

# 某型改性环氧树脂力热特性研究

黄峻峰, 贺尔铭, 陈鹏翔, 李永志

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**对某型改性环氧树脂材料在 $-35^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 温度范围内进行单轴拉伸试验、热膨胀系数测试及常温冲击试验,探究了其在温变环境下的力热特性。提出了该材料适用于特定温变环境下的本构模型,并建立了不同温度区间的断裂判据。在 Matlab 中进行数值模拟结果与试验所得曲线拟合程度良好;并将所得本构模型应用于 ABAQUS 中建模计算并验证结果。结果表明:该改性环氧树脂比常规环氧树脂如 E-44、E-51、EPON E863 等具有更好的强度、刚度、冲击韧性及更低的热膨胀系数,适合作为星载电子元器件灌封的基体材料。提出的经验型本构模型经过插值得到该材料在 $-35^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 范围内任意温度下的应力-应变关系,并可直接用于电子元器件灌封体中相关力热仿真分析当中。

**关键词:**改性环氧树脂;力热特性;本构模型

中图分类号:V45

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2021)05-0978-09

随着我国航天事业的发展,星载电子产品功率和电压急剧增长,使得高压电路内部元器件、原材料之间力热特性的离散性与三维空间布局的复杂程度大幅提升。为满足电子设备在轨运行期间维持功能的正常运转,常使用灌封技术将电子设备全部或部分包裹于环氧树脂中,利用环氧树脂的高绝缘性能及优秀的热力学特性等为电子设备提供机械支撑与散热等功能<sup>[1]</sup>,而经过灌封工艺处理的产品质量则与环氧树脂本身的力学性能直接相关。

传统环氧树脂通常存在脆性大、冲击强度低、容易产生应力开裂及耐热耐湿性差等问题<sup>[2]</sup>。由于星载电子产品需经历太空中长期的高低温循环、发射过程中的振动及外载荷冲击等工况,这使得星载灌封电子产品中环氧树脂材料本身问题显得尤为突出,具体体现为:在实际产品中,可能会出现高低温循环下灌封块本体开裂、灌封块内内含物与环氧树脂之间裂开等问题<sup>[3]</sup>,以及热振载荷作用下电子封装结构出现疲劳失效等问题<sup>[4]</sup>。

要解决这些问题,首先需要对环氧树脂的力学性能加以研究,包括对环氧树脂的力学、热学性能进行分析并研究其适用于各环境内的本构模型。此

前,Justin 等<sup>[5]</sup>在分析飞机发动机中使用的 Epon E 862 环氧树脂的材料力学性能时设计了 1 种光学测量系统和 2 种小型试件。Tsiafis 等<sup>[6]</sup>利用自行研制的试验装置对包含铝管的环氧树脂进行了拉伸应力试验,并对比了对应的有限元仿真结果。Kim 等<sup>[7]</sup>建立了固化过程中力学性能演化模型,系统地分析了固化状态对转化温度  $T_g$ 、松弛模量和松弛谱的影响。Fard 等<sup>[8]</sup>研究了环氧树脂 Epon E 863 的拉伸、压缩和弯曲力学响应,获得了不同应变速率下的拉伸、压缩和弯曲试验结果。Imai 等<sup>[9]</sup>使用动态力学分析(DMA)与热机械分析(TMA)2种方法研究了温度对新型环氧层状硅酸盐纳米复合材料力学性能和绝缘性能的影响。Ramirez 等<sup>[10]</sup>使用了一个统计力学模型,利用变阶(VO)微分积分的新概念,建立了恒定压缩速率下复合材料线黏弹性本构关系。Park 等<sup>[11]</sup>在考虑温度、应变速率、静水压力和交联密度的影响下,建立了环氧树脂的准静态本构关系,并基于宏观结构有限元分析对环氧树脂的弹塑性变形进行了多尺度模拟。Hu 等<sup>[12]</sup>基于试验数据,提出了一个包含多轴应力状态下加载和卸载行为的不同模量的微分形式的非线性黏弹性本构模型。Pou-

收稿日期:2021-09-06

作者简介:黄峻峰(1997—),西北工业大学硕士研究生,主要从事结构动力学与振动控制、力学仿真分析研究。

通信作者:贺尔铭(1964—),西北工业大学教授,主要从事飞机结构动力学与振动控制研究。e-mail:heerming@nwpu.edu.cn

lain 等<sup>[13]</sup>利用考虑热激活屈服、压力敏感性、应变软化和分子链重取向的本构关系,研究了环氧树脂在玻璃化状态下的有限变形响应。Sherwood 等<sup>[14]</sup>提出了考虑环境温度、应变率、相对密度的经验型聚氨酯泡沫本构模型。李勇等<sup>[15]</sup>根据环氧树脂流变性能试验结果,提出了一种新的未固化的环氧树脂本构模型。

经过研究,本文基于一种新的环氧树脂改性方案,以该改性环氧树脂制成的试验件作为研究对象,分析了其在 $-35^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下的静态力学特性,并提出表征其力学性能的经验本构模型;分析了该材料在试验温度范围内的热膨胀系数,得到了其热力学特性;并完成了常温下该种材料的冲击试验,得到了环氧树脂的抗冲击性能。研究结果为后续开展星载电子产品灌封体有限元仿真研究提供了理论依据与数据支撑。

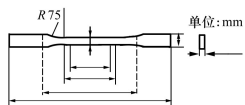


图1 拉伸试样图



图2 拉伸试验件

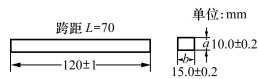


图3 冲击试样图



图4 冲击试验件

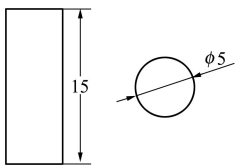


图5 热膨胀试样图



图6 热膨胀试验件

## 1.2 试验设备与仪器

拉伸、压缩试验使用DDL100电子万能试验机,温度环境变化使用LGDW-350高低温环境箱,冲击试验使用三思系列NBJ-25塑料摆锤式冲击试验机,热膨胀系数测试仪型号为TMA Q400;加热固化所用的烘箱型号FX101-3,扫描电子显微镜型号ZEISS EVO 10。

## 1.3 试验方法

为了探究改性环氧树脂的力学及热学性能,设计的具体试验及方法如下:

1) 拉伸试验:在 $-35^{\circ}\text{C}\sim +120^{\circ}\text{C}$ 的温度范围中选取 $-35^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 、常温( $22^{\circ}\text{C}$ )、 $45^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ 、 $75^{\circ}\text{C}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ 、 $120^{\circ}\text{C}$ 共8个温度点,对改性环氧树脂材料以 $0.5\text{ mm}/\text{min}$ 的拉伸速率进行各温度下的拉伸试验。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 试件制备

环氧树脂使用硅微粉进行改性,将环氧树脂、固化剂、促进剂按一定质量比进行称取,为了排除固化剂对搅拌的影响,分为两个组分,其中A组分为:环氧树脂、促进剂、偶联剂、硅微粉,充分搅拌30 min至均匀。B组分为:固化剂混合物。将AB组分混合液搅拌2 h以保证混合均匀,浇注入试验件模具中,放入烘箱中保持 $60^{\circ}\text{C}$ 进行加热固化1 h。其中浇注体试验件依据《GB/T 2567-2008树脂浇铸体性能试验方法》中的要求和注意事项制作环氧灌封材料拉伸、冲击以及热膨胀系数测试试样。其中,拉伸试样为哑铃片状,如图1~2所示;冲击试样为无缺口长条块,如图3~4所示。线胀系数测试试样为圆柱状,如图5~6所示。试验前测量所有试验件截面积并编号。

试件需在各温度下保持至少30 min。每个温度点至少重复3次有效试验,形成改性环氧树脂材料力学特性参数与温度的关系。

2) 冲击试验:在常温下进行改性环氧树脂材料摆锤冲击试验,10组重复试验,并计算得到该种材料的冲击韧性。

3) 热膨胀系数测试:将试验件装入TMA试验机中,先降温至 $-35^{\circ}\text{C}$ 作为起始温度,之后以 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温,在 $-35^{\circ}\text{C}\sim +120^{\circ}\text{C}$ 的温度连续变化范围内测量试验件的伸缩量,最后计算改性环氧树脂材料的热膨胀系数曲线。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 温度环境对拉伸试验结果影响

将 $-35^{\circ}\text{C}\sim +120^{\circ}\text{C}$ 温度区间8个温度点的试验结果经过数据处理,可得各温度环境下的工程应力应变曲线,获得各温度下环氧树脂的强度极限、杨氏模量、泊松比如表1所示。

表 1 环氧树脂拉伸试验结果

温度/°C	强度极限/MPa	杨氏模量/MPa	泊松比
-35	79.690	12 939.894	0.290
-10	69.936	12 409.452	0.292
常温	63.740	11 271.362	0.286
45	59.540	9 870.946	0.295
60	47.712	7 139.753	0.316
75	28.608	4 061.757	0.373
100	8.462	660.739	0.431
120	3.843	793.203	0.434

文献[16-18]中测得 E-44 双酚 A 型环氧树脂常温下拉伸强度分别为 35.92, 29.50 和 44.7 MPa。文

献[19-20]中 E-51 双酚 A 型环氧树脂常温下拉伸强度为 30.69 MPa 杨氏模量为 2 633 MPa。文献[8]中 Epon E 863 在常温低应变率加载下拉伸强度为 62 MPa, 杨氏模量为 2 969 MPa。本文改性材料常温下的强度和杨氏模量明显高于文献中的结果。

环氧树脂的力学性能测试结果受环氧树脂主体质量、固化工艺、使用偶联剂种类、各组分含量和配比、试验加载速率等多方面影响, 即使主体为同一牌号的环氧树脂, 其试验结果也可能会有很大差别。尽管如此, 本文研究的改性环氧树脂具有比常见环氧树脂更好的强度和刚度特性, 对于星载电子元器件灌封结构有更好的承力和保护作用。

使用扫描电子显微镜分别观测 -35°C、常温和 120°C 下试件拉断后的断口形貌, 如图 7~9 所示。

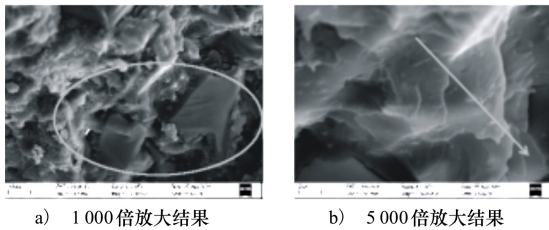


图 7 -35°C 下拉伸试验断口形貌

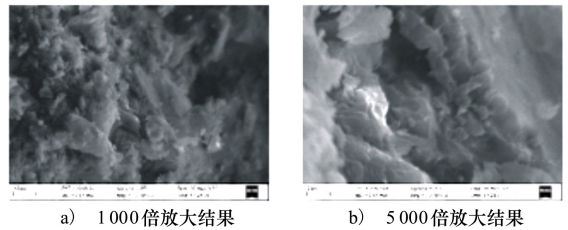


图 8 常温下拉伸试验断口形貌

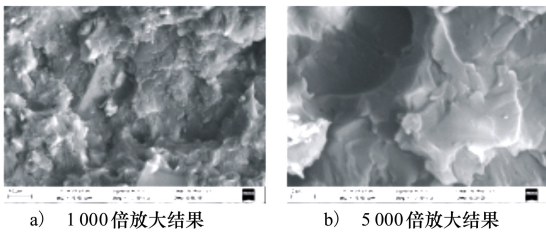


图 9 120°C 下拉伸试验断口形貌

通过 SEM 断口形貌分析, 如图 7a) 圈内所示, -35°C 下的环氧树脂断口出现了更多的光滑镜面区, 在图 7b) 箭头方向, 可看出明显分层多于常温和高温试件且高度梯度更大, 微观形貌中还出现叉状河流花样。低温和常温断口较高温有更多分层、碎屑和孔洞, 孔洞和坑旁的尖角存在硅微粉填料剥离后留下的痕迹。高温下断口分层明显减少, 填料剥离痕迹显著减少, 宏观断口也相对平整, 可知温度升高后环氧树脂与填料间结合更为紧密, 表现出更好的韧性。随温度降低, 材料脆性逐步增强, 与试验数据吻合。微观断口中可观察到环氧树脂团聚在某一位

置, 可能是填料分布不均导致的。

### 2.2 冲击试验结果

对试件进行常温下的冲击试验, 得到结果如表 2 所示, 离散系数为 0.207。

表 2 常温下冲击试验记录

编号	冲击能量/J	冲击韧度/(kJ · m <sup>-2</sup> )
1	1.636	11.021
2	1.291	8.694
3	1.521	10.225
4	1.659	11.145
5	1.455	9.740
6	2.394	16.042
7	1.154	7.710
8	1.875	12.489
9	1.675	11.280
10	1.756	10.823
均值	1.642	10.917

文献[18]中 E-44 环氧树脂的冲击韧度为 8.7 kJ/m<sup>2</sup>, 小于本改性材料。硅微粉的添加使得环氧树脂基体内产生剪切带及银纹等结构, 这些结构

使得改性后的环氧树脂的强度和韧性得到增强。

使用扫描电子显微镜观测冲击试验件断口,可得:冲击试验断口与拉伸试验断口形貌有较大不同,在图 10 圈内标注处,出现了更为明显的裂纹和断层。分层内部可观测到河流花样,可表征出材料的脆性。断口出现的断层和裂纹说明材料在冲击载荷下材料局部出现裂纹的延伸方向。

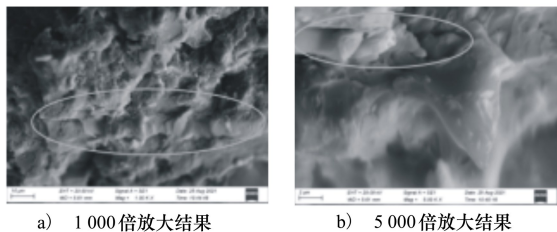


图 10 冲击试验断口形貌

### 2.3 热膨胀系数测试结果

使用 TMA 测得的改性环氧树脂热膨胀系数结果如图 11 所示:3 组试件的伸长量-温度图像基本都呈现出一个转折点前后两段斜率不同的形式,即该种环氧树脂在升温达到转化温度  $T_g$  前后,处于玻璃态和高弹态下时的热膨胀系数不同。这是由于随着温度升高,材料自由体积分数增大,高弹态较玻璃态而言自由体积变化更明显。计算 3 个试件在 2 种状态下的平均热膨胀系数,即 3 个试件分别在两段图像中的割线斜率。计算结果如表 3 所示:

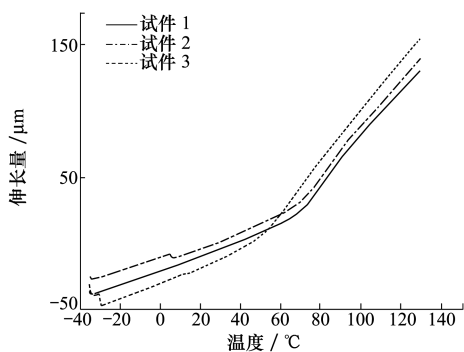


图 11 改性环氧树脂材料热膨胀系数测试结果

表 3 常温下冲击试验记录

试件编号	玻璃态热膨胀系数/°C	高弹态热膨胀系数/°C
1	0.577	1.679
2	0.566	1.710
3	0.667	1.813
均值	0.603	1.734

由计算结果可知,该种环氧树脂在玻璃态下的热膨胀系数远小于高弹态的热膨胀系数,后者近似为前者的 3 倍,因此在仿真分析时应将材料的 2 种状态分别计算。

文献[21]中交联度 90%的酸酐固化体系环氧树脂玻璃态下的热膨胀系数为  $1.71/^\circ\text{C}$  和  $2.67/^\circ\text{C}$ 。添加填料后填料与固化剂等发生交联固化反应,其改性可以增加对分子间的束缚,从而限制基体本身在升温过程中增大的自由体积,进而降低热膨胀系数以提高改性后环氧树脂材料的耐热性能。

### 3 材料本构模型推导

环氧树脂作为一种非晶态聚合物,没有固定的晶体形状和固定熔点,具有各向同性且随温度升高逐渐变软。基于相关研究资料,研究者们常着眼于整个固化过程,将经历整个黏流态、高弹态、玻璃态的环氧树脂归类为黏弹性材料。但对于用作电子封装料的环氧树脂而言,产品遇到的主要问题是在低温或在工作环境内升降温过程中所产生的,很少涉及转化温度以后的力学问题。因此本文主要关注环氧树脂在玻璃态的脆性特征及随温度升高产生的一些塑性力学特征。

由于试件经历整个拉伸过程,其截面积发生些许缩小但无法实时观测,因此通常使用体积不变假设进行等效换算。再根据材料连续性假设可推得真实应力  $\sigma_T$ 、真实应变  $\varepsilon_T$  分别为

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \tag{1}$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \tag{2}$$

式中:  $\sigma$  为工程应力;  $\varepsilon$  为工程应变。

绘制计算所得的各温度下真实应力与真实应变曲线,如图 12 所示。

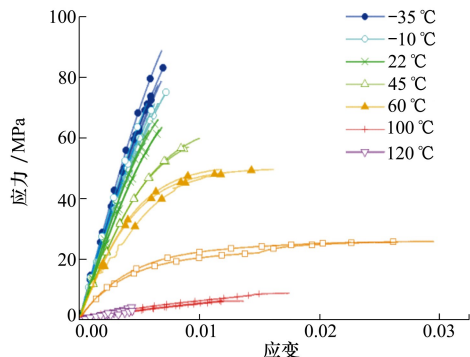


图 12 各温度下真实应力与真实应变曲线

### 3.1 常温及以下

观察曲线可初步得知:对于在室温及以下温度,  $\sigma_T-\varepsilon_T$  曲线几乎均呈线性,塑性变形极小,试验中观察到材料在弹性段末端直接发生脆性断裂,可以看作脆性材料,因此采用线性拟合

$$\sigma_T = E(T) * \varepsilon_T \quad (3)$$

式中:  $E(T)$  为随温度变化的杨氏模量,单位为 MPa。

根据  $-35^\circ\text{C}$ 、 $-10^\circ\text{C}$ 、常温 3 个温度的杨氏模量进行二次曲线拟合,可得常温及以下的杨氏模量表示为随温度(摄氏度)变化的函数为

$$E(T) = -0.4T^2 - 42.75T + 11\ 850 \quad (4)$$

### 3.2 常温以上

温度超过常温时保持同样的拉伸速率,弹性段杨氏模量显著降低,该种环氧树脂开始由脆变韧。尽管未出现颈缩现象,但观察  $\sigma_T-\varepsilon_T$  曲线可知:与黄铜 H62 拉伸的应力应变曲线相似,升温后该材料塑性增强,无明显屈服阶段,弹性阶段后直接进入强化,且温度越高塑性变形越大。在塑性力学中,常用幂指数强化公式

$$\sigma_T = A\varepsilon_T^n \quad (5)$$

式中,  $A$  和  $n$  是材料的特性参数,当  $n = 0$  时为理想刚塑性模型,  $n = 1$  时为线弹性模型,  $0 < n < 1$  时为变形较大且无明显线性阶段的材料。

一般单轴拉伸曲线也有如下模型

$$\sigma_T = E[1 - \omega(\varepsilon_T)]\varepsilon_T \quad (6)$$

式中:  $E$  为杨氏模量;  $\omega(\varepsilon_T)$  为材料性质决定的参数。

以(5)~(6)式为基础,根据各温度下的试验数据,对该材料这一阶段的应力应变关系使用经验型本构模型进行拟合

$$\sigma_T = \varphi(T)(1 - \psi(T)^{c\varepsilon_T}) \quad (7)$$

式中:  $\varphi(T)$  为表征强度的函数;  $\psi(T)$  为表征弹性

的函数;  $c$  为修正系数。

其中  $\varphi(T)$  和  $\psi(T)$  均为温度相关的函数,  $c$  为常数,用来将带入应变后的经验本构模型调整到试验所得应力的量级,经尝试,修正系数  $c$  取 500 时计算结果量级与试验数据相符。以各温度下改性环氧树脂拉伸试验数据为基础,将本构模型与各温度下试验数据的方差作为目标函数,将各温度下的  $\varphi(T)$  与  $\psi(T)$  作为优化变量,设定  $\varphi(T)$  的上界为 200、下界为 0,  $\psi(T)$  的上界为 1、下界为 0。使用非线性二次规划进行优化,得到优化后各温度下  $\varphi(T)$  和  $\psi(T)$  的数值如表 4 所示。

表 4 各温度下本构模型的参数优化结果

温度/ $^\circ\text{C}$	$\varphi(T)$	$\psi(T)$
45	77.083 8	0.729 5
60	52.652 4	0.637 8
75	24.933 8	0.652 5
100	15.293 3	0.904 5
120	9.497 4	0.808 2

根据参数优化结果,拟合出  $\varphi(T)$  与  $\psi(T)$  关于温度的关系。通过之前热膨胀系数测试及拉伸试验结果看出,改性环氧树脂在  $T_g = 80^\circ\text{C}$  附近发生了转化,由玻璃态开始转变为高弹态。因此将经验本构中  $\varphi(T)$  与  $\psi(T)$  沿  $80^\circ\text{C}$  前后分开进行分段拟合。

在常温至  $80^\circ\text{C}$  范围内,二次曲线拟合结果为

$$\varphi(T) = -0.007\ 3T^2 - 0.86T + 130.7 \quad (8)$$

$$\psi(T) = 0.000\ 24T^2 - 0.031T + 1.64 \quad (9)$$

在  $80^\circ\text{C}$  以上,使用一次函数的拟合结果为

$$\varphi(T) = -0.29T + 44.27 \quad (10)$$

$$\psi(T) = -0.005T + 1.39 \quad (11)$$

综上所述,改性环氧树脂的经验型本构模型为(12)式所示

$$\sigma_T = \begin{cases} (-0.4T^2 - 42.75T + 11\ 850)\varepsilon_T & -35^\circ\text{C} \leq T \leq 22^\circ\text{C} \\ (-0.007\ 3T^2 - 0.86T + 130.7)(1 - (0.000\ 24T^2 - 0.031T + 1.64)^{500\varepsilon_T}) & 22^\circ\text{C} < T \leq 80^\circ\text{C} \\ (-0.29T + 44.27)(1 - (-0.005T + 1.39)^{500\varepsilon_T}) & 80^\circ\text{C} < T \leq 120^\circ\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

### 3.3 经验型本构模型的断裂判据

在将所得的改性环氧树脂经验型本构模型用于后续的数值计算及有限元仿真时,需要通过断裂判

据来控制计算中模型何时失效。根据试验过程中的现象及试验所得应力应变曲线总结规律,结合强度理论分析如下:

1) 常温及以下:由于此阶段该材料近似认为脆性,且在拉伸试验中试验件为单向应力状态。因此根据第二强度理论,通过数据分析可得常温及以下材料应变平均在 0.006 时发生脆性断裂。

2) 常温至转化温度  $T_g$ :在常温到玻璃态转化温度之前,材料在弹性段后直接进入强化阶段,几乎未经过颈缩状态直接发生脆性断裂。且随着温度的升高,强度极限下降,断裂伸长率显著增大。在此温度区间,材料断裂前开始出现塑性流动。由于强化阶段材料应力应变曲线斜率极低,若采用第一强度理论作为断裂判据,计算过程中所取的最大拉应力即使与实际情况相比出现很小的偏差,也会导致在计算应变结果时产生较大的误差。因此依然采用第二强度理论,45℃、60℃、75℃ 3 个温度点试验所得的平均断裂应变分别为:0.009 5、0.013 37、0.028,用多项式拟合并作光滑处理,即认为在常温至 80℃ 范围

内材料断裂应变规律满足随温度变化的函数

$$\varepsilon(T) = 3.989 \times 10^{-7} T^3 - 4.78 \times 10^{-5} T^2 - 0.001\ 96T - 0.018\ 3 \quad (13)$$

3) 转化温度  $T_g$  以上:环氧树脂进入高弹态之后,随着温度继续上升,杨氏模量急剧降低,尤其 100℃ 之后试件出现严重的软化现象。应力应变曲线整体呈现小幅震荡上升的现象,其原因可能由于电子万能试验机在加载软化后的试验件时出现了小幅波动。因此依旧采用第二强度理论,将应变作为控制断裂的判据。100℃ 与 120℃ 温度点试验所得的平均断裂应变分别为 0.014 和 0.003 8。使用一次函数连接,认为转化温度以上,材料断裂应变规律满足随温度变化的函数

$$\varepsilon(T) = -0.000\ 53T + 0.067 \quad (14)$$

综上所述,建立改性环氧树脂经验型本构模型的断裂判据为

$$\varepsilon_T = \begin{cases} 0.006 & -35^\circ\text{C} \leq T \leq 22^\circ\text{C} \\ 3.989 \times 10^{-7} T^3 - 4.78 \times 10^{-5} T^2 - 0.001\ 96T - 0.018\ 3 & 22^\circ\text{C} < T \leq 80^\circ\text{C} \\ -0.000\ 53T + 0.067 & 80^\circ\text{C} < T \leq 120^\circ\text{C} \end{cases} \quad (15)$$

### 4 数值计算验证

行数值计算,分别令温度  $T$  等于试验中所取的温度点,计算所得应力应变曲线与试验所得曲线对比如图 13 所示。

在 Matlab 中对本文提出的经验型本构模型进

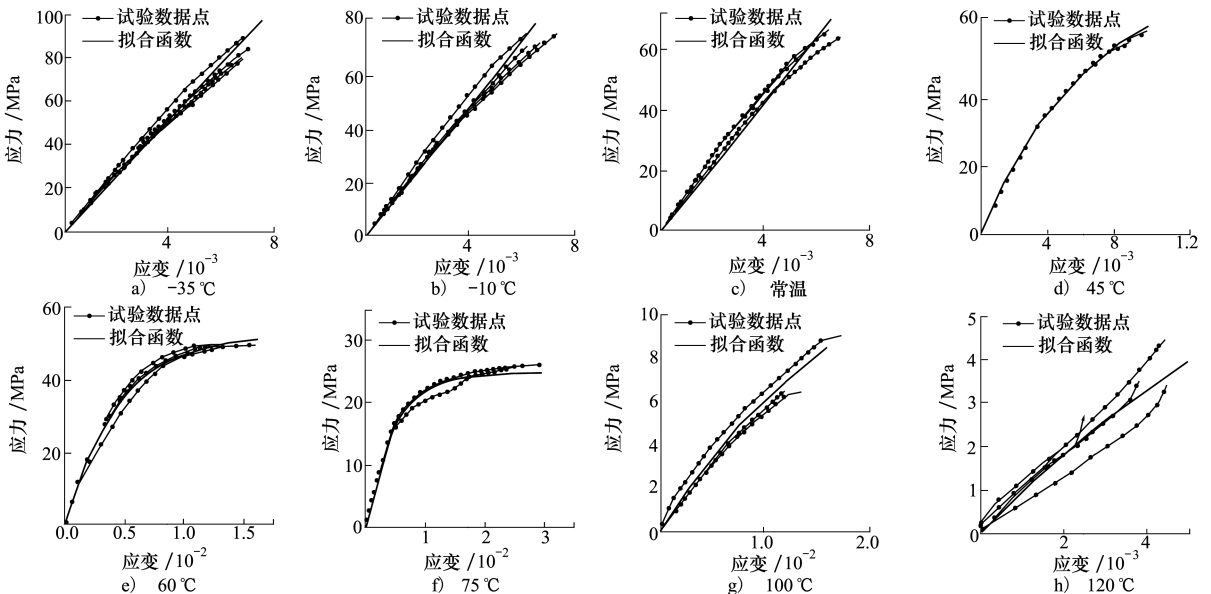


图 13 各温度试验结果与数值验证曲线

由图 13 可知,各温度下经验型本构模型得出的计算结果与试验曲线重合度良好,说明该本构关系模型可以用于本文所研究的改性环氧树脂材料的后续力热特性有限元仿真计算中。

### 5 有限元仿真验证

根据改性环氧树脂本构模型,编写 Umat 子程序,在 Abaqus 中建立拉伸试验件的有限元模型,如图 14 所示:



图 14 环氧树脂拉伸试验件有限元模型

边界条件模拟拉伸试验,对两边夹持端施加位移约束,一端固定,另一端开放拉伸方向的平动自由度和 3 个方向的转动自由度。使用六面体扫掠网格进行划分,共得到 12 928 个单元。调用 Umat 子程

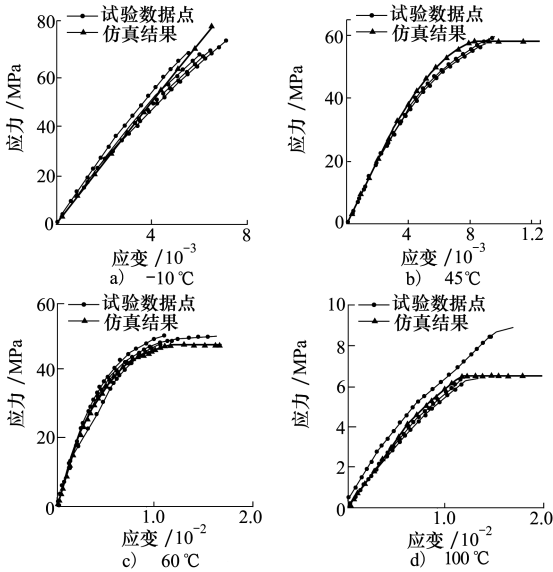


图 15 仿真结果与试验结果对比

序,计算试验中 4 个温度点的拉伸结果,提取计算所得应力应变结果。各温度计算结果与试验所得曲线对比如下:

通过对比可得使用该经验型本构模型所得的有限元仿真数据和试验结果重合度良好,表明所得的本构模型符合该改性环氧树脂的实际情况,可用于后续工程分析。

### 6 结 论

本文对某型改性环氧树脂在 -35℃ ~ 120℃ 的环境温度范围内进行了单轴拉伸试验和热膨胀系数测试,并在常温下进行了冲击试验,探究了该材料在温变环境下的力热特性。根据拉伸试验结果推导了适用于该材料的经验型本构模型,并分别用数值计算、有限元仿真与试验结果进行了相互验证。

1) 单轴拉伸试验结果表明,该种改性环氧树脂在低温为完全脆性断裂,随着温度升高开始逐渐变软变韧,转化温度前其刚度和强度优于其他常见牌号的环氧树脂。常温下冲击试验结果也证明改性后该材料具有更好的韧性。通过热膨胀系数测试观测得该种材料玻璃态转化温度  $T_g$  为 80℃ 左右,转化前后热膨胀系数有不同,但总体热膨胀小于类似的材料。该改性环氧树脂由于具有更强的强度、刚度、韧性和更小的受热变形特性,在作为星载电子元器件灌封材料时具有更好的承力和保护作用。

2) 以塑性力学中 2 种基本模型为基础,通过分段拟合,建立了该种环氧树脂的经验型本构模型及不同温度区间的断裂判据。在 Matlab 中对该本构模型进行数值计算,与试验结果拟合程度好。在 Abaqus 中使用 Umat 子程序编写该本构模型,对拉伸试验件进行有限元仿真,与试验结果重合度良好。说明提出的经验型本构模型具有很高的可靠性和准确性,可以用于后续更深入的分析研究中。

### 参考文献:

[1] 杨媛媛, 张成祥, 赵国静, 等. 环氧树脂电子封装胶研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2017, 15(3): 54-57  
 YANG Yuanyuan, ZHANG Chengxiang, ZHAO Guojing, et al. Research progress of epoxy resin electronic packaging adhesive [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2017, 15(3): 54-57 (in Chinese)

[2] 刘中国. 高性能电子封装材料用环氧树脂的合成与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013  
 LIU Zhongguo. High performance epoxy resin using in electronic package material; synthesis and properties studies[D]. Changchun: Jilin University, 2013 (in Chinese)

- [3] 胡松. 高低温载荷下环氧灌封结构热应力分析研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018  
HU Song. Research on thermal stress of encapsulated assemblies of epoxy resin under high and low temperature load[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018 (in Chinese)
- [4] 赵福斌. 热振加载环境下电子封装结构的疲劳寿命计算[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018  
ZHAO Fubin. The fatigue life calculation of the electronic packaging structure under combined thermal stress and vibration loading conditions[D]. Xi'an: Xidian University, 2018 (in Chinese)
- [5] JUSTIN D L, CHARLES R R, ROBERT K G, et al. Measurement of epoxy resin tension, compression, and shear stress-strain curves over a wide range of strain rates using small test specimens[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2008, 21(3): 162-173
- [6] TSIAFIS I, BOUZAKIS K D, MICHAILIDIS N, et al. Experimental-computational determination of epoxy resin mechanical properties, used in assembly applications[J]. *Mechanical Engineering*, 2005, XI: 26-32
- [7] KIM Y K, WHITE S R. Stress relaxation behavior of 3501-6 epoxy resin during cure[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1996, 36(23): 2852-2862
- [8] FARD M Y, LIU Y, CHATTOPADHYAY A. Characterization of epoxy resin including strain rate effects using digital image correlation system[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, 25(2): 308-319
- [9] IMAI T, SAWA F, OZAKI T, et al. Influence of temperature on mechanical and insulation properties of epoxy-layered silicate nanocomposite[J]. *IEEE Trans on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2006, 13(2): 445-452
- [10] RAMIREZ L E S, COIMBRA C F M. A variable order constitutive relation for viscoelasticity[J]. *Annalen der Physik*, 2007, 16(7/8): 543-552
- [11] PARK H, CHO M. A multiscale framework for the elasto-plastic constitutive equations of crosslinked epoxy polymers considering the effects of temperature, strain rate, hydrostatic pressure, and crosslinking density[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 142: 103962
- [12] HU Y, XIA Z, ELLYIN F. Deformation behavior of an epoxy resin subject to multiaxial loadings. Part I: experimental investigations[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2003, 43(3): 721-733
- [13] POULAIN X, BENZERGA A A, GOLDBERG R K. Finite-strain elasto-viscoplastic behavior of an epoxy resin: experiments and modeling in the glassy regime[J]. *International Journal of Plasticity*, 2014, 62: 138-161
- [14] SHERWOOD J A, FROST C C. Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam under impact loading[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1992, 32(16): 1138-1146
- [15] 李勇, 王友善, 杜星文. 环氧树脂的非线性本构模型[J]. *高分子材料科学与工程*, 2006(5): 32-35  
LI Yong, WANG Youshan, DU Xingwen. Non-linear constitutive model of uncured epoxy resin[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2006(5): 32-35 (in Chinese)
- [16] 刘纪艳, 刘晓龙, 段绪胜. 纳米碳酸钙和硅微粉改性环氧树脂结构胶的力学性能研究[J]. *山东农业大学学报*, 2018, 49(5): 805-808  
LIU Jiyang, LIU Xiaolong, DUAN Xusheng. Study on mechanical properties of epoxy resin structural adhesive modified by nanosize CaCO<sub>3</sub> and silicon powder[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2018, 49(5): 805-808 (in Chinese)
- [17] 张九枝, 史志铭. 硫酸钙晶须对 E-44 环氧树脂的微结构与力学性能的影响[J]. *合成材料老化与应用*, 2013, 42(04): 14-17  
ZHANG Jiuzhi, SHI Zhiming. Influences of calcium sulfate whisker on mechanical properties and micro-structure of E-44 epoxy resin[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2013, 42(4): 14-17 (in Chinese)
- [18] 陈昶旭, 王彦平, 张玉双, 等. 混凝土抗风沙防护用 SiC 增强环氧树脂材料研究[J]. *热固性树脂*, 2021, 36(4): 48-51  
CHEN Changxu, WANG Yanping, ZHANG Shuangyu, et al. Research on SiC-reinforced epoxy materials for concrete protection against wind and sand[J]. *Thermosetting Resin*, 2021, 36(4): 48-51 (in Chinese)
- [19] 熊欣, 李亚东. 纳米碳酸钙填充改性环氧树脂植筋胶力学性能研究[J]. *科学技术创新*, 2021(3): 171-173  
XIONG Xin, LI Yadong. Study on mechanical properties of epoxy resin reinforced adhesive filled with nano calcium carbonate[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021(3): 171-173 (in Chinese)
- [20] 姚艳芳, 姚轶凡, 王云. 纳米纤维素掺杂环氧树脂复合材料的制备及力学性能研究[J]. *功能材料*, 2021, 52(7): 7186-7190

YAO Yanfang, YAO Yifan, WANG Yun. Preparation and mechanical properties of nano cellulose doped epoxy resin composites [J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, 52(7): 7186-7190 (in Chinese)

[21] 毕茂强, 彭豪, 文娅, 等. 纳米掺杂环氧树脂热力学性能分子动力学模拟[J/OL]. (2021-07-30)[2021-08-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1129.TM.20210730.1344.002.html>

## Study on mechanical and thermal properties of a modified epoxy resin

HUANG Junfeng, HE Erming, CHEN Pengxiang, LI Yongzhi

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The uniaxial tensile test, linear expansion coefficient test of a modified epoxy resin in the ambient temperature range from  $-35^{\circ}\text{C}$  to  $120^{\circ}\text{C}$ , and the impact test at room temperature were carried out to explore its mechanical and thermal characteristics under temperature change environment. The constitutive model of the material suitable for temperature change environment is deduced, the numerical calculation is carried out in MATLAB, compared with the relative tested curve, and the obtained constitutive model is applied to the modeling calculation in ABAQUS and the results are verified. The results show that the modified epoxy resin has better strength, stiffness, impact toughness and lower coefficient of linear expansion than common epoxy resins such as E-44, E-51 and EPON e863. The material is suitable to be used as the matrix of spaceborne electronic component potting module. The proposed empirical constitutive model can obtain the stress-strain relationship of the material at any temperature in the range of  $-35^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$  through interpolation, and can be directly used in relevant damage analysis and life prediction of electronic component potting module. The research method and derivation results have engineering reference value.

**Keywords:** modified epoxy resin; mechanical and thermal characteristics; constitutive model

**引用格式:**黄峻峰, 贺尔铭, 陈鹏翔, 等. 某型改性环氧树脂力热特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(5): 978-986

HUANG Junfeng, HE Erming, CHEN Pengxiang, et al. Study on mechanical and thermal properties of a modified epoxy resin[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(5): 978-986 (in Chinese)