

文章编号:1006-9941(2021)10-0914-06

铝基亚稳态复合物与典型黏合剂混合物的流变性能

姜菡雨,姚二岗,张建侃,徐司雨,裴庆,胥会祥,赵凤起

(西安近代化学研究所燃烧与爆炸技术重点实验室,陕西西安710065)

摘要: 金属燃料添加剂在黏合剂中的分散特性将极大影响火炸药的工艺性能。以两种不同形貌(球形和片状)的新型亚稳态分子间复合物铝/聚偏氟乙烯(QAIPV和PAIPV)为对象,利用RS-300流变仪,系统研究了端羟基聚丁二烯(HTPB)、聚叠氮缩水甘油醚(GAP)和环氧乙烷四氢呋喃共聚醚(PET)典型黏合剂与两种铝基复合物形成的混合体系的流变性能。结果表明,悬浮液体系均表现出假塑性流体特征,在20~60℃内,随温度增加,表观黏度均减小。在GAP和PET体系中,含PAIPV混合体系的流动活化能均大于含QAIPV混合体系,说明片状结构的铝基复合物与这两种黏合剂形成的混合体系的刚性较大,其表观黏度对温度更敏感。因此,可通过提高温度来改善PAIPV在黏合剂中的分散性;而QAIPV与GAP、PET形成混合体系的柔性较大,可通过提高剪切速率来改善其分散性和均匀性。

关键词: 黏合剂;铝基亚稳态复合物;流变性能;流动活化能

中图分类号: Tj55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021077

1 引言

高活性金属材料因高潜热、高密度等特性,作为高能燃料广泛应用于火炸药,其反应释放的潜能可提高弹药毁伤威力和射程。纳米Al原材料丰富,具有点火延迟时间短,反应速率快的优点,能显著提高火炸药能量性能,是新型火炸药研制的重要材料^[1-3]。但纳米铝粉同时也存在容易氧化、团聚等特点,易导致反应速率和能量释放效率降低。针对这一问题,研究者们选择将氧化性较强的材料(如金属/非金属氧化物、氟基聚合物等)与纳米铝粉复合,得到亚稳态分子间复合材料(metastable intermixed composite, MIC),以提高材料的反应速率和燃烧效率, MIC作为一类典型的高活性金属材料,已广泛应用于推进装置和储能装置^[4-7]。

高活性金属是高性能火炸药研制的重要原料,但其较大的比表面积、较高的表面能增加了与火炸药其

它组分间的相互作用,如高活性Al与黏合剂体系浸润过程,表面吸附了大量黏合剂,造成药浆黏度大,流动性降低,难以流平,导致火炸药工艺成型性差^[8-9]。在复合推进剂、PBX炸药等火炸药配方中,金属燃料添加剂在黏合剂中的分散特性将极大影响火炸药的工艺性能和力学性能。目前对于高活性金属材料研究多集中在结构形态、反应活性、存储稳定性及燃烧性能等方面^[10-12],而高活性金属材料在推进剂中的工艺适应性等性能研究较少,现有资料也多是针对铝粉、硼粉等典型金属^[13-15],铝基亚稳态复合物的工艺性能研究还尚属空白。

因此,本研究以高性能的新型亚稳态分子间复合物铝/聚偏氟乙烯为对象,利用流变分析法作为分析途径,系统研究了两种不同形貌的MIC与HTPB、GAP和PET典型黏合剂体系的相互作用,为该推进剂的工艺性能研究提供借鉴。

2 实验部分

2.1 试验材料及试样制备

球状铝/聚偏氟乙烯亚稳态分子间复合物,QAIPV,粒度(d_{50})约10 μm,西安近代化学研究所自制(溶剂-非溶剂法);片状铝/聚偏氟乙烯亚稳态分子

收稿日期:2021-04-08;修回日期:2021-05-25

网络出版日期:2021-08-13

基金项目:国家自然科学基金资助(52027809);燃烧与爆炸技术重点实验室基金(6142603190302)

作者简介:姜菡雨(1989-),女,副研究员,研究方向为高活性金属粉体制备及改性研究。e-mail:jianghanyu612@126.com

引用本文:姜菡雨,姚二岗,张建侃,等.铝基亚稳态复合物与典型黏合剂混合物的流变性能[J].含能材料,2021,29(10):914-919.

Jiang Han-yu, Yao Er-gang, Zhang Jian-kan, et al. Rheological Behavior of the Compound Mixed with Metastable Aluminum-based Composites and Typical Binders[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(10):914-919.

间复合物, PAIPV, 粒度(d_{50})约 30 μm , 西安近代化学研究所自制(机械球磨法)。HTPB、GAP 和 PET, 羟值分别为 0.68、0.646 和 0.468 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$, 数均分子量分别为 3100、3400 和 3400, 黎明化工研究院制备; 乙醇、丙酮、乙酸乙酯均为分析纯。

以一定质量比称取铝基亚稳态复合物与黏合剂, 在烧杯中用玻璃棒预混, 再经超声分散 20 min, 得到测试混合体系悬浮液。

2.2 性能表征与测试

采用荷兰 FEI 公司 Quanta600 型场发射环境扫描电镜对高活性金属粉的形貌进行观测对比。采用 HAAKE 公司的 RS-300 型流变仪对铝基复合物与黏合剂的悬浮液进行流变性能测试, 选用平板测试系统, 转子为 PP35Ti。

流体黏度的定义是从牛顿黏性定律导出的^[16-17], 可表示为:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中, τ 表示剪切应力, Pa; $\dot{\gamma}$ 表示剪切速度, s^{-1} ; η 表示黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

高分子预聚体、高聚物熔体以及它们的悬浮体绝大多数均属非牛顿流体, 故不能用牛顿黏度来描述它们的流变行为。为了研究这类流体的流变特性, 研究者们提出了表观黏度的概念^[18]。所谓表观黏度, 是根据这类流体的流动情况直接观测的结果, 其表达式为:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

或

$$\eta_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

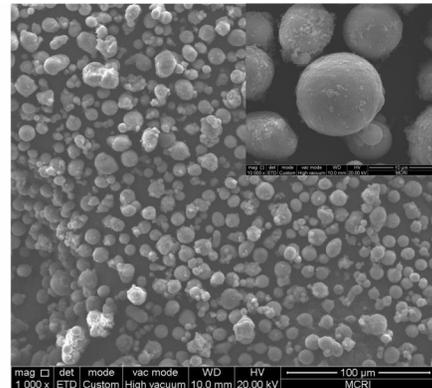
表观黏度不是一个常数, 它是剪切速率和剪切速率指数的函数, 为了便于与牛顿黏度对应, 仍称其单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。在研究推进剂药浆的流变特性时, 用的就是表观黏度的概念, 以剪切速率($\dot{\gamma}$)为 1 s^{-1} 时的表观黏度(η_a)来表征悬浮液的流变性能^[18], 采用测试软件的拟合功能即可获得体系流动曲线及相关系数(r)。

3 结果与讨论

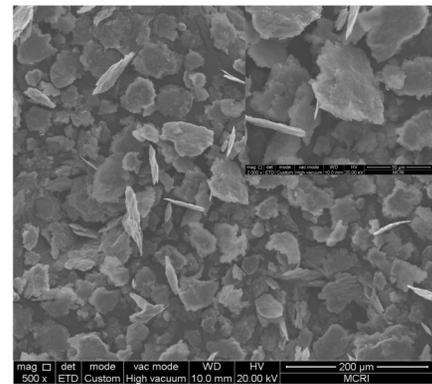
3.1 两种铝基复合物的形貌表征及活性

对两种方法制得的铝基亚稳态复合物进行形貌表征, 结果如图 1。从图 1 中可以看出, QAIPV 颗粒呈球状, 分散较好, 质地光滑且较为均匀; 而 PAIPV 颗粒呈菱形片状, 表面较为粗糙且不规整, 大颗粒上附着部分小颗粒。采用压力传感器法(WJ 20700-2018)对两种复合物进行活性铝含量测定, QAIPV 和 PAIPV 均具有

较高的活性铝含量, 分别为 89.54% 和 86.86%, 说明包覆改性后的铝基复合物仍保持了高活性特点, 这对在应用中保持高反应速率和高能量释放效率非常重要。



a. QAIPV



b. PAIPV

图 1 两种铝基复合物的 SEM 形貌

Fig.1 SEM images of two composite particles

3.2 铝基复合物/黏合剂混合物流变特性

为了探究不同形貌铝基复合物与典型黏合剂混合物的流变性能, 将 QAIPV 和 PAIPV 分别与 HTPB、GAP 和 PET 以质量比 1:2 进行混合, 获得 6 种悬浮液: QAIPV/HTPB、QAIPV/GAP、QAIPV/PET、PAIPV/HTPB、PAIPV/GAP 和 PAIPV/PET。研究发现, 当铝基复合物与黏合剂以质量比 1:1 混合时, PAIPV 易形成团状近似于固体的物料, 不能流动、流平, 难以形成均匀分散的混合体系; 当二者混合比例为 1:3 时, 铝基复合物会沉降在底部, 而上层为黏合剂清液, 无法形成均匀稳定的混合体系; 当混合比例为 1:2 时, 所得悬浮液均匀、稳定, 且不沉降, 6 种悬浮液经搅拌后均能流动、流平, 但所需时间有所不同。说明两种不同形貌的铝基复合物与黏合剂具有不同的相互作用, 其悬浮液体系具有

不同的流变性能。在固定剪切速率为 1 s^{-1} 的条件下,研究在工艺温度范围 ($20\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$) 内温度变化对于物料黏度的影响规律,结果如图 2 所示。

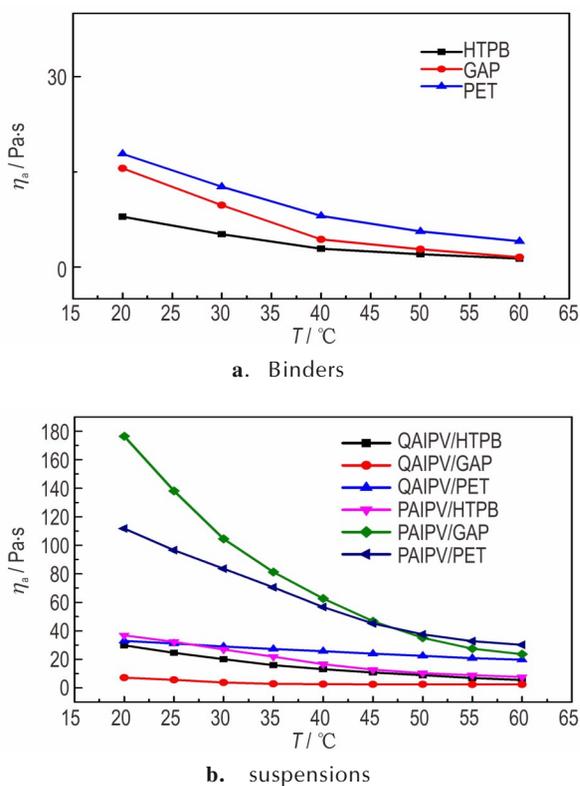


图 2 3种黏合剂及6种悬浮液表观黏度随温度的变化曲线
Fig.2 Effect of temperature on apparent viscosity of the binders and suspensions

从图 2 可以看出,添加 QAIPV 和 PAIPV 后,悬浮液的表观黏度显著增加。含 PAIPV 体系的表观黏度普遍大于含 QAIPV 体系,这是因为相比于规则的球形 QAIPV 颗粒,片状的 PAIPV 颗粒具有较大的比表面和运动阻力,不易流动。同时图 2 中数据也显示所有体系的表观黏度均随着温度的升高而降低,即温度升高更容易流动。但几种体系随温度升高表观黏度降低的速率并不相同,图 2 显示体系表观黏度降低速率顺序为: $\text{PAIPV/GAP} > \text{PAIPV/PET} > \text{PAIPV/HTPB} > \text{QAIPV/HTPB} > \text{QAIPV/GAP} > \text{QAIPV/PET}$ 。说明两种不同形貌的铝基复合物与黏合剂具有不同的相互作用,其悬浮液体系具有不同的温度敏感性和流变特性。

从图 1a 的 QAIPV 的形貌图片可看出,包覆后复合物颗粒为微米级,颗粒间并非紧密堆积状态,分散性较好,使得黏合剂可充裕的填充在颗粒间隙,对其进行浸润;同时,其较高的球形度使得颗粒间相对移动的阻力较小,即颗粒间内摩擦力小,因而 QAIPV 与黏合剂

形成的混合体系具有相对较低的表观黏度。而图 1b 显示 PAIPV 表面不规则,凹凸不平,棱角较多,不仅颗粒间的内摩擦阻力大,颗粒与黏合剂之间也容易发生吸附、缠结,形成三维交联网状结构,造成其分子间的静力学阻力较大,从而表现出较高的表观黏度。

3.3 剪切速率对表观黏度的影响

根据工艺温度的范围,选择 $20, 30, 40, 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为测试点,分别研究了温度对 6 种悬浮液分散特性和流变特性的影响。不同温度下剪切速率对含 QAIPV 和 PAIPV 的几种悬浮液流动曲线和黏度曲线影响如图 3 所示。

对上述悬浮液的流动曲线进行拟合,得到了其流动方程,结果见表 1。

由悬浮液流动曲线和拟合的流动方程(表 1)结果可见:QAIPV/HTPB、QAIPV/GAP、QAIPV/PET、PAIPV/HTPB、PAIPV/GAP 和 PAIPV/PET 6 种悬浮液的流动曲线均符合 Power law 幂率方程,属于假塑性流体,相关系数达到 1;随温度增加,悬浮液的表观黏度大幅减小,随着剪切速率的增大,混合体系的黏度基本趋于不变,表现出良好的流动性,剪切速率指数趋近于 1,表现出牛顿流体的特性。对于含填充材料的高分子分散体系,影响体系流变特征的因素有:填料颗粒与高分子流体本身的流变性,填料颗粒与高分子流体间的相互作用,填料颗粒间的相互作用,颗粒在介质中的分散状态、分散尺寸及尺寸分布等。而对于该悬浮液,经过搅拌和超声分散,可近似认为达到完全分散状态,其流变特性将主要由 QAIPV 和 PAIPV 与黏合剂之间及 QAIPV 和 PAIPV 颗粒间的相互作用决定,即所产生的临时结构强度和内摩擦力有关^[19-20]。

3.4 温度对表观黏度的影响分析及相互作用机理

根据假塑性流体黏度与温度的关系^[14]:

$$\eta = A e^{\frac{\Delta E_\eta}{RT}} \quad (4)$$

式中, A 为指前因子, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ΔE_η 为粘流活化能, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; T 为温度, K 。

对式(4)取对数,则得到:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\Delta E_\eta}{RT} \quad (5)$$

为分析温度对几种悬浮液流变性能的影响,分别获得了不同温度下 6 种悬浮液的 $\ln \eta$ 与 $1/T$ 关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 拟合的 6 种悬浮液的黏度方程及流动活化能结果见表 2。

流动活化能是指在流动过程中,流动单元(链段)

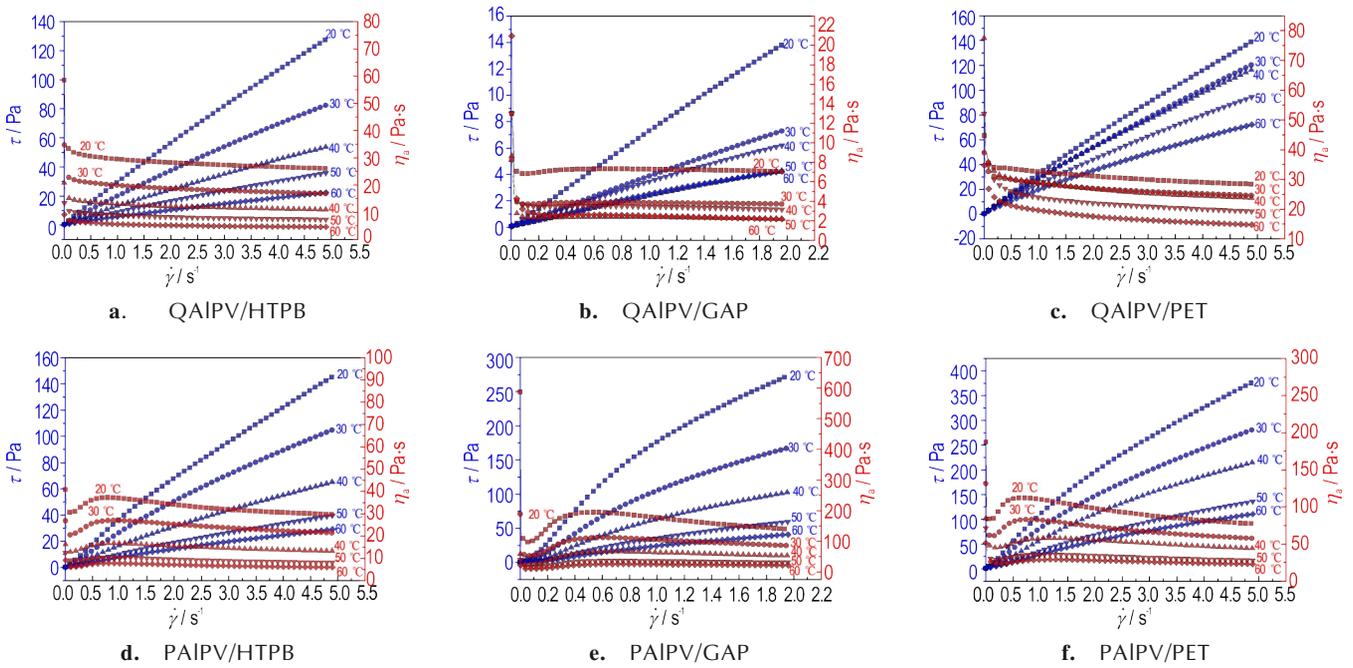


图3 温度对6种悬浮液流变性能影响

Fig.3 Effect of temperature on rheological properties of the suspensions

表1 6种悬浮液的流动方程

Table 1 Flow equations of the six suspensions

samples	T/°C	η _a /Pa·s	flow equations	r ²	samples	T/°C	η _a /Pa·s	flow equations	r ²
QAIPV/HTPB	20	29.41	τ=29.78γ̇ ^{0.9180}	1.000	PAIPV/HTPB	20	36.88	τ=36.79γ̇ ^{0.8629}	0.9997
	30	19.81	τ=20.10γ̇ ^{0.8920}	0.9999		30	26.91	τ=27.57γ̇ ^{0.8488}	0.9993
	40	12.96	τ=13.08γ̇ ^{0.8895}	1.000		40	16.66	τ=21.40γ̇ ^{0.8510}	0.9994
	50	8.80	τ=8.89γ̇ ^{0.8769}	1.000		50	10.28	τ=13.94γ̇ ^{0.8433}	0.9995
	60	5.55	τ=5.58γ̇ ^{0.8685}	1.000		60	7.64	τ=2.843γ̇ ^{0.8320}	0.9993
QAIPV/GAP	20	7.28	τ=7.23γ̇ ^{0.9727}	0.9999	PAIPV /GAP	20	176.50	τ=167.30γ̇ ^{0.7916}	0.9945
	30	3.86	τ=3.83γ̇ ^{0.9652}	0.9999		30	104.50	τ=84.07γ̇ ^{0.8358}	0.9947
	40	3.44	τ=2.32γ̇ ^{0.9287}	0.9999		40	62.70	τ=59.60γ̇ ^{0.8685}	0.9941
	50	2.35	τ=3.39γ̇ ^{0.9168}	0.9995		50	35.10	τ=33.70γ̇ ^{0.8989}	0.9954
	60	2.49	τ=2.44γ̇ ^{0.8507}	0.9996		60	23.70	τ=22.70γ̇ ^{0.9181}	0.9951
QAIPV/PET	20	32.50	τ=32.94γ̇ ^{0.9078}	1.000	PAIPV /PET	20	109.70	τ=111.70γ̇ ^{0.7754}	0.9989
	30	28.90	τ=28.73γ̇ ^{0.9034}	1.000		30	81.76	τ=83.50γ̇ ^{0.7751}	0.9985
	40	28.54	τ=28.99γ̇ ^{0.8751}	1.000		40	57.56	τ=60.80γ̇ ^{0.8126}	0.9977
	50	23.79	τ=24.22γ̇ ^{0.8597}	0.9999		50	35.64	τ=37.50γ̇ ^{0.8245}	0.9984
	60	19.47	τ=19.74γ̇ ^{0.8193}	0.9999		60	28.62	τ=30.20γ̇ ^{0.8298}	0.9980

用于克服位垒,由原位置跃迁到附近“空穴”所需的最小能量,既反映了材料流动的难易程度,也反映了材料黏度变化的温度敏感性^[18]。由表2数据可见,QAIPV/HTPB悬浮液与PAIPV/HTPB悬浮液的流动活化能十分接近,说明对于HTPB体系,不同形貌的颗粒的影响并不明显,体系流动的难易程度更大取决于HTPB材料的结构特点;而PAIPV/GAP和PAIPV/PET悬浮液的

流动活化能均大于QAIPV/GAP和QAIPV/PET悬浮液,说明较之球形铝基复合物,片状结构的粉体与GAP和PET黏合剂形成的混合体系的刚性较大,其表观黏度对温度更敏感,在流动过程中需要较高温度来增加链段向附近“空穴”(自由体积)移动时的能量,使链段在剪切作用下更易于活动。这主要是由于PAIPV表面存在大量的毛刺、凸起等,不仅颗粒间的内摩擦几

率和作用力大,且易于与黏合剂形成的三维交联点,从而使二者之间的静摩擦阻力增大,与黏合剂相互作用更强;当温度升高时,悬浮液分子无规则运动加剧,黏合剂与铝基复合物的活动能力均增强,分子间距增大,黏合剂分子链段更易于活动脱离交联点,形成的相互作用准网状结构被破坏,表观黏度降低。因此,可在混

合过程中通过提高温度来改善 PAIPV 在 HTPB、GAP 及 PET 中的分散性;而 QAIPV 与 GAP、PET 形成混合体系的柔性较大,其表观黏度对温度较不敏感,而对剪切速率变化更为敏感,可在混合过程提高剪切速率来改善其分散性和均匀性。同时也表明,粉体球形化是改善其在固体推进剂的工艺性能的重要途径。

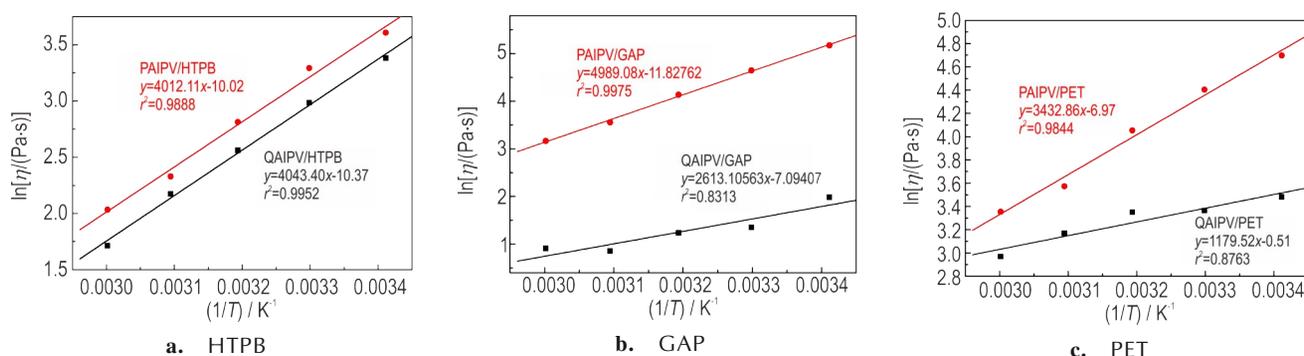


图4 6种悬浮液的 $\ln\eta$ 与 $1/T$ 关系

Fig.4 Relationship between $\ln\eta$ and $1/T$ for the six suspensions

表2 6种悬浮液的流动动力学参数

Table 2 Flow kinetic parameters of the six suspensions

suspensions	viscosity equations	$\Delta E_a/kJ \cdot mol^{-1}$	r^2
QAIPV/HTPB	$\eta=3.12 \times 10^{-5} e^{33.62/RT}$	33.62	0.9952
QAIPV/GAP	$\eta=8.30 \times 10^{-4} e^{21.73/RT}$	21.73	0.8313
QAIPV/PET	$\eta=6.02 \times 10^{-1} e^{9.81/RT}$	9.81	0.8763
PAIPV/HTPB	$\eta=4.44 \times 10^{-5} e^{33.36/RT}$	33.36	0.9888
PAIPV/GAP	$\eta=7.30 \times 10^{-6} e^{40.65/RT}$	40.65	0.9975
PAIPV/PET	$\eta=9.41 \times 10^{-4} e^{28.54/RT}$	28.54	0.9844

4 结论

(1) 添加 QAIPV 和 PAIPV 后,悬浮液的表观黏度显著增加,且含 PAIPV 体系的表观黏度普遍大于含 QAIPV 体系。两种铝基复合物与三种黏合剂组成的悬浮液的表观黏度均随着温度的升高而降低,即温度升高更容易流动。体系表观黏度降低速率顺序为: PAIPV/GAP>PAIPV/PET>PAIPV/HTPB>QAIPV/HTPB>QAIPV/GAP>QAIPV/PET。

(2) 6种悬浮液的流动曲线均符合 Power law 幂率方程,属于假塑性流体,QAIPV/HTPB 悬浮液与 PAIPV/HTPB 悬浮液的流动活化能十分接近,而 PAIPV/GAP 和 PAIPV/PET 悬浮液的流动活化能均大于 QAIPV/GAP 和 QAIPV/PET 悬浮液,说明片状结构的铝基复合物与 GAP 和 PET 黏合剂形成的混合体系

的刚性较大,其表观黏度对温度更敏感。因此,可通过提高温度来改善 PAIPV 在黏合剂中的分散性;而 QAIPV 与 GAP、PET 形成混合体系的柔性较大,可通过提高剪切速率来改善其分散性和均匀性。对于高活性金属类材料,粉体球形化是改善其在固体推进剂的工艺性能的重要途径。

参考文献:

- [1] Valery B, Ildar D, Alexey G, et al. Nanoaluminum as a solid propellant fuel[J]. *Journal of Propulsion and Powder*, 2009, 25(2): 482-489.
- [2] 安亭, 赵凤起, 肖立柏. 高反应活性纳米含能材料的研究进展[J]. *火炸药学报*, 2010, 33(3): 55-67.
AN Ting, ZHAO Feng-qi, XIAO Li-bai. Progress of study on high activity nano-energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(3): 61-65.
- [3] DeLuca L T. Energetic problems in aerospace propulsion[C]// Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2011.
- [4] Brousseau P, Anderson C J. Nanometric aluminum in explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, 27(5): 300-306.
- [5] Chen S W, Tang D Y, Zhang X, et al. Enhancing the combustion performance of metastable Al@AP/PVDF nanocomposites by doping with graphene oxide [J]. *Engineering*, 2020 (6): 1019-1027.
- [6] Asay B W, Son S F, Busse J R, et al. Ignition characteristics of metastable intermolecular composites [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010, 29(4): 216-219.
- [7] He W, Liu P J, He G Q, Gozin M, Yan Q L. Highly reactive metastable intermixed composites (MICs): preparation and characterization[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(41): 1706293.
- [8] 胥会祥, 周文静, 王晓红, 等. Nano-Al 与 HTPB、GAP 和 PET 相

- 互作用研究[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(5):666-671.
XU Hui-xiang, ZHOU Wen-jing, WANG Xiao-hong, et al. Study on interactions of nano-Al with HTPB, GAP and PET[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(5):666-671.
- [9] Lan N, Hashimoto T, Zakharov D N, et al. Atomic-scale insights into the oxidation of aluminum[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(3):2230-2235.
- [10] 王敬凯, 陈捷, 睢贺良, 等. 微纳米铝粉的氧化动力学研究进展[J]. 含能材料, 2021, 29(3):251-265.
WANG Jing-kai, CHEN Jie, SUI He-liang, et al. Review on micro-nano aluminum oxidation kinetics [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29 (3) : 251-265.
- [11] Jiang Z, Li S F, Li K, et al. Laser ignition and combustion properties of composite propellant containing nanometal powders [J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(7): 1463-1467.
- [12] YU Qiong, MA Lan, ZHOU Jing, et al. Content determination of elemental aluminum in micro and nano aluminum powder by redox titration method[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2015, 38(5): 109-111.
- [13] 庞维强, 樊学忠, 蔚红建, 等. 团聚硼颗粒与不同黏合剂的表-界面作用[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 83-86.
PANG Wei-qiang, FAN Xue-zhong, YU Hong-jian, et al. Surface and interface actions of agglomerated boron particles with different binders [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2013, 36(3): 83-86.
- [14] 胥会祥, 赵凤起, 庞维强, 等. 纳米Al/HTPB悬浮液的流变性能[J]. 火炸药学报, 2012, 35(6): 89-93.
XU Hui-xiang, ZHAO Feng-qi, PANG Wei-qiang, et al. Rheological properties of Nano-Al/HTPB suspension [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2012, 35(6): 89-93.
- [15] 唐汉祥, 陈江, 吴倩. 硼粉改性对推进剂工艺性能的影响[J]. 含能材料, 2005, 13(2):69-73.
TANG Han-xiang, CHEN Jiang, WU Qian. Effect of modified boron powder on propellant processing characteristics [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2):69-73.
- [16] M. Keentok. The measurement of the yield stress of liquids[J]. *Rheological Acta*, 1982, 21:325-332.
- [17] Muthiah R M. Effect of temperature on the rheological behavior of HTPB propellant Slurry[J]. *Polym Eng Sci*, 1991, 31(2): 61-63.
- [18] 史铁均, 吴德峰. 高分子流变学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
SHI Tie-jun, WU De-feng. *Polymer rheology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [19] 卫彦菊, 王晶禹, 安崇伟, 等. GAP/CL-20基混合炸药药浆的流变性[J]. 含能材料, 2015, 23(11):1124-1129.
WEI Yan-ju, WANG Jing-yu, AN Chong-wei, et al. Rheological behavior of GAP/CL-20 based composite explosives slurry [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11):1124-1129.
- [20] 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 propellants slurry [J]. *Journal of Propellant Technology*, 2000, 21(3): 79-82.

Rheological Behavior of the Compound Mixed with Metastable Aluminum-based Composites and Typical Binders

JIANG Han-yu, YAO Er-gang, ZHANG Jian-kan, XU Si-yu, PEI Qing, XU Hui-xiang, ZHAO Feng-qi

(Science and Technology on Combustion and Explosion Laboratory, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Shanxi, Xi'an 710065, China)

Abstract: The dispersion characteristics of metal additives in binders might tremendously affect the processing properties of propellants and explosives. Rheological properties of the two metastable intermolecular composites (QALPV and PALPV) mixed with hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB), glycidyl azide polymer (GAP) or poly (ethyleneoxide-co-tetrahydrofuran) (PET) separately were investigated by RS-300 rheometer respectively. Results show that all the six sorts of suspensions exhibited pseudoplastic fluid characteristics, and their apparent viscosity decreases with the increase of temperature between 20 °C and 60 °C. In the systems containing GAP and PET, the flow activation energy of the suspensions with PALPV is greater than those containing QALPV. The results present that the suspensions filled with the lamellar aluminum-based composite exhibits more rigidity, meanwhile their apparent viscosity are more sensitive to temperature. Therefore, the dispersion of PALPV in binders could be improved by increasing the temperature. The dispersion and homogeneity of the suspensions formed by QALPV, GAP or PET separately could be improved by accelerating the shear rate.

Key words: binders; metastable aluminum-based composites; rheological behavior; flow activation energy

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021077

(责编: 王艳秀)