

文章编号: 1006-9941(2005)02-0069-05

硼粉改性对推进剂工艺性能的影响

唐汉祥, 陈江, 吴倩, 李洪旭, 周明川

(湖北航天化学技术研究所, 湖北襄樊 441003)

摘要:采用 HAAKE 粘度计测定硼粉/丁羟简单体系和实验推进剂药浆屈服值和表观粘度, 研究了硼粉的处理效果和含硼量对硼含量为 35% ~ 40% 实验配方药浆工艺性能的影响。结果表明: 在研究处理硼粉 B_D、B_W、B_T 和 B_S 系列中, B_S 的处理效果最好, 处理工艺稳定。用处理硼粉 B_S 制成的实验药浆具有较好的可浇性、流平性和适用期。实验药浆的流体特征, 在出料初期 2 ~ 3 h 内呈 Casson 或 Bingham 流体, 有显著剪切稀化和明显的静止结构恢复特征。

关键词: 航空航天材料; 富燃料推进剂; 复合固体推进剂; 改性硼粉; 推进剂工艺性能; 流变学

中图分类号: TJ763; V512

文献标识码: A

1 引言

硼粉具有高的质量热值和体积热值, 是贫氧富燃料固体推进剂理想的高能量添加组份。20 世纪 70 年代以来, 国外对含硼推进剂作了广泛深入的研究, 探索将含硼贫氧推进剂用于固体燃气发生器冲压发动机^[1~3]。我国也对硼粉在推进剂中的应用作了一定程度的探索工作^[1,4~6]。硼粉在推进剂的应用中, 首先遇到了药浆的工艺性能问题, 在我国探索的配方中硼含量 30% ~ 32%^[1~5], 而国外研究的配方硼含量一般在 35% ~ 40%^[2,3], 与国外相比存在一定差距。

一般认为, 解决含硼推进剂药浆的工艺性能, 关键是解决硼粉的改性。人们已选择了诸如 AP、KP、氟树脂 Viton、环氧树脂 Epicoat 等对硼粉进行包覆处理或用某些醇对硼粉进行钝化处理^[6~9], 也用团聚处理以解决硼粉在推进剂中应用的工艺性能问题^[3]。本研究依据硼粉应用在丁羟粘合剂体系中的特点, 采用不同的助剂和方法对硼粉进行处理, 研究处理硼粉的改性效果, 在配方中硼含量质量百分数为 35% ~ 40% 的水平下, 探索处理硼粉对推进剂工艺性能的影响。

2 实验

实验用原材料硼粉: 禹涛牌无定型硼, 营口北方精细化工厂生产。由于其含水量高达 0.63%, 所以烘干除去水份, 再选择助剂进行各种方法的处理, 获得代号为 B_D、

B_W、B_T、B_S 系列的处理硼粉样品用于实验研究。

丁羟粘合剂粘度低, 可加入较多的固体填料, 制成推进剂的工艺、力学性能好, 且其含氧量低, 是含硼富燃料推进剂所追求的理想组份。所以本研究选择丁羟粘合剂体系考察处理硼粉对推进剂工艺性能的影响。

测定仪器: RV20 旋转流变仪, 德国 HAAKE 公司生产。M5/SV2 测定系统, 取 1 s⁻¹ 剪切速率下的表观粘度作浆料的表征粘度; 用 M5/SV2FL 系统测定浆料的屈服值。

3 实验结果与分析

3.1 硼粉改性

3.1.1 改性方法的选择

硼粉用作推进剂主燃组份, 首先遇到的是工艺性能问题。由于工业硼粉与丁羟粘合剂不相容^[1,2,5]。将二者混合时, 很快变粘, 搅动则成团, 没有流动性, 无法进行药浆流变性测试。

工业硼粉与丁羟粘合剂不相容, 从丁羟角度来分析, 主要应与丁羟胶分子中的双键和羟基有关。用异氰酸酯封端的丁羟胶与工业硼粉混合, 体系粘度可大幅度地降低, 并随时间增长变化很慢, 这说明工业硼粉与丁羟胶不相容主要与丁羟胶中的羟基有关。而从硼粉角度来分析, 由于硼原子具有空轨道、小半径和高的电离能, 导致形成共价性、缺电子和多面体的成键特性, 与别的原子可分别形成四个呈四面体取向的价键; 硼-氧键比硼-碳、硼-氮键具有更高的键能, 硼是一个亲氧元素, 硼将易与含氧基团反应形成正四面体结构。可以认为二者不相容主要与硼粉中的氧化硼有关, 氧化硼极易溶解于水, 形成硼酸。而丁羟胶和工业硼粉中一般含有微量水份, 硼粉中的氧化硼与这些微量水

收稿日期: 2004-06-25; 修回日期: 2004-08-21

基金项目: 国防预先研究(项目编号: 41328030107)

作者简介: 唐汉祥(1943-), 男, 研究员, 从事复合固体推进剂配方和性能研究。e-mail: htjrhx-3396@163.com

份作用生成硼酸。丁羟胶官能度在2左右,为多羟基化合物,生成的硼酸与丁羟胶中的羟基形成正四面体结构的共价结构。这种正四面体结构即是一种交联网,它将使浆料很快变粘,搅动则成团,没有流动性。

根据硼粉在丁羟粘合剂体系中使用的特点,硼粉改性主要考虑减少硼酸的生成,抑制少量硼酸与羟基的作用,据此研究选择了与文献[3,6~9]不同的助剂和方法来处理工业硼粉,获得了代号为 B_D 、 B_W 、 B_T 和 B_S 系列处理硼粉样品,并用硼粉与丁羟粘合剂体系组成的简单体系,评价各种处理硼粉的效果。直观观察实验样品,发现均能连续流动,工艺性能测试表明,所用处理方法可显著改善原工业硼粉制成样品的不流动性和不可测粘性。

由于处理效果不同,实验样品的粘度差别较大,硼粉 B_D 、 B_W 间的比较,体积分数取0.20;硼粉 B_W 、 B_T 和 B_S 间的比较,体积分数取0.32。制成的均匀浆料,50℃下测定表观粘度及其随时间的变化,结果示于图1和图2。

由图1可见,硼粉 B_W 的粘度时间曲线比硼粉 B_D 低,粘度增长也缓慢。表明 B_W 的处理效果要优于 B_D 。由图2可见,硼粉 B_{T3} 、 B_{S1} 、 B_{S2} 的粘度时间曲线又均比 B_W 的低,且粘度增长速度缓慢,尤以 B_{S1} 、 B_{S2} 明显。这表明 B_S 系列是所研究的处理硼粉中改善工艺性能较好的一种样品, B_S 所用的助剂和处理方法有效地减少硼酸的生成和抑制少量硼酸与羟基的作用。但由 B_S 硼粉制成浆料的粘度随时间增长仍缓慢增加,表明 B_S 在丁羟中使用仍能产生极微量的硼酸,所以处理硼粉 B_S 能否用于推进剂,还需经推进剂工艺性能的实践。

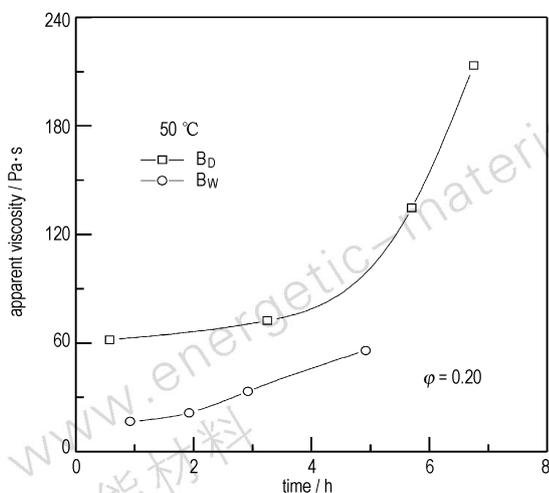


图1 体积分数为0.20时处理硼粉 B_D 、 B_W 对简单体系流变性的影响

Fig. 1 Effect of modified boron B_D 、 B_W at volume fraction 0.20 on the rheological property in the HTPB/Boron simple system

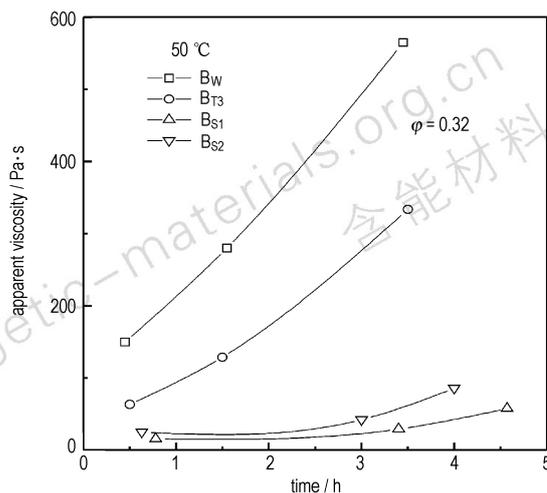


图2 体积分数为0.32时处理硼粉 B_W 、 B_T 、 B_S 对简单体系流变性的影响

Fig. 2 Effect of modified boron B_W 、 B_T 、 B_S at volume fraction 0.32 on the rheological property in the HTPB/Boron simple system

3.1.2 处理硼粉 B_S 的稳定性

硼粉 B_S 的稳定性决定了这种处理工艺方法可行的可行性。本研究通过用考察不同批的原料硼、不同处理批次 B_S 硼粉的得率和 B_S 与丁羟简单体系的表观粘度,来评价处理硼粉 B_S 的稳定性。用营口北方精细化工厂生产的第三批禹涛牌硼粉,进行了数十次的处理实验。将每次处理所得的 B_S 样品,与丁羟粘合剂体系制成硼体积分数为0.41的浆料。料浆混合完毕,50℃下测定 $1s^{-1}$ 剪切速率下的表观粘度。考察处理硼粉的得率、浆料粘度水平,视各批间的波动,以说明 B_S 硼粉的处理稳定性。

表1列出的是各批得率和粘度数据。由表1可见,处理的 B_S 硼粉得率在90%以上,大部分在95%左右,简单体系的粘度在 $20 \sim 60 Pa \cdot s$ 间,粘度值低、波动也小。表明这种工艺处理的硼粉,性能良好,硼粉处理工艺有较好的稳定性。

3.2 硼粉改性对工艺性能影响

3.2.1 实验推进剂药浆制备

硼粉 B_S 与丁羟粘合剂体系组成的简单体系具有很好的浆料流变性。为了确定 B_S 在实际推进剂中工艺性能,这里用实验推进剂的药浆样品进行了考察。实验推进剂采用固体含量70%~75%,其中:硼粉35%~40%,AP 20%~30%,HTPB/IPDI 粘合剂体系,混合温度取40℃,用5升立式混合机制备药浆样品。

3.2.2 药浆工艺性能

推进剂的工艺性能包括可浇性和流平性,通常由药浆的表观粘度和屈服值分别表征^[10,11]。因采用 50℃ 的浇注工艺条件,故以 50℃ 下测定的药浆屈服值和表观粘度、及药浆出料后随时间的变化情况,观察实际浇注工艺状况,评价 B_s 硼粉实验药浆的工艺性能。表 2 是各实验配方制药,出料初期药浆的屈服值和表观粘度的结果,其中 S 为配方设计的固体质量百分数, B 为配方中改性硼粉质量百分数;表 3 是一些药浆的适用期结果。

由表 2 可见,出料药浆的屈服值在 200 Pa 以内,表观粘度在 500 Pa·s 左右,具有良好的工艺性能,即具有良好的流平性和顺利的可浇性。当总固体含量相同,硼含量增加 5%,屈服值和表观粘度成倍增加;当总固体含量增加 5%,硼含量保持不变时,屈服值明显增加,表观粘度大幅度地提高。

表 1 处理硼粉的稳定性

Table 1 The stability of modified boron powder

| Boron batch No | B _s batch No | productivity /% | apparent viscosity /Pa·s, 50℃ |
|----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 20011007 | 020515 | 93.5 | 21.5 |
| | 020619 | 92.3 | 33.2 |
| | 020620 | 91.8 | 50.3 |
| 20020516 | 020617 | 93.8 | 43.4 |
| | 020618 | 94.3 | 48.6 |
| | 020619 | 92.3 | 33.2 |
| | 020814 | 94.6 | 29.0 |
| | 020815 | 96.5 | 32.8 |
| | 020816 | 95.9 | 63.2 |
| | 020826 | 95.0 | 24.8 |
| | 020827 | 94.4 | 62.8 |
| | 020828 | 96.1 | 26.0 |
| | 020829 | 94.8 | 22.1 |
| 20020602 | 020830 | 96.1 | 41.5 |
| | 020902 | 94.1 | 31.1 |
| | 020903 | 94.6 | 21.2 |
| | 020904 | 96.6 | 27.7 |
| | 020905 | 89.4 | 24.0 |

表 2 推进剂药浆在出料初期的流变性能

Table 2 The rheological properties in the initial period of propellant mixingend

| formulation No | S/% | B/% | τ_y /Pa | η_a /Pa·s | castability |
|----------------|------|-----|--------------|----------------|-------------|
| R433 | 70 | 35 | 114.2 | 228.1 | good |
| R434 | 70 | 40 | 262.8 | 430.8 | good |
| R435 | 75 | 35 | 209.0 | 538.5 | good |
| R436 | 70.5 | 35 | 158.4 | 396.8 | good |
| R437 | 73.5 | 38 | 814.9 | 1938 | uncastable |

表 3 推进剂药浆的适用期

Table 3 Pot-life of the propellant filled with modified B_s

| formulation No | time/h | τ_y /Pa | time/h | η_a /Pa·s |
|----------------|--------|--------------|--------|----------------|
| R433 | 0.75 | 114.2 | 1.00 | 228.1 |
| | 3.00 | 62.4 | 3.25 | 293.8 |
| | 4.90 | 61.2 | 5.12 | 358.2 |
| | 6.45 | 115.7 | 6.67 | 492.3 |
| R436 | 0.50 | 158.4 | 0.70 | 396.8 |
| | 2.00 | 131.8 | 2.20 | 424.1 |
| | 4.00 | 175.7 | 4.20 | 507.9 |
| | 5.00 | 145.1 | 5.20 | 491.8 |
| R442 | 0.30 | 61.7 | 0.43 | 294.8 |
| | 2.55 | 102.6 | 2.72 | 480.7 |
| | 4.73 | 128.5 | 5.00 | 622.4 |
| R452 | 0.28 | 182.2 | 0.43 | 402.6 |
| | 1.88 | 118.2 | 2.05 | 567.0 |
| | 2.83 | 96.2 | 3.10 | 488.1 |

推进剂的适用期是指混合完毕后的药浆既要有很好的流平性又要有顺利可浇性的时间期限。由表 2 知,含硼推进剂这类药浆,有良好的可浇注性。据此分析表 3 中的药浆屈服值达到 200 Pa 的时间和表观粘度达到 500 Pa·s 左右的时间,用时间择短原则确定适用期。可见推进剂药浆有 4~5 h 的适用期。

由表 3 可见 B_s 硼粉制成的推进剂药浆,在出料后不同时间测定的流变性变化规律。除 R442 配方外,其余配方的屈服值在前 2~3 h 内一般呈下降趋势,以后则随时间增加而增加;表观粘度一般则随时间呈连续增加趋势,但也有在增加后又出现下降的,例 R436 和 R452 两个配方。产生上述现象的原因是药浆屈服值反映的是药浆由静止转变为流动时的临时结构强度特征,这种结构强度主要由填料颗粒间的静摩擦阻力、各组份间的次价作用力及大分子的静力学阻力决定;由于本实验配方采用了固化速度慢的 IPDI 作固化剂,所以出料后 2~3 h 内药浆的结构强度取决于填料颗粒间的静摩擦阻力。因研究表明^[12],丁羟推进剂固化反应生成的氨基甲酸酯基可通过改善极性填料颗粒的表面润湿、分散性和二相流间的连续性,减小药浆结构强度,降低屈服值。所以出料后的 2~3 h 内,固化反应生成的氨基甲酸酯基逐渐增多,明显降低结构强度;尽管固化造成粘合剂分子的增大也要增加静力学阻力,但尚不能成为药浆屈服值的主控因素,所以综合结果药浆屈服值呈下降趋势。在填料的结构性能得到充分改善后即出料的 2~3 h 后,这时药浆的结构强度将主要由大分子的静力学阻力决定。随固化反应进行,粘合剂的大分子不断变大,静力学阻力也就不断增加,这时就表现为屈服值随时间呈增加趋势。而推进剂药

浆粘度反映的是药浆在剪切流动状态下的内摩擦力的大小。药浆出料后的剪切内摩擦力的变化主要由粘合剂大分子的变化所控制,所以随固化反应的进行,粘合剂分子不断变大,致使流动阻力也不断增大,表现为药浆粘度随出料后时间的增加而呈连续增加趋势。至于表中个别配方药浆的屈服值、粘度变化与上述分析稍有差异,这是由于影响药浆固化反应因素的复杂性,实验配方的设计对此尚不能有效控制所致。

3.2.3 药浆流变特性

推进剂的工艺性能由药浆的流变特性决定,科学地解析药浆的流变特性,有助于深刻认识、调节和改善推进剂的工艺性能。目前人们对含硼药浆的流变性尚未很好的认识,实际感觉这种药浆的工艺性能似乎与以往三组元丁羟推进剂有所不同。为了认识含硼药浆的工艺性能特点,对用 B_5 硼粉制成的实验药浆进行了初步考察。表4是对出料后不同时间的药浆测定的流动曲线,在 $0.3 \sim 2.5 \text{ s}^{-1}$ 剪切速率范围,进行最佳流变模型拟合的结果。

表4 含 B_5 改性硼粉的推进剂药浆流体类型
Table 4 The fluidic type of the propellants filled with modified B_5

| formulation No | after mixingend/h | Rheo-model | equation | relative coefficient |
|----------------|-------------------|-------------|---|----------------------|
| R434 | 0.83 | Casson | $\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0} = \sqrt{\eta\dot{\gamma}}$ | 0.970 |
| | 2.00 | Casson | $\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0} = \sqrt{\eta\dot{\gamma}}$ | 1.000 |
| | 3.83 | Logarithmic | $\tau = a + b \ln \dot{\gamma}$ | 0.990 |
| | 5.33 | Logarithmic | $\tau = a + b \ln \dot{\gamma}$ | 0.990 |
| R435 | 0.80 | Bingham | $\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$ | 1.000 |
| | 2.33 | Casson | $\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0} = \sqrt{\eta\dot{\gamma}}$ | 1.000 |
| | 3.83 | Ostwald | $\tau = k\dot{\gamma}^n$ | 1.000 |
| | 4.77 | Ostwald | $\tau = k\dot{\gamma}^n$ | 1.000 |
| R442 | 0.30 | Casson | $\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0} = \sqrt{\eta\dot{\gamma}}$ | 1.000 |
| | 2.55 | logarithmic | $\tau = a + b \ln \dot{\gamma}$ | 1.000 |
| | 4.73 | logarithmic | $\tau = a + b \ln \dot{\gamma}$ | 0.980 |
| R443 | 0.38 | Bingham | $\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$ | 0.990 |
| | 2.53 | Ostwald | $\tau = k\dot{\gamma}^n$ | 0.990 |
| | 4.00 | Logarithmic | $\tau = a + b \ln \dot{\gamma}$ | 1.000 |

表4结果表明,由 B_5 硼粉制成的实验推进剂药浆,出料初期 $2 \sim 3 \text{ h}$ 内,一般呈具有屈服值的卡松(Casson)流体或宾汉(Bingham)流体特性。随出料后时间的继续增加,才开始变为幂律流体,或具有对数关系的流体。这一特征和以往的丁羟推进剂一般为幂律流体,显著不同。

图3是药浆在出料后不同时间测定的流动曲线。由图3可见,初始出料药浆在低剪切速率下,流动曲线

出现陡升,达一定剪切应力后,曲线呈马鞍型拐弯,以后则呈连续缓慢上升;随出料后时间增加,流动曲线才逐渐消除初始段的马鞍型拐弯,从较低剪切速率下,即呈平稳连续的上升。表明这种实验推进剂药浆在出料初期有较大的临时结构强度,只有当剪切应力达一定大的值后,即达到和超过了这种临时结构强度后,药浆才开始流动,流动曲线呈马鞍型拐弯;随出料后时间增加,由于固化反应的进行致使这种临时结构强度逐渐降低,药浆连续性不断改善,使流动曲线从较低剪切速率下就呈平稳的连续上升状。

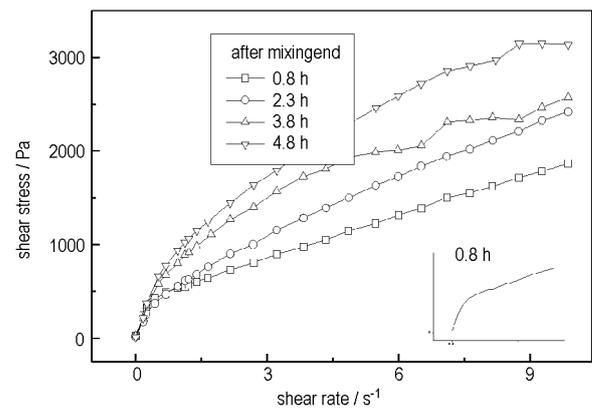


图3 含 B_5 改性硼粉的推进剂药浆的流动曲线

Fig. 3 Flow curves of the propellants filled with modified B_5

图4是药浆的粘度曲线的包络线。由图可见低剪切速率下,粘度很高;随剪切速率增加,粘度急剧下降,表明药浆呈显著的剪切稀化特征。但从粘度曲线的回线来看,当剪切速率由大到小,回归接近零剪切速率时,粘度突升,甚至超过了上升曲线的起始粘度值。这是由于配方中加入了大量细粒硼粉的缘故,因粒细,故尽管个体颗粒间的作用力不大,剪切时易被破坏,但药浆中作用力的点极多,总体作用力仍很大,所以表现为低剪切速率下粘度较高,呈显著剪切稀化特征;并且由于粒细,相互作用的力程短,所以当对药浆的剪切速率回归接近零时,颗粒间作用可很快地大量恢复,呈明显的静止结构恢复特征,致使出现粘度突升。

与之相应的实际工艺状况是,药浆直观显示较粘,一般浇注比较容易,浇下后流平缓慢,沸腾较高,但只要时间较长,流平性尚好。由于顺利浇下的药浆,可很快恢复结构强度,结果使流平受阻,药条桥接,造成沸腾高,不易除气。这种特性的药浆,若用于装填小直径且长径比很大的发动机,将不易浇注;如对固化较快,适用期较短的药浆,则不易流平,有可能要产生气孔。

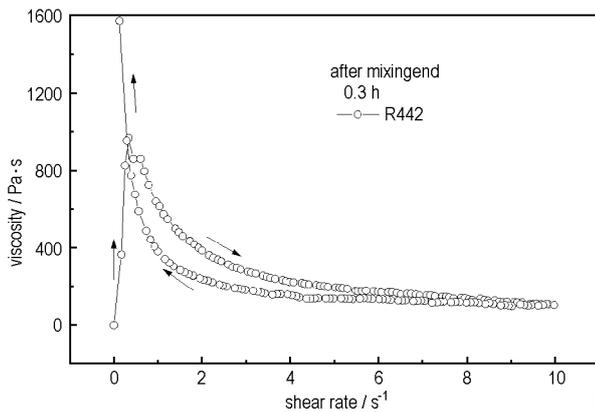


图4 含 B_5 改性硼粉的推进剂药浆的粘度曲线

Fig. 4 Viscosity curves of the propellants filled with modified B_5

4 结论

经对硼粉处理效果的评价和制成实验推进剂药浆流变性的考察,获如下结论:

(1) 选出了具有良好改性效果的处理硼粉 B_5 ,处理工艺稳定。

(2) 由处理硼粉 B_5 制成配方硼含量为35%~40%的实验药浆,出料屈服值在200 Pa以内,表观粘度在500 Pa·s左右,可浇性良好,适用期可达4~5 h。

(3) 实验药浆为Casson或Bingham流体,呈显著剪切稀化和静止结构恢复特征。

参考文献:

- [1] 臧令千. 硼用作推进剂燃料组分的研究[J]. 推进技术,1990,11(14):56-62.
ZANG Ling-qian. The research on boron as one component of fuels in propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*,1990,11(14): 56-62.
- [2] 王桂兰,赵秀媛. 硼粉在推进剂中应用研究[J]. 固体火箭技术,1998,21(2):46-50.

WANG Gui-lian, ZHAO Xiu-yuan. Application study of boron powder in propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*,1998,21(2): 46-50.

- [3] 唐菊花译. 含硼推进剂在火箭冲压发动机中的应用[A]. Mahe B. Combustion of Boron - Based Solid Propellants and Solid Fuels [C], edited by Kenneth K. Kuo, CRC Press 1993:361-371.
- [4] 张德雄译. 德国含硼推进剂火箭冲压发动机的发展[A]. Besser H L. Combustion of Boron - Based Solid Propellants and Solid Fuels [C], edited by Kenneth K. Kuo, CRC Press 1993:133-178.
- [5] 李葆萱,王英红,毛成立,等. 含硼富燃固体推进剂药浆粘度调节[J]. 固体火箭技术,2000,23(4):19-22.
LI Bao-xuan, WANG Ying-hong, MAO Cheng-li, et al. Adjustment of viscosity of boron-based rich-fuel solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*,2000,23(4): 19-22.
- [6] 李疏芬,金荣超. 硼粒子表面包覆对富燃料推进剂热分解特性的影响[J]. 兵工学报·火化工分册,1997,(1):1-4.
- [7] Nieder, Erin G. Chemical passivation of amorphous boron powder[P]. U. S. P. 4 637 847.
- [8] Trowbridge, Jone C, Breazeale, Jack D. Coating of boron particles[P]. U. S. P. 4 877 649, U. S. P. 4 915 753.
- [9] Hidetsugu N, Osamu N, Miyako A, et al. Effect of coating on the reactivity of boron powder, Kayaku Gakkaishi[J]. 2001,62(1):8-15.
- [10] 唐汉祥. 药浆流变性能[A]. 侯林法主编. 导弹与航天丛书,复合固体推进剂[M]. 北京:宇航出版社,1994,212-214.
- [11] 唐汉祥,刘秀兰,吴倩. 推进剂药浆流平性研究[J]. 推进技术,2000,21(3):79-82.
TANG Han-xiang, LIU Xiu-lan, WU Qian. Leveling properties of the composite solid propellant slurry[J]. *Journal of Propulsion Tehnology*, 2000,21(3): 79-82.
- [12] 唐汉祥,吴倩,陈江. 氨基甲酸酯基对推进剂工艺性能的影响[J]. 推进技术,2002,23(1).
TANG Han-xiang, WU Qian, CHEN Jiang. Effect of urethane groups on processing behaviour of composite solid propellants[J]. *Journal of Propulsion Tehnology*, 2002,23(1).

Effect of Modified Boron Powder on Propellant Processing Characteristics

TANG Han-xiang, CHEN Jiang, WU Qian, LI Hong-xu, ZHOU Ming-chuan

(Hubei Institute of Aerospace Chemotechnology(HIACT), Xiangfan 441003, China)

Abstract: In the HTPB/Boron simple system and the HTPB propellant composed of total solid loading 70~75wt% containing modified boron powder B_5 40~35wt%, the effects of modified boron and the processing characteristics of propellant filled boron powder B_5 were studied by means of yield value and apparent viscosity measured with HAAKE RV20 M5/SV2LF and M5/SV2 systems. The results show that according to the processing stability, B_5 is the best one of all the modified products including B_D , B_W , B_T and B_S . The propellants filled B_5 exhibit a good castability, flow level and long potlife, and after mixing 2~3 h the slurry can be described with Casson or Bingham model, when shear up and down to stationary it exhibited obvious shear-thinning and constraction recovery respectively.

Key words: rich-fuel propellant; composite solid propellant; modified boron; propellant processability; rheology