http://pmse.scu.edu.cn

聚氨酯/环氧树脂复合乳液的制备及性能

陈彦霖[1]，徐桂龙[1,2]，刘 超[1]，唐 敏[1,2]，梁 云[1,3]

（1. 华南理工大学 轻工科学与工程学院，广东 广州 510640；2. 华南理工大学 造纸与污染控制国家工程研究中心，广东 广州 510640；
3. 广东华南理工大学造纸工程研究中心有限公司，广东 广州 510640）

摘要：文中制备了含羧基聚氨酯预聚体（PPU），将其作为增韧链段，通过化学接枝的方式引入到环氧树脂基体中，然后通过对PPU的羧基进行中和提高其亲水性能，实现了对环氧树脂的增韧和水性化的双重改性。通过红外光谱表征了聚氨酯/环氧树脂的化学结构，重点研究了异氰酸根指数（*R*值）、亲水扩链剂用量和OH/NCO值对复合树脂乳液性能的影响，测定了聚氨酯/环氧树脂乳液固化物的漆膜性能、拉伸性能和热稳定性能，并将所制备的聚氨酯/环氧树脂乳液应用于耐高温润滑油玻纤滤材的增强研究。结果表明，所制备的聚氨酯/环氧树脂复合乳液具有良好的稳定性，复合树脂涂膜表现出优异的韧性和良好的热稳定性，其增强后的玻纤滤材具有良好的耐高温润滑油性能和弯曲加工性能。

关键词：环氧树脂；聚氨酯；乳液；增韧；水性化

中图分类号：TQ323.5 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）07-0001-07

环氧树脂(EP)因其强度高、耐高温、耐化学性好、粘接性能好等特点，广泛应用于复合材料、涂料和胶黏剂等领域[1]。然而，环氧树脂由于交联密度高而存在耐冲击性能差、韧性低、抗裂纹扩展能力差等缺点[2,3]。采用无机纳米粒子、橡胶弹性体、嵌段共聚物、超支化聚合物及聚氨酯等添加剂增韧环氧树脂是常用的增韧方法[4,5]。聚氨酯具有韧性好和分子链段可调控等优势，广泛应用于环氧树脂的增韧改性，但通过共混的增韧方式往往存在非均相结构，会给树脂的综合性能带来负面影响[6,7]，而通过化学键结合能够消除非均相结构，使材料兼具聚氨酯和环氧树脂2种材料的优点[8,9]，具有广阔的应用前景。Bhuniya等[10]合成了端羟基硅改性聚氨酯(SiMPU)低聚物作为环氧树脂的增韧剂，提高了环氧树脂的抗冲击强度。Chaudhary等[11]制备了聚氨酯预聚体对环氧树脂进行接枝改性，经过三乙胺固化后拉伸强度和抗冲击强度分别提高了61%和212%。

对环氧树脂增韧的研究报道主要集中在溶剂体系，而对水性环氧树脂增韧的研究相对较少。随着环保要求的日益严格，水性环氧树脂体系逐渐成为研究热点。王玉龙等[12]制备了不同粒径的水性聚氨酯，研究了添加不同粒径和掺量的水性聚氨酯对环氧乳液成膜性能的影响，得到的改性环氧树脂乳液固化物拉伸强度为61.99 MPa，断裂伸长率为11.5%，较未改性环氧涂膜分别提高了30%和62%。添加增韧剂的方式虽然较为简单，但是需将环氧树脂与改性剂混合均匀形成均相体系才能最大程度发挥作用，这对树脂体系成型加工带来了麻烦与不便；此外，由于环氧树脂和增韧剂之间的性质存在一定差异，体系容易发生微相分离，会给材料的力学性能造成负面影响。Chen等[13]使用聚氨酯预聚体对环氧树脂进行改性后，通过具有乳化性能的固化剂对改性环氧树脂进行乳化制备了水性聚氨酯/环氧树脂复合材料，其弯曲性能和拉伸性能均显著提高。

本文运用分子设计手段，将柔性链段和亲水基团通过化学键引入到环氧树脂体系中，同时实现了

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0106
收稿日期：2024-06-16
基金项目：广西省重点研发计划（桂科AB22080005）
通讯联系人：徐桂龙，主要从事高分子材料、高性能纸基复合材料研究，E-mail: feglxu@scut.edu.cn

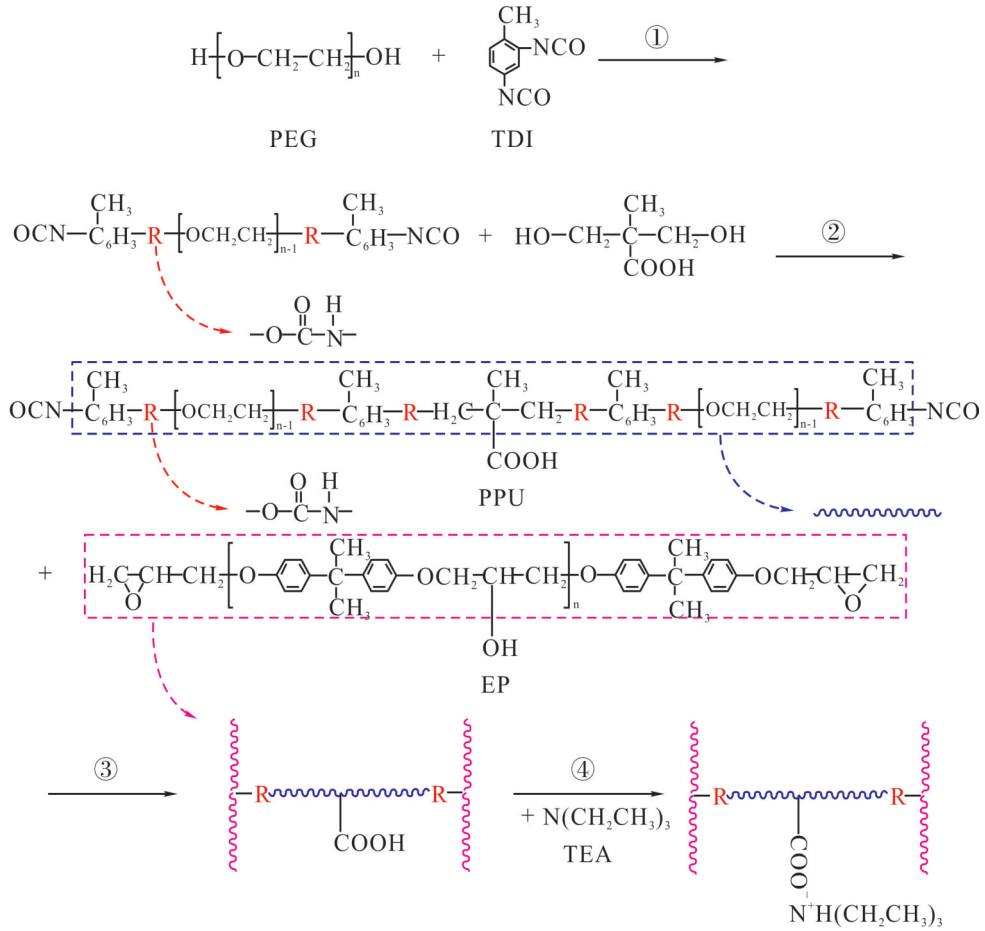


Fig. 1 Preparation mechanism of polyurethane/epoxy resin composite emulsion

对环氧树脂的增韧与水性化改性。首先以甲苯二异氰酸酯(TDI)、聚乙二醇(PEG)和2,2-双羟甲基丙酸(DMPA)为原料制备了含羧基聚氨酯预聚体(PPU),利用环氧树脂的—OH基团与预聚体端—NCO基团反应制备了聚氨酯/环氧树脂复合树脂体系。采用三乙胺中和后通过相转化法制备了稳定的聚氨酯/环氧树脂复合乳液,研究了异氰酸根指数(*R*值)、亲水扩链剂用量和OH/NCO值对复合树脂乳液稳定性、乳液固化物韧性和热稳定性能的影响,并研究了聚氨酯/环氧树脂复合乳液在耐高温润滑油玻纤过滤材料中的增强作用。

1 实验部分

1.1 实验原料

甲苯二异氰酸酯(TDI-80):德国巴斯夫公司;聚乙二醇(PEG,$\overline{M}_n$=2000)、三乙胺(TEA):中国大茂化学试剂厂;双酚A型环氧树脂(型号为环氧树脂ON™ Resin 836, *EE*=290~335):美国Westlake公司;固化剂CA-8537:型号为IKURE™ 环氧固化剂8537-WY-60, HEW=174 g/eq,美国Westlake公司;商品环氧树脂:型号为EP-3510,WPE=185~215 g/eq,美国Westlake公司;2,2-双羟甲基丙酸(DMPA):上海阿拉丁生化科技有限公司;去离子水:实验室自制;玻纤过滤基材:型号为8105,广州华创化工材料科技开发有限公司。

1.2 聚氨酯/环氧树脂复合乳液的制备

将除水后的PEG与TDI和溶剂一起加入反应釜中,通氮气保护,升温至75 ℃后反应3 h得到聚氨酯初聚物(通过监控反应过程的—NCO转化率达到98%)。然后将溶解好的DMPA加入反应釜中,继续反应1.5 h(通过监控反应过程的—NCO转化率达到98%),制备得到含羧基聚氨酯预聚体。继续往体系中加入环氧树脂和适量稀释溶剂,升温至85 ℃反应6 h,即可制备得到聚氨酯/环氧树脂复合树脂体系。体系降温至45 ℃后加入TEA中和(中和度为130%),然后加入去离子水进行高速分散可得到稳

定的聚氨酯/环氧树脂复合乳液。最后,减压蒸馏除去稀释溶剂。制备机理如Fig.1所示。

1.3　树脂固化物及润滑油玻纤滤材的制备

1.3.1　树脂固化物:将聚氨酯/环氧树脂复合乳液与固化剂CA-8537按环氧当量与活泼氢当量的比例为1:1混合后涂在模板中,然后置于40 °C的真空烘箱中干燥72 h,最后在120 °C固化1 h制得树脂固化物。取出产物,在温度(23±2) °C、相对湿度(50±5)%的标准条件下调节24 h后进行性能测试。

1.3.2　润滑油玻纤滤材:将环氧树脂与固化剂共混后用去离子水稀释,形成胶浓为0.5%的增强树脂浸渍液,然后将玻纤原纸浸渍在其中3 min,取出后置于100 °C的干燥箱中烘干,最后在150 °C的温度下固化0.5 h,即可制备得到润滑油玻纤滤材。

1.4　测试与表征

1.4.1　异氰酸酯基含量测定:根据国标HG/T2409-1992采用甲苯-二正丁胺滴定法测定聚氨酯/环氧树脂在反应过程中—NCO基团含量(α_1),并与理论上反应达到终点的理论—NCO基团含量(α_2),通过式(1)计算转化率(p)

$$p=(\alpha_2-\alpha_1)/\alpha_2 \tag{1}$$

1.4.2　粒度分析:使用纳米粒度及Zeta电位分析仪(Zetasizer Nano ZS90型, 英国Malvern公司)对聚氨酯/环氧树脂复合乳液进行粒度分析。测试浓度为0.3%,分散相为水,温度为25 °C。

1.4.3　热重分析:采用热重分析仪(TG209F1型,德国NETZSCH公司)对树脂固化物的热重性能进行测试。气氛为氮气,测试温度为30~900 °C,升温速率为20 °C /min。

1.4.4　化学结构分析:采用傅里叶变换红外光谱仪(TENSOR27型, 德国Bruker公司)对聚氨酯/环氧树脂复合乳液进行化学结构测试。波数范围为400~4000 cm^{-1},分辨率大于0.5 cm^{-1}。

1.4.5　拉伸强度测试:树脂固化物测试按照国标GB/T1040.2-2022执行,采用模塑法在聚四氟乙烯模具上制备得到试样,然后使用拉伸压缩材料试验机(Instron5565型,美国Instron公司)对试样的拉伸强度和断裂伸长率进行测试。

1.4.6　漆膜性能测定:按照国标GB/T 1727-2021制备树脂固化物漆膜;漆膜硬度测试按照国标GB/T6739-2006执行,所用仪器为QHQ-A铅笔硬度计;漆膜柔韧性测试按照国标GB/T1731-2020执行,所用仪器为QTX柔韧性测定仪;漆膜附着力测试按照国标GB/T9286-2021执行,所用仪器为QFH-A百格测试刀;漆膜耐溶剂性能测试按照国标GB/T23989-2009执行,所用试剂为丁酮;漆膜吸水率依据标准HG/T 3344-2012进行测试。

1.4.7　玻纤滤材打褶加工性能测试:玻纤滤材的打褶工艺参考国标GB/T17939-2015标准,将滤材沿纵向方向裁切为长300 mm,宽150 mm的试样。然后将直径为5 mm的细轴放置在试样长为(250±12) mm的范围内进行弯折,如Fig.2所示。弯折弧度为180°,弯折次数为1次。试验结束后,玻纤滤材上无破裂、折断、裂纹或者分层现象可认为通过打褶测试。

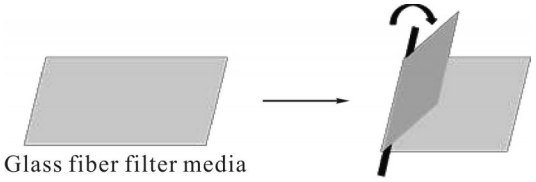


Fig. 2 Simulation of the pleating process for glass fiber filter media

1.4.8　玻纤滤材耐高温油液性能分析:将打褶前后的玻纤滤材浸泡在温度为220 °C的航空润滑油中48 h,使其两面可以充分地暴露在油液中,取出后用吸油纸轻轻拭掉表面润滑油,再用石油醚清洗滤材3次将残余的润滑油洗掉,最后置于100 °C的烘箱中,烘干至恒量后进行性能测试。

1.4.9　玻纤滤材微观形貌和断裂形貌表征:采用台式扫描电子显微镜(PhenomPro型,荷兰Phenom公司)对玻纤滤材的打褶处,以及泡油前树脂在玻纤滤材上的分布情况进行观测。

2　结果与讨论

2.1　红外光谱分析

Fig.3为聚氨酯/环氧树脂复合乳液的红外谱图。从图中可以看出,TDI(曲线a)在2272 cm^{-1}处有—NCO基团的特征吸收峰。加入PEG后,得到的含羧基聚氨酯初聚物(曲线b)在3251~3479 cm^{-1}和1520 cm^{-1}处出现了NHCO基团的顺式NH伸缩振动和NH变形振动特征峰,这表明PEG的—OH基团与

TDI的—NCO基团发生了反应，生成了氨基甲酸乙酯基团。此外，在1114 cm^{-1}处出现了1个较宽且强烈的C—O—C吸收峰，这说明PEG的聚醚链段成功接枝在TDI单体上。当添加DMPA后，得到的预聚体PPU(曲线c)在2272 cm^{-1}处的峰强度明显下降，但峰仍存在，这表明体系中仍存在未反应的—NCO基团，即TDI与PEG，DMPA反应生成的是端—NCO基团型含羧基聚氨酯预聚体。聚氨酯/环氧树脂复合树脂(曲线d)中，916 cm^{-1}和837 cm^{-1}处出现了环氧基特征峰，而2272 cm^{-1}处的—NCO基团特征峰消失，这表明树脂体系中游离—NCO基团与环氧树脂反应完全。红外光谱结果表明，聚氨酯/环氧树脂复合乳液制备成功，符合Fig.1所示制备机理。

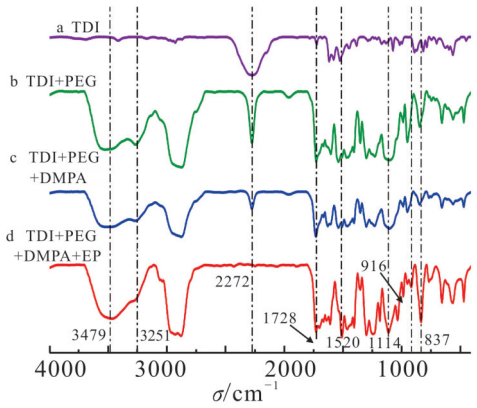


Fig. 3 Infrared spectra of polyurethane/epoxy emulsion

2.2 聚氨酯预聚物异氰酸根指数的影响

Tab.1为异氰酸根指数(*R*值，TDI中—NCO基团与PEG中—OH基团物质的量的比值)对聚氨酯/环氧树脂复合乳液固化成膜性能的影响。从表中可以看出，在*R*=3.25~4.00的范围内，随着*R*值的增大，固化物涂膜的硬度、附着力和耐溶剂性增大，而涂膜的柔韧性下降。这是因为随着*R*值增大，聚氨酯预聚物异氰酸酯硬段结构组分的含量提高，树脂高分子链间的氢键作用增强，因此具有更高的强度性能和耐溶剂性能，但会导致柔韧性降低。*R*值过低会造成乳液稳定性与涂膜附着力下降。当*R*=3.75，复合树脂乳液稳定，且固化体系兼具良好的附着力、硬度与柔韧性能。

2.3 亲水扩链剂用量的影响

聚氨酯预聚体的羧基单体中和成盐后，能够大大提高树脂的亲水性，实现树脂的水性化，但是会影响树脂的抗水性能。确定聚氨酯预聚物异氰酸根指数*R*=3.75，研究DMPA用量对树脂水性化结果及树脂吸水率的影响，结果如Tab.2所示。从Tab.2中可以看出，随着DMPA用量的增加，树脂的亲水性增强，形成的乳液粒径变小，树脂水性化形成乳液的稳定性随之提升，但固化后树脂涂膜的吸水率也随之提高。当DMPA质量分数为4.0%时，树脂乳液稳定性良好，且仍保持较好的抗水性能。因此DMPA的最佳质量分数为4.0%。

2.4 OH/NCO值对复合树脂乳液性能的影响

环氧树脂的游离—OH基团与聚氨酯预聚体的

Tab. 1 Effect of *R* value on film properties of cured products

R	Pencil hardness	Adhesion	Solvent resistance	Flexibility/mm	Stability
3.25	B	1	Not passed	1	<3 months
3.50	HB	0	Not passed	1	>3 months
3.75	HB	0	Passed	1	>3 months
4.00	H	0	Passed	2	>3 months

Tab. 2 Effect of DMPA dosage on resin properties

ω(DMPA)/%	Appearance	Stability	Average particle size /nm	Zeta potential /mV	Water absorption/%
3.5	White	<3 months	302.8	−28.3	6.14
4.0	White	>3 months	271.4	−35.6	6.46
4.5	White	>3 months	210.4	−36.5	8.24
5.0	Blue	>3 months	197.6	−36.7	9.33

游离—NCO基团的摩尔比(OH/NCO值)直接反映了环氧树脂的用量,其对复合树脂体系稳定性、拉伸性能及热稳定性能有重要影响。在R=3.75,DMPA质量分数为4.0%时,探究了OH/NCO值对复合树脂乳液性能的影响。

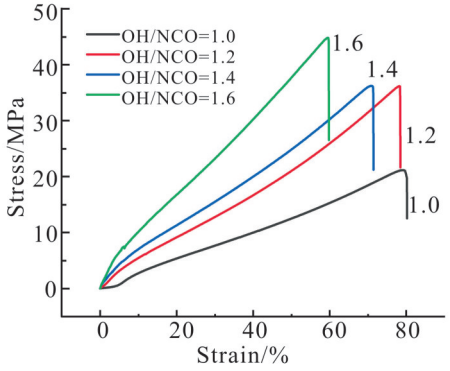


Fig. 4　Effect of OH/NCO value on tensile properties of cured products

2.4.1　复合树脂乳液稳定性分析:OH/NCO值对复合树脂乳液性能的影响结果如Tab.3所示。从Tab.3中可以看出,OH/NCO值在1.2~1.4范围内,可以获得乳液黏度适中且稳定性良好的复合树脂乳液,超出该范围后形成的乳液体系不但黏度较大,并且稳定性不佳。这是由于当OH/NCO值过高时,亲水的聚氨酯分子链段比例较少,无法对环氧树脂体系进行有效的乳化;而当OH/NCO值过低时,体系中游离的NCO与体系中的水会发生扩链反应,使体系黏度急剧上升。

2.4.2　拉伸强度分析:OH/NCO值对聚氨酯/环氧树脂复合乳液固化物拉伸性能的影响结果如Fig.4所示。从图中可以看出,随着OH/NCO值的增大,复合体中硬段的比例和固化交联程度都有所增加,导致固化物的断裂伸长率逐渐降低,拉伸应力逐渐增大。当OH/NCO值为1.2时,固化物的力学性能最佳,此时断裂伸长率为78.12%,拉伸应力为33.20 MPa。

2.4.3　热稳定性能分析:OH/NCO值对聚氨酯/环氧树脂复合乳液固化物热稳定性能的影响结果如Fig.5所示。

从图中可以看出,热分解主要分为2个阶段:30~320 °C主要为固化物中残留的小分子物质的挥发,320~480 °C温度段主要为聚氨酯/环氧树脂复合树脂体系主链结构的热分解,最大热分解速率温度为430 °C,具有良好的耐热性。这是因为聚氨酯改性环氧树脂,能够使体系的交联密度增加,分子间相互作用力增强。因此,当1.2≤n(OH)/n(NCO)<1.6时可以制备得到热稳定性良好的复合树脂乳液。

2.5　聚氨酯/环氧树脂增强玻纤滤材的性能分析

分别选用本文制备的聚氨酯/环氧树脂(Sample

Tab. 3　Effect of OH/NCO mole ratio on resin properties

n(OH)/n(NCO)	Solid content/%	Viscosity /(mPa·s)	Appearance	Stability
1.0	39.1	557.0	Blue	<3 months
1.2	38.4	139.4	Blue	>3 months
1.4	38.7	105.5	Blue	>3 months
1.6	38.5	872.9	White	<3 months

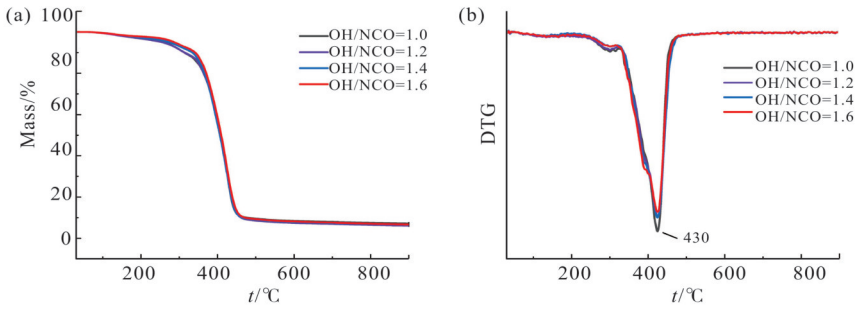


Fig. 5　Effect of OH/NCO mole ratio on thermal properties of cured products: (a) TGA; (b) DTG

Tab. 4 Changes in mechanical properties of resin-reinforced filter material after oil soaking

Sample	Tensile strength before pleating			Tensile strength after pleating		
	Before soaking/(N·m^{-1})	After soaking in oil /(N·m^{-1})	Retention rate/%	Before soaking /(N·m^{-1})	After soaking in oil /(N·m^{-1})	Retention rate/%
0	229					
1	1397	1180	84.47	849	527	62.07
2	1315	1197	91.04	0	0	

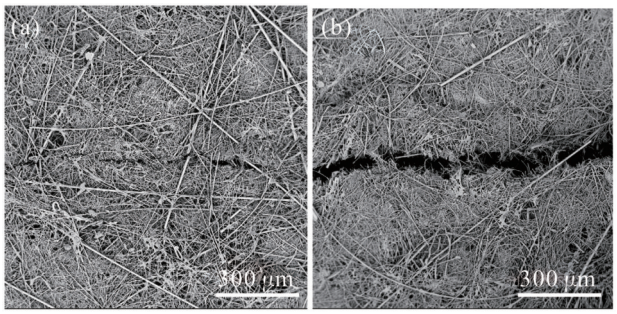


Fig. 6 Fracture morphology of filter media strengthened with (a) sample 1 and (b) sample 2

1)和商品环氧树脂(Sample 2)与固化剂按照环氧当量等于活泼氢当量的比例进行复配，应用于玻纤原纸（Sample 0）的增强。通过拉伸强度及拉伸强度保持率研究打褶前后滤材的强度性能以及经过高温油液浸泡后力学性能的变化情况，结果如Tab.4所示。通过SEM观测了滤材打褶处理后的断裂形貌，如Fig.6所示。

从Tab.4中可以看出，玻纤滤材未经过树脂增强，其拉伸强度仅229 N/m，无法满足应用要求。而经过2种环氧树脂增强以后，其拉伸强度提高近5倍，增强作用明显。经过220 °C高温润滑油处理后，仍具有较高的强度保持率，说明具有良好的耐高温性能。但是2种树脂增强的滤材经过打褶加工后性能呈现出巨大的差异。使用本文制备的增韧环氧树脂（Sample 1），打褶后仍能够保持较高的强度和耐高温性能，可以满足应用强度的要求；而经过商品环氧树脂(Sample 2)增强的环氧树脂，打褶后滤材基本丧失强度。这主要是由于本文制备的环氧树脂具有良好的增韧性能，因此，经过弯曲打褶处理后，滤材的结构没有受到明显的破坏；而商品环氧树脂体系没有经过增韧改性，树脂体系韧性差，应用于滤材增强后会导致滤材体系脆性大，在打褶加工过程中滤材结构受到破坏，导致滤材强度彻底丧失，无法满足实际应用要求。这与Fig.6的电镜分析结果是一致的。

3 结论

本文采用化学接枝法成功制备了具有优异韧性和热稳定性良好的聚氨酯/环氧树脂复合乳液。当异氰酸根指数（*R*值）为3.75，DMPA用量为4.0%，OH/NCO值为1.2，制备得到的聚氨酯/环氧树脂乳液具有优良的稳定性，复合树脂固化物表现出优异的韧性，断裂伸长率可达78.12%，拉伸应力为33.20 MPa，最大热分解温度为430 °C。将制备得到的聚氨酯/环氧树脂体系应用到耐高温润滑油玻纤滤材的增强中，增强后滤材的拉伸强度为1397 N/m，泡油后滤材拉伸强度保持率为84.47%，打褶再经泡油后滤材拉伸强度保持率62.07%，具有良好的耐高温润滑油性能和弯曲加工性能。

参考文献：

[1] Liu B, Wang Y. A novel design for water-based modified epoxy coating with anti-corrosive application properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2014, 77: 219-224.

[2] Farooq U, Teuwen J, Dransfeld C. Toughening of epoxy systems with interpenetrating polymer network (IPN): a review[J]. Polymers, 2020, 12: 1908.

[3] 陈阳, 刘志勇, 管焓宇, 等. 水性聚氨酯增韧环氧树脂研究及应用进展[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13205-13214.

Chen Y, Liu Z Y, Guan H Y, *et al*. Research and application progress of toughened epoxy resin with waterborne polyurethane [J]. Materials Review, 2021, 35(13): 13205-13214.

[4] Kausar A. Rubber toughened epoxy- based nanocomposite: a promising pathway toward advanced materials[J]. Journal of Macromolecular Science, Part A, 2020, 57: 499-511.

[5] Jayan J S, Saritha A, Joseph K. Innovative materials of this era for toughening the epoxy matrix: a review[J]. Polymer Composites, 2018, 39: E1959-E1986.

[6] Kausar A. Interpenetrating polymer network and nanocomposite IPN of polyurethane/epoxy: a review on fundamentals and advancements[J]. Polymer- Plastics Technology and Materials, 2019, 58: 691-706.

[7] Wen Y, Liu X, Liu L. Improving epoxy resin performance using PPG and MDI by one-step modification[J]. Processes, 2022, 10: 929.

[8] 孔志祥, 邹路丝, 张洋, 等. 含柔性链段环氧树脂的合成与性能[J]. 粘接, 2015, 36(11): 44-47.
Kong Z X, Zou L S, Zhang Y, *et al*. Synthesis and properties of epoxy resins with flexible segments [J]. Bonding, 2015, 36(11): 44-47.

[9] 李会录, 李涛, 祁向花, 等. 聚氨酯增韧改性环氧树脂的制备及性能表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(7): 15-22.
Li H L, Li T, Qi X H, *et al*. Preparation and characterization of epoxy resin toughened by polyurethane [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(7): 15-22.

[10] Bhuniya S, Adhikari B. Toughening of epoxy resins by hydroxy-terminated, silicon- modified polyurethane oligomers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90: 1497-1506.

[11] Chaudhary S, Parthasarathy S, Kumar D, *et al*. Graft-interpenetrating polymer networks of epoxy with polyurethanes derived from poly(ethyleneterephthalate) waste[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131: 40490.

[12] 王玉龙, 侯立杰, 刘志勇, 等. 水性聚氨酯改性环氧树脂乳液的涂膜性能研究[J]. 材料导报, 2019, 33(14): 2456-2460.
Wang Y L, Hou L J, Liu Z Y, *et al*. Study on coating properties of epoxy resin emulsion modified by waterborne polyurethane [J]. Materials Review, 2019, 33(14): 2456-2460.

[13] Chen Q, Wang S, Wang C, *et al*. Modified waterborne epoxy as a cold pavement binder: preparation and long- term working properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33: 04021079.

Preparation and Properties of Polyurethane/Epoxy Resin Composite Emulsion

Yanlin Chen[1], Guilong Xu[1,2], Chao Liu[1], Min Tang[1,2], Yun Liang[1,3]

(*1. School of Light Industry Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. National Engineering Research Center of Papermaking and Pollution Control, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong South China University of Technology Paper Engineering Research Center Co., Ltd., Guangzhou 510640, China*)

ABSTRACT: Carboxyl- containing polyurethane prepolymer (PPU) was prepared as toughening chain segment and introduced into the epoxy resin matrix by chemical grafting. Subsequently, the carboxyl groups of PPU were neutralized to improve its hydrophilicity, thereby achieving the dual modification of toughening and hydrophilization of epoxy resin. The chemical structure of the polyurethane/epoxy resin composite was characterized by infrared spectroscopy. The effects of isocyanate root index (*R* value), hydrophilic chain extender dosage, and OH/NCO mole ratio on the properties of the composite resin emulsions were studied. The film properties, tensile properties and thermal stability of the polyurethane/epoxy resin emulsions were also determined, and the prepared emulsion was applied to enhance high-temperature resistance in glass fiber filters for lubricating oils. The results show that the prepared polyurethane/epoxy resin composite emulsion has good stability, and the composite resin film exhibits excellent toughness and good thermal stability, while the reinforced glass fiber filter material demonstrates enhanced resistance to high-temperature lubricating oils and improved bending performance.

Keywords: epoxy resin; polyurethane; emulsion; toughening; water-based