

整体级发动机用含硼 BAMO/THF 推进剂的探索研究*

王锐鑫 苏 峰

(内蒙合成化工研究所, 呼和浩特, 010076)

摘 要: 采用最小自由能法 (white 法), 计算研究了增塑剂与粘合剂质量比 (P_1/P_0)、固体含量、硼含量、HMX 含量对用于整体级发动机的含硼 BAMO/THF (1:1) 推进剂能量的影响。实验研究制得的65%固体含量的 BAMO/THF (1:1) 含硼固体推进剂的基础燃速、压强指数较低; $\phi 65\text{mm}$ 发动机的试车结果表明: 实验制得的65%固体含量的含硼 BAMO/THF (1:1) 推进剂的比冲效率为84.45%。

主题词: 高能材料, 硼, 推进剂配方, 能量性能

分类号: V512.3

A PRIMARY STUDY ON BORON-CONTAINING BAMO/THF PROPELLANTS USED IN INTEGRATED STAGE MOTORS

Wang Ruixin Su Feng

(Inner Mongolia Synthetic Chemical Engineering Inst., Huhehot, 010076)

Abstract: Based on the minimum free energy method (white method), the effects of mass ratio of plasticizer and polymer (P_1/P_0), solid loading, boron powder content and HMX content on the energetic characteristics of boron-containing BAMO/THF (1:1) propellants, which will be used in integrated stage motors, have been studied by thermodynamic calculation. AP/B/ [BAMO/THF (1:1)] propellants with solid loading of 65% have been made, the sample has slower burning rate and lower pressure exponent. The test results of $\phi 65\text{mm}$ motor show that the specific impulse efficiency of the sample is 84.45%.

Subject terms: Energetic material, Boron, Propellant formulation, Energetic property

1 引 言

80年代初, 航空喷气战略推进公司 (ASPC) 进行了整体级概念 (ISC) 的开发研究, 硼用于固体推进剂又重新引起人们的重视。由于整体级发动机使用了强制偏流喷管, 有较高的膨胀比 (180/1), 使得含硼固体推进剂有较高的能量补偿值, 从而弥补了含硼固体推进剂能量水平低的不足。国外有关整体级发动机用含硼固体推进剂的研制情况, 仅有美国已研制成功两个适用于整体级发动机的 GAP/NG/B 推进剂配方和奥林中心 (ORC) 研制了危险性1.1级的 GAP/NG/B 推进剂的消息报道。本文则对这类推进剂进行了探索研究。

* 本文1995年11月16日收到, 修改稿1996年3月14日收到

2 含硼固体推进剂的能量计算

采用 white 法, 选取 67 种产物 (65 种为气相, 2 种为凝相) 作为含硼固体推进剂的燃烧产物, 在假设平衡流, $P_c/P_0=1/70$, 海平面最佳膨胀, 0° 扩散角的条件下, 计算 P_1/P_0 、固体含量、硼含量、HMX 含量对 BAMO/THF 推进剂能量的影响。

2.1 含硼 BAMO/THF (1:1) 推进剂的能量计算结果

为了研究增塑剂 (NG/BTTN=1) 与粘合剂质量比 P_1/P_0 对推进剂能量的影响, 设计和计算的固体含量为 88% 的含硼推进剂配方, 组成为: B 10%, AP 18%~78%, HMX 0~60%, 粘合剂系统 12%, 其中 $P_1/P_0=0.4\sim2.8$, N-100/粘合剂为 0.15。

从图 1 的标准理论比冲的计算结果可看出, 当硼粉含量为 10% 固定不变时, AP/B/[BAMO/THF(1:1)] 推进剂的标准理论比冲 (I_{sp}) 随着 P_1/P_0 值的增大而略有降低; 当用 HMX 部分取代 AP 时, 推进剂的比冲随 P_1/P_0 值的增大和 HMX 百分含量的升高而增大。

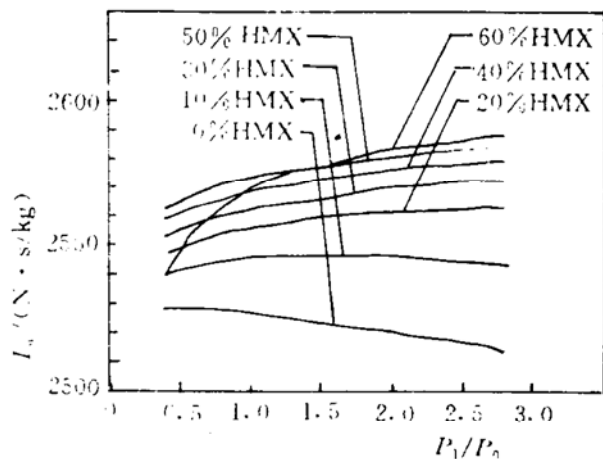


Fig. 1 The standard theoretical I_{sp} versus P_1/P_0 of AP/HMX/B/[BAMO/THF (1:1)] propellants

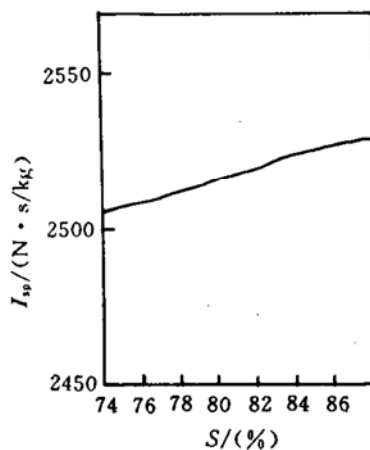


Fig. 2 The standard theoretical I_{sp} versus solid loading of AP/B/[BAMO/THF (1:1)] propellants ($P_1/P_0=0.4$)

按图 1 中不含 HMX 的推进剂标准理论比冲出现最大值时的 P_1/P_0 值, 设计并计算了固体含量为 88% 的推进剂配方, 计算结果如图 2 所示。从中可看出, AP/B/[BAMO/THF (1:1)] 推进剂的标准理论比冲随固体含量的增加呈增大趋势, 当 $S=88$ 时, 比冲为 $2529\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$ 。

为了研究硼含量以及 HMX 含量对推进剂能量的影响, 设计并计算了固体含量为 88% 的含硼推进剂配方, 结果如图 3、图 4 所示。从图中可看出, 对于每一组 HMX 含量相同的 AP/HMX/B/[BAMO/THF (1:1)] 推进剂, 都存在一个比冲最高的推进剂配方 (以下称为最高比冲配方), 随着 HMX 含量的增加, 最高比冲增大, 且最高比冲配方对应的硼含量降低; $P_1/P_0=2.8$ 的含硼 BAMO/THF (1:1) 推进剂配方, 当 HMX 含量为 40%、50%、60% 时, 比冲在一定硼含量范围内出现近似平台区, 推进剂比冲不随硼含量变化。

2.2 整体级发动机的能量补偿效应

表 1 所列为 A、B 两配方的海平面标准理论比冲和高膨胀比下的标准理论比冲值, 从表中数据可看出, 由于整体级发动机使用了强制偏流喷管, 有较高的膨胀比, 使得含硼固体推进

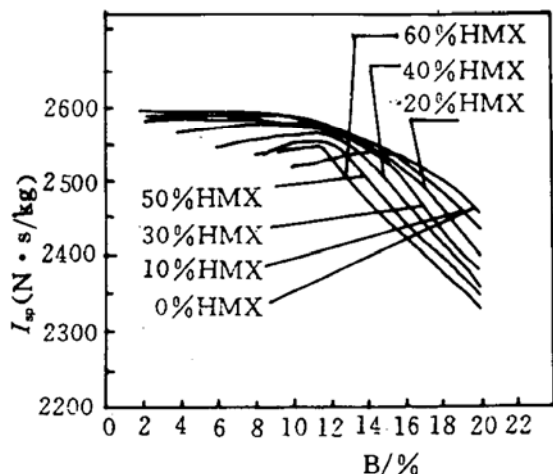


Fig. 3 The standard theoretical I_{sp} versus contents of boron and HMX for AP/HMX/B/ (BAMO/THF (1:1)) propellants ($P_1/P_0=0.4$)

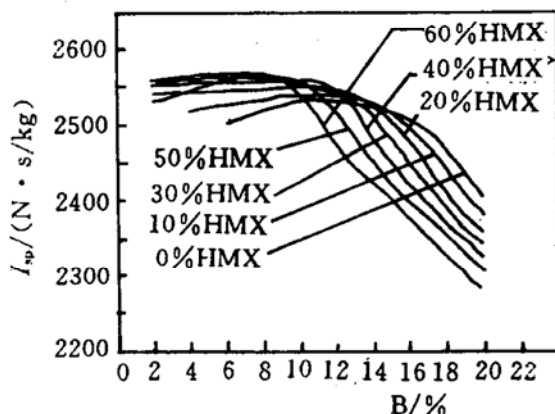


Fig. 4 The standard theoretical I_{sp} versus contents of boron and HMX for AP/HMX/B/ [BAMO/THF (1:1)] propellants ($P_1/P_0=2$)

剂的比冲有较高的补偿值, 弥补了含硼固体推进剂海平面比冲低的不足。

Table1 The energy compensation of integrated stage motor

No.	[BAMO/THF] /AP/B	$I_{sp,th}$, sea level (N·s/kg)	Expansion ratio	$I_{sp,th}$, high expansion ratio (N·s/kg)	deviation (N·s/kg)
A	12/74/14	2523	181.58	3151	628
B	12/80/8	2522	180.00	3125	603

3 含硼推进剂的实验研究

3.1 硼粉的特性分析

实验研究采用了营口精细化工厂生产的无定形硼, 形状为球形, 大部分粒子的直径小于 $1\mu\text{m}$, 其电镜照片如图5。采用光透式粒度仪测定硼粉的粒度分布如表2所列。从表中数据可看出硼粉的粒度很细, 比表面很大, d_{30} 只有 $0.78\mu\text{m}$ 。

化学分析和发射光谱半定量分析结果表明, 营口硼粉的纯度不高, 约91%, 主要杂质为 Mg(5.7%) 和硼的水溶性化合物 (B_2O_3 、 H_3BO_3 , 1.1%) 此外, 还有微量的其它元素。

3.2 含硼 BAMO/THF (1:1) 推进剂基本性能测试

由于硼粉粒度细, 比表面大, 这样就给含硼固体推进剂的制药工艺带来困难, 使得实验配方的固体含量难以达到能量计算最佳配方。在实验研究中, 我们通过分析研究, 解决了推进剂固化过程中出现气泡的问题, 选择了含硼5%、AP 60%、NG/BTTN

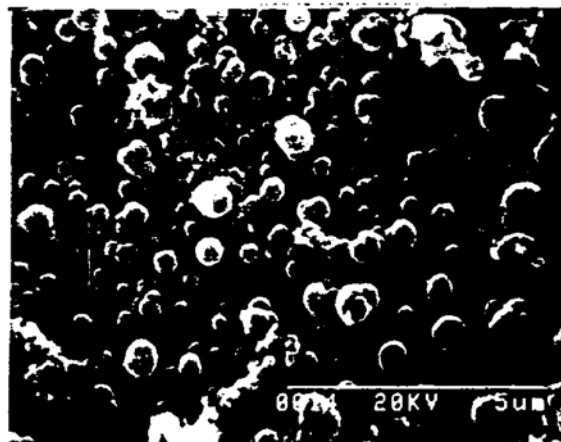


Fig. 5 SEM picture of boron powder

(1:1) +BAMO/THF (1:1) +IPDI 35% ($P_1/P_0=0.5$) 的推进剂配方, 在5升 IKA 立式胶化机上做药, 将药浆浇入方坯盒和 $\phi 65\text{mm}$ 发动机中固化。胶化、浇注温度为 $40\pm 2^\circ\text{C}$, 固化温

度为 $50\pm 2^{\circ}\text{C}$, 固化时间为3天。推进剂的燃烧性能和力学性能测试数据如表3所示。从中可看出, 此配方推进剂的基础燃速、压强指数低, 常、高温强度和低温延伸率偏低。

Table 2 Size measuring result of boron powder

Grain size (μm)	0.0~0.6	0.6~1.0	1.0~2.0	2.0~4.0	4.0~8.0	8.0~10.0	10.0~40.0
Mass fraction (%)	44.0	57.3	69.3	80.6	93.6	94.2	100.0
$d_{30}=0.78\mu\text{m}$				Specific surface $46513\text{cm}^2/\text{g}$			

Table 3 The test result of combustion and mechanical properties

$r/(\text{mm/s})$ (7MPa)	n (3~7MPa)	σ_m/MPa			$\epsilon_m/\%$		
		-40℃	-20℃	+70℃	-40℃	+20℃	-70℃
4.79	0.30	1.32	0.31	0.11	19.61	42.41	38.90

表4所列为 $\phi 65\text{mm}$ 发动机测试结果。从中可看出, $\phi 65\text{mm}$ 发动机测得的燃速比用声发射法测得的值高, 从实测比冲修正结果看, 实验制得的65%固体含量含硼 BAMO/THF (1:1) 推进剂的比冲效率为84.45%, 考虑到硼粉的纯度仅为90.94%, $\phi 65\text{mm}$ 发动机试车结果是令人满意的。

Table 4 The test result of $\phi 65\text{mm}$ motor

$r/(\text{mm/s})$		$I_{sp}/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg})$			$I_{sp,\text{modif.}}/I_{sp,\text{th}}$
acoustic emission (7MPa)	$\phi 65$ motor (7.73MPa)	$I_{sp,\text{th}}$ (7MPa)	$I_{sp,\text{meas}}$ (7.73MPa)	$I_{sp,\text{modif}}$	84.45%
4.79	5.42	2444	2084	2064	

4 结 论

(1) AP/B/[BAMO/THF (1:1)] 推进剂的标准理论比冲随着 P_1/P_0 值的增大而略有降低, 当用 HMX 部分取代 AP 时, 推进剂的比冲随 P_1/P_0 的增大而增大。

(2) AP/B/[BAMO/THF (1:1)] 推进剂的最高标准理论比冲随着 HMX 的含量的增加而增大, 且最高标准理论比冲配方对应的硼含量相应的降低。

(3) 由于整体级发动机使用了膨胀比高的强制偏流喷管, 使得含硼推进剂有较高的能量补偿值。

(4) 实验制得的65%固体含量 BAMO/THF (1:1) 推进剂的燃速和压强指数低, 比冲效率为84.45%。

参 考 文 献

- Mockenhaupt J D, Felix G J. Cold flow tests of forced deflection nozzle for integrated stage application. AIAA81-1420
- Wiswell Robert L. AFRPL technical objective document FY-83. AD-A-111,999
- Mcparland G G, Bennett D R, et al. Integrated stage concept system study results. AIAA86-1581