

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.03.004

生物基增塑剂异山梨醇二庚酯在PVC中的应用

李永朋¹, 崔然¹, 奚桢浩¹, 赵玲^{1,2}

(1. 华东理工大学化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237; 2. 新疆大学化学化工学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要:以异山梨醇和正庚酸为原料合成了一种生物基增塑剂异山梨醇二庚酯(SDH),并与石油基增塑剂邻苯二甲酸二辛酯(DOP)和对苯二甲酸二辛酯(DOTP)对比考察了对聚氯乙烯(PVC)的增塑性能。通过红外分析表征增塑剂与PVC分子间相互作用;通过拉伸试验与动态力学测试表征PVC试样的力学性能;通过热重分析与迁移性实验表征增塑剂的稳定性。结果表明,SDH与PVC分子间的相互作用更强;PVC/40SDH试样较同比例的DOP和DOTP增塑PVC表现出更高柔韧性,其中PVC/40SDH的断裂伸长率较PVC/40DOP和PVC/40DOTP分别提高26.29%和33.89%,玻璃化转变温度则分别降低1.67℃和4.15℃;SDH的热稳定性、挥发性和耐抽提性介于DOP和DOTP之间。SDH的综合增塑性能较优,可以替代DOP和DOTP用于PVC的增塑。

关键词:生物基增塑剂;异山梨醇二庚酯;聚氯乙烯;增塑性能

中图分类号: TQ314.252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)03-0022-06

Application of Bio-based Plasticizer Isosorbide Diheptanoate in PVC

Li Yongpeng¹, Cui Ran¹, Xi Zhenhao¹, Zhao Ling^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. School of Chemistry & Chemical Engineering, Xin Jiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: A bio-based plasticizer isosorbide diheptanoate (SDH) was synthesized by using isosorbide and *n*-heptanoic acid. Compared with traditional plasticizer dioctyl phthalate (DOP) and dioctyl terephthalate (DOTP), the plasticization performance of SDH, including the interaction between plasticizer and polyvinyl chloride (PVC), mechanical properties, thermal stability and migration was studied by infrared spectroscopy, tensile test, dynamic thermomechanical analysis, thermogravimetric analysis, volatility and extraction test. The results showed that the interaction between SDH and PVC chains was stronger. The PVC / 40SDH sample showed higher flexibility than the same proportion of DOP and DOTP, in which the elongation at break increased by 26.29% and 33.89%, respectively, on the contrary, the corresponding glass transition temperature decreased by 1.67℃ and 4.15℃, respectively. The thermal stability, volatility and extractability of SDH were between DOP and DOTP. The work shows SDH has excellent plasticizing properties and can replace DOP and DOTP.

Keywords: bio-based plasticizer; isosorbide diheptanoate; polyvinyl chloride; plasticization performance

聚氯乙烯(PVC)作为目前世界上五大合成树脂之一,广泛用于人造革、儿童玩具、包装材料、电缆、管道、窗帘、医疗等制品。由于PVC链中强烈的极性作用,纯PVC树脂的结晶度高、熔融黏度大、刚性强、柔韧性差而难以加工。而通过添加一定量的增塑剂,可使PVC制品具有良好的柔韧性、可加工性和使用性能^[1-4]。

目前,全球增塑剂的需求已超过1000万t,其中邻苯二甲酸酯类增塑剂约占85%,但出于安全和环境方面的考虑^[5],此类增塑剂的使用在全球范围内受到很大限制^[6]。此外,环境和石油短缺问题也引发了对生物基增塑剂的广泛研究^[7-8]。

相较而言,生物基增塑剂来源于可再生资源,对人类和环境友好^[9-11]。由葡萄糖脱水得到的异

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(22221817014)

通讯作者: 奚桢浩,副教授,主要研究高分子材料及聚合反应工程 E-mail: zhxhi@ecust.edu.cn

收稿日期: 2019-12-16

引用格式: 李永朋,崔然,奚桢浩,等. 生物基增塑剂异山梨醇二庚酯在PVC中的应用[J]. 工程塑料应用,2020,48(3):22-27.

Li Yongpeng, Cui Ran, Xi Zhenhao, et al. Application of bio-based plasticizer isosorbide diheptanoate in PVC[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):22-27.

山梨醇是一种具有芳香结构的生物基二醇,可与脂肪酸通过酯化反应合成异山梨醇二酯^[12],具有和苯二甲酸酯类增塑剂相似的化学结构和理化特性^[13]。异山梨醇二正辛酸酯具有良好的可生物降解性,已通过了严格的毒性、过敏性和诱变性等测试^[14-15],是一种潜在的新型生物基增塑剂^[16]。笔者以异山梨醇和正庚酸为原料,合成了异山梨醇二庚酯(SDH),测试了SDH增塑PVC的混溶性^[17]、力学性能、玻璃化转变温度^[18]、热稳定性、挥发性和耐抽提性^[19-20],并与邻苯二甲酸二辛酯(DOP)和对苯二甲酸二辛酯(DOTP)对比,考察其作为PVC环保增塑剂的可行性。

1 实验部分

1.1 原材料

PVC:S700,中国石化齐鲁石化有限公司;

异山梨醇:纯度98%,阿拉丁试剂有限公司;

正庚酸:纯度99%,阿拉丁试剂有限公司;

钙锌稳定剂:BZ-105P,海德化工有限公司;

对甲苯磺酸:纯度99%,上海凌峰化学试剂有

限公司;

四氢呋喃:分析纯,阿拉丁试剂有限公司;

DOP:纯度98%,国华试剂有限公司;

DOTP:纯度98%,阿拉丁试剂有限公司。

1.2 仪器及设备

集热式恒温磁力搅拌油浴锅:DF101 s型,上海美强实验仪器有限公司;

搅拌电机及调速器:51K90RA-CF型,上海申胜生物技术有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet 5700型,美国热电公司;

电子万能材料试验机:3300型,美国英斯特朗公司;

动态热机械分析(DMA)仪:Q800型,美国TA公司;

热重分析仪:TGA/DSC1型,梅特勒-托利多公司。

1.3 SDH的合成

合成反应在常压下进行,将异山梨醇60 g,正庚酸137 g和对甲苯磺酸1.32 g加入装有分水器、冷凝回流的250 mL三口烧瓶中,N₂吹扫后加热至160℃反应,体系中的正庚酸与酯化反应水共沸逸出,经冷凝后进入分水器,水为下层,酸为上层回流。随着反应进行,出水量逐渐增加至理论值,减压蒸馏

分离产物。合成反应方程式见图1。

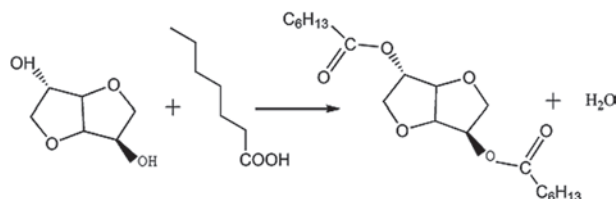


图1 SDH合成反应方程式

1.4 PVC样条制备

在500 mL锥形瓶中加入10 g PVC树脂粉、一定配比的增塑剂、0.23 g钙锌稳定剂、200 mL四氢呋喃,在40℃下磁力搅拌溶解。6 h后将其倾倒入直径15 cm的培养皿中,并覆盖留有缝隙的铝箔纸防止溶剂过快挥发,静置24 h后翻转膜片,敞口晾置3 d,再在真空烘箱中干燥7 d以除去溶剂四氢呋喃,最后裁剪样条备用。增塑PVC配方见表1。

表1 增塑PVC试片配方

试样	PVC	DOP	DOTP	SDH	稳定剂
PVC	10				0.23
PVC/40DOP	10	4			0.23
PVC/40DOTP	10		4		0.23
PVC/10SDH	10			1	0.23
PVC/20SDH	10			2	0.23
PVC/30SDH	10			3	0.23
PVC/40SDH	10			4	0.23

1.5 性能测试与表征

(1) 红外光谱分析。

采用FTIR仪,在4000~400 cm⁻¹的波长范围内扫描增塑剂和PVC试片,分辨率4 cm⁻¹。

(2) 力学性能测试。

按照GB/T 1040.3-2006,采用电子万能材料试验机,室温下以20 mm/min的速度对试样进行拉伸,直到发生断裂,记录最大拉伸力和最大形变量,以此来计算纯PVC和增塑PVC试样的拉伸强度和断裂伸长率,每个试样测6次取其平均值。

(3) 动态力学测试。

采用DMA仪,双悬臂幅度为20 μm,张力频率1 Hz,初始温度-20℃,以3℃/min速率升温至100℃,记录试样(50 mm×5 mm×0.7 mm)损耗角正切(tanδ)的变化。

(4) 热稳定性测试。

采用热重分析仪,在N₂氛围下以10℃/min的速率从50℃升温至600℃,记录升温过程试样的质量变化。

(5) 挥发性测试。

按照ISO 176-2005,裁取20 mm×20 mm正

方形试片并称重(精确至0.0001 g),将试样放入20 cm³活性炭里进行包埋后,置于40℃的烘箱中。相隔一定时间将试片取出称重,用质量损失率来表达增塑剂迁移性。

(6) 耐溶剂性测试。

参照 ASTM D 1239-1998,将增塑 PVC 试样用不同溶剂(蒸馏水,石油醚,30%乙酸,10%乙醇,50%乙醇)在25℃的环境下浸泡24 h,取出后在30℃烘干24 h,记录浸泡前后增塑 PVC 试样的质量变化。

2 结果与讨论

2.1 SDH 的合成

对原料异山梨醇及酯化产物进行了 FTIR 分析,结果见图2。由图2可见,异山梨醇在3507 cm⁻¹处有醇羟基的伸缩振动峰,但酯化产物中该醇羟基特征峰消失。同时,酯化产物在2860~2931 cm⁻¹出现吸光度更强的 C—H 键对称伸缩振动吸收峰和反对称伸缩振动吸收峰,表明反应产物存在烷基链;在1739 cm⁻¹处的强吸收峰为酯基中 C=O 键的伸缩振动吸收峰,表明酯基形成。上述分析可见,异山梨醇的羟基发生了酯化反应,生成了 SDH。

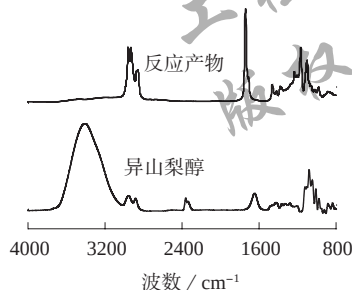
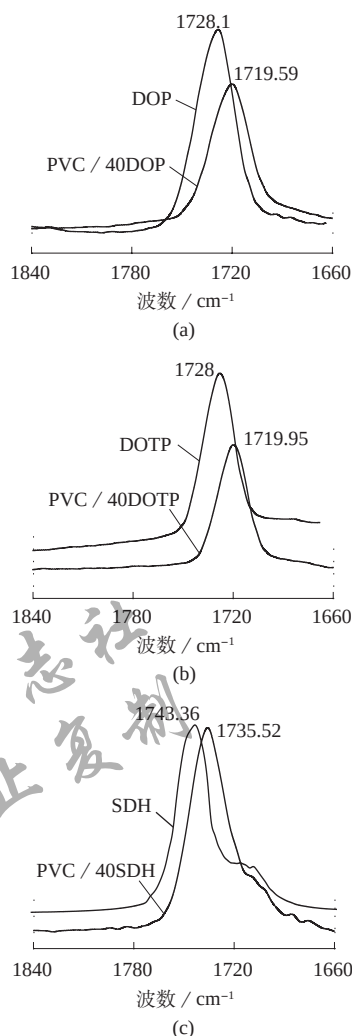


图2 异山梨醇反应前后的 FTIR 谱图

2.2 增塑剂及 PVC 的红外谱图

对比分析了 SDH 和传统邻苯类增塑剂增塑 PVC 试样的羰基区 FTIR 谱图,如图3和表2所示。可见,增塑剂及其相应 PVC 试样的羰基吸收峰存在明显偏移,这归因于 C=O·····H—C—Cl 键的偶极-偶极相互作用,是增塑剂与 PVC 相容的原因^[21]。因此这种偏移可用于评估 PVC 和增塑剂共混物的相容性,增塑后的羰基吸收带偏移越大,这意味着 PVC 与增塑剂之间的相互作用越强^[22]。对比三种增塑 PVC 试样可见, PVC/40DOP, PVC/40DOTP, PVC/40SDH 的羰基吸收带分别向低位偏移 8.51, 8.05, 7.84 cm⁻¹, 差别不大,表明 SDH 与 DOP 和 DOTP 对 PVC 有相近的相容性。



a—DOP 及增塑样条; b—DOTP 及增塑样条; c—SDH 及增塑样条

图3 增塑 PVC 试样与增塑剂的羰基区域 FTIR 光谱

表2 增塑 PVC 试样的羰基红外吸收峰及偏移数据 cm⁻¹

项目	DOP	DOTP	SDH
纯增塑剂峰位置	1728.10	1728.00	1743.36
增塑 PVC 试样峰位置	1719.59	1719.95	1735.52
峰偏移值	8.51	8.05	7.84

图4为 PVC 试样在 690 cm⁻¹附近的 FTIR 谱图。690 cm⁻¹处的吸收带归因于 PVC 的 C—Cl 键^[23]。可见,与纯 PVC 相比, PVC/40DOP, PVC/

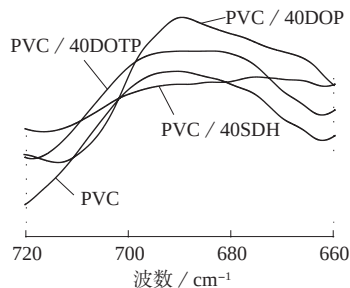
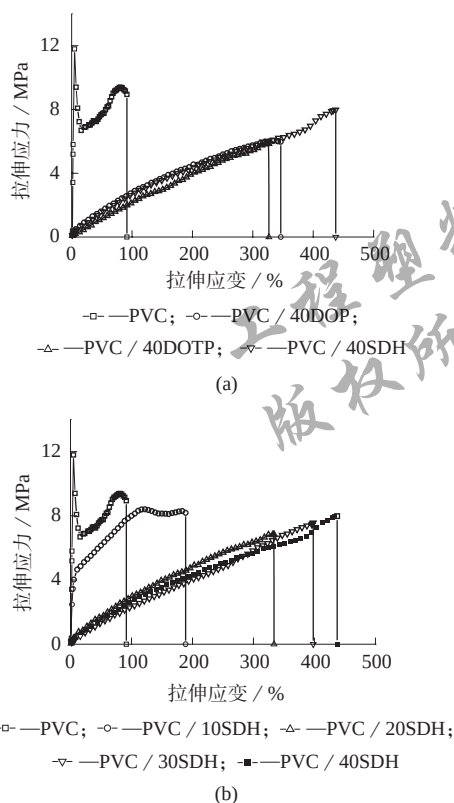


图4 PVC 样条 C—Cl 键区域 FTIR 谱图

40DOTP, PVC/40SDH 试片的 C—Cl 键吸收峰分别向低位偏移 4.25, 6.66, 15.39 cm^{-1} , SDH 明显高于 DOP 和 DOTP, 且峰宽更大, 这是由于 SDH 的呋喃环中有两个氧原子, 可以与 PVC 分子上的极性基团产生更强的吸引, 表现为更强的分子间作用力。

2.3 力学性能测试

拉伸断裂伸长率是评价增塑 PVC 柔韧性的主要指标, 相应试样的应力-应变曲线见图 5 和表 3。可知, SDH 的加入能够有效提高 PVC 制品的柔韧性, 提升产品的断裂伸长率, 且随着配比的增加而增加; PVC/40SDH 的断裂伸长率比纯 PVC 高出近 4 倍, 比 PVC/40DOP, PVC/40DOTP 分别高出 26.29%, 33.89%。这是由于 SDH 较 DOP 和 DOTP



a—PVC 及 40% 增塑剂增塑试样; b—PVC 及 SDH 增塑试样

图 5 PVC 试样应力-应变曲线

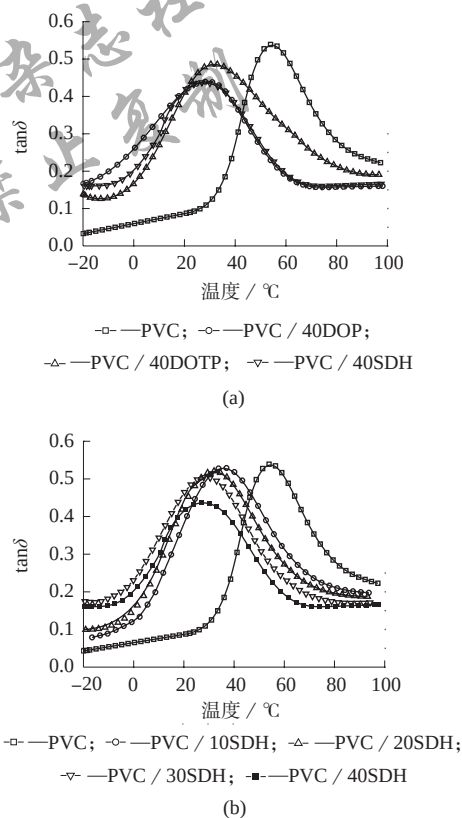
表 3 PVC 试样拉伸性能数据

试样	拉伸强度 / MPa	拉伸弹性模量 / MPa	断裂伸长率 / %
PVC	11.89 ± 0.9	1173 ± 16	91.51 ± 0.9
PVC / 40DOP	6.02 ± 0.6	20.1 ± 0.4	346.24 ± 12.7
PVC / 40DOTP	5.89 ± 0.5	23.7 ± 1.2	326.57 ± 7.4
PVC / 10SDH	8.29 ± 0.7	39.3 ± 0.3	188.79 ± 4.8
PVC / 20SDH	6.85 ± 0.1	18.4 ± 0.5	333.74 ± 4.5
PVC / 30SDH	7.57 ± 0.2	17.7 ± 2.0	398.08 ± 2.2
PVC / 40SDH	7.98 ± 0.4	13.1 ± 2.3	437.25 ± 11.4

具有更多的氧原子, 因此 SDH 与 PVC 有更强的分子间作用力, 且相同质量配比下 SDH 分子数更多, 可以更有效地溶剂化 PVC 树脂中的结晶区, 进而提高 PVC 分子链的运动能力, 增加自由体积, 表现为更好的增塑效果和材料韧性。

2.4 动态力学性能测试

样品的 DMA 测试中 $\tan\delta$ 随温度变化的关系如图 6 所示, 其中 $\tan\delta$ 峰值所对应的温度为玻璃化转变温度 (T_g)。由图 6 可见, 增塑剂的加入减弱了 PVC 链分子间的相互作用, 增加了自由体积, 提高了聚合物链的流动性, 表现为 T_g 降低。随着 SDH 用量的增加, PVC 样品的 T_g 下降越多, 产品柔韧性更好, 其中 PVC/40SDH 的 T_g 较纯 PVC 降低 25 $^{\circ}\text{C}$, 较相同配比的 DOP, DOTP 产品分别降低 1.67, 4.15 $^{\circ}\text{C}$, 表现出更好的增塑效果。



a—PVC 及 40% 增塑剂增塑试样; b—PVC 及 SDH 增塑试样

图 6 PVC 及增塑试样 DMA 测试曲线

2.5 热稳定性测试

表 4 示出了不同 PVC 试样的受热分解行为, 其中 T_5 , T_{10} , T_{50} 分别代表质量损失 5%, 10%, 50% 时的温度, T_{p1} 和 T_{p2} 分别代表第一、第二失重阶段最大失重速率温度。增塑剂 SDH 的加入, 显著提升了 PVC 的热稳定性, 表现为 T_5 , T_{10} 和 T_{p1} 均显著提升。

表4 PVC试样的热重测试数据

试样	T_5	T_{10}	T_{50}	T_{P1}	T_{P2}
PVC	156.6	231.815	298.5	274.1	462.2
PVC/10SDH	206.16	246.40	297.05	278.60	453.83
PVC/20SDH	213.59	253.59	301.09	284.42	457.47
PVC/30SDH	230.15	255.15	297.65	285.14	454.82
PVC/40SDH	251.64	264.14	294.14	283.2	466
PVC/40DOP	247.63	257.63	290.13	284.11	464.80
PVC/40DOTP	262.19	272.19	312.19	294.45	456.25

第一失重阶段发生在 200 ~ 350 ℃, 主要为 PVC 中 C—Cl 键断裂, 所形成的 Cl 原子与邻近亚甲基上的 H 原子生成 HCl, 使得 PVC 链上形成双键, 同时诱发邻近的 C—Cl 键断裂, 造成 PVC 的连续分解; 第二失重阶段发生在 420 ~ 550 ℃, 该阶段的降解过程比较复杂, 主要是 PVC 大分子发生进一步的交联、环化以及分子链的断裂等反应。而随着 SDH 配比的增加, T_5 和 T_{10} 大幅上升, 但其它几个特征温度提高幅度相对较小, 且与纯 PVC 接近, 这是由于高温段 SDH 逐渐挥发, 影响较小。对比不同增塑剂的 PVC 热重数据, 可知 DOTP 表现出了最好的热稳定性, 而 SDH 略优于 DOP。

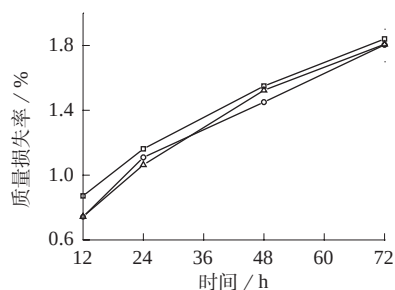
2.6 挥发性测试

聚合物中的小分子增塑剂只以氢键或范德华力与聚合物分子链相结合, 与空气等其它介质相接触时, 增塑剂会逐渐从 PVC 制品中迁移析出, 挥发到其它介质中, 影响制品使用性能。该挥发过程分为两步, 一是增塑剂从 PVC 内部扩散到制品表面, 过程取决于其在树脂中的移动扩散能力, 与增塑剂和聚合物分子链的作用力大小有关; 二是从表面扩散到所接触的介质中, 挥发性取决于增塑剂的沸点。

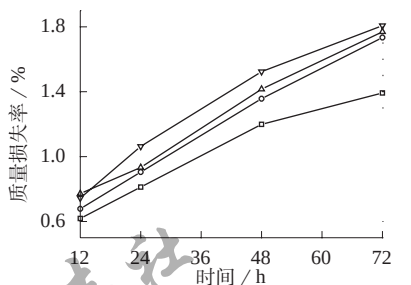
增塑 PVC 试样在空气中的挥发性实验结果见表 5 和图 7。在 PVC 与增塑剂质量比为 100 / 40 时, 增塑剂 DOP, DOTP 和 SDH 在 PVC 中的最终质量损失率为 1.84%, 1.80% 和 1.81%, 三种增塑剂的挥发性差别较小。随着 SDH 配比增大, 质量损失率增加幅度减小。这是因为 SDH 配比低时, SDH 在 PVC 中未达到饱和, 导致其在 PVC 树脂中移动比较困难, 增塑剂在 PVC 中的扩散是控制步骤;

表5 增塑 PVC 试样在 72 h 时的质量损失率

试样	质量损失率 / %
PVC/10SDH	1.39
PVC/20SDH	1.73
PVC/30SDH	1.78
PVC/40SDH	1.81
PVC/40DOP	1.84
PVC/40DOTP	1.80



—□—PVC / 40DOP; —○—PVC / 40DOTP; —△—PVC / 40SDH
(a)



—□—PVC / 10SDH; —○—PVC / 20SDH;
—△—PVC / 30SDH; —▽—PVC / 40SDH
(b)

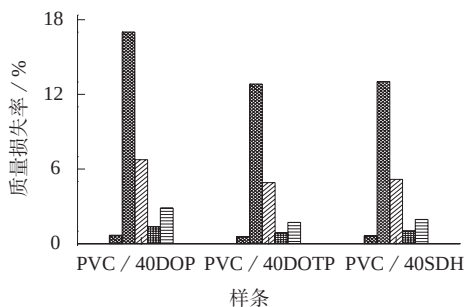
a—40% 增塑剂增塑试样; b—SDH 增塑试样

图7 增塑 PVC 试样在不同时间的质量损失

SDH 配比高时则容易扩散至制品表面挥发, 增塑剂在 PVC 中的扩散不再是控制步骤。对比不同增塑剂的质量损失率数据, SDH 的挥发性介于 DOP 和 DOTP 之间, 但非常接近。

2.7 增塑剂的耐抽提性

与气体中挥发过程不同, 液体介质中增塑剂的表面扩散过程取决于溶剂对增塑剂的溶解度。增塑 PVC 样品在不同溶剂中的耐抽提性如图 8 所示。可知, 增塑剂在石油醚中的迁移性明显高于在其它四种溶剂, 在 50% 乙醇溶液中的迁移性高于在 10% 乙醇溶液, 但在水中的迁移性非常接近, 增塑剂的迁移性行为很大程度取决于溶剂的种类; 此外, 不同



—水; —石油醚; —30%乙酸; —10%乙醇; —50%乙醇

图8 增塑 PVC 试样在不同溶剂中的质量损失

溶剂中增塑PVC的质量损失率大小顺序为DOP > SDH $\approx$ DOTP,表明DOP的耐抽提性最差,而SDH的耐抽提性与DOTP接近。

3 结论

(1) 相比DOP和DOTP,SDH与PVC的分子间力更强;

(2) PVC/40SDH试样较同比例的DOP和DOTP增塑试样的断裂伸长率分别提高26.29%和33.89%, T_g 则分别降低1.67℃和4.15℃,表现出更高的柔韧性;

(3) SDH的热稳定性、挥发性和耐抽提性介于DOP和DOTP之间,且比较接近。

(4) 综合来看,SDH具有取代DOP和DOTP的潜力。

参考文献

- [1] 钱伯章. 增塑剂的国内外发展现状(上)[J]. 上海化工, 2011, 36(1):36-38.
Qian Bozhang. Development status of plasticizers at home and abroad (Part 1)[J]. Shanghai Chemical Industry, 2011, 36(1):36-38.
- [2] 平岳. 塑料助剂产品的发展与展望[J]. 化工新型材料, 2006, 34(8):81-84.
Ping Yue. Development and prospect of plastic additive products[J]. New Chemical Materials, 2006, 34(8):81-84.
- [3] Maeva B, Coline V, Vincent L, et al. Petro-based and bio-based plasticizers: Chemical structures to plasticizing properties[J]. Polymer Chemistry, 2016, 54:11-33.
- [4] Bui T T, Giovanoulis G, Cousins A P, et al. Human exposure, hazard and risk of alternative plasticizers to phthalate esters[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541:451-467.
- [5] 石万聪, 赵晨阳. 增塑剂的毒性与相关限制法规[J]. 塑料助剂, 2010(3):43-47.
Shi Wancong, Zhao Chenyang. Plasticizer toxicity and related restrictions[J]. Plastics Additives, 2010(3):43-47.
- [6] Evan S, Brian R, Rebecca S, et al. Plastics additives and green chemistry[J]. Pure and Applied Chemistry, 2013, 85(8):1 611-1 624.
- [7] 雍奎刚, 刘忠科, 刘宝钊. PVC无毒增塑剂的应用和发展[J]. 塑料科技, 2017(6):88-91.
Yong Kuigang, Liu Zhongke, Liu Baozhao. Research and application of nontoxic plasticizer for PVC[J]. Plastics Science and Technology, 2017(6):88-91.
- [8] Li Mei, Li Shouhai, Xia Jianling, et al. Tung oil based plasticizer and auxiliary stabilizer for poly(vinyl chloride)[J]. Materials & Design, 2017, 122:366-375.
- [9] Chen Jie, Li Xiaoying, Wang Yigang, et al. Synthesis and application of environmental soybean oil-based epoxidized glycidyl ester plasticizer for poly(vinyl chloride)[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119, doi:10.1002/ejlt.201600216.
- [10] Greco A, Brunetti D, Renna G, et al. Plasticizer for poly(vinyl chloride) from cardanol as a renewable resource material[J]. Polymer Degradation & Stability, 2010, 95(11):2 169-2 174.
- [11] Yin B, Aminlashgari N, Yang X, et al. Glucose esters as biobased PVC plasticizers[J]. European Polymer Journal, 2014, 58:34-40.
- [12] Yang Yong, Huang Juncheng, Zhang Ruoyu, et al. Designing bio-based plasticizers: Effect of alkyl chain length on plasticization properties of isosorbide diesters in PVC blends[J]. Materials & Design, 2017, 126:29-36.
- [13] Cui Caixia, Zhen Yueju, Qu Junge, et al. Synthesis of biosafe isosorbide dicaprylate ester plasticizer by lipase in a solvent-free system and its sub-chronic toxicity in mice[J]. Rsc Advances, 2016, 6:11 959-11 966.
- [14] Beach E S, Weeks B R, Stern P T, et al. Plastics additives and green chemistry[J]. Pure Appl Chem, 2013, 85:1 611-1 624.
- [15] Yin B, Minna H. Oligomeric isosorbide esters as alternative renewable resource plasticizers for PVC[J]. Appl Polym Sci, 2011, 119:2 400-2 407.
- [16] Erythropel H C, Shipley S, Bormann A, et al. Designing green plasticizers: influence of molecule geometry and alkyl chain length on the plasticizing effectiveness of diester plasticizers in PVC blends[J]. Polymer, 2016, 89:18-27.
- [17] Benaniba M T, Massardier-Nageotte V. Evaluation effects of biobased plasticizer on the thermal, mechanical, dynamical mechanical properties, and permanence of plasticized PVC[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 118(6):3 499-3 508.
- [18] Jia Puyou, Bo Caiying, Hu Lihong, et al. Synthesis of a novel polyester plasticizer based on glyceryl monooleate and its application in poly(vinyl chloride)[J]. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2015, 22(4):514-519.
- [19] Yang Yong, Xiong Zhu, Zhang Lisheng, et al. Isosorbide dioctoate as a 'green' plasticizer for poly(lactic acid)[J]. Materials & Design, 2015, 91:262-268.
- [20] Lindstrom A, Hakkarainen M. Environmentally friendly plasticizers for poly(vinyl chloride)-improved mechanical properties and compatibility by using branched poly(butylene adipate) as a polymeric plasticizer[J]. Appl Polym Sci, 2006, 100(3):2 180-2 188.
- [21] Gonzales N, Fernandez-Berridi M J. Application of fourier transform infrared spectroscopy in the study of interactions between PVC and plasticizers: PVC / plasticizers compatibility versus chemical structure of plasticizer[J]. Appl Polym Sci, 2006, 101:1 731-1 737.
- [22] Liu Tao, Jiang Pingping, Liu Hongliang, et al. Performance testing of a green plasticizer based on lactic acid for PVC[J]. Polymer Testing, 2017, 61:205-213.
- [23] Bhakti M, Mukesh K, Anagha S. Benzyl ester of dehydrated castor oil fatty acid as plasticizer for poly(vinyl chloride)[J]. Polymer International, 2013, 63(8):1 456-1 464.