

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.021

面向变电站蓄电池火灾的壳体材料燃烧特性

王中杰¹, 陶文彪², 杨栋¹, 王亮²

(1. 国网山西省电力公司, 太原 030021; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001)

摘要: 采用热重分析仪研究了铅酸蓄电池壳体材料[丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)]在空气氛围, 不同升温速率下的燃烧动力学特性。结果表明, 蓄电池壳体材料在燃烧时分为两个失重阶段, 高加热速率有利于第一阶段的燃烧过程, 从而促进电池着火和稳定燃烧, 但却不利于第二阶段的燃烧过程。因此, 如何在火灾早期实现对蓄电池的快速降温是控制灾情的关键。此外, 通过对4种常用动力学模型的综合评估, 选择适用性最好的FWO模型计算得到活化能随燃烧反应的进行而不断增大, 量化说明了火灾初期电池燃烧猛烈, 危险性较大。

关键词: 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料; 燃烧特性; 动力学模型; 活化能

中图分类号: TM912.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0114-06

Combustion Characteristics of the Shell Material Used in Substation Battery

Wang Zhongjie¹, Tao Wenbiao², Yang Dong¹, Wang Liang²

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute of SEPC, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Thermogravimetric analyser was used to study the combustion kinetics characteristics of the lead-acid battery shell material made of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) under air atmosphere. The results show that the combustion process of battery shell material can be divided into two weightless stage. The high heating rate is conducive to the combustion process in the first stage, thereby promoting battery ignition and stable combustion, while impairing the combustion process in the second stage. It is therefore very essential to achieve rapid cooling of the battery in the early stage of fire. In addition, according to the comprehensive evaluation of four commonly used kinetic models, the Flynn-Wall-Ozawa (FWO) model with the best applicability is selected to calculate activation energy, which quantifies that the battery fire is more violent and dangerous at early stage.

Keywords: acrylonitrile butadiene styrene; combustion characteristics; kinetic model; activation energy

铅酸蓄电池具有成本低、性价比高、可靠性好、原材料易得等优点,因而广泛应用于电动车、变电站直流电源及其它工业电力系统^[1]。蓄电池在长期循环充放电的过程中,经常发生热失控、电池短路、析氢爆炸等危险,进而引发大规模的电池火灾,威胁用户的人身和财产安全。由于铅酸蓄电池的电解液是稀硫酸,不同于磷酸铁锂电池^[2]与三元锂离子电池^[3]中的可燃性电解液,铅酸蓄电池火灾发生的可燃物主要是电池壳体,研究其燃烧特性参数对分析铅酸蓄电池的燃烧过程至关重要。热重分析(TG)

是研究煤、市政污泥、城市生活垃圾等材料的燃烧特性及燃烧动力学的重要手段。然而,迄今为止还鲜有文章研究过铅酸蓄电池中的可燃物如丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、PVC(聚氯乙烯)等高聚物的燃烧特性^[4-5]。极少数文章只针对单个动力学模型的拟合结果进行评判^[6-7],尚未有研究对比不同动力学模型在电池材料燃烧转化过程的适应性。因此,开展蓄电池壳体材料的燃烧阶段特性演变反应动力学研究,对完善其燃烧机理,进而指导电池火灾预防和扑灭具有十分重要的理论和现实意义。

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(520530190006)

通信作者: 王中杰, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电站运检管理研究 E-mail: wangzhongjie1007@sohu.com

收稿日期: 2021-02-19

引用格式: 王中杰, 陶文彪, 杨栋, 等. 面向变电站蓄电池火灾的壳体材料燃烧特性[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 114-119.

Wang Zhongjie, Tao Wenbiao, Yang Dong, et al. Combustion characteristics of the shell material used in substation battery[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 114-119.

笔者采用 TG 分析仪研究不同升温速率下电池壳体材料的燃烧失重过程及燃烧特性参数,分析了 Coats-Redfern 法、DAEM 模型、KAS 模型和 FWO 模型的适用性,并计算相应的动力学参数,从而为蓄电池火灾的燃烧过程分析提供了理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

铅酸蓄电池壳体材料即 ABS:新乡市鸿晟能源有限公司。

1.2 主要设备及仪器

TG 分析仪: STA449 F 型,德国耐驰公司。

1.3 性能测试与结构表征

TG 分析:约 2 mg 样品,氮气气氛,100 mL/min 流速吹扫,分别以 5,10,20,30 K/min 升温速率从 30℃升温至 110℃,恒温 10 min,烘干水分;随后切换为空气气氛,流速不变,考察样品在 110~600℃区间内的 TG 情况。对于获得的 TG 数据,只考虑样品在烘干结束后至样品质量不再变化时对应温度区间内的采样点,即无水无灰条件下电池壳体的燃烧转化曲线。

通过动力学分析 ABS 树脂的燃烧过程。首先假定 m_0 为样品的初始质量,按照预设的升温程序进行加热,在此过程中样品发生热分解反应,在 t 时刻,假定样品的质量为 m_t ,而最终不能分解的参与分解的残余物的质量记为 m_f ,则样品的转化率(α)可以表示为:

$$\alpha = (m_0 - m_t) / (m_0 - m_f) \quad (1)$$

对于分解反应,分解速率可表示为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2)$$

在非等温的条件下升温速率(β)= dT/dt ,代入式(2)得到式(3):

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{k_0}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (3)$$

式中: k_0 ——指前因子;

E ——活化能;

$f(\alpha)$ 的函数形式包括其中的反应级数,由反应类型或反应机制决定,通常取 $f(\alpha)=(1-\alpha)^n$ [8]。对于一级反应, n 取 1,机理函数对应的积分表达式为 $g(\alpha)=-\ln(1-\alpha)$ 。此外,由于在热分解反应的末期($\alpha \geq 0.8$),挥发分物质与固体间发生了复杂的气固反应,生成稳定性较强的物质,因此笔者只考虑转化区间在 0.1~0.7 范围内的动力学模型研究。

通过阿累尼乌斯方程和确立的机理函数,以往的研究通过引进 Coats-Redfern 积分法 [9]、DEAM 法 [10] 以及基于等转化速率假设(给定转化速率下的活化能不变)的 KAS 法 [11-13] 和 FWO 法 [12-14],建立拟合模型。通过模型拟合曲线的斜率和截距,经过一系列的变换计算,即可求解出相应的动力学参数。

2 结果与讨论

2.1 燃烧转化曲线分析

ABS 在无水无灰条件下,升温速率分别为 5,10,20,30 K/min 的燃烧转化曲线,如图 1 所示。当升温速率增加时,燃烧转化曲线逐渐向高温区移动,这是因为在快速升温条件下,样品内外温差梯度较大,传热不均匀,不利于样品内部的挥发分析出。

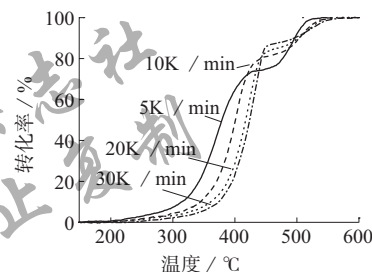


图 1 不同升温速率下 ABS 树脂的燃烧 TG 曲线

图 2 是不同升温速率下 ABS 的燃烧 DTG 曲线。由图 2 可见,DTG 曲线在转化率达到 0.1~0.7 之间时出现第一个燃烧峰,转化率在 0.8~1 之间出现第二个燃烧峰,且随着升温速率的提高,第一阶段峰值升高,第二阶段峰值降低。出现该现象可能是以下两种原因:(1)样品中存在两种反应性截然不同的物质,即存在杂质,并且杂质的燃烧反应性明显低于 ABS 树脂;(2)ABS 树脂等高聚物热解时形成的中间态产物流动性强,在反应过程中逐步覆盖在挥发分析出所形成的孔隙上,形成一层致密的隔热炭层 [15],进而阻碍了挥发分的进一步析出,同时促进热解形成的重质挥发分(焦油)与固体残余物的二次反应,形成反应性极差的二次焦。

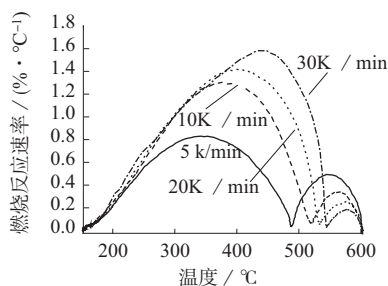


图 2 不同升温速率下 ABS 的燃烧 DTG 曲线

2.2 燃烧特性参数分析

表1列出了不同升温速率下电池外壳的燃烧特性参数。其中包括4种不同升温速率下的着火温度(T_i)、最大燃烧速率峰温(T_{max})、最大反应速率温度(DTG_{max})和燃尽温度(T_f)。结果表明,随着升温速率从5 K/min增加到30 K/min, T_i , T_{max} 和 T_f 逐渐增大,意味着样品更难被点燃、充分燃烧和燃尽。第一阶段的 DTG_{max} 升高说明在燃烧峰温附近,燃烧反应性随升温速率升高而升高,这是因为高升温速率加速了样品中挥发分的析出。然而,第二阶段的燃烧峰随着升温速率升高而降低,说明了低升温速率有利于样品燃烧时的热量积累和温度的均匀分布,进而导致二阶段样品燃烧反应更迅速。

表1 不同升温速率下电池外壳的燃烧特性参数

$\beta /$ (K·min ⁻¹)	$T_i /$ ℃	$DTG_{max} /$ (%·min ⁻¹)	$T_{max} /$ ℃	$T_f /$ ℃	$S /$ (℃ ⁻³ ·min ⁻²)	$C /$ (℃ ⁻² ·min ⁻¹)
5	314.5	0.05	337.7	510.4	1.0×10^{-9}	1.7×10^{-7}
10	344.6	0.22	374.6	532.4	4.8×10^{-9}	4.9×10^{-7}
20	361.0	0.37	399.3	536.4	1.9×10^{-8}	1.0×10^{-6}
30	373.4	0.56	441.6	543.0	4.1×10^{-8}	1.5×10^{-6}

由表1可见,可燃性指数(C)和综合燃烧特性指数(S)可用于定性分析样品的燃烧特性^[16-17]。 S 涵盖了 T_i , T_f 、最大燃烧速率(R_{max})以及平均反应速率(R_{mean})等特征量。 S 值越大,说明样品的综合燃烧性能越好,定义式如下:

$$S = \frac{R_{max} \times R_{mean}}{T_i^2 \times T_f} \quad (4)$$

C 代表煤粉燃烧前期的反应性, C 值越大代表煤粉的可燃性越好,燃烧越稳定,其定义式如下:

$$C = \frac{R_{max}}{T_i^2} \quad (5)$$

在低升温速率(5, 10 K/min)条件下, S 和 C 都比高升温速率下(20, 30 K/min)条件下,高出约1个数量级,说明高升温速率使ABS树脂的着火更快。

2.3 燃烧动力学特性分析

(1) 动力学模型分析壳体材料的燃烧过程。

图3为4种不同热动力学模型的线性拟合结果。

根据图3线性拟合的结果,ABS树脂的燃烧过程分为第一阶段($\alpha=0.1 \sim 0.7$,间隔为0.1)和第二阶段($\alpha=0.8 \sim 0.9$,间隔为0.1)。在第一阶段中,4种模型均能得到较高的线性拟合结果,说明此阶段可以采取常用的动力学模型进行描述。在第二阶段中,

数据点明显偏离原有的线性关系(如图3所示的椭圆中的数据点),说明4种模型都不能直接对该阶段燃烧过程进行描述。这是因为ABS树脂在热解阶段,会发生熔融态的转变,软化的样品附着在表面的孔隙上,增强了析出挥发分与固体样品间的二次反应,而该产物芳构化程度高、结构稳定的物质,上述四种模型均适用于此阶段。

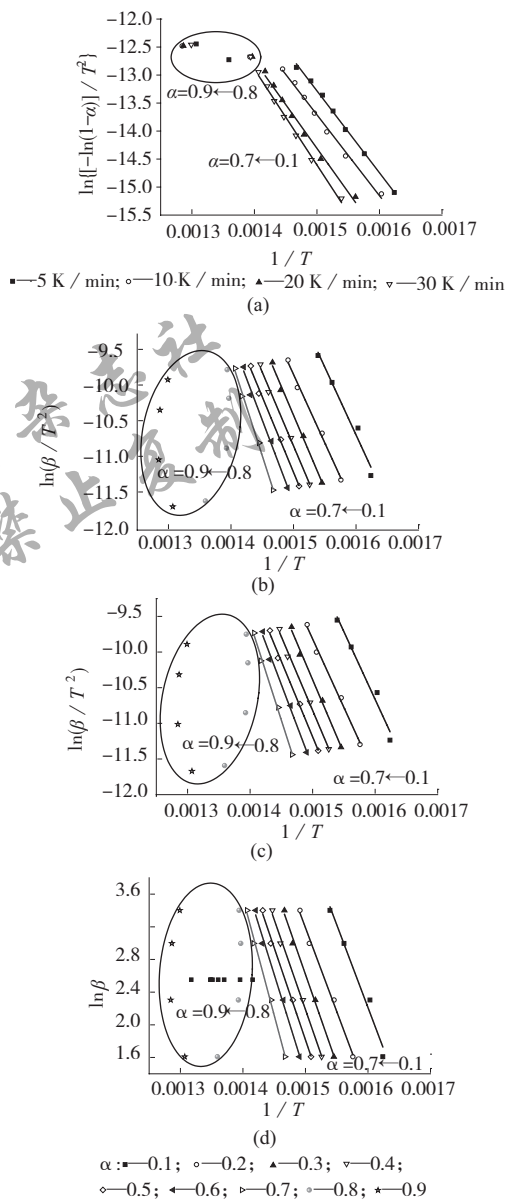


图3 4种不同热动力学模型的线性拟合结果

图3中良好的拟合结果说明了动力学模型分阶段使用的可行性。表2为4种常用动力学模型计算的热解动力学参数和相关系数。由表2可知,选择转化率0.1~0.7的第一阶段,采用4种动力学模型拟合得到的 R^2 分别为:(1) Coats-Redfern 积分法计

算得到的动力学模型拟合系数 $0.989 \leq R^2 \leq 0.997$; (2) DAEM 法计算得到的动力学模型拟合系数 $0.963 \leq R^2 \leq 0.993$; (3) KAS 法计算得到的动力学模型拟合系数 $0.963 \leq R^2 \leq 0.993$; (4) FWO 法计算得到的动力学模型拟合系数 $0.968 \leq R^2 \leq 0.994$ 。上述结果表明, Coats-Redfern 积分法在对 ABS 树脂第一阶段燃烧过程的描述具有一定的适应性。

表 2 4 种常用动力学模型计算的热解动力学参数和相关系数

动力学模型	$\beta / (\text{K} \cdot \text{min}^{-1})$	$\alpha / \%$	$E / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	k_0 / min^{-1}	R^2
Coats-Redfern	5		121.7	1.42×10^7	0.997
	10		120.2	6.97×10^6	0.993
	20		130.2	2.51×10^7	0.989
	30		142.2	1.78×10^8	0.994
DAEM		10	158.1	3.99×10^{12}	0.963
		20	159.6	1.83×10^{12}	0.992
		30	171.4	9.35×10^{12}	0.992
		40	172.0	6.74×10^{12}	0.992
		50	176.1	1.00×10^{13}	0.993
		60	192.5	1.37×10^{14}	0.988
		70	227.2	4.21×10^{16}	0.993
KAS		10	158.1	7.73×10^{11}	0.963
		20	159.6	7.49×10^{11}	0.992
		30	171.4	6.12×10^{12}	0.992
		40	172.0	6.33×10^{12}	0.992
		50	176.1	1.29×10^{13}	0.993
		60	192.5	2.31×10^{14}	0.988
		70	227.2	9.30×10^{16}	0.993
FWO		10	160.3	1.29×10^{12}	0.968
		20	162.0	1.30×10^{12}	0.993
		30	173.5	9.61×10^{12}	0.993
		40	174.1	1.00×10^{13}	0.993
		50	178.2	1.99×10^{13}	0.993
		60	193.8	3.10×10^{14}	0.990
		70	227.0	9.21×10^{16}	0.994

Coats-Redfern 积分法升温速率为 $5 \sim 30 \text{ K/min}$ 时计算得到的活化能, 在 $121.7 \sim 142.2 \text{ kJ/mol}$ 之间变化, 显著低于余下 3 种模型的活化能区间 (约 $160 \sim 227 \text{ kJ/mol}$)。已有研究表明, Coats-Redfern 积分法通过在整个燃烧过程中转化率与燃烧温度的对应关系来求解活化能, 所求的活化能是属于某一温度范围内热解时的平均值, 因此该方法不适合用来描述 ABS 树脂等高聚物的复杂燃烧过程^[16]。Coats-Redfern 法计算得到活化能总体上随着升温速率的升高而增加, 主要可以归因于低加热速率下反应物内部的热量积累, 导致热分解反应容易发生。由表 2 可见, 通过 FWO 法计算得到相关系数的范围, 仅次于 Coats-Redfern 法, 这说明该模型计算得到的动力学参数准确度也非常高。DAEM 法和 KAS 法计算得到相关系数仅略低于 FWO 法,

仅凭相关系数细微的差别无法直接判断模型在拟合电池壳体燃烧过程的优劣, 下文将进一步对 4 种动力学模型的动力学补偿效应进行分析。

(2) 动力学补偿效应。

根据 Arrhenius 公式 $k=k_0\exp(-E/RT)$ 可知, 活化能越大, 其反应速率常数越小的讨论是建立在 k_0 是常数的前提下。但从阿累尼乌斯公式的导出公式: $\ln k_0=E/RT+\ln k$ 可知, 补偿效应是大部分有机高聚物、生物质、煤等热分解反应时必然会出现的现象, 即随着 E 增大, k_0 亦增大; E 减少, k_0 亦减小, $\ln k_0$ 与 E 之间呈线性相关的现象被称为动力学补偿效应^[18-19]。 $\ln k_0$ 与 E 的关系如图 4 所示。指前因子和活化能呈线性关系, 可知补偿效应由好到差依次排列为: FWO 法 = KAS 法 > DAEM 法 > Coats-Redfern 法。这说明 FWO 法和 KAS 法的准确性较 DAEM 法和 Coats-Redfern 法高。综合分析动力学模型的拟合系数和动力学补偿效应的拟合系数, 笔者认为 FWO 模型最适用于 ABS 树脂燃烧过程的描述。

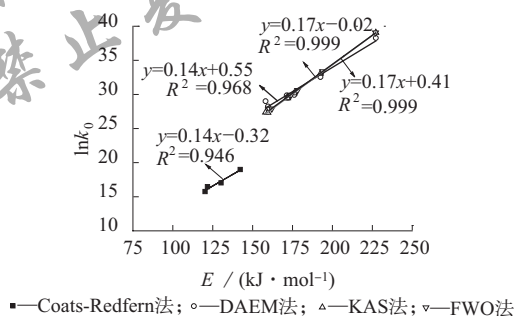


图 4 $\ln k_0$ 与 E 的关系图

(3) 模型拟合曲线。

通过上两个章节对模型拟合系数和动力学补偿效应的分析, 确立了最适于在 ABS 树脂燃烧动力学分析的模型为 FWO 模型。因此, 进一步将模型在升温速率为 $5, 10, 20, 30 \text{ K/min}$ 条件下, 计算所得 E 和 k_0 分别代入原方程求解相应的模型拟合曲线, 并将拟合结果与实验所得的 TG 曲线进行比较, 所得结果如图 5 所示。由以上对壳体材料的讨论可知, ABS 的燃烧过程可分为 2 个阶段, 且其动力学描述存在着明显的差异, 所以笔者只考虑 $0.1 \sim 0.7$ 转化率区间上的转化曲线拟合, 并采用转化率为 50% 对应的温度 T_{50} 分析燃烧反应的难易程度。结果表明, 无论是模型拟合的曲线还是实验曲线, 随着升温速率的升高, 燃烧转化曲线整体都向着高温区移动, 说明 ABS 的燃烧反应性变差。当升温速率为 5 K/min 时, 实验与模型拟合的 T_{50} 差值最低为

25.3℃,而升温速率为 20 K/min 和 30 K/min 时模型和实验得到的 T_{50} 差值分别为 37.3℃和 36.2℃。这意味着,在较低升温速率下,实验所得的燃烧转化曲线与动力学模型拟合曲线结果更符合,这与已有研究结果相一致^[16]。

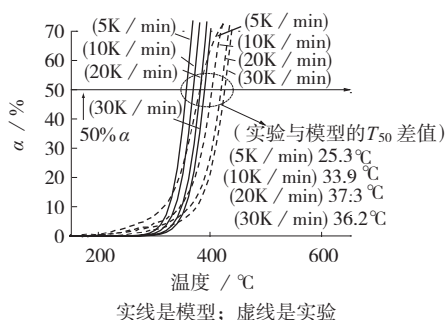


图5 不同升温速率下 FWO 模型转化曲线与实验值对比

(4) FWO 模型计算的活化能。

FWO 法计算得到的活化能分布曲线如图 6 所示。通过 FWO 法计算出的活化能处于 160.3~227.0 kJ/mol 之间,且随着转化程度的增加呈现上升趋势。该结果与生物质热解及燃烧过程中活化能的变化趋势一致。究其原因:一方面,随着热解程度的不断加深,样品中水分、挥发分逐渐析出,残余的固体颗粒性质稳定,热分解反应变困难导致所需活化能升高;另一方面,重质挥发分与固体产物间发生二次反应,芳构化程度加剧,导致反应变困难,反应活化能升高^[13]。

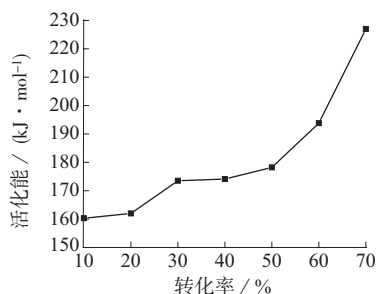


图6 FWO 法计算得到的活化能分布曲线

3 结论

分析了电池壳体材料 (ABS) 的燃烧特性,并采用 4 种常用动力学模型对其热分解时的动力学过程进行描述,进而对蓄电池火灾的预防和扑灭提供理论指导。结论如下:

(1) 蓄电池壳体材料在 5~30 K/min 升温速率的空气气氛下的着火温度在 314~373℃之间,最大失重速率对应温度在 338~442℃之间,燃尽温度在 510~543℃之间。

(2) 根据 TG 和 DTG 曲线结果表明 ABS 树脂

燃烧可分为两个阶段:第一阶段,随着升温速率升高, T_i , T_{max} 和 DTG_{max} 均呈现增大趋势;第二阶段,升温速率越快, DTG_{max} 减小,对应的 T_{max} 增大。

(3) 随着升温速率的提高,电池壳体综合燃烧指数和可燃性指数逐渐升高,说明快速升温条件更有利于壳体材料的着火和稳定燃烧。

(4) FWO 模型在计算动力学参数时具有最高的相关系数、最明显的动力学补偿效应和与实验结果较符合的模型转化曲线,说明该模型最适用于描述蓄电池壳体的燃烧过程。

(5) 随着转化率从 0.1 升高到 0.7, FWO 模型计算所得的活化能从 160.3 kJ/mol 逐步升高到 227.0 kJ/mol,意味着燃烧反应变困难。

参考文献

- [1] 纪哲夫,谢欢欢,罗文杰. 铅酸蓄电池的二次利用[J]. 储能科学与技术,2017,6(2):250-254.
Ji Zhefu, Xie Huanhuan, Luo Wenjie. The secondary utilization of VRLA battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(2):250-254.
- [2] 吴静云,郭鹏宇,黄峥,等. 磷酸铁锂储能电站电池预制舱消防系统研究[J]. 消防科学与技术,2020,39(4):500-502.
Wu Jingyun, Guo Pengyu, Huang Zheng, et al. Study on fire prevention and control strategy of battery prefabrication cabin in Lithium Iron Phosphate storage power station[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(4):500-502.
- [3] 姜学磊,董海斌,张少禹,等. 三元锂离子动力电池热失控及火灾特性研究[J]. 储能科学与技术,2020,9(1):239-248.
Xian Xuelei, Dong Haibin, Zhang Shaoyu, et al. Thermal runaway and fire characteristics of NCM lithium-ion power battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1):239-248.
- [4] 王扬利,李荣勋,孙立水,等. EG 与 DBDPE/Sb₂O₃ 复合阻燃 ABS 热失重行为研究[J]. 工程塑料应用,2008,36(4):55-59.
Wang Yangli, Li Rongxun, Sun Lishui, et al. Study on thermogravimetric behavior of flame retardant ABS by EG/DBDPE/Sb₂O₃[J]. Engineering Plastics Application, 2008, 36(4):55-59.
- [5] 朱琦,沈伯雄,王建桥. 基于 TG-FTIR 的聚丙烯催化热解特性研究[J]. 化学工程,2020,48(6):6-10, 62.
Zhu Qi, Shen Boxiong, Wang Jianqiao. Study on catalytic pyrolysis characteristics of polypropylene based on TG-FTIR[J]. Chemical Engineering, 2020, 48(6):6-10, 62.
- [6] 杨有财,李荣勋,刘光烨. 热降解动力学方法研究 ABS 的降解机理[J]. 中国塑料,2010,24(7):47-50.
Yang Youcai, Li Rongxun, Liu Guangye. Degradation Mechanism of ABS by Thermal Degradation Kinetics[J]. China Plastics, 2010, 24(7):47-50.
- [7] 钟柳,刘治国,欧育湘. BDP 阻燃 PC/ABS 及其纳米复合材料的

- 阻燃性和热降解动力学[J]. 中国塑料, 2008, 22(5):25-29.
- Zhong Liu, Liu Zhiguo, Ou Yuxiang. Flame retardancy and kinetics of thermal degradation of flame retardant PC/ABS and its nanocomposites[J]. China Plastics, 2020, 34(1):136-142.
- [8] 魏利平, 江国栋, 古玉宽, 等. 五彩湾煤和吐鲁番煤热解动力学模型评估与应用[J]. 化工学报, 2019, 70(S2):275-286.
- Wei Liping, Jiang Guodong, Gu Yukuan, et al. Evaluation and application of pyrolysis kinetic model of Wucaiwan coal and Tulufan coal A[J]. CIESC Journal, 2019, 70(S2):275-286.
- [9] 王结良, 陈宏书, 张五龙, 等. 双环戊二烯型聚氨酯树脂/环氧树脂固化物热降解反应动力学及其机理研究[J]. 中国塑料, 2007(11):17-21.
- Wang Jieliang, Chen Hongshu, Zhang Wulong, et al. Studies on the kinetics and mechanism of thermal decomposition of cured DCPDCE/epoxy copolymers[J]. China Plastics, 2007(11):17-21.
- [10] 孙庆雷, 李文, 陈皓侃, 等. DAEM 和 Coats-Redfern 积分法研究煤半焦燃烧动力学的比较[J]. 化工学报, 2003(11):1598-1602.
- Sun Qinglei, Li Wen, Chen Haokan, et al. Comparison between DAEM and Coats-Redfern method for combustion kinetics of coal char[J]. CIESC Journal, 2003(11):1598-1602.
- [11] 罗玉梅, 肖体伟, 张钰格, 等. 新型硬质聚氨酯泡沫的热分解行为及动力学[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):104-108.
- Luo Yumei, Xiao Tiwei, Zhang Yuge, et al. Thermal decomposition behavior and kinetics of a new type of rigid polyurethane foam[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):104-108.
- [12] 卢林刚, 张晴, 徐晓楠, 等. 新型膨胀阻燃聚丙烯的热分解动力学研究[J]. 中国塑料, 2009, 23(5):53-60.
- Lu Lingang, Zhang Qing, Xu Xiaohan, et al. Thermal degradation kinetics of novel intumescent flame retardant polypropylene[J]. China Plastics, 2009, 23(5):53-60.
- [13] 王小黎, 吴丝竹, 王克俭, 等. SEBS 化学交联的热分析动力学研究[J]. 中国塑料, 2009, 23(10):45-49.
- Wang Xiaoli, Wu Sizhu, Wang Kejian, et al. Study on thermal kinetics for chemical crosslinking of SEBS[J]. China Plastics, 2009, 23(10):45-49.
- [14] 唐彪, 周景辉. 木素/聚氧化乙烯碳纤维前驱体的热解动力学[J]. 大连工业大学学报, 2017, 36(3):171-174.
- Tang Biao, Zhou Jinghui. Pyrolysis kinetics of blended lignin/PEO carbon fibers precursors[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2017, 36(3):171-174.
- [15] 刘鹏杰, 孙一峰, 岳小鹏, 等. PBS/木纤维阻燃型复合材料的燃烧动力学[J]. 塑料, 2019, 48(5):23-28.
- Liu Pengjie, Sun Yifeng, Yue Xiaopeng, et al. Combustion dynamics of PBS/wood-fiber flame retardancy composite[J]. Plastics, 2019, 48(5):23-28.
- [16] 李德波, 王明传, 杨新生, 等. Coats-Redfern 模型和 DAEM 在污泥与煤掺烧过程中的动力学适应性分析[J]. 广东电力, 2019, 32(11):70-77.
- Li Debo, Wang Mingchuan, Yang Xinsheng, et al. Analysis on kinetic adaptability of Coats-Redfern model and DAEM in blending combustion of sludge and coal[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11):70-77.
- [17] 吕全伟, 林顺洪, 柏继松, 等. 含油污泥掺混废轮胎燃烧动力学[J]. 石油学报(石油加工), 2018, 34(2):380-388.
- Lyu Quanwei, Lin Shunhong, Bai Jisong, et al. Combustion kinetics of oily sludge blends waste tires[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2018, 34(2):380-388.
- [18] 邹文樵. 化学动力学中的补偿效应[J]. 大学化学, 1997(2):48-50.
- Zou Wenqiao. Compensation effects in chemical kinetics, University Chemical, 1997(2):48-50.
- [19] 郭汉贤, 王辉, 上官炬, 等. 补偿效应:一条化学/化工动力学基本定律的探讨[J]. 化学通报, 2018, 81(9):813-827.
- Guo Hanxian, Wang Hui, Shangguan Ju, et al. Compensation effect: A discussion on a basic kinetic law of chemistry/chemical engineering[J]. Chemistry, 2018, 81(9):813-827.