

# 一种新型含水的有机硅烷改性水性环氧树脂胶黏剂的合成制备

李梦鸽, 刘心毅, 刘安妮, 谭一兵, 彭龙贵\*

(西安科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以环氧树脂为基体, 采用化学接枝法, 通过小分子硅烷与环氧树脂中羟基发生缩合反应, 将 Si—O—C 键和 C—O—C 键引入环氧树脂中, 得到有机硅烷改性环氧树脂(SE)。通过傅里叶变换红外光谱测试确定合成成功。环氧值测试表明, 环氧值较改性前降低 0.12 mol/100 g。凝胶渗透色谱分析显示, SE 的数均分子量为 311 g/mol, 重均分子量为 530 g/mol, 分子量分布系数为 1.70, 分子量分布较为均一。在 SE 中加入含有羟基的非离子型乳化剂及水, 通过相反转法将混合液从油包水变为水包油状态, 形成具有单相稳定结构的均一乳液, 即有机硅烷改性环氧树脂水性乳液(WSE)。通过添加不同苯二酚类羟基供体确定有机硅烷改性环氧树脂水性乳化胶黏剂的最佳配方。存水率分析表明, 间苯二酚因分子间氢键作用存水率最高(11.2%)。热重分析与核磁氢谱证实水以结构水形式存在。高速搅拌可将乳液粒径降至 100 μm 以下, 1 400 r/min 条件下粒径分布更均匀, 符合正态分布。

**关键词:** 水性环氧树脂; 有机硅烷; 结构水; 相反转法; 胶黏剂

中图分类号: TQ323.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0052-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.010

## Synthesis and Preparation of a Novel Water-containing Organosilane-modified Waterborne Epoxy Resin Adhesive

LI Mengge, LIU Xinyi, LIU Anni, TAN Yibing, PENG Longgui\*

(College of Materials Science & Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Using epoxy resin as the matrix, a condensation reaction was carried out between a small-molecule silane and the hydroxyl groups in the epoxy resin by chemical grafting method, introducing Si—O—C bonds and C—O—C bonds into the epoxy resin, resulting in the production of silane-modified epoxy resin (SE). Fourier-transform infrared spectroscopy tests confirmed the successful synthesis. Epoxy value test indicated that the epoxy value decreased by 0.12 mol/100 g compared with that before modification. Gel permeation chromatography analysis showed that SE had a number-average molecular weight of 311 g/mol, a weight-average molecular weight of 530 g/mol, a molecular weight distribution coefficient of 1.70, and a relatively uniform molecular weight distribution. Nonionic emulsifiers containing hydroxyl groups and water were added to SE. The mixture was transformed from an oil-in-water to a water-in-oil state via the phase inversion method, forming a uniform emulsion with a single-phase stable structure, namely, the silane-modified epoxy resin aqueous emulsion (WSE). The optimal formulation of the silane-modified epoxy resin aqueous emulsion adhesive was determined by adding different hydroquinone hydroxyl donors. Water retention analysis showed that hydroquinone had the highest water retention rate (11.2%) due to intermolecular hydrogen bonding. Thermogravimetric test and nuclear magnetic resonance hydrogen spectra confirmed that water existed in the form of structural water. High-speed stirring could reduce the emulsion droplet size to below 100 μm. The droplet size distribution was more uniform under the condition of 1 400 r/min and conformed to a normal distribution.

**Keywords:** Waterborne epoxy resin; Organosilane; Structural water; Phase inversion method; Adhesive

收稿日期 Submitted date 2025-02-15; 修回日期 Revised date 2025-03-20; 录用日期 Accepted date 2025-04-10

\*联系人, penglonggui@163.com

引用本文: 李梦鸽, 刘心毅, 刘安妮, 等. 一种新型含水的有机硅烷改性水性环氧树脂胶黏剂的合成制备[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 52-56.

Citation: LI M G, LIU X Y, LIU A N, et al. Synthesis and preparation of a novel water-containing organosilane-modified waterborne epoxy resin adhesive[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 52-56.

环氧树脂因其优异的黏接性能、机械性能、耐化学腐蚀性、电绝缘性能,被广泛应用于复合材料、涂料、胶黏剂、电子封装和建筑等领域<sup>[1]</sup>。其中,E-51环氧树脂作为一种常见的双酚A型环氧树脂,具有低黏度、高反应活性和良好的加工性能,是胶黏剂制备中的重要基体材料<sup>[2]</sup>。然而,传统环氧树脂胶黏剂通常使用有机溶剂作为分散介质,在施工过程中会释放挥发性有机化合物(VOCs),对环境和人体健康造成危害。为减少溶剂型环氧树脂的环境污染问题,水性环氧树脂胶黏剂逐渐成为研究热点<sup>[3]</sup>。水性环氧树脂以水为分散介质,具有环保、安全、易清洗等优点,但其耐水性、耐候性和机械性能通常不如溶剂型环氧树脂。近年来,通过化学改性(如引入硅烷、聚氨酯等)和物理改性(如乳化技术)来提升水性环氧树脂的性能已成为研究的主要方向<sup>[4-5]</sup>。但水性环氧树脂的固化产物脆性较高等问题较为突出。为解决这一问题,有机硅烷改性是一种有效的化学改性方法。将硅氧烷链段引入环氧树脂分子中可显著提高其耐水性、耐热性和柔韧性<sup>[6-7]</sup>。

尽管传统水性环氧树脂凭借环保优势成为研究热点,但耐水性、黏接强度等性能短板限制其实际应用<sup>[8-9]</sup>。本研究旨在结合有机硅烷改性技术和相反转工艺,开发一种通过氢键作用将水分子作为结构水引入水性环氧胶黏剂中的工艺技术,进而制备一种新型有机硅烷改性水性环氧树脂胶黏剂。通过有机硅烷改性提升E-51环氧树脂的综合性能,同时利用相反转技术实现其水性化,从而制备出兼具环保性和高性能的水性胶黏剂。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

环氧树脂,E-51,工业级,南亚塑胶工业股份有限公司;乙酸丁酯、二月桂酸二丁基锡,分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;三乙胺,分析纯,天津市福晨化学试剂厂;氯甲基二甲基氯硅烷、甲酚红、百里香酚蓝、氢氧化钠、对苯二酚、邻苯二酚、间苯二酚、三乙烯四胺,分析纯,上海易恩化学技术有限公司;酚酞,分析纯,天津市天新精细化工开发中心;非离子型乳化剂,分析纯,西安志格物科技有限责任公司;聚酰胺650,分析纯,江西省宜春翔宇胶黏剂有限公司;去离子水,实验室自制。

### 1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),IRTracer-100,日本岛津制作所;热重分析仪(TG),TGA2,瑞士MettlerToledo公司;核磁共振波谱仪(NMR),Anavce NEO 400M,德国Bruker公司;凝胶渗透色谱仪(GPC),1260 II,美国Agilent公司;正置显微镜,Axiolab 5,北京普瑞赛司仪器有限公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 有机硅烷改性环氧树脂(SE)的制备

将60 g E-51与30 mL乙酸丁酯(溶剂)加入装有机机械搅拌器的三口烧瓶中,水浴加热至50℃,450 r/min搅拌至环氧树脂充分溶解,加入3.30 g氯甲基二甲基氯硅烷、

0.35 g催化剂二月桂酸二丁基锡和15.00 g三乙胺,充分反应7 h。去离子水洗液溶液3~5次,洗涤时间首次1 h,其余每次各30 min,洗涤后样品在60~70℃条件下旋转蒸发40 min,即得到SE。

#### 1.3.2 有机硅烷改性环氧树脂水性乳液(WSE)的制备

称取20 g SE和5 g非离子型乳化剂至烧杯,将烧杯放入65℃水浴锅,以1 200 r/min搅拌样品,同时称取去离子水(固含量为50%)匀速滴入烧杯,搅拌2 h后反应结束完成相性转变,得到产物WSE。

#### 1.3.3 水性乳化胶黏剂的制备

在相转过程中加入SE和非离子型乳化剂后加入1.3 g间苯二酚或其他苯二酚,将烧杯放入65℃水浴锅,以1 200 r/min搅拌样品,同时称取去离子水(固含量为50%)匀速滴入烧杯,搅拌2 h后相转结束,即制得有机硅烷改性环氧树脂水性乳化胶黏剂,简称水性乳化胶黏剂。

## 1.4 性能测试与表征

FTIR测试:采用傅里叶变换红外光谱仪分析基团验证合成,波数范围为4 000~400 cm<sup>-1</sup>。

环氧值测定:按照GB/T 1677—2023中盐酸-丙酮法测定环氧值。

TG测试:采用热重分析仪对水性乳化胶黏剂进行热性能分析,升温速率为10℃/min,测试时长为1 h。

<sup>1</sup>H NMR测试:采用核磁共振波谱仪样品进行核磁共振氢谱分析,溶剂为二甲基亚砜(DMSO)。

GPC测试:采用凝胶渗透色谱仪进行测试,流动相选用DMSO。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SE的合成机理

本文选用氯甲基二甲基氯硅烷与环氧树脂E-51侧链上的羟基反应,通过键的断裂重组,将Si—O—C键和C—O—C键引入环氧树脂,制备SE<sup>[10]</sup>。图1为SE的合成机理。

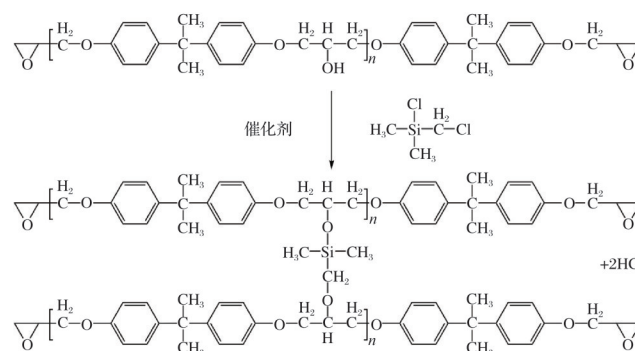


图1 SE的合成机理

Fig.1 Synthesis mechanism of SE

### 2.2 水性乳化胶黏剂的FTIR分析

图2为E-51、SE和WSE的FTIR谱图。从图2可以看出,3 511、1 735、1 080、910 cm<sup>-1</sup>处分别归属羟基(—OH)振

动峰、C=O 振动峰、Si—O—C 伸缩振动峰和环氧基振动峰, 1 096~1 150  $\text{cm}^{-1}$  处归属 C—O—C 键的不对称伸缩振动宽峰<sup>[11]</sup>。其中, 从 E-51 至 SE, 3 511  $\text{cm}^{-1}$  处的—OH 振动峰明显减弱, 表明 E-51 上的—OH 中的 O—H 键断裂。1 735  $\text{cm}^{-1}$  处峰值增大, 可能是由于洗涤过程中溶剂乙酸丁酯未完全除去而产生的 C=O 伸缩振动<sup>[12]</sup>。由于氯甲基二甲基氯硅烷与羟基反应活性大于环氧基, 且反应过程不损耗环氧基, 其振动峰面积与红外特征峰总面积之比几乎不变。因此, 以环氧基振动峰面积为基准, 对 Si—O—C 伸缩振动峰和 C—O—C 键的不对称伸缩振动宽峰在改性前后的变化进行定量分析。

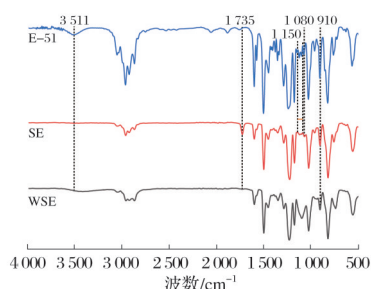


图2 E-51、SE和WSE的FTIR谱图

Fig.2 FTIR spectra of E-51, SE and WSE

基于朗伯比尔定律, 即物质对红外光吸收强度与其浓度、质量成正比, 计算公式为:

$$L_1 = A_{\text{Si-O-C}} / A_{\text{环氧基}} \quad (1)$$

$$L_2 = A_{\text{C-O-C}} / A_{\text{环氧基}} \quad (2)$$

式(1)~式(2)中:  $L_1$  为 Si—O—C 键相对环氧基的相对浓度比;  $L_2$  为 C—O—C 键相对环氧基的相对浓度比;  $A_{\text{Si-O-C}}$  为 Si—O—C 伸缩振动峰面积;  $A_{\text{C-O-C}}$  为 C—O—C 键的不对称伸缩振动宽峰面积;  $A_{\text{环氧基}}$  为环氧基振动峰面积。

依据  $L$  值大小定量反映环氧树脂改性前后 Si—O—C 和 C—O—C 振动峰的变化情况。表 1 为改性前后基团峰面积比值计算结果。从表 1 可以看出, 硅烷改性后,  $L$  增大, 即硅烷改性环氧树脂中 Si—O—C 和 C—O—C 的伸缩振动峰均相对增大, 有新的 Si—O—C 键和 C—O—C 键生成, 且 O—H 键断裂。这表明 SE 合成成功<sup>[13]</sup>。

从 SE 至 WSE, 3 430  $\text{cm}^{-1}$  处的峰增大且有偏移现象, 是因为 SE 在水性乳化为 WSE 的过程中加入了带有羟

表3 SE的分子量测试结果

Tab.3 Molecular weight test results of SE

样品	峰值分子量( $M_p$ )/ ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$M_n$ / ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$M_w$ / ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$z$ 均分子量( $M_z$ )/ ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$z+1$ 均分子量( $M_{z+1}$ )/ ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	黏均分子量( $M_v$ )/ ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	PDI
SE	386	311	530	916	1 437	488	1.70

## 2.5 苯二酚的添加对水性乳化胶黏剂存水率的影响

图 4 为不同羟基供体对水性乳化胶黏剂存水率的影响。从图 4 可以看出, 不同羟基供体水性乳化胶黏剂存水率分别为 9.92%、9.05%、10.35% 和 11.2%。WSE 中由于非离子型乳化剂中含有大量羟基, 与水之间形成了氢键, 使相转

基的非离子型乳化剂。1 735  $\text{cm}^{-1}$  处的峰消失是因为在相转过程中不断加热, 使残余的乙酸丁酯溶剂大量挥发, C=O 键峰面积大幅降低。

表1 改性前后基团峰面积比值计算结果

Tab.1 Calculation results of peak area ratio of functional groups before and after modification

样品	$A_{\text{Si-O-C}}$	$A_{\text{C-O-C}}$	$A_{\text{环氧基}}$	$L_1$	$L_2$
E-51	2 907.50	3 499.26	4 652.33	0.62	0.75
SE	473.86	671.72	707.87	0.67	0.95

## 2.3 SE的环氧值测试

按照 GB/T 1677—2023 中盐酸-丙酮法测试 E-51 和 SE 的环氧值, NaOH 标准溶液浓度为 0.1 mol/L, 试样质量为 1 g。表 2 为环氧值测试结果。从表 2 可以看出, 改性后的 SE 环氧值比 E-51 有所降低。主要是因为制备 SE 的反应过程中, E-51 上的羟基被替换为含有 Si 的侧链, 整体分子量变大, 所以环氧值下降<sup>[10]</sup>。

表2 环氧值测试结果

Tab.2 Epoxy value test results 单位:  $\text{mol}\cdot(100\text{g})^{-1}$

样品	环氧值
E-51	0.494
SE	0.374

## 2.4 SE的GPC表征分析

图 3 为 SE 的 GPC 谱图, 表 3 为 SE 的分子量测试结果。从图 3 和表 3 可以看出, SE 的数均分子量( $M_n$ )为 311, 重均分子量( $M_w$ )为 530, 分子量分布系数(PDI)为 1.70, 分子量分布系数处于中等水平, 表明分子量分布较为均一<sup>[14]</sup>。

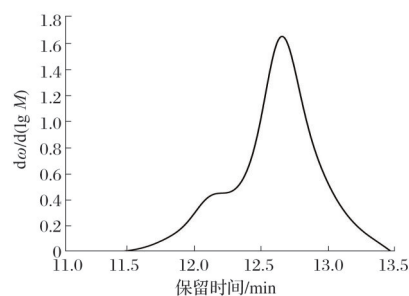


图3 SE的GPC谱图

Fig.3 GPC spectra of SE

有利于和SE分子中—O—Si—C—O—及水之间两两产生氢键,形成更为牢固的结构。加入邻苯二酚的样品存水率为10.35%,低于加入间苯二酚的样品。这是由于邻苯二酚两个羟基间的夹角相对较小,容易形成分子内氢键。加入对苯二酚样品存水量仅有9.05%,低于未加入苯二酚的WSE,这是由于对苯二酚的两个羟基夹角为180°,会和SE分子中—O—Si—C—O—形成分子间的氢键连接,但不会像间苯二酚一样形成三者之间的稳定结构,且不会形成分子内氢键,减少了与水之间的氢键作用,所以降低了存水率。

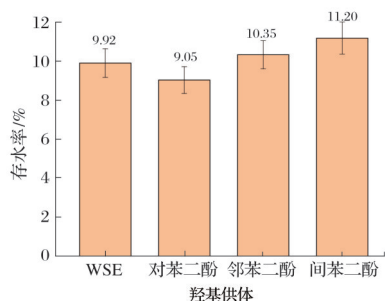


图4 不同羟基供体对水性乳化胶黏剂存水率的影响

Fig.4 Effect of different hydroxyl donors on water retention rate of water-based emulsion adhesives

## 2.6 水性乳化胶黏剂的TG分析

将WSE及加入3种不同羟基供体的水性乳化胶黏剂与聚酰胺650按照质量比3:5进行固化反应,得到固化样品进行TG表征。图5为WSE及添加不同羟基供体的样品的TG曲线。从图5可以看出,0~150℃,4种样品失重均不明显。150℃时WSE、加入对苯二酚、邻苯二酚、间苯二酚的水性乳化胶黏剂固化样品的失重率分别为99.8984%、99.8162%、99.8055%和99.8269%,可见胶黏剂的固化产物中仅有1%左右的自由水。150~300℃,4种样品的失重曲线仍相似,大约有3%的失重率,可能是胶黏剂中的少量溶剂被蒸发。从300℃开始,样品开始有明显失重。300~350℃,WSE的失重略慢一些,但4种样品失重曲线差距不大,大约有10%的失重率。此处10%的失重主要是因为温度过高氢键断裂,导致结构水的蒸发<sup>[15]</sup>。350℃以上为环氧及其他有机物热分解。450~530℃温度范围TG曲线相对较缓,可能是由于环氧树脂中芳环、C—C键及其他官能团开始发生热氧化降解,但反应速率尚未变快,因此质量变化相对稳定,形成一小段平台期<sup>[16-17]</sup>。此阶段加入间苯二酚的胶黏剂固化样品失重曲线略高于邻苯二酚,次高于对苯二酚和WSE。整体来看,4种样品失重曲线比较一致,加入间苯二酚的胶黏剂固化样品在500℃左右的热稳定性相对略高于其他3种样品<sup>[18]</sup>。

## 2.7 SE和WSE的核磁测试表征分析

图6为SE和WSE的<sup>1</sup>H NMR谱图,固化剂为聚酰胺650(聚酰胺650质量为WSE的60%)。从图6可以看出,SE中1.59919和WSE中1.48561处是聚酰胺650中的亚甲基氢峰产生偏移。两个谱图中3.43481处为环氧基团的亚

甲基氢。WSE中新出现峰里,0.61475处出现的尖峰可能是在SE中被屏蔽掉的氯甲基二甲基氯硅烷,2.48848、2.61865和3.09930处的峰是非离子乳化剂中的峰,3.09930处为羟基峰。3.68721~3.74496处的四重峰和4.00286~4.05297处的两个二重峰分别为与—O—Si—C—O—键与水的氢键和乳化剂羟基与水的氢键连接。这是由于硅原子的电负性和羟基中氧原子相比偏低,对氢原子的去屏蔽作用较弱,因此比羟基氢更容易向高场。6~8处的3个双重峰为环氧中芳香环的峰<sup>[19-22]</sup>。

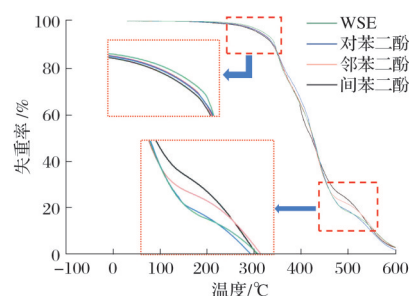


图5 WSE及添加不同羟基供体的样品的TG曲线

Fig.5 TG curves of WSE and samples with different hydroxyl donors

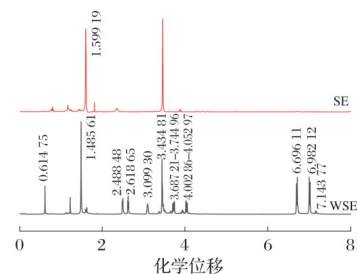


图6 SE和WSE的<sup>1</sup>H NMR谱图

Fig.6 <sup>1</sup>H NMR spectra of SE and WSE

## 2.8 搅拌速度对WSE的粒径的影响

图7为不同搅拌速度下的WSE的正置显微照片。图7a~图7f对应的平均粒径分别是163.81、138.09、139.22、191.91、82.42、86.57 μm。从图7可以看出,搅拌速度在600~1200 r/min时,WSE乳液粒径呈现先降低后升高的趋势,均在100 μm以上;搅拌速度在1400~1600 r/min时,乳液粒径大小降低至100 μm以下,相较于前者,颗粒密度更高,颗粒壁厚(即水相)更大,乳液更稳定<sup>[23]</sup>。

对搅拌速度1400 r/min及1600 r/min的WSE的粒径分布进行进一步分析,图8为WSE粒径分布曲线。从图8a可以看出,搅拌速度1400 r/min条件下的WSE样品的乳液粒径主要分布在23.15~169.85 μm,平均粒径为82.42 μm,其中88.35 μm粒径的乳液占比最高,达到25.92%。从图8b可以看出,搅拌速度在1600 r/min条件下的WSE样品乳液粒径主要分布在38.65~140.35 μm,平均粒径为86.57 μm,其中95.15 μm粒径的乳液占比最高,达到26.31%。图8a和图8b均符合正态分布,图8a的R<sup>2</sup>大于图8b的R<sup>2</sup>。这说明

搅拌速度在 1 400 r/min 条件下的 WSE 颗粒大小分布更加均匀,更符合正态分布<sup>[24-25]</sup>。

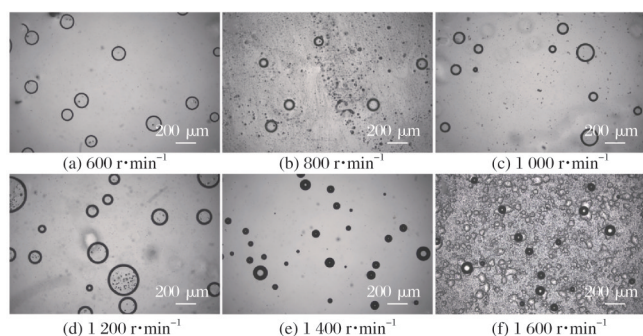
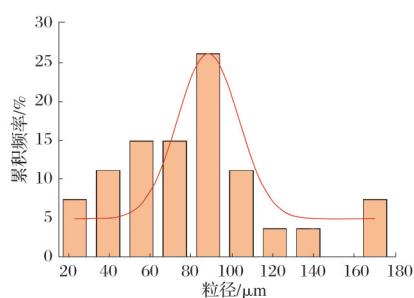
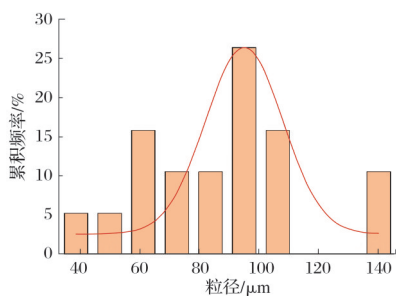


图7 不同搅拌速度下的WSE的正置显微照片(50×)

Fig.7 Upright microscope images of WSE at different stirring speeds (50×)



(a) 1 400 r·min<sup>-1</sup>



(b) 1 600 r·min<sup>-1</sup>

图8 WSE 粒径分布曲线

Fig.8 Particle size distribution curves of WSE

### 3 结论

通过化学接枝法合成了SE, FTIR 和环氧值结果显示合成成功, GPC 结果显示分子量分布较为均一。采用相反转法制备 WSE, 添加苯二酚得到水性乳化胶黏剂。TG 测试和 <sup>1</sup>H NMR 结果显示水作为结构水存在于水性乳化胶黏剂中, 存水率数据显示间苯二酚作为羟基供体的存水量最高。正置显微镜及粒径分布曲线得到相转过程中 1 400 r/min 的搅拌速度制备的水性乳化胶黏剂粒径分布更符合正态分布。

### 参考文献

[1] 吕强. 环氧树脂建筑结构胶黏剂的性能研究[J]. 粘接, 2020(4): 16-20.  
 [2] 虞静远, 虞鑫海, 刘万章, 等. 单组分环氧胶黏剂的研究现状[J]. 粘接, 2013(9): 57-59.  
 [3] 王彩琴, 王巨锋. 水性环氧树脂应用研究现状分析[J]. 广东化工,

2021(24): 62-63.

[4] JUZELIŪNAS E, FRAY D J. Silicon electrochemistry in molten salts [J]. Chemical Reviews, 2019, 120(3): 1690-1709.  
 [5] JIANG Y Y, LIU P X, GAO R, et al. 2D phthalocyanine-assembled porous nanostructure-based electrochemical platform for high-efficiency detection of ascorbic acid[J]. Langmuir, 2023, 39(5): 2080-2088.  
 [6] 张泽峰. 有机硅改性环氧树脂建筑涂覆材料制备及性能研究[J]. 粘接, 2024(4): 23-26.  
 [7] 胡益群, 何向瑶, 詹园, 等. 有机硅改性环氧树脂的研究与应用进展[J]. 胶体与聚合物, 2022, 40(4): 194-199.  
 [8] 严瑾. 水性环氧树脂的研究进展[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(12): 37-38, 161.  
 [9] JOSHI S, MIDHA V, RAJENDRAN S. Multifunctional waterproof breathable coating on polyester-based woven protective clothing for healthcare application[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 178: 107482.  
 [10] 马悦帆. 有机硅改性水性环氧树脂的制备及其防护涂层性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.  
 [11] 牟迪, 姚唯亮, 何树先, 等. 低 VOC 环氧乳液的制备及其耐腐蚀性研究[J]. 涂料工业, 2025(5): 46-52.  
 [12] 胡振文. 磷酸酯功能单体的设计及其对环氧基防腐树脂的改性研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.  
 [13] 何丽红, 马悦帆, 杨克, 等. 水性有机硅改性环氧树脂的制备与性能[J]. 材料导报, 2024, 38(3): 239-243.  
 [14] 曾志伟. LED 封装用有机硅聚氧烷的合成及其改性环氧树脂的性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.  
 [15] SHIRASU K, GOTO K, NAITO K. Microstructure-elastic property relationships in carbon fibers: A nanoindentation study[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 200: 108342.  
 [16] EL-SHAFFEE E, SAAD G R. A dielectric study of the photodegradation of poly(vinyl chloride) in air[J]. Polymer Degradation and Stability, 1994, 43(3): 315-318.  
 [17] LE H G, NGUYEN D N, DANG M P, et al. Chapter 10-Fracture mechanics of composites: Reinforcement of short carbon and glass fibers[J]. Composite Materials, 2021, DOI: 10.1016/B978-0-12-820512-9.00011-3.  
 [18] 彭勃, 杨进, 杨程皓. 疏水 SiO<sub>2</sub> 粒子的设计、制备及改性环氧树脂的研究[J]. 高分子学报, 2023(12): 1844-1856.  
 [19] 杨长安, 陈君求, 赖华, 等. 新型环氧乙烷/环氧丙烷无规共聚醚磷酸酯的合成及在涂料体系中的应用[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2024(4): 7-14.  
 [20] 李晓蓓. 磷酸胺类阻燃环氧树脂的制备及其应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.  
 [21] 黄文钦, 向艳丽, 孟旭, 等. 苯基/十二烷基环氧化超支化聚硅氧烷增稠环氧树脂[J/OL]. 精细化工, 2025: 1-12. [2025-01-13]. <https://link.cnki.net/doi/10.13550/j.jxhg.20240801>.  
 [22] 李啸涵. 多元素协同环氧树脂阻燃剂的设计合成及性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.  
 [23] YOKOYAMA S, NOZAKI J, MOTOMIYA K, et al. Strong adhesion of polyvinylpyrrolidone-coated copper nanoparticles on various substrates fabricated from well-dispersed copper nanoparticle inks[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 591: 124567.  
 [24] 周海. 环氧树脂乳化剂的合成及其乳液的性能评价[J]. 当代化工, 2024(5): 1031-1034.  
 [25] 孙金鹏, 刘树敏, 张靠民, 等. 超支化聚酯的合成以及在水性涂料方面的应用研究[J]. 表面技术, 2025(14): 223-233.