

# 聚酰亚胺复合材料发动机调节片的研制

崔超 易凯 赵伟栋 耿东兵 蒋文革

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 对发动机调节片用聚酰亚胺树脂及其复合材料性能、调节片力学仿真设计和装机试车考核三方面进行研究。采用 DMA、TGA、流变仪和万能力学试验机考察了 KH308 树脂及其复合材料性能,并结合 ANSYS 力学仿真计算等方法对复合材料调节片进行了结构设计。结果表明 KH308 树脂熔体最低黏度为  $14.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,具有良好的成型工艺性; $T_g$  为  $335^\circ\text{C}$ , $T_d^5$  为  $468.8^\circ\text{C}$ , MT300/KH308 复合材料具有优良的耐热、抗振动及耐老化性能,可以有效替代钛合金调节片,实现减重 52%,各项功能指标均满足设计要求。

**关键词** 聚酰亚胺,碳纤维复合材料,耐高温,发动机

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.03.014

## Polyimide Composite Adjustment Sheet for Aeroengine

CUI Chao YI Kai ZHAO Weidong GENG Dongbing JIANG Wenge

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** A kind of polyimide based composite aeroengine adjustment sheet was prepared, modeling analyzed and tested. The polyimide resin and its composite performances were studied by DMA and TGA, as well as rheological and mechanical testing machine. The results show that KH308 resin has excellent processing property; the  $T_g$  tested by DMA is  $335^\circ\text{C}$ ,  $T_d^5$  is  $468.8^\circ\text{C}$ ; the MT300/KH308 composite has pretty high temperature resistance, vibration resistance and aging resistance. In addition, instead of titanium alloy adjustment sheet, the polyimide based composite aeroengine adjustment sheet can achieve weight loss of 52% and the performances of polyimide based composite aeroengine adjustment sheet can meet the design requirements.

**Key words** Polyimide, Carbon fiber composite, High temperature resistant, Aeroengine

### 0 引言

当今,世界各主要发动机厂商都在大力推广先进复合材料在大推力发动机上的使用,树脂基复合材料在国外发动机上已得到了广泛应用。其中,采用聚酰亚胺复合材料制造的喷管外调节片已在多个著名发动机型号上得以应用<sup>[1]</sup>。早期的发动机喷管外调节片采用十多片不锈钢或钛合金金属结构,数量多,制造周期长、效率较低。自 20 世纪 70 年代,随着复合材料技术的日臻成熟,各种新型的轻量化技术纷纷发展起来,希望通过复合材料的使用使发动机更轻、更安全、燃油效率更高,国外各大军用发动机制造商已经完成复合材料调节片替代传统的金属调节片的工作,见图 1。目前国内军用发动机仍采用金属外调节片,因此,开展轻量化复合材料外调节片在国产军用

发动机上的应用研究具有开拓意义。

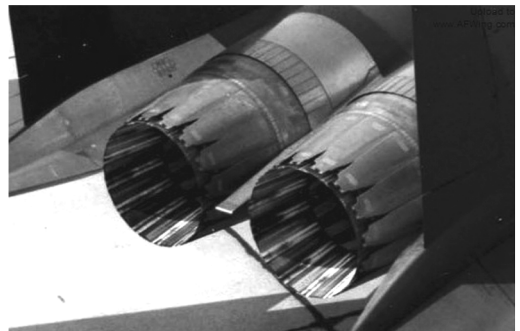


图 1 P & WA 公司 F100 发动机复合材料外调节片  
Fig.1 F100 engine adjustment sheet of P & WA company

聚酰亚胺复合材料具有耐高温、比强度、比模量高、抗疲劳性能好、耐化学稳定性好等特点<sup>[2-4]</sup>。本文主要对调节片用聚酰亚胺树脂及其复合材料性能

收稿日期:2016-03-26

作者简介:崔超,1987 年出生,硕士,主要从事树脂基复合材料的研究工作。E-mail:superc703@163.com

进行研究,通过力学仿真计算设计成型复合材料调节片结构件,并对复合材料调节片进行装机试车考证。

## 1 实验

### 1.1 原材料

KH308 树脂,中科院化学所;MT300 碳纤维,中科院山西煤化所。

### 1.2 主要仪器

Physica MCR301 流变仪, Anton Paar 公司;动力学分析仪,日本精工(升温速率为  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $50 \sim 450^{\circ}\text{C}$ );TGA2050 热分析仪,TA 公司(升温速率为  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $50 \sim 800^{\circ}\text{C}$ );MTS65/G 电子万能材料试验机,弯曲性能按 GB/T 3356—1999,层间剪切性能按 JC/T 773—1996 进行测试。

### 1.3 试样制备

采用湿法制备 MT300/KH308 预浸料,含胶量控制在  $45\% \sim 50\%$ ,纤维面密度为  $(160 \pm 5) \text{ g}/\text{m}^2$ ,单层厚度为  $0.15 \text{ mm}$ <sup>[5]</sup>。采用自动下料机裁剪  $260 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$  规格预浸料,铺层厚度为  $2 \text{ mm}$  层合板,包覆完毕后采用热压罐吸胶、固化,得到 MT300/KH308 复合材料层合板,无损检测通过后进行机械加工得到力学性能等测试试样。

## 2 结果与讨论

### 2.1 调节片结构设计

由于发动机调节片工作时主要是弯曲受力的循环状态,通过力学仿真对钛合金调节片和同等结构的聚酰亚胺复合材料调节片进行挠度形变仿真计算,通过网格划分,输入边界条件一端固支一端施加集中荷载,在仅受弯曲受力状态下进行刚度一致性分析,计算结果见图 2、图 3。

可以看出,聚酰亚胺复合材料调节片的挠度变形大于钛合金调节片的。在设计时,可以在受弯工作区域的铺层设计时适当增加刚度。从图 3 得知,钛合金调节片和聚酰亚胺复合材料调节片的应力分布基本一致,最大应力分布区都集中在前端受弯工作区和翼缘两侧,可采用钛合金调节片网格增强筋的设计形式,由此成型的聚酰亚胺复合材料调节片相较于钛合金调节片减重约  $52\%$ 。

### 2.2 KH308 树脂流变性能

图 4 为 KH308 树脂的升温流变曲线,可看出,随着温度的升高树脂的黏度先下降后升高,在  $250^{\circ}\text{C}$  时,黏度达到最低,为  $14.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,与双马树脂最低黏度值相当。相对于同种类聚酰亚胺, KH308 树脂的黏度下降了一个数量级<sup>[6]</sup>(表 1),为实现聚酰亚胺复合材料调节片构件的成型创造了有利条件。通过图 4 得知,树脂最低黏度对应的温度为  $250^{\circ}\text{C}$ ,可作为固化工艺中的加压参考温度点。

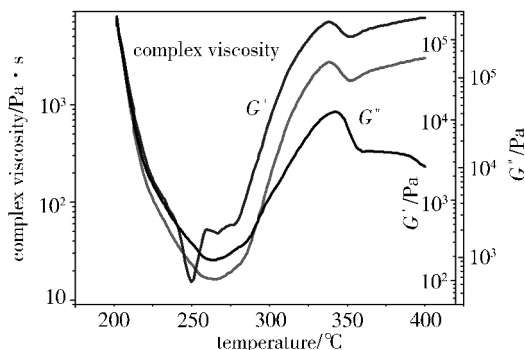


图 4 KH308 树脂体系的黏度-温度曲线

Fig.4 Viscosity-temperature curve of KH308 resin

表 1 几种聚酰亚胺最低黏度对应的温度

Tab.1 Minimum viscosity corresponding temperature of diffident PI

resins	viscosity/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	temperature/ $^{\circ}\text{C}$
KH-304	280	278
KH-305-50	$3.6 \times 10^5$	337
KH-370	100	310
KH308	14.8	250

### 2.3 KH308 树脂耐热性能

复合材料的热氧化稳定性(TOS)和  $T_g$ ,决定了复合材料使用上限和工作温度。图 5 是经后处理的复合材料 DMA 和 TGA 曲线。由图 5(b)可知, MT300/KH308 复合材料的  $T_g$  为  $335^{\circ}\text{C}$ ,在  $447^{\circ}\text{C}$  时开始出现失重,  $468.8^{\circ}\text{C}$  时失重为  $5\%$ ,  $499.4^{\circ}\text{C}$  时失重为  $10\%$ ,  $700^{\circ}\text{C}$  残重率为  $66.69\%$ ,表明 KH308 复合材料具有优异的耐热性能。

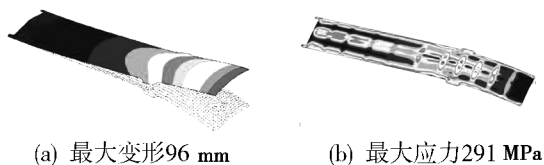


图 2 钛合金调节片变形及应力云图

Fig.2 Strain and stress of titanium alloy engine adjustment sheet

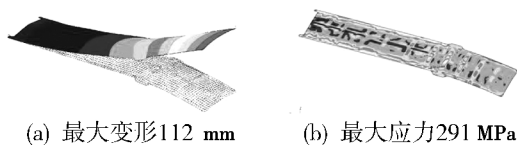
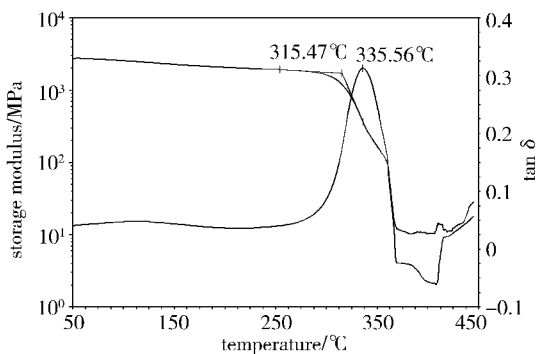
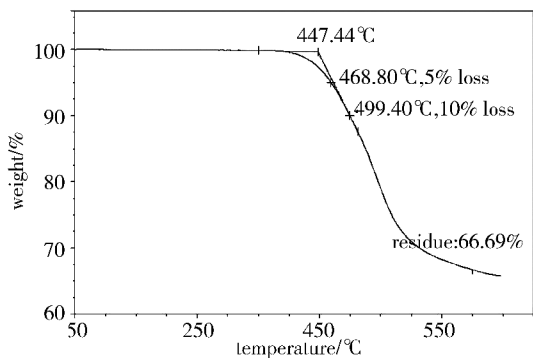


图 3 聚酰亚胺复合材料调节片变形及应力云图

Fig.3 Strain and stress of PI composite engine adjustment sheet



(a) DMA 曲线



(b) TGA 曲线

图 5 MT300/KH308 复合材料 DMA 和 TGA 曲线

Fig.5 DMA and TGA curves of MT300/KH308 composite

## 2.4 MT300/KH308 复合材料力学性能

MT300/KH308 复合材料层合板的力学性能见表 2。此外,测试了 MT300/KH308 层合板的纤维体积分数为 59.5%,孔隙率未检出,表明 MT300/KH308 复合材料成型工艺性好。

表 2 MT300/KH308 层合板力学性能

Tab.2 Elevated-temperature mechanical properties of MT300/KH308 composite

层剪强度/MPa		弯曲强度/MPa		弯曲模量/GPa	
室温	300°C	室温	300°C	室温	300°C
934	833	58.2	60.4	96.2	52

从表 2 得知,MT300/KH308 具有良好的力学性能,弯曲和层剪强度在 300°C 的保持率分别为 89.2% 和 54.1%。

## 2.5 调节片装机试验考核

发动机外调节片使用过程中需要承受数十万次的应力应变、高低温交变、转子不平衡响应、安装结构冲击损伤、整机结构振动和噪声、疲劳老化等工况。通过对未装机试车的调节片、经过 300 和 600 h 试车,对三种状态各项指标进行考核,聚酰亚胺复合材料调节片的高温力学性能满足设计要求,抗振动试验和耐老化试验顺利通过,各项功能指标均满足要求,目前已通过装机试验考核。

## 3 结论

发动机复合材料调节片用聚酰亚胺 KH308 树脂熔体最低黏度为 14.8 Pa·s,具有良好的成型工艺性; $T_g$  为 335°C, $T_d^5$  为 468.8°C,MT300/KH308 复合材料的力学性能具有良好的高温保持率,表明 MT300/KH308 复合材料具有优良的耐热性能。此外,采用力学仿真设计成型的 MT300/KH308 复合材料调节片高温力学性能优异,抗振动性能好,耐老化性能好,可以有效替代钛合金调节片,实现有效减重 52%,各项功能指标均满足设计要求,符合新一代轻量化高性能航空发动机的设计理念,目前已通过装机试验考核。

## 参考文献

- [1] 谭必恩,益小苏.航空发动机用 PMR 聚酰亚胺树脂基复合材料[J].航空材料学报,2001,21(1):55-62.
- [2] SERAFINI T T, DELVIGS P, LIGHTSEY G. Thermally stable polyimides from solutions of monomeric reactions[J]. J. Appl. Polym. Sci., 1972, 16:905.
- [3] VANNUCCI R D. PMR polyimide composites for improved performance at 371°C [J]. SAMPE Q., 1987, 19(1):31.
- [4] ALLRED R E, WESSON S P, SHIN E E. The influence of sizings on the durability of high-temperature polymer composites.
- [5] 赵伟栋,王磊,潘玲英.纤维增强基于  $\alpha$ -BPDA 聚酰亚胺复合材料性能[J].宇航材料工艺,2012,42(4):77-80.
- [6] 赵伟栋,蒋文革,孙红卫,等.新型耐 370°C 聚酰亚胺复合材料固化工艺与性能研究[J].宇航材料工艺,2011,41(5):125-130.