

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.006

聚氨酯改性乙烯基酯树脂的制备及性能

王健龙¹, 陈梦迪², 王金炜², 朱泓熹¹, 马腾¹, 魏浩¹

(1. 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 教育部超轻材料与表面技术重点实验室, 哈尔滨 150001;
2. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南洛阳 471023)

摘要: 聚氨酯(PUR)和乙烯基酯树脂(VE)作为两类常见的高性能聚合物材料,在工业防护领域受到了广泛的关注与应用。为增强VE材料韧性,以聚丙二醇(PPG)、聚丁二醇(PTMG)和聚己内醇二酯(PCL)为原料合成PUR预聚体,将其引入VE中进行增韧改性,制备了PUR种类和含量不同的改性VE材料,并通过傅里叶变换红外光谱、差示扫描量热法、压缩强度测试和冲击强度测试等对材料的结构和性能进行测试与表征。结果表明,当PUR含量为VE质量的0%~30%时,随着PUR含量的增加,材料的玻璃化转变温度和压缩强度逐渐降低,由114.4℃,73.02 MPa降至97.4℃,15.53 MPa;而冲击强度逐渐提升,由11.91 kJ/m²升至37.16 kJ/m²。不同种类PUR制备的VE材料性能也有所不同,其中以PCL为原材料,制备的PUR改性VE表现出最优异的冲击性能,PUR含量为VE质量的20%时,冲击强度可达72.87 kJ/m²,较以PPG为原料的样品的26.64 kJ/m²提升了173%。上述分析表明,增加PUR的含量和软段分子链的柔性都能提高PUR改性VE材料的抗冲击性能,可以为制备高抗冲击型VE材料提供参考。

关键词: 聚氨酯; 乙烯基酯树脂; 力学性能; 冲击强度; 压缩强度

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0038-06

Preparation and performances of PUR-modified vinyl ester resin

WANG Jianlong¹, CHEN Mengdi², WANG Jinwei², ZHU Hongxi¹, MA Teng¹, WEI Hao¹

(1. Key Laboratory of Superlight Materials and Surface Technology, Ministry of Education, School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. China Shipbuilding Group Corporation 725th Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: Polyurethane (PUR) and vinyl ester resin (VE) are two common high-performance polymer materials, which have gained widespread attention and application in the industrial protection field. To enhance the toughness of VE materials, PUR prepolymers were synthesized using polypropyleneglycol (PPG), polybutyleneglycol (PTMG), and polycaprolactone (PCL) as raw materials, which were then used for toughening modification of VE. A series of modified VE materials with different PUR types and contents were prepared and their structures and performance were tested and characterized using Fourier transform infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, compressive strength testing, and impact strength testing. The results indicate that when the content of PUR to is 0%–30% of VE mass, as the PUR content increases, the glass transition temperature and compressive strength of the materials gradually decrease from 114.4 °C, 73.02 MPa to 97.4 °C, 15.53 MPa. In contrast, the impact strength significantly increases, rising from 11.91 kJ/m² to 37.16 kJ/m². The properties of VE materials modified by different PUR also vary. Among them, PUR modified VE prepared with PCL as the raw material exhibits the best impact properties, when the PUR content is 20% of VE mass, the impact strength is 72.87 kJ/m², which is 173% higher than that of the sample prepared with PPG as the raw material (26.64 kJ/m²). The above analyses suggest that both the increase in PUR content and the flexibility of the soft segment molecular chains can enhance the impact properties of PUR modified VE materials, providing a reference for the preparation of VE materials with superior impact resistance performance.

Keywords: polyurethane; vinyl ester resin; mechanical property; impact strength; compressive strength

通信作者: 魏浩, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为海洋先进材料开发与工程应用; 马腾, 博士后, 主要研究方向为船用材料与应用工程

收稿日期: 2025-05-06

引用格式: 王健龙, 陈梦迪, 王金炜, 等. 聚氨酯改性乙烯基酯树脂的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 38–43.

WANG Jianlong, CHEN Mengdi, WANG Jinwei, et al. Preparation and performances of PUR-modified vinyl ester resin[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 38–43.

乙烯基酯树脂(VE)作为一种重要的热固性树脂,因其优异的力学性能和加工特性,在化工防腐、船舶制造等领域获得广泛应用^[1]。然而,VE固有的脆性缺陷严重制约了其在承力构件中的应用^[2]。聚氨酯(PUR)材料以其卓越的柔韧性和能量耗散能力著称,具有良好的弹性、耐磨性、黏结性、耐生物老化性等^[3-4]。在材料科学领域,PUR占据着重要地位,其应用范围涵盖航空航天工程、土木工程、交通运输工具以及纺织工业等多个领域^[5-6]。将PUR引入VE体系被认为是改善VE韧性的有效途径,这对于改善现有VE制品性能、拓宽应用领域具有重要意义。

Yang等^[7]通过乙烯基单体改性的胶原蛋白水解物和水性聚氨酯(WPU)的自由基乳液聚合制备了一种基于WPU接枝胶原蛋白水解物的功能性纸张内施胶剂,这一研究突破了乙烯基单体与PUR共混改性在防水领域的应用,大大降低了耐水性乙烯基单体-PUR共混材料的生产成本。Ghasemi等^[8]通过非异氰酸酯聚氨酯法制备PUR改性VE混合物,在一定程度上提高了VE的力学性能,特别是拉伸强度和断裂伸长率这两方面。Idrees等^[9]通过添加不同比例的商业聚氨酯丙烯酸酯树脂来增韧脆性甲基丙烯酸酯树脂,采用还原光聚合技术进行3D打印,并重点研究了它们的热性能和断裂性能。以上对PUR改性VE的研究虽然都提升了VE的性能,但极少关注材料的冲击性能,此外,材料的制备工艺较为繁琐,不适用于大规模的工业化制备。

孙昭宜等^[10]通过优化PUR柔性链段设计,成功制备了具有宽温域阻尼特性的复合材料,在提高了材料能耗的同时拓宽了复合材料的应用范围。白国栋等^[11]研究了不同聚氨酯丙烯酸酯的添加量对VE力学性能的影响,发现聚氨酯丙烯酸酯能有效改善VE脆性。杨瑞瑞等^[12]将硅烷偶联剂通过一步反应接枝到氧化石墨烯(GO)表面,发现改性的GO(m-GO)对VE表现出更佳的增韧效应。彭新龙^[13]采用模压成型工艺制备了短玻璃纤维(SGF)增韧VE复合材料层压板,其中经硅烷偶联剂处理的SGF长度为12 mm、面密度为60 g/m²时,对VE的增韧效果最佳,层间铺入SGF也在一定程度上提高了复合材料拉伸性能和弯曲性能。疏红扬等^[14]研究了热塑性聚氨酯(TPU)/甲基乙烯基硅橡胶(VMQ)共混体系的性能,发现未增容时,随着VMQ含量增加,共混物

的拉伸强度、断裂伸长率和表面接触角均下降,而固相表面张力上升,引入增容剂(含硅聚氨酯或硅丙接枝共聚物)后,材料的拉伸性能明显改善。这些研究在一定程度上均拓宽了VE改性的合成思路,并为该体系材料的机械性能方面带来了较大的增益效果。然而,目前关于具有不同柔性链段的PUR如何通过改变VE基体的空间结构,进而影响材料整体力学性能的系统研究仍然较为缺乏。

基于上述情况,笔者系统化地探究了不同PUR含量和种类对VE性能的影响,重点关注由能耗特性带来的冲击性能变化情况。通过合成PUR预聚体并将其与VE复合,制备了一系列改性材料,并利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)、差示扫描量热(DSC)法、压缩强度测试和冲击强度测试等手段对材料进行了测试与表征,旨在揭示PUR改性对VE性能的调控规律,为开发高性能VE改性材料提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI):MDI-50,分析纯,美国陶氏化学有限公司;

聚丙二醇(PPG):PPG-2000,分析纯,美国陶氏化学有限公司;

聚己内酯二醇(PCL):PCL-2000,工业级,山东威尚化工有限公司;

聚丁二醇(PTMG):PTMG-2000,工业级,山东威尚化工有限公司;

VE:E-51,金陵力联思树脂有限公司;

1,4-丁二醇(BDO)、三乙醇胺(TEA):分析纯,上海麦克林试剂有限公司;

VE促进剂:231,分析纯,上海华东理工大学华昌聚合物有限公司;

VE固化剂:M-50,分析纯,上海华东理工大学华昌聚合物有限公司;

消泡剂:550,工业级,广东中联邦精细化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子天平:FA1004N,上海精若科学仪器有限公司;

加热磁力搅拌器:IKA RCT Basic,德国IKA公司;

真空干燥烘箱:DZF-6021,上海沪芮仪器厂;

FTIR仪:Nicolet IS50,赛默飞世尔(上海)科技有限公司;

悬臂搅拌器:EUROSTAR 60 digital,德国IKA公司;

顶置式电子搅拌器:EUROSTAR 20数显型,德国IKA公司;

万能拉力试验机:3365,美国INSTRON公司;

DSC仪:梅特勒DSC3,美国梅特勒-托利多集团;

悬筒组合冲击试验机:FBS-5/5.5SJ,厦门弗布斯有限公司。

1.3 试样制备

分别使用PPG, PTMG和PCL制备PUR预聚体,再将不同质量的PUR预聚体与VE混合,制备PUR改性VE样品,样品配方见表1。样品制备以PPG为例,PTMG和PCL作为原料的制备流程和下述流程一致。

(1)合成PUR预聚体:称取一定量的PPG(0.25 mol),倒入到1 000 mL容量的三颈烧瓶中,使用涂有少量硅脂的瓶塞将其密封,随后在110 °C的温度下进行抽真空加热,此过程至少持续2 h;称取一定

量的MDI(0.5 mol),按异氰酸酯基(—NCO)与羟基(—OH)的物质的量比为2:1加入到含有多元醇的三颈烧瓶中,利用机械搅拌桨在50 °C的温度下混合搅拌(300 r/min, 1 h);随后缓慢升温至80 °C,继续搅拌反应2 h,得到无色透明的PUR预聚体,在使用前常温密封储存,以防止其自聚。

(2)PUR改性VE样品制备:称取一定量的VE,分别加入含量为VE质量10%,15%,20%,25%,30%的PUR预聚体,手动搅拌均匀后加入BDO和TEA,继续搅拌,随后加入消泡剂后再次搅拌,然后再加入VE的促进剂和固化剂,每次添加新组分后的搅拌时间均为2 min。

(3)脱泡与固化:将混合均匀的样品置于真空干燥箱中进行抽真空脱泡处理,直至肉眼看不见气泡抽出(时间为5~8 min),随后将样品浇注到聚四氟乙烯模具中,在80 °C的真空烘箱内高温固化12 h,取出后在室温条件下固化7 d,即得到所需的样品。

表1 PUR改性VE样品的配方(质量)

Tab. 1 Composition of PUR modified VE samples (mass)

Samples	VE	PUR prepolymer	BDO	TEA	VE accelerator	VE curing agent	Defoamer
0%PPG	50	0.0	0.000	0.000	0.75	1	0.5
10%PPG	50	5.0	0.150	0.167	0.75	1	0.5
15%PPG	50	7.5	0.225	0.250	0.75	1	0.5
20%PPG	50	10.0	0.300	0.330	0.75	1	0.5
20%PTMG	50	10.0	0.300	0.330	0.75	1	0.5
20%PCL	50	10.0	0.300	0.330	0.75	1	0.5
25%PPG	50	12.5	0.375	0.417	0.75	1	0.5
30%PPG	50	15.0	0.450	0.500	0.75	1	0.5

1.4 测试与表征

(1) FTIR测试:复合材料的化学官能团由FTIR仪在400~4 000 cm^{-1} 波数范围内测得。

(2) DSC测试:复合材料的热性能由DSC仪测试,所用的样品为2 mg左右正方体小块,测试氮气的吹扫流量为50 mL/min。先升温至30 °C后保温5 min,再以10 °C/min的升温速率升温至160 °C,保留并记录DSC曲线。

(3)压缩强度测试:使用万能拉力试验机按GB/T 1041-2008进行测试。压缩样品为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的圆柱形试样,测试温度为20 °C,设置的压缩速率为0.02 mm/s,平行测试5次取平均值,并标记好误差棒,测试时施加预应力0.5 MPa。

(4)冲击强度测试:使用悬筒组合冲击试验机进行测试,样品为80 mm \times 10 mm \times 4 mm的无缺口试

样,使用简支梁测试,冲击速度设置为2.9 m/s,摆锤冲击能量为5 J,测试结果为5个试样的平均值,并标记好误差棒。

2 结果与讨论

2.1 FTIR分析

图1为不同PUR含量的PUR改性VE的FTIR谱图。从图1可以看出,所有样品在2 270 cm^{-1} 附近的一NCO基团都完全消失,并不存在游离的一NCO基团,这证明了该工艺体系下的共混树脂内部的化学反应充分,不存在结构上的缺陷;1 730 cm^{-1} 处为的氨基甲酸酯键峰也同样很好地证明了这一点,3 000~3 600 cm^{-1} 范围内出现的宽而强的吸收峰,通常对应为—OH或—NH基团的伸缩振动,该峰的出现证明了材料体系中含有大量的氢键基团,这很好地诠释了后面材料冲击性能的表现结果,而VE的

特征峰 $C=C$ 和 $C-O-C$ 分别在 $1\ 600\sim 1\ 680\text{ cm}^{-1}$ 与 $1\ 250\sim 1\ 050\text{ cm}^{-1}$ 处出现。可以看到对于不同含量 PUR 改性 VE 的 FTIR 谱图, 各组样品都有着相同的结构峰, 说明改变 PUR 的含量并不会影响改性材料的结构。

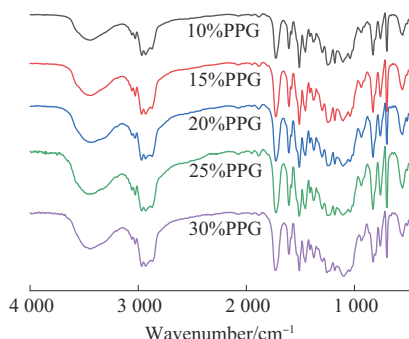


图1 不同PUR含量的PUR改性VE的FTIR谱图

Fig. 1 FTIR spectra of PUR modified VE with varying PUR contents

图2为不同种类PUR改性VE的FTIR谱图。与图1的FTIR谱图类似, 仍可在 $3\ 000\sim 3\ 600\text{ cm}^{-1}$ 范围内观察到由羟基与氨基的伸缩振动带来的宽峰, 可以看到20% PTMG样品在 $2\ 270\text{ cm}^{-1}$ 附近都存在一点微弱的 $-NCO$ 基团特征峰, 说明该样品中 $-NCO$ 基团并没有完全反应, 这可能与PTMG的自结晶趋势有关, 但整体不影响后续的性能测试; 从图1和图2的对比可以发现, 各样品的特征峰在特定的波数内均维持不变, 这说明了在VE中加入PUR仅改变材料内部的空间结构, 对化学结构的影响较小, 这排除了化学基团对材料性能的干扰与影响。

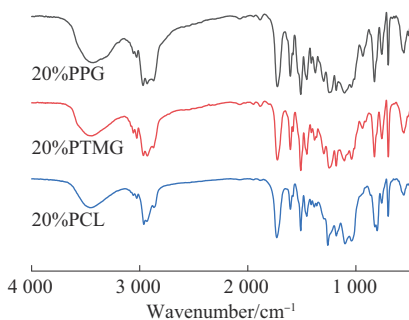


图2 不同种类PUR改性VE的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of VE modified with different types of PUR

2.2 差示扫描量热分析

图3为不同PUR含量的PUR改性VE的DSC曲线, 从图3中可以看出, 各组样品随着温度上升存在阶梯状的转折点, 即发生了相转变, 转折点温度为各组样品所对应的玻璃化转变温度(T_g), 随着PUR含量的增加, 各组样品的 T_g 分别为 $114.4, 109.6, 105.6, 102.3, 100.1, 97.4\text{ }^\circ\text{C}$, 呈现规律性的降低。此

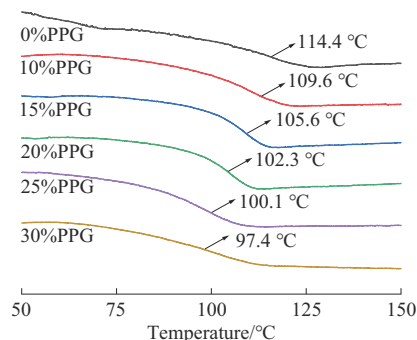


图3 不同PUR含量的PUR改性VE的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of PUR modified VE with varying PUR contents

外, 全部的改性样品曲线均未出现双拐点现象, 这证明PUR作为填料已经与VE基体完全混溶, 改性材料的制备是成功的。而针对 T_g 的趋势变化, 这里需要考虑到, 笔者选用的PUR软段体系为PPG, 该多元醇构建的大分子量长链会给予原本的材料体系更多的柔性分子链单元结构, 而作为硬段部分的MDI与BDO对于VE基体的刚性提高效果远不及软段带来的减益效果, 这在一定程度上降低了材料由玻璃态进入高弹态的温度。从相的结构考虑, PUR材料存在一定程度的微相分离现象^[15], 当其引入到乙烯基体系中, 必然会破坏基体原有的均相结构, 增大改性材料的无序性, 造成分子链之间的相互作用减弱, 使材料更容易进入分子链活动较为活跃的高弹态。随着PUR含量的不断升高, 这一现象会不断被放大, 从而使材料的 T_g 呈现出规律性的下降。

图4为不同种类PUR改性的VE的DSC曲线, 从图4可以看出各组样品随着温度上升存在阶梯状的转折点, 发生了相转变, 转折点温度便为各组样品所对应的 T_g , PUR含量为VE质量的20%时, PPG, PTMG, PCL作为原材料制备的改性VE对应的 T_g 分别为 $102.3, 94.1, 83.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。PCL的引入使VE的 T_g 降低最多, 其次是PTMG, 最后是PPG。PPG和

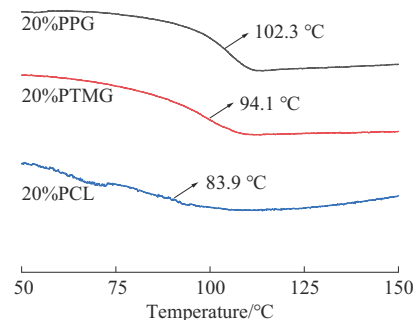


图4 不同种类PUR改性VE的DSC曲线

Fig. 4 DSC curves of VE modified with different types of PUR

PTMG是两种常见的聚醚多元醇,PTMG分子链的柔性高于PPG,分子链中含有更多的醚键,且分子链更长;PPG与PTMG相比链段更短,形成的结构也更加致密;PCL是一种聚酯多元醇,分子链中含有酯键,酯基的极性作用形成分子内塑化效应,链段运动能垒最低,在较低温度即可发生,导致分子链更容易运动,从而显著降低 T_g 。

2.3 压缩性能分析

图5为不同PUR含量的PUR改性VE的压缩强度,PUR含量为VE质量的0%,10%,15%,20%,25%,30%时对应的压缩强度分别为73.02,43.07,32.41,25.17,20.22,15.53 MPa,总体趋势为随着PUR含量的增加,压缩强度减小。随着PUR含量的增加,材料中柔性链段的比例增加,导致材料的刚性降低,压缩强度随之减小。PUR的引入可能降低VE的交联密度,交联密度降低意味着分子链之间的相互作用减弱,材料在受到压缩时更容易发生形变,从而导致压缩强度降低。PUR的柔性链段增加了分子链的运动能力,使得材料在受到外力时更容易发生形变,这种分子链运动能力的增强导致材料的抗压缩能力下降,压缩强度降低。PUR与乙烯基树脂的界面相容性较差,可能导致应力集中,进一步降低材料的压缩强度。

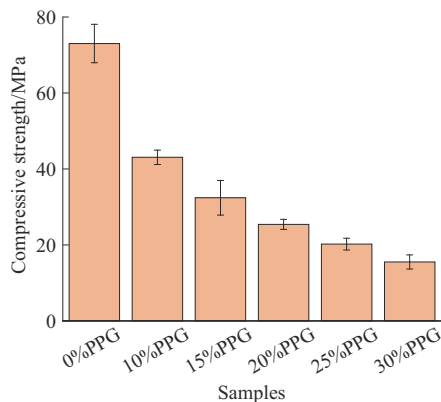


图5 不同PUR含量的PUR改性VE的压缩强度

Fig. 5 Compressive strength of PUR modified VE with varying PUR contents

图6为不同种类样品的压缩强度柱状图。PUR含量为VE质量的20%时,PPG,PTMG,PCL作为原材料制备的改性VE对应的压缩强度分别为25.41,21.24,16.51 MPa。PCL的分子链较长且柔软,具有较低的刚性。其分子结构中含有环状的内酯基团,这使得其链段相对柔韧,能够更容易地弯曲和变形。这种柔韧性虽使PCL具有较好的柔软性和延

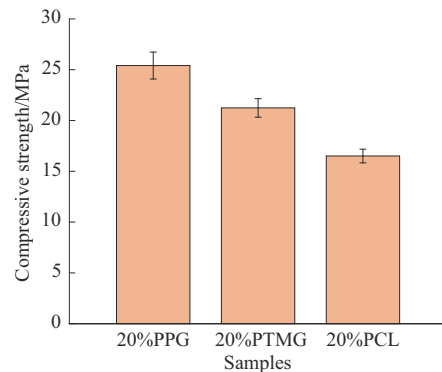


图6 不同种类PUR改性VE的压缩强度

Fig. 6 Compressive strength of VE modified with different types of PUR

展性,但在受到压缩力作用时,材料更容易发生形变,导致压缩强度较低;PTMG的醚键结构规整性好,分子链柔顺性高,但与硬段相容性优于PPG,导致硬段分散性略好,压缩强度略低;PPG中含有侧甲基,链段柔顺性较低,与硬段的相容性较差,可能保留更多硬段聚集区,因此压缩强度最高。

2.4 冲击性能分析

图7为不同PUR含量的改性VE的冲击强度,可以看出,PUR含量为VE质量的0%,10%,15%,20%,25%,30%的复合材料对应的冲击强度分别为11.91,13.50,15.66,26.64,35.41,37.16 kJ/m²,总体趋势为随着PUR含量的增加,冲击强度增大。这一规律的呈现与复合材料内部空间结构的变化密不可分,随着PUR与VE的共混,其各自的空间结构相互之间也发生了穿插与交互,相对于VE的基体,具有微相分离结构的以PPG为原料的PUR的分子链结构柔顺性更好,链段的运动性更强,这一点在2.2部分的DSC表征中已经得到了印证。而柔性链的大量加入,必然会使材料整体的柔顺性得到补强,在受到外力的强冲击时,柔性的分子链会带来更大的空间运动,链与链之间的摩擦更为充分,聚合物材料整体的弛豫特性^[16]会得到增强,这使得材料在受到冲击时能够更好地吸收能量,从而提高冲击强度。此外,VE的强交联网络会使VE在受到外力冲击时发生脆性断裂,而PUR柔性链段的插入可以在一定程度上降低这种网络的整体占比,使材料整体在受到冲击时发生更大的形变,耗散掉更多的外力带来的能量,从裂口的形式来看,PUR柔性基团的加入会阻止裂纹的扩展,使裂纹尖端钝化,从而延缓材料的断裂,这些效果的叠加都会使复合材料的抗冲击性能得到提升,而随着引入的PUR含量

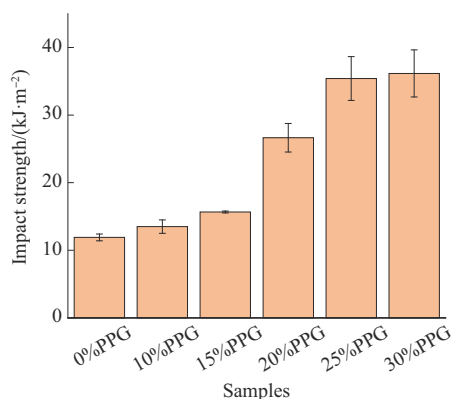


图7 不同PUR含量的PUR改性VE的冲击强度

Fig. 7 Impact strength of PUR modified VE with varying PUR contents 的提高,这类增益效果会得到规律性的增强,这与前文的热力学表征与压缩性能表征相呼应。

图8为不同种类PUR改性VE的冲击强度。可以看出,PUR含量为VE质量的20%时,PPG,PTMG,PCL作为原材料制备的改性VE对应的冲击强度分别为26.64,39.25,72.87 kJ/m²。从图8来看,虽然20%PPG的冲击强度在整体的PPG改性体系里呈现较高的增幅,但在不同种类的PUR改性样品中不如20%PTMG与20%PCL。这与填料内的软段多元醇的单元结构密切相关,PPG分子链上的甲基侧基产生空间位阻效应,限制了分子链的运动能力,醚键虽具有一定柔性,但能量耗散能力较弱,导致材料在冲击下容易断裂。PTMG链段相较PPG更长,链段柔韧性较好,分子链更易吸收冲击能量,因此对应材料韧性优于PPG对应的材料。而PCL的分子链中含有酯基,分子链较之前两者更长且更柔软,这赋予了材料更高的延展性与韧性,此外,PCL的分子量较前两者更大,其构建的交联网络是松散且均匀的,在受冲击过程中,PCL能够通过分子链的伸展和旋转将链段网络扩大,更大程度地吸

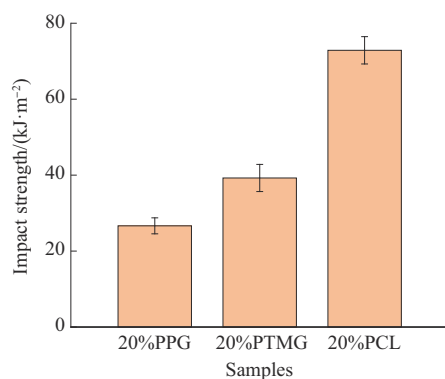


图8 不同种类PUR改性VE的冲击强度

Fig. 8 Impact strength of VE modified with different types of PUR

收能量,因此对应材料的冲击强度最高,较以PPG为原料的样品提升了173%。

3 结论

(1)系统探究了以PPG为原料的PUR预聚体含量对PUR改性VE性能的影响,揭示了PUR含量对改性材料的玻璃化转变温度、压缩性能及冲击性能的调控规律,随着PUR含量的增加,VE的玻璃化转变温度逐渐降低,压缩强度显著下降,冲击强度显著提高。

(2)不同种类的PUR预聚体对VE的压缩性能及抗冲击性能的影响显著,其中以PCL为原料的PUR预聚体所制备的改性VE,由于其分子链中含有可自旋的酯基基团与长柔性链单元,强大的链柔顺性与链运动能力使其能够有效分散冲击能量,冲击强度最高(72.87 kJ/m²);而以PPG为原料时,由于链段较硬,冲击强度最低(26.64 kJ/m²)。上述研究结果为高性能VE材料的开发及后续的工程应用提供了参考。

参考文献

- [1] 江先龙. 乙烯基酯树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
JIANG Xianlong. Vinyl ester resin and its applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [2] 郝志勇, 李玲, 龚兵. 环氧乙烯基酯树脂增韧技术研究进展[J]. 绝缘材料, 2007, 40(1): 40-43.
HAO Zhiyong, LI Ling, GONG Bing. Research progress of toughening of epoxy vinyl ester resin[J]. Insulating Materials, 2007, 40(1): 40-43.
- [3] 朱黎澜. 水性聚氨酯的改性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
ZHU Lilan. Study on modification of waterborne polyurethane[D]. East China University of Science and Technology, 2012.
- [4] JEEVA N, THIRUNAVUKKARASU K, XAVIER J R. Influence of multifunctional graphene oxide and silanized vanadium nitride in polyurethane coatings for the protection of aluminium alloy in aerospace industries[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 142. DOI:10.1016/j.diamond.2024.110792.
- [5] ALSHABEBI A S, ALRASHED M M, EL BLIDI L, et al. Preparation of bio-based polyurethane coating from Citrullus colocynthis seed oil: Characterization and corrosion performance[J]. Polymers, 2024, 16(2). DOI:10.3390/polym16020214.
- [6] 张孟, 吴明元, 吴庆云, 等. 高品质BiOCl珠光颜料的制备及其在水性珠光印花涂料中的应用[J]. 精细化工, 2023, 40(1): 185-191.
ZHANG Meng, WU Mingyuan, WU Qingyun, et al. Preparation of high-quality BiOCl pearlescent pigment and its application in waterborne pearlescent printing coatings[J]. Fine Chemicals, 2023, 40(1): 185-191.

(下转第82页)