doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.06.001

玻纤毡增强聚丙烯复合材料的增容及力学性能 *

吴亚东,沈春银,万海青,王君燕,戴干策
(华东理工大学化学工程联合国家重点实验室,上海 200237)

摘要: 通过玻璃纤维 (GF) 毡与双螺杆挤出相容剂改性聚丙烯 (PP) 膜的多层叠合,以熔融浸渍法制得 PP 基 GF 毡增强热塑性塑料 (GMT) 复合材料,研究了相容剂 PP 接枝马来酸酐 (PP-g-MAH) 和 PP 接枝丙烯酸 (PP-g-AA) 的用量 (为 PP 基体质量的百分数) 及其复配改性,以及相容剂改性 PP 基体分布和毡体种类对 GMT 力学性能的影响。结果表明,PP-g-MAH 可明显提高 GMT 的拉伸与弯曲性能,但降低了冲击性能;PP-g-AA 可明显提高 GMT 的冲击性能,但不利于拉伸与弯曲性能的提高,只有当 PP-g-AA 用量超过 5% 后,拉伸性能才有所提升。在 PP-g-MAH 用量为 3% 的条件下,将其与不同用量的 PP-g-AA 进行复配改性没有对 GMT 力学性能产生协同作用。在各相容剂用量相近 (3%~3.5%) 的情况下,与相容剂复配改性 GMT 相比,以两层 PP-g-AA 改性 PP 为芯层、PP-g-MAH 改性 PP 为上下表面层作为改性基体分布时,GMT 拉伸与弯曲强度分别提高 17% 和 27%、缺口冲击强度提高 48%;而以两层 PP-g-MAH 改性 PP 为芯层、PP-g-AA 改性 PP 为上下表面层作为改性基体分布时,在不损失强度与刚性的同时,缺口冲击强度提高了 88%。采用连续 GF 毡的 GMT 力学性能比采用短切 GF 毡的 GMT 高,尤其是缺口冲击强度提高了 89.6%。

关键词: 玻璃纤维毡增强热塑性塑料;聚丙烯;相容剂;复配改性;改性基体分布;力学性能
中图分类号: TQ327.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)06-0001-06

Compatibilization and Mechanical Properties of Glass Fiber Mat Reinforced Polypropylene Composites

Wu Yadong, Shen Chunyin, Wan Haiqing, Wang Junyan, Dai Gance
(State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Glass fiber (GF) mat reinforced thermoplastic (GMT) composites based on polypropylene (PP) were prepared by melt impregnation method through multilayer stacking of GF mats and compatibilizer modified PP films extruded by twin screw extruder. The effects of compatibilizer PP-g-MAH and PP-g-AA contents (percentage of PP matrix mass) and their combination, compatibilizer modified PP matrix distribution and mat type on mechanical properties of GMT were investigated. The results show that PP-g-MAH can increase the tensile and flexural properties of GMT obviously, but decreases the impact strength. For PP-g-AA, it can improve the impact strength significantly but can't improve the tensile and flexural properties, only the content of PP-g-AA is above 5%, the tensile properties are increased. When the content of PP-g-MAH is 3%, the combination of it and PP-g-AA with different contents does not produce synergistic effect on the mechanical properties of GMT. Compared with GMT modified by the compatibilizer combination on the base of similar content (3% –3.5%) of each compatibilizer, for the matrix distribution design of two layers PP films modified by PP-g-AA as core layers and PP films modified by PP-g-MAH as the upper and lower surface layers, the tensile and flexural strength of the composites are increased by 17% and 27% respectively, while the notched impact strength is improved by 48%, on the other hand, for the distribution design of two layers PP films modified by PP-g-MAH as core layers and the PP matrix modified by PP-g-AA as upper and lower surface layers, the notched impact strength of GMT is improved by 88% without the loss of strength and rigidity. Moreover, the mechanical properties of GMT with continuous GF mat are higher than those of GMT with short GF mat, especially the the notched impact strength is improved by 89.6%.

Keywords: glass fiber mat reinforced thermoplastic; polypropylene; compatibilizer; combination modification; modified matrix distribution; mechanical property

玻璃纤维 (GF) 毡增强热塑性塑料 (GMT) 复合材料以其轻质高强、冲击性能优于热固性树脂基复合材料、成型周期短、废料可以回收再利用等独特优点,在汽车工业中得以广泛应用。但 GMT 刚性与韧性难以兼顾的问题一直未能很好地解决。

* 国家自然科学基金项目 (21376086)
联系人:沈春银,副研究员,主要研究方向为材料化学工程
收稿日期:2017-03-31

工程塑料应用杂志社版权所有 禁止复制

GMT 中,非极性的聚丙烯 (PP) 分子与极性的 GF 界面相容性差,制约了 GF 的增强效果,而添加相容剂是提高界面相容性的有效途径。目前,相容剂聚丙烯接枝马来酸酐 (PP-g-MAH) 在热塑性树脂基复合材料上应用广泛,但在提高 GMT 拉伸及弯曲性能的同时,却降低了 GMT 的韧性 [1-3],其下降程度与 PP-g-MAH 的用量有关。聚丙烯接枝丙烯酸 (PP-g-AA) 多用于 PP / 粉体及共混合金的界面改性,有研究 [4] 认为 PP-g-MAH 改性对 GMT 强度的提升效果优于 PP-g-AA。相容剂复配是平衡材料刚性 / 韧性的重要方法之一 [5],可以将分别具有增强或增韧作用的两种相容剂进行复配,以期能够获得综合性能良好的 GMT 复合材料。相容剂改性树脂基体分布设计是平衡材料刚性 / 韧性的另一重要方法,可以将分别具有增强增韧作用的两种相容剂在 GMT 表层及芯层中进行分布设计,以期获得兼有刚性与韧性的 GMT 复合材料。

影响 GMT 力学性能的结构因素还包括 GF 增强体的结构形式等。文献 [6] 考察了 GF 毡种类对 GMT 力学性能的影响,但未考虑相容剂的用量。

笔者对 PP 基 GMT 复合材料中相容剂种类和用量的影响进行了考察,并探讨了相容剂复配改性、相容剂改性基体分布设计及 GF 毡种类的影响,以期获得刚性与韧性兼顾的 GMT 复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP:K7926,熔体流动速率 (MFR) 为 26 g/10 min (230℃,2.16 kg),上海赛科石油化工有限公司;

PP:Y2600T,MFR 为 26 g/10 min (230 ℃,2.16 kg),中国石化上海石油化工股份有限公司;

PP-g-MAH:FH118,宁波能之光新材料科技有限公司;

PP-g-AA:MODIC,三菱化学株式会社;

抗氧剂 1010,168:瑞士汽巴嘉基公司;

连续 GF 毡:面密度 720 g/m^2,泰山玻璃纤维有限公司;

短切 GF 毡:面密度 720 g/m^2,南京天明玻纤制品有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:SJS35X28 型,上海化工机械四厂;

双钢带压机:自制;

平板硫化机:YX–25 型,上海西玛伟力模塑机械公司;

电子万能试验机:XBD4204 行,上海鑫标检测仪器有限公司;

冲击试验机:XJU–22 型,承德试验机有限责任公司。

1.3 相容剂改性 PP 膜的制备

将 PP (K7926), PP (Y2600T),抗氧剂母粒及不同用量的相容剂均匀混合后在双螺杆挤出机上挤出成膜,其中主螺杆及进料螺杆的转速为 120,15 r/min,将相容剂用量定为 PP 基体质量的百分数。

1.4 GMT 制备

取 3 层 PP 膜及 2 层 GF 毡,将 PP 膜与 GF 毡互相交替叠加并送入连续运行的双钢带压机中,在 220℃,0.7 MPa 的温度与压力下进行熔融浸渍,冷却固化成型,然后送入烘箱中预热膨化 8 min,最后在平板硫化机上进行热压成型制得 GMT 片材,成型温度为 100℃,压力为 10 MPa,时间为 3 min。将制备的 GMT 片材经机械加工制成标准试样。

1.5 力学性能测试

拉伸强度和拉伸弹性模量按 GB/T 1447–2005 测试,拉伸强度测试速率为 5 mm/min、拉伸弹性模量测试速率为 2 mm/min。

弯曲强度和弯曲弹性模量按 GB/T 1449–2005 测试,采用三点弯曲形式,弯曲强度测试速率为 5 mm/min、弯曲弹性模量测试速率为 2 mm/min。

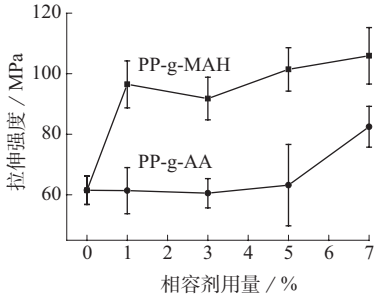
Izod 缺口冲击强度按 ISO 180–2000 测试。

2 结果与讨论

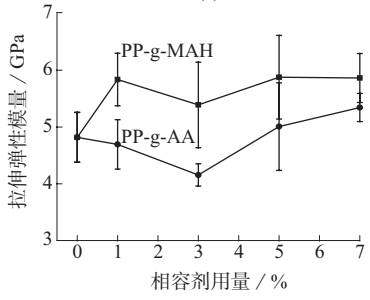
2.1 相容剂种类与用量对 GMT 力学性能的影响

复合材料的界面强度直接影响着树脂与纤维之间的应力传递,从而影响着复合材料的宏观力学性能。相容剂能够有效改善复合材料中树脂与纤维的界面结合,其用量的多少需要考虑材料对刚性与韧性的需求。以 PP-g-MAH 和 PP-g-AA 为相容剂, PP 为基体制备了不同相容剂种类及用量的 GMT 片材,其 GF 质量分数为 (30±1.8)%,力学性能示于图 1~图 3。

图 1 表明,随着 PP-g-MAH 用量的增加, GMT 的拉伸强度与拉伸弹性模量总体上呈先升高最后趋于稳定的趋势,但加入 PP-g-MAH 后,在考察的用量范围内, GMT 的拉伸性能均高于未增容改性的 GMT。当 PP-g-MAH 用量为 7% 时, GMT 的拉伸强度与拉伸弹性模量与未改性 GMT 相比分别提高了 72.2% 和 17.8%。PP-g-AA 对 GMT 拉伸性能



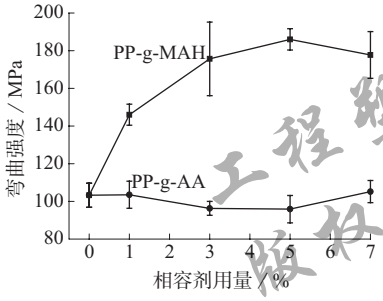
(a)



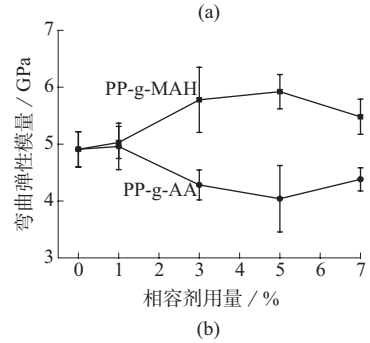
(b)

a—拉伸强度；b—拉伸弹性模量

图 1　不同相容剂种类与用量下 GMT 的拉伸强度与拉伸弹性模量



(a)



(b)

a—弯曲强度；b—弯曲弹性模量

图 2　不同相容剂种类与用量下 GMT 的弯曲强度与弯曲弹性模量

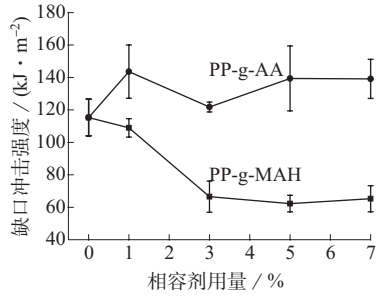


图 3　不同相容剂种类与用量下 GMT 的缺口冲击强度

的影响总体上相对较小，只有当 PP-g-AA 用量达到 5% 后，拉伸强度与拉伸弹性模量才有所提高，PP-g-AA 用量为 7% 时，GMT 的拉伸强度与拉伸弹性模量比未改性 GMT 分别提高了 34% 及 11%。

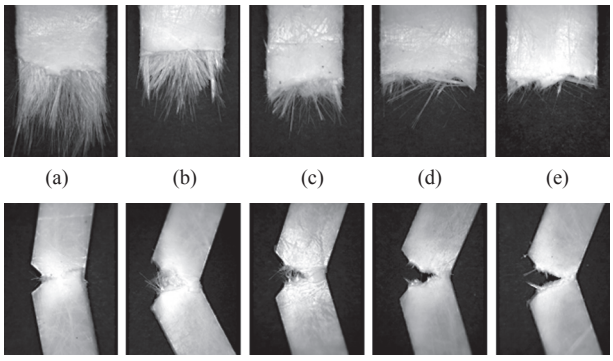
图 2 表明，随着 PP-g-MAH 用量的增加，GMT 的弯曲性能逐渐上升，当 PP-g-MAH 用量达到 5% 时，GMT 的弯曲强度和弯曲弹性模量达到最大值，与未改性 GMT 相比分别提高了 80.6% 和 17.1%；随着 PP-g-MAH 用量的继续增加，弯曲强度与弯曲弹性模量有所下降，但仍高于未改性 GMT。当 PP-g-AA 用量低于 5% 时，弯曲性能随 PP-g-AA 用量的增加总体上呈下降趋势；当 PP-g-AA 用量大于 5% 时，弯曲性能略有上升，但与未改性 GMT 相比，弯曲强度相差不大，弯曲弹性模量则仍较低。

图 3 表明，GMT 的缺口冲击强度随着 PP-g-MAH 用量的增加先略有下降，然后大幅度下降，在 PP-g-MAH 用量达到 3% 后趋于稳定。而随着 PP-g-AA 用量增加，GMT 的缺口冲击强度先明显提升，在 PP-g-AA 用量为 3% 时又有明显的下降，超过 3% 后又有明显的提升，最终趋于稳定。当 PP-g-AA 用量为 7% 时，GMT 的缺口冲击强度相比未改性 GMT 提高了约 20%。

分析认为，当不含相容剂时，树脂与 GF 的界面结合较差，界面强度较弱，在外力作用下 GF 易于拔出，成为制约 GMT 拉伸和弯曲性能的主要因素，但纤维拔出的吸能会提高 GMT 的冲击性能。当加入少量 PP-g-MAH 后，PP-g-MAH 分子上的酸酐基团与 GF 上的硅羟基发生酯化反应，有效改善了 GMT 的界面结合，在 GF 与树脂之间起到了“桥梁”作用[7]，从而使 GMT 的强度和模量得以提高。但随着 PP-g-MAH 用量的增加，复合材料的界面强度也随之增加，使 GF 无法从基体中剥离，从而导致 GMT 的冲击性能下降；另外 PP-g-MAH 用量达到 5% 后，一方面其在体系内可能存在积聚或分布不均的情况[8]，另一方面当 PP-g-MAH 的增容作用过强时，反而会导致界面性能变差，这两方面的作用导致 GMT 的强度、模量和韧性不再发生大的变化或略有下降。

图 4 为不同 PP-g-MAH 用量下 GMT 拉伸和冲击试样的断面情况。由图 4 可看出，随着 PP-g-MAH 用量增加，GMT 中 GF 拔出的现象越来越少。这说明高用量下 PP-g-MAH 产生了过强的界面作用，当 PP 基体传导裂纹扩展到 GF 表面时纤维不易脱粘拔出而直接发生断裂，从而使试样整体表现为脆性断裂。

工程塑料应用杂志社 版权所有



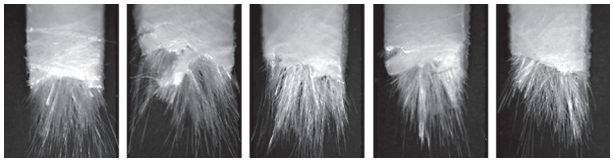
拉伸试样,相容剂用量:a—0%;b—1%;c—3%;d—5%;e—7%

冲击试样,相容剂用量:f—0%;g—1%;h—3%;i—5%;j—7%

图 4 不同 PP-g-MAH 用量的 GMT 拉伸与冲击试样断面情况

对于 PP-g-AA 改性 GMT,从树脂基体到 GF 的应力传递不如 PP-g-MAH 有效[9],这种差异与相容剂的结构有关。马来酸酐基团因竞聚率较小难以发生均聚,而是以单个分子接枝在 PP 上。丙烯酸容易均聚,使 PP-g-AA 分子链上接枝有多个丙烯酸分子形成的支链,因此在相同的接枝量下 PP-g-AA 的接枝点较少。当 PP-g-AA 用量较少时,不但其界面结合点较少,还会由于多个羧酸基团的位阻作用使 PP 基体与 GF 容易发生界面脱粘,从而使复合材料的性能下降。仅当 PP-g-AA 用量超过 5% 时,PP-g-AA 与 GF 有了足够多的活性位点作用后,界面作用得到增强,才能使拉伸与弯曲性能有所提升。

图 5 为不同 PP-g-AA 用量下 GMT 拉伸试样的断面情况。由图 5 可知,在考察的 PP-g-AA 用量范围内,纤维拔出成为主要的破坏形式,而纤维拔出能够吸收更多的冲击能量,因此可使 GMT 具有较高的韧性。另外,PP-g-AA 分子链上接枝的丙烯酸官能团可作为成核剂能够提高基体结晶能力,从而使基体中球晶数量多且细致均匀,也有利于基体韧性的提高[10–11]。



相容剂用量:a—0%;b—1%;c—3%;d—5%;e—7%

图 5 不同 PP-g-AA 用量的 GMT 拉伸试样断面情况

2.2 相容剂复配改性对 GMT 力学性能的影响

PP-g-MAH 能明显改善 GMT 的拉伸和弯曲性能,而 PP-g-AA 能明显提高 GMT 的冲击性能,故将两种相容剂对 GMT 进行复配改性,考察其能否平衡 GMT 的刚性与韧性。由上述研究可知,当 PP-g-MAH 用量达到 5% 后,GMT 的拉伸与弯曲性能基本趋于稳定或仅略有下降,而冲击性能在 PP-g-MAH 用量达到 3% 后也已趋于稳定,为了考察相容剂复配改性对 GMT 力学性能尤其是冲击性能的影响,再结合相容剂用量的经济性与成本因素,因此选择用量为 3% 的 PP-g-MAH 与不同用量的 PP-g-AA 进行复配。实验制得 PP-g-MAH 用量为 3%,PP-g-AA 用量分别为 0%,1%,3%,5%,7% 的相容剂复配改性 GMT 片材,其 GF 质量分数为 (30 ± 1.6)%,力学性能如图 6 ~ 图 8 所示。

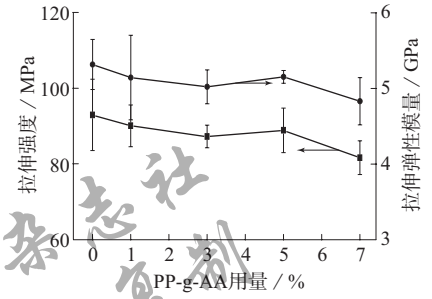


图 6 不同 PP-g-AA 用量的相容剂复配改性 GMT 的拉伸性能

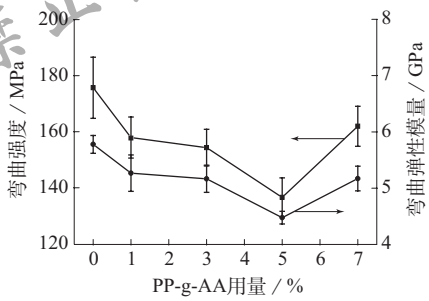


图 7 不同 PP-g-AA 用量的相容剂复配改性 GMT 的弯曲性能

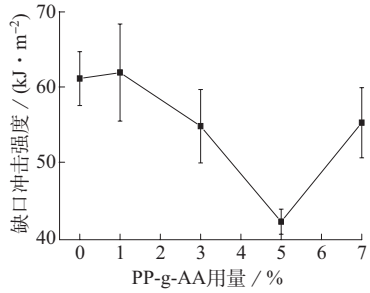


图 8 不同 PP-g-AA 用量的相容剂复配改性 GMT 的缺口冲击强度

由图 6 ~ 图 8 可知,当 PP-g-MAH 用量为 3% 时,随着 PP-g-AA 用量的增加,相容剂复配改性 GMT 的拉伸、弯曲与冲击性能总体均呈下降趋势,其中拉伸性能的下降幅度较小,弯曲与冲击性能下降幅度较大,虽然在 PP-g-AA 用量超过 5% 后弯曲与冲击性能有所提升,但仍低于未加 PP-g-AA 时的材料。总体上看,相容剂复配改性 GMT 既没有获得 PP-g-MAH 改性 GMT 强度与刚性较高的特点,同时也没

工程塑料应用杂志社 版权所有 禁止复制

有获得 PP-g-AA 改性 GMT 韧性较高的优势。这表明在 PP-g-MAH 用量为 3% 时，其与 PP-g-AA 在增强增韧 GMT 方面没有协同作用。

分析认为，GF 表面只有特定活性位点可以与相容剂分子上的极性基团相结合，改善界面作用。两种相容剂在复配改性的同时也对 GF 表面的活性位点构成竞争。当 GMT 中只含 PP-g-MAH 时，GF 表面多数活性位点与 PP-g-MAH 相结合。PP-g-AA 用量的增加使其占据越来越多的活性位点，但 PP-g-AA 对界面结合的完善程度不如 PP-g-MAH，故使 GMT 的拉伸和弯曲性能下降。同时，由于体系中 PP-g-MAH 的存在及其与 PP-g-AA 在活性位点上的竞争，也会使 GMT 的韧性下降。

2.3 相容剂改性基体分布对 GMT 力学性能的影响

采用熔融浸渍工艺制备了两种不同的相容剂改性 PP 基体分布的 GMT 片材，如图 9 所示。PP/PP-g-MAH 膜及 PP/PP-g-AA 膜分别含有用量为 7% 的 PP-g-MAH 或 PP-g-AA，且膜厚度相同。GMT 中 GF 质量分数为 (30 ± 2.4)%。不同相容剂改性基体分布对 GMT 力学性能的影响如图 10 ~ 图 12 所示。

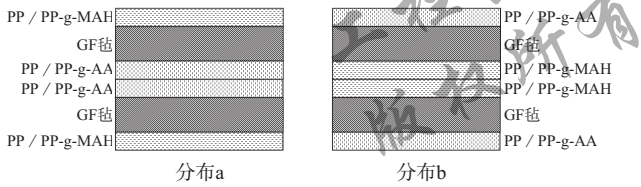


图 9 GMT 中的相容剂改性 PP 基体分布示意图

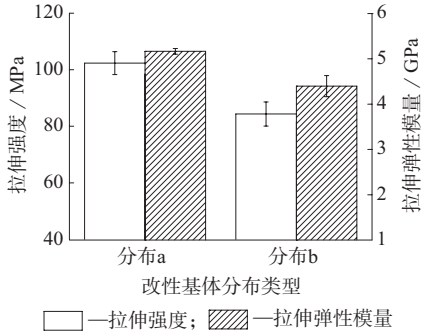


图 10 不同相容剂改性基体分布的 GMT 拉伸性能

由图 10 ~ 图 12 可知，与分布 b 相比，分布 a 对应的 GMT 的拉伸和弯曲性能较高，而冲击性能较低。由上述研究可知，PP-g-MAH 对 GMT 的刚性有利，PP-g-AA 对 GMT 的韧性有利。故可认为分布 a 的表层为刚性区，芯层为韧性区。同理，分布 b 的表层为韧性区，芯层为刚性区。采用熔融浸渍工艺在双钢带压机上制备 GMT 时，GMT 铺层结构由表及里进行受热，表层基体膜首先受热融化，受压浸

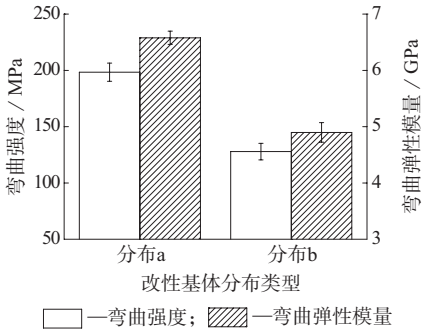


图 11 不同相容剂改性基体分布的 GMT 弯曲性能

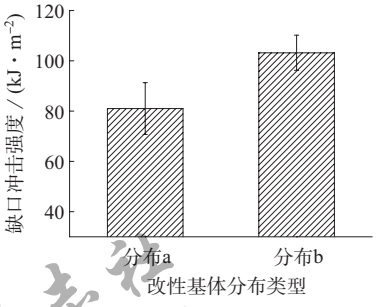


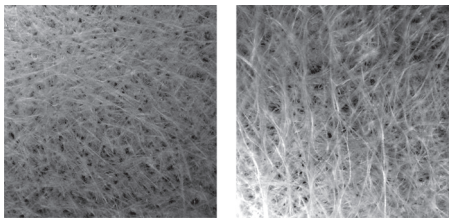
图 12 不同相容剂改性基体分布的 GMT 冲击性能

渍连续 GF 毡，芯层基体膜因传热热阻而熔融滞后于表层，故表层基体对毡体浸渍居于主导地位。对于分布 a，表层为刚性层，故其拉伸和弯曲性能较高而冲击性能较低。同理，分布 b 中，表层为韧性层，故表现为较高的冲击性能 [12]。

由于采用了相容剂改性基体的分布结构即采用了两种相容剂改性基体膜进行组合，故可以认为采用相容剂改性基体分布的 GMT 中 PP-g-MAH 及 PP-g-AA 的用量分别为 3.5%，也即分布 a 与分布 b 中的两种相容剂各自的用量与相容剂复配改性中 PP-g-MAH 及 PP-g-AA 用量 (3%) 接近。对比两种组合改性的 GMT 力学性能可以发现，相对于相容剂复配改性 GMT，分布 a 对应的 GMT 拉伸强度提高 17%、弯曲强度提高 27%、缺口冲击强度提高 48%；分布 b 对应的 GMT 强度和模量得到一定的保持，而其缺口冲击强度上升高达 88%。由此可见对不同相容剂改性基体进行分布设计，不仅平衡了复合材料的刚性与韧性的矛盾，更是凸显了复合材料结构的可设计性。

2.4 GF 毡体种类对 GMT 力学性能的影响

上述研究发现，加入用量为 1% 的 PP-g-MAH，可明显提高 GMT 的拉伸与弯曲性能，同时冲击性能下降幅度较小。因此，以此为基础，分别以短切 GF 毡和连续 GF 毡作为增强体 (两者的形貌如图 13 所示)，制得 GMT 片材，比较了两种 GF 毡对 GMT 力学性能的影响，结果如表 1 所示。



(a) (b)

a—短切 GF 毡; b—连续 GF 毡

图 13 短切 GF 毡与连续 GF 毡的形貌

表 1 不同毡体种类的 GMT 力学性能

项 目	毡体种类	
	短切 GF 毡	连续 GF 毡
GF 质量分数 /%	31.46	31.54
孔隙率 /%	1.54	1.77
拉伸强度 /MPa	73.03	96.50
拉伸弹性模量 /GPa	4.70	5.84
弯曲强度 /MPa	127.77	146.01
弯曲弹性模量 /GPa	4.46	5.03
缺口冲击强度 /(kJ · m^{-2})	57.45	108.95

由图 13 可见,短切 GF 毡中纤维束较短且分布均匀,而连续 GF 毡中 GF 较长,纤维束呈圈状或弧形。由表 1 可知,相同的 GF 用量下,与短切 GF 毡相比,连续 GF 毡增强 GMT 不仅具有较高的强度与模量,同时也具有良好的冲击韧性,尤其是缺口冲击强度提高了 89.6%。这是由于 GMT 的增强是靠 GF 间的应力传递来达到的,而 GF 长度越长则增强效果越好 [13]。韧性的提高主要归因于连续纤维的长度大于短切纤维,在界面相容良好的情况下连续纤维的拔出将消耗更多能量。此外,GF 用量相同时,连续纤维的末端数较少从而减少了裂纹增长的引发点也有利于 GMT 韧性的提高。因此,在成本允许的情况下,为提高 GMT 的力学性能,应尽可能采用连续 GF 毡。

3 结论

(1) 相容剂 PP-g-MAH 可明显提高 GMT 的拉伸与弯曲性能,但降低了冲击性能; 相容剂 PP-g-AA 不利于提高 GMT 的拉伸与弯曲性能,但可明显提高冲击性能,当 PP-g-AA 用量超过 5% 后, GMT 的拉伸性能有所提高,同时冲击性能趋于稳定。

(2) 在 PP-g-MAH 用量为 3% 的条件下,将其与不同用量的 PP-g-AA 进行复配改性不能对 GMT 产生协同作用。

(3) 在各相容剂用量相近 (3%~3.5%) 的情况下,与相容剂复配改性的 GMT 相比,以相容剂改性 PP 基体分布设计所制得的 GMT 不但可以保持或提高强度与刚性,还可大幅改善其韧性。其中,以两层 PP-g-AA 改性 PP 为芯层、PP-g-MAH 改性 PP 为上下表面层作为改性基体分布时,拉伸与弯曲强度分别提高 17% 和 27%、缺口冲击强度提高 48% ; 而以两层 PP-g-MAH 改性 PP 为芯层、PP-g-AA 改性 PP 为上下表面层作为改性基体分布时,在不损失强度与刚性的同时,缺口冲击强度提高了 88%。

(4) 与短切 GF 毡相比,连续 GF 毡增强 GMT 具有较高的强度、模量及韧性,尤其是缺口冲击强度提高了 89.6%。

参 考 文 献

[1] 邱春亮,沈春银,张杨,等 . 碳纤维毡增强聚丙烯复合材料的力学性能 [J]. 华东理工大学学报 : 自然科学版,2015,41(6):729–735.
Qiu Chunliang, Shen Chunyin, Zhang Yang, et al. Mechanical properties of carbon fiber-mat reinforced polypropylene composites[J]. Journal of East China University of Science and Technology:Natural Science Edition,2015,41(6):729–735.

[2] Fang Xun, Shen Chunyin, Dai Gance. The influence of compatibilizers on the structure and mechanical properties of lightweight reinforced thermoplastics[J / OL]. Polymer Composites, 2016:(2016-08-09).http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.24185/full.

[3] Luo Guojun, Li Wenze, Liang Wenbin, et al. Coupling effects of glass fiber treatment and matrix modification on the interfacial microstructures and the enhanced mechanical properties of glass fiber / polypropylene composites[J]. Composites Part B,2017, 111:190–199.

[4] 余剑英,周祖福,闻荻江 . 纤维表面处理与基体改性对连续玻纤增强聚丙烯力学性能的影响 [J]. 复合材料学报,2000,17(3):6–10.
Yu Jianying, Zhou Zufu, Wen Dijiang. Influence of coupling agents and matrix modification on mechanical properties of continuous-glass-fibre-reinforced polypropylene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2000,17(3):6–10.

[5] 袁渭康,胡春圃 . 材料科学与工程 [M]. 北京 : 科学出版社,2007:135–136.
Yuan Weikang, Hu Chunpu. Material science and technology[M]. Beijing:Science Press,2007:135–136.

[6] 沈春银,李中兵,张俊华,等 . 玻纤增强 PP 热塑性片材的制备及力学性能研究 [J]. 塑料工业,2006,34(2):30–32.
Shen Chunyin, Li Zhongbin, Zhang Junhua. Preparation and mechanical properties of glass fiber mat reinforced thermoplastic PP composites[J]. China Plastics Industry,2006,34(2):30–32.

[7] Li Yijun, Lin Yang, Nie Min, et al. New insight into the interfacial enhancement of polypropylene / glass fiber composites via a compatibilizer:The role of injection screw temperature[J]. Journal of Mcromolecular Science, Part B, Physics,2016,55(2):138–148.

[8] 唐可,信春玲,张聪,等 . PP-g-MAH 对连续纤维增强聚丙烯复合材料性能影响的研究 [J]. 塑料工业,2015,43(12):84–85.

(下转第 11 页)

PEG2000 共混物的结晶度，当 NT–C 质量分数为 2%，PEG2000 质量分数为 5% 时，结晶度达到了 17.1%，相比 PLA 提高了 12 倍。

(2) 随着 PEG2000 用量的增加，PLA／NT–C／PEG2000 共混物的 MFR 逐渐增大，储能模量和损耗模量对温度的依赖性逐渐降低，这有利于提高熔丝间的融合，扩宽 PLA 在 FDM 工艺中的成型温度。

(3) PEG2000 的添加，提高了共混物缺口冲击强度，降低了 FDM 成型时发生断丝的几率。打印件弯曲和拉伸强度随着 PEG2000 用量增加而增大，当 PEG2000 质量分数为 5% 时，两者分别达到了注塑件的 80% 和 70% 以上，扩宽了 PLA 在 FDM 中应用。

参 考 文 献

[1] Zaldivar R J，Witkin D B，Mclouth T，et al. Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D-printed ULTEM®9085 material[J]. Additive Manufacturing，2017，13:71–80.

[2] Galantucci L M，Lavecchia F，Percoco G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts[J]. CIRP Annals –Manufacturing Technology，2009，58(1):189–192.

[3] Novak-Marcincin J，Novakova-Marcincinova L，Barna J，et al. Application of FDM rapid prototyping technology in experimental gearbox development process[J]. Tehnicki Vjesnik，2012，19(3):689–694.

[4] Yokohara T，Yamaguchi M. Structure and properties for biomass-based polyester blends of PLA and PBS[J]. European Polymer Journal，2008，44(3):677–685.

[5] 包宽亮．生物降解材料流变性能的研究[D]．北京：北京化工大学，2013.
Bao Kuanliang. The research of rheological properties of biodegradable materials[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology，2013.

[6] 于晓东，陈涛，贾茹．聚乳酸 3D 打印件材料性能表征 [J]. 现代塑料加工应用，2016，28(2):51–53.
Yu Xiaodong，Chen Tao，Jia Ru. Property characterization of polylactic acid product formed by 3D printing[J]. Modern Plastics Processing and Applications，2016，28(2):51–53.

[7] Tian X，Liu T，Yang C，et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing，2016，88:198–205.

[8] 金泽枫，金杨福，周密，等．基于 FDM 聚乳酸 3D 打印材料的工艺性能研究 [J]. 塑料工业，2016，44(2):67–70.
Jin Zefeng，Jin Yangfu，Zhou Mi，et al. Research of processing property of PLA materials for 3D printing based on FDM[J]. China Plastics Industry，2016，44(2):67–70.

[9] Serra T，Ortiz-Hernandez M，Engel E，et al. Relevance of PEG in PLA-based blends for tissue engineering 3D-printed scaffolds[J]. Materials Science & Engineering C，2014，38(1):55–62.

[10] 迟长龙，王延伟，杨秀琴，等．PLA／PEG 复合材料结晶行为研究 [J]. 塑料科技，2015，43(2):38–41.
Chi Changlong，Wang Yanwei，Yan Xiuqin，et al. Study on crystallization behavior of PLA／PEG composite system[J]. Plastic Science and Technology，2015，43(2):38–41.

[11] 窦强．β 晶型聚丙烯复合材料研究进展 [J]. 合成树脂及塑料，2006，23(2):72–76.
Dou Qiang. Progress in research on β crystalline form PP composites[J]. China Synthetic Resin And Plastics，2006，23(2):72–76.

[12] 王伟超．L-乳酸熔融缩聚及聚乳酸的结晶和熔融行为[D]．杭州：浙江大学，2006.
Wang Weichao. Melt polycondensation of L-lactic acid and the crystallization and melting behavior of PLLA[D]. Hangzhou:Zhejiang University，2006.

[13] 王天明，金烨，习俊通．FDM 工艺过程中丝材的粘结机理与热学分析 [J]. 上海交通大学学报，2006，40(7):1230–1233.
Wang Tianming，Jin Ye，Xi Juntong. The adhesive mechanism and thermal analysis of fibers in the FDM process[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2006，40(7):1 230–1 233.

（上接第 6 页）

Tang Ke，Xin Chunling，Zhang Cong，et al. Influence of PP-g-MAH on properties of continuous fiber reinforced polypropylene composites[J]. China Plastics Industry，2015，43(12):84–85.

[9] 刘太闯，靳玲，徐冬梅，等．固相接枝法制备高熔体强度聚丙烯的研究 [J]. 工程塑料应用，2015，43(12):35–38.
Liu Taichuang，Jin Ling，Xu Dongmei，et al. Study on high melt strength polypropylene prepared by solid phase grafting method[J]. Engineering Plastics Application，2015，43(12):35–38.

[10] Mandala D K，Bhuniaa H，Bajpai P K，et al. Optimization of acrylic acid grafting onto polypropylene using response surface methodology and its biodegradability[J]. Radiation Physics and Chemistry，2017，132:71–81.

[11] Saffar A，Carreau P J，Ajji A，et al. Development of polypropylene microporous hydrophilic membranes by blending with PP-g-MAH and PP-g-AA[J]. Journal of Membrane Science，2014，462:50–61.

[12] Dias C M R，Savastano H J，John V M. Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement[J]. Construction and Building Materials，2010，24:140–146.

[13] 吴维新，任璞，李宾，等．玻纤形态对长玻纤增强聚丙烯性能的影响 [J]. 工程塑料应用，2013，41(1):23–26.
Wu Weixin，Ren Pu，Li Bin，et al. Effect of glass fiber morphology on properties of long glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application，2013，41(1):23–26.

工程塑料应用杂志社 版权所有 禁止复制