

麻纤维/异种纤维/聚合物复合材料研究进展

盛旭敏

(重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆 400054)

摘要 麻纤维/聚合物复合材料的力学性能尚不令人满意。将麻纤维与其他纤维混杂,可以进一步改善复合材料性能。综述了近年来国内外在麻纤维/异种纤维/聚合物复合材料方面的研究进展。异种纤维主要指与麻纤维不同种类的植物纤维、玻璃纤维、碳纤维以及粘胶、芳纶等其他有机纤维。介绍了混杂纤维种类及混杂方式、聚合物种类以及添加增容剂、纳米填料等其他组分对麻纤维/异种纤维/聚合物复合材料性能的影响,展望了麻纤维/异种纤维/聚合物复合材料的发展趋势。

关键词 天然纤维,麻纤维,玻璃纤维,碳纤维,有机纤维,混杂,聚合物复合材料

Research progress of fibrilia and other fiber hybrid polymer composite

Sheng Xumin

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University of Technology,
Chongqing 400054)

Abstract The mechanical properties of fibrilia/polymer composites are not satisfactory. Mixing fibrilia with other fibers can further improve the properties of polymer composites. The research progress of fibrilia and other fiber hybrid polymer composites at home and abroad was summarized. The other fiber was mainly refer to different kinds of plant fiber, glass fiber, carbon fiber and viscose, aramid fiber and other organic fibers. The effects of fiber types and hybrid mode, resin types and additives (e.g compatibilizer nano filler) on properties of fibrilia and other fiber hybrid polymer composites were introduced. Moreover, the development trend of fibrilia and other fiber hybrid polymer composites was prospected.

Key words natural fiber, fibrilia, glass fiber, carbon fiber, organic fiber, hybrid, polymer composite

植物纤维/聚合物复合材料具有质轻、价廉的优点,且符合复合材料“绿色、低碳”的发展趋势^[1],在汽车制造、航空航天以及建筑工业等领域日益受到关注。

目前用于聚合物复合材料的植物纤维以麻纤维为主,如剑麻、洋麻、亚麻、黄麻、苧麻、大麻、蕉麻等。聚合物包括不饱和聚酯(UP)、环氧树脂(EP)、酚醛树脂(PF)等热固性聚合物以及高密度聚乙烯(HDPE)、聚丙烯(PP)等热塑性聚合物。其中围绕UP、EP、PP开展的研究较多。

与传统增强纤维/聚合物复合材料相比,麻纤维/聚合物复合材料的性能尚不令人满意,主要体现在其力学性能不佳^[2]。针对这一问题,国内外学者利用与麻纤维不同种类(异种)的植物纤维、玻璃纤维(GF)、碳纤维(CF)以及粘胶纤维(VF)、芳纶纤维、羊毛等其他有机纤维与麻纤维混杂制备聚合物

复合材料,以期获得性能良好的复合材料。

1 麻纤维/异种植物纤维/聚合物复合材料

与麻纤维混杂使用的异种植物纤维以香蕉纤维(BF)居多,这是一种以香蕉茎秆为原料制取的植物纤维。Boopalan等^[3]利用BF对黄麻纤维(JF)/EP复合材料进行改性,结果表明添加BF有利于改善复合材料的力学性能和热性能并降低其吸水性;当BF与JF质量比为50:50时,材料的强度(拉伸、冲击、弯曲)最佳,其中冲击强度增幅最大,达到35.5%。Rajesh等^[4]研究了BF/剑麻纤维(SF)混杂纤维对UP性能的影响,发现当混杂纤维总量超过50%(wt,质量分数)时,复合材料的力学性能明显下降。Alavudeen等^[5]探讨了洋麻纤维(KF)、BF混杂方式对UP复合材料强度的影响,结果表明BF/KF平纹编织物的增强效果优于BF/KF斜纹编

纤维物以及纤维随机混杂的增强效果,由此说明纤维互锁的混杂方式更有利于提高纤维与基体间的界面结合,从而改善材料的力学性能。

软木纤维、棕纤维等也可与麻纤维混杂制备聚合物复合材料。为优化材料性能,复合材料中通常还需加入增容剂、纳米填料等。Fernandes 等^[6]以剑麻短纤、软木纤维与 HDPE 挤出造粒制备复合材料,结果表明复合材料中添加质量分数 2% 的马来酸酐接枝聚乙烯(PE-g-MAH)增容剂可以有效改善纤维与基体的界面结合,从而提高复合材料的硬度、强度及断裂伸长率。Saiful 等^[7]在 KF/棕纤维/PP 复合体系中加入 2 份纳米蒙脱土,发现复合材料的拉伸强度及模量均有一定程度的改善。

由以上研究不难看出,麻纤维与异种植物纤维混杂使用能在一定程度上改善材料的力学性能。但植物纤维自身的吸水性制约了聚合物复合材料性能的提升^[2]。研究表明^[8-21],将麻纤维与吸水性小的 GF 混杂使用,是改善聚合物复合材料性能的有效途径。

2 麻纤维/GF/聚合物复合材料

国内外学者主要围绕麻纤维/GF/热固性聚合物复合材料、麻纤维/GF/热塑性聚合物复合材料以及麻纤维/异种植物纤维/GF/热固性聚合物复合材料展开研究。

2.1 麻纤维/GF/热固性聚合物复合材料

这类复合材料通常以纤维织物及 UP、EP 配制的胶液为原料,采用手糊成型、传递模塑等方法制备复合材料。

Akil 等^[8]通过浸水实验得出 JF/UP 复合材料(体积比为 70:30)的吸水率高达 47.65%;而混杂 GF 后,JF/GF/UP 复合材料(体积比为 35:35:30)的吸水率降为 13.31%,可见在纤维总量一定的前提下,将麻纤维与 GF 混杂使用能够显著降低复合材料的吸水性。

Braga 等^[9]以 JF 布、GF 布、EP 为原料,采用手糊法制备了 3 种复合材料:JF/EP(质量比为 31:69)复合材料、JF/GF/EP(质量比为 25:7:68)复合材料(JF 在表层)、JF/GF/EP(质量比为 18:19:64)复合材料(GF 在表层)。对比 3 种复合材料的性能发现,JF/GF/EP 复合材料(JF 在表层)的拉伸强度比 JF/EP 复合材料提高 68.70%,JF/GF/EP 复合材料(GF 在表层)的拉伸强度较 JF/EP 复合材料提高 92.01%。可见在麻纤维/EP 复合材料中即使添加

少量 GF,也能使材料的拉伸强度明显改善,且材料的拉伸强度随 GF 含量增加而显著提高。

Romanzini 等^[10]采用传递模塑法制备了苧麻纤维(RF)/GF/UP 复合材料。结果表明,复合材料的冲击强度及层间剪切强度随混杂纤维总量增加而增加;纤维总量一定时,复合材料的机械性能随 GF 含量增加而增加;RF 与 GF 体积比为 75:25 且混杂纤维总量为 31%(体积分数)时,复合材料的冲击强度及层间剪切强度最大。

雷文等^[11]以 RF 布、GF 布、UP 为原料制备了复合材料。研究表明:RF/GF/UP 复合材料的吸水率与 GF/UP 复合材料的吸水率相近,远低于 RF/UP 复合材料的吸水率;RF 与 GF 质量比分别为 10:20 和 15:15 时,复合材料的弯曲强度及弯曲模量达到最大值;采用硅烷及钛酸酯偶联剂对纤维布进行预处理,可以进一步改善复合材料的模量和强度。

2.2 麻纤维/GF/热塑性聚合物复合材料

这类复合材料多以 PP 为基体,其制备难点在于如何使聚合物熔体与混杂纤维或纤维织物充分融合。为此,国内外学者从原料形态、复合材料制备工艺等方面进行了探索。

王春红等^[12]、张荫楠等^[13]以 PP 纤维为原料,将其与 35%(体积分数,下同)的长苧麻纤维(LRF)、5%的 GF 混合,经开松、梳理后平铺网成坯件并热压成型。采用这种非织造-模压工艺制备的复合材料与 LRF 含量为 40%(体积分数)的 LRF/PP 复合材料相比,其纵横向弯曲强度以及层间剪切强度分别增加了 18.50%、6.50%和 31.41%。可见添加 GF 对复合材料的纵向弯曲强度以及层间剪切强度影响显著。

刘晓烨等^[14]将黄麻纤维毡、玻纤毡与 PP 薄膜以 2 种方式层叠后压制成型,发现以玻纤毡为外层、麻毡为中间层的复合材料弯曲性能较好;而以麻毡为外层、玻纤毡为中间层的复合材料拉伸性能较好。

Jarukumjorn 等^[15]将 SF、GF 按比例混合后加入 PP,然后注塑制样。结果表明:在 SF 中混杂 GF 可以显著降低 SF/PP 复合材料的吸水率并改善其机械性能;复合材料的热变形温度随 GF 含量增加而上升。刘晓烨等^[14]将 10%(wt,质量分数,下同)短切 SF、20%短切 GF 与 PP 挤出造粒后注塑制样,并与未添加 GF 的 SF/PP 复合材料对比,结果发现加入 20%的 GF 后,材料的弯曲强度和模量分别提高 34%和 122%;拉伸强度和模量分别增加 41%和 102%。

罗崇禧等^[16-17]将不同质量分数及质量比的混合纤维 SF/长玻璃纤维(LGF)与 26%(wt,质量分数,下同)的 CaCO_3 、4.5%的马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物(POE-g-MAH)、4.5%的马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)以及 PP 混炼后压制成复合材料。研究发现:混合纤维 SF/LGF 在 PP 基体中呈交叉网状分布;SF/LGF 的总质量分数为 30%且质量比为 2:2 时,材料的冲击强度、弯曲强度和维卡软化温度均达到最大值。通过添加自制超分散剂,可使复合材料的冲击强度、弯曲强度进一步提高 35.2%和 6%,复合材料的热性能、结晶速率、结晶度及储能模量等也有所提高。

2.3 麻纤维/异种植物纤维/GF/热固性聚合物复合材料

与麻纤维/GF/热固性聚合物复合材料相比,这类复合材料的组成更复杂,纤维混杂难度更大,通常以手糊法制备,研究多围绕 EP 展开。

Vijaya 等^[18]以 GF 布为外层,以 JF、蕉麻纤维(AF)交替叠合为中间层(共 3 层)制备了 JF/AF/GF/EP 复合材料,通过比较不同 AF 含量(25%、50%、75%,wt,质量分数,下同)以及 JF 层、AF 层间不同夹角(90° 、 0° 、 45°)条件下制备的复合材料性能发现,材料的拉伸强度随 AF(自身拉伸强度大于 JF)含量增加而增加;AF 含量为 75%且层间夹角为 45° 时,材料的拉伸强度达到最大值 70.25MPa。在中间层层间夹角均为 90° 的条件下,JF/AF/GF/EP 复合材料的拉伸强度及剪切强度优于 AF/GF/EP 复合材料,但前者的弯曲强度和冲击强度低于后者^[19]。

Srinivasan 等^[20]制备了以 GF 布为外层,以亚麻纤维(BF)、BF 交替叠合为中间层(BF 层/BF 层/FF 层的铺层角度为 $90^\circ/0^\circ/90^\circ$)的 EP 复合材料。结果表明 FF/BF/GF/EP 复合材料的热稳定性、阻燃性、弯曲强度和冲击强度均优于 BF/GF/EP 复合材料以及 FF/GF/EP 复合材料。

Bhoopathi 等^[21]研究了 BF/大麻纤维(HF)/GF/EP 复合材料性能,发现 BF/HF/GF/EP 复合材料的冲击强度和弯曲强度略高于 BF/GF/EP 复合材料以及 HF/GF/EP 复合材料,但 BF/HF/GF/EP 复合材料的拉伸强度比 BF/GF/EP 复合材料以及 HF/GF/EP 复合材料下降较多。

综上所述,麻纤维中混杂 GF 后,复合材料的吸水性随 GF 含量增加而降低,力学性能随 GF 含量增加而明显改善。比较而言,麻纤维/GF/热塑性聚合物复合材料的制备难度更大。原因在于:热塑性

聚合物熔体比热固性聚合物配制的胶液更难与混杂纤维充分融合,需要通过原料形态及复合材料制备工艺等进行弥补。此外,麻纤维(及异种植物纤维)/GF/热固性聚合物复合材料的力学性能受纤维织物的铺层顺序及层间夹角影响较大。

3 麻纤维/CF/聚合物复合材料

与 GF 相比,CF 虽然价格偏高,但其具有轻质高强的优势,国内外学者针对麻纤维/CF/聚合物复合材料也进行了一些探索性研究。

Flynn 等^[22]将 FF、CF 交替铺层后再注入 EP 制备复合材料。结果表明:CF 体积分数增加,则复合材料的密度、拉伸强度、弯曲强度及模量增加;CF 能够明显改善复合材料的冲击强度,FF/CF/EP 复合材料中 CF 的体积分数仅为 12%,也可使材料冲击强度提高 400%;借助混合法则及 Halpin-Tsai 模型可以进一步优化 FF/CF/EP 复合材料的机械性能。

Bagheri 等^[23]以 16 层 FF/EP 预浸片料作为芯层,与 2 层 CF/EP 预浸片料(表层)叠合后通过热压制备复合材料板,发现这种 FF/CF/EP 复合材料板具有高循环疲劳强度,足以承受人体股骨日常运动的负荷,可用作医学上的接骨板,由此也说明麻纤维/异种纤维/聚合物的应用领域并不局限于航空、汽车、建材领域。

莫正才等^[24]研究发现,将长度为 6mm、面密度为 12g/m^2 的短切苧麻纤维(SRF)铺散在 CF/EP 预聚布第 3、4 层(中间层)时,复合材料的层间断裂韧性最佳且拉伸性能、弯曲性能也有一定提高。

4 麻纤维/其他有机纤维/聚合物复合材料

与麻纤维混杂改性的其他有机纤维主要包括 VF、芳纶纤维等人造有机纤维以及羊毛等天然有机纤维。

Ranganathan 等^[25]借助同向双螺杆挤出机将黄麻纤维长纤(LJF)、VF 与 PP 挤出造粒后压制成型。结果表明:VF 有利于防止材料内部裂纹扩展,含有 10%(wt,质量分数,下同)VF 的复合材料较未添加 VF 的 LJF/PP 复合材料,断裂韧性及断裂能分别提高 133%和 514%,且疲劳寿命是 LJF/PP 复合材料的 3 倍;LJF/VF/PP 复合材料中添加 2%的 PP-g-MAH,可进一步提高材料断裂韧性、断裂能以及疲劳寿命。

王春红等^[26]以精细化处理后的洋麻纤维(KF)

与对位芳纶纤维的混纺织物为增强体,通过模压工艺制备了 KF/芳纶/EP 复合材料。研究发现:精细化处理工艺使 KF 表面粗糙度增加,更有利于织物与树脂浸润,从而改善了复合材料性能;采用斜纹编织方式的混纺织物更有利于树脂渗透,且具有较小的纤维屈曲使复合材料拉伸性能较优;KF/芳纶/EP 复合材料与芳纶/EP 复合材料力学性能相近,但更具有成本优势。Zhong 等^[27]将 SF 与芳纶纤维按质量比 8:2 混合,添加 PF 制备了复合材料,很好地兼顾了高性能与低成本要求。

Santulli 等^[28]以 JF 布、羊毛毡与 EP 为原料,采用插层复合及夹芯复合 2 种方法制备复合材料。声发射技术检测表明 JF 布与羊毛毡混杂使用,可以实现应力的有效传递,从而提高复合材料的拉伸性能和弯曲性能。

5 结语与展望

以麻纤维为代表的植物纤维制备聚合物复合材料具有轻质、价廉、环保等优点,但其力学性能与传统纤维/聚合物复合材料相比还有较大差距。将麻纤维与其他纤维混杂,可以进一步改善复合材料性能。麻纤维与异种植物纤维混杂,往往还需要添加增容剂、纳米填料等以进一步改善复合材料的性能;将麻纤维与 GF 混杂使用可以有效降低麻纤维吸水性对复合材料性能的负面影响,从而达到提高材料性能并兼顾成本的目的;CF 具有轻质高强的优势,但价格偏高,目前针对麻纤维/CF/聚合物复合材料的研究还很薄弱;麻纤维与 VF、芳纶、羊毛等有机纤维混杂制备聚合物复合材料的研究也有待加强。

为适应聚合物复合材料高性能化、轻量化、环保化的发展趋势,还需深入研究麻纤维与 CF、芳纶纤维等高性能纤维混杂制备聚合物复合材料;麻纤维与羊毛、蚕丝等天然有机纤维混杂制备聚合物复合材料也需要进一步研究,以便为全降解聚合物复合材料的高性能化奠定基础。

参考文献

- [1] Ho M, Wang H, Lee J, et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites[J]. *Composites: Part B*, 2012, 43(8): 3549-3562.
- [2] 盛旭敏, 李又兵. 聚合物基天然植物纤维增强复合材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2012, 40(10): 1-3.
- [3] Boopalan M, Niranjana M, Umapathy M J. Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites[J]. *Composites: Part B*, 2013, 51: 54-57.
- [4] Rajesh M, Pitchaimani J, Rajini N. Free vibration characteristics of banana/sisal natural fibers reinforced hybrid polymer composite beam[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 144: 1055-1059.
- [5] Alavudeen A, Rajini N, Karthikeyan S, et al. Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites: effect of woven fabric and random orientation[J]. *Materials and Design*, 2015, 66: 246-257.
- [6] Fernandes E M, Mano J F, Reis R L. Hybrid cork-polymer composites containing sisal fibre: morphology, effect of the fibre treatment on the mechanical properties and tensile failure prediction[J]. *Composite Structures*, 2013, 105: 153-162.
- [7] Saiful I M, Nur Atiqah B H, Hasan, et al. Physical, mechanical and biodegradable properties of kenaf/coir hybrid fiber reinforced polymer nanocomposites[J]. *Materials Today Communications*, 2015, 4: 69-76.
- [8] Akil H M, Santulli C, Sarasini F, et al. Environmental effects on the mechanical behaviour of pultruded jute/glass fibre-reinforced polyester hybrid composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 94: 62-70.
- [9] Braga R A, Magalhaes Jr P A A. Analysis of the mechanical and thermal properties of jute and glass fiber as reinforcement epoxy hybrid composites[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2015, 56: 269-273.
- [10] Romanzini D, Lavoratti A, Ornaghi Jr H, et al. Influence of fiber content on the mechanical and dynamic mechanical properties of glass/ramie polymer composites[J]. *Materials and Design*, 2013, 47: 9-15.
- [11] 雷文, 任超, 杨涛. 玻璃纤维布/苧麻纤维布混杂增强不饱和聚酯树脂的研究[J]. *热固性树脂*, 2007, 22(6): 25-28.
- [12] 王春红, 张青菊, 任子龙, 等. GF 增强 PP/苧麻纤维复合材料的制备及其性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(7): 1-5.
- [13] 张荫楠, 王春红, 马崇启. 苧麻纤维/玻璃纤维混杂增强聚丙烯树脂基复合材料的制备与力学性能分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(增刊): 63-67.
- [14] 刘晓辉, 戴干策. 麻纤维/玻璃纤维混杂增强聚丙烯复合材料的性能研究[J]. *塑料工业*, 2007, 35(6): 35-38; 49.
- [15] Jarukumjorn K, Suppakarn N. Effect of glass fiber hybridization on properties of sisal fiber-polypropylene composites[J]. *Composites: Part B*, 2009, 40(7): 623-627.
- [16] 罗崇禧, 陆绍荣, 郭栋, 等. 剑麻纤维/长玻纤混杂增强 PP 复合材料的力学性能研究[J]. *塑料工业*, 2012, 40(4): 60-63.
- [17] 罗崇禧, 陆绍荣, 郭栋, 等. 超分散剂对剑麻纤维/长玻纤/聚丙烯复合材料性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(11): 80-83; 88.
- [18] Vijaya R B, Manickavasagam V M, Elanchezian C, et al. Determination of mechanical properties of intra-layer abaca-jute-glass fiber reinforced composite[J]. *Materials and Design*, 2014, 60: 643-652.
- [19] Vijaya R B, Junaid K S, Niranjana R R, et al. Evaluation of mechanical properties of abaca-jute-glass fibre reinforced epoxy composite[J]. *Materials and Design*, 2013, 51: 357-366.

(下转第 246 页)