硝化棉的热分解机理

汪 澜 刘 蓉 宁斌科 潘 清 胡荣祖
(西安近代化学研究所,西安 710065)

摘要 建立了实时测定硝化棉(NC)热分解气相产物和凝聚相产物的快速热裂解原位反应池(气体原位反应池)/快速扫描傅立叶变换红外光谱(RSFT-IR)和固体原位反应池/RSFT-IR联用装置。提出了测定上述产物的两种方法。用上述方法研究了在线性升温条件下NC的热分解反应。根据所得结果,提出了该反应的机理。

关键词 快速热裂解原位反应池/RSFT-IR 硝化棉 固体原位反应池/RSFT-IR 热分解 机理

中图法分类号 TQ560.1 O657.3

1 引 言

硝化棉(NC)是单、双、三基火药和混合炸药的组分之一。高氮量NC(14.14%N)与火、炸药中常用的NC(13.20%N)相比,燃气平均分子量提高5.1%,火药力提高6.4%,定容爆热和爆温提高12.0%,受到国内外火炸药工作者的极大关注。为了推动高氮量(氮量高于13.60%)NC在新型火、炸药中的应用,我们开展了NC的热分解机理和模拟燃烧条件下的快速热裂解行为的研究。这对于NC耐热性的评定和燃烧初始阶段数学模型的建立是有益的。

2 文献综述

关于NC的热分解机理,Lurie等人[1-6]研究了NC热分解过程中的脱硝机理,认为NC热分解的初始阶段是仲O-NO_2基脱硝逸出NO_2的过程。Pfeil等人[7]在0.5K·min^{-1}的慢速升温条件下考察了NC的硝基吸收强度和平均分子量随温度的变化,证实加热过程中,NC先由大分子变为小分子,尔后才发生O-NO_2键的断裂。Jutier[8]则认为NC的热分解是一个脱硝过程,并不一定导致链节的断裂。Brill等人[9]通过快速热裂解原位反应池(气体原位反应池)与快速扫描傅立叶变换红外光谱(RSFT-IR)联用技术,测定了NC在快速升温条件下(140K·s^{-1})分解的气相产物,得到了NO、NO_2、CO、CO_2、CH_2O、HCOOH的相对百分浓度与时间的关系图,认为CH_2O来自-CH_2ONO_2基的分解,HCOOH是凝聚相产物的分解产物。

收稿日期:1997-09-25 修回日期:1997-11-30
火炸药燃烧中心科技基金资助课题

3 实验部分

3.1 试 样

NC(14.14%N)和 NC(13.78%N)由我所应用化学研究部制备和纯化。NC(13.54%N)、NC(12.97%)和 NC(11.92%N)由惠安化工厂提供。

3.2 仪器及实验条件

在非等温条件下,NC 的热分解实验在固体原位反应池/RSFT-IR 联用装置和美国 CDS 公司产气体原位反应池/RSFT-IR 联用装置上进行。固体原位反应池/RSFT-IR 联用装置的操作条件为:试样量,约 0.7mg;试样/KBr,1/100;丙酮溶解、干燥压片;升温速率,20 $K\cdot min^{-1}$;实验在固体原位反应池敞口条件下进行;红外分辨率,$4cm^{-1}$;光谱采集速率,$18files\cdot min^{-1}$,$8scans\cdot file^{-1}$;检测器选用 DTGS 型。气体原位反应池/RSFT-IR 联用装置的操作条件为:试样量,1~2mg,平铺在快速加热的铂丝中央;气氛,高纯氮气;加热速率,50、100 和 $140K\cdot s^{-1}$;裂解气体产物在试样上方几毫米处被快速扫描的 FT-IR 光谱仪检测;红外分辨率,4 或 $8cm^{-1}$;光谱采集速率,$5files\cdot s^{-1}$,$2scans\cdot file^{-1}$;检测器选用 MCT-A 型。

4 结果与讨论

等速升温条件下 NC(14.14%N)热分解凝聚相的 IR 谱示于图 1。图中同时给出室温下的 IR 谱,以便比较。室温下 IR 谱中各特征吸收峰的指配列在表 1 中。IR 特征吸收峰相对强度与时间、温度的关系数据见表 2~5。由此可见,在 NC 的热分解过程中,首先发生的是 O-NO_2 键的断裂。随着温度的升高,-NO_2 基的特征吸收峰强度逐渐减小,至 463K,-NO_2 基特征吸收峰消失,在 $1749cm^{-1}$处新出现的 C═O 基的特征吸收峰强度逐渐增强,至 448K 时达最大值。与此同时,$1067cm^{-1}$处的环间 C-O-C 基的特征吸收峰强度逐渐降低;而 NC 环和环内 C-O-C 基的振动吸收峰强度的降低则明显滞后,这说明 NC 分解过程中先由大分子变为小分子,尔后才发生环内碳骨架及氧桥的断裂。随着温度的升高,$1381cm^{-1}$附近的弱峰吸收强度逐渐增强,说明 NC 分解过程中有硝酸根离子产生。该离子可能来自反应 $2NO_2 + KBr = KNO_3 + NOBr$。产物 NOBr 仅在室温下存在[10],在 393~463K 的温度范围内则分解成 Br_2 和 NO。

NC(13.78%N)快速热裂解气相产物的 IR 谱示于图 2,各气相产物的 IR 特征吸收峰频率及绝对强度列于表 6 中。IR 特征吸收峰积分值和相应吸收峰的绝对强度[11]的比值随时间的变化数据列于表 7~9 中。在升温速率 $50K\cdot s^{-1}$条件下,第一张有气相产物出现的 IR 谱中只有 NO_2 气体的特征吸收峰(数据见表 7),这表明 NC 分解初始阶段脱硝逸出 NO_2 气体。这与固体原位反应池/RSFT-IR 联用分析证实 NC 受热过程中-NO_2 基强度首先发生降低的事实相符。逸出的 NO_2 作用于分解凝聚相残余物,使 NO_2 转化为 NO,同时生成大量碳的氧化物,以 CO 和 CO_2 形式逸出。HCOOH 的出现滞后于其余气体产物,表明 HCOOH 是凝聚相分解产物的二次反应产物。CH_2O 是伯 O-NO_2 基的分解产物。在氮量高的 NC 中,伯 O-NO_2 基含量相对低于常用 NC,生成的 CH_2O 相对较少,完全被掩盖在 HCOOH 吸收峰中。

由以上实验事实可知，NC 热分解过程中首先发生仲 O－NO_2 基的脱硝，形成 C═O 基，放出 NO_2 气体。伴随脱硝的是 NC 由大分子经环间 C－O－C 的断裂形成小分子，最初逸出的 NO_2 作用于凝聚相，引发自催化反应，加速剩余 O－NO_2 键的断裂和环内氧桥的断裂，进一步放出 NO_2、NO、CO、CO_2、CH_2O 等气体。大多数 O－NO_2 基分解后，剩余凝聚相继续分解，放出 HCOOH 气体。根据固体原位反应池和气体原位反应池与 RSFT-IR 联用技术的分析结果，我们推测 NC 受热分解的机理为：

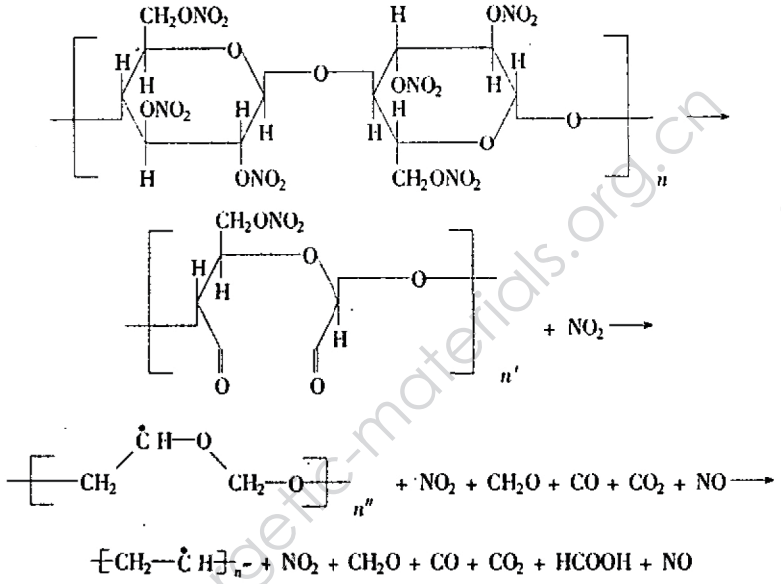

表 1　室温下 NC(14.14%N)的 IR 特征吸收峰的指配

Table 1　Assignments of the IR characteristic absorption peaks of NC (14.14%N) at ambient temp.

频率/cm^{-1}	相对强度	指　　配
2966	中等	－CH_2 不对称伸缩振动
2927	中等	－CH 伸缩振动
1661	极强	－NO_2 不对称伸缩振动
1381	中等	－CH 弯曲振动
1279	极强	－NO_2 对称伸缩振动
1159	中等	不对称氧桥伸缩振动
1116	中等	不对称环伸缩振动
1067	极强	环间 C－O 伸缩振动
1022	弱	C－O 伸缩振动
1002	中等	C－O 伸缩振动
836	极强	O－NO_2 伸缩振动
746	中等	O－NO_2 扭曲振动
688	中等	O－NO_2 扭曲振动

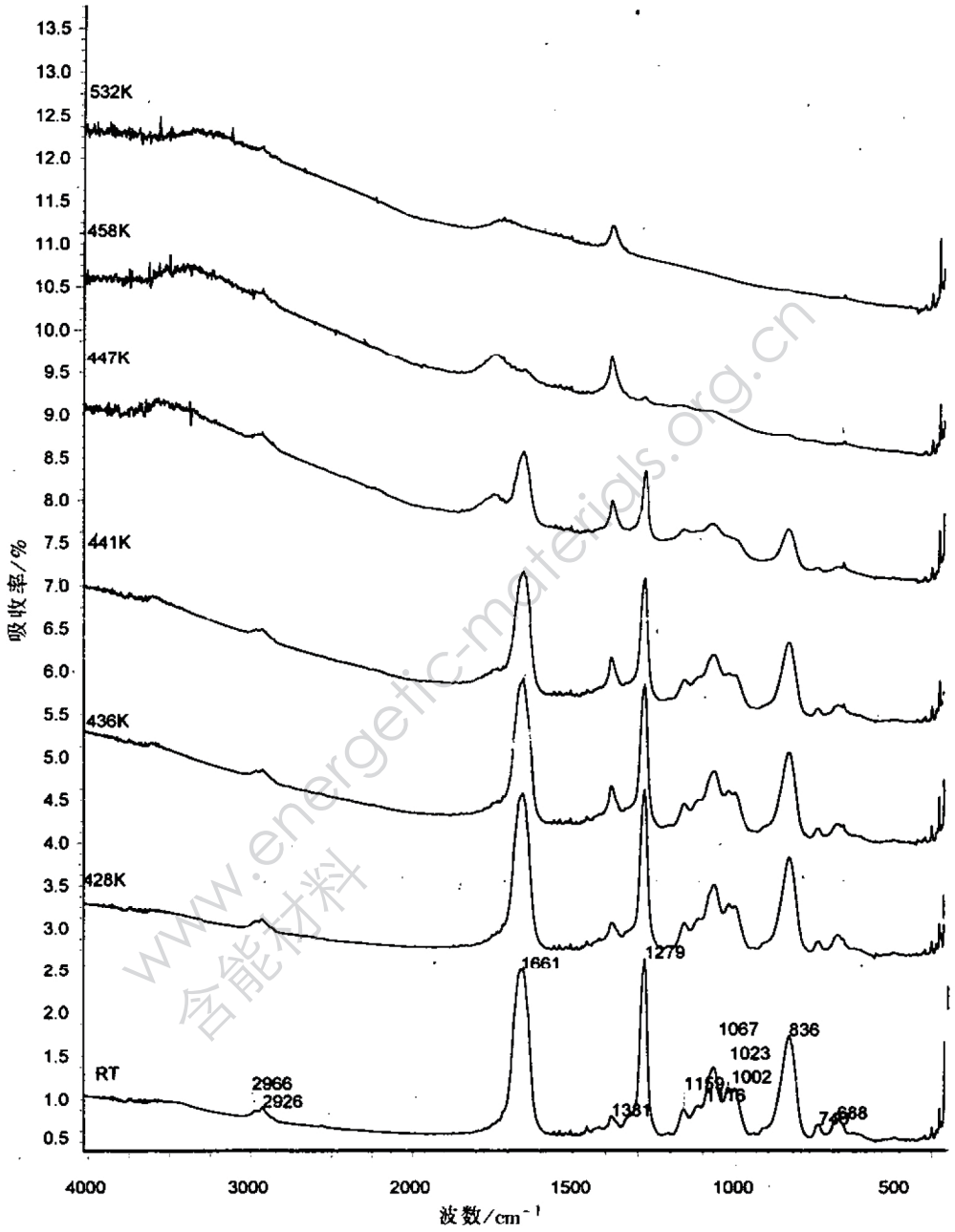

图1 NC(14.14%N)热分解凝聚相产物的典型IR谱(敞口,加热速率: 20K·min⁻¹)

Fig.1 Typical IR spectra of the condensed products of NC (14.14%N) thermal decomposition (open, heating rate: 20K·min⁻¹)

表 2　NC(14.14%N)IR 特征吸收峰强度随时间和温度的变化(敞口，加热速率：20K·min^{-1})

Table 2　Intensity of IR characteristic absorption peaks of NC (14.14%N) vs time and temperature (open, heating rate: 20K·min^{-1})

t/min	C－H (3040-2813)	C═O (1815-1693)	－NO_2 (1309-1253)	C－O－C (1193-957)	－NO_2 (905-777)
0.28	11.83	0.00	44.15	82.89	59.04
0.84	11.82	0.69	44.44	82.69	59.69
1.40	11.80	1.26	44.61	82.49	58.98
1.95	11.79	2.05	44.43	82.41	58.73
2.51	11.77	2.60	44.44	82.17	58.82
3.07	11.74	3.38	44.50	82.09	58.70
3.63	11.84	4.06	44.08	81.88	58.53
4.19	11.76	4.71	43.76	81.83	58.28
4.74	11.75	5.35	43.70	81.60	57.96
5.30	11.71	6.12	43.29	81.47	57.78
5.86	11.63	6.90	42.85	81.18	57.20
6.42	11.53	7.96	41.98	80.95	56.39
6.70	11.42	8.62	41.74	80.66	55.82
6.98	11.26	9.67	41.25	80.28	55.06
7.25	10.93	11.40	41.01	79.32	53.55
7.53	10.38	14.08	37.54	77.07	50.22
7.81	9.96	18.01	33.62	71.41	45.17
8.09	9.61	25.09	25.85	55.83	35.01
8.37	8.97	38.13	12.90	30.15	16.23
8.65	9.06	42.19	4.08	14.77	4.50
8.93	6.47	41.61	1.13	9.72	1.11
9.21	6.52	40.85	0.22	7.11	0.17
9.49	6.66	40.32	0.07	5.54	0.00
9.76	6.71	39.59	0.06	4.53	
10.04	6.10	38.64	0.05	3.77	
10.32	6.62	37.76	0.00	3.14	
10.60	5.11	37.50	0.03	2.53	
10.88	4.93	36.98	0.02	2.13	
11.16	3.15	36.51	0.05	1.77	
11.38	5.87	36.01	0.05	1.65	
11.66	4.47	35.62	0.07	1.08	
11.94	5.76	34.86	0.09	0.90	
12.22	5.63	34.52	0.08	0.53	
12.50	5.09	34.15	0.09	0.28	
12.78	4.53	33.84	0.09	0.12	

t/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T/K	298.7	309.0	324.2	341.5	359.7	378.4	397.1	416.3	435.3	454.5	473.7	493.0	512.2	532.3

表3 NC(13.54%N)IR特征吸收峰强度随时间和温度的变化(敞口,加热速率: 20K·min^{-1})

Table 3 Intensity of IR characteristic absorption peaks of NC (13.54%N) vs time and temperature (open, heating rate : 20K·min^{-1})

t/min	C-H (3040-2813)	C=O (1815-1693)	$-NO_2$ (1309-1253)	C-O-C (1193-957)	$-NO_2$ (905-777)
0.22	6.54	0.00	22.66	41.36	27.66
0.79	6.57	0.07	22.61	41.21	27.61
1.35	6.58	0.45	22.52	41.22	27.65
1.91	6.55	0.79	22.50	41.19	27.71
2.47	6.53	1.10	22.44	41.11	27.65
3.03	6.55	1.49	22.35	41.04	27.62
3.59	6.54	1.86	22.28	40.97	27.65
4.15	6.58	2.22	22.16	40.90	27.60
4.71	6.57	2.61	22.08	40.91	27.51
5.27	6.57	3.03	21.91	40.80	27.33
5.83	6.54	3.56	21.72	40.80	27.09
6.39	6.45	4.16	21.38	40.63	26.78
6.67	6.38	4.56	21.08	40.47	26.45
6.95	6.32	5.07	20.66	40.20	25.92
7.23	6.15	5.97	20.03	39.61	25.15
7.51	5.90	7.25	18.86	38.25	23.66
7.79	5.62	9.32	16.36	34.29	20.50
8.07	4.94	12.82	12.25	26.93	15.36
8.35	4.45	18.05	6.35	16.18	7.46
8.63	3.81	19.83	2.04	9.47	2.15
8.91	3.35	19.65	0.42	6.77	0.39
9.19	2.96	19.17	0.10	5.40	0.03
9.47	3.04	18.74	0.04	4.60	0.00
9.75	2.82	18.30	0.04	3.89	
10.03	2.79	17.91	0.03	3.37	
10.31	2.55	17.55	0.03	2.89	
10.59	2.73	17.18	0.04	2.54	
10.87	2.91	16.85	0.04	2.17	
11.15	2.59	16.49	0.04	1.91	
11.38	2.81	16.21	0.04	1.69	
11.66	2.32	16.10	0.04	1.50	
11.94	2.11	15.91	0.04	1.30	
12.22	2.04	15.71	0.04	1.16	
12.50	2.29	15.52	0.04	1.00	
12.78	2.29	15.36	0.04	0.88	

t/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T/K	299.7	309.5	324.5	341.0	359.2	377.8	396.9	416.1	435.5	454.3	473.6	493.1	512.1	532.3

表 4　NC(12.97%N)IR 特征吸收峰强度随时间和温度的变化(敞口,加热速率：20K·min^{-1})

Table 4　Intensity of the IR characteristic absorption peaks of NC (12.97%N) vs time and temperature (open, heating rate: 20K·min^{-1})

t/min	C－H (3040-2813)	C═O (1815-1693)	－NO_2 (1309-1253)	C－O－C (1193-957)	－NO_2 (905-777)
0.28	8.04	0.00	21.79	41.38	25.32
0.84	8.02	0.24	21.70	41.28	25.31
1.40	7.99	0.49	21.69	41.21	25.34
1.95	7.97	0.83	21.63	41.13	25.39
2.51	7.96	1.11	21.58	41.08	25.39
3.07	7.98	1.41	21.52	40.99	25.38
3.63	7.99	1.70	21.42	40.91	25.39
4.19	7.99	2.02	21.33	40.84	25.38
4.74	7.94	2.36	21.18	40.77	25.30
5.30	7.96	2.73	21.02	40.67	25.17
5.86	7.90	3.23	20.81	40.65	25.00
6.42	7.83	3.79	20.45	40.51	24.66
6.70	7.73	4.18	20.16	40.35	24.34
6.98	7.62	4.72	19.76	40.06	23.84
7.25	7.52	5.45	19.14	39.50	23.07
7.53	7.22	6.57	18.00	38.01	21.75
7.81	6.96	8.40	15.61	33.88	18.92
8.09	6.46	11.92	11.49	26.75	13.92
8.37	5.86	16.24	6.18	17.43	7.09
8.65	5.02	17.75	2.22	11.08	2.29
8.93	4.58	17.58	0.53	8.15	0.47
9.21	4.53	17.16	0.12	6.52	0.02
9.49	4.19	16.58	0.07	5.42	0.00
9.76	4.24	16.13	0.06	4.45	
10.04	4.21	15.70	0.06	3.72	
10.32	4.12	15.25	0.06	3.15	
10.60	3.83	14.81	0.07	2.66	
10.88	3.92	14.48	0.07	2.26	
11.16	3.80	14.12	0.06	1.95	
11.38	3.53	13.92	0.06	1.70	
11.66	3.77	13.64	0.06	1.47	
11.94	3.39	13.36	0.07	1.25	
12.22	3.51	13.16	0.05	1.08	
12.50	3.35	12.98	0.07	0.95	
12.78	3.34	12.78	0.06	0.77	

t/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T/K	299.6	309.4	324.2	341.2	359.3	377.9	396.9	416.1	435.0	454.4	473.5	492.9	512.0	532.1

表 5 NC(11.92%N)IR 特征吸收峰强度随时间和温度的变化(敞口,加热速率: 20K·min^{-1})

Table 5 Intensity of the IR characteristic absorption peaks of NC (11.92%N) vs time and temperature (open, heating rate : 20K·min^{-1})

t/min	C-H (3040-2813)	C=O (1815-1693)	$-NO_2$ (1309-1253)	C-O-C (1193-957)	$-NO_2$ (905-777)
0.28	6.42	0.00	18.50	39.58	20.83
0.84	6.40	0.15	18.45	39.49	20.91
1.40	6.42	0.35	18.39	39.38	20.95
1.95	6.41	0.53	18.35	39.26	21.01
2.51	6.40	0.71	18.28	39.16	21.03
3.07	6.40	0.91	18.20	39.07	21.10
3.63	6.43	1.07	18.14	38.95	21.18
4.19	6.39	1.27	18.06	38.85	21.21
4.74	6.38	1.51	17.97	38.74	21.20
5.30	6.37	1.82	17.83	38.64	21.15
5.86	6.38	2.29	17.60	38.64	20.91
6.42	6.23	2.99	17.17	38.47	20.40
6.70	6.20	3.41	16.84	38.31	19.99
6.98	6.06	3.93	16.38	38.03	19.42
7.25	6.01	4.57	15.64	37.36	18.53
7.53	5.82	5.45	14.40	35.74	17.08
7.81	6.00	7.20	12.34	31.93	14.41
8.09	5.49	10.15	9.13	26.05	10.36
8.37	5.46	12.75	5.28	19.36	5.63
8.65	4.72	13.75	2.11	14.25	2.13
8.93	4.69	13.84	0.45	11.00	0.40
9.21	3.98	13.55	0.06	8.43	0.00
9.49	3.89	12.94	0.03	6.06	
9.76	3.73	12.38	0.04	4.23	
10.04	3.31	11.87	0.05	3.12	
10.32	3.40	11.43	0.04	2.43	
10.60	3.44	11.04	0.05	1.96	
10.88	3.17	10.65	0.04	1.56	
11.16	2.69	10.39	0.04	1.24	
11.38	2.63	10.16	0.04	1.04	
11.66	3.00	9.94	0.06	0.82	
11.94	3.20	9.76	0.06	0.67	
12.22	2.95	9.53	0.04	0.49	
12.50	2.47	9.37	0.06	0.36	
12.78	2.94	9.23	0.05	0.24	

t/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T/K	298.7	308.7	323.6	340.6	358.9	377.9	396.8	415.9	435.0	454.4	473.6	492.9	511.8	532.1

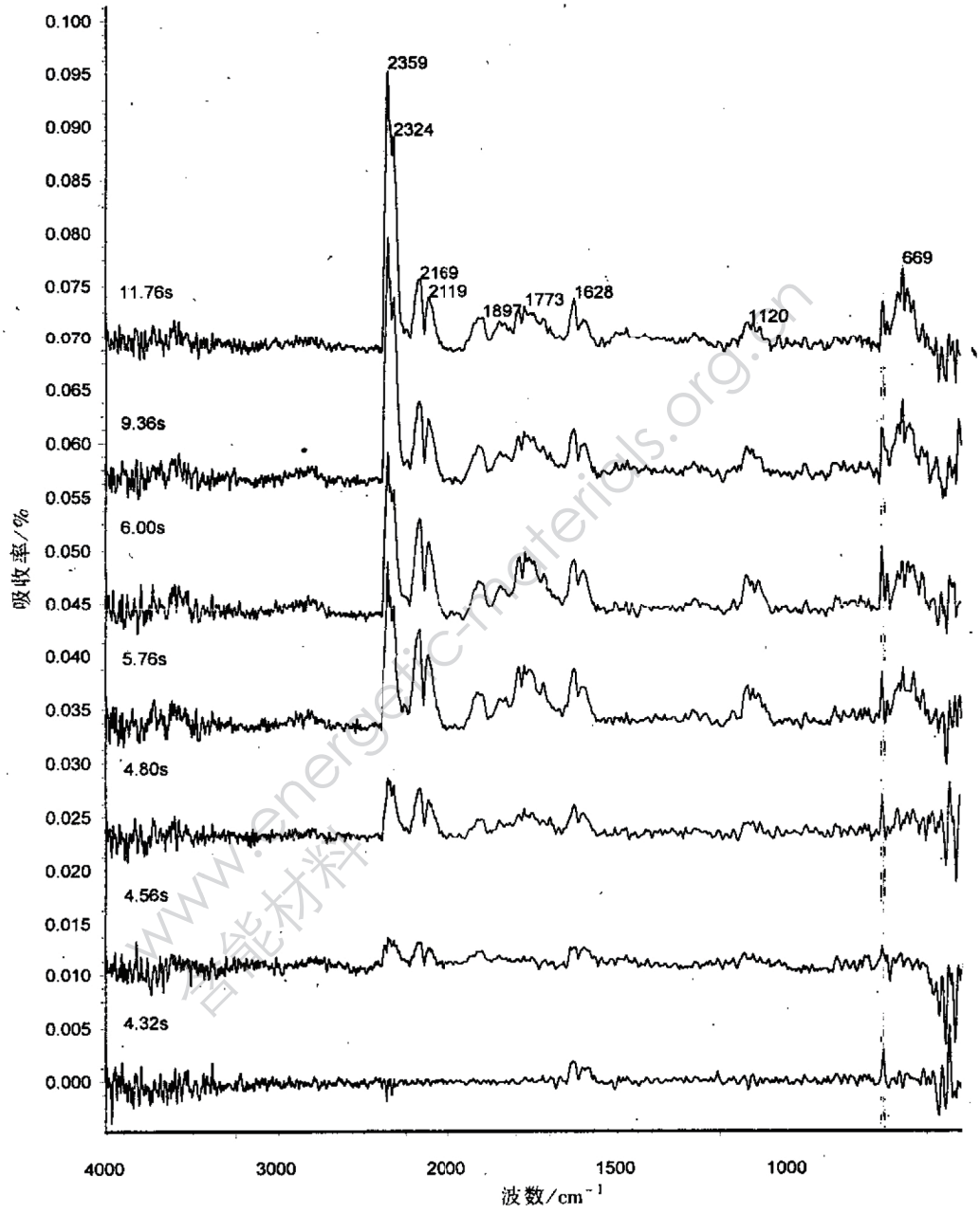

图 2　NC(13.78%N)快速热裂解气相产物的 IR 谱(加热速率：50K·s^{-1})

Fig.2　IR spectra of rapid-thermolysis gaseous products of NC (13.78%N) (heating rate: 50K·s^{-1})

表 6 NC(13.78%N)快速热裂解气相产物的 IR 特征吸收峰频率和绝对强度

Table 6 Frequency and absolute intensity of IR characteristic absorption peaks of rapid-thermolysis gaseous products of NC (13.78%N)

气相产物	频率/cm^{-1}	绝对强度/$cm^{-2}\cdot MPa^{-1}$
CO_2	2349	25800
CO	2143	2680
NO	1876	1330
HCOOH	1790	7590
NO_2	1621	14190

表 7 NC(13.78%N)快速热裂解气相产物的组成随时间的变化(加热速率: 50K·s^{-1})

Table 7 Composition of rapid-thermolysis gaseous products of NC (13.78%N) vs time (heating rate: 50K·s^{-1})

t/s	气相产物组成/×10^{-4}MPa				
	CO_2	CO	NO	HCOOH	NO_2
3.84					0.037
4.08					0.058
4.32					0.092
4.56	0.040	0.382	0.274	0.006	0.102
4.80	0.079	0.660	0.602	0.017	0.180
5.04	0.146	1.526	0.835	0.247	0.190
5.28	0.279	2.545	1.549	0.624	0.201
5.52	0.333	2.784	1.586	0.610	0.200
5.76	0.376	3.168	0.812	0.646	0.194
6.00	0.396	3.291	1.962	0.670	0.192
6.96	0.439	3.112	1.913	0.634	0.195
7.92	0.491	2.847	1.774	0.581	0.178
8.88	0.548	2.769	1.702	0.556	0.178
9.84	0.598	2.772	1.683	0.546	0.175
11.04	0.642	2.481	1.677	0.548	0.170

表 8 NC(13.78%N)快速热裂解气相产物的组成随时间的变化(加热速率: 100K·s^{-1})

Table 8 Composition of the rapid-thermolysis gaseous products of NC (13.78%N) vs time (heating rate: 100K·s^{-1})

t/s	气相产物组成/×10^{-4}MPa				
	CO_2	CO	NO	HCOOH	NO_2
2.16	0.357	2.485	1.203	0.125	0.064
2.40	0.407	2.515	1.398	0.273	0.066
2.64	0.419	3.530	2.105	0.494	0.117
2.88	0.482	3.843	2.293	0.574	0.130
3.12	0.502	3.996	2.308	0.600	0.131
3.36	0.575	4.276	2.323	0.644	0.135
3.60	0.555	4.026	2.406	0.597	0.135
3.84	0.600	3.877	2.323	0.609	0.132
4.08	0.619	3.608	2.000	0.581	0.132
5.04	0.709	2.937	1.887	0.448	0.106
6.00	0.821	2.937	1.892	0.450	0.125

表 9　NC(13.78%N)快速热裂解气相产物的组成随时间的变化(加热速率：140K·s^{-1})

Table 9　Composition of rapid-thermolysis gaseous products of NC (13.78%N) vs time (heating rate: 140K·s^{-1})

t/s	气相产物组成/×10^{-4}MPa				
	CO_2	CO	NO	HCOOH	NO_2
1.68	0.595	4.750	3.120	0.428	0.105
1.92	1.117	8.396	4.752	0.588	0.092
2.16	1.041	8.751	5.218	0.770	0.179
2.40	1.174	9.101	6.489	1.010	0.254
2.64	1.240	9.000	6.615	0.980	0.259
2.88	1.259	8.981	6.594	1.000	0.283
3.12	1.257	8.451	5.932	0.936	0.283
3.36	1.379	8.470	5.947	0.890	0.279
3.60	1.458	8.455	6.038	0.959	0.314
3.84	1.578	8.205	6.481	1.000	0.343
4.80	1.880	7.347	5.820	1.033	0.328
5.76	2.219	6.847	5.956	1.009	0.390
6.00	2.211	6.716	5.895	1.007	0.392

5　结　论

5.1　建立了测定 NC 热分解气、固相产物的气体原位反应池/RSFT-IR 和固体原位反应池/RSFT-IR 联用装置及分析法。

5.2　根据固体原位反应池/RSFT-IR 和气体原位反应池/RSFT-IR 联用装置的测试结果，提出了 NC 热分解机理。

参　考　文　献

1　Fifer R A. In: Kuo K K, Summerfield M, eds. Fundamentals of Solid-Propellant Combustion. Prog. Astronaut. Aeronaut., 1984, 90: 117

2　Kimura J. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1988, 13: 8

3　Lurie B A, Svetlov B S, Chernyshov. Symp. Chem. Probl. Connected Stabil. Explos. 9th, 1992, 119.

4　Wilfong R E, Penner S S, Daniels F. J. Phys. Chem., 1950, 54: 863

5　Collins L W, Haws L D. Thermochim. Acta, 1977, 21: 1

6　Zeman S. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1992, 17: 17

7　Pfeil A, Krause H H, Eisenreich N. Thermochim. Acta, 1985, 85: 395

8　Jutier J J, Harrison Y, Prenont S, Prud'homme R E. J. Appl. Polym. Sci., 1987, 33: 1359

9　Chen J K, Brill T B. Combust. Flame, 1991, 85: 479

10　Bent H A, Crawford B Jr. J. Am. Chem. Soc., 1957, 79: 1793

11　Oyumi Y, Brill T B. Combust. Flame, 1985, 62: 213

A STUDY OF THE THERMAL DECOMPOSITION MECHANISM OF NITROCELLULOSE

Wang Yuan Liu Rong Ning Binke Pan Qing Hu Rongzu

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an* 710065)

ABSTRACT Two simultaneous devices, the rapid thermolysis reaction cell (gas reaction cell) in situ in conjuncton with rapid-scan Fourier transform infrared spectroscopy (RSFT-IR), and the solid reaction cell in situ with RSFT-IR, are constructed for measuring the gas products and condensed phase products of thermal decomposition of nitrocellulose (NC) in real time. Two methods for determining the above mentioned products are presented. Under linear temperature increase condition, the thermal decomposition reaction of NC are experimentally studied, and a mechanism for this reaction is proposed based on the results.

KEYWORDS mechanism, NC, rapid thermolysis reaction cell/RSFT-IR, solid reaction cell/RSFT-IR, thermal decomposition.

作者简介 汪渊(Wang Yuan),西安近代化学研究所副研究员,1943年出生于上海,1967年毕业于北京大学化学系化学专业,长期从事含能材料热化学、热分析和红外分析检测研究工作,曾获省部级科技进步奖两项,在国内外发表学术论文20余篇。