

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.021

无孔型高透湿 TPEE 的制备与性能

陈震, 李森, 张志峰, 戴勇, 李文豪, 黎万丽, 付亚兰, 尤润菁

(新疆蓝山屯河高端新材料工程技术研究中心有限公司, 新疆昌吉 831100)

摘要: 为满足市场对无孔透湿热塑性聚酯弹性体(TPEE)的多样化需求,研发了无孔型高透湿 TPEE (GTS TPEE)。以丁二醇、精对苯二甲酸、聚醚(聚四氢呋喃二醇)软段为原料,采用熔融共聚法合成了两种无孔透湿 TPEE,即常规 TPEE 与 GTS TPEE,探究了两种不同软段占比对产物水蒸气透过率的影响。通过傅里叶变换红外光谱、差示扫描量热仪、熔体流动速率仪、热重分析等对产物进行结构表征与性能测试,并将产物吹膜后,采用日标与美标两种方法测试膜的水蒸气透过率。同时,为保证材料在水蒸气透过率提升的同时兼具耐老化性能,通过与抗老化母粒、开口母粒共混吹膜,提升膜制品的开口性及热稳定性。结果显示,在保证吹膜厚度均为 $18\mu\text{m}$ 的前提下,GTS TPEE 的水蒸气透过率日标达 $172\,300\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$,美标达 $11\,300\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$;相比之下,常规 TPEE 的水蒸气透过率日标为 $87\,440\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$,美标为 $9\,266\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$,GTS TPEE 的水蒸气透过率显著提升,主要是由于 GTS TPEE 中所含亲水基团量高于常规 TPEE。此外,热重分析表明,GTS TPEE 的热稳定性优于常规 TPEE。研究表明,成功提升了无孔透湿 TPEE 膜制品的水蒸气透过率和热稳定性,促进了无孔透湿 TPEE 在服装、医疗、户外用品等领域的多元化应用。

关键词: 热塑性聚酯弹性体;无孔透湿;水蒸气透过率;熔融共聚;透湿膜

中图分类号: TQ326.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0165-06

Preparation and properties of high moisture permeability TPEE without pores

CHEN Zhen, LI Sen, ZHANG Zhifeng, DAI Yong, LI Wenhao, LI Wanli, FU Yalan, YOU Runjing

(Xinjiang Lanshan Tunhe High-Tech New Materials Engineering Research Center Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract : To meet the diversified market demands for non-porous moisture-permeable thermoplastic polyester elastomer (TPEE), the high moisture permeable non-porous moisture permeable TPEE (GTS TPEE) was developed. Using 1,4-butanediol, purified terephthalic acid, and polyether soft segments as raw materials, two types of non-porous moisture-permeable TPEE materials namely conventional TPEE and GTS TPEE were synthesized via melt copolymerization. The influence of different soft segment ratios on the water vapor transmission rate (WVTR) of the products was investigated. The products were characterized and tested by Fourier transform infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, melt flow index tester, and thermogravimetric analysis. After blow-molding, the WVTR of the films was tested using both Japanese (JIS) and American (ASTM) standards. In order to ensure the material in water vapor transmittance increases with aging resistance performance, anti-aging masterbatch and opening masterbatch were blended during blow-molding to enhance the opening property and thermal stability of the film products. The results show that the water vapor permeability of GTS TPEE is $172\,300\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ by JIS, and $11\,300\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ by ASDM under the premise of ensuring that the thickness of the blown film is $18\mu\text{m}$. In contrast, the water vapor transmission rate of conventional TPEE is $87\,440\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ by JIS, and $9\,266\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ by ASDM. The water vapor transmission rate of GTS TPEE is significantly improved, mainly because the amount of hydrophilic groups contained in GTS TPEE is higher than that of conventional TPEE. Thermogravimetric analysis indicates that GTS TPEE exhibits better thermal stability than conventional TPEE due to the addition of thermal stabilizers. The WVTR and thermal stability of non-porous moisture-permeable TPEE film products are successfully improved, promoting the diversified applications of non-porous moisture-permeable TPEE in fields such as clothing, medical care, and outdoor supplies.

Keywords : thermoplastic polyester elastomer ; non-porous moisture permeability ; water vapor transmittance ; melt copolymerization ; permeable film

基金项目: 新疆人才发展基金科研创新平台人才团队支持计划

通信作者: 张志峰,工程师,研究方向为生物基材料、降解材料、工程塑料的研发与转化

收稿日期: 2025-06-22

引用格式: 陈震,李森,张志峰,等.无孔型高透湿 TPEE 的制备与性能[J].工程塑料应用,2025,53(8):165-170.

CHEN Zhen, LI Sen, ZHANG Zhifeng, et al. Preparation and properties of high moisture permeability TPEE without pores[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 165-170.

透湿材料^[1]是一类能够让水蒸气通过但阻止液态水渗透的材料,被广泛应用于服装、医疗、户外用品等领域^[2]。根据透湿机理,透湿材料主要分为微孔透湿材料和无孔透湿材料两大类。微孔透湿材料通过材料表面的微孔结构实现透湿,微孔的直径大于气态水分子而小于液态水分子,允许水蒸气通过但阻挡液态水。常见材料有聚四氟乙烯(PTFE)薄膜和聚乙烯(PE)薄膜。无孔透湿材料是一类通过化学结构或特殊工艺实现透湿功能的材料,不依赖物理孔隙。它们通过分子链的亲水基团或化学改性,使水分子能够从高浓度侧传递到低浓度侧,从而实现透湿^[3]。常见的无孔透湿材料有:聚氨酯薄膜,广泛用于防水透湿服装、鞋类、帐篷等户外用品,透湿性好、柔软、耐水压高;热塑性聚氨酯薄膜,用于防水透湿服装、鞋材、医疗用品等,特点是高弹性、耐磨、透湿性好;亲水性聚醚嵌段酰胺薄膜,由刚性酰胺段和柔性聚醚段组成,通过分子链运动形成动态透湿通道,主要用于运动服饰、医疗用品等,特点是强度高、透湿性好、耐化学腐蚀。热塑性聚酯弹性体(TPEE)作为一种具有橡胶的弹性以及塑料的加工性的材料^[4],其通过化学结构实现透湿^[5],兼具弹性、耐化学性和较高的力学性能,广泛应用于服装、医疗、工业和汽车领域。尽管成本较高且加工复杂,但TPEE具有的优异性能使其在高要求应用中具有重要地位。未来,随着改性和加工技术的进步,TPEE的应用前景将更加广阔^[6-8]。

周晓东等^[9]研究表明,非多孔薄膜的透湿机制依赖于材料中特定的亲水分子链或基团,能够将皮肤表面产生的水蒸气从高浓度区域通过“吸附—迁移—释放”的步骤传递至低浓度区域,实现水蒸气的有效疏导。同时,该薄膜的阻水性能则来自其完整无缺的结构特性以及较高的表面张力作用。无孔透气材料凭借其出色的特性被广泛应用于多个领域。周宇^[10]创新性地将该技术运用于专业防护服装领域,成功开发出适用于消防装备的阻水透气复合薄膜。实验数据显示,这种新型材料的透气性能达到 $3\,515.9\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ 。研究还采用叠层工艺制造出兼具防水和透气功能的新型织物,并从理论上阐释了这种阻水透气织物对水蒸气的防护作用机制,目前采用常规TPEE所制备的普通TPEE薄膜,水蒸气透过率通常为 $3\,000\sim 5\,000\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ (美标),通过添加辛基酚聚氧乙烯醚、炔二醇乙氧基化合物等

亲水剂进行共混改性可显著提升水蒸气透过率,大约能提升至 $8\,000\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ (美标)。笔者在现有无孔透气材料研究基础上,开发出一种具有高水蒸气透过率和亲水结构的TPEE材料,其水蒸气透过率可跃升至 $11\,300\text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{ h})$ 。同时,笔者突破传统工艺,在满足高水蒸气透过率的同时,在聚合阶段添加了耐老化助剂(季戊四醇酯),使材料不但具有良好的耐老化性能,也具备优异的力学性能,为无孔透湿TPEE性能优化提供了新思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

1,4-丁二醇、聚四氢呋喃二醇、钛酸四丁酯、磷酸三乙酯、丙三醇:工业级,新疆蓝山屯河科技股份有限公司;

对苯二甲酸:工业级,新疆中泰(集团)有限责任公司。

1.2 主要仪器及设备

聚合反应釜:20KCF-1.6 29 L,烟台曙光精密仪器厂;

鼓风干燥箱:DHG-9423A,上海精宏实验设备有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:MFI-1221,承德市金建检测仪器有限公司;

塑料注射成型机:MA1200/400G3,海天塑机集团有限公司;

硬度仪:HT-6510,广州兰泰仪器有限公司;

万能拉伸试验机:UTM-1434,承德市金建检测仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:FTIR-850,天津港东科技股份有限公司;

热重(TG)分析仪:TGA-4000,铂金埃尔默公司;

桌面小型精密挤出流延机:FDSI-25/22,普同实验公司;

吹膜机:SJ-A55,深圳市盛联盛机械有限公司;

差示扫描量热分析(DSC)仪:DSC 3,梅特勒上海仪器有限公司;

水蒸气透过率测试仪:W3/031,济南兰光机电技术有限公司。

1.3 试样制备

首先将最终合成产物的质量设定为10 kg,其中硬段聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)质量分数为55%(常规TPEE)和45%[高透湿TPEE(GTS TPEE)],软段聚

醚(聚四氢呋喃二醇)的质量分数分别为45%(常规TPEE)和55%(GTS TPEE),钛酸四丁酯作为催化剂加入量为理论产量的0.05%~0.1%,交联剂(丙三醇)加入量为理论产量的0.03%~0.06%,此外对于GTS TPEE,在常规TPEE催化剂的基础上加入了热稳定剂来提升其耐老化性能。

反应分为三个阶段:打浆阶段、酯化阶段和缩聚阶段。打浆阶段需要在一定温度条件下(50℃左右)让反应釜中原料充分混合,为酯化阶段做好前期准备。酯化阶段温度为230℃,压力为80 kPa,此外需严格控制酯化率,根据酯化羧基的大小来判定酯化率(聚醚的加入方式不同,酯化羧基有不同的要求)。聚醚的加入有两种方式,一种是在打浆阶段加入,另一种是在缩聚阶段加入,本实验两种TPEE合成过程均是在缩聚阶段加入聚醚。若在打浆阶段加入软段聚醚,则酯化羧基含量<300 mol/t时,视为酯化率达标;在缩聚阶段加入软段聚醚时,酯化羧基含量<100 mol/t,视为酯化率达标。酯化阶段完成后立即加入缩聚催化剂,进入预缩聚阶段,缓慢降低真空值,最终真空值降至150 Pa以内,缩聚温度为235℃。在高真空环境下进行缩聚,通过观察搅拌桨扭矩变化来判定聚合物黏度,最终产品MFR需控制在20 g/10 min (230℃, 2 160 g),便于后期吹膜和流延。

将反应釜合成产物进行干燥(80℃, 8 h),测试水分含量<0.05%,水分含量达标后便可进行吹膜。吹膜和流延时,进料口通冷却水降温,一段温度200℃左右,梯度升温,模头温度设置为210℃左右,模头温度过高不利于成膜。通过控制吹胀比以及进料速度来控制膜的厚度,最终膜厚控制在15~25 μm。

常规TPEE与GTS TPEE性能的差异本质上源于其软段含量的不同配比设计。GTS TPEE通过显著增加软段比例来扩大分子链自由体积,从而形成更畅通的水蒸气传输通道,这使得材料水蒸气透过率获得明显提升。然而这种分子结构优化也带来了耐老化性能下降的问题,为此需要在合成过程中引入复合型抗老化体系。在本材料开发过程中,精准地调控了软段含量和最优配比,搭配耐老化助剂(季戊四醇酯)来提升产品的耐老化性能,以满足多种情况下的使用要求。

1.4 测试与表征

(1) FTIR 表征:采用FTIR仪检测产品的红外吸

收,扫描范围为500~4 000 cm⁻¹。

(2) TG 测试:使用TG分析仪进行TG测试,取5 mg左右样品放入仪器内,设置氮气流速22 mL/min,以16℃/min升温速率升至750℃。

(3) DSC 测试:采用DSC仪表征无孔透湿TPEE的热性能。取6~8 mg样品放入铝制坩埚中,在氮气流条件下,先以12℃/min的速率从室温缓慢升温至290℃,等温5 min以消除热历史;随后以12℃/min降温至60℃,最后以12℃/min升温至290℃。

(4) 硬度测试:将注塑好的试样放置24 h,然后将试样放在硬度仪水平平面上,握住硬度计把手,使其压针准直扎入试样,15 s后读出硬度示数,测试6组,取平均值。

(5) 力学性能测试:使用万能拉伸试验机,在25℃的条件下,根据ASTM-D638,以50 mm/min的拉伸速度测试试样的测量拉伸性能。测试前所有试样均在室温的条件下保存至少24 h。每个样品至少测试5个试样,测试结果为所有测试结果的平均值。

(6) MFR 测试:取10 g左右样品,在230℃, 2 160 g的条件下进行测试,测试间隔时间为40 s,切取6次,试样冷却后,将6次结果求平均值,再将平均值乘以15,即为最终MFR。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

图1为GTS TPEE与常规TPEE的FTIR谱图。如图1所示,GTS TPEE与常规TPEE两个谱图中吸收峰位置基本相同,说明两者所含官能团种类相同,不同的是吸收峰的峰值即官能团的含量,此结果与配方中各物料占比规律相符。两种TPEE图中的主要吸收峰有三个,以常规TPEE为例,分别为

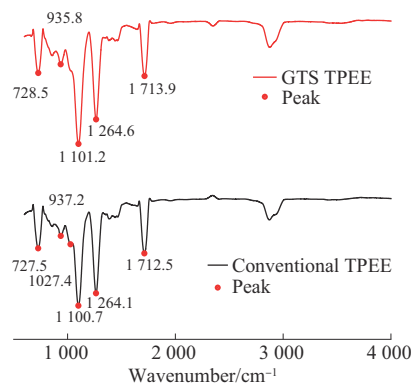


图1 GTS TPEE与常规TPEE的FTIR谱图

Fig. 1 FTIR spectra of GTS TPEE and conventional TPEE

$1\,100.7\text{ cm}^{-1}$ (对应醚基 $\text{R}-\text{O}-\text{R}'$ 的振动峰)、 $1\,264.1\text{ cm}^{-1}$ (对应酯基 $\text{R}-\text{COO}-\text{R}'$ 的振动峰)、 $1\,712.5\text{ cm}^{-1}$ (对应羧酸 $\text{C}=\text{O}$ 的振动峰),以上三种基团均为亲水性基团,含量越高则亲水性越强,由此可以看出,GTS TPEE 相较于常规 TPEE 水蒸气透过率高的原因是亲水性基团较多。

2.2 TG 分析

图2为GTS TPEE与常规TPEE的TG曲线对比图。通过TG分析可知,两种材料的TG曲线均呈现单一的热失重台阶,这表明两种样品均具有较高的纯度,未检测到明显的杂质或副产物。从热分解温度来看,常规TPEE的起始分解温度(T_{onset})和最大分解温度(T_{max})均显著低于GTS TPEE,而两者的热失重行为在其他温度区间基本一致。这一现象说明GTS TPEE具有更优异的热稳定性。通过材料配方分析可知,这种热稳定性的提升主要归因于GTS TPEE在聚合过程中添加了特定的耐老化助剂,这些添加剂能够有效抑制高分子链的热降解过程,从而提高材料的热稳定性。而常规TPEE中并未添加此耐老化助剂,所以GTS TPEE的热稳定性优于常规TPEE。

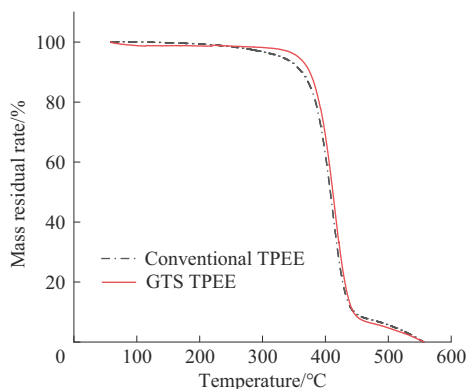


图2 GTS TPEE与常规TPEE的TG曲线

Fig. 2 TG curves of GTS TPEE and conventional TPEE

2.3 DSC 分析

图3和表1分别为常规TPEE和GTS TPEE的DSC曲线及热性能测试数据。由图3可见,常规TPEE和GTS TPEE两组都出现了两个熔融峰,分析原因可能为材料内部结晶区存在两种晶型,所以导致产生两个熔融峰。此外由表1数据可知,GTS TPEE的熔点为 $207.83\text{ }^{\circ}\text{C}$,常规TPEE的熔点为 $204.42\text{ }^{\circ}\text{C}$,熔点相差很小。此外,GTS TPEE的总吸热量为 169.34 MJ ,常规TPEE的总吸热量为 122.68 MJ 。一般来说熔融焓较高的材料通常具有更强的

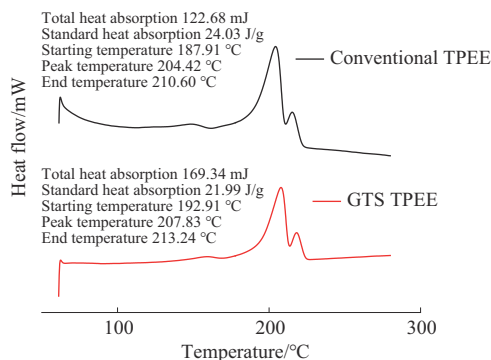


图3 常规TPEE和GTS TPEE的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of conventional TPEE and GTS TPEE

表1 常规TPEE和GTS TPEE的热性能测试数据

Tab. 1 Thermal performance data of conventional TPEE and GTS TPEE

Items	Conventional TPEE	GTS TPEE
$T_{\text{onset}}/^{\circ}\text{C}$	181.70	192.91
$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	410.2	416.5
$T_g/^{\circ}\text{C}$	-70.4	-79.8
$T_m/^{\circ}\text{C}$	204.42	207.83
Total heat absorption/MJ	122.68	169.34

Notes: T_{onset} is initial decomposition temperature; T_{max} is maximum decomposition temperature; T_g is glass transition temperature; T_m is melting point.

分子间作用力,意味着热稳定性较好,结合TG分析结果,加入了耐老化助剂(季戊四醇酯)的GTS TPEE的热稳定性较常规TPEE更好,这意味着其拥有更加广泛的应用场景。

2.4 硬度测试结果分析

图4为GTS TPEE与常规TPEE的硬度测试结果。由图4可知,常规TPEE硬度为40.2,而GTS TPEE硬度为35.6,测试结果与1.3样品制备中的软段占比相符合。一般来说,TPEE软段含量越高,硬度越低。此外软段含量高同时醚键(亲水基团)含量也会增加,导致材料水蒸气透过能力增强。综上,

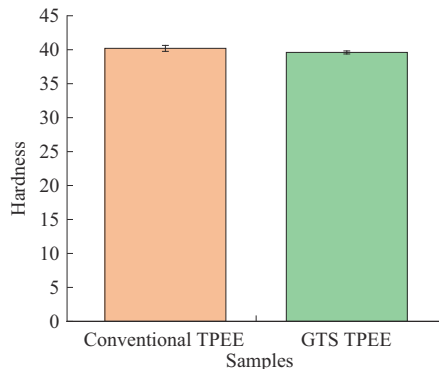


图4 GTS TPEE与常规TPEE的硬度测试结果

Fig. 4 Hardness test results of GTS TPEE and conventional TPEE

软段占比与材料硬度有直接对应关系,通过硬度测试可以大概估算出TPEE材料软硬段占比,评价合成出的材料是否符合预期目标。

2.5 力学性能测试结果分析

图5为GTS TPEE与常规TPEE的拉伸强度和断裂伸长率测试结果。由图5可知,常规TPEE的拉伸强度为22.1 MPa, GTS TPEE的拉伸强度为20.5 MPa, 低于常规TPEE。常规TPEE的断裂伸长率为957.6%, GTS TPEE的断裂伸长率为1 079.1%, 高于常规TPEE。因为GTS TPEE的软段含量较高, 所以其断裂伸长率较高, 导致其拉伸强度有所下降。

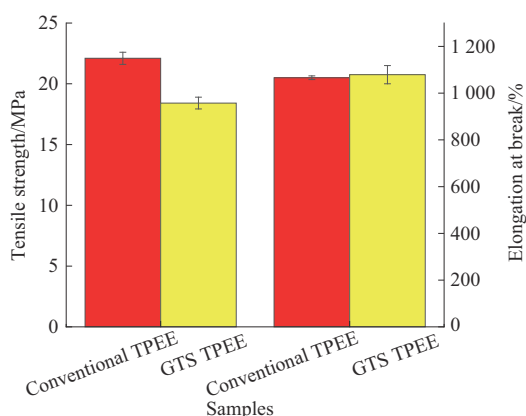


图5 GTS TPEE与常规TPEE的拉伸强度和断裂伸长率

Fig. 5 Tensile strength and elongation at break of GTS TPEE and conventional TPEE

2.6 MFR测试结果分析

表2为GTS TPEE与常规TPEE的MFR测试结果。由表2可知, 两者的MFR均在20 g/10min左右, 对比过程可以排除MFR变化对测试结果的影响。且MFR为20 g/10min左右便于吹膜和流延, 为后期测试提供条件。

表2 GTS TPEE与常规TPEE的MFR测试结果

Tab. 2 MFR test results of GTS TPEE and conventional TPEE

Sample number	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	
	Conventional TPEE	GTS TPEE
1 [#]	19.5	20.0
2 [#]	20.1	20.5
3 [#]	19.4	20.8
4 [#]	19.5	19.9
5 [#]	19.8	20.2
6 [#]	20.5	20.2
Mean	19.8	20.2

2.7 水蒸气透过率测试结果分析

目前测试水蒸气透过率的方法有很多, 较为常见的就是美标和日标两种测试方法, 国标基本与美标相同, 日标与美标有一定区别^[11]。最常用的方法

的测试标准为美标ASTM E96 (倒杯法)。

另一种测试标准为日标JISL-1099B1, B2 (倒杯法), 日标测试出的水汽透过率结果较高^[12-13], 日标方法对于透湿膜厂家来说更加受欢迎。主要原因是日标测试结果数值较大, 往往是美标测试结果的10倍以上, 受到透湿膜使用厂家的欢迎(便于宣传)。但是对于研发单位主要还是使用美标方法进行测试, 主要原因是美标的测试精度高、误差小, 便于对比分析。笔者分别采用两种方法(美标和日标)对产品水蒸气透过率进行检测, 以此达到更加直观的效果。

表3和表4分别为GTS TPEE与常规TPEE吹膜后在日标和美标下测试的水蒸气透过率对比。由表3和表4可见, 通过将吹膜后的常规TPEE与GTS TPEE分别进行日标水蒸气透过率检测和美标水蒸气透过率检测可知, 不管是何种方法, GTS TPEE的水蒸气透过率比常规TPEE的高出很多^[14-15]。主要是因为常规TPEE中亲水性基团的数量比GTS TPEE的要少, 所以GTS TPEE的水蒸气透过率较高^[16-18]。

表3 GTS TPEE与常规TPEE吹膜后水蒸气透过率对比(日标)

Tab. 3 Comparison of water vapor transmittance between GTS TPEE and conventional TPEE film blowing (Japan standard)

Thickness/ μm	Transmittance/[g·(m ² ·24 h) ⁻¹]	
	Conventional TPEE	GTS TPEE
18	87 440	172 300
21	70 544	160 886
22	65 637	155 000

表4 GTS TPEE与常规TPEE吹膜后水蒸气透过率对比(美标)

Tab. 4 Comparison of water vapor transmittance between GTS TPEE and conventional TPEE film blowing (US standard)

Thickness/ μm	Transmittance/[g·(m ² ·24 h) ⁻¹]	
	Conventional TPEE	GTS TPEE
15	9 400	11 400
18	9 266	11 300
21	9 015	11 166

3 结论

(1) GTS TPEE的水蒸气透过率在日标下达到170 000 g/(m²·24 h), 美标下达到11 000 g/(m²·24 h); 通过调整分子结构, 可进一步优化GTS TPEE的透湿性能, 以满足不同应用场景的需求。

(2) 为提升薄膜综合性能, 在材料聚合过程中引入特定热稳定以显著增强耐候性, 可在不影响基材特性的前提下实现薄膜性能的定向优化。

(3) 与常规TPEE相比, GTS TPEE的拉伸强度有

所下降,断裂伸长率有所提升,这与材料本身软硬段占比有关。GTS TPEE软段含量高,所以拉伸强度降低,断裂伸长率提升。总的来说力学性能相差不大,能满足正常情况下的使用要求。

参考文献

- [1] 沈海平.防水透湿功能纺织面料的关键技术与性能分析[J].中国服饰,2025(2):75-76.
SHEN Haiping. Research on key technologies and performance analysis of waterproof and moisture permeable functional textile fabrics[J]. China Fashion, 2025(2):75-76.
- [2] 王新力.防水透湿户外运动产品及未来发展趋势[J].纺织导报,2024(4):68-72.
WANG Xinli. Waterproof and moisture permeable outdoor sports products and future development trends[J]. China Textile Leader, 2024(4):68-72.
- [3] 张慢乐,胡进,刘林,等.浅析防水透湿面料[J].中国纤检,2022(6):109-111.
ZHANG ManLe, HU Jin, LIU Lin, et al. Analysis on waterproof and moisture permeable fabric[J]. China Fiber Inspection, 2022(6):109-111.
- [4] 林裕卫,蔡朝辉,吴耀根. TPEE在防水透气材料中的应用及其特性[J].广州化工,2012,40(20):35-37.
LIN Yuwei, CAI Zhaohui, WU Yaogen. Application and specification of TPEE in the waterproof and breathable[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2012, 40(20):35-37.
- [5] 吴华志.热塑性聚酯弹性体TPEE的热性能研究[J].合成技术及应用,2024,39(3):43-48.
WU Huazhi. Study on thermal properties of thermoplastic polyester elastomer TPEE[J]. Synthetic Technology & Application, 2024, 39(3):43-48.
- [6] 金玉顺,伍一波,刘若凡,等.热塑性弹性体的制备与改性研究进展[J].弹性体,2023,33(6):83-91.
JIN Yushun, WU Yibo, LIU Ruofan, et al. Research progress in preparation and modification of thermoplastic elastomers[J]. China Elastomerics, 2023, 33(6):83-91.
- [7] 文敬滨,龚光碧,冯裕智,等.热塑性弹性体研究进展[J].合成树脂及塑料,2023,40(5):76-82,86.
WEN Jingbin, GONG Guangbi, FENG Yuzhi, et al. Research progress on TPE[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2023, 40(5):76-82, 86.
- [8] 路启超.生物降解热塑性弹性体的嵌段聚合与性能研究[D].青岛:青岛科技大学,2022.
LU Qichao. Block polymerization and performance of biodegradable thermoplastic elastomers[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2022.
- [9] 周晓东,朱平,王炳.防水透湿织物的设计机理与应用[J].染整技术,2006,28(9):1-4.
ZHOU Xiaodong, ZHU Ping, WANG Bing. The applications and design mechanism of waterproof and moisture permeable fabric[J]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2006, 28(9):1-4.
- [10] 周宇.消防服用防水透湿复合膜的制备及性能研究[D].郑州:中原工学院,2014.
ZHOU Yu. Study of fire protection materials coated with waterproof and moisture-permeable composite film[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2014.
- [11] 高强,杨丹,杨永强,等.有机/无机/有机结构的封装薄膜水汽透过率研究[J].光电子激光,2014,25(9):1 721-1 726.
GAO Qiang, YANG Dan, YANG Yongqiang, et al. Study of the water vapor transmission rate for the organic/inorganic/organic hybrid barrier film[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(9):1 721-1 726.
- [12] 姚鑫.热塑性聚酯弹性体复合材料的制备及性能研究[D].扬州:扬州大学,2016.
YAO Xin Preparation and performance study of thermoplastic polyester elastomer composites[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [13] 高思航.热塑性聚酯弹性体PBT-PTMG及一种耐油耐低温非结晶性的生物基工程弹性体(BEE)的合成制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2015.
GAO Sihang. Synthesis, preparation and performance study of thermoplastic polyester elastomer pbt-ptmg and a bio-based engineering elastomer (BEE) with oil resistance and low temperature resistance characteristics[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [14] LI H X, WANG J, LIAO M D, et al. Low melting point thermoplastic polyether ester elastomer modified with adipic acid[J]. Materials Letters, 2025, 384. DOI:10.1016/j.matlet.2025.138092.
- [15] GU Z Q, ZHAO B Y, ZHANG L, et al. Supercritical carbon dioxide foamed thermoplastic polyester elastomer with poly(lactic acid) blending: Shrinkage reduction and expansion ratio improvement[J]. Colloid and Polymer Science, 2025, 303(1):67-80.
- [16] 陆志鹏,韩顺涛,劳志超,等.热塑性弹性体合成与改性的研究进展[J].橡塑技术与装备,2024,50(9):4-9.
LU Zhipeng, HAN Shuntao, LAO Zhichao, et al. Research progress on synthesis and modification of thermoplastic elastomers[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2024, 50(9): 4-9.
- [17] 张梦茹,王灿,肖汪洋,等.聚醚酯弹性纤维的制备及其结构与性能[J].纺织学报,2024,45(8):81-88.
ZHANG Mengru, WANG Can, XIAO Wangyang, et al. Preparation of polyether ester elastic fiber and its structure and properties [J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(8):81-88.
- [18] 王梓冲,吴亮,朱丽莎,等.高韧性PGA/TPEE共混物的制备及性能[J].工程塑料应用,2024,52(5):35-42.
WANG Zichong, WU Liang, ZHU Lisha, et al. Preparation and properties of PGA/TPEE blends with enhanced toughness[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5):35-42.