

贫氧复合固体推进剂燃速测定的研究

陈协坤

一、前言

在测定贫氧复合固体推进剂燃速的过程中,经常出现测试结果跳动大,分散和重复性很差的现象,无法报平均值,只好报原始数据。而燃速数据又是评价推进剂内弹道性能好坏的重要依据,因此,对上述现象进行分析和研究是有意义的。根据初步分析,产生上述现象的原因,估计有以下三种可能性。

1. 制药工艺不合理。由于捏合时间不够或混合不均所致。
2. 贫氧复合固体推进剂配方不合理。由于个别组分规格选择不当或有某种特别的性质所致。
3. 燃速的测试技术不合理。对不同燃烧性能的固体推进剂,没有采取不同的测试技术和取样方法所致。

第一个原因是容易排除的。第二和第三个原因是相互联系的。在本文所用的贫氧复合固体推进剂配方中有大量的金属粉和碳纤维。在测试实践中我们发现,药条在燃烧过程中有成团的药碴飞落,这种灼热的药碴如落到易熔的靶线上,就会造成靶线提前熔断,使记时提前,结果测得的燃速数据是虚假值。只要在测试技术上加以改进是可以克服的。根据文献报道,碳纤维是有增速作用的,并有方向性。因此,本文重点研究了含有碳纤维的贫氧推进剂的燃速分布规律。

二、实验手段

实验工作是在燃烧性能实验室氮气靶线法燃速仪上进行的。用切药机将样品切成 $4 \times 4 \times 80$ 毫米的药条,测试长度由钻孔模具控制,打孔后用千分尺实测孔距。测试长度内的燃烧时间由计时仪或电秒表记录。药条按规范进行侧面包复,确保只进行端面平移燃烧。

为了避免成团药碴飞落断靶和镁蒸汽及其凝聚相的瞬间电弧对计时电路的干扰,在测试中采取了技术措施。

实验中的推进剂是500立升捏合工艺所带的一个中方皮。这个方皮的工艺状态是良好的,避免了工艺因素的影响。

三、实验结果及理论分析

在所测贫氧推进剂的配方中,为提高燃速加入了碳纤维组分。加碳纤维增速同拉金属丝方案不同,碳纤维的分布方向是较难控制的。

由于所用碳纤维长细比很大($l = 5 \sim 7$ 毫米, $d = 5 \sim 7$ 微米),在浇注时细长的碳纤维是作

平行于流动方向取向。注入模具后,随着推进剂浆面不断上升,中心部位的碳纤维将逐步转为水平取向。而在浆面的边缘,由于模具壁面的约束,许多碳纤维一直保持着浇注流动方向即垂直于水平取向。在这两种正交取向状态之间还有一个过渡性部位。从方皮的纵切断面上可以观察到反映这种碳纤维分布的条纹。根据碳纤维增速的机理,这种分布将直接影响到推进剂燃速的不均匀。当推进剂药条中多数的碳纤维取向与燃烧方向一致时,燃速较高。反之,当药条中多数的碳纤维取向与燃烧方向正交时,燃速较低。这就从理论上解释了含碳纤维的贫氧复合推进剂燃速测试值分散度很大的原因。实验所得的结果与这个分析是相一致的。

第一部分实验样品取自方皮的下半段,按不同部位分别切取纵向药条。从方皮中心到边缘选取四个不同位置的药条,分别定为Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区。

在室温 $T = 25^{\circ}\text{C}$ 下,分别用压力 $P = 15, 25, 35, 45$ 和 60 公斤/厘米²来测定四区药条的燃速。测试结果列于表1。实验中发现同一区位的药条燃速测试值重复性很好,不同区位的药条燃速测试值差别显著,从边缘向中心药条燃速逐区降低。这五组数据的规律与上述的理论分析基本上是一致的。

第二部分实验样品取自方皮的上半段,按准确的位置分别切取四个区位的纵向药条。Ⅰ区取在方皮中心、Ⅱ区取在距边缘11~20毫米的位置,Ⅲ区取在距边缘6~10毫米位置,Ⅳ区取自边皮层。(与第一部分实验的区位略有差别)

这四区的药条是在压力 $P = 25$ 公斤/厘米²下,分别做初温 $T = 25^{\circ}\text{C}$ 、 35°C 和 45°C 时的燃速测试。实验数据列于表2。实验结果表明,方皮上、下段燃速的分布规律是一样的。

第三部分实验是在方皮中心部位,横取一块样品切横向药条和竖取一块样品切与纵向药条成20度交角的斜向药条,横向药条取边皮和中心两个区位,在 $T = 25^{\circ}\text{C}$ 、 $P = 25$ 公斤/厘米²下,进行燃速测试,实验数据列于表3。从表3可以看出,中心部位的横向药条的燃速测试值正好与边缘四周的纵向药条的燃速相一致,而边缘四周的横向药条的燃速又与中心部位的纵向药条相对应。

斜向药条的实验样品分别取自基础配方相同一个加碳纤维另一个不加碳纤维的小方皮。每个方皮中心部位分别切取纵向药条和与纵向成20度交角的斜向药条两种。在 $T = 20^{\circ}\text{C}$ 、 $P = 25$ 公斤/厘米²进行对比试验。实验结果列于表4。这个实验表明,含有碳纤维的推进剂其中心部位的斜向药条比同位的纵向药条具有更高的燃速。这对燃面计算有实际影响。

四、碳纤维取向分布对压力指数及温度系数的影响

尽管碳纤维分部位规则取向造成推进剂径向燃速分布不均匀,当研究并掌握其规律性后,仍然可以测定出各给定部位的燃速压力指数和温度系数。

根据表1所给的燃速测试值,可以分别计算出四个区位的燃速压力指数。

假定燃速与压力关系服从维也里指数公式,即有

$$r = bp^n$$

采用最小二乘法处理得

$$n = \frac{\sum_{i=1}^m (\lg p_i - \overline{\lg P}) \cdot (\lg r_i - \overline{\lg r})}{\sum_{i=1}^m (\lg p_i - \overline{\lg P})^2}$$

其中:

$$\overline{\lg P} = \frac{\lg p_1 + \lg p_2 + \cdots + \lg p_m}{m}$$

$$\overline{\lg r} = \frac{\lg r_1 + \lg r_2 + \cdots + \lg r_m}{m}$$

计算得到的四个区位的压力指数列于表 5。从表 5 可以看出碳纤分部位规则取向对各部位的燃速影响很大, 而对压力指数的影响比较小。

同样, 用表 2 的数据可以计算各区位的温度系数。根据公式有:

$$\alpha = \frac{1}{r} \frac{dr}{dT}$$

经最小二乘法处理后得:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m (T_i - \bar{T}) (\ln r_i - \overline{\ln r})}{\sum_{i=1}^m (T_i - \bar{T})^2}$$

其中:

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2 + \cdots + T_m}{m}$$

$$\overline{\ln r} = \frac{\ln r_1 + \ln r_2 + \cdots + \ln r_m}{m}$$

计算结果列于表 6, 相比之下碳纤维取向对温度系数的影响要稍大一些。

五、燃速仪测燃速与发动机测燃速

含碳纤维的贫氧复合推进剂, 用燃速仪测定整个推进剂的平均燃速比较困难, 因为这种推进剂的平均燃速不但和配方、测试条件有关, 而且还受推进剂浇注模具径向尺寸的影响。一般来说, 径向尺寸越小平均燃速越高。

用发动机来测定平均燃速是比较合适的。但是由碳纤维取向造成燃速径向分布的不均匀, 所以用内孔或内星孔燃面的发动机显然不能得到平稳的压力曲线。而且这种发动机测出的平均燃速也会偏低。比较理想的是用端面燃烧的发动机来测定燃速。当然, 发动机径向尺寸大小对测试结果还有影响。

表 7 给出这种推进剂用于各类发动机的部分试车数据, 基本上可以看出一些规律。

六、实验小结

通过实验和分析提出以下看法:

1. 含有碳纤维分部位规则取向的贫氧复合推进剂径向燃速分布不均匀, 用药条在燃速仪中测燃速时, 必须分部位取样, 否则将出现测试结果的跳动、分散。
2. 这种推进剂可以通过在给定尺寸的方皮中, 找一个适当部位的办法来预测特定发动机的燃速。

3. 目前研制的含碳纤维的贫氧推进剂可以用于火箭冲压发动机端燃面的燃气发生器, 只要掌握规律, 在特定结构下合理设计燃面就能够达到预期的压力曲线和平均燃速。

4. 解决碳纤维取向问题的途径, 一是采用超短碳纤维, 二是开展工艺研究利用取向特性来为提高推进剂性能服务。

表 1 $T = 25^{\circ}\text{C}$ 时各种压力下燃速测试值

方 位	压力(公斤/厘米 ²)	15	25	35	45	60
	燃速 (毫米/秒)	测试平均值	测试平均值	测试平均值	测试平均值	测试平均值
I 区纵向药条		13.13	14.39	16.78	18.09	18.98
II 区纵向药条		13.59	15.71	17.79	19.68	21.47
III 区纵向药条		14.29	16.99	18.81	21.47	22.64
IV 区纵向药条		15.04	17.48	19.59	22.51	25.24
边皮层纵药条		/	21.52	/	/	/

表 2 $P = 25$ 公斤/厘米² 时各种初温下燃速测试值

方 位	初温($^{\circ}\text{C}$)	25	35	45
	燃速 (毫米/秒)	测试平均值	测试平均值	测试平均值
I 区纵向药条		14.66	15.64	16.65
II 区纵向药条		16.54	17.43	19.37
III 区纵向药条		19.22	20.32	20.80
IV 区纵向药条 (边皮层)		21.43	22.58	22.77

表 3 $T = 25^{\circ}\text{C}$, $P = 25$ 公斤/厘米² 时横向药条燃速测试值 (毫米/秒)

方 位	中 心 部 位						边缘部位	
序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
燃速测试值	21.28	21.10	21.94	22.33	21.19	20.84	14.87	14.10

表 4 $T = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 25$ 公斤/厘米² 时斜向与纵向药条燃速对比测试

测 试 结 果	配 方	无 碳 纤 维		含 碳 纤 维	
	方 位	中心纵向	中心斜向	中心纵向	中心斜向
燃速测试值 (毫米/秒)		14.43	14.08	17.81	18.68

注: 斜向为与纵向成 20° 度交角。

表 5 $T = 25^{\circ}\text{C}$ 时四个区位的纵向药条压力指数

项 目 \ 部 位	I 区					II 区				
压力 P (公斤/厘米 ²)	15	25	35	45	60	15	25	35	45	60
平均燃速 (毫米/秒)	13.13	14.39	16.78	18.09	18.98	13.59	15.71	17.79	19.68	21.47
压力指数 n	0.29					0.34				
项 目 \ 部 位	III 区					IV 区				
压力 p (公斤/厘米 ²)	15	25	35	45	60	15	25	35	45	60
平均燃速 (毫米/秒)	14.29	16.99	18.81	21.47	22.63	15.04	17.48	19.59	22.51	25.24
压力指数 n	0.34					0.38				

表 6 $P = 25$ 公斤/厘米² 时四个区位纵向药条温度系数

项 目 \ 部 位	I 区			II 区			III 区			IV 区		
$T (^{\circ}\text{C})$	25	35	45	25	35	45	25	35	45	25	35	45
平均燃速 (毫米/秒)	14.66	15.64	16.65	16.50	17.43	18.82	19.22	20.32	20.80	21.43	22.58	22.77
温度系数 α	0.006			0.006			0.004			0.003		

表 7 有关发动机试车数据

发 动 机 测 试 结 果	$\phi 108$ 发动机 (内锥孔燃面)					$\phi 150$ 发动机 (端面燃烧)					$\phi 314$ 发动 机 (端面 燃烧)
工作压力 P (公斤/厘米 ²)	19.1	27.6	24.6	26.6	26.3	28.6	25.0	25.7	21.6	23.1	29.21
平均燃速 r (毫米/秒)	15.7	17.6	16.9	16.6	17.0	19.9	19.6	19.3	18.3	19.4	20.2

注：比较燃速时都应换算到 $P = 25$ 公斤/厘米² 时的燃速值。

参 考 文 献

- (1) “富燃料推进剂燃烧研究。”卅一所情报室编译。
- (2) “A study of a novel additive for HTPB propellant final report”. AD-A028850 JU/YI.
- (3) “复合固体推进剂。”国防科技大学, 1979.