

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.09.004

# 永久抗静电聚苯乙烯的制备及其性能

马伊<sup>1</sup>, 赵振伦<sup>1</sup>, 柳碧波<sup>1</sup>, 曹世伟<sup>1</sup>, 潘宇<sup>2</sup>, 胡纲<sup>2</sup>, 姜立忠<sup>2</sup>

(1. 沧州旭阳化工有限公司, 河北沧州 061113; 2. 北京旭阳科技有限公司, 北京 100070)

**摘要:** 为了考察永久抗静电剂 5505-5Y 对高抗冲击聚苯乙烯(PS-HI)树脂抗静电改性的使用效果, 使用 5505-5Y 作为抗静电助剂加入 PS-HI 树脂中, 通过平行异向双螺杆挤出熔融共混制备了永久抗静电 PS-HI 复合材料, 分别考察了抗静电剂 5505-5Y 含量对抗静电 PS-HI 复合材料拉伸强度、断裂伸长率、缺口冲击强度、表面电阻率、体积电阻率、熔体流动速率、结晶温度的影响。实验结果表明: PS-HI/永久抗静电剂 5505-5Y 复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度都随抗静电剂加入量的增加而降低, 强度最低值分别为 25.7 MPa 和 5.85 kJ/m<sup>2</sup>。断裂伸长率随抗静电剂加入量的增加先增加后降低; 表面电阻率和体积电阻率都随抗静电剂加入量的增加而降低, 当抗静电剂用量达到 25% 时, 表面电阻率和体积电阻率都达到最低值, 分别是  $8.0 \times 10^7 \Omega$ ,  $9.2 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ , 抗静电逾渗阈值为 15%; 熔体流动速率(MFR)随着抗静电剂用量的增加而增加, 抗静电剂用量为 25% 时, PS-HI 复合材料的 MFR 是 8.44 g/10 min, MFR 增加了 74.4%, 结晶温度不随抗静电剂加入量的增加而变化。

**关键词:** 聚酰胺弹性体; 抗静电聚苯乙烯; 永久型抗静电剂; 结晶温度; 抗静电逾渗阈值

**中图分类号:** TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)09-0021-06

## Preparation and Properties of Permanent Antistatic Polystyrene

Ma Yi<sup>1</sup>, Zhao Zhenlun<sup>1</sup>, Liu Bibo<sup>1</sup>, Cao Shiwei<sup>1</sup>, Pan Yu<sup>1</sup>, Hu Gang<sup>2</sup>, Jiang Lizhong<sup>2</sup>

(1. Cangzhou Risun Chemical Co., Ltd., Cangzhou 061113, China; 2. Beijing Risun Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract :** In order to investigate the effect of permanent antistatic agent 5505-5Y on the antistatic modification of high impact polystyrene (PS-HI) resin, 5505-5Y was added into PS-HI resin as an antistatic agent and permanent antistatic polystyrene composites were prepared by parallel-oriented twin screw extruder. The effects of antistatic agent 5505-5Y content on tensile strength, elongation at break, notch impact strength, surface resistivity, volume resistivity, melt flow index and crystallization temperature of antistatic polystyrene composites were investigated. The experimental results show that the tensile strength and notched impact strength of PS-HI/antistatic agent 5505-5Y composites decrease with the increase of the amount of antistatic agent, and the minimum strength values were 25.7 MPa and 5.85 kJ/m<sup>2</sup> respectively. The elongation at break first increases and then decreases with the increase of the amount of antistatic agent. The surface resistivity and volume resistivity both decrease with the increase of the amount of antistatic agent. The surface resistivity and volume resistivity reach the lowest values, which are  $8.0 \times 10^7 \Omega$  and  $9.2 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$  respectively, when the dosage of antistatic agent reach 25%. The melt flow rate of PS-HI composites increase with the increase of antistatic agent, it is 8.44 g/10 min increased by 74.4% when the dosage of antistatic agent is 25%. The crystallization temperature does not change with the addition of antistatic agent.

**Keywords :** thermoplastic polyamide elastomer ; antistatic polystyrene ; permanent antistatic agent ; crystallization temperature ; antistatic percolation threshold

随着经济的高速发展,人民生活水平不断的提高,人们对家用电器、文具、玩具、文教用品等的要求也越来越高,例如:外观美、质量高和轻量化等。

当前家电产品的外壳和零部件越来越多地被塑料代替,塑料制品加工方便,易染色,可以制得各式各样的外观,受到了家电领域的广泛喜爱。目前,在

通信作者: 马伊, 博士, 高级工程师, 研究方向为聚合物材料分析、改性等

收稿日期: 2023-06-28

引用格式: 马伊, 赵振伦, 柳碧波, 等. 永久抗静电聚苯乙烯的制备及其性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9): 21-26.

Ma Yi, Zhao Zhenlun, Liu Bibo, et al. Preparation and properties of permanent antistatic polystyrene[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9): 21-26.

家电领域聚苯乙烯(PS)类产品用量比较大,主要用于制备家用电器的壳体或部件,例如:洗衣机缸体、吸尘器部件、电视机后壳、空调面板、冰箱外壳和内胆等。PS是非结晶性的线型聚合物,透明性良好并且PS为绝缘树脂,表面电阻率为 $10^{20} \sim 10^{22} \Omega$ ,无抗静电性,受温、湿度、环境影响极易产生静电。静电不仅会吸附空气中的灰尘影响制品的外观,还会造成纺丝、薄膜的黏结影响生产,更严重的会使精密仪器失真、电路板被击穿等。如果可以提高PS的抗静电性,将会进一步开拓PS材料在家电和电子载带等领域的应用<sup>[1-2]</sup>。

普通型抗静电材料是指在高分子材料中添加抗静电剂而达到抗静电效果。常用的抗静电剂按化学组成的分子结构可分为表面活性剂型、高分子型、复合型三种类型。根据基体材料的用途、价格等综合考虑,选择不同类型的抗静电剂<sup>[3-8]</sup>。

沧州旭阳化工有限公司在2019年建成投产了聚酰胺热塑性弹性体工业化装置。该公司生产的聚酰胺热塑性弹性体是以聚酰胺为硬段,聚醚为软段的嵌段共聚物。该产品具有永久抗静电的特性。基于此,沧州旭阳化工有限公司开发了一系列适用于不同材料的抗静电剂产品,例如尼龙6、尼龙66、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料、聚丙烯、聚乙烯、高抗冲击聚苯乙烯(PS-HI)等<sup>[9-13]</sup>。

笔者选用沧州旭阳化工有限公司开发的以聚酰胺热塑性弹性体为基材的永久抗静电剂5505-5Y,采用共混法制备了永久抗静电PS-HI,并研究该抗静电剂用量对PS-HI复合材料物理性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PS-HI:622,上海赛科石化责任有限公司;

永久抗静电剂:5505-5Y,河北沧州旭阳化工有限公司;

抗氧剂1098、抗氧剂168:巴斯夫化工(中国)有限公司。

### 1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机:HK-36型,南京科亚化工成套装备有限公司;

注塑机:UN120SM型,广东伊之密精密机械股份有限公司;

缺口制样机:ZNO型,兹韦克罗睿试验机科技(上海)有限公司;

万能拉伸实验机:BT20KN型,兹韦克罗睿试验机科技(上海)有限公司;

摆锤冲击试验机:Zwick/Roell HIT50P型,兹韦克罗睿试验机科技(上海)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC214型,耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:MFFI-1221型,承德市金建检测仪器有限公司;

电阻测试仪:HC200SV型,北京华测实验仪器有限公司;

鼓风干燥箱:DUG-9246 A型,上海精宏实验设备有限公司;

恒温恒湿试验箱:ZH-QTH-80B型,东莞市正航仪器设备有限公司。

### 1.3 工艺流程及试样制备

工艺流程为:干燥样品(PS-HI和永久抗静电剂5505-5Y分别干燥)→简单混合(PS-HI、抗静电剂5505-5Y、抗氧剂1098、抗氧剂168)→挤出造粒→干燥→注塑制样→测试性能;

挤出工艺条件:加料段180℃,压缩段200℃,均化段235℃,口模225℃;挤出速度:350 r/min;喂料速度:14 r/min;

注塑工艺条件:加料段180℃,中间段230℃,浇口225℃;

按试验要求准确称量干燥好的原料质量,放入试样袋中手动摇匀5 min后,在双螺杆挤出机中挤出造粒。抗静电剂5505-5Y母粒添加的质量分数分别为0%,5%,10%,15%,20%,25%。改性粒子干燥后用注塑机制备标准样条。

表1 抗静电PS-HI配方

| 原料            | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| PS-HI 622     | 99.5           | 94.5           | 89.5           | 84.5           | 79.5           | 74.5           |
| 永久抗静电剂5505-5Y | 0              | 5              | 10             | 15             | 20             | 25             |
| 抗氧剂168        | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3            |
| 抗氧剂1098       | 0.2            | 0.2            | 0.2            | 0.2            | 0.2            | 0.2            |

### 1.4 性能测试

试样在测试之前需要恒温恒湿处理,恒温恒湿箱参数为RH 50%,25℃。

表面电阻/体积电阻率测试:试样方板尺寸10 mm×10 mm×2 mm,试样恒温恒湿处理48 h。

结晶温度测试:按GB/T 19466.3-2004在氮气气氛下进行测试,升温速率10℃/min,测试温度范围40~275℃。

MFR测试:按GB/T 3682-2000测试,测试条件为200℃,载荷5 kg。

拉伸性能测试:按GB/T 1040-2018测试,拉伸速率为50 mm/min,试样尺寸170 mm×10 mm×4 mm,试样恒温恒湿处理24 h。

缺口冲击性能测试:按GB/T 1843-2008测试,试样尺寸80 mm×10 mm×4 mm,缺口为A型,试样恒温恒湿处理24 h。

## 2 实验结果及讨论

抗静电剂的作用原理主要有两个:一是在材料表面形成抗静电剂薄膜,依靠薄膜的吸湿性和导电性使产品积累的静电消散而达到抗静电的效果;二是赋予材料表面一定的润滑性,降低摩擦系数,减少静电的产生。高分子型永久抗静电剂与表面活性剂型抗静电剂相比添加量大,对改性基材的性能影响也较大。常用的高分子型永久抗静电剂的添加量一般为15%~25%,笔者选用的永久抗静电剂5505-5Y是聚酰胺弹性体型的永久抗静电剂,聚酰胺弹性体与PS-HI的相容性有一定的相容性,在本试验范围内添加的助剂会对PS-HI的力学性能产生较大的影响。笔者就相容剂进行讨论,因只进行了简单的共混改性,试验结果能揭示抗静电剂对物理性能的影响程度,为今后进一步改性提供依据。

### 2.1 拉伸强度及断裂伸长率

不同抗静电剂5505-5Y添加量时抗静电PS-HI复合材料拉伸性能如图1所示。

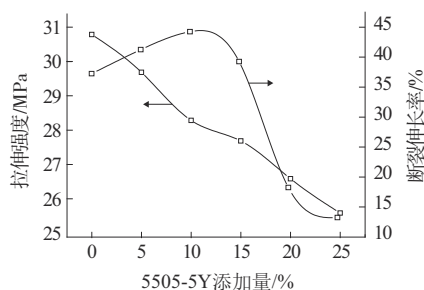


图1 5505-5Y不同含量时抗静电PS-HI复合材料拉伸性能

从图1中可知,抗静电PS-HI复合材料的拉伸强度随5505-5Y加入量的增加而降低。5505-5Y加入质量分数为0%时PS-HI的拉伸强度为30.9 MPa,而其加入量达到25%时复合材料的拉伸强度为25.7 MPa,比纯PS-HI的拉伸强度降低了16.8%。从图1可知,抗静电PS-HI复合材料的断裂伸长率随5505-5Y加入量的增加先增加后降低。当抗静电剂的加入量在10%以内时PS-HI的断裂伸长率随抗静

电剂加入量的增加而增加。当抗静电剂加入量在15%~25%范围内时,PS-HI的断裂伸长率随抗静电剂加入量的增加而降低。这主要是因为抗静电剂5505-5Y是尼龙6型嵌段共聚弹性体,其玻璃化转变温度低、韧性好、强度低,它的加入会使得PS-HI基体拉伸强度降低。

抗静电PS-HI的断裂伸长率随抗静电剂加入量先增加后降低是因为抗静电剂是聚酰胺弹性体,其断裂伸长率在150%左右。聚酰胺弹性体与PS-HI有一定的相容性,少量添加时可以起到增韧的作用,所以抗静电PS-HI的断裂伸长率随之增大。当添加量较大时,PS-HI基体与聚酰胺弹性体相分离严重,韧性变差,断裂伸长率随之降低。

### 2.2 缺口冲击强度

图2为5505-5Y不同含量时抗静电PS-HI复合材料缺口冲击强度。由图2可知,抗静电PS-HI复合材料的缺口冲击强度随着抗静电剂5505-5Y加入量的增加而逐渐降低。当抗静电剂加入质量分数较低时( $\leq 10\%$ ),体系缺口冲击强度由纯PS-HI的14.03 kJ/m<sup>2</sup>下降到12.32 kJ/m<sup>2</sup>,体系的缺口冲击强度下降了12.2%,降幅较小。当抗静电剂加入量较高时( $\geq 15\%$ ),体系缺口冲击强度由7.15 kJ/m<sup>2</sup>下降到5.85 kJ/m<sup>2</sup>,体系的缺口冲击强度下降了18.2%,降幅较小。然而当抗静电剂加入量由10%增加到15%时,体系的缺口冲击强度由12.32 kJ/m<sup>2</sup>降低到7.15 kJ/m<sup>2</sup>,降幅达到了42.0%。

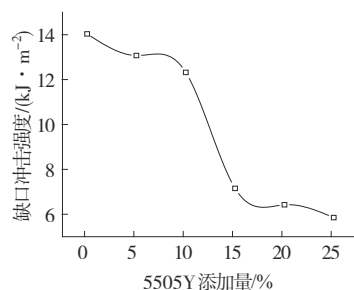


图2 5505-5Y不同含量时抗静电PS-HI复合材料缺口冲击强度

PS-HI中的聚丁二烯橡胶含量为5%~15%,PS-HI的高抗冲性是由基体中的橡胶粒子提供的。橡胶粒子作为应力集中点诱发大量的银纹和剪切带,并且控制了银纹的发展,使银纹终止而不会发展成破坏性裂纹。抗静电剂是聚酰胺热塑性弹性体与PS-HI有一定的相容性,加入量少时对体系冲击强度破坏较小。但是抗静电剂加入量较大时,其与PS-HI相容性差,难以传递和吸收应力,造成冲击性

能的下降。

### 2.3 抗静电的特点

表面活性剂型抗静电剂相对分子质量较低,在使用过程中,通过抗静电剂不断从内部迁移到材料表面,通过端基的亲水基团吸收空气中的水分,疏导静电电荷,降低塑料基体的表面电阻。表面活性剂型抗静电剂使用时依赖一定的外部条件,即环境的空气湿度、表面活性剂迁移时间、摩擦或洗涤引起表面活性剂损失量等。这就造成表面活性剂型抗静电剂的抗静电效果有一定的时间限制,不是永久性的。

高分子型抗静电剂在加工过程中,会在基体中形成微细筋状结构,中心接近球状分布,这些结构能为静电荷泄漏提供导电通路。此类抗静电剂不完全靠表面吸水来释放静电,受湿度影响较小,同时高分子型抗静电剂的相对分子质量大,不会发生迁移,也不受摩擦、洗涤的影响,抗静电效果持久。

表2是选用抗静电剂5505-5Y改性并注塑后,在室温下放置不同时间后复合材料表面电阻率。

表2 放置时间对抗静电复合材料表面电阻率的影响  $\times 10^5 \Omega$

| 0 h | 1 h | 3 h | 5 h | 7 h | 15 h | 17 h |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 84  | 33  | 24  | 13  | 23  | 14   | 9.7  |

注:0 h表示抗静电剂样板注塑后直接测试;1 h表示抗静电剂样板在室温下放置1 h后测试。

由表2可知,5505-5Y改性PS-HI材料注塑后直接测试的电阻率是 $8.4 \times 10^6 \Omega$ 。抗静电剂样板在空气中放置时间的延长,样板的表面电阻率逐渐降低,在 $2.3 \times 10^6 \Omega$ 附近保持稳定。刚注塑完的样板经历了注塑前干燥除水和注塑时 $230^\circ\text{C}$ 的高温,材料含水率为0,可以认为其抗静电性不依赖水分的作用。同时5505-5Y是聚酰胺热塑性弹性体,其分子量在2万以上,不能迁移。这两点是明显区别于表面活性剂型抗静电剂的,与高分子型永久抗静电剂的不依赖水分、抗静电平稳、持久的特点相符合。

### 2.4 表面电阻率和体积电阻率

表面电阻率和体积电阻率是衡量抗静电材料电性能的主要指标,尤其是表面电阻率的应用更广泛。绝缘材料、抗静电材料、半导体材料和导电材料便是用表面电阻率来划分界线的。

图3~图4分别为抗静电剂添加量对抗静电PS-HI表面电阻率和体积电阻率的影响。由图3~图4可知,PS-HI的表面电阻率和体积电阻率都随着抗静电剂5505-5Y添加量的增加而降低。当抗静电剂

添加量达到15%时,表面电阻率和体积电阻率分别是 $6.9 \times 10^9 \Omega$ ,  $3.1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ,达到抗静电材料的表面电阻率要求。当抗静电剂添加量达到25%时,表面电阻率和体积电阻率分别是 $8.0 \times 10^7 \Omega$ ,  $9.2 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。当抗静电剂的添加量在5%~10%和20%~25%两个区间时除了5%的添加量比纯PS-HI的表面电阻率降低了3个数量级,其他的添加量比前一添加量的表面电阻率只降低1个数量级。然而抗静电剂添加为5%时,PS-HI的表面电阻率只有 $4.7 \times 10^{12} \Omega$ ,属于绝缘体的范畴,其电性能未发生突变。抗静电剂添加15%时的复合材料表面电阻率比添加10%时降低了2个数量级,由 $3.9 \times 10^{11} \Omega$ 降低到 $6.9 \times 10^9 \Omega$ 。可以认为抗静电PS-HI的逾渗阈值为15%。当抗静电剂的添加量超过15%以后,PS-HI材料的表面电阻和体积电阻率依然随抗静电剂的增加而降低,但是降低的幅度非常缓慢。这主要是因为抗静电剂之间的平均间距对复合材料电导率的影响远大于填料体积分数的影响。当抗静电剂用量达到逾渗阈值后,复合材料内部形成导电网络,抗静电剂粒子之间的平均间距大幅度减少,使得复合材料的抗静电性能显著提高。再增加抗静电剂的体积分数,导电网络的密度会增加,但对导电网络上抗静电剂粒子平均间距的进一步减小的贡献不大,所以抗静电性能提升幅度小<sup>[14-15]</sup>。

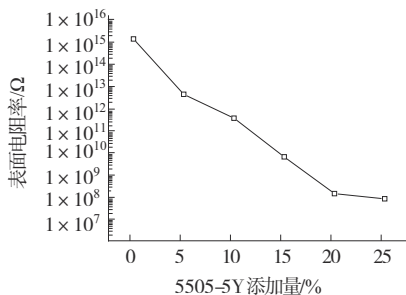


图3 5505-5Y不同含量时抗静电PS-HI复合材料的表面电阻率

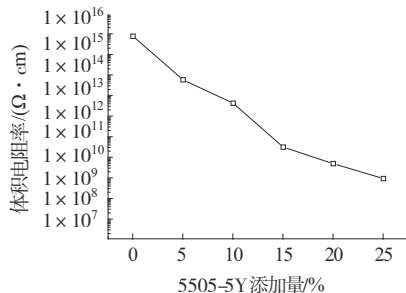


图4 5505-5Y不同含量时抗静电PS-HI复合材料的体积电阻率

### 2.5 MFR

表3为抗静电剂添加量对PS-HI复合材料的

MFR的影响。由表3可知,抗静电 PS-HI 复合材料的 MFR 随着抗静电剂用量的增加而增加。纯 PS-HI 的 MFR 是 4.84 g/10 min;抗静电剂用量为 25% 时,PS-HI 复合材料的 MFR 是 8.44 g/10 min, MFR 增加了 74.4%。这是因为抗静电剂 5505-5Y 是高流动性聚合物,其 MFR 是 17.5 g/10 min,远高于纯 PS-HI 的 MFR。所以抗静电剂的加入提高了 PS-HI 复合材料的 MFR,并且加入量越大, MFR 越大。

表3 抗静电剂不同含量时 PS-HI 复合材料的 MFR g/10 min

| 项目  | 0    | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  | 25%  |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| MFR | 4.84 | 4.90 | 5.72 | 6.36 | 6.72 | 8.44 |

注: MFR 的测试条件为: 200 °C, 砝码质量为 5 kg。

## 2.6 结晶温度

PS-HI 是非结晶型聚合物,所用抗静电剂 5505-5Y 是结晶型聚合物。抗静电剂 5505-5Y 是由聚酰胺热塑性弹性体制备的,其结构为聚酰胺硬段与聚醚软段嵌段共聚。聚酰胺弹性体的力学性能、耐热性、耐磨性、耐溶剂性和结晶性都是由聚酰胺硬段提供,耐低温性能、柔韧性是由聚醚软段提供。聚酰胺弹性体的结晶性能已经有相关的报道<sup>[16]</sup>,在此不再做讨论。图5是抗静电剂 5505-5Y 含量对抗静电 PS-HI 复合材料结晶温度的影响,表4汇总了图5中各条曲线的结晶温度。

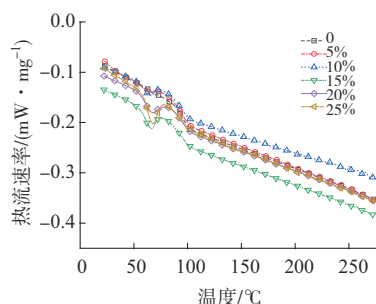


图5 5505-5Y 不同含量时抗静电 PS-HI 复合材料的结晶温度

表4 抗静电剂不同含量时 PS-HI 复合材料的结晶温度 °C

| 项目   | 0 | 5%    | 10%   | 15%   | 20%   | 25%   |
|------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| 结晶温度 |   | 65.45 | 65.18 | 66.05 | 67.62 | 67.49 |

由图5可知,纯 PS-HI 没有结晶温度,抗静电 PS-HI 复合材料有结晶温度,结晶曲线随抗静电剂用量的增加而增大。这主要是因为抗静电 PS-HI 复合材料的结晶性是由抗静电剂 5505-5Y 提供的,抗静电剂用量的增加会导致结晶时放热量的增加。由表4可知,随抗静电剂用量增加,抗静电 PS-HI 复合材料结晶温度在 65.18 ~ 67.62 °C 之间波动。波动的温度区间是 2.44 °C,可以认为是测量误差。这说

明基体材料 PS-HI 对抗静电剂 5505-5Y 的结晶性能没有影响。

## 3 结论

(1)永久抗静电剂 5505-5Y 可以有效降低 PS-HI 的体积电阻率和表面电阻,使 PS-HI 复合材料达到抗静电的性能要求。

(2)抗静电 PS-HI 复合材料的抗静电逾渗阈值为 15%。

(3)抗静电 PS-HI 复合材料的表面电阻率和体积电阻率都随抗静电剂 5505-5Y 加入量的增加而降低,当抗静电剂添加量达到 25% 时,表面电阻率和体积电阻率分别是  $8.0 \times 10^7 \Omega$ ,  $9.2 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

(4)抗静电 PS-HI 复合材料的拉伸强度、缺口冲击强度随抗静电剂 5505-5Y 加入量的增加而降低, MFR 的表现与之相反。

(5)抗静电 PS-HI 复合材料的结晶温度与抗静电剂 5505-5Y 的加入量没有关系。

## 参考文献

- [1] 李杨. 聚苯乙烯树脂及其应用[M]. 化学工业出版社, 2015: 103-111.  
Li Yang. Polystyrene resin and its application[M]. Chemical Industry Press, 2015: 103-111.
- [2] 罗河胜. 实用聚苯乙烯[M]. 广州: 广东科技出版社, 1993: 1-15.  
Luo Hesheng. Practical polystyrene[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1993: 1-15.
- [3] 刘志维. 抗静电 HDPE 和 HIPS 片材的研究[D]. 北京化工大学硕士论文, 2009: 3-8.  
Liu Zhiwei. Research on HDPE antistatic sheet and HIPS antistatic sheet[D]. Master's thesis in Beijing University of Chemical Technology, 2009: 3-8.
- [4] 孙殿波, 邱敦瑞, 童敏伟. 高分子型抗静电剂的制备[J]. 现代塑料加工应用, 2010, 22(6): 39-40.  
Sun Dianbo, Qiu Dunrui, Tong Minwei. Preparation of polymer antistatic agent[J]. Modern Plastics Processing And Applications, 2010, 22(6): 39-40.
- [5] 刘慧珍, 孙连强, 蒋杰. 国内外高分子型抗静电剂的研究进展[J]. 杭州化工, 2017, 47(1): 5-8.  
Liu Huizhen, Sun Lianqiang, Jiang Jie. Research progress of polymer antistatic agent at home and abroad[J]. Hangzhou Chemical Industry, 2017, 47(1): 5-8.
- [6] 熊佳. 导电复合材料的制备及其性能研究[D]. 西安: 西北工业大学优秀硕士论文, 2002: 23-24.  
Xiong Jia. Preparation and properties of conductive polymer composite[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002: 23-24.
- [7] Vieira L, dos Anjos E G R, Verginio G E A, et al. Carbon based materials as antistatic agents for the production of antistatic packaging materials[M]. Carbon, 2017, 115: 1-10.

- ing: a review[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(4):3 929–3 947.
- [8] Kuo Y C, Lee C H, Rajesh R. Iron oxide-entrapped solid lipid nanoparticles and poly(lactide-co-glycolide) nanoparticles with surfactant stabilization for antistatic application[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1):887–895.
- [9] 胡纲,赵振伦,潘宇,等.永久抗静电ABS性能研究[J].工程塑料应用,2020,48(11):33–37.
- Hu Gang, Zhao Zhenlun, Pan Yu, et al. Study on properties of permanent antistatic ABS[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11):33–37.
- [10] 赵振伦,姜立忠,潘宇,等.永久型抗静电PA6制备及性能[J].工程塑料应用,2020,48(12):36–40.
- Zhao Zhenlun, Jiang Lizhong, Pan Yu, et al. Preparation and properties of permanent antistatic polyamide 6[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12):36–40.
- [11] 杨留杰,刘冬然,冉围,等.永久型抗静电PA66复合材料的性能探讨[J].河南化工,2021,38(9):28–33.
- Yang Liujie, Liu Dongran, Ran Wei, et al. Discussion on properties of permanent antistatic PA66 composites[J]. Henan Chemical Industry, 2021, 38(9):28–33.
- [12] 吕强.无卤阻燃永久抗静电GFPP材料研制[J].工程塑料应用,2021,49(1):30–33,39.
- Lyu Qiang. Preparation of halogen-free flame retarded and permanent antistatic glass-fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 49(1):30–33,39.
- [13] 闫东广,张远,周昱,等.一步法制备聚酰胺聚醚弹性体及其在抗静电ABS材料中的应用[J].高分子材料科学与工程,2020,36(2):155–160.
- Yan Dongguang, Zhang Yuan, Zhou Yu, et al. Preparation of polyamide-block-polyether copolymer based on one-step method and its application in permanent antistatic ABS[J]. Polymer Materials Science And Engineering, 2020, 36(2):155–160.
- [14] 高小龙.空间限域强制组装法制备高性能聚合物基导电复合材料机理的研究[D].北京:北京化工大学,2017.
- Gao Xiaolong. The mechanism of a novel method of spatial confining forced network assembly for preparation of high-performance conductive polymeric composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [15] Zhang S, Deng H, Zhang Q, et al. Formation of conductive networks with both segregated and double-percolated characteristic in conductive polymer composites with balanced properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6:6 835–6 844.
- [16] 潘宇,姜立忠,赵振伦,等.不同硬度热塑性聚酰胺弹性体非等温结晶动力学[J].工程塑料应用,2020,48(10):110–115.
- Pan Yu, Jiang Lizhong, Zhao Zhenlun, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of TPAE with different hardness[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10):110–115.

(上接第7页)

- [14] Bauer M, Beratz S, Ruhland K, et al. Anodic oxidation of carbon fibers in alkaline and acidic electrolyte: Quantification of surface functional groups by gas-phase derivatization[J]. Applied Surface Science, 2020(506). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144947.
- [15] He D, Soo V K, Stojcevski F, et al. The effect of sizing and surface oxidation on the surface properties and tensile behaviour of recycled carbon fibre: An end-of-life perspective[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020(138). DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106072.
- [16] 于广,魏化震,李大勇,等.碳纤维上浆剂及其对复合材料界面性能的影响研究进展[J].工程塑料应用,2019,47(2):143–147.
- Yu Guang, Wei Huazhen, Li Dayong, et al. Research progress of carbon fiber sizing agent and its effects on interface properties of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2): 143–147.
- [17] 水兴瑶,刘猛,朱曜峰,等.水性上浆剂对碳纤维表面及碳纤维/环氧树脂复合材料界面性能的影响[J].复合材料学报,2016,33(2):273–279.
- Shui Xingyao, Liu Meng, Zhu Yaofeng, et al. Effects of waterborne sizing agent on fiber surface and properties of carbon fiber/epoxy composites interface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2):273–279.
- [18] Eyckens D J, Servinis L, Scheffler C, et al. Synergistic interfacial effects of ionic liquids as sizing agents and surface modified carbon fibers[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(10): 4 504–4 514.
- [19] Gargano A, Galos J, Mouritz A P. Importance of fibre sizing on the seawater durability of carbon fibre laminates[J]. Composites Communications, 2020(19):11–15.
- [20] Downey M A, Drzal L T. Toughening of carbon fiber-reinforced epoxy polymer composites utilizing fiber surface treatment and sizing[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016(90):687–698.
- [21] 刘程,蹇锡高.含二氮杂萘酮联苯结构热塑性聚芳醚树脂基复合材料研究进展[J].高分子通报,2011(9):52–62.
- Liu Cheng, Jian Xigao. Recent progress in thermoplastic composites based on poly(aryl ether)s containing phthalazinone moiety [J]. Polymer Bulletin, 2011(9):52–62.
- [22] 王立伟.油田用碳纤维增强杂萘联苯聚芳醚复合材料及其工程化研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- Wang Liwei. Fabrication and engineering study of carbon fiber reinforced high performance phthalazinone-containing poly(aryl ether) resin composites for oil field[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [23] 王锦艳,蹇锡高.耐高温杂萘联苯聚芳醚材料在电绝缘领域的应用[J].绝缘材料,2016,49(10):17–23.
- Wang Jinyan, Jian Xigao. Application of high performance phthalazinone-containing resins in insulating materials[J]. Insulating Materials, 2016, 49(10):17–23.