

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.007

热升华高光黑色键帽用PBT复合材料的制备与性能

郑夏莲, 马元好, 欧阳铖

(宜春学院智能制造与材料化工学院, 江西宜春 336000)

摘要: 随着机械键盘市场的快速发展,用户对键帽材料的性能尤其是表面质量提出了更高要求。聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)因其优异的力学性能和耐化学腐蚀性成为键帽的理想材料之一,但普通PBT存在染色性差、高光效果不足等问题。采用熔融共混法制备PBT复合材料,通过添加聚碳酸酯(PC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料、玻璃纤维、碳纤维(CF)、自制丙烯酸酯类光泽度改性剂、聚氨酯、纳米二氧化硅等以提供良好的触摸感受及光滑性,同时提升表面光泽度与力学性能。利用双螺杆挤出机进行复合造粒,经注射成型得到键帽坯件后,采用热升华转印工艺对键帽表面进行处理。重点研究了PC含量、CF含量、光泽度改性剂含量和挤出工艺参数对复合材料性能的影响,同时考察了热升华转印工艺参数对键帽涂层表面质量的影响。结果表明,当PC与CF和光泽度改性剂的质量分数分别为3%,2%和1%时,复合材料具有较高的表面光泽度、力学性能和热变形温度;当挤出机主机转速为350 r/min、进料转速为255 r/min时,复合材料的表面光泽度、拉伸强度和热变形温度达到最高。采用适当的热升华转印工艺参数可提升键帽涂层的表面质量,当升华温度为230℃、升华时间为10 min时,键帽涂层的表面光泽度达到93.4 GU。

关键词: 聚对苯二甲酸丁二酯;复合材料;键帽;热升华转印;光泽度

中图分类号: TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0048-08

Preparation and properties of PBT composites for thermal sublimation high gloss black key caps

ZHENG Xialian, MA Yuanhao, OUYANG Cheng

(Intelligent Manufacturing and Materials Chemical Engineering Institute, Yichun College, Yichun 336000, China)

Abstract : With the rapid development of the mechanical keyboard market, users have put forward higher requirements for the performances of key cap materials, especially the surface quality. Polybutylene terephthalate (PBT) has become an ideal material for key caps due to its excellent mechanical properties and chemical resistance, but ordinary PBT has problems such as poor dyeing and insufficient high gloss effect. The melt blending method was used to prepare PBT composites. Polycarbonate (PC), acrylonitrile-butadiene-styrene plastic, glass fiber, carbon fiber (CF), self-made acrylic gloss modifier, polyurethane, nano silica, and other additives were added to provide good tactile sensation and smoothness, while improving surface gloss and mechanical properties. Compound granulation was carried out using a twin-screw extruder and used to obtain key cap blanks by injection molding, then the key cap surface was treated using thermal sublimation transfer printing technology. The effects of PC content, CF content, gloss modifier content, and extrusion process parameters on the properties of the PBT composites were mainly studied, and the influences of thermal sublimation transfer printing process parameters on the surface quality of key cap coatings were also investigated. The results show that when the content of PC is 3 wt%, the content of CF is 2 wt%, and the content of gloss modifier is 1 wt%, the composite has high surface gloss, mechanical properties, and heat deformation temperature. When the main engine speed of the extruder is 350 r/min and the feeding speed is 255 r/min, the surface gloss, tensile strength, and heat deformation temperature of the composite reaches the highest. Adopting appropriate thermal sublimation transfer printing process parameters can improve the surface quality of the key cap coatings, when the sublimation temperature is 230℃ and the sublimation time is 10 min, the surface gloss of the key cap coating reaches 93.4 GU.

Keywords : polybutylene terephthalate ; composite ; key cap ; thermal sublimation transfer printing ; gloss

通信作者: 郑夏莲, 副教授, 博士, 研究方向为高性能复合材料

收稿日期: 2025-07-07

引用格式: 郑夏莲, 马元好, 欧阳铖. 热升华高光黑色键帽用PBT复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 48-55.

ZHENG Xialian, MA Yuanhao, OUYANG Cheng. Preparation and properties of PBT composites for thermal sublimation high gloss black key caps[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 48-55.

目前常见的键盘材料主要有丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚甲醛(POM)、聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)等。ABS是目前市面上比较常见的键盘材质之一,其优点是有一定的坚韧特性,缺点是易受磨损、容易变黄、耐热性和耐候性较差,长时间使用后,容易受到热胀冷缩的影响,产生变形或者开裂状况。ABS价格相对较低,适用于入门级别的键盘,更适合一般使用场景尤其是预算有限的日常办公场景。

POM综合性能优异,具有高硬度、超低阻尼、优异的耐热性、优异的耐化学腐蚀性和出色的耐磨性。由POM材料制作的键帽手感和硬度都非常优良,而且对应的黑色激光刻蚀键盘视觉效果良好,但是POM价格高于PBT,价格昂贵限制了它的使用。

电子竞技行业的兴起为机械键盘行业奠定了消费群体基础。电子竞技活动对于鼠标、键盘、显示器等设备的灵敏度、舒适度提出更高要求,定制化机械键盘受到职业玩家青睐。因此研究在高端外设用的键盘材料也迫在眉睫。现在研究键盘用材料的文献较少,笔者只查阅到了关于防水键盘材料^[1]和防水抗过敏背光型硅胶键盘材料^[2]的专利文献。

PBT材料适用于不同的加工工业。通常,需要向PBT添加添加剂或将PBT与其他塑料混合,不同比例的添加剂可用于制造不同规格的改性材料。由于PBT具有较好的耐热性、耐候性、耐化学腐蚀性,以及低吸水性良好的光泽^[3],因此广泛应用于电子电器、汽车配件、机械、家居用品等。PBT材料虽然价格较为昂贵,但理化性能优异,最大的特点是耐磨性好、柔韧性好^[3],在生活用品中通常用于牙刷刷毛,而在键帽上使用时的优点是比ABS更耐用,键帽更加厚实、耐用性更强,相比ABS塑料更加耐高温,手感更加光滑,适用于专业人士或者需要长时间使用键盘的玩家,电子竞技会更倾向于使用这种材质的键盘。然而,传统PBT在高端应用中存在显著局限:表面能低导致热升华转印时染料渗透不足,从而导致图案分辨率与色彩饱和度难以满足定制化需求;注射成型易产生流痕,入射角为60°时的光泽度普遍低于90 GU,无法达到镜面效果^[4];同时,结晶度高、表面极性低还会导致染料附着强度不足,长期使用易褪色。这些缺陷严重制约了PBT

在电子竞技用键盘等高端外设中的应用^[5]。

为解决上述问题,笔者通过多组分复合改性进行性能优化:引入聚碳酸酯(PC)改善PBT熔体流动性^[6],引入ABS提升抗冲击性^[7],引入单组份聚氨酯(PUR)优化触摸手感并降低粗糙度;加入玻璃纤维(GF)和碳纤维(CF)可增强PBT力学性能、耐用性与便携性^[8-10],且二者适量混杂时具有较好的改性效果;加入纳米二氧化硅(SiO_2)填充PBT表面微孔可降低粗糙度^[11],配合偶联剂(如KH-560)修饰界面,还能同步提升PBT表面光洁度与染料渗透深度,同时纳米 SiO_2 的加入还可提升材料的硬度;加入光稳定剂改善PBT耐候性以应对材料紫外线老化问题。

然而,多组分复合体系面临两大核心挑战:一是界面相容性问题,尤其是PBT/PC/ABS三元共混时,相容性可能会受到影响,相容性不佳可能导致材料的性能下降,如冲击强度降低等^[12-13];二是热升华转印工艺与材料表面特性的关联机制尚不明确,现有研究缺乏系统性分析,制约了高精度图案转印的实现^[14-15]。

因此,针对键盘键帽对材料表面光洁度、热升华转印适应性及综合力学性能的需求,在上述各组分改性机理的基础上,主要通过调整PC含量、CF含量和用于改善制品表面光泽度的光泽度改性剂含量,以及解析热升华转印工艺参数与表面特性的关联,提高PBT复合材料的力学性能和表面性能,为高性能键帽等产品提供材料支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC:IR2200,上海科思创PC塑料有限公司;

ABS:ABS-757,中国台湾奇美实业股份有限公司;

PBT:PBT-KM500,金发科技股份有限公司;

PUR:HF-85AP,浙江华峰热塑性聚氨酯有限公司;

纳米 SiO_2 :NM-3,中国蓝星(集团)股份有限公司;

GF:HGF-13 μm ,泰山玻璃纤维有限公司;

CF:T700,中复神鹰碳纤维股份有限公司;

光稳定剂:UV-326,北京天罡益康材料科技有限公司;

偶联剂:KH-560,南京曙光硅烷化工有限公司;

润滑剂:硬脂酸正丁酯,郑州亿腾化工产品有

限公司;

光泽度改性剂:含有丙烯酸酯结构,自制。

1.2 主要仪器及设备

高速混合机:SHR-50A,张家港市亿利机械有限公司;

注塑机:MA1200/260,海天塑机集团有限公司;

同向双螺杆挤出机:SHJ-36,南京科亚化工成套设备有限公司;

热变形温度测定仪:XRW-300M,承德市金建检测仪器有限公司;

光泽度测试仪:KGZ-1B,天津市科器高新技术有限公司;

高精度粗糙度轮廓仪:IPRE-RAI50S,山东中科普锐检测技术有限公司;

热升华印刷设备:HS-8020A,广东东莞宏达热转印设备有限公司;

简支梁冲击试验机:JJ-20,长春市智能仪器设备有限公司;

万能材料试验机:UTM4204,深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.3 试样制备

(1)原料预混合:按设定质量比,先将干燥的

PBT,PC,ABS加入高速混合机预混10~15 s;接着加入KH-560继续混合5~10 s;随后加入光稳定剂、润滑剂及PUR,混合30~40 s;最后将纳米SiO₂、光泽度改性剂与定量色粉共混30~40 s,确保色泽均匀。

(2)挤塑成型:将上述预混合物加入同向双螺杆挤出机,在双螺杆第四节加料口同步加入质量分数15%的GF和一定量的CF;设定挤出机温度梯度为160,180,235,250,240,220,220,245,240℃,主机转速300~400 r/min,进料转速220~300 r/min,经熔融共混造粒,挤塑得到条状复合材料。

(3)颗粒化处理:条状复合材料依次经过水冷、吹干后,由切粒设备切成长度为2~4 mm的复合材料颗粒。

(4)标准样条与键帽注射成型:将复合材料颗粒进行二次干燥后,加入注塑机,设定注塑机温度为275,265,265,260℃,注射成型为标准试样和键帽坯件。

(5)键帽后处理(热升华印刷):将键帽坯件放入热升华印刷设备,设定升华温度210~250℃、时间5~12 min,引入黑色热升华染料,使键帽呈现高饱和度黑色,完成键帽成品制备。

试样具体配方见表1。

表1 PBT复合材料试样配方(质量分数)

Tab. 1 PBT composite sample formulations (mass fraction)

Sample number	%									
	PBT	PC	ABS	GF	PUR	SiO ₂	CF	KH-560	Gloss modifier	Others
1	58	2	6	15	3	1	1	0.3	0.5	13.2
2	58	2.5	6.5	15	3	1	1	0.3	0.5	12.2
3	58	3	7	15	3	1	1	0.3	0.5	11.2
4	58	3.5	8	15	3	1	1	0.3	0.5	9.7
5	58	4	9	15	3	1	1	0.3	0.5	8.2
6	58	3	7	15	3	1	0	0.2	0.5	12.3
7	58	3	7	15	3	1	1	0.2	0.5	11.3
8	58	3	7	15	3	1	2	0.2	0.5	10.3
9	58	3	7	15	3	1	3	0.2	0.5	9.3
10	58	3	7	15	3	1	2	0.3	0.2	10.5
11	58	3	7	15	3	1	2	0.3	0.6	10.1
12	58	3	7	15	3	1	2	0.3	1.0	9.7
13	58	3	7	15	3	1	2	0.3	1.5	9.2

Notes: Others include lubricants, light stabilizers and other additives.

1.4 测试与表征

1.4.1 光泽度测试

依据ASTM D523-08,打开光泽度测试仪,设置60°入射角,校准标准板后,将键帽试样置于测试平台中心位置,确保表面无污染。每个试样测量5个不同区域,取平均值作为最终光泽度值,数据精确

至0.1 GU。测试前用无水乙醇清洁表面,避免指纹或灰尘干扰。

1.4.2 拉伸性能测试

依据GB/T 1447-2005,制备I型样条,打开万能材料试验机预热15 min后,设置夹距50 mm,拉伸速度5 mm/min。夹紧试样后清零,测试至断裂,

记录最大载荷及断裂伸长率,计算拉伸强度,剔除偏离均值 $\pm 15\%$ 的数据。

1.4.3 弯曲性能测试

依据 GB/T 9341-2008,制备尺寸为 $80\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的试样,支撑跨距为 64 mm 。打开万能材料试验机预热后设置压头速度 2 mm/min ,居中加载至试样断裂或变形达到 5% 。记录最大弯曲应力和挠度,计算弯曲强度。

1.4.4 缺口冲击强度测试

依据 GB/T 1043.1-2008,使用简支梁冲击试验机,将摆锤放置在合适位置,然后将试样安装在夹具上。摆角设为 150° ,冲击能量为 5 J ,冲击速度为 2.9 m/s 。打开摆锤的开关使摆锤自由下落冲击试样,冲击后读取断裂吸收能,剔除不完全断裂数据,得到缺口冲击强度。

1.4.5 热变形温度测试

依据 GB/T 1634.1-2004 测试,弯曲应力选择 0.45 MPa 。

1.4.6 粗糙度测试。

依据 GB/T 1031-2009 测试,评定参数为轮廓的算术平均偏差 Ra ($0.025\sim 6.3\text{ }\mu\text{m}$)。

2 结果与讨论

2.1 PC含量对PBT复合材料性能的影响

引入PC可改善PBT的熔体流动性,加入纳米 SiO_2 填充PBT表面微孔可降低粗糙度,因此固定纳米 SiO_2 的质量分数为 1% ,PC质量分数在 $2\%\sim 4\%$ 范围内变化(表1中的样品编号为1~5),研究PC含量对PBT复合材料表面光泽度和表面粗糙度的影响,结果如图1所示。从图1可以看出,在添加质量分数 1% 纳米 SiO_2 的基础上,改变PC含量可显著影响

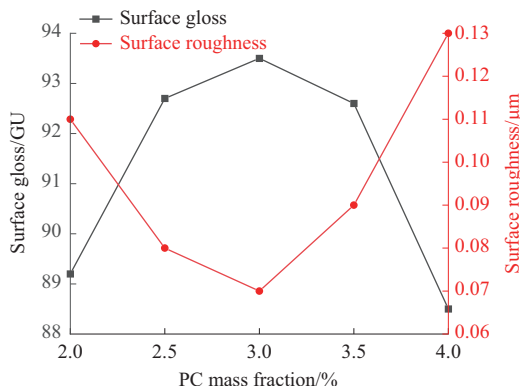


图1 PC含量对PBT复合材料表面光泽度和粗糙度的影响

Fig. 1 Effect of PC content on surface gloss and surface roughness of PBT composites

PBT复合材料的表面光泽度。当PC质量分数从 2% 增至 3% 时,光泽度(60°)由 89.2 GU 提升至 93.5 GU 。这是因为适量高透光性的PC与PBT基体通过熔融共混可形成较为均匀的相态结构,减少了表面光散射。然而,当PC质量分数超过 3% 时,因PC与PBT的熔体黏度差异增大,注塑过程中产生流痕缺陷^[6],导致光泽度下降,当PC质量分数增至 4% 时,光泽度降低至 88.5 GU 。

从图1还可以看出,PC质量分数从 2% 增至 3% 时,材料表面粗糙度从 $0.11\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.07\text{ }\mu\text{m}$,但随着PC含量进一步增加,粗糙度也随之增加,当PC质量分数增至 4% 时,粗糙度增至 $0.13\text{ }\mu\text{m}$ 。值得注意的是,当PC质量分数为 3% 时,复合材料光泽度达到峰值 93.5 GU ,试样表面粗糙度降至最低 $0.07\text{ }\mu\text{m}$,这时材料的综合表面性能更优。这是因为此时PC对PBT流动性的改善作用与纳米 SiO_2 的纳米填充效应协同优化了表面平整度^[7]。PC可能会通过相容性、加工温度和应力分布等因素影响PBT的表面粗糙度。纳米 SiO_2 颗粒可均匀填充于PBT基体的微孔中,形成“微凸起-凹陷”互锁结构。

2.2 CF含量对PBT复合材料性能的影响

为探究CF含量对PBT复合材料性能的影响规律,选取CF质量分数分别为 $0\%, 1\%, 2\%, 3\%$ (表1中的样品编号为6~9),测试了不同CF含量下PBT复合材料的性能,结果如图2、图3和图4所示。从图2可以看出,随着CF质量分数从 0% 增至 3% ,复合材料的拉伸强度先增大后减小,在CF质量分数为 2% 时达到最大值 88.5 MPa ,弯曲强度则呈现单调上升趋势,由 89.6 MPa 提高至 112.4 MPa 。这归因于CF的高强度和高模量特性及其与PBT基体的界面结合效果,通过KH-560偶联剂改性可改善CF

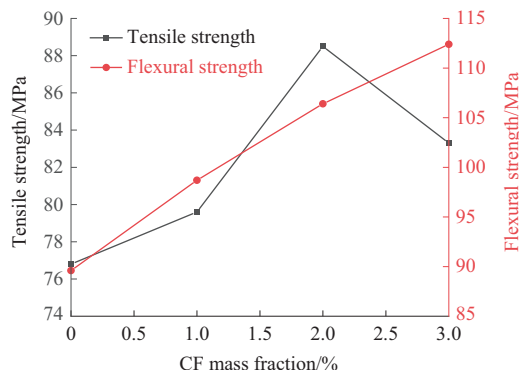


图2 CF含量对PBT复合材料拉伸强度和弯曲强度的影响

Fig. 2 Effect of CF content on tensile and flexural strength of PBT composites

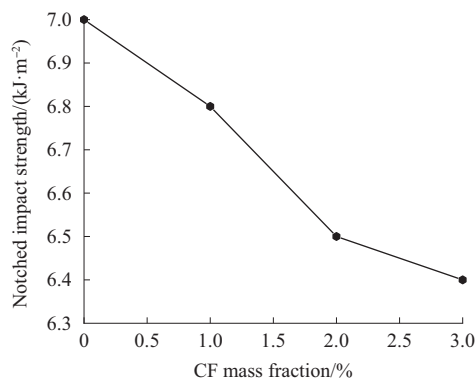


图3 CF含量对PBT复合材料缺口冲击强度的影响

Fig. 3 Effect of CF content on notched impact strength of PBT composites

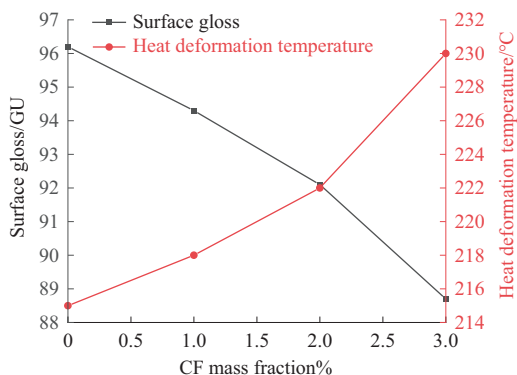


图4 CF含量对PBT复合材料表面光泽度和热变形温度的影响

Fig. 4 Effect of CF content on surface gloss and heat deformation temperature of PBT composites

与PBT的相容性。当CF含量增大时,缺口冲击强度出现下降趋势(图3),这与纤维团聚导致的应力集中有关^[18]。CF的引入显著改善了材料的耐热性(图4),当CF质量分数从0%增至3%时,材料的热变形温度从215℃提升至230℃。然而,随着CF质量分数从0%增至3%,表面光泽度(60°)从96.2 GU降至88.7 GU,这与CF裸露于表面形成的微观凹凸结构相关^[19]。通过调整注塑工艺,将模温升至110℃,可部分缓解此问题。

综合各项指标,发现CF质量分数为2%时,材料(样品8)的综合性能最佳,在保证力学性能的同时还维持了高光效果,由其制作的键帽手感显著提高。此时材料的拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度分别为88.5、106.4 MPa和6.5 kJ/m²,表面光泽度保持92.1 GU,热变形温度达到222℃。

2.3 光泽度改性剂含量对PBT复合材料性能的影响

光泽度改性剂主要用于改善制品的表面光泽度,考察了不同的光泽度改性剂含量(表1中的样品编号为10~13)对PBT复合材料性能的影响,结果如

图5和图6所示(测试过程中发现光泽度改性剂含量对复合材料弯曲强度和热变形温度影响很小,故未列出)。从图5和图6可以看出,随着光泽度改性剂含量的上升,复合材料的表面光泽度、拉伸强度和缺口冲击强度先升高后降低。光泽度改性剂内含有的丙烯酸酯基团可能与偶联剂KH-560的环氧官能团反发生化学反应或物理吸附,而KH-560通过硅烷醇基与GF/CF和其他无机填料产生结合力,从而间接使光泽度改性剂也起到一定的界面改性作用,从而使复合材料拉伸强度和缺口冲击强度提高。另外,光泽度改性剂含有丙烯酸酯结构,在注塑过程中可迁移至表面,填充微观凹陷。质量分数为1%的光泽度改性剂可形成连续光滑层,使表面光泽度提升至95.3 GU;但当光泽度改性剂质量分数增加至1.5%时可能形成团聚,导致表面光泽度和力学性能下降。当质量分数为0.3%的KH-560与1%的光泽度改性剂联合使用时,两者的协同效应

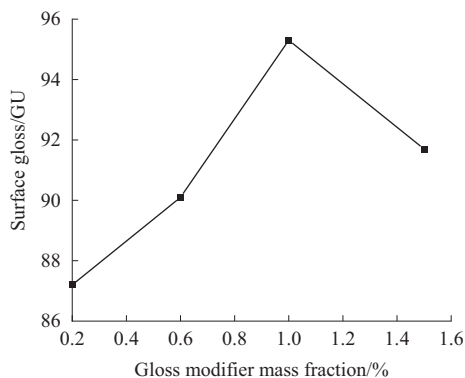


图5 光泽度改性剂含量对PBT复合材料表面光泽度的影响

Fig. 5 Effect of gloss modifier content on surface gloss of PBT composites

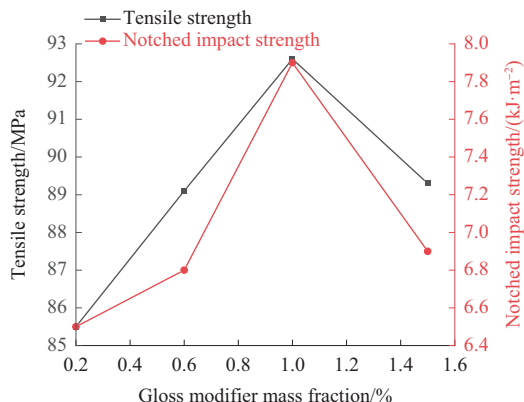


图6 光泽度改性剂含量对PBT复合材料拉伸强度和缺口冲击强度的影响

Fig. 6 Effect of gloss modifier content on tensile strength and notched impact strength of PBT composites

可使复合材料同时满足高光泽与高强度的需求。综上所述,当光泽度改性剂质量分数为1%时,复合材料(样品12)综合性能最优。

2.4 双螺杆挤出机主机转速和进料转速对复合材料性能的影响

通过调整双螺杆挤出机的主机转速和进料转速,研究不同挤出转速组合对PBT复合材料力学性能、表面光泽度及热变形温度的影响规律,测试的数据见表2(测试过程中发现挤出工艺参数对复合材料弯曲强度和缺口冲击强度影响很小,故未列出)。

由表2可知,随着主机转速和进料转速的上升,复合材料的拉伸强度先上升后下降,原因可能是适中的剪切力可以促进PBT与PC和ABS的分子链缠

结,同时避免了高转速导致的纤维断裂;复合材料的表面光泽度先上升后下降,分析原因可能是较高的剪切速率有助于纳米 SiO_2 的均匀分散,减少团聚现象,导致光泽度提升,而光泽度又下降是因为熔体温度局部过热引发PBT部分降解,使试样表面出现微裂纹,光泽度下降;复合材料的热变形温度呈现先上升后下降趋势,这是由于适中的剪切场使PC与PBT形成更完善的共结晶结构,从而提升了材料的耐热性,但是,过高的主机转速会加剧聚合物分子链的剪切降解。实验表明当主机转速为350 r/min、进料转速为255 r/min时,复合材料的拉伸强度、表面光泽度和热变形温度达到峰值,此时纤维长度保持良好,熔体压力稳定,挤出物表面光滑无气泡,材料耐热性显著提升。

表2 不同挤出转速组合下PBT复合材料的性能

Tab. 2 Performances of PBT composites processed at different extrusion rotational speeds

Main engine speed/(r·min ⁻¹)	Feeding speed/(r·min ⁻¹)	Tensile strength/MPa	Surface gloss/GU	Heat deformation temperature/°C
300	220	84.5	88.1	219
350	255	92.6	95.3	225
380	280	90.3	92.1	223
400	300	83.9	89.5	221

2.5 热升华转印工艺参数对PBT复合材料键帽涂层质量的影响

固定所有原料的含量(采用表1中的样品12),考察了热升华转印工艺参数中的升华温度和升华时间对PBT复合材料键帽涂层表面质量的影响,结果如图7和图8所示。由图7看出,升华温度与涂层性能存在显著关联,当升华温度从210 °C升至230 °C时,光泽度(60°)从82.0 GU提升至96.1 GU;但当升华温度超过240 °C后,PBT基体出现轻微热变形,这是因为热升华印刷虽然存在一定的压力变化,但相对于其他印刷方法来说,施加在键帽上的压力是比较小的,故测试的材料热变形温度虽然未

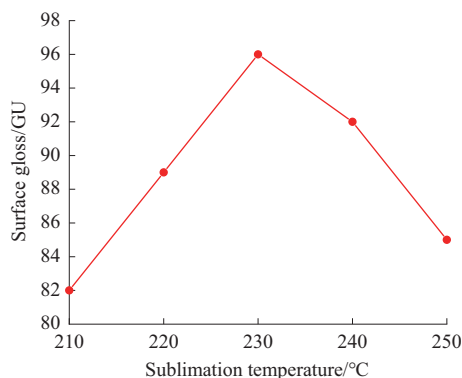


图7 升华温度对键帽涂层光泽度的影响

Fig. 7 Effect of sublimation temperatures on surface gloss of key cap coat

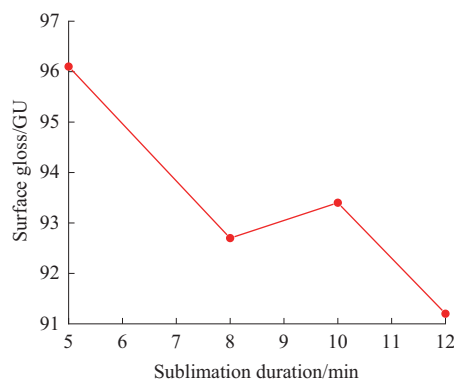


图8 升华时间对键帽涂层光泽度的影响

Fig. 8 Effect of sublimation duration on surface gloss of key cap coat

超过230 °C,但在热升华印刷时可以承受230 °C的温度。而240 °C出现的轻微热变形会导致涂层均匀性下降^[20],所以230 °C是兼顾色彩表现与PBT基体稳定性的最优升华温度。

从图8可以看出,当升华时间为5 min,键帽涂层光泽度为96.1 GU,随着升华时间增加,光泽度下降,但当升华时间由8 min增加到10 min时,涂层光泽度由92.7 GU增加到93.4 GU;再延长升华时间,涂层光泽度下降。虽然在较短的升华时间下涂层光泽度较高,但热升华使涂层表面附着力降低,未达到预期效果;而较长的升华时间会使键帽表面出现烧胶现象,表面图案模糊。实验结果证实,升华时

间 10 min 是印刷时墨水渗透效果与表面光泽度的平衡点,推测这种现象与墨水分子过度扩散导致的表面结晶结构改变有关^[21]。所以可以认为最佳的升华时间为 10 min,此时键帽涂层的光泽度为 93.4 GU。

3 结论

通过熔融共混法制备了热升华高光黑色键帽用 PBT 复合材料,研究了 PC 含量、CF 含量、光泽度改性剂含量及挤出工艺参数对 PBT 复合材料性能的影响,同时研究了热升华转印工艺参数对由该复合材料制备的键帽表面涂层光泽度的影响。对实验结果进行分析后得出以下结论。

(1)当 PC 质量分数为 3% 时,复合材料的表面光泽度最高,表面粗糙度最低,分别为 93.5 GU 和 0.07 μm ; CF 质量分数为 2% 时,复合材料具有最佳综合性能,拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度分别为 88.5、106.4 MPa 和 6.5 kJ/m^2 ,表面光泽度为 92.1 GU,热变形温度达到 222 $^{\circ}\text{C}$,满足高端键帽高温使用需求。

(2)KH-560 偶联剂(质量分数 0.3%)与光泽度改性剂(质量分数 1%)的协同作用,使纤维-基体界面结合强度提高,同时形成表面光滑层,能改善复合材料的表面光泽度和力学性能。

(3)当双螺杆挤出机主机转速和进料转速分别为 350 r/min 和 255 r/min 时,复合材料的综合性能最佳,拉伸强度为 92.6 MPa,表面光泽度为 95.3 GU,热变形温度为 225 $^{\circ}\text{C}$ 。

(4)热升华工艺参数优化实验表明,当升华温度为 230 $^{\circ}\text{C}$,升华时间为 10 min 时,可以得到较好的复合材料键帽涂层表面质量,其表面光泽度为 93.4 GU。

参考文献

- [1] 黄文朝.一种键盘材料及其制备方法:CN108504019A[P]. 2018-09-07.
HUANG Wenchao. Keyboard material and preparation method thereof:CN108504019A[P]. 2018-09-07.
- [2] 谢朝辉,吴长林,张贵雄,等.一种防水抗过敏背光型硅胶键盘材料:CN209383691U[P]. 2019-09-13.
XIE Chaohui, WU Changlin, ZHANG Guixiong, et al. Waterproof anti-allergic backlight type silica gel keyboard material: CN209383691U[P]. 2019-09-13.
- [3] 李陵洲,冉宝清,王廷,等.新能源汽车充电小门用玻纤增强 PBT/PC 复合材料的开发与应用[J].工程塑料应用,2025,53(3):40-47.
LI Lingzhou, RAN Baoqing, WANG Ting, et al. Development and application of glass fiber reinforced PBT/PC composites for charging port doors of new energy vehicles[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3):40-47.
- [4] 张艳.智能背景下数码印花技术在染整行业的应用[J].印染助剂,2020,37(8):15-18.
- [5] ZHANG Yan. Application of digital printing technology in dyeing and finishing industry under intelligent background[J]. Textile Auxiliaries, 2020, 37(8):15-18.
- [6] 熊建.高光亮耐划伤免喷 ABS 注塑包装应用研究[J].橡塑技术与装备,2025,51(4):11-14.
XIONG Jian. Research on the application of high gloss scratch resistant and spray free ABS injection molding packaging[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2025, 51(4):11-14.
- [7] 吴靖,冯金海,刘辉,等. PBT/PC 共混体系流变性能与形态结构研究[J].功能高分子学报,1994,7(3):260-264.
WU Jing, FENG Jinhai, LIU Hui, et al. Studies on rheological behavior and microstructure of PBT/PC blends[J]. Journal of Functional Polymers, 1994, 7(3):260-264.
- [8] TAN Z Y, XU X F, SUN S L, et al. Influence of rubber content in ABS in wide range on the mechanical properties and morphology of PC/ABS blends with different composition[J]. Polymer Engineering & Science, 2006, 46(10):1 476-1 484.
- [9] 种云胜,王立岩,王萌,等.碳纤维和玻璃纤维混杂增强生物基 PA56 复合材料制备及性能[J].工程塑料应用,2023,51(11):9-14.
CHONG Yunsheng, WANG Liyan, WANG Meng, et al. Preparation and properties of CF and GF hybrid reinforced bio-based PA56 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):9-14.
- [10] 高爽,李泽邦,李森,等.玻璃纤维增强复合材料拉拉疲劳研究[J].海洋工程装备与技术,2023,10(2):57-60.
GAO Shuang, LI Zebang, LI Sen, et al. Research on tensile fatigue of glass fiber reinforced composites[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2023, 10(2):57-60.
- [11] 张晓虎,孟宇,张炜.碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J].纤维复合材料,2004,21(1):50-53,58.
ZHANG Xiaohu, MENG Yu, ZHANG Wei. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced composites[J]. Fiber Composites, 2004, 21(1):50-53, 58.
- [12] 徐翔民,张宏祥,张豫徽,等.聚甲醛/纳米 SiO_2 复合材料的力学性能、结晶行为及热稳定性研究[J].塑料科技,2020,48(1):80-85.
XU Xiangmin, ZHANG Hongxiang, ZHANG Yuhui, et al. Mechanical properties, crystallization behavior and thermal stability of polyoxymethylene/nano- SiO_2 composites[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(1):80-85.
- [13] KURAM E, OZCELIK B, YILMAZ F, et al. The effect of recycling number on the mechanical, chemical, thermal, and rheological properties of PBT/PC/ABS ternary blends: With and without glass-fiber[J]. Polymer Composites, 2014, 35(10):2 074-2 084.
- [14] BASU D, BANERJEE A. Determination of optimum compatibilizer (SMA) concentration for PBT/ABS (70/30) blend using tensile strength data[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 64(8):1 485-1 487.
- [15] 刘庆云.热升华转印原纸性能对转印率的影响[J].丝网印刷,

- 2019, 37(10):28–32.
- LIU Qingyun. Effect of thermal sublimation transfer on transfer rate[J]. Screen Printing, 2019, 37(10):28–32.
- [15] ARIÑO I, KLEIST U, MATTSSON L, et al. On the relation between surface texture and gloss of injection-molded pigmented plastics[J]. Polymer Engineering & Science, 2005, 45(10):1 343–1 356.
- [16] MONTAUDO G, PUGLISI C, SAMPERI F. Mechanism of exchange in PBT/PC and PET/PC blends. Composition of the copolymer formed in the melt mixing process[J]. Macromolecules, 1998, 31(3):650–661.
- [17] SINHA R K, SRIDHAR K, PUROHIT R, et al. Effect of nano SiO₂ on properties of natural fiber reinforced epoxy hybrid composite: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 3 183–3 186.
- [18] 吴一凡, 温卫东, 崔海涛, 等. 考虑温度和纤维含量影响的单向层合板材料的退化模型[J]. 材料研究学报, 2021, 35(12): 893–902.
- WU Yifan, WEN Weidong, CUI Haitao, et al. Degradation models of unidirectional laminated board in consideration of volume fraction of reinforced fiber and temperature[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35(12):893–902.
- [19] 庞亚男, 李江华, 祁会军. CF增强PC/ABS复合材料力学性能和热学性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(11):68–72.
- PANG Yanan, LI Jianghua, QI Huijun. Study on mechanical and thermal properties of CF reinforced PC/ABS composites[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(11):68–72.
- [20] HALE W, LEE J H, KESKKULA H, et al. Effect of PBT melt viscosity on the morphology and mechanical properties of compatibilized and uncompatibilized blends with ABS[J]. Polymer, 1999, 40(13):3 621–3 629.
- [21] WELTE L, GARCÍA-COUCEIRO U, CASTILLO O, et al. Organization of coordination polymers on surfaces by direct sublimation[J]. Advanced Materials, 2009, 21(20):2 025–2 028.

(上接第47页)

- [8] 张珍颖, 韩书亮, 宋文波. 异山梨醇型聚碳酸酯合成工艺的研究进展[J]. 石油化工, 2023, 52(11):1 588–1 595.
- ZHANG Zhenying, HAN Shuliang, SONG Wenbo. Research progress on synthesis process of isosorbital polycarbonate[J]. Petrochemical Technology, 2023, 52(11):1 588–1 595.
- [9] YUM S, KIM H, SEO Y. Synthesis and characterization of isosorbide based polycarbonates[J]. Polymer, 2019, 179. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121685.
- [10] 范期程, 王亚宁, 郭明法, 等. 山梨醇杂质对异山梨醇型聚碳酸酯聚合的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(2):24–30, 53.
- FAN Qicheng, WANG Yaning, GUO Mingfa, et al. The influence of sorbitol impurity on the polymerization of isosorbide-based polycarbonate[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(2):24–30, 53.
- [11] ZHANG M, LAI W Q, SU L L, et al. Effect of catalyst on the molecular structure and thermal properties of isosorbide polycarbonates[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(14):4 824–4 831.
- [12] 王婷婷. 生物基异山梨醇型聚碳酸酯的合成及共聚物导电性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
- WANG Tingting. Synthesis of biosorbital polycarbonate and conductive performance of copolymer[D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.
- [13] ALLEN N S, EDGE M, HUSSAIN S. Perspectives on yellowing in the degradation of polymer materials: Inter-relationship of structure, mechanisms and modes of stabilisation[J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, 201. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.109977.
- [14] ZENG C, REN J W, SHEN W F, et al. Synthesis of thermal-resistant polyester-polycarbonate with fully rigid structure from biobased isosorbide[J]. Macromolecules, 2024, 57(13): 6 284 – 6 294.
- [15] YAN S D, WU G Z. Thermo-induced chain scission and oxidation of isosorbide-based polycarbonates: Degradation mechanism and stabilization strategies[J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, 202. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110028.
- [16] 储俊雨, 王卫卫, 王恒, 等. 聚碳酸酯合成工艺研究进展[J]. 辽宁化工, 2022, 51(8):1 114–1 117.
- CHU Junyu, WANG Weiwei, WANG Heng, et al. Research progress in synthesis technology of polycarbonate[J]. Liaoning Chemical Industry, 2022, 51(8):1 114–1 117.