

文章编号: 1006-9941(2015)07-0619-05

FT-IR 光谱法研究低毒固化剂 DDI 与 HTPB 的反应动力学

李爽¹, 邓琪明¹, 贾方娜¹, 程晓红², 王爱梅¹, 贾存茹¹, 苏薇¹

(1. 中国航天科技集团公司四院四十二所, 湖北 襄阳 441003; 2. 湖北文理学院低维光电材料与器件湖北省重点实验室, 湖北 襄阳 441053)

摘要: 采用傅里叶变换红外(FT-IR)光谱法研究了二聚脂肪酸二异氰酸酯(DDI)/端羟基聚丁二烯(HTPB)体系的固化反应动力学,并与异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)/HTPB体系进行了比较。初步探索了 DDI 在 HTPB 推进剂中的应用。结果表明,DDI/HTPB 体系的固化反应为二级反应,表观活化能为 $37.02 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,相比 IPDI/HTPB 体系降低了 $3.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,说明 DDI 的反应活性稍高于 IPDI,反应活性适中,可作为低毒固化剂应用于 HTPB 推进剂中。DDI/HTPB 体系推进剂具有较好的常温力学性能,抗拉强度为 0.85 MPa 时,最大伸长率为 44.1%,可基本满足推进剂的常温力学性能要求。

关键词: 二聚脂肪酸二异氰酸酯(DDI); FT-IR 光谱; 反应动力学; 端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂

中图分类号: TJ55; O64; V512

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.002

1 引言

固化剂甲苯二异氰酸酯(TDI)为我国目前及国外早期端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂普遍采用的固化剂^[1-2],由于其毒性大、蒸汽压高、适用期短及对水敏感等问题,美国等西方国家已于 20 世纪 60 年代在推进剂配方研制中放弃了使用,而选择中等毒性的异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)和低毒的二聚脂肪酸二异氰酸酯(DDI)作为固化剂^[2]。

随着我国对职业健康的日益关注,推进剂的低毒化进程势在必行。而 DDI 的低毒性,对水不敏感等特性吸引着越来越多人的关注。DDI 固化剂在国外研究较多,其分子结构为 36 个碳(叠氮化钠法)或 38 个碳(光气法)的脂肪族二异氰酸酯。据报道^[3] DDI 的毒性相比 IPDI 更小(DDI 的蒸汽压为 IPDI 的 $1/4 \sim 1/5$,为 TDI 的 $1/40 \sim 1/50$),且其分子侧链在推进剂网络中可起内增塑作用,降低了高分子链间的极性作用,进而减弱低温下的内聚作用,可赋予推进剂良好的低温力学性能^[4],另外 DDI 还具有较好的抗老化性能^[5],应用于丁羟推进剂中可显著降低推进剂的压强指数^[5-7],是一种很有前景的低毒固化剂。我国由于原材料供应问题,对 DDI 的研究一直处于空白状态。

近年来,随着国内一些单位如黎明化工研究设计院有限责任公司等对 DDI 合成技术的突破,加快了 DDI 在我国丁羟推进剂体系中的推广运用,但目前仍处于起步阶段。另外文献中关于 TDI、IPDI 与 HTPB 的反应动力学有较多报道^[8-14],而对 DDI 与 HTPB 的反应动力学鲜有报道,但动力学对推进剂的固化条件的选择等非常重要。基于此,为加快低毒固化剂 DDI 在 HTPB 推进剂中的应用,推进我国推进剂的低毒化进程,本工作采用傅里叶变换红外光谱法(FT-IR)研究了 DDI/HTPB 体系固化反应动力学并与 IPDI/HTPB 体系进行了比较,初步探索了 DDI/HTPB 体系推进剂不同固化参数下的常温力学性能,为 DDI 固化剂在我国的推广应用奠定了基础。

2 实验

2.1 原材料和仪器

端羟基聚丁二烯(HTPB),羟值 $0.500 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$,数均相对分子质量 $M_n = 4050$,其它指标符合 GJB1327A-2003,黎明化工研究设计院有限责任公司;二聚脂肪酸二异氰酸酯(DDI),NCO 质量分数为 14%~15%,工业纯,黎明化工研究设计院有限责任公司;异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI),NCO 质量分数为 37.5%~37.8%,工业纯,德国 Bayer 公司;甲苯二异氰酸酯(TDI-80),NCO 质量分数为 48%~48.2%,工业纯,德国 Bayer 公司;高氯酸铵(AP),黎明化工

收稿日期: 2014-05-14; 修回日期: 2014-07-09

作者简介: 李爽(1985-),男,博士研究生,工程师,从事高分子材料和固体推进剂的性能研究。e-mail: lishuang851111@163.com

研究设计院有限责任公司, 指标符合 GJB617A-2003。

美国 Thermo electron corporation 公司 Nicolet 8700 FT-IR 型红外光谱仪, 溴化钾压片, 测试范围 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$, 扫描 32 次, 图谱分辨率为 4 cm^{-1} ; 5 L 立式混合机, 中国航天科技集团四院四十二所; Instron 5582 型电子万能材料试验机, 美国英斯特朗公司。

2.2 反应动力学测试原理

DDI、IPDI 中的异氰酸酯基团 ($-\text{NCO}$) 与 HTPB 中的羟基 ($-\text{OH}$) 进行反应, 反应过程中 $-\text{NCO}$ 基团的浓度逐渐降低, DDI 和 IPDI 中 $-\text{NCO}$ 基团的伸缩振动峰分别在 2268 cm^{-1} 和 2258 cm^{-1} 处, 随着固化反应的进行, 两处 FT-IR 的特征吸收峰强度逐渐减弱, 因此可通过 $-\text{NCO}$ 吸收峰强度的变化来定量描述 $-\text{NCO}$ 和 $-\text{OH}$ 的反应程度。

测试过程中同时测定 1447 cm^{-1} 处 $-\text{CH}_2-$ 吸收峰强度作为测试的内标峰, 因为 $-\text{CH}_2-$ 的浓度在整个固化过程中不受影响, 这样便可以消除样品制备过程中样品厚度的影响, 达到定量描述 $-\text{NCO}$ 吸收峰相对强度的目的。

2.3 FT-IR 测试样品制备

称取 20.00 g HTPB 置于两个干燥的称量瓶中, 按照 $R = n(-\text{NCO}) : n(-\text{OH}) = 1.00$ 计算 DDI 和 IPDI 的用量, 准确称量两种固化剂后分别加入上述称量瓶中, 迅速搅拌均匀, 得到 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 样品。取适量样品涂于 KBr 盐片上, 将盐片压紧除去盐片间的气泡, 待盐片间形成均匀薄膜后, 将其置于室温样品池中, 记录初始 $-\text{NCO}$ 的吸光度。剩余样品分别置于 $40, 60, 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 油浴烘箱中, 测试同一样品在不同温度、不同反应时间的 FT-IR 图, 跟踪测定特征谱带的吸光度变化。

2.4 推进剂测试样品制备

试验用基础配方为丁羟三元推进剂配方, 燃速约 $23 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (15.0 MPa), 配方固体含量为 87%, HTPB/TDI 固化体系占 8.0%, AP 含量 68%。DDI/HTPB 体系仅将其固化剂由 TDI 换为 DDI, 其余组分及其含量不变。配方常温力学性能指标要求抗拉强度 $\sigma_m \geq 0.7 \text{ MPa}$, 最大伸长率 $\varepsilon_m \geq 40\%$ 。

按照配方设计要求准确称量各组分, 采用 5 L 立式混合机捏合, 推进剂药浆在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 下真空浇注, 在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 下固化 7 d, 后脱模整形, 得到推进剂方坯, 其中 LS-01~LS-05 以 DDI 为固化剂, LS-06 以 TDI 为固化剂 ($50 \text{ }^\circ\text{C}$ 固化 7 d)。在 Instron 材料试验机上, 按照

GJB770B-2005 火药试验方法, 在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的拉伸速度下测试哑铃形推进剂药条的常温单向拉伸力学性能 (抗拉强度 σ_m , 最大伸长率 ε_m 和断裂伸长率 ε_b)。

3 结果与讨论

3.1 样品 FT-IR 图谱分析

样品 DDI/HTPB、IPDI/HTPB 的 FT-IR 谱图如图 1 所示, 图 1 中标示了 $-\text{NCO}$ 特征吸收峰和 $-\text{CH}_2-$ 特征吸收峰的位置。DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 的 $-\text{NCO}$ 的特征吸收峰分别位于 2268 cm^{-1} 和 2258 cm^{-1} 处, 1447 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2-$ 的特征吸收峰。用 $-\text{NCO}$ 和 $-\text{CH}_2-$ 特征吸收峰的峰面积表示吸光度, 以 $-\text{NCO}$ 与 $-\text{CH}_2-$ 吸光度之比表示反应体系吸光度的相对强度, 相对强度随时间的变化规律即为 $-\text{NCO}$ 的转化率 α 随时间的变化规律, 最后经数据处理得到反应体系的反应速率常数和活化能。

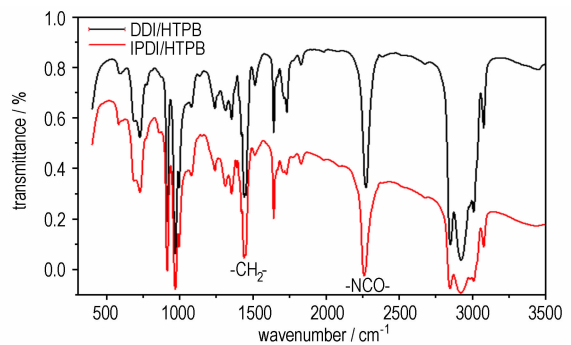
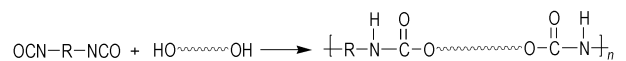


图 1 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 的 FT-IR 光谱图

Fig. 1 FT-IR spectra of DDI/HTPB and IPDI/HTPB

3.2 HTPB 与 DDI/IPDI 的固化反应过程

固化反应过程中, DDI、IPDI 中的 $-\text{NCO}$ 基团与 HTPB 的 $-\text{OH}$ 基团进行反应生成氨基甲酸酯, 得到聚合物网络, 反应方程式见 Scheme 1。

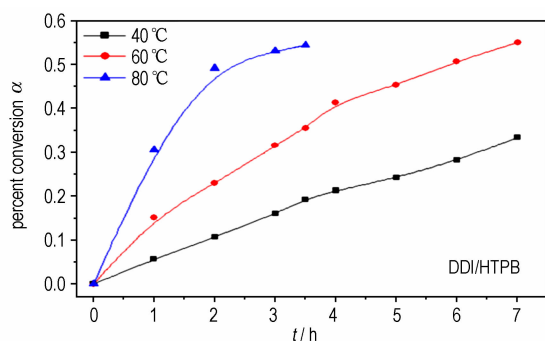


Scheme 1

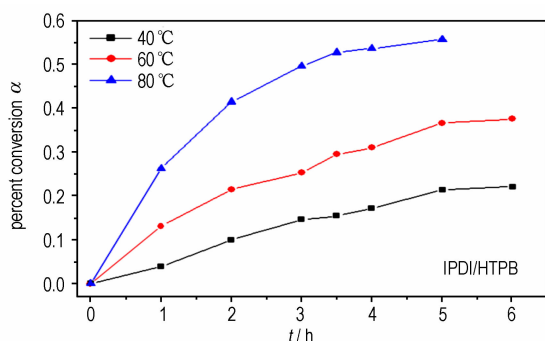
反应过程中 $-\text{NCO}$ 基团的含量逐渐减少, 反应程度可通过 $-\text{NCO}$ 基团特征吸收峰相对强度的变化进行表征。样品 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 在 $40, 60, 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 $-\text{NCO}$ 的转化率 (α) 随时间的变化曲线如图 2 所示。

从图 2 可以看到, 随着时间的推移, 转化率 α 不断增加。反应初始阶段, $-\text{NCO}$ 和 $-\text{OH}$ 浓度较高,

转化率增加较快,之后逐渐减慢。随着温度的升高,分子间碰撞机率增大,反应达到某一固定转化率 α 的时间缩短。另外,DDI/HTPB 体系反应相同时间下测得的转化率要稍高于 IPDI/HTPB,说明 DDI/HTPB 体系的反应速率稍快于 IPDI/HTPB 体系。Coutinho^[8]等在氯苯和甲苯溶剂中研究了 TDI、DDI、IPDI 与 HTPB 反应动力学,对比发现二异氰酸酯的反应活性顺序为 TDI>DDI>IPDI,与本研究结论一致。



a. DDI/HTPB



b. IPDI/HTPB

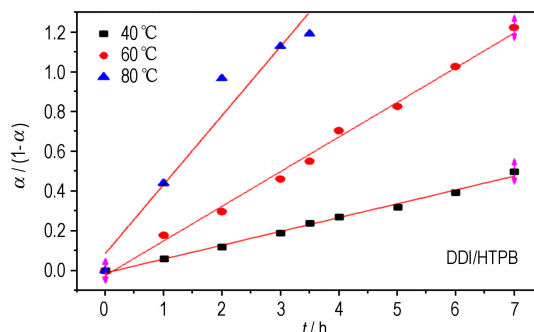
图2 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 在不同温度下 α 与 t 的关系曲线

Fig.2 The α vs t relation curves for DDI/HTPB and IPDI/HTPB at different temperature

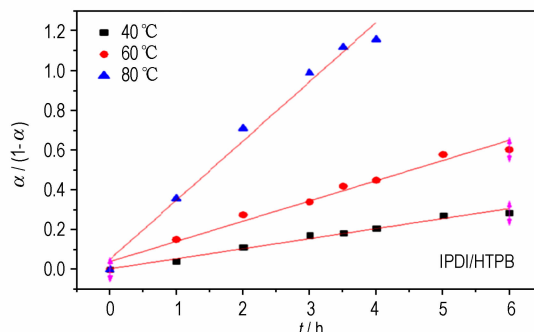
3.3 DDI/HTPB 固化反应动力学

以二级反应动力学模型处理 IPDI/HTPB 体系的数据,以 $\alpha/(1-\alpha)$ 对 t 作图(图3)。由图3可以看出, $\alpha/(1-\alpha)$ 与时间 t 呈线性关系,证实 HTPB 与 IPDI 的反应为二级反应,与文献[9-12]报道相符。用二级反应动力学模型处理 DDI/HTPB 体系的数据同样发现 $\alpha/(1-\alpha)$ 与时间 t 呈线性关系(图3),说明 DDI 与 HTPB 的反应亦为二级反应。

进一步回归分析,得到两个样品不同温度下 $\alpha/(1-\alpha)$ 与 t 的回归方程、相关系数 r 以及直线斜率即反应速率 k 值,具体数据见表1。



a. DDI/HTPB



b. IPDI/HTPB

图3 IPDI/HTPB 和 DDI/HTPB 体系在不同温度下 $\alpha/(1-\alpha)$ 与 t 的关系曲线

Fig.3 The $\alpha/(1-\alpha)$ vs t relation curves for IPDI/HTPB and DDI/HTPB at different temperature

表1 回归方程、相关系数和反应速率

Table 1 Regression equation, correlation coefficient and reaction rate

sample	T / $^{\circ}\text{C}$	regression equation	correlation coefficient	reaction rate / $\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{h}^{-1}$
DDI/HTPB	40	$Y=0.0695X-0.0111$	0.9924	0.0696
	60	$Y=0.1742X-0.0245$	0.9938	0.1742
	80	$Y=0.3473X+0.0855$	0.9304	0.3473
IPDI/HTPB	40	$Y=0.0505X+0.0044$	0.9796	0.0505
	60	$Y=0.1016X+0.0404$	0.9748	0.1016
	80	$Y=0.2978X+0.0513$	0.9808	0.2978

从表1可以看到,DDI/HTPB 体系在各温度下的反应速率都高于相同温度下 IPDI/HTPB 体系的反应速率。由此可以推断 DDI 的反应活性适中,能够作为低毒固化剂应用于 HTPB 推进剂中。

根据阿伦尼乌斯方程^[10]: $\ln k = \ln A - E_a/RT$,以 $\ln k$ 对 $1/T$ 作图(为方便观看将温度的坐标扩大 1000 倍),如图4所示。

通过图4得到回归方程,从而求得反应的活化能 E_a 和指前因子 A ,将 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 体系的反应动力学参数列于表2中。

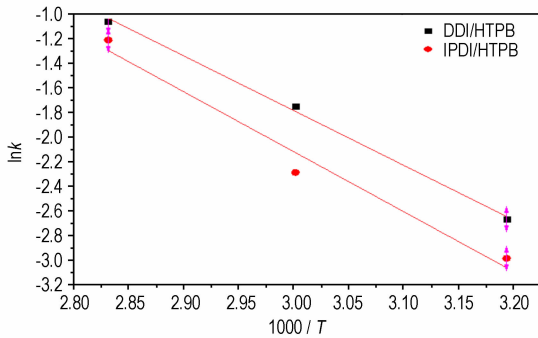


图4 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 体系的 $\ln k$ 与 $1/T$ 的关系曲线

Fig. 4 The $\ln k$ vs $1/T$ relation curves for DDI/HTPB and IPDI/HTPB

表2 样品 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 的固化反应动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of curing reaction for DDI/HTPB and IPDI/HTPB

sample	regression equation	E_a / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	A / h^{-1}
DDI/HTPB	$Y = -4452.97X + 11.58$	37.02	1.069×10^5
IPDI/HTPB	$Y = -4879.18X + 12.52$	40.57	2.738×10^5

Note: E_a is activation energy; A is pre-exponential factor.

计算得到的 DDI/HTPB 和 IPDI/HTPB 体系的表观活化能分别为 $37.02 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $40.57 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。IPDI/HTPB 表观活化能测试的相关文献报道较多, Yee 和 Adicoff^[11] 使用终止反应法测得的 IPDI/HTPB 的表观活化能为 $40.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, Dilek^[12] 等通过 FT-IR 法与 Adicoff^[13] 通过扭辫法测得的 IPDI/HTPB 的表观活化能分别为 $43.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $43.9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 都与本研究的测试结果相近, 说明本研究动力学测试数据可信。

固化反应的表观活化能 E_a 是衡量固化体系反应活性大小的重要参数^[15], 表观活化能越小表明反应越易进行。DDI/HTPB 体系的表观活化能相比 IPDI/HTPB 的降低了 $3.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 再次证明 DDI 的反应活性稍高于 IPDI, 可以作为低毒固化剂应用于 HTPB 推进剂中。

3.4 DDI/HTPB 在推进剂中的应用探索

为了加快我国推进剂的低毒化进程, 用 DDI/HTPB 体系进行 5 L 装药。上述研究结果表明 DDI 的反应活性稍高于 IPDI, 故 DDI/HTPB 的固化条件可参照 IPDI/HTPB 体系, 选择 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 固化 7 d。通过调节固化剂的量调节固化参数, 探索了 DDI/HTPB 体系的推进剂常温力学性能, 结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出, DDI/HTPB 体系 (LS-01~LS-05)

推进剂的常温抗拉强度可以通过固化参数调节, 且推进剂常温最大伸长率可以保持在 40% 以上, 基本满足设计要求; 与 TDI/HTPB 体系相比, 当推进剂真实固化参数相同时, DDI/HTPB 体系的常温拉伸强度显著偏低, 这是因为 DDI 的结构中以柔性的脂肪链为主, 且含有侧链软段, 导致其强度下降。

表3 DDI/HTPB 体系的性能

Table 3 Properties of DDI/HTPB system

sample	curing parameters	mechanical properties		
		σ_m / MPa	ε_m / %	ε_b / %
LS-01	0.79	0.36	43.5	60.0
LS-02	0.82	0.43	47.5	54.5
LS-03	0.86	0.76	40.6	49.3
LS-04	0.90	0.83	44.1	50.6
LS-05	0.93	0.85	44.1	52.2
LS-06	0.79	1.24	46.4	50.0

Note: σ_m is tensile strength, ε_m is the strain at maximum, ε_b is the strain at break.

4 结 论

(1) 通过 FT-IR 法研究了 DDI/HTPB 体系固化反应动力学, 实验测得 DDI/HTPB 体系固化反应为二级反应, 表观活化能为 $37.02 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 相比 IPDI/HTPB 体系降低了 $3.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 说明 DDI 的反应活性稍高于 IPDI, 反应活性适中, 可作为低毒固化剂应用于 HTPB 推进剂中。

(2) 初步探索了 DDI 在 HTPB 三元推进剂中的应用, 测试表明 DDI/HTPB 体系推进剂常温力学性能较好, 在抗拉强度为 0.85 MPa 时, 最大伸长率仍有 44.1%, 且可通过调节固化参数较好地调节推进剂的力学性能。

(3) DDI/HTPB 固化体系与 TDI/HTPB 固化体系相比还存在抗拉强度偏低, 伸长率不够高的问题, 还需通过例如添加补强剂、扩链剂等方法进一步提高推进剂的力学性能。另外 DDI/HTPB 体系的燃速、能量等性能还没有开展研究, 今后还需加大投入以切实将低毒固化剂 DDI 运用于 HTPB 推进剂中。

致谢: 感谢黎明化工研究设计院有限公司的常伟林、尚丙坤在原材料方面给予的帮助!

参考文献:

[1] A·达维纳. 固体火箭推进剂技术[M]. 张德雄, 姚润森, 徐涛清,

- 等译. 北京: 宇航出版社. 1997: 478-480.
- [2] 张景春. 固体推进剂化学及工艺学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社. 1987: 28-35.
- [3] 徐馨才. 二聚脂肪酸二异氰酸酯及其运用[J]. 推进剂技术, 1988, 9(4): 55-61.
XU Xin-cai. Dimeryl diisocyanate and its applications[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1988, 9(4): 55-61.
- [4] Marjorie T, Cucksee Huntsville, Henry C. Allen Decatur. For hydroxy-terminated polybutadiene propellant, aluminum fuel, ammonium perchlorate oxidizer; US, 4090893[P], 1978.
- [5] Fong C W, Hamshere B L. The mechanism of burning rate catalysis in composite HTPB-AP propellant combustion[J]. *Combustion and Flame*, 1986, 65(1): 61-69.
- [6] Rodic V B, Mirjana P M. The effect of curing agents on solid composite rocket propellant characteristics[J]. *Scientific-Technical Review*, 2005, LV(1): 46-49.
- [7] 王伯羲, 冯增国, 杨荣杰. 火药燃烧理论[M]. 北京: 北京理工大学出版. 1997: 335-338.
- [8] Coutinho F M B, Rocha M C G. Kinetic study of the reactions between hydroxylated polybutadiene and isocyanates in chlorobenzene-IV[J]. *European Polymer Journal*, 1991, 27(2): 213-216.
- [9] 王新德, 张捷, 刘艳艳, 等. IPDI 与 HTPB 反应动力学傅里叶红外研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(6): 64-68.
WANG Xin-de, ZHANG Jie, LIU Yan-yan, et al. Researches on IPDI and HTPB reaction kinetics by fourier transform infrared spectrum[J]. *Chemical Propellant and High Polymer Material*, 2011, 9(6): 64-68.
- [10] 吴艳光, 罗运军, 葛震, 等. FT-IR 法研究 IPDI 与 GAP 预聚及预聚物和 NC 的固化反应[J]. 火炸药学报, 2013(1): 43-46.
WU Yan-guang, LUO Yun-jun, GE Zhen, et al. FT-IR study on the Curing reaction of isophorone diisocyanate with the glycidyl azide polymer and its prepolymer with nitrocellulose[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013 (1): 43-46.
- [11] Yee R Y, Adicoff A. Polymerization kinetics in propellants of the hydroxyl-terminated polybutadiene-isophorone diisocyanate system[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1976, 20(4): 1117-1124.
- [12] Dilek K, Saimö. Kinetic study of the reaction between hydroxyl-terminated polybutadiene and isophorone diisocyanate in bulk by quantitative FTIR spectroscopy[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1997, 66(10): 1979-1983.
- [13] Adicoff A, Yukelson A. Torsional braid as a kinetic tool for the study of the polymerization of viscous materials. II. Catalytic effects in the polymerization of carboxylic acid-terminated polybutadiene prepolymers with tris[1-(2-methyl) aziridinyl] phosphine oxide[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1968, 12(8): 1959-1966.
- [14] 刘晶如, 罗运军. 非等温 DSC 研究 Al/HTPB/TDI 体系的固化反应动力学[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 83-86.
LIU Jing-ru, LUO Yun-jun. Curing kinetics of HTPB/TDI/Al system by nonisothermal DSC[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailliao)*, 2009, 17(1): 83-86.
- [15] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 6-8.

Reaction Kinetics of Low-toxic Curing Agent DDI and HTPB by FT-IR Spectra

LI Shuang¹, DENG Qi-ming¹, JIA Fang-na¹, CHENG Xiao-hong², WANG Ai-mei¹, JIA Cun-ru¹, SU Wei¹

(1. The 42nd Institute of the Fourth Academy of CASC, Xiangyang 441003, China; 2. Hubei Key Laboratory of Low Dimensional Optoelectronic Materials and Devices, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

Abstract: The curing reaction kinetics of dimeryl diisocyanate (DDI) / hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) system was studied using Fourier transform infrared (FT-IR) spectra and compared with that of isophorone diisocyanate (IPDI) /HTPB system. The application of DDI in HTPB propellant was preliminary explored. Results show that the curing reaction of DDI/HTPB system appears as the second-order reaction and the apparent activation energy is $37.02 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, which decreases by $3.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ compared with that of IPDI/HTPB system, revealing that the reactivity of DDI is slightly higher than that of IPDI. And DDI has a moderate reactivity, which can be used as low-toxic curing agent in HTPB propellant. The DDI/HTPB system possesses better mechanical properties at room temperature with the tensile strength of 0.85 MPa, and the strain at maximum load of 44.1%. The room temperature mechanical property of DDI/HTPB system can meet the requirements of mechanical properties at room temperature basically for propellant.

Key words: dimeryl diisocyanate (DDI); FT-IR spectra; kinetics; hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) propellant

CLC number: TJ55; O64; V512

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.002