

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.024

# 潜伏性改性咪唑低温固化剂/环氧树脂体系的性能

王志远, 陈刚, 魏化震, 王启芬

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

**摘要:** 为探明一种新型潜伏性改性咪唑低温固化剂 M-10 用于固化高性能环氧树脂体系的性能, 进一步在低温固化预浸料上的应用积累基础数据, 采用差示扫描量热分析、动态热机械分析、浇注体力学性能测试等方法研究了固化剂用量及后处理温度对潜伏性低温固化环氧树脂体系的固化特性、力学性能、耐热性和室温适用期等性能的影响。结果表明, 当固化剂用量为 5% 时, 树脂体系短时间内无法实现低温快速固化; 当固化剂用量为 10% 和 20% 时, 树脂体系均可实现低温快速固化, 经 80 °C/4 h 固化和 80 °C/4 h 的后处理工艺过程, 固化度均能达到 90% 以上, 已能够实现较高等度的固化, 两者的力学性能及玻璃化转变温度( $T_g$ )也基本保持相当。高温后处理工艺过程可使低温固化浇注体的  $T_g$  明显提高, 力学性能提高不明显, 甚至有所降低。当固化剂质量分数为 10% 时, 固化工艺参数为 80 °C 固化 4 h 并经 170 °C/4 h 高温后处理, 树脂体系具有最优的综合力学性能和耐热性, 拉伸强度和  $T_g$  分别为 48 MPa 和 140 °C。该固化剂是一种性能优异的潜伏性低温固化剂, 与环氧树脂混合后体系的室温适用期超过 35 d, 有望进一步应用于低温固化预浸料的制备。

**关键词:** 潜伏性; 低温固化; 环氧树脂; 力学性能; 耐热性

**中图分类号:** TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0154-06

## The Performance of a Latent Modified Imidazole Low Temperature Curing Agent/Epoxy Resin System

Wang Zhiyuan, Chen Gang, Wei Huazhen, Wang Qifen

(Shandong Nonmetallic Materials Institute, Jinan 250031, China)

**Abstract:** In order to investigate the performance of a new latent modified imidazole curing agent M-10 for curing high performance epoxy resin system, and to accumulate basic data for further application in low temperature curing prepreg, the effects of the content of the latent low-temperature curing agent M-10 and the post-treatment temperature on the curing properties, mechanical property, heat resistance and the pot life at room temperature of the epoxy resin system were studied by differential scanning calorimetry, dynamic thermomechanical analysis and test of mechanical properties of epoxy resin casting. The results show that the resin system can not achieve fast curing at low temperature in a short time when the content of the curing agent is 5%. When the curing agent content are 10% and 20%, the resin system can realize fast curing at low temperature. After curing at 80 °C for 4 h and later post-treatment at 80 °C for 4 h, a higher curing degree is more than 90%, and the mechanical properties and glass transition temperature ( $T_g$ ) are basically the same. After high temperature post-treatment,  $T_g$  of the resin casting increases obviously, but the mechanical properties increase not obvious, or even decrease. The resin system with a curing agent content 10%, being cured at 80 °C for 4 h and later post-treated at 170 °C for 4 h has the best comprehensive mechanical properties and heat resistance, whose tensile strength and  $T_g$  are 48 MPa and 140 °C, respectively. The curing agent M-10 is a kind of latent low temperature curing agent with excellent performance. After mixing with epoxy resin, the resin system has a pot life more than 35 days at room temperature, which is expected to be further applied to the preparation of low temperature curing prepreg.

**Keywords:** latent ; low temperature curing ; epoxy resin ; mechanical properties ; heat resistance

低温固化环氧树脂体系固化温度一般低于 100 °C, 相较于固化温度高达 170~180 °C 以上的高温固化环氧树脂体系, 具有固化温度低、内应力小等诸多优点, 但是目前常见的一些低温固化环氧树

**通信作者:** 王志远, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为先进树脂基复合材料树脂基体及新型低成本制造工艺技术

**收稿日期:** 2023-05-20

**引用格式:** 王志远, 陈刚, 魏化震, 等. 潜伏性改性咪唑低温固化剂/环氧树脂体系的性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8):154-159.

Wang Zhiyuan, Chen Gang, Wei Huazhen, et al. The performance of a latent modified imidazole low temperature curing agent/epoxy resin system[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8):154-159.

脂体系适用期只有几个小时,多用于胶黏剂及复合材料湿法缠绕工艺中,不适合用于制备预浸料,由于复合材料许多零部件都采用预浸料形式进行制造,因此开发预浸料用低温固化环氧树脂体系具有重要的应用价值,有利于促进复合材料在国防及民用领域的应用<sup>[1-7]</sup>。

采用低温固化预浸料制备复合材料构件,有助于降低构件内应力,减少翘曲变形及开裂,并且可以选用非耐高温的工装模具材料和相关辅助材料,减少了制造过程的成本,是复合材料低成本制造领域的一个重要研究方向,近年来得到国内外很多研究者的重视,并形成一些系列化的产品,被应用于战机机翼、无人机机身、风电叶片主芯轴、汽车结构件及深空探测等领域<sup>[8-17]</sup>。低温固化预浸料的关键是选择合适的具有较好潜伏性和室温适用期长的低温固化剂,此外还需要调控树脂组分和制备工艺以满足预浸料的制备和使用要求。由于通常的固化剂无法同时满足低温固化和室温适用期长的要求,低温固化预浸料及相关树脂体系的研制也是一个难点,产品种类较少。目前国外商品化的低温固化预浸料主要集中在几家大型复合材料厂商,如Hexcel公司、Cytec公司,牌号较少,并且出于配方保密的要求,其产品所用低温固化树脂体系或所用固化剂未见报道。国内商品化的低温固化预浸料主要是北京航空材料研究院开发的LT系列,但是其所用固化剂也未见报道。其它见诸报道的一些低温固化预浸料多采用复杂的固化剂和促进剂进行搭配,组分稍显较多,且其树脂基体多为通用双酚A环氧树脂或者酚醛型环氧树脂,对一些高性能环氧树脂基体如TDE-85等的使用较少<sup>[14]</sup>。

针对目前低温固化预浸料用高性能树脂体系较少且组分较为复杂的问题,笔者探索采用一种新型潜伏性改性咪唑类固化剂M-10单一组分作为固化剂,以高性能环氧树脂基体TDE-85和通用环氧树脂E-51的复合为基体树脂,制备潜伏性低温固化环氧树脂体系。

潜伏性改性咪唑类固化剂M-10是一种淡黄色粉末状固化剂,其与环氧树脂混合后具有室温适用期长、固化温度低等特性,因此可考虑应用其作为低温固化预浸料中的固化剂组分。目前该固化剂主要应用于单组分胶黏剂中,如环氧电子灌封胶等,尚未见用于复合材料预浸料用树脂体系的报

道。此外该固化剂用于固化高性能环氧树脂时的固化特性以及对树脂体系的力学性能和耐热性的影响也未见报道。因此,从探索该潜伏性低温固化剂用于制备低温固化预浸料用树脂体系及积累该固化剂用于高性能环氧树脂固化的相关性能数据的角度出发,对M-10固化剂组成的环氧树脂体系的固化特性、力学性能和耐热性及适用期等特性进行了研究,为进一步用于低温固化预浸料积累相关数据,奠定一定的基础。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

环氧树脂:TDE-85,天津津东化学工业有限公司;

环氧树脂:E-51,南通星辰合成材料有限公司;

潜伏性改性咪唑类固化剂:M-10,常州马蹄莲树脂有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

电热鼓风干燥箱:101x-4型,上海树立仪器仪表有限公司;

真空烘箱:DZF-6050AB型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC204型,德国Netzsch公司;

动态热机械(DMA)分析仪:DMA 242型,德国NETZSCH公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Magna750型,美国Nicolet公司;

凝胶实验测试热板:自制;

拉力试验机:INSTRON型,美国Instron公司。

### 1.3 试样制备

浇注体的制备:将环氧树脂TDE-85与E-51按质量比1:1于烧杯中混合,然后分别加入质量分数为5%、10%和20%的M-10固化剂并搅拌均匀,得到不同固化剂比例的环氧树脂体系。将上述环氧树脂于真空烘箱中脱泡,然后浇注入模具中,最后放入电热鼓风干燥箱中按照80℃/4h的固化工艺参数进行固化,然后自然冷却降温,脱模得到浇注体。

浇注体后处理:将浇注体分别放于烘箱中按照80℃/4h,130℃/4h和180℃/2h的工艺参数进行自由后处理,自然冷却至室温。

浇注体试样制备:采用水刀切割成标准拉伸试

样和玻璃化转变温度( $T_g$ )试样,其中 $T_g$ 试样尺寸为55 mm×10 mm×4 mm,并将试样边缘打磨至光滑平整。

#### 1.4 性能测试

**凝胶时间测试:**采用热板拉丝法,将热板温度调至实验温度,然后取适量环氧树脂置于热板上的凹槽内,玻璃棒不断搅拌,直至环氧树脂拉丝拉断,记录整个过程的时间,即为凝胶时间;

**浇注体力学性能:**拉伸强度、拉伸弹性模量和断裂伸长率按照 GB/T2567-2008 测试,拉伸速度2 mm/min,状态调节温度(23±2) °C,状态调节湿度(50±5)%RH;

**室温适用期测试:**将环氧树脂胶液置于离型纸上摊成薄层,记录胶液触干(用手触摸不粘手)的时间来表示树脂体系的室温适用期;

**DSC测试:**将10 mg左右的环氧树脂放入铝坩埚内,氮气气氛,升温速率5 °C/min,将不同固化剂含量的树脂体系在室温~300 °C进行扫描,得到DSC曲线;

**固化度测试:**采用DSC方法,测量树脂胶液的放热量及固化物的放热量,二者的差值与总放热量的比值即为固化度;

**$T_g$ 测试:**采用DMA法按 ASTM D4065-2020 标准进行测试,双悬臂变形模式,频率1 Hz,温度范围20~250 °C,升温速率5 °C/min。以储能模量( $E'$ )-温度( $T$ )曲线上储能模量下降最快的开始温度作为浇注体的 $T_g$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同固化剂含量的环氧树脂体系的DSC曲线

M-10固化剂质量分数为5%,10%和20%的环氧树脂体系的DSC曲线如图1所示,图2为固化剂质量分数5%的环氧树脂体系DSC曲线的放大图。曲线上放热峰的起始温度( $T_i$ )、峰顶温度( $T_p$ )和放热结束温度( $T_f$ )及单位质量树脂的放热量,列于表1。

由图1可以看出,固化剂质量分数为20%的环氧树脂体系的放热峰最为尖锐,随着固化剂含量的

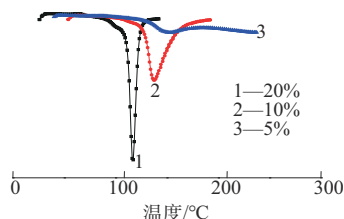


图1 不同固化剂含量树脂体系的DSC曲线

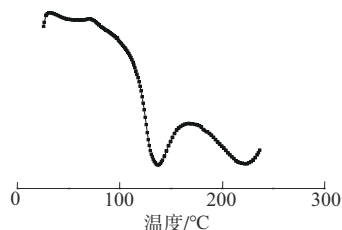


图2 固化剂质量分数为5%树脂体系的DSC曲线放大图

表1 放热峰的特征温度及放热量

固化剂质量分数/%	第一个放热峰特征温度/°C			第二个放热峰特征温度/°C			放热量/(J·g <sup>-1</sup> )
	$T_i$	$T_p$	$T_f$	$T_i$	$T_p$	$T_f$	
5	116	137	156	178	224	263	197.62
10	114	123	142	—	—	—	319.12
20	111	116	122	—	—	—	268.68

减少,放热峰的尖锐程度逐渐变缓,当固化剂质量分数为5%时,环氧树脂体系的放热峰最为平缓。随着固化剂含量的减少,放热峰温度也逐渐向高温方向移动,由116 °C移动到123 °C和137 °C。由图1还可以看出,固化剂质量分数为20%和10%的树脂体系在DSC曲线的后段(150 °C以后)为一平滑直线,而固化剂质量分数为5%的树脂体系的DSC曲线的后段(150 °C以后)并不平滑,仍有放热峰的存在。因此进一步放大固化剂质量分数为5%的DSC曲线于图2。

从放大图图2及表1可以看出,与固化剂质量分数为10%和20%不同,固化剂质量分数为5%时环氧树脂体系出现了两个放热峰,第一个放热峰的 $T_i$ 、 $T_p$ 和 $T_f$ 分别约为110,135 °C和150 °C,第二个放热峰的 $T_i$ 、 $T_p$ 和 $T_f$ 分别约为175,220 °C和260 °C。这表明,在第一个放热峰结束时,环氧树脂体系没有固化完全,在更高的温度下,发生了二次固化,因此这也说明了固化剂的含量较低,在低温时不能使环氧树脂完全固化,在高温时发生了进一步的固化反应。

由表1可以看出,随着固化剂含量的增加,放热峰的起始温度基本均在110 °C左右,而峰顶温度和峰末温度则逐渐向低温方向移动。当固化剂质量分数为20%时,放热 $T_i$ 、 $T_p$ 和 $T_f$ 相当集中,在110~120 °C之间,表明固化反应比较剧烈,表明固化剂用量偏多;而固化剂质量分数为10%时,三个特征温度则相对比较分散,在110~140 °C之间,表明该固化剂含量的环氧树脂体系固化放热相对比较平缓。

### 2.2 不同固化剂含量的树脂体系的凝胶化时间

凝胶化时间对于确定固化工艺具有更加现实

的指导意义。经测定固化剂质量分数为5%时,环氧树脂体系在80℃下经过240 min后仍未发生凝胶化反应,并且将温度升至160℃时环氧树脂短时间内也未凝胶,表明环氧树脂体系在80℃下反应速度非常缓慢。因此,固化剂质量分数为5%时,环氧树脂体系在80℃下短时间内无法实现低温固化。

固化剂质量分数为10%时,环氧树脂体系在80℃下15 min后即变成膏状,70℃下75 min发生凝胶。固化剂质量分数为20%时,环氧树脂体系在70℃下38 min发生凝胶,60℃下55 min发生凝胶,50℃下2 h未发生凝胶。

可见,固化剂质量分数为10%和20%时,环氧树脂体系在70~80℃的凝胶时间适中,选择在该温度段进行凝胶化反应,能够有效的控制反应速度和反应时间,并且可以实现较短时间内低温固化。

### 2.3 M-10低温固化树脂体系的固化度

图3为固化剂质量分数10%和20%的浇注体经80℃/4 h固化及80℃/4 h后处理,固化剂质量分数5%的浇注体经80℃/4 h及120℃/5.5 h固化后的DSC曲线。计算后的固化度结果列于表2。

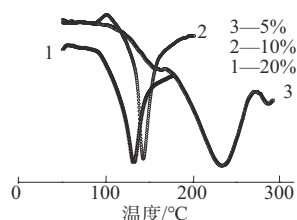


图3 不同固化剂含量浇注体固化物的DSC曲线

表2 不同固化剂含量的树脂体系在不同固化制度下的固化度

固化剂质量分数/%	固化工艺	放热量/(J·g <sup>-1</sup> )		固化度/%
		固化物	总放热	
20	80℃/4 h固化+80℃/4 h后处理	23.62	268.68	91.2
10	80℃/4 h后处理	23.33	319.12	92.7
20	80℃/4 h固化+130℃/4 h后处理	23.62	359.4	93.4
10	80℃/4 h+120℃/5.5 h固化	36.83	425.15	91.3
5	80℃/4 h+120℃/5.5 h固化+180℃/2 h后处理	89.63	197.62	55
5	80℃/4 h+120℃/5.5 h固化+180℃/2 h后处理	0	197.62	100

对固化剂质量分数为10%和20%的浇注体,按照80℃/4 h于模具中固化,脱模后置于烘箱中再经80℃/4 h后处理过程,测试其固化度分别为92.7%和91.2%;而经130℃/4 h后处理后测得固化度分别为91.3%和93.4%。可见,经80℃固化和后处理后,固化物已经达到较高的固化度,该固化度基本能够满足实际使用要求,经更高温度130℃后处理,并未使固化度有明显提升。

对固化剂质量分数为5%的浇注体,按照80℃/4 h于模具中进行固化时,发现浇注体未能固化,随后继续经120℃/5.5 h固化,浇注体发生了固化,脱模后,测试固化度为55%。然后将脱模后的浇注体置于烘箱中经180℃/2 h后处理,固化物经DSC扫描时,已无放热峰,近乎完全固化。即按照液体DSC曲线中第二个放热峰的起始温度进行后处理2 h可实现近乎完全固化。由此可见,对于固化剂质量分数为5%的浇注体,不能实现低温固化,必须在高温下进行固化和后处理,才能达到较高的固化度。

### 2.4 不同固化剂用量浇注体的力学性能和 $T_g$

固化剂质量分数为10%和20%的浇注体按照80℃/4 h固化工艺参数进行固化,固化剂质量分数5%的浇注体按照80℃/4 h+120℃/5.5 h固化工艺参数固化,然后均进行175℃/2 h的后固化处理。浇注体的拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率列于表3,DMA方法测试浇注体 $T_g$ 过程中的 $E'$ 随 $T$ 的变化曲线如图4所示。

表3 不同固化剂用量浇注体的力学性能和 $T_g$

固化剂含量/%	拉伸强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	$T_g$ /°C
5	55.3	3.35	1.89	116.7
10	48.2	3.22	1.82	140
20	42.8	3.18	1.50	146

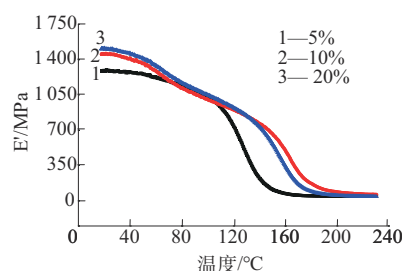


图4 DMA测试玻璃化转变温度过程中的 $E-T$ 曲线

由表3可以看出,固化剂M-10质量分数由5%增加到20%时,浇注体的拉伸强度、拉伸弹性模量和断裂伸长率均在逐渐降低, $T_g$ 在逐渐升高。当固化剂质量分数在5%时,浇注体的力学性能最高。但此时浇注体在80℃下固化了4 h仍未发生硬化,继续在120℃下固化了5.5 h才完成固化,无法实现低温固化的效果。

而当固化剂质量分数为10%和20%时,浇注体在较低温度80℃下4 h即能发生固化,固化度能达到90%以上,且固化剂质量分数为10%时浇注体的力学性能要优于固化剂质量分数为20%时,虽然固

剂质量分数为20%时 $T_g$ 略高6℃,但两者的 $T_g$ 总体比较接近,表明固化剂质量分数为10%和20%对浇注体的耐热性影响不大。

因此,综合考虑固化温度、力学性能和 $T_g$ ,选择M-10固化剂质量分数为10%时,树脂体系既能够实现低温固化,同时又具有较高的力学性能和 $T_g$ 。同时较固化剂质量分数20%时,用量减少了一半,有助于延长环氧树脂体系的适用期,降低原材料成本,因此选择固化剂加入质量分数10%是低温固化环氧树脂体系比较合适的固化剂加入量。

### 2.5 后处理工艺对低温固化环氧树脂体系力学性能和耐热性的影响

对固化剂质量分数分别为20%和10%的低温固化环氧树脂体系,按照80℃/4h固化工艺参数制备浇注体后,分别按照80℃/4h(I)和130℃/4h+170℃/4h(II)的后处理工艺进行后固化,其力学性能和 $T_g$ 见表4、图5及图6。

表4 经不同后处理工艺处理的浇注体的力学和耐热性能

固化剂质量分数/%	后处理工艺	拉伸强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	$T_g/^\circ\text{C}$
10	I	40.4	3.90	1.18	87.0
	II	48.2	3.22	1.82	140.0
20	I	50.9	3.66	1.47	84.1
	II	42.8	3.18	1.50	146.0

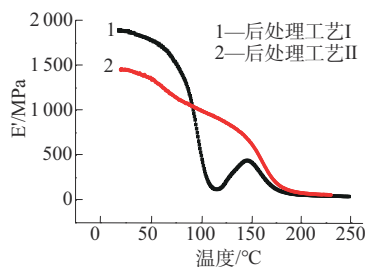


图5 固化剂质量分数20%低温固化环氧树脂体系经不同后处理工艺后的 $T_g$

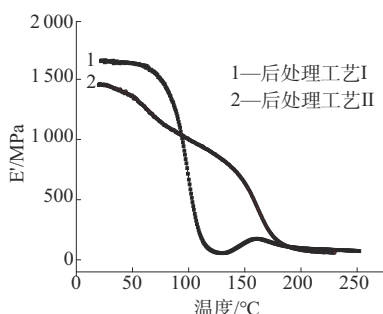


图6 固化剂质量分数10%低温固化环氧树脂体系经不同后处理工艺后的 $T_g$

由表4可以看出,不同的后处理工艺对低温固化浇注体的力学性能和耐热性有一定的影响。130℃/4h+170℃/4h的高温后处理(II)与80℃/4h的低温后处理(I)相比较,高温后处理使得固化剂

质量分数为10%和20%的浇注体的 $T_g$ 由87.0℃和84.1℃左右提高到140℃和146℃,提高程度显著,拉伸弹性模量则均降低了约15%;高温后处理使得固化剂质量分数为10%的浇注体的断裂伸长率较低温后处理时提高了约54%,拉伸强度提高了19.3%;而对于固化剂质量分数为20%的浇注体而言,高温后处理后拉伸强度降低了15.9%,断裂伸长率略微提高。

由图5和图6可以看出,在动态热机械法测试 $T_g$ 的过程中,两种不同固化剂含量的浇注体在80℃/4h低温后处理(I)后, $E'$ 在下降到最低值后(约在114℃处)又出现了上升趋势,并出现了一个小的峰值,而经130℃/4h+170℃/4h的高温后处理(II)后的浇注体,则未出现此种情况, $E'$ 随温度的升高呈现一直下降趋势,最后基本趋于稳定。这可能是由于经80℃/4h低温后处理(I)时,浇注体的固化度小于130℃/4h+170℃/4h的高温后处理(II)时,在 $T_g$ 测试过程中,较高的测试温度使得试样进一步发生固化,因此表现为 $T_g$ 的一个小幅度提升。

综上,对于10%固化剂含量的浇注体,经130℃/4h+170℃/4h的高温后处理(II)较80℃/4h的低温后处理(I),拉伸强度、断裂伸长率和 $T_g$ 提高明显,拉伸弹性模量有所下降,表现为材料的韧性有所提高。总体上经过高温后处理,浇注体的综合力学性能提高较为明显。对于该低温固化树脂体系,若需获得较高的 $T_g$ ,需至少在140℃的温度进行高温后处理过程才能达到,以满足高温使用要求。

### 2.6 不同固化剂质量分数环氧树脂体系的适用期

测试了固化剂质量分数为5%、10%和20%的环氧树脂体系在室温下的适用期,结果发现,放置35~40d后,树脂体系仍有较强的黏性,表明含该固化剂的环氧树脂体系的室温适用期超过了35d,约40d,因此该固化剂是一种潜伏性优良的环氧树脂固化剂。

同时在浇注体制备过程中,选择在温度为40℃下对环氧树脂体系进行真空脱泡,至脱泡结束时间大约7h,在该过程中环氧树脂体系一直保持黏度较小的稳定状态,未出现黏度激增等现象,表明在40℃下环氧树脂体系的适用期至少大于7h,具有非常优良的潜伏性。

## 3 结论

将一种新型潜伏性改性咪唑固化剂M-10用于高性能环氧树脂体系的制备,研究了固化剂的含量和后处理工艺对树脂体系固化特性、力学性能、耐热性和适用期等特性的影响,得到以下结论:

(1)添加M-10固化剂质量分数为5%时,TDE-

85/E51 复合环氧树脂体系无法实现低温固化;固化剂质量分数为 10% 和 20% 时,该环氧树脂体系能够实现低温固化,经 80 °C/4 h 固化后,固化度能达到 90% 以上。

(2)与 80 °C/4 h 低温后处理相比,130 °C 后处理/4 h+170 °C/4 h 高温后处理,可使浇注体的  $T_g$  由 84~87 °C 显著提高到 140~146 °C,拉伸弹性模量有所降低,拉伸强度提高不明显,有时甚至有所降低。

(3)综合考虑固化温度、力学性能和  $T_g$ ,M-10 固化剂质量分数为 10% 时,TDE-85/E51 复合环氧树脂体系既能够实现低温固化,同时又具有较高的力学性能和  $T_g$ ,为最佳固化剂用量。

(4) TDE-85/E51/M-10 环氧树脂体系在室温下的适用期超过 35 d,潜伏性能优良,且在 40 °C 下也具有较长的适用期,有望进一步用于制备低温固化环氧树脂基预浸料。

#### 参考文献

- [1] 刘宁,侯晓,刘津生,等.不同固化剂复配的低温固化环氧树脂体系性能[J].固体火箭技术,2022,45(2):274-280.  
Liu Ning, Hou Xiao, Liu Jinsheng, et al. Properties of epoxy resin system cured by different mixed curing agents at low temperature [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(2):274-280.
- [2] 李伟捷,光善仪,徐洪耀.不同固化剂复配的耐高温环氧树脂体系性能[J].高分子材料科学与工程,2022,38(5):69-80.  
Li Weijie, Guang Shanyi, Xu Hongyao. Properties of high temperature resistant epoxy resin cured by different mixed curing agent[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(5):69-80.
- [3] 刘明.室温固化湿法缠绕用环氧树脂体系研究[J].热固性树脂,2017,32(3):57-60.  
Liu Ming. Research on the room temperature curing epoxy resin system for wet-winding[J]. Thermosetting Resin, 2017, 32(3):57-60.
- [4] 周文英,齐署华,赵红振,等.环氧复合材料低温固化剂研究进展[J].中国胶粘剂,2007,16(1):44-52.  
Zhou Wenyong, Qi Shuhua, Zhao Hongzhen, et al. Research progress of low temperature curing agent for epoxy resin composites[J]. China Adhesives, 2007, 16(1):44-52.
- [5] 刘燕峰,刘青曼,陈旭.高温固化松香基环氧树脂碳纤维增强复合材料性能研究[J].复合材料科学与工程,2022(4):40-44.  
Liu Yanfeng, Liu Qingman, Chen Xu. Study on properties of rosin based epoxy resin carbon fiber reinforced composites cured at high [J]. Composites Science and Engineering, 2022(4):40-44.
- [6] 曾娟娟,杨元龙,马哲.低温固化环氧树脂灌浆材料的性能研究[J].新型建筑材料,2017,44(10):112-115.  
Zeng Juanjuan, Yang Yuanlong, Ma Zhe. Study on the properties of low-temperature curing epoxy resin grouting material[J]. New Building Materials, 2017, 44(10):112-115.
- [7] 刘宁,包艳玲,周伟江,等.固化剂的混合对低温固化环氧树脂体系耐热性的影响[J].合成材料老化与应用,2017,46(5):10-13.  
Liu Ning, Bao Yanling, Zhou Weijiang, et al. Effect of curing agents mixing on the thermal properties of low-temperature cured epoxy resin system[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2017, 46(5):10-13.
- [8] 廖国峰,杨小兵,吕飘飘,等.中低温固化碳纤维预浸料的制备与性能[J].复合材料科学与工程,2020(12):59-62.  
Liao Guofeng, Yang Xiaobing, Lyu Piaopiao, et al. Preparation and properties of moderate to low temperature curing carbon fiber prepreg[J]. Composites Science and Engineering, 2020(12):59-62.
- [9] Li Hong, Chen Gong, Su Hang, et al. Effect of the stoichiometric ratio on the crosslinked network structure and cryogenic properties of epoxy resins cured at low temperature[J]. European Polymer Journal, 2019, 112:792-798.
- [10] 陈祥宝.先进复合材料低成本技术[M].北京:化学工业出版社,2004.  
Chen Xiangbao. Low cost technology for advanced composite materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [11] 王志远,陈刚,王启芬,等.长贮存期低温固化环氧树脂基预浸料研究进展[J].工程塑料应用,2018,46(6):148-152.  
Wang Zhiyuan, Chen Gang, Wang Qifen, et al. Research progress of low temperature curing epoxy prepreg with long pot life[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):148-152.
- [12] 杨智勇,张东,顾春辉,等.国外空天往返飞行器用先进树脂基复合材料研究与应用进展[J].复合材料学报,2022,39(7):3 029-3 043.  
Yang Zhiyong, Zhang Dong, Gu Chunhui, et al. Research and application of advanced resin matrix composites for aerospace shuttle vehicles abroad[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7):3 029-3 043.
- [13] 包建文.高效低成本复合材料及其制造技术[M].北京:国防工业出版社,2012:33-68.  
Bao Jianwen. High-efficient and low-cost manufacturing technology for advanced composites[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012:33-68.
- [14] 陈祥宝,张宝艳,李斌太.低温固化高性能复合材料技术[J].材料工程,2011(1):1-6.  
Chen Xiangbao, Zhang Baoyan, Li Bintai. Low temperature cure high performance composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(1):1-6.
- [15] 汪亮,孙玲.低温固化高温使用复合材料应用研究[J].玻璃钢/复合材料,2010,(3):32-35.  
Wang Liang, Sun Ling. Application study of composite materials with low-temperature curing and high-temperature usage[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010, (3):32-35.
- [16] 魏运召,梁磊,吴健伟,等.中低温固化预浸料用环氧树脂基体的制备与性能研究[J].化学与粘合,2021,43(4):259-263.  
Wei Yunzhao, Liang Lei, Wu Jianwei, et al. Study on the preparation and properties of epoxy resin matrix for medium and low temperature curing prepregs[J]. Chemistry and Adhesion, 2021, 43(4):259-263.
- [17] 王东山,梁森,梁天锡.嵌入式低温共固化高阻尼纤维/树脂基复合材料[J].复合材料学报,2016,33(9):2 030-2 037.  
Wang Dongshan, Liang Sen, Liang Tianxi. Embedded low-temperature co-curing high damping fiber/resin matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(9):2 030-2 037.