

基于热失重分析的盆式绝缘子热分解活化能的计算方法

金 虎¹, 李锐海¹, 孟晓波¹, 任 鹏², 丛浩熹², 李庆民²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关(GIS)在电力系统中应用广泛,其中盆式绝缘子长期在电热应力作用下不断发生老化降解,严重情况下可能会引发重大事故。盆式绝缘子的老化降解实际上是化学反应过程,因此研究盆式绝缘子的热分解过程具有重要意义。文中基于热分析动力学原理,采用热失重法分析了盆式绝缘子在5种不同升温速率下的热分解过程,采用Flynn-Wall-Ozawa法和Kissinger法计算了盆式绝缘子的活化能。研究表明,采用Flynn-Wall-Ozawa第1种方法和Kissinger方法计算结果基本一致,由Flynn-Wall-Ozawa第2种方法计算得到的活化能起初随着转化率的增加而增大,在转化率0.12处达到峰值,然后随着转化率的增大略有下降,并给出了这一现象的微观解释。上述研究对于准确计算盆式绝缘子的活化能,进而为揭示老化机理和评估老化程度具有一定的指导意义。

关键词: GIS; 盆式绝缘子; 热分析动力学; 活化能

Calculation Method of Thermal Decomposition Activation Energy of Basin-type Insulators Based on TG Analysis

JIN Hu¹, LI Ruihai¹, MENG Xiaobo¹, REN Peng², CONG Haoxi², LI Qingmin²

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Gas-insulated metal-enclosed switches(GIS)are widely used in power systems. Among them, basin-type insulators have been subjected to aging degradation under the effect of electro thermal stress for a long time, and serious accidents may be caused in severe cases. Aging degradation of basin-type insulator is actually a chemical reaction process, so it is of great importance to study the thermal decomposition process of basin-type insulator. Based on the principle of thermal analysis, the thermal decomposition process of the basin-type insulator under five different heating rates is analyzed by TG method. The activation energy of the basin-type insulator is calculated by the Flynn-Wall-Ozawa method and the Kissinger method. The results show that the calculated results by the first method of Flynn-Wall-Ozawa method and Kissinger method are basically the same. The activation energy calculated by the second method of Flynn-Wall-Ozawa method initially increases with the increase of conversion rate. Peak at a conversion rate of 0.12, then decrease slightly as the conversion rate increases and last gives a microscopic explanation of this phenomenon. The above research has certain guiding significance for accurately calculating the activation energy of the basin-type insulator, revealing the aging mechanism and evaluating the aging degree.

Key words: GIS; basin-type insulator; thermal analysis kinetics; activation energy

0 引言

随着中国电力工业的大力发展,气体绝缘金属

封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)以其独特的优点:加工工艺严格、技术先进、占地面积小、检修周期长、维护费用少等而被广泛应用于电力系统^[1-4]。

收稿日期:2018-01-17; 修回日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金(51477051,51737005);南方电网公司科技项目(SEPRI-K175010)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51477051, 51737005), the Southern Power Grid Technology Research Project(SEPRI-K175010).

盆式绝缘子在GIS中起到高压导体支撑、对地绝缘和气室隔离作用,是GIS的关键绝缘部件,直接关系到GIS设备的整体绝缘水平。运行实践发现,相当比例的GIS内部故障与盆式绝缘子有很大关系^[5]。对美国投运的GIS发生故障进行统计发现,在所有GIS故障中,涉及盆式绝缘子沿面放电所占比例最高^[6]。根据广东电网公司的运行数据发现,广东电网公司从2009—2011年共发生17起GIS内部故障,其中16起都与盆式绝缘子绝缘状况相关^[7]。进一步的研究表明,GIS内部故障大都是由于局部放电(电晕、火花和固体介质沿面放电)等潜伏性缺陷发展引起的^[8-9]。因此,为降低GIS运行故障率,特别为防止盆式绝缘子沿面闪络或绝缘击穿事故发生,保证电力系统可靠运行,对GIS盆式绝缘子老化程度和寿命预测尤为重要。

在GIS实际运行中,由于受到电的、热的等作用,盆式绝缘子会不断发生老化降解,引起盆式绝缘子绝缘强度下降。一般材料的老化降解过程实际上是化学反应过程,其老化降解过程与化学动力学参数密切相关,其化学稳定性很大程度上依赖于活化能^[10-11]。目前关于绝缘材料绝缘寿命的评估研究主要集中在变压器油—纸复合材料^[12-13]、电缆所用交联聚乙烯材料^[11, 14]、硅橡胶材料及上述材料复合之后的绝缘老化^[15-16],而对盆式绝缘子的研究多基于局部放电和介电性能等宏观电气参量^[17-18]因此,开展对盆式绝缘子的热分解动力学研究,分析其表观活化能,能为评估盆式绝缘子的老化程度和寿命预测奠定良好的基础。

文中以某公司生产的盆式绝缘子为例,利用热失重法,测试5组不同升温速率(5、10、15、20、25 °C/min)条件下的盆式绝缘子的热失重曲线,应用Kissinger法、Flynn-Wall-Ozwa法计算绝缘子的活化能,并分析了几种方法得出的活化能特点。

1 实验步骤

1.1 盆式绝缘子样本制备

文中以盆式绝缘子为实验对象,将盆式绝缘子切片磨成粉末,然后放置40°恒温干燥箱里干燥24 h。

1.2 热失重实验

该实验采用美国TA公司生产的SDT-Q600型TGA/DSC/DTA同步热分析仪(见图1),对盆式绝缘子(样品见图2)进行热失重分析测试,测试过程每次取样10 mg,升温速率为5、10、15、20、25 °C/min,使用Al₂O₃陶瓷坩埚,通以100 mL/min的氮气气氛条件,温度升至900 °C。



图1 SQT-600同步热分析仪

Fig. 1 SQT-600 simultaneous thermal analyzer

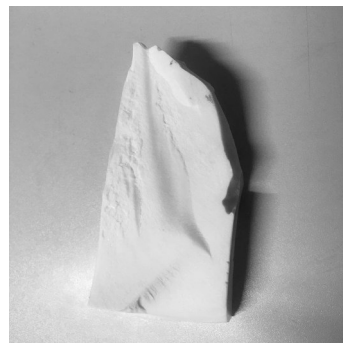


图2 盆式绝缘子样本

Fig. 2 Basin-type insulator samples

2 实验结果与分析

2.1 盆式绝缘子的热失重曲线

实验测得盆式绝缘子在不同升温速率下的热失重曲线和对热失重曲线所有的一阶导数DTG曲线见图3,不同升温速率下盆式绝缘子的DTG曲线见图4。10 °C/min升温速率热失重曲线和DTG曲线见图5,由热失重曲线可知,随着温度的升高,热失重曲线向着高温方向移动,起始分解温度和最大分解温度一致。由图5可知(以10 °C/min的升温速率为例),热失重曲线有3个失重阶段,其中质量损失主要集中在第3个阶段,5条热失重曲线的变化规律相同,因此在不同升温速率下盆式绝缘子的反应机理函数一致。

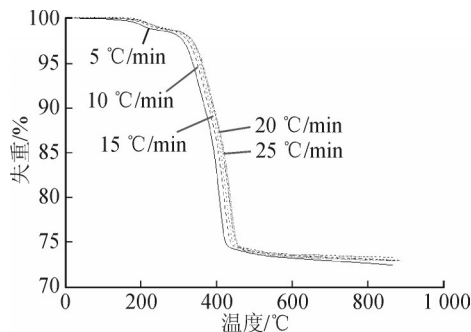


图3 不同升温速率下盆式绝缘子的热失重曲线

Fig. 3 Thermogravimetric analysis curves of basin-type insulators at different heating rates

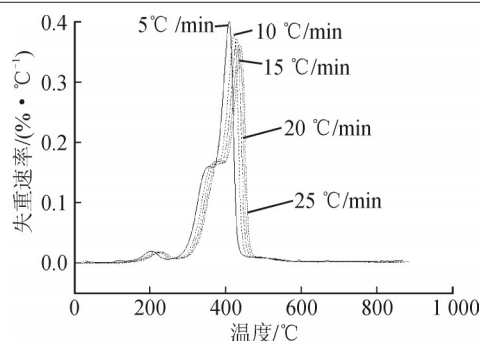


图4 不同升温速率下盆式绝缘子的DTG曲线

Fig. 4 The DTG curve of basin-type insulator at different heating rates

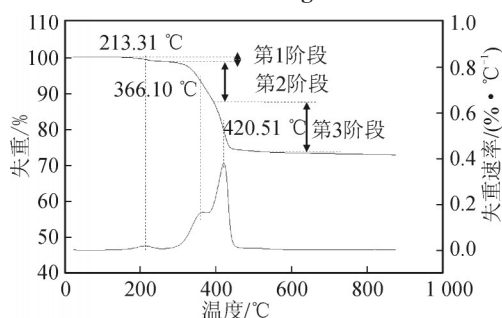


图5 10 °C/min升温速率热失重曲线和DTG曲线

Fig. 5 The DTG curve of basin-type insulator at 10 °C/min heating rates

2.2 动力学参数计算

非等温、非均相反应的动力学方程形式见式(1)

$$\frac{d\alpha}{dT} = \left(\frac{1}{\beta}\right) k(T) f(\alpha) \quad (1)$$

式(1)中: β 为升温速率; α 为转化率; $f(\alpha)$ 为反应机理函数; $k(T)$ 为速率常数。

动力学方程中的速率常数 k 与温度有非常密切的关系,其中 Arrhenius 通过模拟平衡常数—温度关系的形式提出的速率常数—温度关系最为常用,见式(2)

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

式(2)中: A 为指前因子; E 为活化能; R 为摩尔气体常量; T 为热力学温度。

将式(2)代入式(1)可得到非均相体系在非等温条件下的常用动力学方程式,见式(3)

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

通过对式(3)进行数学变换,结合热失重曲线和DTG曲线就能求解盆式绝缘子的活化能^[19]。

2.2.1 Flynn-Wall-Ozwa 法

$$\lg \beta = \lg \left[\frac{AE}{RG(\alpha)} \right] - 2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT} \quad (4)$$

式(4)中的, E 可用以下两种方式求得。

1)由不同升温速率下的 β 各峰顶温度 T_p 处各 α 值近似相等,因此在 $0 \sim \alpha_p$ 范围内值 $\lg \left[\frac{AE}{RG(\alpha)} \right]$ 都是相等的,因此可用 $\lg \beta - 1/T$ 成线性关系来确定 E 的值。各峰顶温度见表1。

表1 不同升温速率下热失重曲线峰值温度

Table 1 Peak temperature of the thermogravimetric curve at different heating rates

升温速率/(°C·min ⁻¹)	$T_p/^\circ\text{C}$	T_p/K
$\beta_1=5$	407.83	680.98
$\beta_2=10$	420.54	693.69
$\beta_3=15$	428.34	701.49
$\beta_4=20$	434.04	707.19
$\beta_5=25$	438.51	711.66

拟合曲线见图6^[20-21],所求活化能为200.96 kJ/mol。

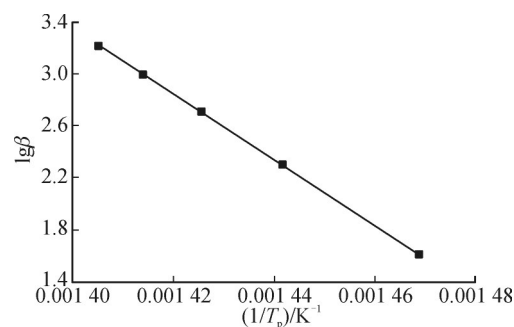


图6 Flynn-Wall-Ozwa法拟合直线

Fig. 6 Fitting curve obtained by Flynn-Wall-Ozwa method

2)由不同的升温速率下的 β 选择相同的转化率 α ,则 $G(\alpha)$ 是一个恒定值,这样 $\lg \beta - 1/T$ 就成线性关系,从斜率可求得 E 。选取不同转化率 α 对应的活化能的数值见表2。不同转化率 α 下的活化能变化曲线见图7。

表2 不同转化率 α 下的活化能Table 2 Activation energies at different conversion rates α

转化率 α	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
活化能/(kJ·mol ⁻¹)	104.44	156.92	176.28	183.11	187.03	191.16
转化率 α	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12
活化能/(kJ·mol ⁻¹)	197.76	204.91	211.77	218.36	224.05	224.53
转化率 α	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18
活化能/(kJ·mol ⁻¹)	223.26	220.03	218.11	214.79	212.99	212.62
转化率 α	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
活化能/(kJ·mol ⁻¹)	211.40	210.25	210.19	210.00	209.86	210.74

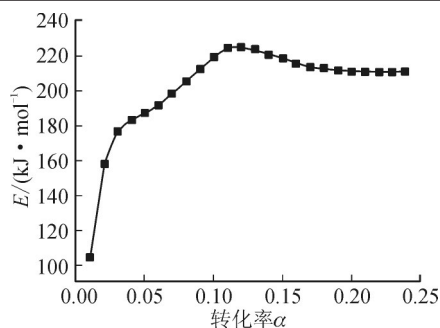


图7 活化能变化趋势图

Fig. 7 Activation energy change trend

2.2.2 Kissinger 法

$$\ln\left(\frac{\beta_i}{T_{pi}^2}\right) = \ln\left(\frac{A_k R}{E_k}\right) - \frac{E_k}{R} \frac{1}{T_{pi}} \quad (5)$$

假定在曲线峰顶温度 T_{pi} 处反应速率最大, 那么在温度 T_{pi} 处有 $\frac{d}{dt}\left[\frac{d\alpha}{dt}\right] = 0$, 且假设 $n(1-\alpha_p)^{n-1}$ 与 β 无关, 这样在不同程序升温速率 β 下测定一组热失重曲线, 得到相应的一组 T_{pi} , 以 $\ln\left(\frac{\beta_i}{T_{pi}^2}\right)$ 对 $\frac{1}{T_{pi}}$ 作图应是一条直线, 从该直线斜率可计算活化能。通过计算得到的活化能为 199.80 kJ/mol, 拟合曲线见图 8^[22]。

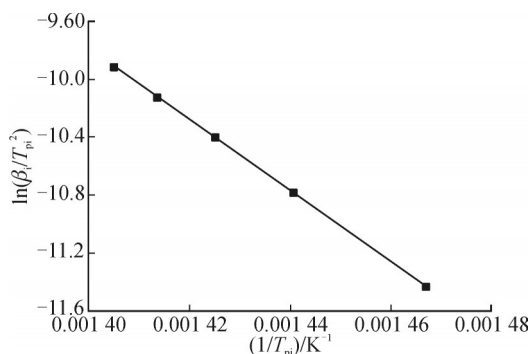


图8 Kissinger法拟合直线

Fig. 8 Fitting curve obtained by Kissinger method

2.2.3 结果分析

1) Kissinger法和 Flynn-Wall-Ozawa法第一种计算方法计算出的结果几乎一致, 其值都在 200 kJ/mol 附近。导致这样结果的原因是两种计算方法都选择的热失重曲线斜率最大处的值, 即 DTG 最大峰值处。

2) 由不同转化率 α 下所求的活化能在热失重反应初期值很低, 随着温度升高活化能值逐渐变大, 到达峰值后随着转化率的变大略有下降。反应初期首先是盆式绝缘子内部结晶水需要吸收一部分能量蒸发出来, 所以反应初期活化能的值不高。随着反应深度的增加, 发生物理交联的环氧树脂分子开始断裂, 而后发生化学交联的环氧树脂分子开始

断裂, 所需能量不断增大, 活化能逐渐变大。在峰值处, 既有物理交联和化学交联的环氧树脂分子断裂, 活化能数值最高。

3 结论

盆式绝缘子的老化过程实际上是化学反应过程, 研究对绝缘子的表观活化能可为评估绝缘子的老化程度和寿命预测奠定良好的基础。文中通过研究不同升温速率下的盆式绝缘子热失重曲线, 采用 Flynn-Wall-Ozawa 法和 Kissinger 法计算了盆式绝缘子在氮气气氛条件下的活化能, 主要结论如下:

1) 在热失重曲线最大斜率处所对应的温度计算出来的活化能 Kissinger 法和 Flynn-Wall-Ozawa 方法相一致。由 Flynn-Wall-Ozawa 方法计算的不同转化率 α 所对应的活化能值不同, 随着转化率变大活化能逐渐上升, 到达峰值后随着转化率的变大略有下降。

2) 活化能值理论上应该是恒定的, 由于盆式绝缘子是由环氧树脂、固化剂和添加剂组成的混合物, 所以活化能数值有一定的变化范围。盆式绝缘子材料的热失重曲线由 3 个台阶组成, 探究 3 个阶段反应过程和反应活化能, 将有助于进一步揭示盆式绝缘子的老化机理, 为提高盆式绝缘子的寿命提供一定知识基础。

参考文献:

- [1] 齐波, 高春嘉, 邢照亮, 等. 直流/交流电压下 GIS 绝缘子表面电荷分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5990-6001.
QI Bo, GAO Chunjia, XING Zhaoliang, et al. Distribution characteristic for surface charge on GIS insulator under DC/AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5990-6001.
- [2] 周鑫, 鲁铁成, 罗容波, 等. 气体绝缘组合电器触头电接触状态检测与评估方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 217-224.
ZHOU Li, LU Tiecheng, LUO Rongbo, et al. Detection and evaluation method of electrical contact state in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 217-224.
- [3] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输变电装备最新技术进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [4] YAO Liangzhong, LI Naihu, HAO Kou, et al. Reliability tests of a wireless system of monitoring and controlling for

- high voltage switch cabinets[C]//2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China: IEEE, 2010: 1-5.
- [5] OKUBO H. Recent activity and future trend on ageing characteristics of electrical insulation in GIS[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Brisbane, Australia: [s.n.], 1994: 837-840.
- [6] ERIKSSON A, PETTERSSON K G, KRENICKY A, et al. Experience with gas-insulated substations in the USA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 210-218.
- [7] CHEN Jun, ZHOU Wenjun, YU Jianhui, et al. Insulation condition monitoring of epoxy spacers in GIS using a decomposed gas CS₂[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2152-2157.
- [8] 丁登伟, 唐 诚, 高文胜, 等. GIS中典型局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3243-3251.
- DING Dengwei, TANG Cheng, GAO Wensheng, et al. Frequency attributes and propagation properties of typical partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3243-3251.
- [9] 齐 波, 高春嘉, 赵林杰, 等. 交/直流电压下气体绝缘变电站盆式绝缘子表面电荷对闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 915-922.
- QI Bo, GAO Chunjia, ZHAO Linjie, et al. Influence of surface charge on flashover voltage of gas insulated substation basin insulator under AC and DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 915-922.
- [10] 文庆珍, 朱金华, 余 超, 等. 丁苯橡胶老化表观活化能的实验研究[J]. 弹性体, 2009, 19(2): 31-34.
- WEN Qingzhen, ZHU Jinhua, YU Chao, et al. Finite element analysis of rolling contact characteristics for radial tire with grooved tread patterns[J]. China Elastomerics, 2009, 19(2): 31-34.
- [11] 刘 刚, 刘斯亮, 金尚儿, 等. 基于理、化、电特性 110 kV XLPE绝缘电缆剩余寿命的综合评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 72-79.
- LIU Gang, LIU Siliang, JIN Shang'er, et al. Comprehensive evaluation of remaining life of 110 kV XLPE insulated cable based on physical, chemical and electrical properties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 72-79.
- [12] 吴旭涛, 李秀广, 李军浩, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 128-131.
- WU Xutao, LI Xiuguang, LI Junhao, et al. PD characteristics over oil/paper interface stressed by AC and DC composite voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 128-131.
- [13] 廖瑞金, 张 爽, 杨丽君, 等. 天然酯-纸绝缘与矿物油-纸绝缘的热老化及工频击穿特性对比[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 769-775.
- LIAO Ruijin, ZHANG Shuang, YANG Lijun, et al. Comparative analyses of thermal aging and power frequency breakdown characteristics between natural ester-paper insulation and mineral oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 769-775.
- [14] 刘 蓉, 李继胜, 田维坚, 等. XLPE电力电缆典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 44-50.
- LIU Rong, LI Jisheng, TIAN Weijian, et al. Measurement and analysis of partial discharge on typical defects in XLPE power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 44-50.
- [15] 张冠军, 赵 林, 周润东, 等. 硅橡胶复合绝缘子老化表征评估研究的现状与进展[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 1-15.
- ZHANG Guanjin, ZHAO Lin, ZHOU Rundong, et al. Review on aging characterization and evaluation of silicon rubber composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 1-15.
- [16] 常文治, 阎春雨, 李成榕, 等. 硅橡胶/胶联聚乙烯界面金属颗粒沿面放电严重程度的评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 245-254.
- CHANG Wenzhi, YAN Chunyu, LI Chengrong, et al. Assessment of creeping discharge initiated by metal particles on the silicone rubber/XLPE interface in cable joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 245-254.
- [17] 周文俊, 乔胜亚, 李 丽, 等. GIS中盆式绝缘子沿面放电的新特征气体CS₂[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 848-856.
- ZHOU Wenjun, QIAO Shengya, LI Li, et al. Creeping discharge monitoring of epoxy spacers in GIS using a new target gas CS₂[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 848-856.
- [18] 黄炎光, 易 鹭. 热老化对干式变压器环氧树脂介电性能的影响[J]. 绝缘材料, 2016, 49(9): 53-56.
- HUANG Yanguang, YI Lu. Effect of thermal ageing on dielectric property of epoxy resin for dry-type transformer[J]. Insulating Materials, 2016, 49(9): 53-56.
- [19] 胡荣祖, 高胜利, 赵凤起, 等. 热分析动力学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2008: 2-4.
- HU Rongzu, GAO Shengli, ZHAO Fengqi, et al. Thermal analysis kinetics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008: 2-4.
- [20] OZAWA T. A new method of analysing thermogravimetric data[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 1965, 38(11): 1881-1886.
- [21] FLYNN J H, WALL L A. A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters, 1966, 4(5): 323-328.
- [22] KISSINGER H E. Reaction kinetics in differential thermal

- tube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(3): 357-401.
- [15] WU Chaofu, XU Weijian. Atomistic molecular modelling of crosslinked epoxy resin[J]. Polymer, 2006, 47(16): 6004-6009.
- [16] PLIMPTON S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 117(1): 1-19.
- [17] JIANG D, VAN DUIN A C T, GODDARD W A, et al. Simulating the initial stage of phenolic resin carbonization via the ReaxFF reactive force field[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2009, 113(25): 6891-6894.
- [18] 张世良, 戚力, 高伟, 等. 分子模拟中常用的结构分析与表征方法综述[J]. 燕山大学学报, 2015, 39(3): 213-220.
- ZHANG Shiliang, QI Li, GAO Wei, et al. Summary of methods for structural analysis and characterization in molecular modeling[J]. Journal of Yanshan University, 2015, 39(3): 213-220.
- [19] RAASKA T, NIEMELA S, SUNDHOLM F. Atom-based modeling of elastic constants in amorphous polystyrene[J]. Macromolecules, 1994, 27(20): 5751-5757.
- [20] 吴超富. 交联环氧树脂的分子模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- WU Chaofu. Atomistic molecular simulations of crosslinked epoxy resins[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [21] JUND P, JULLIEN R. Molecular-dynamics calculation of the thermal conductivity of vitreous silica[J]. Physical Review B, 1999, 59(21): 13707.
- [22] MÜLLER-PLATHE F. A simple nonequilibrium molecular dynamics method for calculating the thermal conductivity[J]. The Journal of Chemical Physics, 1997, 106(14): 6082-6085.
- [23] GREEN M S. Markoff random processes and the statistical mechanics of time-dependent phenomena. II. Irreversible processes in fluids[J]. Journal of Chemical Physics, 1954, 22(3): 398-413.
- [24] KUBO R. Statistical-mechanical theory of irreversible processes. I. General theory and simple applications to magnetic and conduction problems[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1957, 12(6): 570-586.
- [25] SCHUELER R, PETERMANN J, SCHULTE K, et al. Agglomeration and electrical percolation behavior of Carbon black dispersed in epoxy resin[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 63(13): 1741-1746.
- [26] NAKAMURA Y, YAMAGUCHI M, OKUBO M, et al. Effect of particle size on the fracture toughness of epoxy resin filled with spherical silica[J]. Polymer, 1992, 33(16): 3415-3426.

韩智云(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究新型特高压直流绝缘方面。

(上接第48页)

analysis[J]. Analytical Chemistry, 1957, 29(11): 1702-1706.

金虎(1986—), 男, 工程师, 主要从事绝缘材料老化评估方面的研究工作。

李锐海(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事绝缘材料老化评估方面的研究工作。

孟晓波(1986—), 男, 工程师, 主要从事绝缘材料老化评

估方面的研究工作。

任鹏(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事绝缘材料老化评估方面的研究工作。

丛浩熹(1989—), 男, 讲师, 主要从事绝缘材料老化评估方面的研究工作。

李庆民(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事新型高压电器方面的科学研究。