

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.10.021

复合发泡体系对 PUR-T 发泡材料性能的影响^{*}

汪扬涛^{1,2}, 张青海^{1,2}, 曾安蓉^{1,2}, 李云龙^{1,2}

(1. 黎明职业大学材料与化学工程学院, 福建泉州 362000; 2. 实用化工材料福建省高校应用技术工程中心, 福建泉州 362000)

摘要: 采用化学发泡法, 用热塑性聚氨酯 (PUR-T) 及偶氮二甲酰胺 (AC)/NaHCO₃, AC/尿素及 4,4'-氧代双苯磺酰肼 (OBSh)/NaHCO₃, OBSh/尿素复合发泡剂和交联剂甲苯二异氰酸酯 (TDI) 制备出交联型 PUR-T 发泡材料, 通过万能电子试验机、发泡倍数和扫描电子显微镜分析比较了不同复合发泡剂的发泡效果, 探讨了 AC/NaHCO₃ 用量配比和 TDI 用量对 PUR-T 发泡材料力学性能、发泡倍数和泡孔结构的影响。结果表明, AC/NaHCO₃ 复合发泡剂对 PUR-T 的发泡效果最佳, 泡孔均匀细密且结构最为稳定; 当 AC 和 NaHCO₃ 用量均为 0.2 份、TDI 用量为 1.2 份时, 发泡剂的发泡速率和 PUR-T 的交联速率最匹配, 发泡倍数为 1.421 倍, 发泡效果最佳, 制得的 PUR-T 发泡材料的力学性能最好, 其拉伸强度达 11.23 MPa, 断裂伸长率达 311%。

关键词: 热塑性聚氨酯; 复合发泡剂; 发泡材料

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)10-0113-06

Effects of Composite Foaming System on Properties of PUR-T Foaming Materials

Wang Yangtao^{1,2}, Zhang Qinghai^{1,2}, Zeng Anrong^{1,2}, Li Yunlong^{1,2}

(1. College of Materials and Chemical Engineering,黎明 Vocational University, Quanzhou 362000, China;

2. Center of Fujian Provenical High Education for Practical Chemical Material, Quanzhou 362000, China)

Abstract: Thermoplastic polyurethane (PUR-T) foaming materials were prepared with PUR-T, the composite foaming agents of azodicarbonamide (AC)/NaHCO₃, AC/urea, 4,4'-oxybis(benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh)/NaHCO₃, OBSh/urea and the cross linker of toluene diisocyanate (TDI). The foaming effects of different composite foaming agents were compared by universal electronic testing machine, foaming multiples and scanning electron microscopy. The effects of AC/NaHCO₃ dosage ratio and TDI dosage on mechanical properties, foaming multiples and pore structure of PUR-T foaming material were investigated. The results show that AC/NaHCO₃ composite foaming agent has the best foaming effect on PUR-T. The pores are uniform and fine, and the structure is the most stable. When the dosages of AC and NaHCO₃ are 0.2 phr and the dosage of TDI is 1.2 phr, the foaming rate of the foaming agent is best matched with the crosslinking rate of PUR-T, the foaming multiple is 1.421 times, the best foaming effect and the mechanical properties of PUR-T foam material are the best, the tensile strength is 11.23 MPa and the elongation at break is 311%.

Keywords: thermoplastic polyurethane; composite foaming; foaming material

热塑性聚氨酯 (PUR-T) 是由硬段和软段构成的无交联结构嵌段共聚物^[1-2], 具有高强度、高弹性、耐磨、抗撕裂、低温柔软性好等优点, 加工性能良好, 是可回收再利用的绿色环保材料, 广泛应用于汽车、鞋材、电线电缆等领域^[3-7]。通过发泡工艺可以获得轻质 PUR-T 发泡材料, 不仅保持原有的优异性能, 还提高 PUR-T 的使用寿命和柔韧性^[8-12]。目前对 PUR-T 发泡的研究大多为物理发泡, 如超临界 CO₂ 发泡、水蒸气发泡、甘油发泡、氮气发泡等, 物理发泡工艺对设备要求高, 技术难度大^[13-15]。而化学发泡在 PUR-T 的应用中却少有报道, 且单一的化学发泡剂很难满足多种 PUR-T 发泡制品的需求, 可通

过配合使用满足生产要求^[16-18]。

笔者采用化学发泡法, 用复合发泡剂制备 PUR-T 发泡材料, 并在此基础上研究复合发泡剂的种类、组分用量以及交联剂用量对发泡材料力学性能、发泡倍数和泡孔结构的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PUR-T: JZ-S85, 石梅化学工业股份有限公司;

^{*} 福建省中青年教育科研项目 (JAT160841)

联系人: 汪扬涛, 助教, 主要从事功能高分子材料及橡塑改性加工研究

收稿日期: 2017-09-02

甲苯二异氰酸酯 (TDI): 工业级, 厦门健佳工贸有限公司;

偶氮二甲酰胺 (AC): 工业级, 泉州海泰化工厂;

4,4'-氧代双苯磺酰肼 (OBSH): 工业级, 南阳市鸿富橡塑有限公司;

碳酸氢钠: 分析纯, 上海虹光化工厂有限公司;

尿素、氧化锌: 分析纯, 西陇化工股份有限公司;

硬脂酸: 工业级, 福州开发区成海化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

开放式炼塑炼胶机: SXK1160X320 型, 福建永春县轻工机械厂;

平板硫化机: XLB-D/Q 450 × 450 型, 郑州鑫和机器制造有限公司;

电子万能拉力试验机: CMT-6203 型, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

邵氏 A 硬度计: GS-701N/702N 型, 日本得乐有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): TM3030Plus 型, 日本日立公司;

电热恒温鼓风干燥箱: DHG-9070A 型, 上海新诺仪器设备有限公司。

1.3 配方设计

不同复合发泡剂的 PUR-T 发泡材料配方列于表 1, AC/NaHCO₃ 复合发泡剂的 PUR-T 发泡材料配方列于表 2。

表 1 不同复合发泡剂的 PUR-T 发泡材料配方 质量份数

项目	样品编号			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
PUR-T	100	100	100	100
TDI	1.2	1.2	1.2	1.2
AC/NaHCO ₃ (1:1)	0.4	0	0	0
AC/尿素 (1:1)	0	0.4	0	0
OBSH/NaHCO ₃ (1:1)	0	0	0.4	0
OBSH/尿素 (1:1)	0	0	0	0.4
氧化锌	3	3	3	3
硬脂酸	1	1	1	1

表 2 AC/NaHCO₃ 复合发泡剂的 PUR-T 发泡材料配方 质量份数

项目	样品编号								
	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]
PUR-T	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TDI	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0	0.4	0.8	1.6
AC	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2
NaHCO ₃	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.2	0.2	0.2	0.2
氧化锌	3	3	3	3	3	3	3	3	3
硬脂酸	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1.4 试样制备

将 PUR-T 于 90 ℃ 下真空干燥 2~3 h, 然后用开炼机将 PUR-T、发泡剂、交联剂和其它助剂

于 110 ℃ 下混炼均匀, 再用平板硫化机于 160 ℃, 10 MPa 条件下热压 10 min, 得到 PUR-T 发泡材料。

1.5 性能测试与表征

拉伸强度、断裂伸长率及 100% 定伸应力按照 GB/T 528-2009 测试, 拉伸速率为 500 mm/min。

硬度 (邵氏 A) 按照 GB/T 531.1-2008 测试, 试样厚度不小于 6 mm。

发泡倍数按照 GB/T 6343-2009 测试。按式 (1) 计算表观密度, 按式 (2) 计算发泡倍数^[17-18]:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (2)$$

式中: ρ ——试样的表观密度;

m ——测试试样的质量;

V ——测试试样的体积;

φ ——发泡材料的发泡倍数;

ρ_1 ——未发泡试样的表观密度;

ρ_2 ——发泡后试样的表观密度。

SEM 分析: 将试样用液氮脆断, 保留泡孔形貌, 然后喷金, 用 SEM 分析断面形貌。

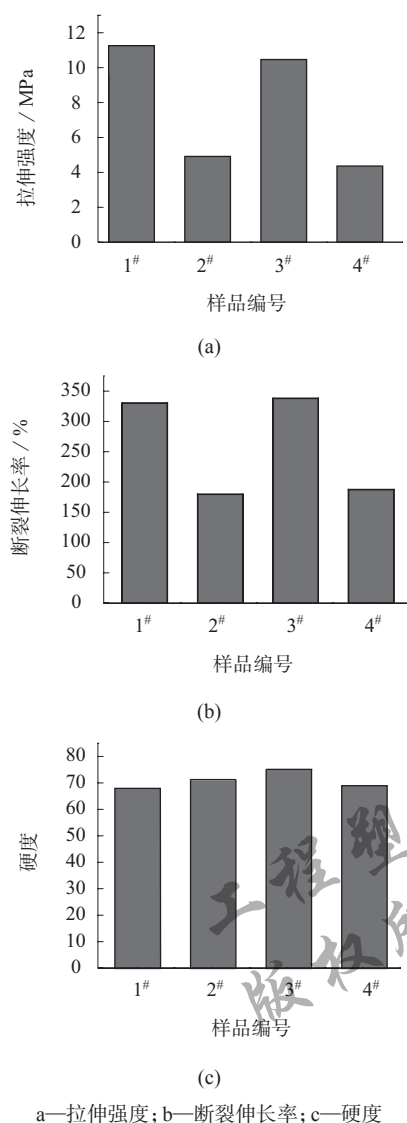
2 结果与讨论

2.1 复合发泡剂种类对 PUR-T 发泡材料性能的影响

(1) 力学和物理性能。

添加不同复合发泡剂的 PUR-T 发泡材料的性能如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 添加复合发泡剂 AC/NaHCO₃ 和 OBSH/NaHCO₃ 的 PUR-T 发泡材料的力学性能较好。添加复合发泡剂 AC/NaHCO₃ 的 PUR-T 发泡材料的拉伸强度和断裂伸长率分别为 11.23 MPa 和 311 %, 添加 OBSH/NaHCO₃ 的 PUR-T 发泡材料拉伸强度和断裂伸长率分别为 10.4 MPa 和 339 %。这可能是因为含 NaHCO₃ 的复合发泡剂的分解速率与 PUR-T 交联速率更加匹配, 在发泡剂分解出气体时 PUR-T 同步进行了交联, 容易形成细密均匀且结构稳定的泡孔, 使 PUR-T 发泡材料的力学性能较好。而添加复合发泡剂 AC/尿素和 OBSH/尿素的 PUR-T 发泡材料的拉伸强度均小于 5 MPa, 断裂伸长率均小于 200%。这可能是因为含尿素的复合发泡剂的分解速率慢, 且发气量小, 发泡剂分解时 PUR-T 已经产



a—拉伸强度; b—断裂伸长率; c—硬度

图1 不同种类复配发泡剂的 PUR-T 发泡材料的性能

生交联,具有一定的熔体强度,部分泡孔不能成长而导致发泡不均,在拉伸过程中容易形成应力集中而使材料断裂。另外,添加 AC/ NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料的硬度最小,为 68。综合来看,添加 AC/ NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料的性能最佳。

(2) 发泡倍数。

添加不同种类复配发泡剂的 PUR-T 发泡材料的发泡倍数列于表 3。

表 3 不同种类复配发泡剂的 PUR-T 发泡材料的发泡倍数

项目	样品编号			
	1#	2#	3#	4#
表观密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.8024	1.0844	1.0496	1.0988
发泡倍数	1.421	1.051	1.086	1.037

由表 3 可以看出,添加复合发泡剂 AC/ NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料的发泡倍数为 1.421 倍,在 4 种复合发泡剂中的发泡效果最好。说明 AC/

NaHCO_3 相较于其它复合发泡剂在 PUR-T 中分解的气体可以更有效地形成细密均匀且结构稳定的泡孔,同时,AC 分解产生异氰酸和 NaHCO_3 分解产生的水反应生成 NH_3 和 CO_2 ,进一步增大发泡量,添加 AC/ NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料的发泡倍数大于添加 OBSH/ NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料(发泡倍数为 1.086 倍)。而 AC/尿素和 OBSH/尿素则由于部分泡孔不能成长,导致其发泡倍数最低,分别为 1.051 倍和 1.037 倍。

(3) SEM 分析。

添加不同复合发泡剂的 PUR-T 发泡材料的 SEM 照片如图 2 所示。

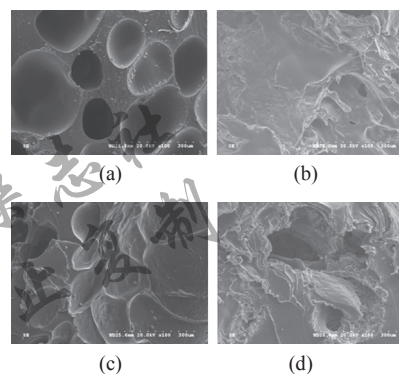
复合发泡剂种类: a—AC/ NaHCO_3 ; b—AC/尿素;
c—OBSH/ NaHCO_3 ; d—OBSH/尿素

图2 不同种类复配发泡剂的 PUR-T 发泡材料断面的 SEM 照片

从图 2 可看出,添加复配发泡剂 AC/ NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料的泡孔结构稳定,泡孔壁光滑清晰,而且尺寸均匀,说明 AC/ NaHCO_3 的分解速率与 PUR-T 的交联速率是基本同步的,在发泡的同时 PUR-T 产生交联,及时地锁住 AC/ NaHCO_3 分解的气体,形成良好的闭孔发泡结构。相比较而言,添加 OBSH/ NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料的泡孔不均匀,且泡孔壁较为粗糙。这是由于 OBSH/ NaHCO_3 的分解速率稍快于 PUR-T 的交联速率,来不及锁住气体,导致部分泡孔破裂,形成开孔发泡结构。而添加 AC/尿素和 OBSH/尿素的 PUR-T 发泡材料的泡孔量少且不稳定。这是因为 AC/尿素和 OBSH/尿素的分解速率落后于 PUR-T 的交联速率,发泡剂分解时 PUR-T 已经有一定的熔体强度,气体很难在交联的 PUR-T 中成长形成有效的泡孔结构。

2.2 发泡剂 AC 与 NaHCO_3 配比对 PUR-T 发泡材料性能的影响

(1) 力学和物理性能。

固定 AC 与 NaHCO_3 总用量为 0.4 份不变,添加 AC 与 NaHCO_3 用量配比不同时 PUR-T 发泡材料的性能如图 3 所示。

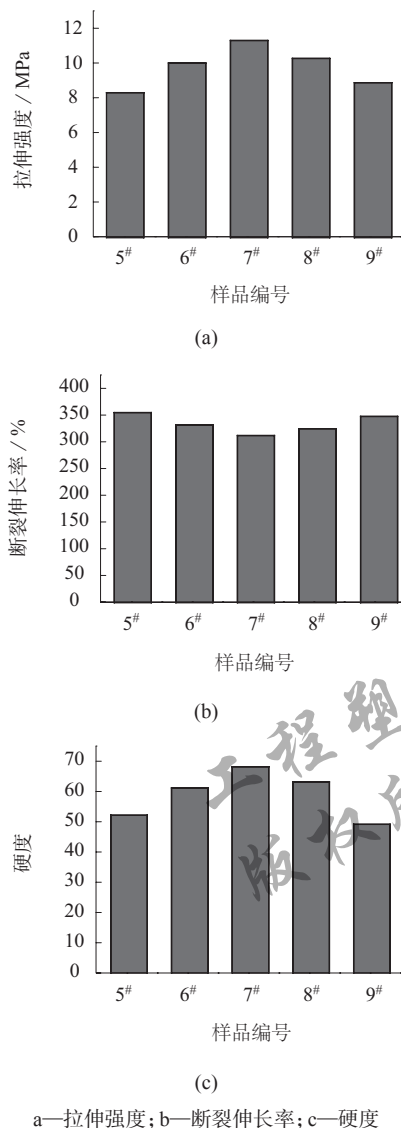


图3 AC和 NaHCO_3 用量配比不同时 PUR-T 发泡材料的性能

从图 3 和表 2 可以看出,当 $\text{AC}/\text{NaHCO}_3=0/0.4$ 时,随着 AC 含量的增加, PUR-T 发泡材料的拉伸强度和硬度先增大后减小,在 AC, NaHCO_3 用量均为 0.2 份时拉伸强度和硬度均达到最大值,分别为 11.23 MPa 和 68,而断裂伸长率则先减小后增大。当 $\text{AC}/\text{NaHCO}_3=0/0.4$ 时,由于 NaHCO_3 的分解温度较低,很容易分解释放出气体,而此时 PUR-T 还未产生交联结构将气体锁住,因此只能形成大气泡对材料造成缺陷, PUR-T 发泡材料的拉伸强度仅为 8.2 MPa。随着 AC 含量的增加, AC/NaHCO_3 复合发泡剂的分解速率逐渐与 PUR-T 的交联速率同步,且发气量也逐渐增加,容易形成细密均匀且稳

定的闭孔结构,使 PUR-T 发泡材料的拉伸强度提高。但当 AC 含量超过 0.2 份时, AC 分解放热会导致 PUR-T 局部熔体强度较低,虽然发气量增加但无法锁住气体,气体胀破泡孔,使泡孔塌陷、并泡,导致缺陷的产生, PUR-T 发泡材料拉伸强度减小。

(2) 发泡倍数。

固定 AC 与 NaHCO_3 总用量为 0.4 份不变,添加 AC 与 NaHCO_3 用量配比不同时 PUR-T 发泡材料的发泡倍数列于表 4。

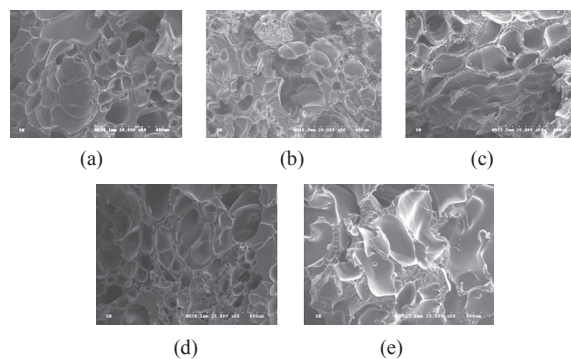
表 4 AC 与 NaHCO_3 用量配比不同时 PUR-T 发泡材料的发泡倍数

项目	AC / NaHCO_3				
	0 / 0.4	0.1 / 0.3	0.2 / 0.2	0.3 / 0.1	0.4 / 0
表观密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.7651	0.7514	0.8024	0.7603	0.7305
发泡倍数	1.490	1.517	1.421	1.500	1.561

从表 4 可以看出,只添加 NaHCO_3 的 PUR-T 发泡材料的发泡倍数为 1.490 倍。这是因为模压加工过程中产生的气体无法释放导致的,大气泡不均匀地分布在材料中。添加 AC 之后,随着 AC/NaHCO_3 中 AC 用量的增加, PUR-T 发泡材料的发泡倍数呈先减小后增大的趋势,在 AC 与 NaHCO_3 用量均为 0.2 份时达到最小值,为 1.421 倍。这是因为当 AC 用量不超过 0.2 份时,增加 AC 有利于形成气泡核,提高成泡率,使泡孔逐渐密集, PUR-T 发泡材料的密度增大。随着 AC 用量的继续增加,过大的发气量会胀破泡孔,使泡孔增大、并泡,成泡率降低,导致 PUR-T 发泡材料的表观密度减小,发泡倍数增大。

(3) SEM 分析。

固定 AC 与 NaHCO_3 总用量为 0.4 份不变,添加 AC 与 NaHCO_3 用量配比不同时 PUR-T 发泡材料的 SEM 照片如图 4 所示。



AC/ NaHCO_3 用量配比: a—0 / 0.4 ; b—0.1 / 0.3 ; c—0.2 / 0.2 ; d—0.3 / 0.1 ; e—0.4 / 0

图4 AC和 NaHCO_3 用量配比不同时 PUR-T 发泡材料断面的 SEM 照片

从图 4 可以看出,只添加 NaHCO_3 时, PUR-T 发泡材料内部存在很多分布极不均匀的大气泡,说明 PUR-T 还未交联 NaHCO_3 就已经分解产生了大量气体,没有成型发泡结构,发泡效果差。添加 AC 之后,随着 AC 用量的增加, PUR-T 开始形成有效的泡孔结构,泡孔分布逐渐均匀,泡壁结构逐渐稳定,发泡效果逐渐良好。但是当 AC 用量超过 0.2 份之后,特别是只添加 AC 时, PUR-T 发泡材料的泡孔开始出现增大和并泡的现象,使泡孔不均匀。由此可知, AC/ NaHCO_3 用量均为 0.2 份时, PUR-T 的发泡效果最佳。

2.3 交联剂 TDI 对 PUR-T 发泡材料性能的影响

(1) 力学和物理性能。

不同 TDI 用量的 PUR-T 发泡材料的性能如图 5 所示。

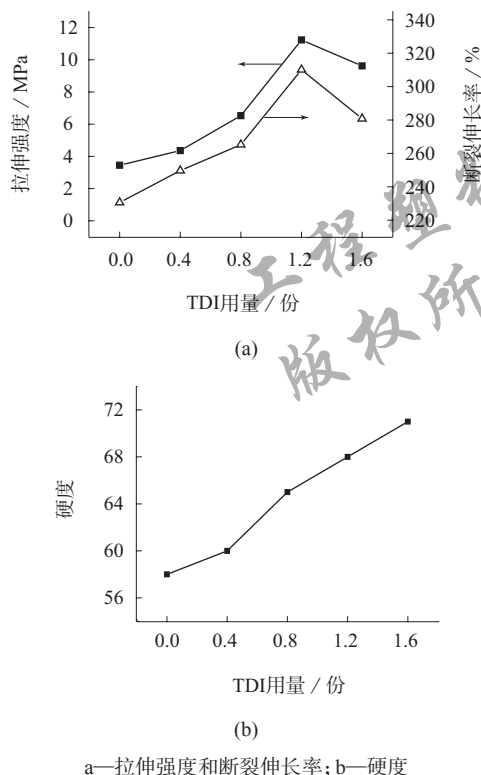


图 5 不同 TDI 用量的 PUR-T 发泡材料的性能

从图 5 可以看出,随着 TDI 用量的增加, PUR-T 发泡材料的拉伸强度和断裂伸长率先增大后减小,在 TDI 用量为 1.2 份时拉伸强度和断裂伸长率达到最大值,分别为 11.23 MPa 和 311%,而硬度则逐渐增大。这是因为随着 TDI 用量的增加, PUR-T 的交联程度提高,一方面会使 PUR-T 分子链不容易产生相对滑移,从而提高拉伸强度,另一方面 PUR-T 交联程度的提高会使熔体黏度增大,在

一定程度上有利于锁住发泡剂分解的气体,形成细密均匀且结构稳定的泡孔。但 TDI 用量超过 1.2 份时会导致 PUR-T 交联程度过高,使 PUR-T 发泡材料变脆、变硬,导致拉伸强度和断裂伸长率均下降。

(2) 发泡倍数。

不同 TDI 用量的 PUR-T 发泡材料的发泡倍数列于表 5。

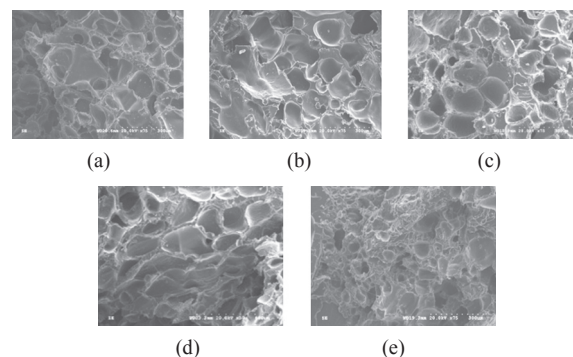
表 5 不同 TDI 用量的 PUR-T 发泡材料的发泡倍数

项目	TDI / 份				
	0	0.4	0.8	1.2	1.6
表观密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.0779	0.947	0.8560	0.8024	0.8786
发泡倍率	5.4	16	24.9	29.6	22.9

从表 5 可以看出,随着 TDI 用量的增加, PUR-T 发泡材料的发泡倍数先增大后减小,当 TDI 用量为 1.2 份时最大,为 29.6 倍。这是因为当 TDI 用量不超过 1.2 份时,增加 TDI 的用量会使 PUR-T 熔体黏度增大,可将发泡剂分解的气体锁在 PUR-T 中,并使泡孔得到一定的成长,且不会发生破孔、并泡现象。但 TDI 用量超过 1.2 份时,会导致 PUR-T 熔体黏度过大,限制了泡孔的成长,发泡倍数反而下降。

(3) SEM 分析。

不同 TDI 用量的 PUR-T 发泡材料断面的 SEM 照片如图 6 所示。



TDI 用量: a—0 份; b—0.4 份; c—0.8 份; d—1.2 份; e—1.6 份

图 6 不同 TDI 用量的 PUR-T 发泡材料断面的 SEM 照片

从图 6 可以看出,未添加 TDI 的 PUR-T 发泡材料泡孔大且不均匀。这是熔体黏度较低不能锁住气体,泡孔不稳定坍塌所导致的。当 TDI 用量不超过 1.2 份时,随着 TDI 用量的增加, PUR-T 发泡材料的泡孔分布逐渐均匀,孔壁逐渐清晰。这是因为 PUR-T 的熔体黏度增大锁住气体,保证了泡孔的形成和稳定成长。当 TDI 用量超过 1.2 份时, PUR-T 发泡材料的泡孔很小且不均匀。这是因为 PUR-T 熔体黏度过大,泡孔不能成长,发泡不充分。

3 结论

(1) AC/NaHCO₃ 复合发泡剂的分解速率和 PUR-T 的交联速率最匹配,发泡效果最佳,发泡倍数达到 1.421 倍。

(2) AC/NaHCO₃ 复合发泡剂中 AC 和 NaHCO₃ 的用量均为 0.2 份时, PUR-T 发泡材料的泡孔成泡率和发泡效果最佳,可以形成细密均匀且结构稳定的泡孔。

(3) 随着 TDI 用量的增加, PUR-T 交联程度提高,熔体黏度增大, PUR-T 发泡材料的拉伸强度和断裂伸率先增大后减小,在其用量为 1.2 份时达到最大值,分别为 11.23 MPa 和 311%。

参考文献

- [1] Herrera M, Matuschek G, Kettrup A. Thermal degradation of thermoplastic polyurethane elastomers (TPU) based on MDI[J]. Polymer Degradation & Stability, 2002, 78(2):323-331.
- [2] 张敏,路润峰,王昊,等. 不同软段结构对 PUR-T 性能影响研究[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(5):25-29.
Zhang Min, Lu Runfeng, Wang Hao, et al. Effects of soft segments with different structures on properties of PUR-T[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(5):25-29.
- [3] 蔡贵平,王裕清. TPU 材料的应用与发展[J]. 聚氨酯工业, 2011(12):30-31.
Cai Guiping, Wang Yuqing. Application and development of TPU[J]. Polyurethane Industry, 2011(12):30-31.
- [4] 李云龙,张青海,黄高爽. PUR-T/PVC 复合材料的制备及性能研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(10):8-11.
Li Yunlong, Zhang Qinghai, Huang Gaoshuang. Study on preparation and properties of PUR-T/PVC composite[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(10):8-11.
- [5] 张青海,李云龙,林松柏,等. PUR-T/PVC 热塑性弹性体的制备及工艺探究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(6):67-71.
Zhang Qinghai, Li Yunlong, Lin Songbai, et al. Preparation and process technology for PUR-T/PVC thermoplastic[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):67-71.
- [6] 肖欢,李侃社,丁胜春,等. PVC/TPU 共混材料的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2010(12):144-147.
Xiao Huan, Li Kanshe, Ding Shengchun, et al. Preparation and performances of PVC/TPU blends[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010(12):144-147.
- [7] 刘建平,王一帆,周青,等. 共混改性废旧聚氨酯的再生研究[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(10):14-17.
Liu Jianping, Wang Yifan, Zhou Qing, et al. Study on reuse of waste polyurethane waste by blending modification[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(10):14-17.
- [8] 耿佳,冯芳,王东田. 聚氨酯泡沫在环境领域的应用及其回收处理[J]. 材料导报, 2012, 26(3):78-83.
Geng Jia, Feng Fang, Wang Dongtian. Application of polyurethane foams in the environmental field and reuse of the materials[J]. Materials Review, 2012, 26(3):78-83.
- [9] 朱俊. 聚氨酯发泡技术应用及发展趋势[J]. 化学工业, 2013, 31(5):36-39.
Zhu Jun. Polyurethane foaming technology and market prospect[J]. Chemical Industry, 2013, 31(5):36-39.
- [10] 张艳娜,秦柳,张聪,等. 新型超轻发泡 TPU 颗粒材料在鞋材上的应用[J]. 化工新型材料, 2016(10):260-262.
Zhang Yanna, Qin Liu, Zhang Cong, et al. The application of new super-light foaming TPU particle material in shoe material[J]. New Chemical Materials, 2016(10):260-262.
- [11] 刘际泽. 热塑性聚氨酯发泡粒子的特性和应用[J]. 塑料, 2015(1):120-120.
Liu Jize. The characteristics and application of TPU foam particles[J]. Plastics, 2015(1):120-120.
- [12] 焦雷,陈聪,陈程,等. 交联型 PVC/TPU 轻质材料的制备和表征[J]. 高分子学报, 2012(5):513-520.
Jiao Lei, Chen Cong, Chen Cheng, et al. Preparation and characterization of cross-linked PVC/TPU lightweight materials[J]. Acta Polymerica Sinica, 2012(5):513-520.
- [13] 汪诗平,李星,任倩. 高压 CO₂ 流体发泡制备微孔 PVC/PUR-T 泡沫材料[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(3):54-58.
Wang Shiping, Li Xing, Ren Qian. Preparation of microcellular PVC/PUR-T foam with compressed CO₂[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(3):54-58.
- [14] 李海燕,杨卫民,秦柳,等. 复合发泡剂制备 TPU 微孔发泡材料[J]. 塑料, 2016(6):59-61.
Li Haiyan, Yang Weimin, Qin Liu, et al. Preparation of TPU microporous foaming material by compound foaming agent[J]. Plastics, 2016(6):59-61.
- [15] 杨卫民,李海燕. 蒸汽发泡与传统发泡方式对 TPU 发泡效果的影响[J]. 中国塑料, 2016, 30(9):9-13.
Yang Weimin, Li Haiyan. Effect of steam foaming and traditional foaming method on foaming result of TPU[J]. China Plastics, 2016, 30(9):9-13.
- [16] 张振江,石雅琳,苏丽丽,等. 热塑性聚氨酯微孔弹性体发泡工艺综述[J]. 洛阳师范学院学报, 2011, 30(11):42-45.
Zhang Zhenjiang, Shi Yalin, Su Lili, et al. The review of thermoplastic polyurethane microcellular elastomer foaming process[J]. Journal of Luoyang Teachers College, 2011, 30(11):42-45.
- [17] 林佩洁. HGB/TPU 复合泡沫材料的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
Lin Peijie. Study on the preparation and properties of HGB/TPU composites foam[D]. Shanghai: Donghua university, 2013.
- [18] 杜娟. TPU 发泡薄膜制备工艺及相关性能的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2015.
Du Juan. Study on the preparation technology and properties of TPU foam film[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2015.