

引用格式: 陈宇, 赵升龙, 刘清方. 核壳粒子增韧剂对环氧基中温固化胶膜性能的影响[J]. 材料工程, 2025, 53(2): 213-218.
CHEN Yu, ZHAO Shenglong, LIU Qingfang. Influence of core-shell particle toughening agent on performances of epoxy based medium temperature curing adhesive film[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(2): 213-218.

核壳粒子增韧剂对环氧基中温 固化胶膜性能的影响

Influence of core-shell particle toughening
agent on performances of epoxy based
medium temperature curing
adhesive film

陈宇*, 赵升龙, 刘清方

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

CHEN Yu*, ZHAO Shenglong, LIU Qingfang

(AECC Beijing Institute of Aeronautical
Materials, Beijing 100095, China)

摘要:采用一种核壳粒子作为增韧剂制备新型中温固化胶膜(SY-59),研究核壳粒子增韧剂对中温固化胶膜的微观形貌、玻璃化转变温度(T_g)、胶接性能、耐高温性能等性能的影响。实验结果表明,核壳粒子增韧剂的加入,可以使得胶膜的剪切强度和浮辊剥离强度显著提高,使其具有高强高韧的特点。核壳粒子增韧剂的最佳添加量为 15 phr,对应胶膜的 23 °C 剪切强度和 23 °C 浮辊剥离强度分别可以达到 40.5 MPa 和 10.6 kN·m⁻¹。同时,与端羧基丁腈橡胶(CTBN)增韧剂相比,核壳粒子增韧剂加入中温固化树脂体系后胶膜的 T_g 无明显变化,这使得其可以很好地解决橡胶增韧中温固化胶膜耐高温性能相对较差的问题,使胶膜具有耐高温的特点。对应胶膜的 120 °C 和 150 °C 剪切强度分别可以达到 29.8 MPa 和 10.2 MPa。最后,还对 SY-59 胶膜的全面性能进行评价,结果表明 SY-59 胶膜具有优异的耐介质性能、耐环境性能、批次稳定性和贮存稳定性。

关键词:胶膜;胶接性能;耐高温性能;核壳;增韧剂

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000688

中图分类号: TQ436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)02-0213-06

Abstract: The new medium temperature curing adhesive film (SY-59) is prepared using core-shell particle as the toughening agent. The influence of core-shell particle toughening agent on the microstructure, glass transition temperature (T_g), bonding properties, and high-temperature resistance properties of the medium temperature curing adhesive films are studied. The results show that the tensile shear strength and the floating roller peel strength of the adhesive film improve significantly by adding the core-shell particle toughening agent. The SY-59 adhesive film exhibits characteristics of high strength and high toughness. The optimal content of the core-shell particle toughening agent is 15 phr, and the 23 °C tensile shear strength and the 23 °C floating roller peel strength of the corresponding adhesive film can reach 40.5 MPa and 10.6 kN·m⁻¹ respectively. Meanwhile, compared with the carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile rubber (CTBN) toughening agents, the T_g of the medium temperature resin system modified core-shell particle toughening agents have no significant changes after being added to the medium temperature curing resin system. It indicates that core-shell particle toughening agents can effectively solve the problem of poor high-temperature resistance properties of rubber toughened medium temperature curing adhesive films, making the adhesive film with good high-temperatures resistance properties. The 120 °C and 150 °C tensile shear strength of the SY-59 adhesive film can reach 29.8 MPa and 10.2 MPa. Finally, the comprehensive properties of SY-59 adhesive film are evaluated, and the results show that the SY-59

adhesive film has excellent medium resistance properties, environmental resistance properties, batch stability properties and storage stability properties.

Key words: adhesive film; bonding property; high-temperature resistance property; core-shell; toughening agent

中温固化胶膜是一种单组分、中温固化(120~130 ℃)的膜状结构胶黏剂,具有胶接强度高、断裂韧性好、耐介质、耐湿热老化、抗疲劳、蠕变性能优良、工艺黏性和铺覆工艺良好等优点,广泛应用于航空、航天、交通、船舶、能源等领域,是胶黏剂的重要品种之一^[1-5]。以往的中温固化胶膜是以含有官能团的橡胶为增韧剂制备而成的,比如端羧基丁腈橡胶、端羧基聚丁二烯橡胶等^[6-10]。橡胶增韧中温固化胶膜的制备过程是含官能团的橡胶和环氧树脂共混熔融成一体,橡胶的反应型基团(如氨基、羧基和羟基)和环氧树脂的反应型基团(如羟基、环氧基)发生反应形成嵌段结构;随后,在环氧树脂固化过程中,橡胶逐渐与环氧树脂发生相分离,形成“海岛”两相结构,为环氧树脂提供良好的韧性。但是,研究表明,在环氧树脂固化过程中,橡胶增韧剂的相分离不彻底^[6-7],有少量的橡胶会遗留环氧树脂体系中,使得环氧树脂体系的交联密度和玻璃化转变温度显著下降,导致中温固化胶膜的耐高温性能较差,这限制了中温固化胶膜的应用范围。

核壳粒子是一类内核和外壳分别由不同聚合物材料组成的聚合物粒子,其中软核/硬壳的核壳粒子可以用来增韧环氧树脂,使得环氧树脂的韧性显著提高^[11-15]。比如,王婧等^[11]分别采用多种核壳粒子增韧环氧树脂,研究不同类型核壳粒子对环氧树脂的影响。结果表明,三种核壳粒子均可以使得环氧树脂体系的韧性显著提高,其中CSP-PP核壳粒子的增韧效果最好,添加8 phr的CSP-PP核壳粒子可以使得环氧树脂体系的断裂韧度提高了57.6%。马宁波等^[14]利用有机硅核壳聚合物增韧环氧树脂基体,制备环氧树脂胶黏剂,并研究有机硅核壳聚合物对环氧树脂胶黏剂的影响。结果表明,当有机硅核壳聚合物的含量仅为10%(质量分数)时,环氧树脂胶黏剂就可以获得良好的增韧效果,冲击强度提高了95.3%。核壳粒子不仅可以增韧环氧树脂,而且在固化前后其成分、形态、大小和分散状态始终保持不变,不存在相分离不彻底的问题。

因此,本工作通过核壳粒子作为增韧剂来解决以往橡胶增韧中温固化胶膜耐高温性能相对较差的问题,同时详细地研究核壳粒子增韧剂的加入和含量、增韧剂的类型等因素对中温固化胶膜微观形貌、玻璃

化转变温度和胶接性能等方面的影响,并对新型中温固化胶膜(SY-59)的性能进行全面评价。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

双酚A环氧树脂,工业级,南通星辰合成材料有限公司;双氰胺,工业级,宁夏嘉峰化工有限公司;促进剂,工业级,北京航空材料研究院;核壳粒子增韧剂,工业级,北京航空材料研究院;端羧基丁腈橡胶(CTBN),工业级,美国亨斯迈公司。

1.2 实验过程

1.2.1 胶膜的制备

采用种子溶液聚合法,制备出甲基丙烯酸甲酯、丁二烯和苯乙烯三元共聚(MBS)结构的核壳粒子。通过反应釜,将固体双酚A环氧树脂和液体双酚A环氧树脂热熔混合,待冷却至室温后,加入双氰胺和促进剂,混合均匀制备中温固化树脂体系。

以核壳粒子作为增韧剂,分别将0, 5, 10, 15, 20 phr和25 phr核壳粒子增韧剂加入到中温固化树脂体系中,通过反应釜和胶膜机等设备,制备不同核壳粒子增韧剂含量的新型中温固化胶膜(牌号为SY-59),研究核壳粒子增韧剂含量对胶膜的影响;根据核壳粒子增韧剂含量不同,分别简称为SY-59(0[#]), SY-59(5[#]), SY-59(10[#]), SY-59(15[#]), SY-59(20[#])和SY-59(25[#])。作为对比,还将CTBN加入中温固化树脂体系中,制备CTBN增韧中温固化胶膜。所有胶膜的单位面积质量均为300 g·m⁻²左右。

1.2.2 胶接试样制备

按照HB/Z 197—1991规定的方法,对2024-T3铝合金试样进行磷酸阳极化处理。将裁剪好的胶膜按相应性能要求铺贴在磷酸阳极化后的铝合金试样的胶接区域,在电热鼓风干燥箱中加压加热固化。固化条件为125 ℃/2 h。

1.3 性能测试

(1)蜂窝滚筒剥离强度:按GJB 130.7—1986通过电子万能试验机进行测试;(2)浮辊剥离强度:按GB/T 7122—1996通过电子万能试验机进行测试;(3)剪切强度:按GB/T 7124—2008通过电子万能试验机进行测试。

2 结果与分析

2.1 核壳粒子增韧剂含量对胶膜的影响

新型中温固化胶膜(SY-59)是以一种核壳粒子作为增韧剂制备而成的。表1为核壳粒子增韧剂的含量对SY-59胶膜胶接性能的影响。如表1所示,随着核壳粒子增韧剂含量由0 phr增加到15 phr,胶膜的浮辊剥离强度和剪切强度均得到显著提高。其中,浮辊剥离强度的提高幅度最大,由 $1.6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 提高到 $10.6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。随着核壳粒子增韧剂含量的进一步提高,当核壳粒子增韧剂含量为20 phr时,胶膜的浮辊剥离强度达到最高值($11.2 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$);而剪切强度却开始逐渐下降,25 phr核壳粒子增韧剂对应胶膜的剪切强度降低至 36.2 MPa 。综上所述,确定核壳粒子增韧剂的最佳添加量为15 phr左右。

浮辊剥离强度的变化幅度大是因为浮辊剥离强

表1 核壳粒子增韧剂含量对SY-59胶膜胶接性能的影响

Table 1 Effect of core-shell particle toughening agent content on bonding properties of SY-59 adhesive film

Core-shell particle toughening agent/phr	23 °C floating roller peel strength/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	23 °C tensile shear strength/MPa
0	1.6	32.6
5	6.4	36.7
10	8.7	38.9
15	10.6	40.5
20	11.2	38.8
25	9.5	36.2

度和胶膜的韧性密切相关。图1为核壳粒子增韧剂含量分别为0 phr和15 phr时对应的SY-59胶膜的浮辊剥离挠性板的扫描电镜图;图2为不同核壳粒子增韧剂含量的SY-59胶膜对应的浮辊剥离挠性板照片,挠性板指的是浮辊剥离性能测试时被剥离的 0.5 mm 铝合金薄板。通过剥离强度的大小和剥离试样的破坏界面可以很好地显示出胶膜韧性的好坏。当核壳粒子增韧剂为0 phr时,胶膜韧性较差,从图1(a)的扫描电镜图可以看出在试样剥离破坏后,破坏界面较为平滑,呈现出典型的脆性破坏特征;在剥离力的作用下发生脆性破坏时,处于基材界面附近的裂纹很少发生分岔和弯曲,导致破坏界面面积小,在浮辊剥离挠性板上遗留的固化物少,破坏后的浮辊剥离挠性板趋于“光板”,比如图2中SY-59(0[#])胶膜的浮辊剥离挠性板。随着核壳粒子增韧剂的加入和含量逐渐增加,胶膜的韧性得到显著提高。比如,当核壳粒子增韧剂为15 phr时,从图1(b)的扫描电镜图可以看出在试样剥离破坏后,破坏界面比较粗糙,呈现出典型的韧性破坏特征;在剥离力的作用下发生韧性破坏时,核壳粒子通过诱发银纹、塑性变形等多种形式,使得处于基材界面附近的裂纹不断发生分岔和弯曲,消耗了更多的破坏能,破坏界面面积大,在浮辊剥离挠性板上遗留的固化物明显增多,破坏模式逐渐趋于胶层破坏,比如图2中SY-59(15[#])胶膜的浮辊剥离挠性板。当核壳粒子增韧剂含量过高时,会出现分散不均匀的现象,造成界面相容性差,使得胶膜的浮辊剥离强度降低。

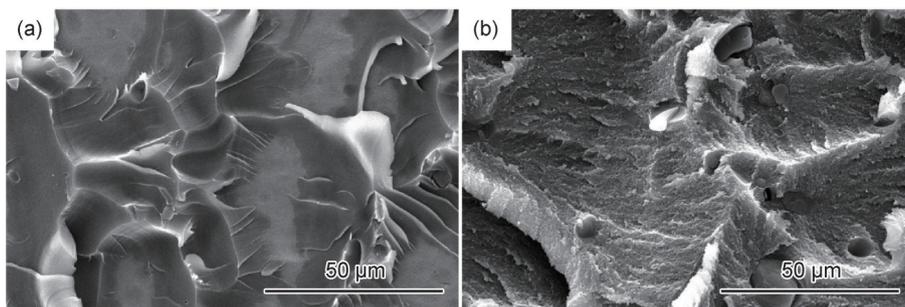


图1 SY-59(0[#])胶膜(a)和SY-59(15[#])胶膜(b)的浮辊剥离挠性板的扫描电镜图

Fig. 1 SEM images of floating roller peel flexible plates of SY-59 (0[#]) adhesive film (a) and SY-59 (15[#]) adhesive film (b)

剪切强度的变化幅度小是因为剪切性能测试的受力模式决定了剪切强度主要用来反映胶黏剂的强度和刚度,和胶黏剂的韧性关系不如浮辊剥离强度的密切。因此,当核壳粒子增韧剂的含量从0 phr增加至15 phr时,剪切强度虽然也显著提高,但是提高幅度不如浮辊剥离强度的大。当核壳粒子增韧剂为15 phr时,剪切强度达到峰值,为 40.5 MPa 。进一步提高核

壳粒子增韧剂含量会使得胶膜的刚性和强度下降,即剪切强度下降。

2.2 与传统增韧剂的影响对比

使用核壳粒子替代传统的含官能团橡胶作为中温固化胶膜的增韧剂,主要是为了解决橡胶相分离不彻底导致中温固化胶膜耐高温性能较差的问题。因此,在表2中测试和对比了核壳粒子增韧剂对应的

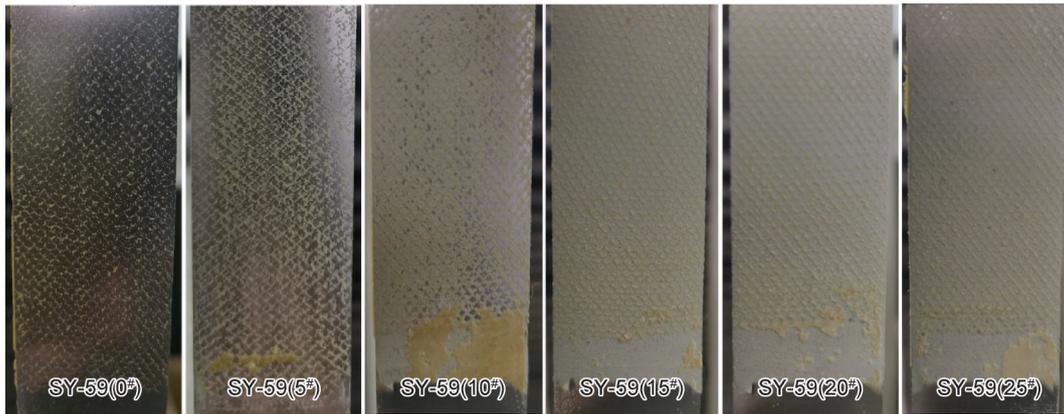


图2 不同含量核壳粒子增韧剂的SY-59胶膜浮辊剥离挠性板的照片

Fig. 2 Pictures of floating roller peel flexible plates of SY-59 adhesive films containing different core-shell particle toughening agents

SY-59胶膜和CTBN增韧剂对应的中温固化胶膜的胶接性能,两种胶膜的增韧剂添加量均为15 phr。

如表2所示,两种增韧剂对应的中温固化胶膜在(-55~80℃)时剪切性能、常温浮辊剥离强度和常温蜂窝滚筒剥离强度等性能方面无明显差别,均表现出优异的胶接性能,主要差别在于120℃剪切强度和150℃剪切强度。从实验数据上看,在温度超过80℃

后,采用CTBN作为增韧剂的中温固化胶膜的剪切性能就开始显著下降,120℃剪切强度和150℃剪切强度分别只有17.4 MPa和2.78 MPa。而采用核壳粒子作为增韧剂的SY-59(15#)胶膜的120℃剪切强度还可以保持在30 MPa左右,在温度超过120℃后,剪切强度才开始下降,150℃的剪切强度还能保持在10 MPa左右。

表2 SY-59(15#)胶膜和CTBN增韧中温固化胶膜的胶接性能对比

Table 2 Bonding properties comparison of SY-59 (15#) adhesive film and CTBN-adhesive film

Sample	23℃ floating roller peel strength/(kN·m ⁻¹)	23℃ honeycomb climbing drum peel strength/(N·mm·mm ⁻¹)	Tensile shear strength/MPa				
			-55℃	23℃	80℃	120℃	150℃
SY-59 (15#) adhesive film	10.6	Above:110,below:135	41.3	43.3	34.4	29.8	10.2
CTBN-adhesive film	10.9	Above:100,below:124	38.3	42.7	30.9	17.4	2.78

为了进一步证实两种增韧剂对中温固化胶膜耐高温性能的影响,还对CTBN增韧中温固化胶膜、SY-59(0#)胶膜和SY-59(15#)胶膜进行了DMA测试,通过添加前后胶膜的玻璃化转变温度(T_g ,储能模量切线交点)变化研究两种增韧剂对环氧树脂体系的影响,测试结果如图3所示。当中温固化胶膜未添加任何增韧剂时,其 T_g 为121.4℃。而当加入15 phr的CTBN增韧剂时,对应的中温固化胶膜的 T_g 显著下降,仅为111.9℃,这是CTBN在固化过程中相分离不彻底导致的。因此,温度达到120℃和150℃时储能模量已经显著下降,对应的中温固化胶膜的120℃剪切强度和150℃剪切强度也必然显著下降。而当加入15 phr核壳粒子增韧剂时,相比于SY-59(0#)胶膜,对应的SY-59(15#)胶膜的 T_g 基本保持不变,为121.0℃,这说明在环氧树脂体系固化前后核壳粒子无明显变化,不会影响到环氧树脂体系。因此,温度达到120℃时,SY-59(15#)胶膜的储能模量基本保持不变,使得120℃剪切强度也没有明显下降。

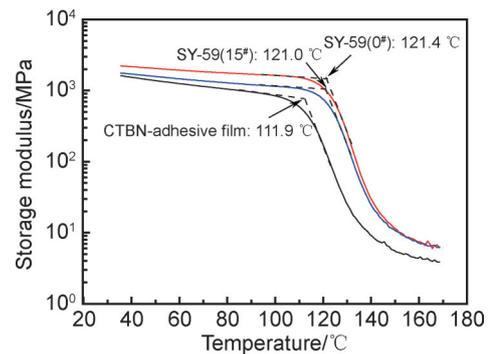


图3 CTBN增韧中温固化胶膜、SY-59(0#)胶膜和SY-59(15#)胶膜的DMA曲线

Fig. 3 DMA curves of CTBN-adhesive film, SY-59 (0#) adhesive film, and SY-59 (15#) adhesive film

综上所述,由于相分离不彻底的缘故,CTBN增韧剂会使得中温固化胶膜的 T_g 显著下降,从而导致其耐高温性能相对较差。而核壳粒子增韧剂在胶膜固化前后,在树脂基体中无明显变化,不存在相分离的问题,不会对环氧树脂体系产生负面影响。因此,对

应的中温固化胶膜在保持原有胶接性能的前提下 ($-55\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$), 具有优异的耐高温性能, 即兼具高强高韧和耐高温的优点。

2.3 SY-59胶膜的全面性能

除此以外, 还开展了核壳粒子增韧的 SY-59 胶膜的全面性能研究, 包括耐介质性能、耐环境性能、批次稳定性和贮存稳定性。SY-59 胶膜的核壳粒子增韧剂添加量为 15 phr。

表 3 为 SY-59 胶膜在不同条件下处理前后的常温剪切性能对比。与未经处理的相比, 胶接试样在浸泡不同介质、经历不同条件的湿热老化、热老化和盐雾实验后的常温剪切强度无明显下降, 说明 SY-59 胶膜具有优异的耐介质性能和耐环境性能。

为表征 SY-59 胶膜的批次稳定性, 采用相同的材料配方和工艺流程, 制备和测试了 20220126, 20221015 和 20230222 等三个批次胶膜的胶接性能。

表 3 SY-59 胶膜的耐介质性能和耐环境性能

Table 3 Medium resistance and environmental resistance properties of SY-59 adhesive film

Treatment conditions	Tensile shear strength/MPa
Untreated	40.0
(70 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, RH95% humidity, 30 d	38.2
(49 ± 3) $^{\circ}\text{C}$, RH95% humidity, 30 d	38.5
35 $^{\circ}\text{C}$, 5% NaCl, salt spray, 30 d	38.1
(70 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 30 d	38.2
MIL-H 8322B hydraulic oil, (70 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 30 d	38.0
BMS 3-11 hydraulic oil, (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 7 d	40.2
JP-4 fuel, (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 7 d	38.6
ASTM D471 hydro-carbon liquid, (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 7 d	37.8
Deionized water, (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 7 d	39.6

从表 4 可以看出, 三个批次胶膜的胶接性能无明显差异, 说明 SY-59 胶膜具有优异的批次稳定性。

表 4 SY-59 胶膜的批次稳定性研究

Table 4 Batch stability properties of SY-59 adhesive film

Sample	23 $^{\circ}\text{C}$ floating roller peel strength/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tensile shear strength/MPa					
		-55 $^{\circ}\text{C}$	23 $^{\circ}\text{C}$	80 $^{\circ}\text{C}$	120 $^{\circ}\text{C}$	150 $^{\circ}\text{C}$	
SY-59 adhesive film	20220126	10.6	41.3	43.3	34.4	29.8	10.2
	20221015	10.6	41.5	40.5	30.2	27.0	9.6
	20230222	10.2	39.8	41.2	33.1	27.8	10.0

同时, 还研究了 SY-59 胶膜在不同条件下的贮存稳定性。如表 5 所示, 与制备后立即胶接测试相比, SY-59 胶膜在经历 (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 外置 60 天、 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮存 1 年后外置 30 天等不同贮存条件后, 胶接测试得到的常温剪切强度和常温浮辊剥离强度均保持不变。同时, 在胶接过程中, SY-59 胶膜仍然具有良好的工艺黏性和铺覆性, 满足实际的工艺需求。综上所述, SY-59 胶膜具有优异的贮存稳定性。

表 5 SY-59 胶膜的贮存稳定性

Table 5 Storage stability properties of SY-59 adhesive film

Storage condition	Floating roller peel strength/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tensile shear strength/MPa
Use after preparation	10.2	41.2
(23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ for 30 d	11.0	39.3
(23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ for 60 d	11.6	40.5
$-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1 year	10.8	42.8
$-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1 year, 23 $^{\circ}\text{C}$ for 30 d	11.2	43.1

3 结论

(1) 核壳粒子增韧剂的加入, 使得 SY-59 胶膜的

剪切强度和浮辊剥离强度显著提高。当核壳粒子增韧剂的含量为 15 phr 时, 胶膜的剪切强度和浮辊剥离强度分别可以达到 40.5 MPa 和 $10.6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

(2) 与 CTBN 增韧的相比, 核壳粒子增韧的 SY-59 胶膜具有更好的耐高温性能, 120 $^{\circ}\text{C}$ 和 150 $^{\circ}\text{C}$ 剪切强度分别可以达到 29.8 MPa 和 10.2 MPa。

(3) 与 CTBN 增韧剂的相比, 核壳粒子增韧剂加入中温固化树脂体系 ($T_g=121.4\text{ }^{\circ}\text{C}$) 后胶膜的 T_g (121.0 $^{\circ}\text{C}$) 基本保持不变。

(4) 核壳粒子增韧的 SY-59 胶膜具有优异的耐介质性能、耐环境性能、批次稳定性和贮存稳定性。

参考文献

- [1] 刘真航. SY-24 中温固化胶接体系[J]. 中国胶黏剂, 2002, 11(1): 1-5.
LIU Z H. SY-24 moderate temperature cured adhesive system[J]. China Adhesives, 2002, 11(1): 1-5.
- [2] 梁滨, 刘清方, 陶树宇, 等. 蜂窝夹层结构面板胶黏剂的研究[J]. 中国胶黏剂, 2001, 10(5): 11-13.
LIANG B, LIU Q F, TAO S Y, et al. Adhesive for bonding facing to core of honeycomb sandwich structure [J]. China Adhesives, 2001, 10(5): 11-13.

- [3] 邵南,高堂铃,付刚,等.低面密度中温固化载体结构胶膜的性能研究[J].化学与粘合,2018,40(3):182-184.
SHAO N, GAO T L, FU G, et al. study on the moderate temperature-curing supported adhesive film with low areal density [J]. Chemistry and Adhesion, 2018, 40(3):182-184.
- [4] LI Y, BAI Y S, CHEN H, et al. Fabrication and evaluation of epoxy resin film adhesive with excellent heat resistance and potential flame retardance [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2023, 121: 103318.
- [5] 乔海涛,赖士洪,邹贤武,等.两种中温固化胶黏剂的剪切疲劳和蠕变性能研究[J].航空材料学报,2001,21(2):51-54.
QIAO H T, LAI S H, ZOU X W, et al. Study on shear fatigue and creep properties of two moderate temperature curing adhesives [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(2):51-54.
- [6] 周恒石,徐世爱.液体橡胶增韧环氧树脂的力学性能及增韧机理[J].高分子材料科学与工程,2013,29(11):50-53.
ZHOU H S, XU S A. Mechanical properties and toughening mechanism of rubber toughening epoxy resin [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(11):50-53.
- [7] WISE C W, COOK W D. CTBN rubber phase precipitation in model epoxy resins [J]. Polymer, 2000, 41(12):4625-4633.
- [8] LIU L Z, ZHANG H, ZHANG H, et al. The preparation and application of CTBN modified epoxy adhesive [J]. Pigment & Resin Technology, 2015, 44(6):358-363.
- [9] 孔杰,宁荣昌,唐玉生,等.含环氧基团丙烯酸酯液体橡胶增韧环氧树脂的研究[J].航空材料学报,2003,23(4):48-51.
KONG J, NING R C, TANG Y S, et al. Toughening of epoxy resin by modification with acrylate liquid rubber containing pendant epoxy groups [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(4):48-51.
- [10] 周文英,张帆,汪旭,等.EHTPB液体橡胶改性环氧树脂研究[J].现代塑料加工应用,2020,32(5):4-7.
ZHOU W Y, ZHANG F, WANG X, et al. Modification of epoxy resin with epoxidized hydroxyl terminated polybutadiene liquid rubber [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(5):4-7.
- [11] 王婧,薛忠民,李刚,等.不同纳米核壳粒子增韧环氧树脂体系的性能及机理研究[J].复合材料科学与工程,2018(7):5-11.
WANG J, XUE Z M, LI G, et al. Study on the properties and mechanism of toughened epoxy resin system with different core shell particles [J]. Composites Science and Engineering, 2018(7):5-11.
- [12] QUAN D, MURPHY N, IVANKOVIC A. Fracture behaviour of epoxy adhesive joints modified with core-shell rubber nanoparticles [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 182:566-576.
- [13] ZHANG X G, ZHANG B, SUN M M, et al. Toughened epoxy adhesive modified with core-shell nanoparticles containing epoxy groups on the surface [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 184/185:1375-1379.
- [14] 马宁波,白云翔,张春芳,等.有机硅核壳聚合物增韧环氧树脂胶黏剂[J].应用化工,2016,45(2):249-252.
MA N B, BAI Y X, ZHANG C F, et al. Organic silicon core-shell polymer toughening epoxy resin adhesive [J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(2):249-252.
- [15] 魏运召,吴健伟,匡弘,等.核壳粒子改性中温固化环氧树脂基体树脂的研究[J].化学与粘合,2018,40(3):165-168.
WEI Y Z, WU J W, KUANG H, et al. Study on a moderate temperature curing epoxy matrix resin toughened with core-shell particles [J]. Chemistry and Adhesion, 2018, 40(3):165-168.

基金项目:北京市科协2023-2025年度青年人才托举工程(BYESS2023335)

收稿日期:2023-10-17;修订日期:2024-10-12

通讯作者:陈宇(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事复合材料和结构胶黏剂的研究,联系地址:北京市海淀区温泉镇环山村8号北京航空材料研究院(100095),E-mail:chenyu_8071@163.com

(本文责编:解宏)