

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.11.006

云母粉改性高密度聚乙烯的汽油阻隔性

梁林周¹,李春松²,刘苏芹²,洪王胜²,何杰²,赵红玉²,扈广法³

[1. 陕西延长石油工贸有限公司黄陵石化制品厂, 陕西延安 727300; 2. 余姚中国塑料城塑料研究院有限公司, 浙江宁波 315400; 3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司, 西安 710054]

摘要:以片状云母粉为阻隔改性剂,与高密度聚乙烯(PE-HD)熔融共混,以改善其对汽油的阻隔性,考察云母粉形貌、含量等因素对PE-HD/云母粉复合材料阻隔性、熔体流动性以及力学性能的影响。结果表明,云母粉可显著提高复合材料对汽油的阻隔性,但熔体流动速率(MFR)与断裂伸长率降幅明显,高径厚比的云母粉对复合材料的汽油阻隔性提升更为显著,但径厚比过大不利于阻隔性的进一步提升,并会导致材料MFR和断裂伸长率进一步下降;当云母粉含量开始增加时,复合材料的汽油阻隔性明显提升,拉伸强度与缺口冲击强度上升,而MFR和断裂伸长率下降,当裂纹发展方向垂直于云母片面积方向时,缺口冲击强度提高更为显著;随着云母粉含量继续增加,复合材料的汽油阻隔性趋于稳定,拉伸强度与缺口冲击强度却明显下降。当径厚比为180的云母粉质量分数为30%时,复合材料具有最佳的综合性能,其汽油浸泡后的拉伸强度保持率显著高于纯PE-HD。

关键词:高密度聚乙烯;阻隔;片状;云母粉;径厚比;熔体流动性;力学性能

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)11-0030-05

Gasoline Barrier Properties of Mica Powder Modified High-Density Polyethylene

Liang Linzhou¹, Li Chunsong², Liu Suqin², Hong Wangsheng², He Jie², Zhao Hongyu², Hu Guangfa³

[1. Huangling Petrochemical Product Factory, Shaanxi Yanchang Petroleum Industrial and Trade Co. Ltd., Yanan 727300, China; 2. Yuyao Plastics City of China Research Institute, Ningbo 315400, China; 3. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd., Xi'an 710054, China]

Abstract: Mica powder with the micro morphology of sheet was adopted as barrier modifier and blended with high density polyethylene (PE-HD) through melting extrusion for improving the gasoline barrier properties of PE-HD. The effects of morphology and content of the mica powder on the barrier properties, melt fluidity and mechanical properties of the PE-HD/mica powder composites were studied. The results show that the mica powder can improve the gasoline barrier properties of the composites significantly, but the melt flow rate (MFR) and elongation at break decrease obviously, the gasoline barrier properties are improved more significantly when the diameter-thickness ratio of the mica powder is higher, but if the diameter-thickness ratio is too high, the barrier properties can not be improved further, MFR and elongation at break also decrease further. When content of the mica powder begins to rise, the gasoline barrier properties of the composites are improved remarkably, the tensile and notched impact strength are increased, MFR and elongation at break are decreased, when the direction of crack growth is perpendicular to the area direction of mica sheet, the notched impact strength is improved more obviously. When content of the mica powder continue to rise, the gasoline barrier properties tend to be stable, the tensile and notched impact strength are decreased obviously. When the mass fraction of mica powder with 180 of diameter-thickness ratio is 30%, the composite has best comprehensive properties and the tensile strength retention rate after gasoline soaking is more higher than that of pure PE-HD.

Keywords: high density polyethylene; barrier; sheet; mica powder; diameter-thickness ratio; melt fluidity; mechanical property

高密度聚乙烯(PE-HD)具有较好的疏水性,可在一定程度上隔绝水汽渗透,是一种应用范围极广的包装材料。但其气体和油脂的渗透率较高,通常采用多层共挤出^[1]、涂覆^[2-3]或层状掺混^[4-5]等技术手段将阻隔功能组分与其复合,达到阻隔气体或油脂的目的。层状掺混技术是指将阻隔功能物质以层

状结构交错分布于基体树脂中,实现介质通过路径延长,进而达到降低介质透过率,提高阻隔性的目的。影响其阻隔性的因素主要包括阻隔层数量、单层阻隔面积、取向以及交错分布情况等,其阻隔原理

联系人:李春松,副研究员,主要研究方向为聚合物改性

收稿日期:2017-09-08

如图 1 所示。其中阻隔功能层多为阻隔功能树脂,如乙烯醇共聚物、聚酰胺等^[6-8]。阻隔树脂需以片层状分散于基体树脂中,对加工工艺有较高的要求,而片状无机物在树脂加工环境下为稳定的片层结构,对加工工艺要求不高,故以片状无机物改性的层状掺混阻隔技术逐渐成为研究热点,其中以石墨烯、蒙脱土等片状无机物的层状掺混物阻隔性研究最为广泛^[9-12]。

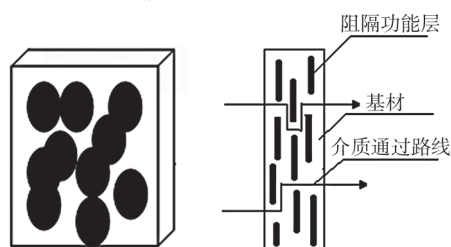


图 1 层状掺混复合结构阻隔功能原理示意图

绢云母为具有层片状结构的硅酸盐矿物质,以其制备的云母粉具有片层薄、径厚比大的特点,具有良好的阻湿、阻氧和防紫外特性,是涂料和化妆品行业常用的功能添加剂。云母粉用于塑料改性常见于填充增强、耐热、电性能等研究,未见阻隔性研究的相关报道。

笔者以微观形貌为片状的绢云母粉作为阻隔功能层,以 PE-HD 为基体树脂,通过粉体活化、挤出混配等工艺制备阻隔性 PE-HD 复合材料。考察云母粉形貌、含量等因素对 PE-HD 阻隔性、熔体流动性以及基本力学性能的影响。该材料的应用目标为加装汽油的小型动力油箱,故以 92[#] 汽油渗透率作为评价复合材料阻隔性的依据,为同类产品的应用与研究提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-HD: 8008, 陕西延长石油(集团)有限责任公司;

聚乙烯接枝马来酸酐(PE-g-MAH): 余姚中国塑料城塑料研究院有限公司;

乙烯基三(2-甲氧基乙氧基)硅烷偶联剂: A172, 广州守正化工科技有限公司;

云母粉: 灵寿县可达矿物粉体经贸有限公司。

1.2 主要设备及仪器

同向双螺杆挤出机: CTE-35 型, 南京科倍隆机械有限公司;

注塑机: YH30 型, 宁波海天机电有限公司;

熔体流动速率(MFR)测试仪: XNR-400AM 型, 承德科承试验机有限公司;

电子拉力试验机: MEGA1510 型, 兰光机电技术有限公司;

简支梁缺口冲击试验机: XJJ-50 型, 承德市世鹏检测设备有限公司;

透过率试验仪: W3 / 060 型, 兰光机电技术有限公司;

数码电子显微镜: B011 型, 深圳超眼科技有限公司。

1.3 试样制备

实验一共采用 3 种云母粉, 1[#] 云母粉为干法研磨绢云母粉, 粒度 50 目, 径厚比为 70; 2[#] 云母粉为湿法研磨绢云母粉, 粒度 150 目, 径厚比为 180; 3[#] 云母粉为湿法研磨绢云母粉, 粒度 500 目, 径厚比为 200。3 种云母粉在电子显微镜下的形貌照片如图 2 所示。

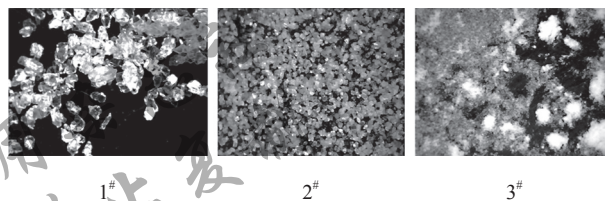


图 2 3 种云母粉在电子显微镜下的形貌照片

将 3 种云母粉分别和预配的浓度为 2% 的硅烷偶联剂乙醇溶液(偶联剂用量为云母质量的 5%) 在 80℃ 下高速混合 30 min, 冷却至室温, 加入 PE-HD, PE-g-MAH 及加工助剂(三者质量比为 100:8:0.5), 混合 2 min, 在同向双螺杆挤出机熔融挤出并造粒, 制得 4 种 PE-HD 复合材料, 将未加云母粉和分别加入 1[#], 2[#], 3[#] 云母粉的复合材料分别编号为 PE0, PE1, PE2 和 PE3。挤出温度 180~200℃, 螺杆转速 400 r/min, 为便于观察试样中云母形态, 配方中加入微量色素炭黑。

将粒子经注塑机注塑成标准试样, 注塑温度 220~230℃, 注射压力 5 MPa, 注射速度 35 mm/s, 模具温度 50℃。

1.4 测试与表征

MFR 按 GB/T 3682-2000 测试, 测试条件为 190℃, 5 kg;

拉伸性能按 GB/T 1040-2006 测试, 拉伸速率 50 mm/min, 1A 型试样;

简支梁缺口冲击强度按 GB/T 1043-2008 测试, 1 型试样, C 型缺口;

参考 GB/T 21529-2008 进行渗透实验, 介质 92[#] 汽油, 测试条件为温度 40℃, 相对湿度 50%, 试样尺寸 Ø80 mm×5 mm。

2 结论与讨论

2.1 云母粉形貌对 PE-HD 复合材料性能的影响

在 3 种云母粉的质量分数均为 30% 情况下,研究云母粉形貌对复合材料流动性、阻隔性以及力学性能的影响。

(1) 云母粉形貌对流动性的影响。

未加云母粉和分别加入 1[#], 2[#], 3[#] 云母粉的复合材料 MFR 如图 3 所示。由图 3 可以看出,添加了云母粉的复合材料的 MFR 均显著降低,且云母的粒度越小、径厚比越大,对试样流动性影响愈加明显,这与一般的矿物粉体填充热塑性塑料的 MFR 变化规律基本相同。其主要原因是随着粉体粒度降低,其比表面积增大(即径厚比增大),与基体树脂作用增强,影响了树脂分子链的流动性,从而使 MFR 出现明显下降。

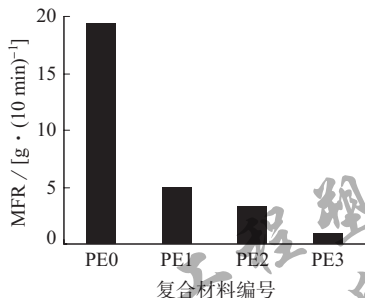


图 3 未加云母粉和分别加入 1[#], 2[#], 3[#] 云母粉的复合材料 MFR

(2) 云母粉形貌对汽油阻隔性的影响。

未加云母粉和分别加入 1[#], 2[#], 3[#] 云母粉的复合材料汽油渗透率如图 4 所示。由图 4 可以看出,添加云母粉的复合材料汽油渗透率显著降低,达到了预期的效果。云母粉在试样注塑过程中沿流动方向取向,形成交替阻隔微层。2[#] 和 3[#] 云母粉改性复合材料的汽油渗透率降低更为显著,这得益于高径厚比下数量更多的阻隔层的增幅作用。PE3 渗透率略高于 PE2 的原因可能是其流动性较差(MFR 仅为 0.67 g/10 min),造成了试样的内部缺陷或云母粉取向效果不佳。

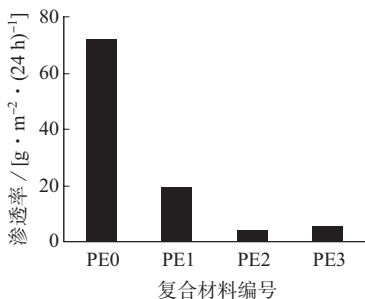


图 4 未加云母粉和分别加入 1[#], 2[#], 3[#] 云母粉的复合材料汽油渗透率

(3) 云母粉形貌对力学性能的影响。

未加云母粉和分别加入 1[#], 2[#], 3[#] 云母粉的复合材料力学性能如表 1 所示。由表 1 可以看出,添加云母粉后,复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度略有提高,断裂伸长率下降显著。与一般粉状矿物不同,云母粉具有一定的纵横比,经取向后沿取向方向对基体树脂有一定的补强作用,但这种作用会对断裂应变产生不利影响。缺口冲击强度提高的原因是片状结构干扰了裂纹的发展,提高了试样的断裂面积,进而提高了试样的断裂能量。

表 1 未加云母粉和分别加入 1[#], 2[#], 3[#] 云母粉的复合材料力学性能

复合材料编号	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %	缺口冲击强度 / (kJ · m⁻²)
PE0	28	551	7.1
PE1	32	153	7.8
PE2	35	127	8.2
PE3	36	87	9.4

2.2 云母含量对 PE-HD 复合材料性能的影响

当采用径厚比相对较高的 2[#] 和 3[#] 云母粉时,所制备的复合材料 PE2 和 PE3 的汽油渗透率相对较低,但与 PE3 相比,PE2 的流动性较好(MFR 为 3.3 g/10 min)、断裂伸长率较高,而拉伸强度和缺口冲击强度与 PE3 相差不大,故以 PE2 为研究对象,考察 2[#] 云母粉含量对复合材料流动性、阻隔性以及力学性能的影响。

(1) 云母粉含量对流动性的影响。

不同云母粉含量下复合材料的 MFR 如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着云母粉含量的提高,复合材料 MFR 呈快速降低趋势。当云母粉质量分数为 40% 时,复合材料的 MFR 低至 1 g/10 min 左右,当云母粉质量分数达到 50% 时, MFR 仅为 0.2 g/10 min。粉体含量过高时,基体树脂含量少、粉体间摩擦干扰等因素造成材料熔体流动差,将导致加工困难或内部缺陷的产生。

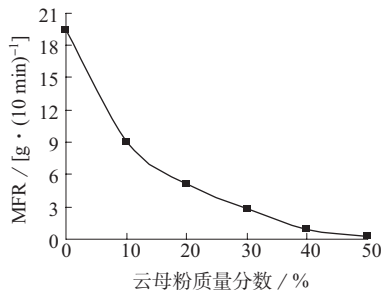


图 5 不同云母粉含量下复合材料的 MFR

(2) 云母粉含量对汽油阻隔性的影响。

不同云母粉含量下复合材料的汽油渗透率如

图6所示。由图6可以看出,随着云母粉含量的提高,复合材料的汽油渗透率迅速降低,当云母粉质量分数达到20%后,渗透率下降趋势趋缓,当云母粉质量分数达到30%左右时,渗透率达到最低值,而后随着云母粉含量增加,渗透率虽有略微增加的趋势,但基本变化不大。

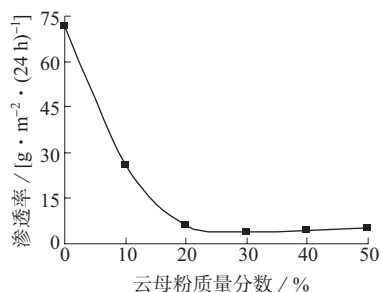
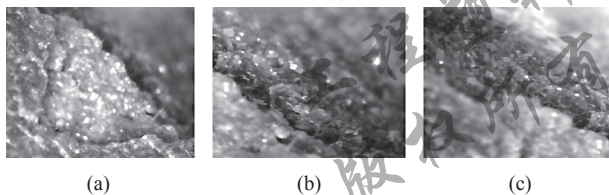


图6 不同云母粉含量下复合材料的汽油渗透率

理论上,随着阻隔片层数量的增加,材料的渗透率应该继续降低,但随着云母粉含量的提高,体系的流动性减弱,无法保证片层的良好取向。同时,如图7所示,随着云母粉含量提高,片状物间的摩擦加剧造成片层结构的破损或破坏,进而导致材料的阻隔性无法再得到进一步的提高。



云母粉质量分数: a—30%; b—40%; c—50%

图7 不同云母粉含量下复合材料冲击试样断面形貌

(3) 云母粉含量对力学性能的影响。

不同云母粉含量下复合材料的拉伸性能如图8所示。

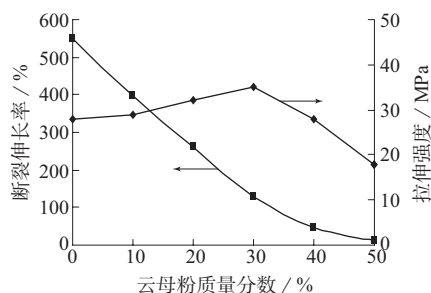


图8 不同云母粉含量下复合材料的拉伸性能

由图8可以看出,复合材料的断裂伸长率随着云母粉含量的增加呈逐步降低的趋势,当云母粉质量分数达到50%时,试样的断裂伸长率低至10%左右,完全丧失了聚乙烯材料的高断裂应变特性。拉伸强度随云母粉含量的增加呈先缓慢上升,后下降的趋势。云母粉质量分数为30%时,拉伸强度达

到最大值。与对阻隔性影响因素相似,高粉体含量时,体系的流动性减弱,云母片层取向分散效果差,云母粉间摩擦加剧,片层结构破坏,纵横比损失,缺陷增加等因素导致复合材料的力学性能降低。

为了研究不同云母粉含量下,云母的取向对复合材料冲击强度的影响,分别采用了正向缺口(冲击方向垂直于试样面积方向)和侧向缺口(冲击方向垂直于试样厚度方向)两种缺口形式,不同云母粉含量下复合材料的正向和侧向缺口冲击强度如图9所示。由图9可以看出,试样的缺口冲击强度随云母粉含量先增加后降低。侧向缺口冲击强度最大值出现在云母粉质量分数为20%时,达到9.6 kJ/m²,较未添加云母粉的提高35%。正向缺口冲击强度最大值出现在云母粉质量分数为30%时,达到17.2 kJ/m²,较未添加云母粉的提高109%,提升非常显著。可以看出,正向缺口冲击强度整体高于侧向缺口冲击强度,这是因为片状云母大部分沿试样面积方向取向,对正向缺口进行冲击时,裂纹的发展方向多垂直于片状云母面积方向,面积较大的片状云母能够更好地阻碍裂纹发展。

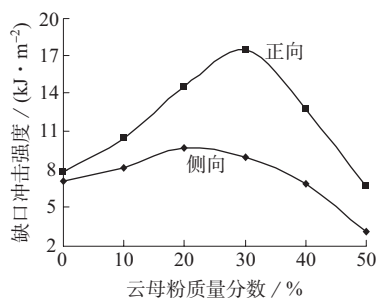


图9 不同云母粉含量下复合材料的正向和侧向缺口冲击强度

2.3 汽油浸泡实验

聚乙烯材料的拉伸强度通常在烷烃类溶剂浸泡后大幅降低,而断裂伸长率和冲击强度均有提高。所制备的PE-HD复合材料在实际应用中会与小分子烷烃长期接触。因此采用汽油浸泡实验验证实际使用环境的材料拉伸强度变化。

根据上述研究,确定复合材料中云母粉的最佳含量为30%,将相应的复合材料拉伸试样与纯PE-HD拉伸试样在92#汽油中,水浴加热55℃,考察不同浸泡时间下试样的拉伸强度,结果如图10所示。图10表明,纯PE-HD与云母粉质量分数为30%的复合材料试样拉伸强度在浸油后均有明显下降,其原因是汽油中小分子烷烃溶入聚乙烯链段间,降低了分子链间的相互作用。纯PE-HD试样在浸泡48 h后,拉伸强度下降趋缓,维持在14 MPa左

右,拉伸强度下降约 50%。复合材料试样在浸泡 96 h 后拉伸强度下降趋缓,维持在 25 MPa 左右,降幅约 30%,仍保持较高水平。这说明复合材料中的云母片状结构可有效阻碍小分子烷烃的侵入,保持体系内各组元间的作用强度。图 11 为两种试样在汽油渗透率测试后的表面形貌。由图 11 可以看出,纯 PE-HD 试样表面发生明显褶皱,而复合材料试样保持了良好的外观。

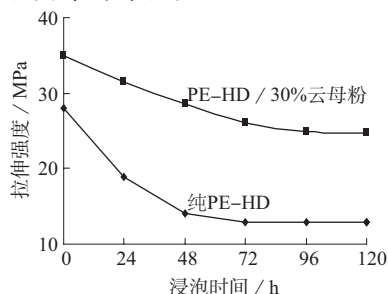


图 10 不同汽油浸泡时间下纯 PE-HD 及其复合材料的拉伸强度

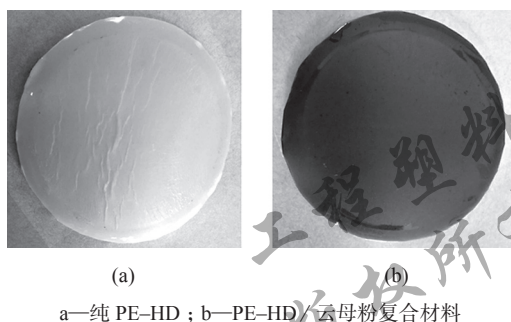


图 11 纯 PE-HD 及其复合材料汽油渗透率测试后的表面形貌

3 结论

(1) 云母粉可降低 PE-HD 的汽油渗透率,改善 PE-HD 的汽油阻隔性,但材料的 MFR 与断裂伸长率均显著下降。

(2) 高径厚比的云母粉能更为显著地提升复合材料的汽油阻隔性能,但径厚比过大反而不利于阻隔性的提升,同时会进一步降低复合材料的 MFR 及断裂伸长率。

(3) 随着云母粉含量的增加,复合材料的 MFR、断裂伸长率和汽油渗透率均下降,拉伸强度和缺口冲击强度均有所提升,但随着云母粉含量继续增加,复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度均明显下降,而汽油阻隔性基本保持稳定。

(4) 当径厚比为 180 的云母粉质量分数为 30% 时,复合材料具有最佳的汽油阻隔性,汽油浸泡后的拉伸强度保持率显著高于纯 PE-HD,且拉伸强度和缺口冲击强度均有显著提高,当裂纹发展方向垂直于云母片面积方向时,缺口冲击强度提高更为显著。

参考文献

- [1] 汪若冰,冯乙巳. 五层共挤阻隔薄膜的结构、性能、工艺及表征[J]. 安徽化工,2015,41(6):31-35.
Wang Ruobing, Feng Yisi. The structure, properties and processing technology of five co-extruded barrier film[J]. Anhui Chemical Industry, 2015, 41(6):31-35.
- [2] 蔡珀,周海平,赵鹏伟,等. 高阻隔液态牛奶包装膜[J]. 塑料工业, 2013, 41(8):119-123.
Cai Po, Zhou Haiping, Zhao Pengwei, et al. The high barrier liquid milk packaging film[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(8):119-123.
- [3] 桑利军,王敏,陈强,等. 聚乙烯薄膜表面沉积纳米 SiO₂ 涂层的阻隔性能[J]. 中国表面工程,2015,28(3):36-41.
Sang Lijun, Wang Min, Chen Qiang, et al. Barrier properties of SiO₂ coatings deposited on polyethylene films[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3):36-41.
- [4] 杨勇,历伟,杜丽君,等. 复合载体扩散/阻隔特性的调控与乙烯聚合反应器的强化[J]. 化学反应工程与工艺,2013,29(3):260-268.
Yang Yong, Li Wei, Du Lijun, et al. Control of diffusion / barrier effects of polymer-coated particles and the strengthening of ethylene polymerization reactor[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2013, 29(3):260-268.
- [5] 梁晓红,呼和,王羽,等. 乙烯-乙烯醇共聚物复合膜的力学、热学及阻隔性能研究[J]. 塑料科技,2015,43(6):21-24.
Liang Xiaohong, Hu He, Wang Yu, et al. Study on mechanical, thermal and barrier properties of EVOH composite films[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(6):21-24.
- [6] 蔡佩玲,栗慧君,李姜,等. PE-HD / (EVOH / PE-HD) 交替多层复合材料的结构及氧气阻隔性能研究[J]. 工程塑料应用,2015, 43(3):7-12.
Cai Peiling, Li Huijun, Li Jiang, et al. Structure and oxygen barrier properties of PE-HD / (EVOH / PE-HD) alternating multilayered composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(3):7-12.
- [7] 李长金,焦志伟,王乾,等. 微层 PP / (PP+EVOH) 复合材料的结构与阻隔性能[J]. 工程塑料应用,2013,41(10):83-86.
Li Changjin, Jiao Zhiwei, Wang Qian, et al. Structure and barrier property of PP / (PP+EVOH) microlayered composite[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(10):83-86.
- [8] 吕妍妍. 高韧性 PP / POE-g-MAH / EVOH 阻隔材料的制备、结构及性能研究[D]. 太原: 中北大学,2013.
Lyu Yanyan. Preparation, morphology and properties of PP / POE-g-MAH / EVOH barrier material with high toughness property[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [9] 吕夏燕,慈继豪. 聚乙烯醇 / 氧化石墨烯复合薄膜的制备及阻隔性能研究[J]. 现代商贸工业,2016,37(31):197-198.

显更高;在试验温度、加载频率一定的条件下,基于TDI的体系等效阻尼比随激励振幅增加先升高后降低,基于IPDI的体系随着激励振幅升高变化不大。3种体系的阻尼结构在试验温度范围内的等效阻尼比均在0.20以上,具有较宽的阻尼温域。综合多个因素考量,PU-3体系的阻尼性能最为优异。

参考文献

- [1] 倪楠楠,温月芳,贺德龙,等.结构-阻尼复合材料研究进展[J].材料工程,2015,43(6):90-101.
Ni Nannan, Wen Yuefang, He Delong, et al. Process on the research of structure-damping composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(6):90-101.
- [2] Melleta C, Le F, Poissonb F, et al. High speed train noise emission:Latest investigation of the aerodynamic / rolling noise contribution[J]. Noise & Vibration Worldwide, 2007, 293(3):535-546.
- [3] 吕平,盖盼盼,伯仲维,等.阻尼层厚度对结构阻尼性能的影响[J].噪声与振动控制,2013,33(2):101-104.
Lyu Ping, Gai Panpan, Bo Zhongwei, et al. Influence of damping layer's thickness on vibration damping performance of structures[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(2):101-104.
- [4] 何鑫,陈凯华,何筱珊.粘弹性约束阻尼结构的研究现状与应用[J].上海涂料,2014,52(11):29-31.
He Xin, Chen Kaihua, He Xiaoshan. Research status and application of viscoelastic constrained damping structure[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(11):29-31.
- [5] 周云.粘弹性阻尼减震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2006:12-13.
Zhou Yun. Structural design of viscoelastic damping structures[M]. Wuhan:Wuhan Technology University Press, 2006:12-13.
- [6] 吕平,高金岗,李晶,等.影响约束阻尼结构阻尼性能的因素[J].噪声与振动控制,2014,34(5):234-238.
Lyu Ping, Gao Jingang, Li Jing, et al. Impacting factors of damping performance of constraint damping structures[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(5):234-238.
- [7] 谭亮红,陈红,罗亿科,等.阻尼结构对复合结构阻尼性能的影响[J].橡胶工业,2014,61(2):84-88.
Tan Lianghong, Chen Hong, Luo Yike, et al. Effect of damping structure on damping property of composite structure[J]. Rubber Industry, 2014, 61(2):84-88.
- [8] 张晓蕾.聚氨酯阻尼材料的结构设计及其性能研究[D].天津:河北工业大学,2014:87.
Zhang Xiaolei. Study on structure design and properties for polyurethane damping materials[D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2014:87.
- [9] 盖盼盼.粘弹阻尼材料性能及其约束阻尼结构的动态性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2012:49-62.
Gai Panpan. Study on viscoelastic damping material and dynamic performance of constrained damping structure[D]. Qingdao:Qingdao Technology University, 2012:49-62.
- [10] 王焱.聚氨酯阻尼材料及其约束结构研究[D].成都:西南交通大学,2008:34-42.
Wang Yao. Investigation on polyurethane damping material and constrained damping structure[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2008, 34-42.
- [11] 王绍宸,郭艳宏.聚氨酯基约束阻尼复合材料的制备及性能研究[J].化学工程师,2017(2):1-3.
Wang Shaochen, Guo Yanhong. Preparation and properties of polyurethane-based damping composite material constraints[J]. Chemical Engineer, 2017(2):1-3.
- [12] 张静.改性聚氨酯粘弹阻尼材料及其约束阻尼结构的表征及老化研究[D].青岛:青岛理工大学,2011:31-38.
Zhang Jing. Characterization and aging studies on modified polyurethane viscoelastic damping material and its constrained damping structure[D]. Qingdao:Qingdao Technology University, 2011:31-38.
- [13] 高小茹.聚氨酯基约束阻尼复合材料的制备及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012:37-58.
Gao Xiaoru. Research on synthesis of polyurethane matrix constrained damping composites and their properties[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2012:37-58.
- [14] 王建华,罗陈雷,杨伟,等.聚氨酯阻尼材料研究进展[J].工程塑料应用,2002,30(10):51-53.
Wang Jianhua, Luo Chenlei, Yang Wei, et al. Advance in the research of polyurethane damping materials[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(10):51-53.
- [11] 吕夏燕.聚乙烯/蒙脱土复合材料的制备及阻隔性能研究[J].农村经济与科技,2016,27(22):276,278.
Lyu Xiayan. Preparation and barrier properties of polyethylene / montmorillonite composite[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2016, 27(22):276, 278.
- [12] 毛超英,黄亚江,李光宪,等.聚合物/层状纳米填料阻隔复合薄膜研究进展[J].中国塑料,2015,29(10):7-13.
Mao Chaoying, Huang Yajiang, Li Guangxian, et al. Review on the high barrier polymer films enhanced by nanoplatelets[J]. China Plastics, 2015, 29(10):7-13.

(上接第34页)

Lyu Xiayan, Ci Jihao. Preparation and barrier properties of PVA / graphene oxide composite film[J]. Modern Business Trade Industry, 2016, 37(31):197-198.

- [10] 张晓亮.功能化氧化石墨烯/UHMWPE复合薄膜的制备及气体阻隔性研究[D].西安:西安理工大学,2015.
Zhang Xiaoliang. Preparation and gas barrier property of functionalized graphene oxide / ultra-high molecular weight polyethylene composite film[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2015.