

# 不同热解因素对污泥热解生成气相产物的影响

李刚<sup>1</sup>, 王格格<sup>1</sup>, 陆江银<sup>1\*</sup>, 王建俊<sup>2</sup>

(1. 新疆大学化学化工学院, 石油天然气精细化工教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046;  
2. 新疆乌鲁木齐昆仑环保集团有限公司, 新疆乌鲁木齐 830021)

**摘要:**采用外热式反应釜加热装置, 以  $\text{CH}_3\text{COOK}$  为催化剂对污泥进行了热解实验, 研究了不同热解终温、催化剂的质量分数、反应时间、升温速率对热解气相产物的产率及气相产物组成的影响。结果表明: 随着热解温度升高, 气相产率不断增大,  $\text{H}_2$  的体积分数在增大, 气体的热值先增大后减小,  $500^\circ\text{C}$  时气体热值达到最大值, 为  $26.05 \text{ MJ/m}^3$ ; 随着催化剂质量分数和升温速率的增大, 气产率先增大后减小, 催化剂质量分数为 6% 时达到最大值, 而热值变化呈减小趋势; 随着反应时间增大, 气产率不断增大,  $\text{H}_2$  体积分数在增大, 而热值先增大后减小, 在 90 min 时达到最大值, 为  $30.19 \text{ MJ/m}^3$ 。

**关键词:** 污泥; 热解; 产率; 热值

中图分类号: X784

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)03-0071-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.03.017

## Effect of different pyrolysis factors on gas phase products generated from sludge pyrolysis

LI Gang<sup>1</sup>, WAN Ge-ge<sup>1</sup>, LU Jiang-yin<sup>1\*</sup>, WANG Jian-jun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Oil & Gas Fine Chemicals, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Urumqi Kunlun Environmental Protection Group Co., Ltd., Urumqi 830021, China)

**Abstract:** Pyrolysis experiments for sewage sludge are performed by using  $\text{CH}_3\text{COOK}$  as catalyst in an external heated reactor. The effects of final pyrolysis temperature, catalyst content, reaction time and heating rate on the characteristics of the resulting gas are analyzed. The results show that with the increase of final pyrolysis temperature, the yield of gas and the  $\text{H}_2$  concentration both increase. The heat value of generated gas is firstly increased and then decreased, which can reach the maximum value (over  $26.05 \text{ MJ/m}^3$ ) at  $500^\circ\text{C}$ . In contrast, by increasing the mass fraction of catalyst and the heating rate, the yield of gas is firstly increased and then decreased. The maximum gas yield can be achieved with 6% mass fraction of  $\text{CH}_3\text{COOK}$ . But the heat value of generated gas decreases. In addition, increasing the reaction time leads to the increase of gas yield and  $\text{H}_2$  concentration. For heat value, it follows the trend that firstly increased and then decreased. The maximum heat value (over  $30.19 \text{ MJ/m}^3$ ) can be obtained with 90 minutes of reaction time.

**Key words:** sludge; pyrolysis; yield; heat value

近年来,随着人民生活水平的提高,城市生活污水、污泥的产量日益增大。目前,对于生活污水的处理方式主要以填埋、堆肥、焚烧为主<sup>[1-2]</sup>,但处理过程中产生大量污染物,对环境造成了严重的污染。污泥热解技术不仅解决了上述方法存在的污染问题,而且能耗低,实现了资源化和无害化的目标<sup>[3]</sup>,是近年来人们最为关注的焦点。热解过程中会产生气、液、固三相产物,气相产物主要以  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  为主,平均热值约为  $14 \sim 20 \text{ MJ/m}^3$ <sup>[4]</sup>。污泥热解过程中温度、反应时间、升温速率会对气体产率和气体产物组分有较大影响<sup>[5]</sup>,进而影响到污泥资源化利用的效果。

笔者主要针对污泥热解气相产物进行研究。着重分析了热解过程中热解终温、催化剂的质量分数、反应时间、升温速率 4 个因素的变化对气相产物体积分数分布的影响,并对不同温度下气体的热值进行简单的计算和分析。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品

实验样品取自乌鲁木齐市某污水处理厂的生活污泥,污泥含水率约为 80%。所取样品在  $110^\circ\text{C}$  下干燥并研磨均匀,并对原污泥样品进行了工业分析和元素分析,结果如表 1 所示。

收稿日期: 2015-08-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市科技计划项目(Y131330011)

作者简介: 李刚(1989-),男,硕士生,研究方向为污泥资源化利用,783794458@qq.com;陆江银(1964-),男,博士,教授,主要研究方向为石油天然气加工及多相催化转化,通讯联系人,0991-8581012,jiangyinlu6410@163.com。

表 1 原料污泥的分析数据 质量分数/%

灰分	挥发分	固定碳	C	H	O	N	S
70.42	27.0	2.58	18.57	3.27	26.14	26.76	0.79

## 1.2 实验方法

取含水率约为 80% 的污泥 500 g, 加入不同添加量的  $\text{CH}_3\text{COOK}$  混合均匀, 装入体积为 1L 的反应釜中, 以  $\text{N}_2$  为保护气保证无氧操作的条件, 其流量为 100 mL/min, 在升温程序可控的电热炉中加热达到最终热解温度。热解产生的气体先经过饱和碳酸氢钠溶液脱除硫化氢气体, 再经过无水氯化钙干燥后进入气相色谱仪进行定性定量分析。

## 1.3 气体的检测方法

采用 SP3420A 型气相色谱对气体进行分析, 色谱柱使用不锈钢柱 (TDX-01, 1.5 m × 2 mm, He 为载气, 流速为 30 mL/min) 和毛细柱 (KB- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 50 m × 0.32 mm, 高纯  $\text{N}_2$  为载气, 流速为 30 mL/min)。以  $\text{CH}_4$  峰面积为关联, 将所测的组分等价到同一条件下进行定量计算。

## 1.4 数据的处理

气体产率的计算式为:

$$Y_i = (V_i/m_i) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $V_i$  为各组分气体的总体积,  $m_i$  为参加反应的湿污泥质量。

气体中各组分体积分数的计算式为:

$$X_i = f_i \times A_i / \sum f_i \times A_i$$

式中:  $f_i$  为组分  $i$  的校正因子,  $A_i$  为组分  $i$  的峰面积。

气体热值的计算式为:

$$\text{LHV} = 4.2 \sum (v_i \times q_i)$$

式中:  $v_i$  为各组分气体的体积分数,  $q_i$  为各组分气体的低热值。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 不同因素对热解气体产率的影响

不同热解因素下气体的产率曲线如图 1 所示。

由图 1(a) 可知, 气体的产率随着热解温度的升高而增大, 500℃ 时气体的产率增幅最大, 主要原因是此时大量的大分子物质分解产生了气体, 导致产率迅速增大; 之后随着温度的升高气体的产率增幅缓慢。由图 1(b) 可知, 随着催化剂质量分数的增加, 气体的产率先增大后减小, 这是因为在一定范围类, 催化剂的增加有利于污泥中脂肪类、蛋白质、糖类等物质分解, 导致其产率增大, 当超过最佳值后会抑制反应, 导致产率下降。由图 1(c) 可知, 随着反

应时间的增长, 气体的产率增大, 在 90 min 之前, 气体的产率增长迅速; 90 min 之后气体的产率增加逐渐缓和, 主要是污泥热解过程在 90 min 之前已基本反应完全, 只剩下少部分未燃烧完全。由图 1(d) 可知, 污泥热解属于吸热反应, 升温速率太慢, 提供热量太小, 导致污泥中有机质热解量减少, 使得产率减小; 升温速率太大, 导致升温过快, 使污泥中大部分有机质未能分解, 致使产率下降, 因此气体产率随升温速率先增大后减小。

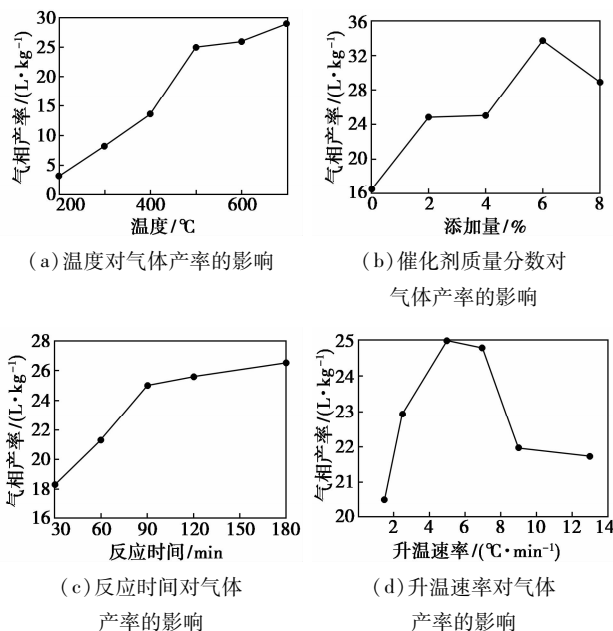


图 1 不同热解因素下的热解气体的产率

### 2.2 不同因素对各组分气体体积分数的影响

#### 2.2.1 热解终温对各组分气体体积分数的影响

当催化剂质量分数为 4%, 反应时间为 90 min, 升温速率为 7℃/min 时, 考察不同热解终温对各组分气体体积分数的影响, 结果如表 2 所示。

表 2 在不同热解终温下的热解气体组分的体积分数 %

热解终温/℃	$\text{H}_2$	CO	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{C}_2\text{H}_6$
200	0	0.58	3.58	93.56	0.63
300	6.15	4.11	2.67	84.03	0.93
400	8.84	4.01	4.18	75.28	3.48
500	32.40	8.67	12.81	24.19	9.02
600	38.05	8.35	12.46	18.10	8.11
700	44.17	22.46	5.09	17.76	2.66
热解终温/℃	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_3\text{H}_6$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	
200	0.36	0.67	0.62	0	
300	0.67	0.88	0.56	0	
400	1.14	3.17	0.68	0.27	
500	4.49	3.23	4.61	0.57	
600	7.05	2.64	4.61	0.63	
700	1.84	0.94	4.01	0.28	

由表2可以看出:①300℃之前气体的主要成分为CO<sub>2</sub>,其他气体的体积分数很少;当热解终温为300℃时有H<sub>2</sub>生成,H<sub>2</sub>体积分数随温度升高而明显上升;在热解终温为400℃时,H<sub>2</sub>体积分数只有8.84%;在热解终温为500℃时,H<sub>2</sub>体积分数增加到32.40%,主要是温度升高,脱氢反应加剧,产生了大量H<sub>2</sub>;当热解终温为600℃时,H<sub>2</sub>体积分数增加到38.05%,此时热解产生的烃类(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)发生二次裂解,导致H<sub>2</sub>体积分数的增加;②随着温度升高CO体积分数缓慢增大,因为在二次裂解反应过程中,C与H<sub>2</sub>O或CO<sub>2</sub>发生反应产生CO,同时CO和H<sub>2</sub>O又发生置换反应生成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>,导致CO的体积分数维持稳定,在500℃后体积分数变化显著,由于裂解反应中以生成CO为主;CH<sub>4</sub>体积分数随着温度的升高先增加后减小,在500℃达到了最大值12.81%,因为脱氢反应过程中碳氢化合物产生了CH<sub>4</sub>,同时烃类发生裂解产生了CH<sub>4</sub>;③CO<sub>2</sub>体积分数随热解终温升高而减少,开始主要以生成物形式存在,随着温度的升高,CO<sub>2</sub>和C发生反应生成CO,导致生成的CO<sub>2</sub>体积分数逐渐减少;④C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>具有相似性,低温段(400℃以下)体积分数较低,随着温度的升高及脱氢反应的进行,体积分数均增加,在500~600℃时达到最大值,之后有所下降,主要是发生了二次裂解,导致其体积分数减小。

### 2.2.2 催化剂质量分数对各组分气体体积分数的影响

当反应温度为500℃,反应时间为90 min,升温速率为7℃/min时,催化剂质量分数对各组分气体体积分数的影响如表3所示。

表3 不同质量分数催化剂的热解气体组分体积分数%

w(催化剂)/%	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
0	19.19	4.75	14.28	26.01	11.18
2	30.82	6.21	12.28	25.75	10.66
4	32.40	8.67	12.81	24.19	9.02
6	36.45	8.51	12.16	23.35	8.46
8	38.80	11.87	12.72	13.97	8.97
w(催化剂)/%	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	
0	7.09	5.30	9.95	1.53	
2	5.12	4.53	4.18	0.55	
4	4.49	3.23	4.61	0.57	
6	2.85	3.41	3.96	0.85	
8	2.39	3.97	6.00	1.29	

由表3可以看出:①H<sub>2</sub>体积分数随着催化剂质量分数的增加而增大,随着催化剂质量分数的增加,

加速了热解过程中脱氢反应速率和一些烃类分子裂解,使得H<sub>2</sub>体积分数增加,且在反应过程中,污泥中部分重金属元素也以催化剂的形式参与反应,加速了CO、CO<sub>2</sub>转化反应产生部分H<sub>2</sub>;②CO体积分数随着催化剂质量分数的增加而增加,主要是加速了析出的化合水和CO<sub>2</sub>与C的反应产生了CO;CH<sub>4</sub>随着催化剂质量分数的增加基本维持稳定,CH<sub>4</sub>既是裂解生成物也与水蒸气发生反应,导致了体积分数没有明显的变化;③CO<sub>2</sub>体积分数随着催化剂质量分数的增加而减小,质量分数较少时,有利于污泥热解产生CO<sub>2</sub>,随着质量分数的增大,产生的CO<sub>2</sub>和C发生反应生成CO,导致生成的CO<sub>2</sub>体积分数逐渐减少;④C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>随着催化剂质量分数的增加呈现出减小的趋势,主要是催化剂的添加有利于烃类的裂解,加速了二次裂解,使得浓度下降;而C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>析出量很小,基本在1%左右。

### 2.2.3 反应时间对各组分气体体积分数的影响

当反应温度为500℃,催化剂质量分数为4%,升温速率为7℃/min时,反应时间对各组分气体体积分数的影响如表4所示。

表4 在不同热解时间下的热解气体组分的体积分数%

热解时间/min	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
1	20.82	5.20	9.82	55.99	4.65
30	30.78	7.92	13.36	26.96	8.79
60	32.40	8.67	12.81	24.19	9.02
90	32.70	9.33	11.77	24.16	8.75
120	33.92	7.76	8.28	28.31	6.31
150	37.62	5.67	6.23	26.77	3.77
180	35.80	4.95	4.96	31.95	1.64
热解时间/min	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	
1	1.62	1.13	0.69	0.05	
30	4.75	3.01	3.94	0.49	
60	4.49	3.23	4.61	0.57	
90	3.39	3.80	5.01	1.08	
120	2.53	3.90	7.30	1.67	
150	1.68	3.70	11.34	3.22	
180	0.92	1.77	9.78	7.62	

由表4可以看出:①H<sub>2</sub>体积分数随着反应时间的增加而增大,这是因为反应时间增加,CH<sub>4</sub>、C与H<sub>2</sub>O发生反应产生H<sub>2</sub>,同时烃类气体发生二次裂解反应产生H<sub>2</sub>;②CO、CH<sub>4</sub>随着反应时间的增加先增大后减小,这是因为反应时间增加,污泥中有机质、脂肪类、蛋白类发生热解,CO、CH<sub>4</sub>的体积分数增大,但随着时间增加,CO、CH<sub>4</sub>与H<sub>2</sub>O发生反应产生

H<sub>2</sub>, 导致其体积分数减小; ③CO<sub>2</sub> 体积分数随着反应时间的增加先减小后基本趋于稳定, 这是因为 CO<sub>2</sub> 与 C 发生反应生成 CO, 导致生成的 CO<sub>2</sub> 体积分数逐渐减少, 之后 CO 与 H<sub>2</sub>O 发生反应产生 CO<sub>2</sub> 使其体积分数趋于稳定; ④C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 随着反应时间增加呈现出先增加后减小的趋势。开始阶段, 热解气体的体积分数在不断增大, 当反应达到 60~90 min 时, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 发生了二次裂解, 导致其体积分数下降; 而 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 体积分数不断增加, 主要是污泥中大分子物质逐渐裂解产生了较多的 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>。

#### 2.2.4 升温速率对各组分气体体积分数的影响

当反应温度为 500℃, 催化剂质量分数为 4%, 反应时间为 90 min 时, 升温速率对各组分气体体积分数的影响如表 5 所示。

表 5 在不同升温速率下的热解气体组分体积分数 %

升温速率/(℃·min <sup>-1</sup> )	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
2.5	29.80	4.54	13.65	24.87	10.88
5.0	32.40	8.67	12.81	24.19	9.02
7.0	40.16	4.59	11.52	26.19	7.18
9.0	33.75	6.61	12.79	25.03	8.98
13.0	24.74	4.04	14.54	36.41	7.57

升温速率/(℃·min <sup>-1</sup> )	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
2.5	3.43	4.84	5.83	2.14
5.0	4.49	3.23	4.61	0.57
7.0	3.41	2.46	3.93	0.57
9.0	3.83	3.42	4.66	0.96
13.0	3.65	2.87	5.46	0.73

由表 5 可以看出: ①H<sub>2</sub> 体积分数随着升温速率增加先增大后减小, 升温速率的增大, 达到最佳热解过程, 产生烃类气体发生了二次裂解反应使 H<sub>2</sub> 体积分数增多, 在 7℃/min 达到最佳; 升温速率继续增大, 温度升高太快, 部分烃类气体未来得及发生二次热解被吹扫出来, 导致 H<sub>2</sub> 体积分数减少; ②CO、CH<sub>4</sub> 体积分数随着升温速率的增加基本保持平稳; CO<sub>2</sub> 体积分数随着升温速率增大而逐渐增大, 主要是随着反应进行污泥中含碳物质基本热解完全, 使得 CO<sub>2</sub> 与 C 反应减少, 导致 CO<sub>2</sub> 体积分数的增大; ③C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 随着升温速率增大呈现减小的趋势, 升温速率的增大, 在一定程度上延长了反应的停留时间, 使烃类充分发生二次热解, 导致其体积分数减小。

### 2.3 不同热解因素对热解气体的热值的影响

不同热解因素下气体的热值如图 6 所示。

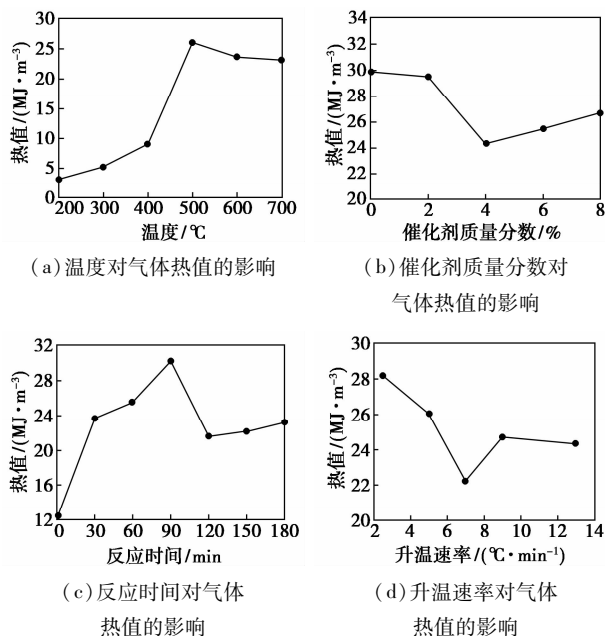


图 6 不同热解因素下气体的热值

从图 6(a)可知, 气体的热值随着温度的升高先增大后减小, 在 500℃之前, 由于产生的气体主要以 H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 为主, 且体积分数较大的 CO<sub>2</sub> 属于非可燃性气体, 导致热值低于 10 MJ/m<sup>3</sup>; 在 500℃时, 产生了发热量较大的烃类气体, 导致热值迅速增大, 约为 26.05 MJ/m<sup>3</sup>; 之后, 这些烃类气体发生了二次裂解使其体积分数下降, 导致热值下降。从图 6(b)可知, 热值随着催化剂质量分数的增大而减小, 主要是 CO<sub>2</sub> 的体积分数增大, 导致其热值下降; 从图 6(c)可知, 随着反应时间的增大, 热值先增大后减小, 开始阶段, CO<sub>2</sub> 的体积分数在减小, 烃类气体体积分数增大, 使得热值增大; 在 90 min 左右, 烃类气体发生了二次裂解, 体积分数减小, 导致热值减小; 从图 6(d)可知, 随着升温速率的增大, 热值逐渐减小, 主要是由于 CO<sub>2</sub> 的体积分数增大, 烃类气体发生裂解, 导致热值不断减小, 在 7℃/min 时, 属于最佳升温速率, 烃类气体发生大量的二次裂解使其体积分数迅速下降, 热值下降迅速。

### 3 结论

(1) 随着热解温度的升高, 气体的产率增大; H<sub>2</sub> 的体积分数不断增大; 气体热值随温度的升高先增大后减小, 在 500℃时达到最大值, 约为 26.05 MJ/m<sup>3</sup>。

(下转第 76 页)

公司生产;粘结剂、增塑剂、表面活性剂、钝感剂,工业品;乙酸乙酯,工业品。

仪器:电子天平;蒸发皿;烧杯;数显恒温水浴;搅拌机;真空烘箱;标准检验筛 10 目(2.00 mm)、20 目(0.850 mm)、40 目(0.425 mm);撞击感度仪;爆速仪。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 溶解度实验

利用平衡法进行溶解度实验<sup>[7]</sup>。将过量的固体溶质加入液体溶剂中,密封并加热到一定的温度后恒温一段时间,其间连续或间歇搅拌以促进固体的溶解,使其尽量接近真正的固-液相平衡状态。静置后,吸取上层饱和清液,用合适的手段分析其组成,从而获得固体溶质在液体溶剂中的溶解度数据。

先准备蒸发皿若干,编号,称量质量为  $a$  g。向烧杯中加入 200 mL 水和 30 g NTO,恒温至 5℃,搅拌 3 h;静置后取少量上层清液加入 1#蒸发皿中,称量蒸发皿和清液总质量为  $b$  g。然后将蒸发皿放入真空烘箱中 50℃ 下干燥,NTO 逐渐析出,干燥完全后再称量蒸发皿和 NTO 的总质量为  $c$  g。根据式(1)计算对应温度下 NTO 的溶解度  $S$  [g/(100 g 水)<sup>-1</sup>]。然后将温度升至 10℃ 恒温搅拌,取上清液加入 2#蒸发皿称量并干燥,以此类推,每次升高 5℃ 恒温,可得到不同温度下 NTO 的溶解度:

$$S = [(c - a)/(b - c)] \times 100 \quad (1)$$

### 1.2.2 造型粉的制备

利用水悬浮法制备造型粉<sup>[8]</sup>。将 2 g 粘结剂和 3 g 增塑剂溶解在 30 mL 乙酸乙酯中形成粘结剂溶液;在装有搅拌和加热的混合器中按比例加入

NTO、HMX 单质共 97.5 g,加入事先溶解好的 NTO 饱和水溶液 280 ~ 340 mL 和微量的水溶性表面活性剂,搅拌 20 min 使单质炸药均匀分散开,形成悬浮液,室温下向混合器中滴加溶解好的粘结剂溶液,搅拌速度为 300 ~ 600 r/min,5 min 滴加完,搅拌 2 h 使体系中的乙酸乙酯挥发完,过滤干燥后进行筛分,保留粒度在 10 ~ 40 目之间,最后得到表面光滑、具有一定粒度的造型粉,这个过程也叫造粒。再包覆适量钝感剂即可得到产品。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NTO 在水中的溶解度

NTO 在水中的溶解度较大,溶于水后呈现为明显的黄色,因此采用水悬浮法制备混合炸药时存在 NTO 溶于水而造成的原料损耗问题。因此,笔者先对 NTO 在不同温度水中的溶解度进行了测定,结果如图 1 所示。

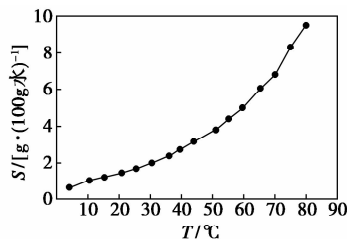


图 1 NTO 在水中的溶解度

乙酸乙酯的沸点为 77.2℃,一般水悬浮法是在低于有机溶剂沸点的较高温度下造粒。由图 1 可以看出,NTO 在水中的溶解度较大,温度为 30℃ 时的溶解度已达到 2.00 g/(100 g 水),随着温度的升高,

影响不大;气体的热值不断减小,在 7℃/min 时达到最小值,约为 22.24 MJ/m<sup>3</sup>。

### 参考文献

- [1] 李向荣,张艳君,张志强. 剩余污泥的资源化利用[J]. 环境卫生工程,2011,19(5):35-38.
- [2] 张培玉,刘晗. 城市污水处理厂污泥的综合利用与资源化[J]. 环境科学与技术,2009,32(12):109-112.
- [3] 谭铁鹏. 污水污泥处理的资源化技术分析[J]. 云南环境科学,1997,4(23):382-386.
- [4] Dominguez A, Menendez J A, Pis J J. Hydrogen rich fuel gas production from the pyrolysis of wet sewage sludge at high temperature[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2006, 77(2):127-132.
- [5] 熊思江,章北平,冯振鹏,等. 湿污泥热解制取富氢燃气影响因素研究[J]. 环境科学学报,2010,30(5):996-1001. ■

(上接第 74 页)

(2) CH<sub>3</sub>COOK 的添加在一定范围内可增大气体的产率;催化剂质量分数的不同,各气体体积分数差异较大,尤其对 H<sub>2</sub> 的体积分数影响较大;气体的热值随催化剂质量分数的增大而减小,但减小幅度不大。

(3) 随着反应时间的增加,气体的产率增大;H<sub>2</sub> 的体积分数随着反应时间的增加而增大,烃类气体体积分数先增大后减小;气体热值随反应时间增加先增大后减小,在 90 min 时达到最大值,约为 30.19 MJ/m<sup>3</sup>。

(4) 随着升温速率的增大,气体的产率先增大后减小;H<sub>2</sub> 的体积分数先增大后减小,在 7℃/min 时达到最大值,而升温速率对烃类气体体积分数的