

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.004

无机粉体填充PBAT/PBS/PLA共混薄膜的制备与性能

肖湘莲¹, 雷雅芳¹, 游琳¹, 彭茂荣¹, 杨义浒², 周超³, 陈锐³, 张向南³, 黄建平¹

(1. 湖南工学院材料科学与工程学院, 湖南衡阳 421002; 2. 深圳光华伟业股份有限公司, 广东深圳 518057;

3. 孝感易生新材料有限公司, 湖北孝感 432100)

摘要: 将不同含量的聚丁二酸丁二酯(PBS)、碳酸钙(CaCO_3)/滑石粉(Talc)、聚乳酸(PLA)与聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)进行熔融共混改性, 研究各组分含量对PBAT/PBS/PLA共混材料加工性能、拉伸性能及其吹塑薄膜的拉伸性能、直角撕裂强度和热封强度的影响。采用熔体流动速率(MFR)仪、万能试验机、热封测试仪、差示扫描量热仪对PBAT共混薄膜的加工性能、力学性能和热封性能等进行测试。结合3因素3水平设计正交试验来优化试样配方, 并对试验结果进行了正交试验极差分析。结果表明, PBAT/PBS/PLA共混材料的MFR值均在2.6~4.3 g/10 min范围内, 薄膜吹塑成型加工稳定性良好。根据薄膜力学性能极差分析结果提出了最佳配方: PBAT含量为100质量份、PBS含量为10质量份、 CaCO_3 /Talc质量比为10/10和PLA含量为2质量份, 验证试验结果表明, 该配方制备的吹塑薄膜各项力学性能最高, 横向、纵向拉伸强度分别为23.2 MPa和27.3 MPa, 横向、纵向断裂伸长率分别为988%和1 137%, 横向、纵向直角撕裂强度分别为126.4 N/mm和121.2 N/mm, 热封强度为7.94 N/15 mm, 通过将热封温度从90 °C提高到95 °C, 热封强度提高到9.46 N/15 mm, 达到最高。

关键词: 聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯; 聚丁二酸丁二酯; 聚乳酸; 薄膜; 力学性能; 热封强度

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0021-06

Preparation and Properties of Inorganic Powder Filled PBAT/PBS/PLA Blend Films

Xiao Xianglian¹, Lei Yafang¹, You Lin¹, Peng Maorong¹, Yang Yihu², Zhou Chao³, Chen Rui³, Zhang Xiangnan³, Huang Jianping¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China; 2. Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd., Shenzhen 518057, China; 3. Xiaogan Esun New Material Co., Ltd., Xiaogan 432100, China)

Abstract: Poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) was modified by different weight content of poly (butylene succinate) (PBS), calcium carbonate (CaCO_3)/talcum powder (Talc) and polylactic acid (PLA) through melt-compounding, the effects of each compositions weight content on the processing and tensile properties of PBAT blends were investigated. The tensile properties, right-angle tear strength and heat-sealing strength of modified PBAT blown films were also studied. The processing performance, mechanical properties and heat-sealing strength of blown films were characterized by melt flow rate (MFR), universal testing machine, heat seal tester and differential scanning calorimetry. The three-factor and three-level design of orthogonal experiment was used to optimize the formulations, and the experimental results were analyzed by the orthogonal experiment range. The results show that the MFR of PBAT blends is in the range of 2.6-4.3 g/10 min, the processing stability is excellent during film-blowing. The optimal formulation for 10 phr PBS, 10 phr/10 phr CaCO_3 /Talc, and 2 phr PLA with respect to 100 phr PBAT is proposed basing on the range analysis of mechanical properties of PBAT blown films, the experimental results show that the film made from the optimal formulation has the highest mechanical properties, the transverse tensile strength, and longitudinal tensile strength, transverse elongation at break, longitudinal elongation at break, transverse right-angle tear strength, longitudinal right-angle tear strength are 23.2 MPa, 27.3 MPa, 988%, 1 137%, 126.4 N/mm and 121.2 N/mm, respectively. The heat-sealing strength is 7.94 N/15 mm, which is improved to the highest value of 9.46 N/15 mm by increasing the heat-sealing temperature from 90 °C to 95 °C.

Keywords: poly(butylene adipate-co-terephthalate); poly(butylene succinate); poly(lactic acid); film; mechanical property; heat-sealing strength

基金项目: 广东省企业科技特派员专项资助项目(GDKTP2021053300), 湖南省教育厅重点项目(21 A0569, 20 A137), 国家级大学生创新创业训练计划项目(202211528031), 湖南省应用特色学科开放基金(KFB22005), 湖南工学院校级重点自科项目(HY22025)

通信作者: 肖湘莲, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为生物降解材料和3D打印材料的改性加工

收稿日期: 2023-09-05

引用格式: 肖湘莲, 雷雅芳, 游琳, 等. 无机粉体填充PBAT/PBS/PLA共混薄膜的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 21-26.

Xiao Xianglian, Lei Yafang, You Lin, et al. Preparation and properties of inorganic powder filled PBAT/PBS/PLA blend films[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 21-26.

随着人们生产生活中大量消耗一次性包装袋,而传统聚乙烯塑料袋等包装制品回收困难,丢弃后难以降解,造成日益严重的“白色污染”。研制可生物降解包装材料已成为大势所趋^[1-2]。目前,聚乳酸(PLA)、聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)和聚丁二酸丁二酯(PBS)等生物降解材料发展迅速^[3-7]。其中,PBAT既具有脂肪族聚酯(PBA)的柔韧性和降解性,又具有芳香族聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)的耐热性和耐水性,力学性能与低密度聚乙烯类似,可以吹塑成型,在塑料包装薄膜、农用薄膜和一次性塑料袋等领域应用广泛^[8-11]。然而,PBAT薄膜直角撕裂强度不高,热封强度低,而且纯PBAT黏性较高,吹塑薄膜开口性不佳,自身熔体强度低,薄膜吹塑成型加工稳定性差,相对于传统聚乙烯成本较高,限制了其在包装领域的广泛应用^[8,12]。

PLA是一种生物基生物降解脂肪族聚酯,具有良好的加工性能和力学强度^[13]。PBS是由丁二酸和1,4-丁二醇缩聚而成的脂肪族聚酯,具有较高的强度和模量。将PBAT与PLA、PBS共混,有利于改善其力学性能^[14-15]。碳酸钙(CaCO_3)、滑石粉(Talc)具有资源丰富、成本低廉的优势,加入到PBAT中不仅可以降低材料成本,还可以起到增强增韧的效果,并能提高材料的熔体强度和薄膜开口性。Rocha等^[16]与李博等^[17]研究发现 CaCO_3 的加入改善了PBAT/PLA复合材料的界面结合强度,提高了复合材料薄膜的拉伸强度、断裂伸长率和拉伸弹性模量。马发行^[18]采用20质量份的超细 CaCO_3 填充改性PBAT/PLA复合材料获得优异的拉伸强度和抗撕裂性能。胡晨曦等^[19]研究发现Talc的加入也可改善PBAT与PLA的界面相容性,有利于提高复合材料的力学性能。孙静等^[20]通过添加Talc提高了PBAT的熔体强度和拉伸性能。

笔者将PBS、PLA、 CaCO_3 和Talc作为PBAT的改性剂,设计3因素3水平正交试验,采用熔融共混和吹塑成型方法制备PBAT/PBS/PLA共混薄膜,研究PBS、 CaCO_3 /Talc和PLA的含量对PBAT/PBS/PLA共混材料的熔体流动性能、拉伸性能及PBAT/PBS/PLA薄膜的拉伸性能、直角撕裂强度和热封强度的影响,通过极差分析,获取最佳配方,对PBAT/PBS/PLA薄膜性能进行优化。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBAT: TH801T, 熔体流动速率(MFR)为2.56 g/

10 min (190 °C, 2.16 kg), 新疆蓝山屯河化工股份有限公司;

PLA: 4032D, MFR为7.88 g/10 min (190 °C, 2.16 kg), 美国Nature Works公司;

PBS: A200, MFR为9.00 g/10 min (190 °C, 2.16 kg), 金发科技股份有限公司;

CaCO_3 : 2 μm , 北京印尼斯文有限公司;

Talc: 10 μm , 广西龙胜华美滑石开发有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机: HT30型, 南京橡胶机械厂有限公司;

微型注塑机: SZS-20型, 武汉瑞鸣实验仪器有限公司;

小型精密挤出吹膜机: FBSI-20/28型, 广州市普同实验分析仪器有限公司;

快速水分测定仪: WL-760Y型, 深圳市冠亚技术科技有限公司;

MFR测定仪: XNR-400型, 泰安安太检测设备有限公司;

微机控制电子万能试验机: CMT6104型, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

电子热封试验仪: GBB-F1型, 广州标际包装设备有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC 3型, 梅特勒托利多科技(中国)有限公司。

1.3 试样制备

选择PBS质量份数(A)、 CaCO_3 /Talc质量比(B)和PLA质量份数(C)3个因素为研究对象, 根据前期研究经验和文献调研, 以PBAT的含量为100质量份, PBS含量选择5, 10, 15质量份, 为了比较 CaCO_3 和Talc在共混材料中的改性效果, CaCO_3 /Talc质量比选择20/0, 10/10, 0/20, PLA含量选择2, 4, 8质量份, 设计3因素3水平的正交试验进行制样, 因素水平列于表1。

表1 因素水平表

水平	因素		
	A	B	C
1	5	20/0	2
2	10	10/10	4
3	15	0/20	8

将 CaCO_3 和Talc在105 °C下, PBS, PBAT, PLA在60 °C下烘干水分至0.3%以下。按表2的试验方案称取相应含量的PBS、 CaCO_3 /Talc、PLA, 与100质

量份的PBAT混合均匀,加入双螺杆挤出机中熔融共混造粒。双螺杆挤出机温度设置为165~185℃,主机转速设置为100 r/min。造完粒的粒料在60℃下烘干水分至0.3%以下。

表2 试验配方

试样编号	A	B	C
1 [#]	1	1	1
2 [#]	1	2	2
3 [#]	1	3	3
4 [#]	2	1	2
5 [#]	2	2	3
6 [#]	2	3	1
7 [#]	3	1	3
8 [#]	3	2	1
9 [#]	3	3	2

图1为PBAT/PBS/PLA共混材料试样及吹膜过程。将干燥完的粒料放入微型注塑机中注塑成哑铃型试样(图1a),注塑温度为175℃。通过吹膜机将上述干燥的粒料吹塑成型制备薄膜(图1b),吹膜机温度设置为160~180℃,螺杆转速为30 r/min,牵引辊转速1.5 m/min,薄膜厚度50 μm左右。

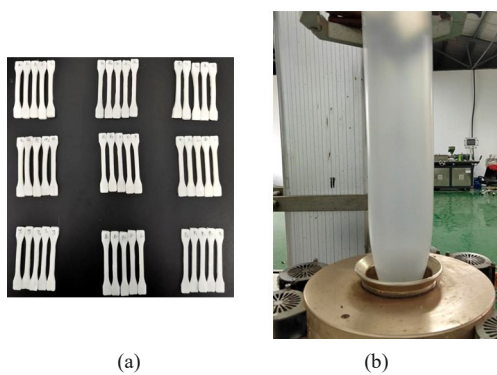


图1 PBAT/PBS/PLA共混材料试样及吹膜过程

1.4 性能测试与表征

MFR测试:使用MFR仪测定熔融共混挤出料的MFR。按照GB/T 3682.1-2018测试,测试条件为190℃和2.16 kg。

拉伸性能测试:采用万能试验机,注塑样条的拉伸性能按照GB/T 1040.2-2022测试,拉伸速度为200 mm/min;薄膜的拉伸性能按照GB/T 1040.3-2006测试,采用哑铃形薄膜试样,拉伸速度为100 mm/min。

薄膜的直角撕裂强度测试:采用万能试验机,按照QB/T 1130-1991测试,试验速度为200 mm/min。

薄膜的热封强度测试:采用电子热封试验仪,按照QB/T 2358-1998测试,测试条件为25℃,85%湿度,试验速度为300 mm/min。

熔融温度测试:采用DSC仪测试样品的熔融温度(T_m)。氮气流速50 mL/min,样品先以10℃/min的速率从25℃升温至230℃,恒温保持3 min;然后以10℃/min的速率降温至-60℃,恒温保持3 min;再次以10℃/min升温至230℃, T_m 在第二次升温曲线中获得。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

正交试验PBAT/PBS/PLA共混材料和薄膜性能检测结果列于表3。

2.2 极差分析

聚合物熔体强度对其加工性能有显著影响,当MFR值较低时,熔体流动性低,熔体强度高,有利于提高薄膜吹塑成型加工稳定性。PBAT/PBS/PLA共混材料的MFR极差分析结果见表4。结合表3和表4,对于PBAT/PBS/PLA共混材料的MFR,最佳配方为 $A_2B_1C_1$,即PBS为10质量份, CaCO_3 /Talc质量比为20/0,PLA为2质量份。影响因素A,B,C的极差分别是0.77,0.80,0.25,3个因素对MFR影响强弱顺序为 $B>A>C$ 。总体来看,9个试样的MFR均在2.6~4.3 g/10 min之间,薄膜吹塑成型加工性能均良好,膜泡稳定,各因素水平对薄膜成型效果影响较小。

PBAT/PBS/PLA共混材料的拉伸性能极差分析结果见表5。由表5可知,对于注塑样条的拉伸强度,最佳配方为 $A_3B_1C_2$,即PBS为15质量份, CaCO_3 /Talc质量比为20/0,PLA为4质量份,影响因素A,B,C的极差值分别是2.13,0.67,0.33,3个因素中对拉伸强度影响强弱顺序为 $A>B>C$;对于断裂伸长率,最佳配方为 $A_1B_1C_1$,即PBS为5质量份, CaCO_3 /Talc质量比为20/0,PLA为2质量份。影响因素A,B,C的极差值分别是88,75,43,3个因素中对断裂伸长率影响强弱顺序为 $A>B>C$ 。总体来看,高含量的PBS有助于提高复合材料的拉伸强度,但会降低其断裂伸长率;相对于Talc,添加 CaCO_3 对复合材料的拉伸强度和断裂伸长率更有利;PLA对拉伸性能的影响相对较小。

PBAT/PBS/PLA薄膜拉伸性能极差分析见表6。由表6可知,薄膜横向拉伸强度的最佳配方为 $A_2B_2C_2$,即PBS为10质量份, CaCO_3 /Talc质量比为

表3 PBAT/PBS/PLA共混材料及其薄膜的性能

试验编号	MFR/ [g·(10 min) ⁻¹]	试样拉伸 强度/MPa	试样断裂 伸长率/%	薄膜拉伸强度/MPa		薄膜断裂伸长率/%		薄膜直角撕裂强度/(N·mm ⁻¹)		薄膜热封强度/ [N·(15 mm) ⁻¹]
				横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	
1 [#]	2.73	20.6	809	18.9	21.2	774	804	113.5	116.2	4.85
2 [#]	3.52	20.4	730	19.2	21.2	869	837	92.0	119.7	4.98
3 [#]	3.73	19.7	727	16.5	18.3	893	473	100.5	117.2	5.43
4 [#]	2.67	21.9	743	21.3	22.1	714	939	114.3	112.6	5.65
5 [#]	3.17	21.7	732	22.5	22.7	807	1007	85.0	116.0	9.33
6 [#]	3.40	21.0	706	20.0	21.4	848	931	113.6	105.9	5.13
7 [#]	3.62	22.6	709	19.5	22.2	713	759	87.5	90.4	5.73
8 [#]	3.64	22.1	691	19.9	26.0	748	896	113.3	131.2	5.10
9 [#]	4.28	22.4	603	19.8	21.7	807	746	102.6	96.1	8.94

表4 PBAT/PBS/PLA共混材料MFR极差分析结果¹⁾

项目	A	B	C
k_1	3.33	3.01	3.26
k_2	3.08	3.44	3.49
k_3	3.85	3.80	3.51
R	0.77	0.80	0.25

注:1) k_1, k_2, k_3 分别表示某因素在3个水平下的性能均值;R为 k_i 中的最大值减去最小值。

表5 PBAT/PBS/PLA共混材料拉伸性能极差分析结果

性能	项目	A	B	C
拉伸强度	k_1	20.23	21.70	21.23
	k_2	21.53	21.40	21.57
	k_3	22.37	21.03	21.33
	R_1	2.13	0.67	0.33
断裂伸长率	k_1	755	754	735
	k_2	727	718	692
	k_3	668	679	723
	R_2	88	75	43

10/10, PLA为4质量份,影响因素A,B,C的极差值分别是3.07,1.77,0.60,3个因素中对横向拉伸强度影响由强到弱顺序为 $A>B>C$;薄膜纵向拉伸强度的最佳配方为 $A_3B_2C_1$,即PBS为15质量份, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比为10/10, PLA为2质量份,影响因素A,B,C的极差分别是3.07,2.83,1.80,3个因素中对纵向拉伸强度影响由强到弱的顺序为 $A>B>C$;横向断裂伸长率的最佳配方为 $A_1B_3C_3$,即PBS为5质量份, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比为0/20, PLA为8质量份,影响因素A,B,C的极差分别是89,116,14,3个因素中对横向断裂伸长率影响由强到弱顺序为 $B>A>C$;对纵向断裂伸长率来说,最佳配方为 $A_2B_2C_1$,即PBS含量为10质量份, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量为10/10, PLA含量为2质量份,影响因素A,B,C的极差分别是254,197,131,3个因素中对纵向断裂伸长率影响由强到弱的顺序为 $A>B>C$ 。

PBAT薄膜直角撕裂性能极差分析见表7。由表7可知,薄膜横向直角撕裂强度的最佳配方为

表6 PBAT/PBS/PLA薄膜拉伸性能极差分析结果

性能	项目	A	B	C
拉伸强度	横向	k_1	18.20	19.90
		k_2	21.27	20.53
		k_3	19.73	18.77
		R_1	3.07	1.77
	纵向	k_1	20.23	21.83
		k_2	22.07	23.30
		k_3	23.30	20.47
		R_2	3.07	2.83
断裂伸长率	横向	k_1	845	734
		k_2	790	808
		k_3	756	849
		R_3	89	116
	纵向	k_1	705	834
		k_2	959	913
		k_3	800	717
		R_4	254	197

$A_2B_3C_1$,即PBS为10质量份, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比0/20, PLA为2质量份,影响因素A,B,C的极差分别是3.2,8.8,22.5,3个因素中对横向直角撕裂强度影响由强到弱顺序为 $C>B>A$;薄膜纵向直角撕裂强度的最佳配方为 $A_1B_2C_1$,即PBS为5质量份, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比为10/10, PLA为2质量份,影响因素A,B,C的极差分别是11.8,15.9,9.9,3个因素中对纵向直角撕裂强度影响由强到弱的顺序为 $B>A>C$ 。

表7 PBAT/PBS/PLA薄膜直角撕裂性能极差分析结果

性能	项目	A	B	C
直角撕裂强度	横向	k_1	102.00	105.10
		k_2	104.30	96.77
		k_3	101.13	105.57
		R_1	3.17	8.80
	纵向	k_1	117.70	106.40
		k_2	111.50	122.30
		k_3	105.90	106.40
		R_2	11.80	15.90

PBAT/PBS/PLA薄膜热封强度极差分析见表8。由表8可知,薄膜热封强度的最佳配方为 $A_2B_3C_3$,即

PBS为10质量份, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比为0/20, PLA为8质量份, 影响因素 A, B, C 的极差分别是1.62, 1.09, 1.80, 3个因素中对薄膜热封强度影响由强到弱顺序为 $C>A>B$ 。其中, B_2 和 B_3 的 k 值相差不大, 选择 B_2 或 B_3 对热封性能影响较小。PLA含量高有利于提高薄膜的热封性能。

表8 PBAT/PBS/PLA共混薄膜热封强度极差分析结果

性能	项目	A	B	C
热封强度	k_1	5.09	5.41	5.03
	k_2	6.70	6.47	6.52
	k_3	6.59	6.50	6.83
	R	1.62	1.09	1.80

2.3 熔融温度分析

选取 B 因素均为2水平的 $2^\#(A_1B_2C_2)$ 、 $5^\#(A_2B_2C_3)$ 和 $8^\#(A_3B_2C_1)$ 试样分别进行了DSC测试。图2为纯PBAT、纯PBS及PBAT/PBS/PLA共混材料的二次升温曲线, 相应的 T_m 列于表9。从图2和表9可看出, 3个PBAT/PBS/PLA共混材料的试样中, PBS和PLA的熔融峰没有明显偏移, PBAT的熔融峰值发生变化, 其中, $5^\#$ 试样中PBAT的 T_m 值比 $2^\#$ 和 $8^\#$ 低 2.5°C , 所以表现出较高的热封强度, $2^\#$ 和 $8^\#$ 试样 T_m 相同, 热封强度相近。

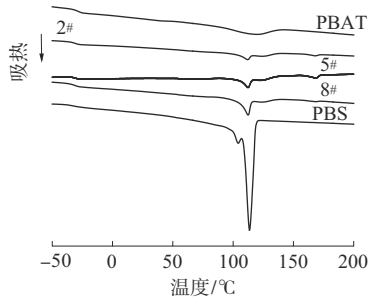


图2 PBAT, PBS与PBAT/PBS/PLA共混材料的DSC二次升温曲线

表9 PBAT/PBS/PLA共混材料的DSC熔点

材料	$T_{m, \text{PBS}}/^\circ\text{C}$	$T_{m, \text{PBAT}}/^\circ\text{C}$	$T_{m, \text{PLA}}/^\circ\text{C}$
PBAT	—	127.8	—
$2^\#$	112.8	130.2	174.0
$5^\#$	112.8	127.7	174.0
$8^\#$	112.8	130.2	174.0
PBS	108.8, 113.7	—	—

2.4 最优方案验证

综合考虑PBAT/PBS/PLA共混薄膜的拉伸性能和直角撕裂强度, 选取最优配方 $A_2B_2C_1$, 即PBS含量, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比和PLA含量分别为10质量份, 10/10和2质量份, 与100份PBAT熔融共混并吹塑成型, 制得的薄膜横向、纵向拉伸强度分别为23.2 MPa和27.3 MPa, 横向、纵向断裂伸长率分别

为988%和1137%, 横向、纵向直角撕裂强度分别为126.4 N/mm和121.2 N/mm, 各项力学性能均高于正交试验结果, 为最优方案。从配方来看, 选取了较低PLA含量的方案, 在一定程度上牺牲了热封强度, 薄膜 90°C 热封强度为7.94 N/15 mm, 低于 $5^\#$ 试样对应的最高热封强度, DSC测试发现试样中PBAT对应的 T_m 为 128.5°C , 比 $5^\#$ 试样熔点高 0.8°C , 导致热封强度偏低。将热封温度提高到 95°C , 薄膜热封强度增加到9.46 N/15 mm, 比 $5^\#$ 试样的热封强度高0.13 N/15 mm。

3 结论

(1) 由正交试验结果分析可知, PBAT/PBS/PLA共混材料的MFR值均较低, 熔体强度均较好, 薄膜的吹塑成型加工稳定性能良好, 其中MFR值最低配方是PBS, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$, PLA含量分别为10质量份、20/0、2质量份。拉伸强度最佳配方是PBS含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量分别为15质量份、20/0、4质量份; 断裂伸长率最佳配方是PBS含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量分别为5质量份、20/0、2质量份。

(2) PBAT/PBS/PLA共混薄膜的横向拉伸强度最佳配方是PBS含量, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比, PLA含量分别为10质量份、10/10、4质量份; 纵向拉伸强度最佳配方是PBS含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量分别为15质量份、10/10、2质量份; 横向断裂伸长率最佳配方是PBS, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量分别为5质量份、0/20、8质量份; 纵向断裂伸长率最佳配方是PBS, $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量分别为10质量份、10/10、2质量份; 横向直角撕裂强度最佳配方是PBS含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量分别为10质量份、0/20、2质量份; 纵向直角撕裂强度最佳配方是PBS含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$, PLA含量分别为5质量份、10/10、2质量份; 热封强度最佳配方是PBS含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量分别为10质量份、0/20、8质量份。

(3) 通过正交试验结果极差分析得到3个因素中对试样和薄膜的拉伸性能影响由强到弱依次为PBS含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PLA含量; 对薄膜横向直角撕裂强度影响由强到弱依次为PLA含量、 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PBS含量, 对薄膜纵向直角撕裂强度影响由强到弱依次为 $\text{CaCO}_3/\text{Talc}$ 质量比、PBS含量、PLA含量; 对薄膜热封强度影响由强到弱依次为

PLA含量、PBS含量、CaCO₃/Talc质量比。

(4) 综合考虑PBAT/PBS/PLA共混薄膜的力学性能,最佳配方是PBS含量,CaCO₃/Talc质量比、PLA含量分别为10质量份、10/10,2质量份。验证试验结果表明,该配方为最优配方,吹塑薄膜纵、横向拉伸强度、断裂伸长率和直角撕裂强度均高于正交试验试样,热封强度虽未达到最佳,但通过将热封温度从90℃提高到95℃,热封强度提高到9.46 N/15 mm,达到最高。

参考文献

- [1] Balaji S, Venkatesan R, Mugeeth L, et al. Hydrophobic nanocomposites of PBAT with Cl-fn-POSS nanofiller as compostable food packaging films[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2021, 61(1): 314–326.
- [2] Ahmed T, Shahid M, Azeem F, et al. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(8): 7 287–7 298.
- [3] Xiao X L, Chevali V S, Song P A, et al. Polylactide/hemp hurd biocomposites as sustainable 3D printing feedstock[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 184. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107887.
- [4] Costa A R M, Crocitti A, Carvalho L H, et al. Properties of biodegradable films based on poly(butylene succinate) (PBS) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends[J]. *Polymers*, 2020, 12(10). DOI: 10.3390/polym12102317.
- [5] Yang H R, Jia G, Wu H, et al. Design of fully biodegradable super-toughened PLA/PBAT blends with asymmetric composition via reactive compatibilization and controlling morphology[J]. *Materials Letters*, 2022, 329. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.133067.
- [6] 尹远, 余月红, 吴晓如. PLA/PBAT双向拉伸薄膜的制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(10): 25–29.
Yin Yuan, Yu Yuehong, Wu Xiaoru. Preparation and properties of PLA/PBAT biaxially oriented films[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(10): 25–29.
- [7] Xiao X L, Chevali V S, Song P A, et al. Enhanced toughness of poly(l-lactide)/poly(ε-caprolactone) blends using poly(d-lactide)-poly(ε-caprolactone)-poly(d-lactide) as compatibilizer[J]. *Composites Communications*, 2020. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100385.
- [8] 程鹏飞, 高琳, 李朋朋, 等. PBAT/PLA/木质素流延膜的制备、表征及性能研究[J]. *塑料工业*, 2022, 50(11): 118–123.
Cheng Pengfei, Gao Lin, Li Pengpeng, et al. Preparation, characterization and properties of PBAT/PLA/lignin casting film[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(11): 118–123.
- [9] Ghosh K, Jones B H. Roadmap to biodegradable plastics-current state and research needs[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9 (18): 6 170–6 187.
- [10] Campos S S D, Oliveira A D, Moreira T F M, et al. TPCS/PBAT blown extruded films added with curcumin as a technological approach for active packaging materials[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 22. DOI: 10.1016/j.fpsl.2019.100424.
- [11] França D C, Almeida T G, Abels G, et al. Tailoring PBAT/PLA/babassu films for suitability of agriculture mulch application[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2018, 16(7): 933–943.
- [12] Jian J, Zeng X B, Huang X B. An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020, 3(1): 19–26.
- [13] 夏学莲, 史向阳, 赵海鹏, 等. PLA/PBAT共混体系的反应性增容[J]. *塑料工业*, 2023, 51(3): 67–75, 89.
Xia Xuelian, Shi Xiangyang, Zhao Haipeng, et al. Reactive compatibilization of PLA/PBAT blends[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(3): 67–75, 89.
- [14] 陈宇, 杨文德, 戴文利. PBAT/PBS吹塑薄膜的制备[J]. *塑料*, 2022, 51(2): 2–4.
Chen Yu, Yang Wende, Dai Wenli. Preparation of PBAT/PBS blown film[J]. *Plastics*, 2022, 51(2): 2–4.
- [15] Wang X, Peng S X, Chen H, et al. Mechanical properties, rheological behaviors, and phase morphologies of high-toughness PLA/PBAT blends by in situ reactive compatibilization[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 173. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107028.
- [16] Rocha D B, Souza De Carvalho J, De Oliveira S A, et al. A new approach for flexible PBAT/PLA/CaCO₃ films into agriculture[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(35). DOI: 10.1002/APP.46660.
- [17] 李博, 李娟, 周万维, 等. 碳酸钙对PBAT/PLA复合材料性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(3): 136–140.
Li Bo, Li Juan, Zhou Wanwei, et al. Effect of calcium carbonate on properties of PBAT/PLA composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(3): 136–140.
- [18] 马发行. 无机物填充PBAT/PLA复合薄膜的制备及其性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Ma Faxing. Preparation and properties of inorganic filled PBAT/PLA composite films[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [19] 胡晨曦, 王宇韬, 吕明福, 等. 滑石粉改性PBAT/PLA复合材料的制备及性能研究[J]. *塑料科技*, 2022, 50(7): 44–48.
Hu Chenxi, Wang Yutao, Lyu Mingfu, et al. Preparation and properties of talcum modified PBAT/PLA composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2022, 50(7): 44–48.
- [20] 孙静, 黄安荣, 罗珊珊, 等. 扩链剂对PBAT/Talc复合材料性能影响研究[J]. *塑料科技*, 2021, 49(8): 1–6.
Sun Jing, Huang Anrong, Luo Shanshan, et al. Effect of chain extender on the properties of PBAT/Talc composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(8): 1–6.