

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.10.006

咪唑基离子液体改性 PET 在 3D 打印中的应用

王中立^{1,2}, 胡先海^{2,3}, 程从亮^{2,3}, 谢金刚^{1,3}

(1. 安徽职业技术学院建筑工程学院, 合肥 230011; 2. 安徽省先进建筑材料重点实验室, 合肥 230022;

3. 安徽建筑大学材料与化学工程学院, 合肥 230022)

摘要: 利用自合成的咪唑基离子液体 (Imi-ILs)——氯化 1-磷酸乙酯-3-甲基咪唑盐对聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 进行共混改性, 研究了 Imi-ILs 对 PET 结晶性能的影响, 以及改性后 PET 材料的熔体流动情况, 分析了改性后 PET 材料 3D 打印产品的表面粗糙度和打印精度, 并通过数值分析推导出最大翘曲变形计算公式。结果发现, 随着 Imi-ILs 含量的增加, 改性 PET 材料的结晶峰向低温方向移动, 起始结晶温度和结晶峰温度均减少, 结晶峰半高宽也在减少, 结晶速率加快, 熔体流动性有所增大, 打印精度有所提高, 并且推导出的最大翘曲变形计算公式的计算结果与实际情况趋势一致。

关键词: 聚对苯二甲酸乙二醇酯; 3D 打印精度; 咪唑基离子液体; 数值分析

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)10-0030-06

Application of Polyethylene Terephthalate Modified by Imidazolyl Ionic Liquids in 3D Printing

Wang Zhongli^{1,2}, Hu Xianhai^{2,3}, Chen Congliang^{2,3}, Xie Jingang^{1,3}

(1. College of Architectural Engineering, Anhui Vocational and Technical College, Hefei 230011, China; 2. Anhui Key Laboratory of Advanced Building Materials, Hefei 230022, China; 3. College of Materials and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China)

Abstract: Polyethylene terephthalate (PET) was modified by self-synthesized imidazolium ionic liquids (Imi-ILs)——chlorinated 1-ethyl phosphate-3-methylimidazole salt. The effect of Imi-ILs on the crystallization properties and melt flow of PET were studied. The surface roughness and printing accuracy of 3D printing products of modified PET were analyzed. The formula for calculating the maximum warpage deformation was deduced by numerical analysis. The results showed that, with the increase of Imi-ILs content, the crystallization peak of modified PET moved to low temperature, the initial crystallization temperature and the crystallization peak temperature decreased, the half-width of the crystallization peak decreased, the crystallization rate accelerated, the melt fluidity increased, and the printing accuracy improved. The formula for calculating the maximum warpage deformation was deduced to calculate the crystallization, and the results were consistent with the actual situation.

Keywords: polyethylene terephthalate; 3D printing accuracy; imidazolium ionic liquids; numerical analysis

热熔融沉积型 (FDM 型) 3D 打印工艺价格低廉、材料易得, 目前在珠宝加工、制鞋、建筑、汽车、医疗与航空航天等领域得到广泛应用, 在工业领域有着非常广阔的发展前景。聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 材料作为新兴 3D 打印材料, 兼具传统聚乳酸材料的易用性和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯材料良好的层间粘合性, 在打印中不会产生难闻的气味, 表面光泽度也较高, 力学性能方面基本可以满足对刚性

和韧性的需求。但 PET 材料较高的结晶度导致其收缩率较大, 打印精度较差, 限制了 PET 材料在 3D 打印领域的进一步应用^[1-7]。

离子液体是指由有机阳离子和有机或无机阴离子组成的化合物, 在常态下呈液态。近年来, 离子液体作为“绿色溶剂”和“绿色介质”在有机合成、催化、萃取与分离等领域引起了国内外学术和工业界研究人员的广泛关注。根据相关文献报道^[8-17],

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51573001), 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2018A0707), 安徽省自然科学基金项目 (1908085MB55)

通讯作者: 胡先海, 博士, 副教授, 主要从事 3D 打印材料开发、3D 打印工艺研究 E-mail: king370@126.com

收稿日期: 2019-07-20

引用格式: 王中立, 胡先海, 程从亮, 等. 咪唑基离子液体改性 PET 在 3D 打印中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10):30-35.

Wang Zhongli, Hu Xianhai, Chen Congliang, et al. Application of polyethylene terephthalate modified by imidazolyl ionic liquids in 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):30-35.

特殊结构的离子液体对聚合物具有增塑作用,是潜在的高性能增塑剂,而且对聚合物链的运动能力、晶体结构和相结构的形成与演化过程具有显著影响。因此,设计特殊结构的离子液体对 PET 材料进行改性,具有较好的应用前景。

笔者拟利用自合成的咪唑基离子液体 (Imi-ILs)——氯化 1-磷酸乙酯-3-甲基咪唑盐 ([TCEPMIM][Cl]) 对 PET 进行共混改性,研究了 Imi-ILs 对 PET 结晶性能的影响以及改性后 PET 材料的熔体流动情况,考察了 Imi-ILs 与 PET 的相容性,分析了改性后 PET 材料 3D 打印产品的力学性能和打印精度,并通过建模推导出最大翘曲形变理论计算公式,以期能够优化 PET 材料的 3D 打印工艺性能。

1 实验部分

1.1 原材料

PET 树脂: WP56152, 普什集团有限公司;

抗氧化剂 1010、抗氧化剂 168: 德国巴斯夫公司;

热稳定剂: FT-4288, 广东凡田科技有限公司;

[TCEPMIM][Cl] 离子液体: 自合成, 结构式如图 1 所示。

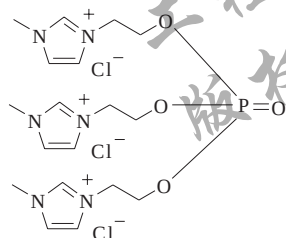


图 1 [TCEPMIM][Cl] 离子液体的结构式

1.2 仪器及设备

差示扫描量热 (DSC) 仪: DSC-3 型, 瑞士梅特勒-托利多公司;

FDM 型 3D 打印机: FDM-1 型, 芜湖林一科技有限公司;

线材挤出机: SESIL-20 / 28 型, 广州三奥科技有限公司;

双螺杆挤出机: STS-35 型, 科倍隆 (南京) 机械有限公司;

熔体流动速率 (MFR) 仪: TST-R804 型, 东莞特斯特仪器有限公司;

光学显微镜: 4XC-MS 型, 瑞戈 (上海) 实业有限公司;

表面粗糙仪: 3200 型, 上海高致精密仪器有限

公司;

三坐标测量机: HSD-GX565 型, 东莞惠仕达仪器有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-3400N 型, 日本 Hitachi 公司。

1.3 试样制备

将 PET 材料在 150 ℃ 下烘干 5 h, 然后将指定配比的 PET 与 Imi-ILs 放入双螺杆挤出机中进行挤出造粒, 挤出温度为加料段 250 ℃, 熔融段 260 ℃, 计量段 250 ℃, 螺杆转速为 140 r/min。将 Imi-ILs 改性 PET 粒料放入线材挤出机进行挤出, 获得 3D 打印线材待用, 线材厚度为 1.75 mm, 挤出温度为 260 ℃。使用 FDM 型 3D 打印机制备长方体制件, 喷头温度 240 ℃, 尺寸规格为 20 mm × 13 mm × 22 mm。各样品配方如表 1 所示。

表 1 PET 样品配方

样品编号	PET	Imi-ILs	抗氧化剂 1010	抗氧化剂 168	热稳定剂
1 [#]	100	0	0.01	0.005	0.002
2 [#]	100	1	0.01	0.005	0.002
3 [#]	100	2	0.01	0.005	0.002
4 [#]	100	3	0.01	0.005	0.002
5 [#]	100	4	0.01	0.005	0.002
6 [#]	100	5	0.01	0.005	0.002

1.4 测试与表征

结晶性能使用 DSC 仪分析, 样品用量为 5 mg, 在氮气保护下以 20 ℃ / min 速率从室温升至 280 ℃ 保温 2 min 以消除热历史, 然后以 10 ℃ / min 速率降至室温, 记录结晶过程的 DSC 曲线;

MFR 按 GB / T3682.2-2018 测定, 测试条件为 280 ℃ / 5 kg / 半标准口模;

断面形貌使用 SEM 观察, 样品在液氮中淬断, 使用去离子水抽提 24 h 后观察;

表面粗糙度使用表面粗糙仪测定, 测定探针在线材表面 5 mm 距离内的数值;

打印制件的尺寸误差和翘曲形变量使用三坐标测量机测定。

2 结果与分析

2.1 DSC 分析

不同含量 Imi-ILs 改性 PET 的降温 DSC 曲线如图 2 所示, 相应起始结晶温度 (θ_{sc})、结晶峰温度 (θ_{cp})、结晶峰半高宽 ($W_{1/2}$) 等结晶动力学参数见表 2。

从图 2 和表 2 可以看出, 随着 Imi-ILs 含量的增加, 改性 PET 材料的结晶峰向低温方向移动, θ_{sc}

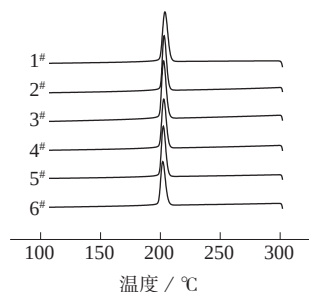


图2 不同含量 Imi-ILs 改性 PET 的降温 DSC 曲线

表2 不同含量 Imi-ILs 改性 PET 的结晶动力学参数 / °C

样品编号	θ_{cp}	θ_{sc}	$\theta_{cp}-\theta_{sc}$	$W_{1/2}$
1 [#]	199.3	204.2	4.9	5.9
2 [#]	199.0	203.9	4.9	6.0
3 [#]	198.1	202.6	4.5	5.4
4 [#]	198.0	202.2	4.2	5.2
5 [#]	197.7	201.7	4.0	5.1
6 [#]	197.4	201.3	3.9	4.9

和 θ_{cp} 均减少, $W_{1/2}$ 也在减少。这是由于 Imi-ILs 对 PET 材料具有一定增塑效果,促使大分子链运动性能增强,并且 Imi-ILs 的离子基团通过偶极力诱导 PET 分子链产生定向化排列,促进了 PET 的成核过程。但是当 Imi-ILs 含量较高时出现团聚现象,造成晶核数量有所降低,因而造成结晶温度有所降低。 θ_{cp} 与 θ_{sc} 的差值可以用于表征结晶速率的快慢,从表 2 可以看出, $\theta_{cp}-\theta_{sc}$ 值随着 Imi-ILs 含量的增加有降低的趋势,说明结晶速率加快,这也说明 Imi-ILs 对 PET 具有增塑作用,使得 PET 分子链运动性增强、促使结晶速率加快, $W_{1/2}$ 的减小也说明了这一点。

2.2 熔体流动性分析

不同含量 Imi-ILs 改性 PET 的 MFR 如表 3 所示。

表3 不同含量 Imi-ILs 改性 PET 的 MFR g/10 min

样品编号	MFR
1 [#]	83.74
2 [#]	84.58
3 [#]	84.41
4 [#]	90.27
5 [#]	92.20
6 [#]	93.96

从表 3 可看出,在 Imi-ILs 含量较低时,改性 PET 材料的 MFR 变化不大。当 Imi-ILs 添加量超过 2% 时, MFR 不断上升,其中 Imi-ILs 添加量为 5 份时的 MFR 比未添加时上升 12.2%。这是由于 Imi-ILs 中的离子基团抑制了分子链的缠结倾向,缠结度有所下降,从而使流动阻力下降。另一方面 Imi-ILs 在大分子链中存在润滑作用,其结构中的负离子起到关键作用。Imi-ILs 中的负离子 Cl^- 在偶

极力作用下易吸附在 PET 分子链周围,正离子(咪唑)部分体积较大,对负离子部分形成屏蔽效应,保护负离子稳定在 PET 分子链周围,整体形成有效的“链间润滑膜”结构,因而达到润滑效果。

2.3 相容性分析

不同含量 Imi-ILs 改性 PET 线材的断面形貌如图 3 所示。

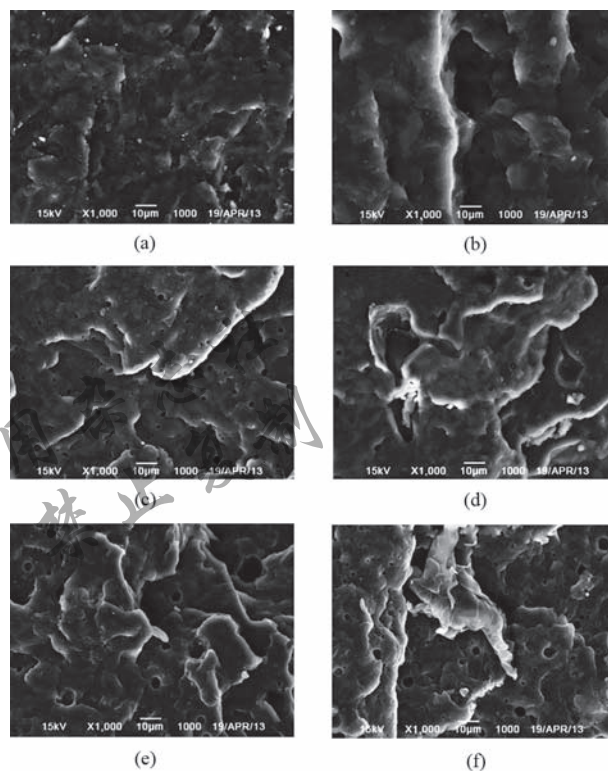
a—1[#]; b—2[#]; c—3[#]; d—4[#]; e—5[#]; f—6[#]

图3 不同含量 Imi-ILs 改性 PET 线材断面形貌

从图 3 可以看出, Imi-ILs 含量较低时,断面处空洞较少,表面较光滑, Imi-ILs 在 PET 内部分散均匀;当 Imi-ILs 含量达到 5 份时,断裂面出现较大空洞, Imi-ILs 有团聚倾向。这是由于 Imi-ILs 咪唑结构导致其极性较强,同时 PET 中的酯基也有一定极性,偶极力作用促使二者有较好的相容性;当 Imi-ILs 含量较高时, Imi-ILs 的正负离子间相互缔合,从而导致出现部分团聚。

2.4 3D 打印精度分析

不同含量 Imi-ILs 改性 PET 线材的表面粗糙度如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着 Imi-ILs 含量增加, PET 线材的表面粗糙度不断下降。这是由于在熔融挤出过程中,一方面 Imi-ILs 增加了熔体流动性,另一方面 Imi-ILs 具有一定的成核作用,促使 PET 晶粒尺

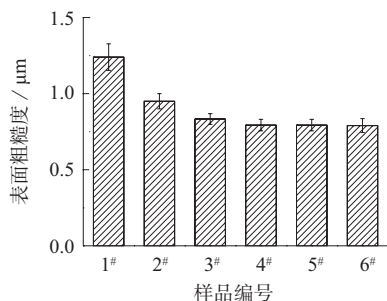


图4 不同含量的 Imi-ILs 改性 PET 线材表面粗糙度

寸和分布更加均匀。当 Imi-ILs 含量较高时,表面粗糙度变化较小,这是由于高含量导致 Imi-ILs 产生部分团聚,晶核数量保持不变甚至出现下降,晶粒尺寸和分布随之变化的趋势也逐渐变缓。另外, Imi-ILs 含量较高导致离子交联作用增强,形成的离子簇对 PET 分子链间作用力有一定增强作用,导致增塑效果不再提升,从而表面粗糙度变化较小。

打印制品的尺寸误差如表 4 所示。从表 4 可以看出,打印制品的尺寸误差随 Imi-ILs 含量的增加有下降的趋势,打印精度逐渐上升,这与 Imi-ILs 的加入促使熔体从喷头中流出时的离模膨胀效应减弱有关。熔体在喷头中受热并短时间通过,分子链受到了来自喷头内壁的沿流动方向的剪切力,从而产生一定的定向排列构象。Imi-ILs 中的离子基团通过偶极力作用,对定向排列构象有保持作用,当熔体从喷头中流出时,定向排列构象并没有完成解除,并且随着 Imi-ILs 含量的增加解除越少,自由体积的增量也越少,因而离模膨胀效应减弱,尺寸精度较好。

表 4 不同含量的 Imi-ILs 改性 PET 线材打印制品的尺寸误差

样品 编号	长度 / mm	宽度 / mm	高度 / mm	长度 误差 / %	宽度 误差 / %	高度 误差 / %
1#	19.8318	12.9328	22.0434	-0.8412	-0.5173	0.1971
2#	19.8533	12.9540	21.9729	-0.7334	-0.3536	-0.1231
3#	19.8558	12.9631	22.0435	-0.7211	-0.2837	0.1979
4#	19.8894	12.9709	21.9733	-0.5531	-0.2237	-0.1215
5#	19.9111	13.0244	21.9707	-0.4445	0.1875	-0.1331
6#	19.9303	13.0214	22.0322	-0.3487	0.1642	0.1464

2.5 翘曲形变量数值分析

目前在翘曲形变数值计算方面已有相关报道^[18-19],但相关数值分析结果与真实结果有较大差异,并且未结合 PET 材料冷却前后的结构变化进行分析。笔者在已有研究基础上对翘曲形变数值分析进行了优化,对打印过程建模如图 5 所示。其中, R 为翘曲面的曲率半径, θ_1 为第一堆积层的最大翘曲形变。

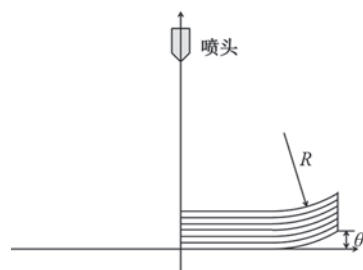


图5 FDM 型 3D 打印工艺建模

分析了出丝到物料冷却过程,提出以下假设:

- ①忽略喷嘴在材料挤出时的热量损失;
- ②忽略材料到达堆积面后的堆积时间;
- ③忽略堆积层材料在扫描方向上的温度分布,认为温度均匀分布;
- ④忽略堆积层间的间隙,认为层间堆积紧密;
- ⑤认为材料在堆积前截面为圆柱形,堆积后截面为矩形。

在翘曲过程中, PET 的结晶相与非晶相有着不同的贡献,因此需要分别计算。对于结晶相而言,应变与结晶温度和打印环境温度的差值成正比,则:

$$\varepsilon_c = \alpha \Delta T \quad (1)$$

因此,结晶相应力为:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = E_c \alpha \Delta T \quad (2)$$

式中, ε_c 为结晶相应变, ΔT 为结晶温度与打印环境温度之差, E_c 为结晶相弹性模量。

对于非晶相而言,应力与非晶态分子链构象变化导致的收缩应变有关,如果对第 n 层堆积层进行微分,冷却固化后第 n 层某一质点高度为 x ,则:

$$\sigma_a = E_a (d - x) / R \quad (3)$$

式中, d 为物料刚到达前一堆积层的瞬间上表面的高度, E_a 为非晶相弹性模量, $h_1 < x < h_2$, h_1 为第 $n-1$ 层上表面高度, h_2 为第 n 层上表面高度。

材料的总应力值为结晶相与非晶相应力值之和,则:

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_a = E_c \alpha \Delta T + E_a (d - x) / R \quad (4)$$

打印过程中,物料在空气中缓慢冷却,因此认为分子链在冷却固化前已达到平衡构象,因此在堆积层内各质点的内应力为零,可求解曲率,得:

$$\frac{1}{R} = \frac{E_c \alpha \Delta T (h_2 - h_1)}{E_a d (h_2 - h_1) - \frac{E_a}{2} (h_2^2 - h_1^2)} \quad (5)$$

另外,对于单位时间内的体积,有:

$$V_1 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi v_1 \quad (6)$$

$$V_2 = v_2 (\Delta h)^2 \quad (7)$$

式中, V_1 为单位时间内的冷却前体积, V_2 为单位时间内的冷却后体积, D 为喷嘴直径, Δh 为堆积层厚度, v_1 为喷头挤出速度, v_2 为喷头横向移动速度。PET 成型收缩率在 1% 左右,可忽略不计,认为冷却前和冷却后体积守恒,则:

$$\Delta h = D \sqrt{\frac{\pi v_1}{4 v_2}} \quad (8)$$

当堆积到 n 层时, $h_1 = (n-1) \Delta h$, $h_2 = n \Delta h$, 带入曲率公式,则:

$$\frac{1}{R} = \frac{E_c \alpha \Delta T}{E_a d - E_a \frac{2n-1}{2} D \sqrt{\frac{\pi v_1}{4 v_2}}} \quad (9)$$

由于翘曲形变对称,制件横向总长度为 L ,求解翘曲边缘的最大翘曲形变 θ ,则:

$$\theta = R - \sqrt{R^2 - (L/2)^2} \quad (10)$$

由于第一堆积层的最大翘曲形变 θ_1 对于制件而言最为重要,而第一堆积层物料到达加热板的瞬间上表面高度 d 与喷嘴直径 D 相等,则:

$$\theta_1 = \frac{E_a D \sqrt{\frac{\pi v_1}{v_2}}}{4 E_c \alpha \Delta T} - \sqrt{\frac{E_a^2 D^2 \frac{\pi v_1}{v_2}}{16 E_c^2 \alpha^2 \Delta T^2} - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (11)$$

不同含量的 Imi-ILs 改性 PET 制品第一堆积层理论最大翘曲形变和实际最大翘曲形变如图 6 所示。

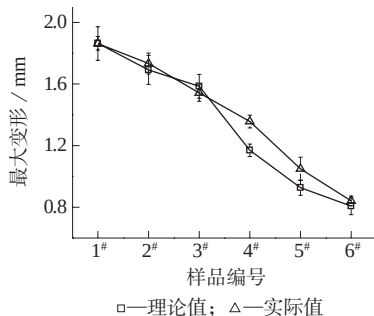


图6 不同含量 Imi-ILs 改性 PET 制品第一堆积层理论最大翘曲形变和实际最大翘曲形变

从图 6 可以看出,理论最大翘曲形变与实际最大翘曲形变在趋势上基本一致,在低 Imi-ILs 含量时较准确,高含量时与实际值存在一定误差,理论值

偏小。这是由于在计算过程中未考虑 Imi-ILs 高含量时出现的团聚造成晶核数量减少,晶区尺寸有所增大,实际晶区弹性模量比理论值有所增大,因而计算结果偏小,笔者将在后续研究中进行修正。

3 结论

(1) 采用 Imi-ILs 对 PET 材料进行共混改性,用于 FDM 型 3D 打印线材。DSC 结果表明,随着 Imi-ILs 含量的增加,改性 PET 材料的结晶峰向低温方向移动, θ_{sc} 和 θ_{cp} 均减少,结晶峰半高宽 ($W_{1/2}$) 也在减少,结晶速率加快。

(2) 熔体流动性分析结果表明,在 Imi-ILs 含量较低时,改性 PET 材料 MFR 变化不大,当 Imi-ILs 添加量超过 2% 时, MFR 不断上升。

(3) 3D 打印精度分析结果表明,打印精度随着 Imi-ILs 含量的增加有所上升。

(4) 翘曲形变数值分析结果表明,以晶区和非晶区弹性模量为基础,通过建模推导最大翘曲形变计算公式,计算结果与实际情况基本一致。

参考文献

- [1] 肖建华,高延峰,陈思维,等. 基于塑料微挤出成型的熔融沉积成型技术表面粗糙度研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(4):160-167.
- [2] Xiao Jianhua, Gao Yanfeng, Chen Siwei, et al. Surface roughness of fused deposition modeling based on micro-extrusion: A review [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(4):160-167.
- [3] Dolzyk G, Jung S. Tensile and fatigue analysis of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(2):511-518.
- [4] Seki Y. Enhancement of electrical conductivity of polyethylene terephthalate (PET) fabrics via ionic liquids [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2018, 58(1):1-7.
- [5] Mansour M, Tsongas K, Tzetzis D, et al. Mechanical and dynamic behavior of fused filament fabrication 3D printed polyethylene terephthalate glycol reinforced with carbon fibers [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2018, 57(16):1-11.
- [6] Anon. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects [J]. Advances in Manufacturing, 2015, 3(1):42-53.
- [7] Afrose M F, Masood S H, Iovenitti P, et al. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2016, 1(1-2):21-28.
- [8] Wenzheng W, Peng G, Guiwei L, et al. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS [J]. Materials, 2015, 8(9):5 834-5 846.

- [8] Szykiedans K, Credo W, Osiński D. Selected mechanical properties of PETG 3-D Prints[J].Procedia Engineering,2017, 177:455-461.
- [9] 张文君,方辉,袁泽林,等.桌面型 FDM 3D 打印设备的优化设计与精度分析[J].机械,2018,45(1):5-10.
Zhang Wenjun, Fang Hui, Yuan Zelin, et al. Optimum design and accuracy analysis of desktop FDM 3D printing equipment[J]. Mechanics, 2018, 45(1):5-10.
- [10] 赵晓非,刘立新,舒静,等.热分析法研究聚对苯二甲酸乙二醇酯微波水解解聚反应[J].材料导报,2007(S2):7-9.
Zhao Xiaofei, Liu Lixin, Shu Jing, et al. Study on hydrolytic depolymerization of polyethylene terephthalate (PET) under microwave irradiation by thermal analysis methods[J]. Materials Report, 2007(S2):7-9.
- [11] 杨兆平,信春玲,王泽鸣,等.双螺杆反应挤出工艺对聚对苯二甲酸乙二醇酯黏弹性的影响[J].塑料工业,2017,45(10):55-59.
Yang Zhaoping, Xin Chunling, Wangzeming, et al. Effect of twin-screw reactive extrusion process on the viscoelasticity of polyethylene terephthalate[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):55-59.
- [12] 邱丽清,刘杭忠,赵升云,等.相容剂增容聚对苯二甲酸乙二醇酯/聚乳酸共混物的制备及结晶性能与热性能[J].高分子材料科学与工程,2018,34(3):73-80.
Qiu Liqing, Liu Hangzhong, Zhao Shengyun, et al. Preparation and characterization of crystallization and thermal property of poly(ethylene terephthalate) and poly(lactic acid) blends promoted by compatilizer[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(3):73-80.
- [13] 张龙,郭强,毕宸洋,等.拉伸工艺对熔纺聚对苯二甲酸乙二醇酯单丝的拉伸与热收缩行为的影响[J].高分子材料科学与工程,2019,35(1):96-101.
Zhang Long, Guo Qiang, Bi Chenyang, et al. Effects of drawing process with melting spinning poly(ethylene terephthalate) monofilament on its tensile properties and heat shrinkage behavior[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(1):96-101.
- [14] 钟振兴,刘桂兰,李永海,等.1,2-丁二醇共聚对聚对苯二甲酸乙二醇酯结晶行为及力学性能的影响[J].应用化学,2019, 36(2):170-175.
Zhong Zhenxing, Liu Guilan, Li Yonghai, et al. Effects of 1, 2-butanediol comonomer on the crystallization behavior and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate)[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2019, 36(2):170-175.
- [15] 陈莉,刘帅,李棉刚,等. Au(111)/咪唑基离子液体界面结构研究:阳离子侧链长度的影响[J].电化学,2018,24(5):511-516.
Chen Li, Liu Shuai, Li Miangang, et al. An investigation on the structure of Au(111)/imidazolium-based ionic liquid interface: Effect of alkyl side chain length[J]. Journal of Electrochemistry, 2018, 24(5):511-516.
- [16] 孙志刚,牛瑞霞,董彭旭,等.长链烷基咪唑类离子液体型表面活性剂的聚集行为[J].应用化工,2018,47(12):2620-2623.
Sun Zhigang, Niu Ruixia, Dong Pengxu, et al. Aggregation behavior of aqueous solutions of long-chain imidazolium ionic liquids surfactant[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(12):2620-2623.
- [17] 杜海燕,许玉玉,任哲,等.微波驱动咪唑类聚离子液体/聚乙醇醇形状记忆材料[J].化工学报,2018,69(7):3279-3285.
Du Haiyan, Xu Yuyu, Ren Zhe, et al. Microwave-induced imidazole poly(ionic liquid)/poly(vinyl alcohol) shape memory materials[J]. CIESC Journal, 2018, 69(7):3279-3285.
- [18] 白鹤,赵明侠,王核心,等.FDM 3D 打印翘曲变形成因分析及解决对策[J].塑料工业,2019,47(1):60-63.
Bai He, Zhao Mingxia, Wang Hexin, et al. Analysis and countermeasures of warpage deformation in FDM 3D printing process[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(1):60-63.
- [19] 曹师增,宋发成,刘元义,等.基于 FDM 的 3D 打印翘曲变形优化研究[J].塑料工业,2017,45(10):51-54.
Cao Shizeng, Song Facheng, Liu Yuanyi, et al. Research on optimization of warpage deformation of 3D printing based on FDM[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):51-54.

巴斯夫聚氨酯解决方案为中国 5G 通信塔提供稳固支持

巴斯夫 Elastolit® 聚氨酯 (PUR) 创新材料解决方案为中国部署 5G 网络提供助力。安徽汇科恒远复合材料有限公司(汇科)采用 Elastolit® 制成 60 座通信塔,分布在北京、苏州以及黑龙江和江西的多个城市。

汇科总经理董翹男表示:“5G 网络的数据速率峰值可达现行 4G 网络的 100 倍,它将成为中国智能城市以及自动驾驶、工业自动化等先进技术发展的支柱。要确保 5G 网络的快速稳定运行,包括通信塔在内的坚固基础设施必不可少。”

相比传统混凝土或钢基材料,采用 Elastolit® 制成的通讯塔质量更轻,即便在偏远地区亦可快速安装,同时能够抵御大雪和强风等恶劣天气。

巴斯夫亚太区特性材料部全球高级副总裁鲍磊伟表示:“5G 基站承载传输设备和天线,必须在恶劣天气条件下保持强韧。采用巴斯夫 PUR 复合材料制成的 35 m 高通信塔重 1500 ~ 1800 kg,其断裂强度是自身质量的 10 倍。”

不仅如此, Elastolit® 制成的通讯塔较传统钢塔更具成本效益。Elastolit® 具有耐锈和耐腐蚀特性,所需维护量更小。表面覆盖有一层特殊配方的耐紫外线涂层,能够延长其使用寿命。同时具有防火性,能够迅速自熄。(艾邦高分子)