

MT300/802 双马树脂基复合材料固化工艺 及高温力学性能

李健芳¹ 郭鸿俊¹ 高 杨² 张东霞¹ 李桂洋¹

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 火箭军驻 519 厂军事代表室,北京 100076)

文 摘 采用热分析方法研究高活性 802 双马树脂的固化反应动力学特征,分析树脂固化度与固化温度、固化时间的关系,确定树脂固化制度 150℃/1 h+180℃/2 h+200℃/4 h,制得 MT300/802 复合材料 200℃ 固化 T_g 达到 325℃,而相同固化温度 XU292 双马树脂 T_g 仅为 234℃。进一步考察 MT300/802 复合材料室温、230、280 及 300℃ 的力学性能,结果表明,复合材料单向板 280℃ 弯曲强度保持率达到了 57%,300℃ 弯曲强度仍达到 1 094 MPa,室温及高温层间剪切强度及面内剪切强度也表现出较高的性能水平,高活性 802 双马树脂及其复合材料固化温度相对较低而使用温度较高,能够满足航天领域耐高温主承力结构的应用要求。

关键词 双马树脂,复合材料,固化动力学,高温力学性能

中图分类号:TB332

DOI:10. 12044/j. issn. 1007-2330. 2019. 04. 007

Curing Process and High Temperature Mechanical Properties of MT300/802 Bismaleimide Matrix Composites

LI Jianfang¹ GUO Hongjun¹ GAO Yang² ZHANG Dongxia¹ LI Guiyang¹

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

(2 Military Representative Office of PLA Rocket Force in 519 Factory, Beijing 100076)

Abstract Bismaleimide resin composites service as primary high temperature resistance load-carrying structure in aerospace crafts. Dynamic cure kinetics of highly reacted 802 bismaleimide resin was analyzed by differential scanning calorimetry, meanwhile its cure cycle was established as “150℃/1 h+180℃/2 h+200℃/4 h”. The T_g of 802 resin is up to 325℃ cured at 200℃, significantly superior to XU292 resin (234℃) with the same curing temperature. Furthermore, MT300/802 composite mechanical properties were investigated at room temperature, 230, 280 and 300℃, respectively. Its flexural strength retention capacity is 57% at 280℃, and the 300℃ flexural strength is as high as 1 094 MPa. Meanwhile, its interlaminar and in-plane shear strength also exhibits high properties level at both room temperature and high temperature. The results indicate that MT300/802 composite has the feature of “low temperature curing and high temperature usage”, which is suitable for aerospace primary structures.

Key words Bismaleimide resin, Composites, Cure kinetics, High-temperature mechanical properties

0 引言

先进树脂基复合材料的应用水平是衡量航天飞行器轻质化水平的重要标志,常用的树脂基体有环氧

树脂、双马树脂、氰酸酯树脂及聚酰亚胺树脂等,其中双马树脂具有耐高温、耐湿热、抗辐射、低介电等特性,既弥补了环氧树脂耐热性的不足,又克服了聚酰

收稿日期:2018-07-09

基金项目:国家自然科学基金资助(51603058)

第一作者简介:李健芳,1983 年出生,高级工程师,主要从事耐高温树脂设计制备及复合材料先进成型工艺研究。

通信作者:李桂洋,博士,高级工程师,主要从事树脂基复合材料及先进成型工艺与缺陷控制研究。E-mail:guiyang_lee@163.com.

亚胺工艺性差的弱点,已经广泛应用于制备耐高温复合材料主承力结构^[1-3]。例如:Narmco 公司研制的 5250 双马树脂具有良好的耐高温、耐湿热性能,IM7/5250-4 复合材料已经用于制备空天一体化飞行器 X-33 机翼面板和箱间段、X-37B 机身蒙皮和支撑梁等耐高温构件;Cytec 公司报道的 5270 树脂长期使用温度达到 226℃,高温性能接近于 PMR-15 聚酰亚胺树脂;Hexcel 公司开发 F650 树脂具有良好的耐湿热性能,潮湿环境长期工作温度达到 204℃,短时使用温度达到 430℃;另外,Hexcel 公司的 F178、Polymeric 公司的 V378 和 V391、Ciba-Geigy 公司的 R6451 和 XU292 等双马树脂基复合材料在国外航天领域均得到广泛的应用^[2-6]。我国也相继研制了多种高性能双马树脂体系,如 QY8911、QY9611、5428、5405、4501 及 4504 等,也已经应用于航空、航天、核能、船舶等高端制造领域^[7-10]。

针对我国航天飞行器结构特点与服役工况,航天材料及工艺研究所研制了系列化双马树脂及其复合材料,主要包括针对 RTM 工艺的流动性可控 801 双马树脂体系、针对主承力结构的耐高温高性能 803 双马树脂体系、针对空间环境的高韧性 806 双马树脂体系等^[3,11]。然而,双马树脂基复合材料成型通常需要较高的固化温度,例如:XU292 双马树脂固化制度 180℃/1h+200℃/2h+250℃/6 h,不仅容易引起复合材料的结构变形,而且增加了设备运行及维护成本。为此,我所进一步研制了固化温度较低而使用温度较高的高活性 802 双马树脂体系,同时具备热压罐初始加压工艺特点,避免了加压时机选择导致的工艺风险。本文重点研究高活性 802 双马树脂体系的固化反应动力学特征及 MT300/802 复合材料高温力学性能,以期为 MT300/802 双马树脂基复合材料的工程化应用提供技术支撑。

1 实验

1.1 材料

802 双马树脂,自制;MT300-3K 碳纤维,河南永煤碳纤维有限公司;MT300/802 热熔法预浸料,自制。

1.2 测试

DSC 测试:采用 Mettler Toledo DSC STAR[®] System 差示扫描量热仪,树脂试样 8~10 mg,升温速率分别取 2.5、5、10、15 K/min,测试范围 0~350℃,测试过程采用氮气保护。

扫描电子显微镜(SEM):采用德国 ZEISS 扫描电镜分析仪进行预浸料及其复合材料微观结构分析。

材料力学性能测试:美国 Sintech 万能力学性能试验机,复合材料单向板拉伸性能按照 GB/T3354—1999 测试,压缩性能按照 GB/T3856—2005 测试,弯宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2019 年 第 4 期

曲性能按照 GB/T3356—1999 测试,层间剪切强度按照 JC/T773—1996 测试,面内剪切强度按照 GB/T3335—2005 测试。

2 结果与讨论

2.1 802 双马树脂固化工艺研究

2.1.1 固化反应动力学研究

同批次 802 树脂试样不同升温速率下的 DSC 曲线如图 1 所示。当升温速率较慢时,树脂链段充分获得运动活化能,提高了活性基团碰撞几率,由低聚体、支化结构、梯形结构、超支化结构、轻度凝胶结构至超交联结构各反应阶段进行较完全,反应放热峰特征温度较低且峰形较宽;当升温速率较快时,树脂的活性基团初始反应相对滞后,温度达到一定值时开始迅速反应,形成不完全的凝胶网络。因此,随着升温速率的增加,树脂固化放热峰温度向高温方向移动且峰形逐渐变陡。

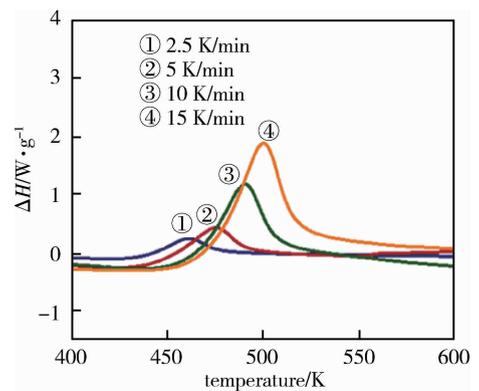


图 1 802 树脂不同升温速率 DSC 曲线

Fig.1 DSC curves for 802 resin at different heating rates

表 1 列出了 802 树脂 DSC 曲线反应放热峰的特征温度。

表 1 802 树脂反应放热峰的特征温度

Tab.1 Characteristic peak temperatures of 802 resin

升温速率 $\beta/K \cdot \text{min}^{-1}$	起始放热温度 T_i/K	峰值温度 T_p/K	结束放热温度 T_f/K
2.5	431.5	462.2	485.9
5	439.1	474.5	494.9
10	452.3	489.6	512.2
15	462.6	500.2	529.5

基于反应动力学基本假设,采用 Kissinger 方程和 Crane 方程计算 802 双马树脂的表观活化能与反应级数^[12-14],Kissinger 方程表达式:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = -\frac{E_a}{R \cdot T_p} + \ln\left(\frac{A \cdot R}{E_a}\right) \quad (1)$$

式中,R 为理想气体常数,8.314 J/(mol·K); E_a 为固

化反应表观活化能; A 为方程的指前因子。根据 Kissinger 方程利用 $\ln(\beta/T_p^2)$ 对 $1/T_p$ 作图, 通过直线斜率和截距即可得到固化反应的 E_a 及 A , 如图 2 所示。

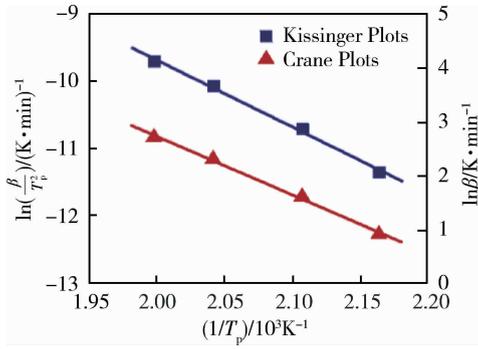


图 2 Kissinger 直线拟合与 Crane 直线拟合

Fig.2 Plots of Kissinger equation and Crane equation

Crane 方程表达式:

$$\frac{d[\ln \beta]}{d(1/T_p)} = - \left(\frac{E_a}{nR} + 2 T_p \right) \quad (2)$$

当 $\frac{E_a}{nR} \gg 2 T_p$ 时, Crane 方程可简化为:

$$\frac{d[\ln \beta]}{d(1/T_p)} = - \frac{E_a}{n \cdot R} \quad (3)$$

根据 Crane 方程利用 $\ln \beta$ 对 $1/T_p$ 作图, 通过直线斜率即可得到固化反应的反应级数 n , 计算结果见表 2。

利用 Arrhenius 方程^[9] 计算 802 树脂体系固化反应速率常数(图 3), 根据反应速率常数随温度的变化趋势能够指导树脂固化工艺的优化。在 25~100℃ 之间, 树脂的反应速率常数 $< 10^{-7}$ 量级, 表明 802 树脂在较宽温度范围内具有良好的稳定性; 在 100~130℃ 之间, 树脂反应速率常数介于 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 量级, 该温度范围内 802 树脂反应较慢, 可以设置预吸胶工艺; 在 140~170℃ 之间, 树脂反应速率常数达到 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 量级, 该阶段 802 树脂处于快速反应阶段, 应合理设置固化保温台阶以保证交联反应均匀进行; 温度大于 170℃ 以后, 树脂中的活性基团继续反应将受到凝胶网络及空间位阻的共同影响, 反应速率常数不可能进一步提高, 应适当延长后固化保温时间使得双马树脂交联反应充分完成。

表 2 802 树脂体系固化动力学参数
Table 2 Curing kinetics parameters for 802 resin

Kinetics Equation	fitting liner	R-Square	$E_a/kJ \cdot mol^{-1}$	$A/10^5 s^{-1}$	n
Kissinger	$y = -9.93819x + 10.18404$	0.994	82.63	2.631	
Crane	$y = -10.8994x + 24.53503$	0.995			0.9112

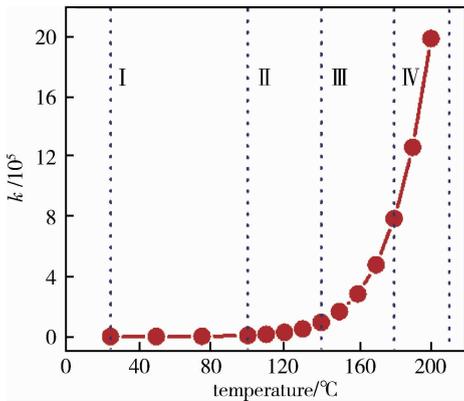


图 3 802 树脂反应速率常数曲线

Fig.3 Reacting rate constant curve of 802 resin

进一步将反应动力学参数带入 n 级固化反应动力学模型, 表达式为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) \cdot (1 - \alpha)^n \quad (4)$$

式中, α 为反应转化率; $k(T)$ 为反应速率常数, n 为反应级数。得到 802 双马树脂固化反应动力学方程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = 2.631 \times 10^5 (1 - \alpha)^{0.9112} \exp(-2.632 \times 10^4 / T)$$

2.1.2 固化工艺参数分析

根据表 1 中 802 树脂在不同升温速率下 DSC 曲线放热峰的特征温度, 采用 $\beta-T$ 外推法初步确定树脂固化温度, 计算结果如图 4 所示, 得到 802 树脂零升温速率反应温度分别为: 153.1、184.4、204.2℃。相比于 XU292 双马树脂固化温度(180℃/1 h+200℃/2 h+250℃/6 h), 结果表明 802 树脂反应活性较高, 在 200℃ 左右即可充分反应, 表现出良好的低温固化工艺性。表 3 列出 802 树脂在不同温度下的凝胶时间。150℃ 时, 凝胶时间为 (47±5) min, 树脂凝胶前具有充分的流动时间, 既有利于对纤维表面进行充分浸润, 又能够通过树脂流动排除内部气泡, 能够提高复合材料综合性能并降低缺陷风险; 170℃ 时, 树脂凝胶时间缩短为 (12±5) min, 从图 3 反应速率常数曲线中也可以看出此时树脂反应速率适中, 有利于交联反应均匀地进行而减少交联网络反应缺陷及内部应力。后固化温度定为 200℃ 并延长保温时间为 4 h, 而后

固化温度过高可能导致树脂中小分子组分挥发及分解。因此,树脂固化制度确定为:150℃/1 h+ 180℃/2 h+200℃/4 h。

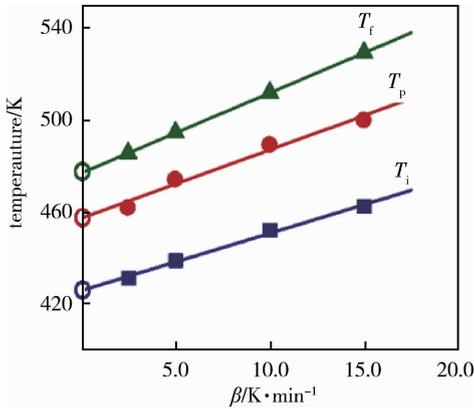


图4 802树脂 $\beta-T$ 外推直线

Fig.4 $\beta-T$ extrapolation plots for 802 resin

表3 802树脂体系凝胶时间

Tab.3 Gelation time of 802 resin

temperature/°C	gelation time/min
140	92± 5
150	47± 5
160	29± 5
170	18± 5
180	12± 5

802树脂黏温曲线如图5所示。在80~110℃,脂黏度随温度升高而明显降低;在110~130℃,树脂黏度下降趋势变缓并接近最低黏度;在130~160℃,树脂达到最低黏度8 Pa·s;温度达到165℃,树脂黏度迅速升高,出现爆聚现象。结果表明802树脂特性黏度较高,可以实现热压罐初始加压,避免了加压时机选择导致的工艺风险,有利于提高复合材料内部质量。

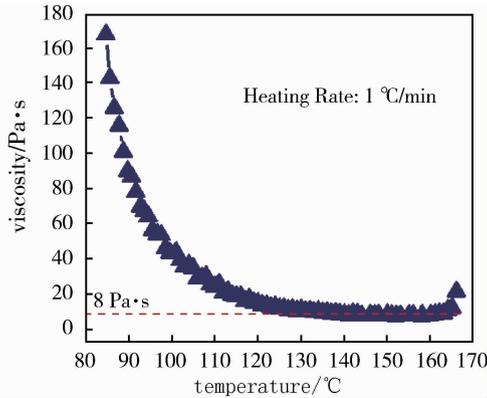


图5 802树脂动态黏温曲线

Fig.5 Dynamic viscosity curve of 802 BMI resin

(图6)。凝胶阶段150℃/1 h,固化度为36%;固化阶段180℃/2 h,固化度为78%;后固化阶段200℃/4 h,固化度达到95%以上,树脂能够均匀、充分地完固化反应,未发生爆聚现象。

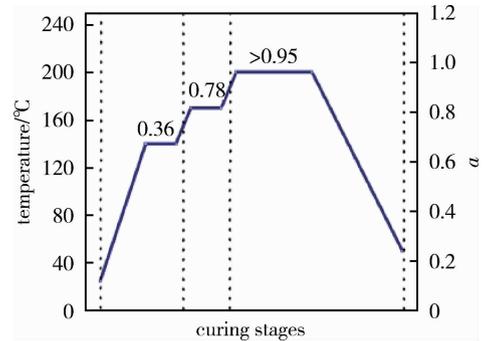


图6 802树脂三阶段固化曲线及固化度

Fig.6 Curing process and curing degree of 802 resin

2.1.3 E_a 变化规律

802树脂固化过程中转化率的变化能够反映树脂整个反应过程的动力学特征并可以解释复杂的固化机理,图7为不同升温速率下树脂的转化率变化曲线。

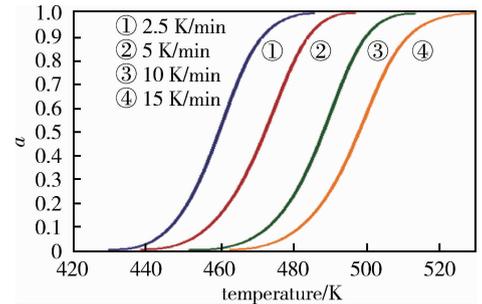


图7 不同升温速率下反应程度与温度的关系曲线

Fig.7 Fractional conversion (α) as a function of temperature (T) at different heating rates

根据Ozawa-Flynn-Wall方程计算802树脂的固化反应活化能^[15],其表达式为:

$$\lg\beta = \lg\left[\frac{A E_a}{Rg(\alpha)}\right] - 2.000 - 0.4667 \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

式中, $g(\alpha)$ 为动力学模式函数 $f(\alpha)$ 的积分形式, α 一定时 $g(\alpha)$ 为定值。根据Ozawa-Flynn-Wall方程利用 $\lg\beta$ 对 $1/T$ 作图,通过直线斜率即可得到转化率 α 下的反应活化能 E_a ,对 $E_a-\alpha$ 及 E_a-T 作图,如图8所示。

802树脂反应活化能随转化率和温度表现出“先降低,再升高,又降低”的阶段变化规律,在200℃高温固化阶段更容易实现较为充分的交联反应,明显低于XU292双马树脂250℃最高固化温度。

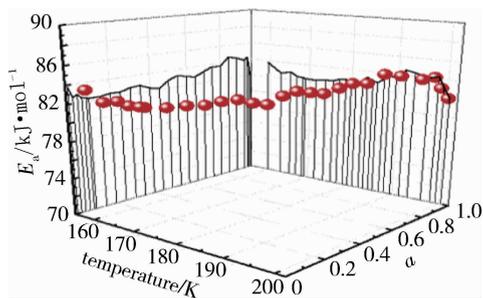


图8 活化能随转化率和温度的变化曲线

Fig.8 E_a values as a function of fractional conversion and temperature

2.1.4 机理分析

802 树脂固化反应见图 9。固化反应初期,马来酰亚胺双键在树脂引发体系作用下需要获得一定能量才能够形成活性中心并引发交联反应,该阶段固化反应活化能相对较高。802 树脂固化反应见图 9。固化反应被引发后,树脂体系主要发生马来酰亚胺双键的均聚反应及其与烯丙基的交替共聚反应,[图 9(a)(b)],聚合物链增长、链支化及交联过程将迅速发生,表现为反应活化能降低。

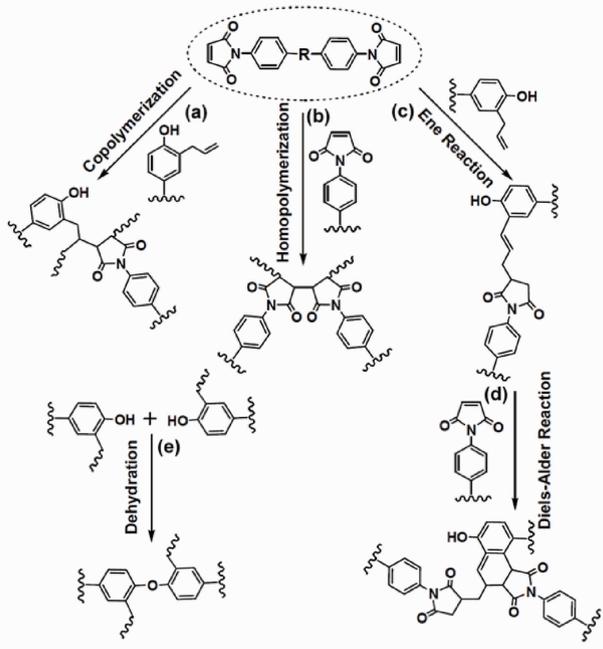


图9 802 树脂固化反应路线

Fig.9 Curing reaction routes of 802 resin

随着反应转化率和温度升高,交联网络分子量达到一定程度,反应位阻增大,聚合活性中心需要更高的能量才能进行有效碰撞;同时树脂体系进一步发生 Ene 反应、Diels-Alder 反应及其他复杂周环反应也需要较高的活化能,[图 9(c)(d)],该阶段树脂体系反应活化能明显升高。固化反应后期,树脂体系反应活

化能不再继续升高反而呈下降趋势,该现象归因于交联网络中小分子成分的挥发与分解:一方面,树脂体系反应温度及反应程度较高时,邻近分子链上的酚羟基可能发生醚化反应产生水分子,[图 9(e)],温度达到 200℃ 以上酚羟基缩合反应生成的水分子挥发会引起反应活化能降低;另一方面,在交联网络内部可能保留少量未参与聚合反应的双马单体,高温引发这些小分子单体挥发和分解也将导致反应活化能降低,S.VYAZOVKIN 等人采用等转化率方法研究固化反应过程中发现很多热固性树脂都存在类似现象^[16-17]。

2.2 MT300/802 复合材料耐热性能研究

2.2.1 MT300/802 复合材料研究

选择 MT300 碳纤维作为增强体,按照上述固化制度制备 MT300/802 复合材料,其 DMA 曲线如图 10 所示,MT300/802 复合材料 T_g 达到 325℃,测试条件下 300℃ 以内复合材料的模量及模量保持率均较高,而已报道的 XU292 双马树脂 200℃ 固化的 T_g 仅为 234℃^[18-20],结果表明 802 双马树脂能够在较低的固化温度实现较高的耐热性能,具备低温固化-高温使用性能特征。

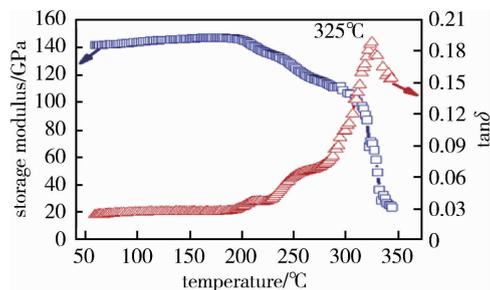


图10 MT300/802 复合材料 DMA 曲线

Fig.10 DMA curve of MT300/802 composite

图 11 为 802 树脂固化样品在空气环境中的 TGA 曲线,802 树脂表现出优异的热稳定性,空气条件 T_d^5 达到 390℃,表现出良好的热稳定性。

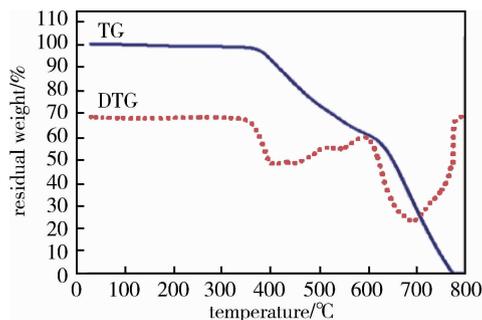


图11 802 树脂 TGA 曲线

Fig.11 TGA curve of 802 resin

2.2.2 高温力学性能

802 树脂虽然表现出低温固化-高温使用性能特
 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2019 年 第4期

征,但是树脂体系反应活性较高,导致复合材料固化成型过程中容易产生孔隙、分层等内部缺陷,进一步影响复合材料力学性能。采用“半含浸”技术使得增强纤维仅被部分浸润,预浸料内部仍存在干纤维区域,MT300/802 预浸料截面形貌如图 12 所示。

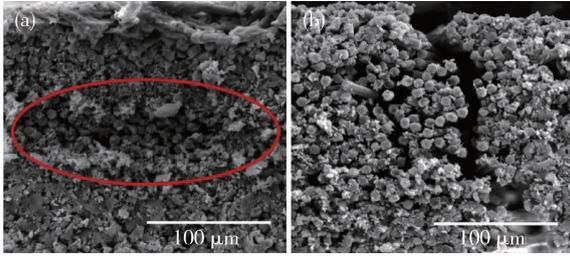


图 12 MT300/802 预浸料微观形貌

Fig.12 Micro-morphology of MT300/802 prepreg

复合材料固化过程中,预浸料内部干纤维区域能够作为排气通道,提高复合材料预制体的气体渗透性,有利于夹杂在预制体内部的空气及小分子挥发份的快速排除,同时 802 树脂能够实现热压罐初始加压,能够进一步降低复合材料产生内部缺陷的工艺风险并提升复合材料力学性能。

根据确定的固化制度 150℃/1 h+180℃/2 h+200℃/4 h,采用 MT300/802“半含浸”预浸料制备复合材料单向板,表 4 中列出了 MT300/802 复合材料单向板室温力学性能,其中 0° 拉伸强度为 1 650 MPa,0° 压缩强度为 1 490 MPa,拉伸/压缩比接近 1:1,表现出良好的拉伸-压缩匹配性,符合航天领域复合材料承力结构的载荷环境需求。

表 4 MT300/802 复合材料室温力学性能¹⁾

Tab.4 Mechanical properties of MT300/802 composites at room temperature

properties	0° laminates		90° laminates	
	strength/MPa	modulus/GPa	strength/MPa	modulus/GPa
tensile	1650	137	40	9.2
compressive	1490	132	304	11.4
flexural	2078	135		
interlaminar shear	95			
in-plane shear ¹⁾	98	5.3		

注:1) stacking sequence: [+45/-45]_{4s}。

图 13 为 MT300/802 单向板 0° 压缩试样的破坏断面形貌,试样破坏过程未发生纤维拔脱现象,表明树脂与纤维结合状态良好。

MT300/802 复合材料单向板 0° 弯曲强度和层间剪切强度分别达到 2 078 和 95 MPa,进一步观察复合材料单向板层间剪切试样的破坏面形貌,如图 14 所示。

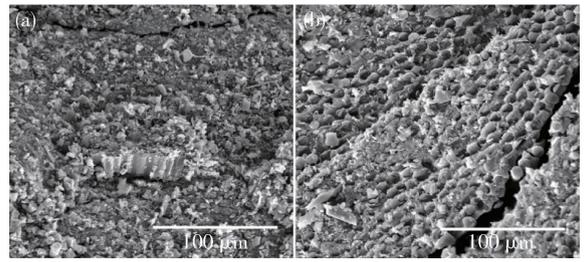


图 13 MT300/802 复合材料压缩破坏形貌

Fig.13 Compressive fracture morphology of MT300/802 composites

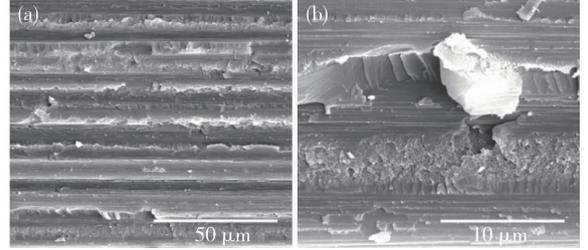


图 14 MT300/802 复合材料层间剪切破坏形貌

Fig.14 Interlaminar shear fracture morphology of MT300/802 composites

图 14(a) 中明显可以发现树脂基体呈韧性断裂形貌,树脂剪切断裂带较为宽厚,图 14(b) 中可以观察到 MT300 碳纤维表面具有均匀分布的沟槽,进一步强化了复合过程中纤维与树脂之间的机械啮合作用,能够有效提高复合材料的界面结合状态,因此 MT300/802 复合材料面内剪切强度也达到了 98 MPa。碳纤维与树脂基体之间优异的界面性能起到了良好的载荷传递作用并有效抑制了加载过程中复合材料内部损伤与裂纹的扩展,使得 MT300/802 复合材料具有优异的拉伸-压缩匹配性及层间剪切性能。

进一步考察 MT300/802 复合材料高温力学性能,如表 5 所示,0° 单向板 230℃ 弯曲强度为 1 590 MPa,相比于室温弯曲强度保持率高达 77%;280℃ 弯曲强度为 1 192 MPa,强度保持率仍达到 57%;300℃ 弯曲强度仍达到 1 094 MPa。高温弯曲模量变化较小,300℃ 弯曲模量保持率也接近于 80%。

表 5 不同测试温度下 MT300/802 单向板弯曲性能

Fig.5 Flexural properties of MT700/802 laminate at different testing temperature

temperature /°C	flexural strength /MPa	conservation rate/%	flexural modulus /GPa	conservation rate/%
r.t.	2078		135	
230	1590	77	128	95
280	1192	57	108	80
300	1094	53	107	79

表 6 为 MT300/802 高温层间剪切性能变化规律,测试温度由室温升至 230℃ 层间剪切强度由 95 MPa 降至 71 MPa,强度保持率达到 75%;280℃ 层间剪切强度保持率接近 50%;300℃ 层间剪切强度降至 34 MPa。

表 6 不同测试温度下 MT300/802 单向板层间剪切强度

Tab.6 Interlaminar shear strength of MT700/802 laminate at different testing temperature

temperature/°C	interlaminar strength/MPa	conservation rate/%
r.t.	95	
230	71	75
280	46	48
300	34	6

表 7 为不同测试温度下 MT300/802 面内剪切强度对比,由于面内剪切试样铺层顺序为 [+45/-45]_{4s},增强纤维对复合材料力学性能贡献较小,230℃ 面内剪切强度为 60 MPa,280 和 300℃ 面内剪切强度分别降至 30 和 22 MPa。

表 7 不同测试温度下 MT300/802 复合材料面内剪切强度

Tab.7 In-plane shear strength of MT700/802 composite at different testing temperature

temperature/°C	in-plane strength/MPa	conservation rate/%
r.t.	98	
230	60	61
280	30	31
300	22	22

3 结论

(1) 采用热分析方法研究高活性 802 双马树脂的固化反应动力学特征, n 级固化反应动力学方程为 $d\alpha/dt = 2.631 \times 10^5 (1-\alpha)^{0.9112} \times \exp(-2.632 \times 10^4/T)$, 反应活化能随温度及转化率呈先下降再上升又下降的变化规律,结果表明 802 双马树脂反应活性较高,在 200℃ 左右即可充分固化。

(2) 结合树脂 $\beta-T$ 外推温度、凝胶分析、黏度特性及复合材料缺陷控制等因素,确定 802 双马树脂固化制度为 150℃/1 h+180℃/2 h+200℃/4 h,树脂固化过程均匀、充分,未发生爆聚现象。

(3) MT300/802 复合材料具有优异的耐高温特性,200℃ 固化后 T_g 达到 325℃,空气条件下 T_d^5 达到 390℃,表现出良好的热稳定性。

(4) MT300/802 复合材料表现出良好的拉伸-压缩匹配性及高温力学性能,拉伸强度/压缩强度比例接近 1:1,室温 0° 弯曲强度达到 2 078 MPa,230℃ 弯曲强度保持率高达 77%,280℃ 弯曲强度保持率仍达

到 57%,室温及高温层间剪切强度与面内剪切强度均表现出较高的性能水平。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 赵云峰. 航天特种高分子材料研究与应用进展[J]. 中国材料进展, 2013, 32(4): 217-228.
- [3] 赵云峰, 孙宏杰, 李仲平. 航天先进树脂基复合材料制造技术及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(4): 1-7.
- [4] 宋健朗. 先进聚合物基结构复合材料在导弹和航天中的应用[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(7): 50-54.
- [5] 邢丽英, 包建文, 礼嵩明, 等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-1338.
- [6] 罗楚养, 张朋, 李伟东, 等. 高温复合材料在空空导弹上的应用研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(1): 19-24.
- [7] 赵渠森, 刘善国. QY8911 系列双马树脂的开发及应用[J]. 航空制造工程, 1994(3): 25-28.
- [8] 赵渠森, 王京城. 高性能 QY9511 双马树脂及其复合材料应用[J]. 纤维复合材料, 2001(4): 3-9.
- [9] 刘天舒, 张宝艳. 5428 双马树脂体系动态固化反应动力学研究[J]. 材料工程, 2005(10): 7-8.
- [10] 王汝敏, 蓝立文. 先进复合材料用热固性树脂基体的发展[J]. 热固性树脂, 2001, 16(1): 36-38.
- [11] 魏巍, 熊艳丽, 凌辉, 等. 耐高温双马树脂体系[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2): 61-63.
- [12] GOODWIN A A. The curing kinetics of a modified bismaleimide [J]. Polymer International, 1993, 32: 87-92.
- [13] FREDDY Y C, BOEY X L. Modeling the curing kinetics for a modified bismaleimide resin [J]. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry, 2000, 38: 907-913.
- [14] KISSINGER H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis [J]. Analytical Chemistry, 1957, 29(11): 1702-1706.
- [15] OZAWA T. Kinetic analysis of derivative curves in thermal analysis [J]. Journal of Thermal Analysis, 1970, 2: 301-315.
- [16] SBIRRAZZUOLI N, VYAZOVKIN S, MITITELU A, et al. A study of epoxy-amine cure kinetics by combining isoconversional analysis with temperature modulated DSC and dynamic rheometry [J]. Macromol. Chem. Phys., 2003, 204: 1815-1821.
- [17] VYAZOVKIN S, SBIRRAZZUOLI N. Isoconversional kinetic analysis of thermally stimulated processes in polymers [J]. Macromol. Rapid Commun., 2006, 27: 1515-1532.
- [18] 王汝敏, 郑水蓉, 张军君, 等. 引发剂引发 BMI/DP 共聚双马树脂基体研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1998, (1): 86-89.
- [19] 王汝敏, 郑水蓉, 苏克和. 低温固化双马酰亚胺树脂基体研究-扩链 BMI/DP 共聚体系[J]. 复合材料学报, 1997(3): 61-66.
- [20] 李玲, 陈剑楠, 董凤云. 双马来酰亚胺树脂的研究进展[J]. 华北工学院学报, 2003, 24(6): 423-427.