

# 空客320货舱衬板复合材料的热解和燃烧特性

贾旭宏 杨晓光 徐松涛 马俊豪 薛杨武

(中国民用航空飞行学院民航安全工程学院, 广汉 618307)

**文 摘** 使用热重分析仪和锥形量热仪在相同条件下分析对比两种试验材料空客320货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂)和3240玻纤板-FR4(玻璃纤维/环氧树脂)的热解和燃烧特性。试验结果表明:空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4的热解分为4个和3个阶段,货舱衬板的初始热分解温度、点燃时间及燃烧时长均小于3240玻纤板-FR4。3240玻纤板-FR4的有烟时间、产烟率(RSR)及总产烟量(TSR)大于货舱衬板,且产烟率(RSR)及总产烟量(TSR)分别是货舱衬板的2倍、3.45倍;3240玻纤板-FR4的热释放速率(HRR)及总热释放量(THR)大于货舱衬板,且热释放速率峰值(pk-HRR)及总热释放量(THR)分别是货舱衬板的1.47倍、1.94倍。故空客320货舱衬板在火灾发生后对人的生命安全及飞机的运行安全危险性小。

**关键词** 复合材料,热解特性,酚醛树脂,产烟率,热释放速率

中图分类号:V259

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.04.016

## Characteristics of Pyrolysis and Combustion of Airbus 320 Cargo Hold Lining Composite

JIA Xuhong YANG Xiaoguang XU Songtao MA Junhao XUE Yangwu

(College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307)

**Abstract** The pyrolysis and combustion characteristics of Airbus 320 cargo hold liner (fiberglass/phenolic resin) and 3240 fiberglass board-FR4 (fiberglass/epoxy resin) were analyzed and compared by thermal gravimetric analyzer and cone calorimeter under the same conditions. The results show that the pyrolysis of Airbus 320 cargo hold liner and 3240 fiberglass board-FR4 can be divided into four and three stages, and the initial thermal decomposition temperature, ignition time and combustion duration of the cargo hold liner are all less than that of 3240 fiberglass board-FR4. The smoke time, release smoke rate (RSR) and total smoke release (TSR) of 3240 fiberglass board-FR4 are higher than the cargo hold liner, and the release smoke rate (RSR) and total smoke release (TSR) are 2 and 3.45 times higher than the cargo hold liner. The heat release rate (HRR) and total heat release (THR) of 3240 fiberglass board-FR4 are greater than that of cargo hold liner, and the peak heat release rate (pk-HRR) and total heat release (THR) of 3240 fiberglass board-FR4 are 1.47 and 1.94 times of cargo hold liner. Therefore, the Airbus 320 cargo hold liner is less dangerous to human life and aircraft operation safety after a fire.

**Key words** Composite, Pyrolysis characteristics, Phenolic resin, Release smoke rate, Heat release rate

### 0 引言

进入21世纪以来,我国航空航天事业发展迅速,航空货运周转量的增长速度大于客运周转量的增长速度。由于货舱起火时而发生,所以我国民航行业标准MH/T 6086—2012要求货舱衬板材料的耐烧穿时间必须大于5 min,以提供足够的时间启动灭火系

统<sup>[1]</sup>,用不同材料就会导致预期之外的火灾发生<sup>[2]</sup>。玻璃纤维树脂基复合材料因其优良的性能被广泛用于航空航天、轨道交通等领域。在飞机舱内不同位置材料对成本、烟雾量及耐火性的要求不同,环氧树脂体系在早期广泛应用于货舱衬板,酚醛树脂体系由于优良的耐火性及低烟排放开始取代环氧树脂。

收稿日期:2020-12-30

基金项目:民航局安全能力建设项目(0242023)

第一作者简介:贾旭宏,1985出生,博士,副教授,从事民用飞机非金属材料燃烧特性与灭火剂合成研究工作。E-mail:jiaxuhong02@163.com

因此,对复合材料性能要求也不断提高<sup>[3-6]</sup>。

张鹏飞等<sup>[7]</sup>根据 FAR 25. 853 飞机材料的燃烧实验方法,测试飞机结构物质(玻璃纤维/酚醛树脂、碳纤维/环氧树脂)的燃烧特性,相比于碳纤维/环氧树脂,玻璃纤维/酚醛树脂的阻燃性能更好。杜宇等<sup>[8]</sup>和李胜等<sup>[9]</sup>通过合成一种阻燃环氧树脂,有效地评估阻燃剂对环氧树脂的燃烧性能,是否产生协同效应。CHEN 等<sup>[10]</sup>采用锥形量热仪对玻璃纤维/酚醛树脂复合材料的着火及燃烧特性开展了实验研究,得出了质量损失率(MLR)和热释放率峰值(pk-HRR)与热通量转化点火时间的线性关系。黄娜等<sup>[11]</sup>研究了氨酚醛树脂的热解反应下,改变升温速率对复合材料的表观活化能的影响。

货舱的火灾危险严重影响着飞机的安全运行。本试验用热重分析仪和锥形量热仪研究典型货舱壁板材料的热解和燃烧特性,降低火灾发生的潜在危险,为我国研发用于飞机货舱衬板的阻燃材料指明方向及防火灭火提供理论依据。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 原材料

空客 320 货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂);3240 玻纤板-FR4(玻璃纤维/环氧树脂)。

### 1.2 试验仪器

TGA 4000 型热重分析仪,美国 PerkinElmer 公司;CCT 型锥形量热仪,中国莫帝斯公司。

### 1.3 试验制备

材料自身厚度限制,燃烧测试样品尺寸为 100 mm×100 mm×1 mm 的 2 种样品做 3 组平行试验;热性能分析称重样品大约 10 mg

### 1.4 试验方法

(1)热解特性:用热重分析法在空气环境,温度范围 30~800 °C,升温速率 10 °C/min,取样品大约 10 mg

(2)燃烧分析:用锥形量热仪在辐射强度为 35 kW/m<sup>2</sup> 下进行测定,分析对比两种材料的平均点燃时间、热释放速率、总热释放量、产烟速率、总烟释放量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热解特性

树脂基复合材料在一定热流条件下持续受热时,首先发生表层树脂热分解,释放出小分子气体,生成炭化层、热解层,其树脂的裂解,向外引射分解气体,对炭层起到一定保护作用<sup>[12]</sup>。

由图 1 可知,酚醛树脂基体的初始热分解温度是 251.2 °C。该材料在 251.2~384.6 °C 和 385~574.6 °C 均存在明显热失重,由 DTG 曲线得知 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 峰值温度分别为 337.7 和 541.1 °C。图 2 可知,空客 320 货舱衬板材料的初始热分解温度是 131.7 °C,热解行为是在连续失重的情况下发生的,该失重依次由四个

峰 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub> 和 D<sub>4</sub> 组成。在 131.7~290 °C 下的 TG 曲线相对平缓,有轻微重量损失,对应的 DTG 曲线有两个热分解小峰 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub>,峰值温度分别为 191.1 °C 和 282.5 °C。货舱衬板材料在 290~375 °C 和 376~685 °C 均存在明显热失重,由 DTG 曲线得知 D<sub>3</sub> 和 D<sub>4</sub> 峰值温度分别为 326.7 和 532.2 °C。这与酚醛树脂基体热分解温度相似。290~375 °C 货舱衬板材料失重率为 5.7%;在 376~685 °C 货舱衬板材料失重率为 25.5%,此阶段货舱衬板材料质量损失最多,热分解速率最快,是主要分解阶段。根据 TG 曲线得空客 320 货舱衬板材料 800 °C 剩余量为 67.74%。

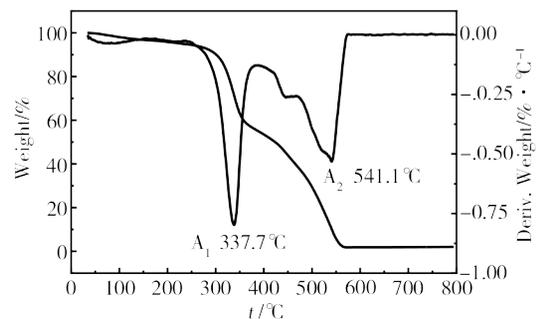


图 1 酚醛树脂基体的热失重和失重速率曲线

Fig. 1 TG and DTG curves of phenolic resin matrix

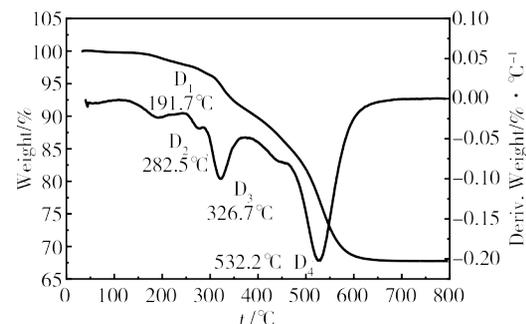


图 2 空客 320 货舱衬板复合材料的热失重和失重速率曲线

Fig. 2 TG and DTG curves of Airbus 320 cargo hold lining composite

由图 3 可知,环氧树脂基体的初始热分解温度是 376.8 °C。该材料在 376.8~446.7 °C 和 498.1~635.4 °C 均存在明显热失重,由 DTG 曲线得知 B<sub>1</sub> 和 B<sub>2</sub> 峰值温度分别为 407.1 和 568.7 °C。图 4 可知,3240 玻纤板-FR4 材料的初始热分解温度是 219.2 °C,热解行为是在连续失重的情况下发生的,该失重依次由三个峰 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 和 P<sub>3</sub> 组成。材料在 352~461.6 °C 和 479.4~583.8 °C 均存在明显热失重,由 DTG 曲线得知 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 峰值温度分别为 413.1 和 513.2 °C。这与环氧树脂基体热分解温度相似。材料在 479.4~583.8 °C 失重率为 9.86%;而在 219.2~461.6 °C 3240 玻纤板-FR4 材料失重率为 17.39%,此阶段 3240 玻纤板-FR4 材料质量损失最多,热分解速率最快,是主要分解阶段。在 615.4~719.8 °C 下的 TG 曲线相对平缓,有轻微重量损失,根据 DTG 曲

线有一个热分解小峰 $P_3$ ,峰值温度分别为 $684.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据TG曲线得3240玻纤板-FR4材料 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 剩余量为 $71.81\%$ 。

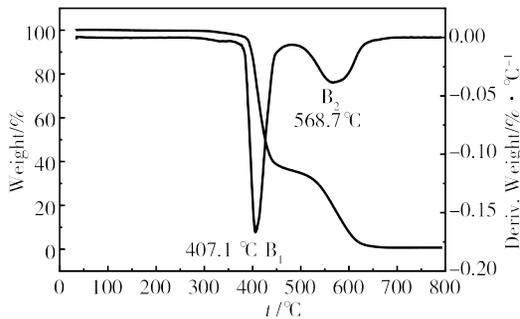


图3 环氧树脂基体的热失重和失重速率曲线  
Fig. 3 TG and DTG curves of epoxy resin matrix

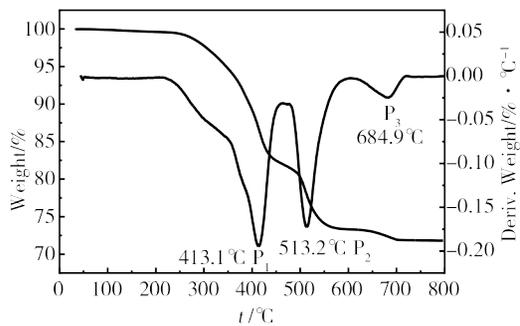


图4 3240玻纤板-FR4复合材料的热失重和失重速率曲线  
Fig. 4 TG and DTG curves of 3240 fiberglass board-FR4 composite

综上所述,树脂基体加入阻燃剂和纤维等能促进材料的热分解,使其初始热分解温度降低。空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料热失重过程取决于树脂基体热分解行为,因为玻璃纤维的熔化温度在 $1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右<sup>[13]</sup>。

## 2.2 燃烧特性分析

### 2.2.1 点燃时间及燃烧时长

点燃时间与燃烧时长是评价固体材料燃烧性能的重要指标<sup>[14]</sup>。表1为空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料在热辐射强度下的点燃时间和燃烧时长。表1可知:2种材料在较短时间内能够被点燃,空客320货舱衬板相比于3240玻纤板-FR4复合材料的点燃时间和燃烧时长较短。

表1 两种复合材料的点燃时间及燃烧时长

原材料	点燃时间/s	燃烧时长/s
空客320货舱衬板	14	41
3240玻纤板-FR4	32	91

### 2.2.2 RSR、TSR分析

2种材料在火灾环境中持续受热分解生成大量的烟气颗粒和 $\text{NO}_x$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}$ 等有毒气体,其在货舱两侧短

时间内扩散到客舱,危害到乘客人员的生命健康。产烟率(RSR)和总产烟量(TSR)是评估火灾危害程度的重要参数。图5和图6为空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料在热辐射强度下的产烟率和总产烟量曲线。图5可知,2种复合材料在点燃之后空客320货舱衬板在 $42\text{ s}$ 到达产烟率峰值 $0.015\text{ m}^2/\text{s}$ ,3240玻纤板-FR4在 $76\text{ s}$ 到达产烟率峰值 $0.029\text{ m}^2/\text{s}$ 且大约是空客320货舱衬板的2倍。这是因为与3240玻纤板-FR4(玻璃纤维/环氧树脂)相比,空客320货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂)在燃烧热分解时有较强的热稳定性和炭化趋势,炭层的形成使得可燃裂解产物避免转换成气体燃料,抑制了聚合物材料的燃烧<sup>[15]</sup>。由于辐射温度的持续作用,使材料处于阴燃状态一直会产生烟气。所以,空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4分别在 $29\sim 73$ 和 $35\sim 144\text{ s}$ 持续产生烟气,且有烟时间分别是 $44$ 和 $109\text{ s}$ 。图6可知,空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4的总产烟量分别为 $0.447$ 和 $1.541\text{ m}^2$ ,其后者总产烟量是前者的 $3.45$ 倍。因此,可以看出2种复合材料开始产烟时间相差 $6\text{ s}$ ,对3240玻纤板-FR4(玻璃纤维/环氧树脂)而言,空客320货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂)的有烟时间、产烟率及总产烟量明显降低。

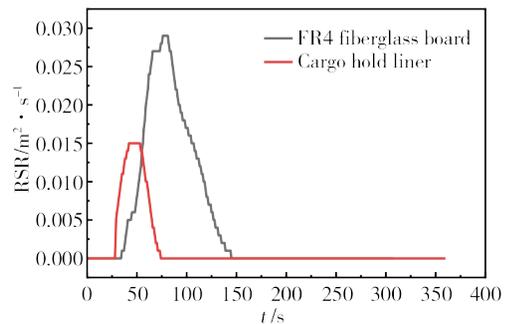


图5 空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料的RSR曲线

Fig. 5 RSR curves of Airbus 320 cargo hold liner and 3240 fiberglass board-FR4 composite

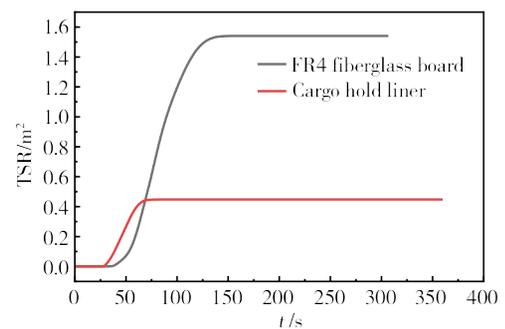


图6 空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料的TSR曲线

Fig. 6 TSR curves of Airbus 320 cargo hold liner and 3240 fiberglass board-FR4 composite

### 2.2.3 HRR、THR分析

聚合物燃烧一定会释放大量的热量,而热释放速率是衡量火灾危险性中最重要的单一变量<sup>[16]</sup>。图7和图8为空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料在热辐射强度下的热释放速率和总热释放量曲线。图7可知,2种复合材料在点燃之后空客320货舱衬板在63 s达到热释放速率峰值(pk-HRR)83.28 kW/m<sup>2</sup>,3240玻纤板-FR4在83 s达到热释放速率峰值(pk-HRR)122.32 kW/m<sup>2</sup>且短时间内释放大热量,是空客320货舱衬板的1.47倍。这是因为2种复合材料的表面在持续施加热辐射温度的作用下短时间内释放出大量热量。而对于空客320货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂)而言,在材料表面热量的聚集促使温度升高,内部孔隙率随密度的降低而增高,且酚醛树脂在热解过程中会产生大量的炭层,使得热释放速率逐渐减少<sup>[17]</sup>。图8可知,聚合物燃烧是有焰燃烧和无焰燃烧的一个持续过程,空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4的总热释放量分别为3981.2和7726.2 MJ/m<sup>2</sup>。其后者总热释放量是前者的1.94倍。综上,空客320货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂)的热释放速率峰值、总热释放量均少于3240玻纤板-FR4(玻璃纤维/环氧树脂)。

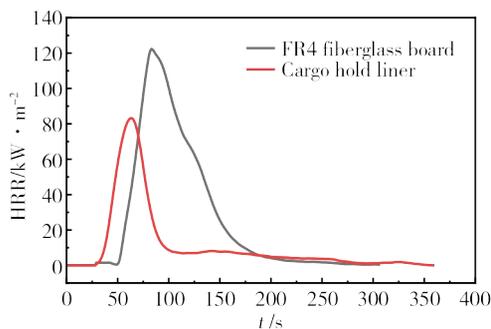


图7 空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料的HRR曲线

Fig. 7 HRR curves of Airbus 320 cargo hold liner and 3240 fiberglass board-FR4 composite

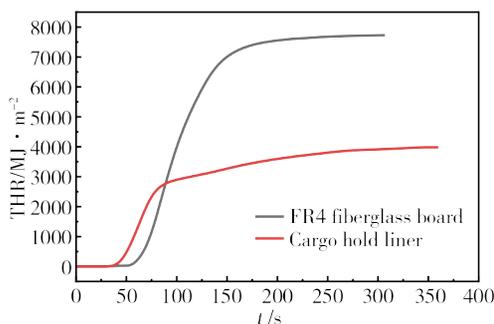


图8 空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料的THR曲线

Fig. 8 THR curves of Airbus 320 cargo hold liner and 3240 fiberglass board-FR4 composite

### 3 结论

(1)空客320货舱衬板和3240玻纤板-FR4复合材料在空气气氛下热解过程分别为4个和3个阶段,且前者的初始分解温度低于后者。两种复合材料的剩余量分别为67.74%和71.81%。

(2)在相同热辐射强度条件下进行火灾模拟,得出3240玻纤板-FR4的产烟率及总产烟量分别是货舱衬板的2倍、3.45倍;3240玻纤板-FR4的热释放速率峰值及总热释放量分别是货舱衬板的1.47倍、1.94倍。通过对比分析有烟时间、RSR、TSR、pk-HRR、THR结果表明,空客320货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂)有很好的低烟雾性、低毒性和耐火性。

(3)相比3240玻纤板-FR4(玻璃纤维/环氧树脂)而言,空客320货舱衬板(玻璃纤维/酚醛树脂)在火灾发生后对人的生命安全及飞机的运行安全危险性小。

#### 参考文献

- [1] MH/T 6086—2012, 飞机货舱衬板耐烧穿试验[S].
- [2] MH/T 6086—2012, Flame burn through test for aircraft cargo liners [S].
- [3] 蔡菊生. 先进复合材料在航空航天领域的应用[J]. 合成材料老化与应用, 2018,47(6): 94-97.
- [4] CAI Jusheng. Application of advanced composite materials in aerospace [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018,47(6):94-97.
- [5] 朱永茂. 国外酚醛树脂及其塑料发展动向[J]. 热固性树脂, 2003(6): 28-30,36.
- [6] ZHU Yongmao. Development trend of phenolic resin and plastics used it [J]. Thermosetting Resin, 2003(6):28-30,36.
- [7] 马洪霞. 阻燃低烟低毒复合材料在交通运输领域的发展Ⅱ. 基体树脂分析[J]. 热固性树脂, 2016,31(6): 65-68.
- [8] MA Hongxia. Development of composites with superior FST properties in transportation Ⅱ. Analysis of matrix resin [J]. Thermosetting Resin, 2016,31(6):65-68.
- [9] [5] Federal Aviation Regulations. Section 25.853: Appendix C Materials Used in Aircraft[S].
- [10] [6] Sara Black. Advanced materials for aircraft interiors [R]. 2016.
- [11] [7] 张鹏飞,王旭. 民航客机火灾风险浅析[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010,27(1): 77-80.
- [12] ZHANG Pengfei, WANG Xu. Analysis of civil aircraft fire hazard[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2010,27(1):77-80.
- [13] [8] 杜宇,张宝艳,王婷婷,等. 民机内饰用阻燃环氧树脂及复合材料性能研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(4): 56-60.
- [14] DU Yu, ZHANG Baoyan, WANG Tingting, et al. Study on properties of flame retardant epoxy resin and composites for civil

aircraft interior decoration[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2019(4):56-60.

[9] 李胜, 张广鑫, 王文博, 等. 基于锥形量热仪法对环氧树脂燃烧性能的研究[J]. *化学与粘合*, 2019,41(6): 457-459,483.

LI Sheng, ZHANG Guangxin, WANG Wenbo, et al. Research on the combustion performance of epoxy resin based on the cone calorimeter[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2019,41(6): 457-459,483.

[10] CHEN R Y, LU S X, LI C H, et al. Experimental study on ignition and combustion characteristics of fibre-reinforced phenolic composite [J]. *Key Engineering Materials*, 2016,707: 13-22.

[11] 黄娜, 刘亮, 王晓叶. 热重质谱联用技术对酚醛树脂热解行为及动力学研究[J]. *宇航材料工艺*, 2012,42(2): 99-102.

HUANG Na, LIU Liang, WANG Xiaoye. Pyrolysis and kinetics of phenolic resin by TG-MS analysis [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012,42(2):99-102.

[12] 郭梅梅, 匡松连, 华小玲, 等. 树脂基复合材料的分解防热效率[J]. *宇航材料工艺*, 2012,42(2): 58-60.

GUO Meimei, KUANG Songlian, HUA Xiaoling, et al. Heat-resistant effect of pyrolysis of resin composites [J].

*Aerospace Materials & Technology*, 2012,42(2):58-60.

[13] 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 玻璃纤维/环氧树脂复合材料热分解动力学参数的确定[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(9): 1969-1972.

CHEN Minsun, JIANG Houman, LIU Zejin. Determination of thermal decomposition kinetic parameters of glass-fiber/epoxy composite [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9):1969-1972.

[14] LAUTENBERGER C, TORERO J, FERNANDEZ-PELLO C. Understanding materials flammability, flammability testing of materials used in construction, Transport and mining [M]. UK: Woodhead Publishing, 2006:1-21.

[15] 杨雪梅. 酚醛阻燃复合材料在民用飞机上的应用[J]. *工程与试验*, 2015,55(3): 30-34,103.

Yang Xuemei. Application of flame retardant phenolic composite to civil aircraft[J]. *Engineering & Test*. 2015,55(3): 30-34,103.

[16] BABRAUSKAS V, PEACOCK R D. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard [J]. *Fire Safety Journal*, 1992,18(3): 255-272.

[17] KNOP A, PILATO L A. Degradation of phenolic resins by heat, oxygen and high-energy radiation [J]. *Phenolic Resins*, 1985:140-146.