

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.012

锑系协效阻燃剂及打标参数对PBT复合材料激光标记、力学和阻燃性能的影响

但颖迪¹, 贾义军^{1,2}, 韩笑^{1,2}, 赵姜斌¹

(1. 宁波华腾首研新材料有限公司, 浙江宁波 315400; 2. 北京市化学工业研究院有限责任公司, 北京 100084)

摘要:将聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)树脂、玻璃纤维、溴系阻燃剂和锑系协效阻燃剂原料,通过双螺杆挤出机熔融共混,制备出阻燃增强PBT复合材料。采用三氧化二锑(Sb_2O_3)、锑酸钠(NaSbO_3)和锑掺杂氧化锡(ATO)三种锑系阻燃协效剂,通过控制阻燃体系中锑摩尔量相同,研究了三种不同类型的锑系协效阻燃剂对PBT复合材料激光打标、力学和阻燃性能的影响,同时,进一步重点探讨了激光打标参数(速度、功率及频率)对材料激光打标效果的影响,并采用分光光度计和扫描电子显微镜对材料激光打标效果进行表征。研究结果表明,锑系协效阻燃剂中单独使用 Sb_2O_3 激光标记效果最差,用ATO或 NaSbO_3 替代部分 Sb_2O_3 后,PBT材料的激光标记效果改善明显,其中采用 NaSbO_3 体系PBT试样的激光标记轮廓锐度与光学对比度最优。三种锑系协效阻燃剂在维持PBT材料阻燃等级V-0级(3.2 mm)的同时,拉伸强度与缺口冲击强度等关键力学参数保持一致。激光打标参数中功率和速度对PBT复合材料的激光标记效果影响最显著。相比较而言,协效阻燃剂 NaSbO_3 体系表现出最高的工艺敏感性,以其制备的PBT复合材料具备更优的工艺适应性。

关键词:聚对苯二甲酸丁二酯;激光标记;协效阻燃剂;三氧化二锑;锑酸钠;锑掺杂氧化锡

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0092-07

Influence of antimony-based synergistic flame retardants and marking parameters on laser marking, mechanical and flame retardant properties of PBT composites

DAN Yingdi¹, JIA Yijun^{1,2}, HAN Xiao^{1,2}, ZHAO Jiangbin¹

(1. Ningbo Huateng Shouyan New Materials Co., Ltd., Ningbo 315400, China;

2. Beijing City Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: Flame-retardant and reinforced polybutylene terephthalate (PBT) composites were prepared by melting and blending PBT, glass fiber, brominated flame retardants and antimony synergistic flame retardants through a twin-screw extruder. Using three antimony-based flame retardant synergies, namely antimony trioxide (Sb_2O_3), sodium antimonate (NaSbO_3), and antimony-doped tin oxide (ATO), and by controlling the molar amount of antimony in the flame retardant system to be the same, the effects of these three different types of antimony-based synergistic flame retardants on the laser marking, mechanical and flame retardant properties of PBT composites were studied. Meanwhile, the influences of laser marking parameters (speed, power and frequency) on the laser marking effect of materials were further focused on, and the laser marking effect of materials was characterized by spectrophotometer and scanning electron microscope. The research results show that among the antimony-based synergistic flame retardants, the laser marking effect of using Sb_2O_3 alone is the worst. After replacing part of Sb_2O_3 with ATO or NaSbO_3 , the laser marking effect of PBT materials was improved significantly. Among them, the laser marking contour sharpness and optical contrast of the samples using NaSbO_3 system are the best. PBT prepared with three different antimony-based synergistic flame retardants maintain the flame retardancy grade of V-0 (3.2 mm) while keeping the key mechanical parameters such as tensile strength and notched impact strength

通信作者:但颖迪,硕士,主要从事工程塑料改性与应用研究

收稿日期:2025-10-16

引用格式:但颖迪,贾义军,韩笑,等. 锑系协效阻燃剂及打标参数对PBT复合材料激光标记、力学和阻燃性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1):92-98.

DAN Yingdi, JIA Yijun, HAN Xiao, et al. Influence of antimony-based synergistic flame retardants and marking parameters on laser marking, mechanical and flame retardant properties of PBT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1):92-98.

consistent. Among the laser marking parameters, power and speed have the most significant impact on the laser marking effect of PBT composites. In comparison, the synergistic flame retardant NaSbO_3 system exhibits the highest process sensitivity, PBT composite prepared with it has better process adaptability.

Keywords: polybutylene terephthalate ; laser marking ; synergistic flame retardant ; antimony trioxide ; sodium antimonate ; antimony-doped tin oxide

随着电气电子行业的快速发展,电子元件及终端产品的标识技术日益凸显其重要性^[1]。在工业生产过程中,序列号、条形码、企业标识以及生产日期等关键信息通常需要通过标识技术实现产品追溯与质量控制^[2-4]。相较于传统的机械雕刻、油墨印刷及化学蚀刻等标识工艺,激光打标技术具有非接触式加工、无耗材、加工过程清洁高效等特性^[5-7],可应用于多种材料以及复杂曲面^[8],在通信、制造等行业中得到广泛认可^[9]。

聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)是一种由对苯二甲酸和丁二醇经脱水缩聚反应合成的热塑性结晶型聚酯^[10-11]。因其卓越的力学性能、热稳定性以及介电性能,被广泛应用于电子电器、汽车制造和精密仪器等领域^[12-14]。然而,PBT本身属于易燃材料,在应用场景中需进行阻燃改性,常见方式为引入溴系阻燃剂并搭配协效阻燃剂,以提升其阻燃等级^[5,15-16]。相比于其他阻燃协效剂,锑系阻燃协效剂具有光敏性,能够吸收激光能量,导致材料表面温度急剧升高。在高温下,PBT基体材料热分解,释放出大量气体,进而形成微米或纳米级的微孔结构。这些微孔结构对入射光线产生强烈散射,从而使标记区域呈现出白色效果^[17-18]。然而,阻燃体系的组成对激光标记质量具有关键影响。邱鹏飞等^[19]探究了PBT/ Sb_2O_3 复合材料的激光标记效果和机理,结果表明, Sb_2O_3 可以改善PBT材料的可激光标记性。张平等^[20]探究了不同的阻燃体系以及激光标记粉对阻燃增强PBT材料的激光标记效果的影响。结果表明,溴化环氧类阻燃体系对激光打标效果产生不利影响。由此可见,不同阻燃体系对激光标记性能的影响机制复杂,结果差异显著。

在各类锑系阻燃剂中, Sb_2O_3 因其高效的协效阻燃作用而被广泛采用。然而,常规 Sb_2O_3 在用于“黑打白”激光标记工艺时,常出现标记对比度低、图案清晰度差以及标记区域泛黄等问题,严重影响标识质量与应用效果^[21-23]。而ATO和 NaSbO_3 对激光敏感度较弱,在提高阻燃性能的同时对激光标记的效果影响较小。目前,关于不同类型含锑协效阻燃剂

对阻燃增强PBT复合材料激光标记性能影响的研究尚不系统,尤其缺乏对激光工艺参数与阻燃剂种类协同影响机制的深入探讨。针对上述问题,本研究通过筛选多种含锑协效阻燃剂,成功制备出具有高清晰度“黑打白”激光标记效果的阻燃增强PBT复合材料,并进一步研究了激光功率、扫描速度等关键参数对标记效果的影响。该研究旨在为高性能可激光标记阻燃PBT材料的开发提供理论依据与实践参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBT: MY10,黏度 1.00 dL/g,浙江美源新材料股份有限公司;

NaSbO_3 : 粒度 40 μm ,上海星贝达化工材料有限公司;

Sb_2O_3 : 粒度 0.4~2.5 μm ,常德辰州锑品有限公司;

ATO: 粒度 5~50 μm ,大展吉源新材料科技有限公司;

溴化环氧: EP-25K,江苏兴盛化工有限公司;

玻璃纤维: ECS11-3.0-T436H,泰安泰山玻璃纤维有限公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: ZSK-30,长径比为44,南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

注塑机: UN90A5S-V,佛山伊之密精密器械有限公司;

激光打标机: KDD-50,苏州开泰激光科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM-7600F,日本电子株式会社;

电子万能试验机: WDT-W-20A1,承德精密试验机有限公司;

电子式简支梁冲击试验机: JC-25D,承德精密试验机有限公司;

水平垂直燃烧试验仪: ZZZ-RS-HL,深圳市中子测控仪器有限公司;

分光光度计: Ci6X, 上海爱色丽色彩科技有限公司。

1.3 试样制备

(1)原料干燥: 使用鼓风干燥箱将PBT树脂在120℃环境下放置120 min, 之后取出冷却后备用。

(2)物料共混: 将(1)中的PBT树脂、溴系阻燃剂、 Sb_2O_3 及抗氧剂按照一定比例, 一起加入高速混合机设备中, 混合均匀。

(3)材料制备: 双螺杆挤出机挤出造粒: 将(2)中混合后的混合物, 通过主喂料称, 以失重计量方式, 喂入双螺杆挤出机中; 玻璃纤维从侧喂料秤按一定比例计量加入, 通过熔融共混的方式挤出后, 牵条、造粒, 制得PBT复合材料。激光标记的PBT复合材料的四种设计配比见表1。双螺杆挤出熔融共混的加工工艺: 挤出机1~10区温度分别为120、200、240、230、230、235、235、235、245、245℃, 机头温度为255℃; 双螺杆挤出机螺杆转速300~350 r/min。

(4)测试样条的制备: 所制得的阻燃增强PBT复合材料样品粒料, 放入鼓风干燥箱中在120℃条件下干燥2 h; 按照GB/T 17037.1-2019, 在245~255℃下, 使用注塑机制备成型标准的力学和阻燃性能等测试样条。最后, 采用激光打标机进行激光标记(波长1.064 μm)。

表1 玻纤增强阻燃PBT材料实验配方

Tab. 1 Experimental formula of glass fiber reinforced flame-retardant PBT material

phr							
Samples	PBT	Glass fiber	Carbon black	Epoxide bromide	Sb_2O_3	NaSbO_3	ATO
1 [#]	100	20	0.2	18	4.5		
2 [#]	100	20	0.2	18	2		2.5
3 [#]	100	20	0.2	18	2	3.5	
4 [#]	100	20	0.2	18		6	

1.4 性能表征

拉伸强度按ISO 527-2012检测, 测试速率5 mm/min, 样条尺寸170 mm×80 mm×4 mm。

弯曲强度按ISO 178-2019检测, 测试速率2 mm/min, 样条尺寸80 mm×10 mm×4 mm。

悬臂梁缺口冲击强度按ISO 180/1A-2008检测, 样条尺寸80 mm×10 mm×4 mm。

阻燃性能按UL 94 垂直燃烧法检测, 样条尺寸125 mm×13 mm×3.2 mm。

激光标记表征: 利用激光打标机对色板进行标记。在自然光下通过肉眼观察色板的初始未标记

区域与激光标记区域的颜色差别, 同时进一步利用分光光度计测量测试色板未标记区域与激光标记区域的色差 ΔL 。 ΔL 值越大, 对比度越强, 激光标记效果越好。样条尺寸80 mm×20 mm×2 mm。

试样的制备与表征如图1所示。

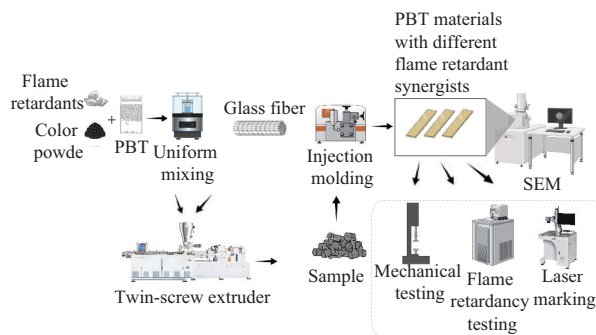


图1 试样的制备和表征过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample preparation and characterization process

2 结果与讨论

2.1 不同锑系阻燃协效剂对阻燃增强PBT材料激光标记效果的影响

图2为四种不同锑系阻燃协效剂体系PBT材料的激光标记表现形貌。各子图2a至图2d依次对应1[#]~4[#]配方的试样。图3表征了对应的PBT色板试样的激光标记区域亮度值(L)及标记区-非标记区亮度差(ΔL)。

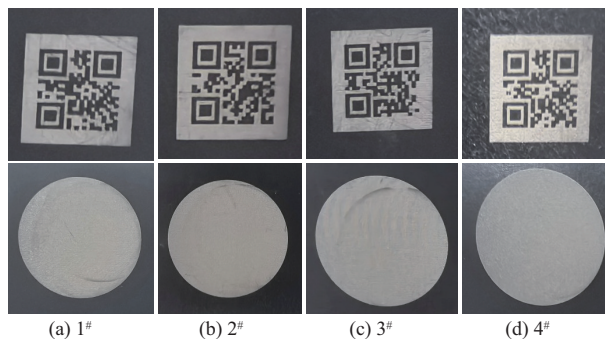


图2 不同锑系阻燃协效剂制备的PBT材料激光标记效果

Fig. 2 Laser marking effect of PBT materials prepared with different antimony-containing flame retardant synergists

从图2可以看出, 四种锑系阻燃协效剂体系均能实现有效的激光标记(图2a至图2d)。其中, Sb_2O_3 体系(图2a)的标记区域存在轻微黄变现象; 采用ATO(图2b)或 NaSbO_3 (图2c)部分替代 Sb_2O_3 后, 标记表现质量显著改善; 而 NaSbO_3 完全替代 Sb_2O_3 (图2d)的标记轮廓锐度最高, 对比度最为显著。

图3为不同锑系阻燃协效剂对PBT材料的 L 值和激光标记效果 ΔL 的影响。如图3所示, 以 Sb_2O_3

为阻燃协效剂的1[#]样品,其标记区域 L 值为26.37, ΔL 值为11。降低 Sb_2O_3 含量后,材料非标记区域 L 值降低,而 ΔL 值显著增大。此现象归因于 Sb_2O_3 本身着色度较高,且其在激光作用下易发生吸热转化,导致局部温升过高,引发PBT基材过度发泡甚至炭化变暗。相较于1[#]样品,采用ATO或 NaSbO_3 部分替代 Sb_2O_3 制备的2[#]样品和3[#]样品,其 ΔL 值均显著提高。用 NaSbO_3 完全替代 Sb_2O_3 制得的4[#]样品, ΔL 值达到最大,且非标记区域 L 值最低。上述结果表明,采用其他含锑阻燃协效剂替代 Sb_2O_3 ,可有效改善PBT材料的激光标记对比度。其中, NaSbO_3 体系的试样光学对比度最高。该结果与图2观测到的激光标记表观效果一致。

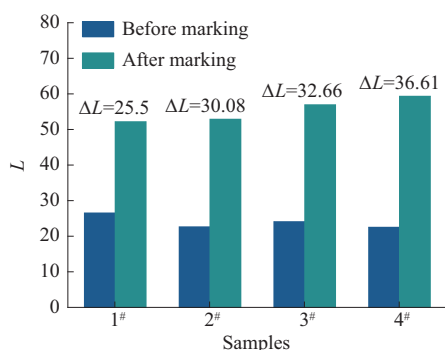


图3 不同锑系阻燃协效剂对PBT材料的 L 值和激光标记效果 ΔL 的影响

Fig. 3 Influence of different antimony-containing flame retardant synergists on L value and laser marking effect ΔL of PBT materials

图4为不同锑系阻燃协效剂的PBT材料在激光标记区域与未标记区域的SEM表面形貌图,如图所示, Sb_2O_3 体系试样(图4a)呈现非均匀发泡与局部炭化共存形貌:泡孔密度低、孔壁破裂形成连通凹坑,并伴随深色炭化带及微裂纹。此现象归因于 Sb_2O_3 的高激光吸收系数,导致局部能量密度过高,引发PBT材料炭化^[23]。相较之下,ATO部分替代体系(图4b)以破裂泡孔为主导,形成网状凹坑结构,归因于ATO的高导热性促使热量扩散,减少材料的炭化面积^[24]。而 NaSbO_3 部分替代体系(图4c)则呈现高密度闭孔结构,泡孔呈规则球形,孔壁完整无炭化。这归因于 NaSbO_3 的高温相变耗散过剩能量;同时作为异质成核位点,提升泡孔成核密度^[25]。 NaSbO_3 完全替代体系(图4d)进一步形成双尺度泡孔结构,主体为球形闭孔嵌套亚微米孔,孔壁完整且排布具短程有序性,无炭化或熔融痕迹。该结构兼具高发泡完整性、均匀性及无热损伤特性,此微观形貌与图3

最优标记表观效果直接关联。

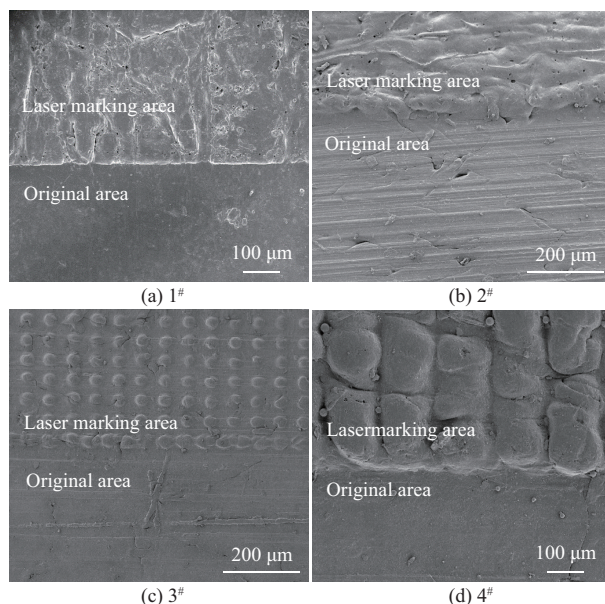


图4 不同锑系阻燃协效剂制备PBT材料的激光标记分界处表面SEM形貌

Fig. 4 Surface SEM morphology at laser marking boundary of PBT prepared with different antimony-containing flame retardant synergists

2.2 不同锑系阻燃剂对PBT材料阻燃性能和力学性能的影响

上述测试结果已证明,采用不同锑系阻燃协效剂替代 Sb_2O_3 后,制备的PBT材料的激光标记效果改善明显,其中用 NaSbO_3 阻燃协效剂的样品激光标记效果最好。但在实际应用中产品的力学性能和阻燃性能有更多的要求,为进一步研究不同锑系阻燃协效剂对材料力学性能和阻燃性能的影响,对材料进行多种性能测试,测试数据详见表2。由表2数据可见,四种配方UL 94阻燃等级均能达到V-0级(3.2 mm),这是因为ATO与 NaSbO_3 作为协效阻燃剂,在PBT/溴系阻燃剂体系中仍能有效发挥气相阻燃作用,其与溴系阻燃剂在高温下反应生成 SbBr_3 等锑卤化合物,通过气相自由基捕获机制中断燃烧链反应,因而表现出与 Sb_2O_3 相当的阻燃效率。

表2 不同含锑阻燃协效剂对PBT材料性能的影响

Tab. 2 Effects of different antimony-containing flame retardant synergists on properties of PBT material

Item	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
Tensile strength/MPa	124	112	123	128
Bending strength/MPa	166	163	174	185
Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	4.5	5.7	5.9	5.8
Notched-free impact strength/(kJ·m ⁻²)	34.5	35.6	44.2	50.6
UL 94 (3.2 mm)	3.2 V-0	3.2 V-0	3.2 V-0	3.2 V-0

由表2数据可见,不同PBT材料力学性能无明显差别。这表明使用ATO或 NaSbO_3 替代 Sb_2O_3 并未对PBT基体产生明显的增韧或脆化影响。这归因于这些锑系协效剂的粒径分布、表面特性及其与PBT基体的界面相容性较为接近,因而在相同加工条件下能够实现一定的分散状态,未引入明显的应力集中或缺陷,从而保障了力学性能的稳定性。上述测试结果表明三种不同锑系阻燃协效剂在保证阻燃性能的同时,PBT的力学性能仍能保持一致。

2.3 激光标记参数对不同锑系阻燃协效剂制备的PBT材料标记效果的影响

激光标记工艺参数对PBT材料激光标记的效果有较大的影响^[26],其中速度决定激光标记的快慢,功率反映了作用在材料表面的能量的大小,频率代表标记时的脉冲数量。激光标记的工艺参数可以控制激光与黑色PBT材料的局部接触时间、能量大小和次数,从而影响PBT材料的激光标记效果。

图5和图6给出了40%固定激光标记功率和80 Hz激光标记频率的条件下,在不同的激光标记速度下,四种配方PBT材料色板的激光标记效果和 ΔL 的变化。由图5可见,随着激光标记速度变快,不同含锑阻燃协效剂的PBT材料的激光标记效果均表现为由深变浅。在标记速度为500 mm/s时,标记效果明显发黄,这是由于PBT材料炭化程度加深。标记固定激光标记功率和频率,标记速度越慢,在同一位置的激光标记次数越多,炭化程度越严重。随着标记速度逐渐增大,材料的炭化程度减弱,颜色由深变浅。但当标记速度增加到一定程度,作用于材料的能量过少,PBT材料无法发泡或成炭,不能形成清晰的标记。实验结果表明激光速

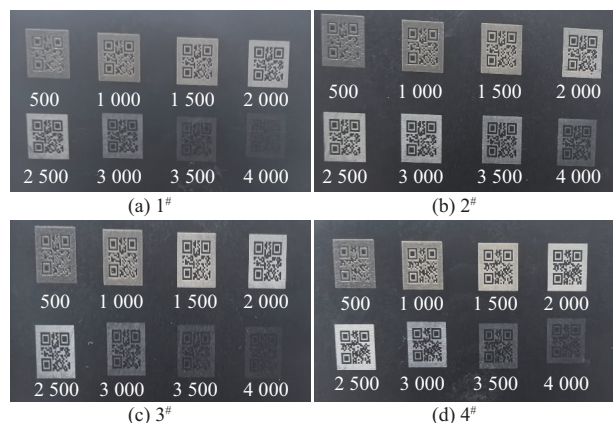


图5 不同激光速度下PBT材料的激光标记效果(单位:mm/s)

Fig. 5 Laser marking effect of PBT materials at different laser speeds (unit:mm/s)

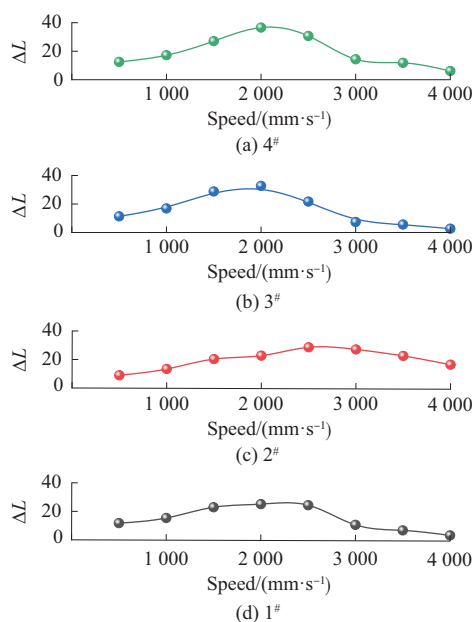


图6 激光标记速度对PBT材料 ΔL 值的影响

Fig. 6 Effect of laser labeling speed on ΔL value of PBT material

度对材料的激光标记效果影响显著,其中 NaSbO_3 体系对激光速度的敏感度最高。

固定标记速度为3 000 mm/s、标记频率为40 Hz,在不同功率下不同含锑阻燃协效剂PBT材料的激光标记效果如图7、图8所示。从图中可以观察到,随着激光功率的增加,标记效果先变好后变差,材料的 ΔL 先增大后减小。这是因为在较低的激光标记功率下,激光标记能量不足以诱导材料表面发泡,无法在样品表面留下明显标记。随着标记功率的提高,激光能量增加,样品表面发泡更明显,标记

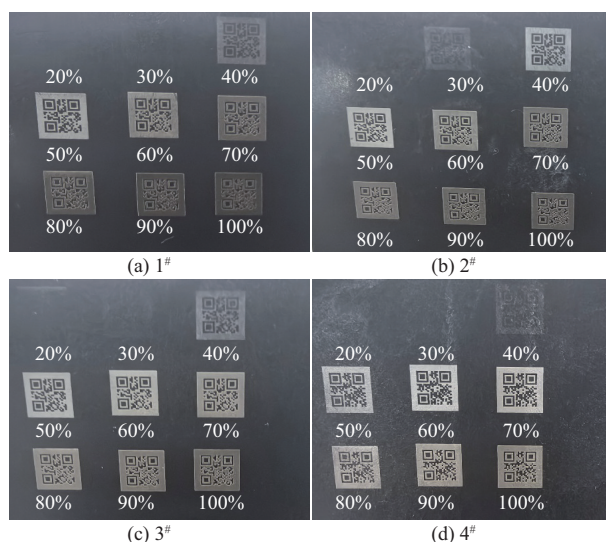
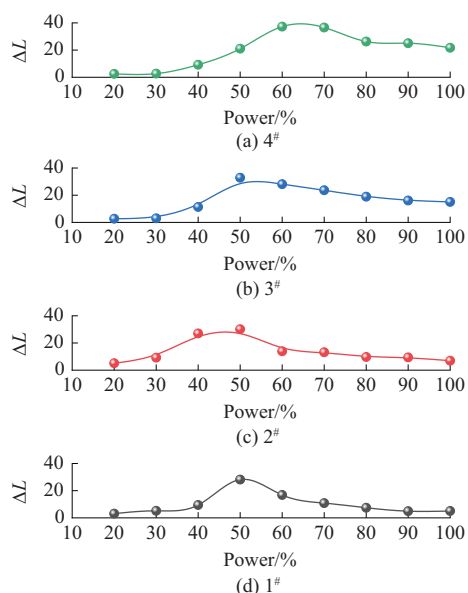


图7 不同激光功率下PBT材料的激光标记效果

Fig. 7 Laser marking effect of PBT materials under different laser powers

图8 激光标记功率对PBT材料 ΔL 值的影响Fig. 8 Effect of laser marking power on ΔL value of PBT materials

区域的清晰度增加, ΔL 值逐渐增大。随着功率进一步增加,样品表面开始逐渐炭化,虽然发泡形貌仍然较为完整,但标记区域颜色加深。其中4#配方的 ΔL 值变化最明显,当标记功率为60%时,4#配方的激光标记效果最清晰, ΔL 值为37.25。实验结果表明激光功率会显著影响材料的激光标记效果,其中 NaSbO_3 体系对激光功率的敏感度最高。

固定标记速度为3 000 mm/s、标记功率为40%,在不同频率下不同含铈阻燃协效剂PBT材料的激光标记效果如图9、图10所示。在低频率时,在同一

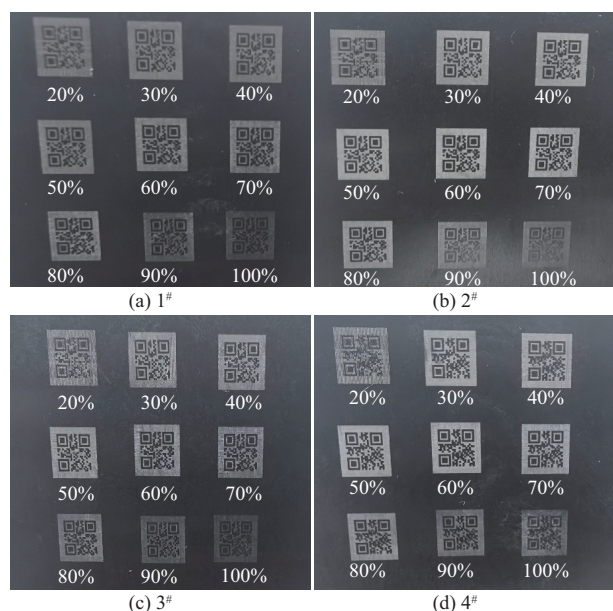
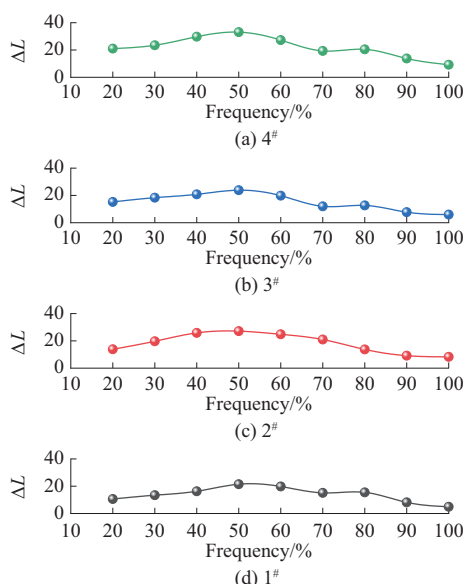


图9 不同激光频率时PBT材料的标记效果

Fig. 9 Marking effect of PBT material at different laser frequencies

图10 激光标记频率对PBT材料 ΔL 值的影响Fig. 10 Effect of laser marking frequency on ΔL value of PBT materials

位置激光脉冲的次数较少,导致激光标记痕迹较浅,材料发泡不完全。随着标记频率的升高,脉冲激光在同一位置的标记次数增加、热量积累充分、发泡程度增加、亮度也随之提高。从图10可以看出,随着频率的增加, ΔL 先增大后减小,但变化幅度不大,表明激光频率对PBT材料的激光标记效果影响较小。

3 结论

(1)相较于纯 Sb_2O_3 阻燃协效体系,用ATO或 NaSbO_3 替代 Sb_2O_3 后,PBT材料的激光标记效果更佳,其中采用 NaSbO_3 体系试样的激光标记轮廓锐度与光学对比度最优。

(2)相较于纯 Sb_2O_3 阻燃协效体系,ATO及 NaSbO_3 替代体系在维持阻燃等级V-0级(3.2 mm)的同时,PBT材料的拉伸强度与缺口冲击强度等关键力学性能不差于纯 Sb_2O_3 体系的材料。

(3)激光功率和激光速度对样品激光标记效果影响最显著。其中 NaSbO_3 体系表现出最高的工艺敏感性,具备更优的工艺适应性。

参考文献

- [1] GENG J, YAN W, SHI L P, et al. Surface plasmons interference nanogratings: Wafer-scale laser direct structuring in seconds[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1). DOI: 10.1038/s41377-022-00883-9.
- [2] 赵刚,陈泉,何洋,等. 聚丙烯复合材料激光打标性能研究[J]. 日用电器, 2024(11):149-154.

ZHAO Gang, CHEN Quan, HE Yang, et al. Research on the laser marking performance of polypropylene composite materials[J].

- Electrical Appliances, 2024(11):149–154.
- [3] 王喜印. 苹果激光打标关键技术及装备研发[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024.
- WANG Xiyin. Research and development of key technologies and equipment for laser marking on Apple[D]. Yangling:Northwest A & F University, 2024.
- [4] 任泽龙,王海波,徐进,等. 汽车电线束连接器激光打标自动化设计与实现[J]. 汽车电器, 2024(1):47–48, 50.
- REN Zelong, WANG Haibo, XU Jin, et al. Design and implementation of laser marking automation for automotive wire bundle connectors[J]. Auto Electric Parts, 2024(1):47–48, 50.
- [5] 殷年伟,陈锐,禹权,等. 黑色PBT材料激光打标发泡模型研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(6):104–111.
- YIN Nianwei, CHEN Rui, YU Quan, et al. Study on laser marking foaming model for black PBT materials[J]. China Plastics, 2018, 32(6):104–111.
- [6] 王伟,张永康,鲁金忠,等. 激光标记方法的原理分析与发展前景[C]//长三角光子科技创新论坛暨2006年安徽博士科技论坛论文集. 合肥, 2006:325–329.
- WANG Wei, ZHANG Yongkang, LU Jinzhong, et al. Principle analysis and development prospect of laser marking method[C]//Yangtze River Delta Photonics Science and Technology Innovation Forum and 2006 Anhui Doctoral Science and Technology Forum. Hefei, 2006:325–329.
- [7] 杨红伟,单盼盼,倪亚茹,等. 激光在塑料加工中的应用[J]. 现代塑料加工应用, 2021, 33(6):52–55.
- YANG Hongwei, SHAN Panpan, NI Yaru, et al. The application of laser in plastic processing[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(6):52–55.
- [8] 周博. 紫外激光打标机特性研究[J]. 农业科技与装备, 2014(11):77–78.
- ZHOU Bo. Properties research on UV laser marking machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014(11):77–78.
- [9] 安朋,张超,丁正亚,等. 可激光标记、高抗冲长玻璃纤维增强聚丙烯的应用研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(11):142–146.
- AN Peng, ZHANG Chao, DING Zhengya, et al. Study on application of laser marking and high impact long glass fiber reinforced PP[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(11):142–146.
- [10] 杨力芳. 聚对苯二甲酸丁二酯合成用钛系催化剂的研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(8):100–102.
- YANG Lifang. Research of titanium-based catalysts for PBT synthetics[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(8):100–102.
- [11] 王良民,王龙礼,刘文哲,等. 含溴阻燃PBT的阻燃性及紫外光稳定性[J]. 塑料工业, 2020, 48(8):47–51.
- WANG Liangmin, WANG Longli, LIU Wenzhe, et al. Flame retarding and ultraviolet stability of bromine flame retarded PBT composites[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(8):47–51.
- [12] 张平,林远开,张钊鹏. 一种优异激光打标效果的750 °C灼热丝环保阻燃增强改性PBT的研究[J]. 广东化工, 2018, 45(18):59–61.
- ZHANG Ping, LIN Yuankai, ZHANG Zhaopeng. Study on 750 °C glow wire environmentally friendly flame retardant modified pbt with excellent laser marking effect[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(18):59–61.
- [13] 韩潇. 聚对苯二甲酸丁二酯扩链协同阻燃改性研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- HAN Xiao. Chain-extended and synergistic flame-retarded modification of poly(butylene terephthalate) resin[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2014.
- [14] 洪玉琢,朱健,冯正明,等. PBT/CF导热复合材料的制备与研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4):92–97.
- HONG Yuzhuo, ZHU Jian, FENG Zhengming, et al. Preparation and research of thermally conductive PBT/CF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4):92–97.
- [15] 边策,钱志国,李小雅,等. 可激光标记阻燃PBT的制备及打标工艺研究[C]//银川:2014年中国工程塑料复合材料技术研讨会, 2014:123–125.
- BIAN Ce, QIAN Zhiguo, LI Xiaoya, et al. Research on the preparation and marking process of laser-marking flame-retardant PBT [C]//Yinchuan:2014 China Engineering Plastics Composite Materials Technology Symposium, 2014:123–125.
- [16] 薛惠振,何建龙,卞瑞忠,等. PBT增强阻燃激光打印材料及其制备方法: CN104448735B[P]. 2016-09-28.
- XUE Huizhen, HE Jianlong, BIAN Ruizhong, et al. PBT reinforced flame-retardant laser printing materials and their preparation methods: CN104448735B[P]. 2016-09-28.
- [17] 马宝海,陈林,刘小池. 一种深色可激光打标的无卤阻燃PBT复合材料及其制备方法: CN107353604A[P]. 2017-11-17.
- MA Baohai, CHEN Lin, LIU Xiaochi. A Halogen-free flame-retardant PBT composite material with dark laser marking and its preparation method: CN107353604A[P]. 2017-11-17.
- [18] 刘斌,朱永,东为富,等. 镉雕聚丙烯材料的制备与性能分析[J]. 工具技术, 2019, 53(5):99–101.
- LIU Bin, ZHU Yong, DONG Weifu, et al. Preparation and property of colored laser engraving polypropylene materials[J]. Tool Engineering, 2019, 53(5):99–101.
- [19] 邱鹏飞,周金龙,钟蔚,等. 激光标记PBT/Sb₂O₃复合材料的制备及其机理研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):7–12.
- QIU Pengfei, ZHOU Jinlong, ZHONG Wei, et al. Preparation and study on mechanism of laser-marking PBT/Sb₂O₃ composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):7–12.