用了两种药柱, 一种药柱含有增塑剂, 另一种药柱中无增塑剂, 而药柱中的其它成分都相同, 包覆层材料也相同。试验结果表明 (见表 1) 在无增塑剂的药柱中, 沿包覆层界面没有燃速增大现象。

表 1 增塑剂迁移的实验结果

包覆层种类	端羟基聚丁二烯衬层, 高固化比 ($\text{NCO}/\text{OH} = 1.05$)	
推进剂类别	含端羟基聚丁二烯粘结剂和 30% 二乙基 2 己基壬二酸酯的推进剂	含端羟基聚丁二烯粘结剂的推进剂 (无增塑剂)
包覆前药柱尺寸	$D = 187\text{mm}$, $L = 140\text{mm}$	$D = 187\text{mm}$, $L = 140\text{mm}$
燃烧参数	喷喉 $\phi = 15.9\text{mm}$ 工作压力 $P = 10.98\text{MPa}$	喷喉 $\phi = 18.7\text{mm}$ 工作压力 $P = 10\text{MPa}$
中止燃烧时间	$> 2.5\text{ s}$	$> 2.0\text{ s}$
中止燃烧后的药柱实测尺寸		
实验结果	界面燃速增大, 工作压力增加 4.02MPa	界面燃速没有增加

(2) 药柱中其它化学组分的迁移

推进剂浇注在包覆层中, 然后进行固化。只要交联反应不完全时, 一些化学组分 (除增塑剂外) 可能迁移到包覆层中。包覆层对这些化学组分的吸收程度取决于包覆层的性质和它的交联度。

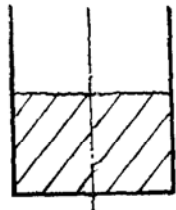
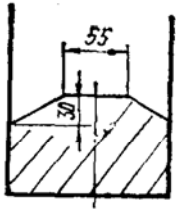
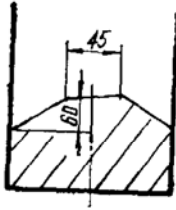
Gonthier, B. 等人把推进剂浇注到三种包覆层衬层中: 第一种为双层聚氨酯橡胶粘结剂/环氧粘结剂衬层; 第二、三种衬层由聚氨酯-端羟基聚丁二烯粘结剂组成 (第二种衬层为高交联度比, 第三种衬层为低交联度比)。后两种包覆层衬层的交联度都比第一种衬层的交联度低。实验表明 (见表 2), 界面燃速增大现象与推进剂的化学组分迁移到包覆层以及包覆层的化学性质有关。交联度高的包覆层可以阻止推进剂中化学组分的迁移, 减小燃速增大现象。

(3) 固化剂的迁移

用二异氰酸酯固化的端羟基聚丁二烯推进剂, 在固化期间, 由于固化剂的迁移, 紧靠推进剂和包覆层界面形成一软层, 它使燃速增加。因而在燃烧过程中形成锥面。

Jolley, W. H. 等人^[3]曾在端羟基聚丁二烯/聚氨酯橡胶粘结剂包覆的药柱中, 采取了两种包覆法: 一种是把推进剂浇注进已固化好的包覆层中; 另一种是先把推进剂固化好, 然后再包覆。发动机实验表明, 在后一种情况下, 药柱在燃烧过程中没有出现锥面。其原因是在已固化好的推进剂中, 固化物在化学上已处于停顿状态, 没有机会迁移进包覆层。

表2 包覆层的性质对燃速增大的影响

包覆层种类	聚氨酯橡胶粘结剂/环氧粘结剂	聚氨酯-端羟基聚丁二烯粘结剂 $NCO/OH > 1.0$	聚氨酯-端羟基聚丁二烯粘结剂 $NCO/OH > 1.0$
推进剂类别	含铝粉的无增塑剂端羧基聚丁二烯粘结剂-燃烧催化剂		
燃烧参数	喷喉 $\phi = 11\text{mm}$ 工作压力 $P = 9.02\text{MPa}$	喷喉 $\phi = 11\text{mm}$ 工作压力 $P = 9.02\text{MPa}$	喷喉 $\phi = 11\text{mm}$ 工作压力 $P = 9.02\text{MPa}$
中止燃烧时间	15 s	15 s	15 s
中止燃烧后的药柱实测尺寸			
实验结果	燃速不增大	燃速增加较小	燃速增大很多

Jolley, W.H.等人还通过实验证实了以下三个问题:

- ① 推进剂固化的时间越长, 固化剂的迁移越多。
- ② 包覆层吸收固化剂慢或吸收固化剂的能力小, 则固化剂迁移的量少。
- ③ 包覆层的模量值大, 则固化剂迁移得少。

2. 细颗粒高度集中在界面

在药柱和包覆层的界面处, 集中了药柱组分中很多细小的颗粒, 因而界面中断了紧密装填的颗粒排列方向, 增大了空隙的空间, 并由细小的颗粒所充填。所以, 使界面区域的细颗粒浓度增加。

Messner, A.M.的实验表明^[1], 在推进剂中用特别细的氧化铝或氧化铁颗粒作燃速催化剂时, 锥面燃烧将是很显著的。在含细氧化铁颗粒的推进剂中, 界面燃速可增加70%。

3. 推进剂的应变

发动机工作时, 有两个原因引起靠包覆层界面推进剂的应变: 一是温度载荷, 它使各种材料收缩不同引起应变, 称为热应变; 二是压力载荷, 它使包覆层和推进剂界面拉伸引起应变, 称为压力应变。

Boggs, T.L.等人论述了高能固体推进剂应变对燃速的影响^[4]。他们认为推进剂的应变将使燃速增大。为了证明这种论点, Jolley, W.H.等人^[3]制造了几个发动机。药柱的一部分采用套管式包覆层, 使它处于应力松弛状态, 其余部分直接粘在发动机壳体上。实验表明在这些发动机中, 药柱与壳体粘结部位, 在燃烧过程中总是产生锥面, 而在应力松弛部位, 就没有锥面或是锥面很小。为了进一步证明推进剂应变对产生锥形燃烧面的影响, 使用与壳体粘结的装药, 故意在推进剂中引起应变来进行一系列的试验。实验表明在药柱自由装填的发动机中, 燃烧面不产生锥面; 在与壳体粘结装药的发动机中, 严重的产生锥形燃烧面。

四、双基推进剂的燃速增大问题

使用双基推进剂所遇到的燃速增大现象和复合推进剂相似,原因也基本上相同。燃速随工作压力和工作温度的增加而加大,随发动机贮存时间的加长而增加,特别是在高温(40~60℃)贮存时,情况更为严重。

包覆层从双基推进剂中吸收较多的硝化甘油或增塑剂时,将使包覆层的力学性质发生显著的变化。因此,设法避免增塑剂从推进剂迁移进包覆层是一个很重要的问题。

双基推进剂所用的包覆层与复合推进剂所用的包覆层在一些性能要求上是不同的(不是化学性质)。这是因为双基推进剂大多用于战术导弹,要求包覆材料具有价值低、工作温度和贮存温度范围大、无烟等特殊性质。

包覆材料的性能不同,对双基推进剂产生锥面燃烧的影响程度也不同。因为双基推进剂包覆层使用的各种化学族并不以相同的方式反应硝酸酯的迁移。例如交联度高的聚酯对硝酸酯增塑剂有一适当的吸收速率;以聚丙烯乙二醇粘结剂为基础的聚氨酯即使形成较高的交联度时,也能吸收很多的增塑剂;硅合成橡胶的吸收度最低。

此外,复合推进剂减少燃速增大的办法同样也适用于双基推进剂。

五、控制燃速增大的一些措施

1. 改变包覆层的化学性质

选择对可移动组分吸收能力小或添加能排斥增塑剂化学组分的包覆层以及增加包覆层的交联度都是十分重要的。例如在包覆层中加入增塑剂可以起平衡作用。Gonthier, B. 等人进行过实验^[2],他们采用同一种推进剂同一类型的包覆层,唯一差别是一种包覆层中不含增塑剂,另一种包覆层中添加12%的增塑剂。实验表明,有增塑剂的包覆层消除了燃速增大现象。但是,应当特别注意一个问题,包覆层中增塑剂的含量高会严重降低它的力学性能和常温下的固化速率。所以它不适宜用于自由支撑药柱的装填,但可用于与壳体粘结的药柱中。

2. 在推进剂和包覆层之间加薄衬层

交联度高的包覆层可以限制或阻止化学组分的迁移,减小或消除燃速增大现象。然而这种包覆层的力学性质常和药柱成型引起的应力不相容(特别是与壳体粘结的药柱)。因此,为了阻止推进剂中化学组分的迁移,可以采用很薄的高交联度材料作衬层,把它嵌在推进剂和包覆层之间。

3. 改变推进剂和包覆层界面的几何形状

改变推进剂和包覆层界面的几何形状,可以减小燃速增大现象。其方法是在实心圆柱药柱的外表面加工一系列细小的沟槽。

六、结 束 语

综上所述,当前国外对端面燃烧固体推进剂药柱燃速增大现象研究的重点是确定界面燃速增加的机理,通过实验验证有关燃速增大的各种假定。现已初步探明了影响燃速增大的主要因素,发现包覆材料的性能对端面燃烧药柱是否产生锥形燃烧面有重要的联系。避免燃速增大现象主要从两方面采取措施:一是对包覆层进行化学改进;二是在推进剂和包覆层之间加一衬层。

(下转第65页)

五、结 束 语

理论模型的数值计算与实验结果符合较好,理论预示与前人研究结果趋势一致,表明该理论模型描述推进剂点火过程基本正确。通过实验研究和理论计算,本文所获得的结论有:

1. 在一定镁粉粒度范围内,当 MT 烟火剂中镁粉粒度增大时,推进剂点火延迟时间缩短。可以预计有使点火延迟最小的最佳镁粉粒度存在。

2. 异相反应存在,加大了点火延迟时间。但当环境压力较高,或外部热流率较大时,异相反应作用不明显。

3. 复合推进剂结构异质特性,对固相温度分布影响较大,但对气相区温度,浓度分布影响不大。

本文的工作是课题研究的先行部分,实验研究还要进行大量试验,以确定最佳粒度;理论模型在寻找更准确的物理,化学参数和考虑对流效应上还有待进一步完善。

参 考 文 献

- 〔1〕 Willams, F. A.: 固体推进剂火箭发动机基本问题。下册。
- 〔2〕 Siddiqui, K. M. and Smith, I. E.: The ignition of double-base propellants by hot particles arising in the igniter products. AIAA74-1087.
- 〔3〕 易建文: 高能点火药中固体微粒对复合推进剂点火性能的影响, 西工大硕士论文, 1985.
- 〔4〕 Kumar, M. and Kuo, K. K.: A Model including gas-phase and subsurface reactions for APbased composite propellant. AIAA82-1109.
- 〔5〕 潘宏亮、李逢春、王克秀, 高能点火药点燃复合推进剂的实验研究。宇航学会威海会议, 1986.
- 〔6〕 Peretz, A.: Investigation of pyrotechnic MTV compositions for rocket motor igniters. AIAA 82-1189.
- 〔7〕 Hall, A. R. and Southern, G. R.: Ignition of 127mm solid propellant motors by pyrogens with and without solid particles. AIAA78-1009.
- 〔8〕 Kishore, K. and Drasad, G.: 复合固体推进剂中氧化剂和粘合剂的分解/爆燃综述。国外固体火箭技术, 1985, No. 2.

(上接第51页)

参 考 文 献

- 〔1〕 Transient coning in end-burning solid propellant grains. AIAA80-1138.
- 〔2〕 Burning rate enhancement phenomena in end-burning solid propellant grains. AIAA 85-1435.
- 〔3〕 Studies on coning in end-burning rocket motors. AIAA85-1179.
- 〔4〕 The effect of strain on the burning rates of high energy solid propellants. Proceedings of 13th JANNAF Combustion Meeting, Monterey, Calif. Sept. 1976, CPIA publication 281, Dec 1976, Vol II.