

研究论文

基于 Digimat RVE 的碳纤维增强聚丙烯复合材料性能分析

孙胜然^{1,2} 吴东乐^{1,2} 罗嘉倩^{1,2} 许跃^{1,2} 刘文^{1,2} 徐凯丽^{1,2}

(1. 中国制浆造纸研究院有限公司, 北京, 100102; 2. 制浆造纸国家工程实验室, 北京, 100102)

摘要: 采用 Digimat 软件包对造纸/热压模塑法制备的碳纤维增强聚丙烯 (CF/PP) 复合材料建立等效体积单元 (RVE), 研究了碳纤维含量、碳纤维长径比和基体中碳纤维取向对 CF/PP 复合材料力学性能、导热性能和导电性能的影响。模拟实验结果表明, 碳纤维含量从 5 wt% 增至 30 wt%, CF/PP 复合材料弹性模量和电导率分别提高 290% 和 750%; 碳纤维长径比从 100 提高至 700, CF/PP 复合材料电导率提高了约 54 倍; 碳纤维取向张量的变化对 CF/PP 复合材料 RVE 的弹性模量和导热系数的影响可以忽略不计。Digimat 软件对 CF/PP 复合材料导热系数的模拟值较精确, 在 100℃ 下测量的导热系数实验结果与软件模拟结果误差为 0.48%。

关键词: Digimat; 碳纤维复合材料; 造纸法; 等效体积单元

中图分类号: TB332; TS758*.4

文献标识码: A

DOI: 10.11981/j.issn.1000-6842.2021.01.44

短切碳纤维增强热塑性 (CCFRTP) 复合材料是目前受到广泛关注的一类复合材料, 具有加工性能好、比强度高、密度低等优点^[1]。CCFRTP 复合材料的性能不仅与热塑性基体的性能有关, 还受到增强纤维长度、含量和取向等参数的影响^[1-6]。湿法造纸技术结合热压模塑工艺制备 CCFRTP 复合材料, 具有优异、高效的特点, 有利于提高纤维在基体中的分散性并控制其在基体中的取向分布, 从而提高复合材料的性能^[2]。

目前, 有很多关于预测 CCFRTP 复合材料性能的方法和模型研究。Andriyana 等^[1] 将基体中的局部纤维取向考虑在内, 为注塑成型的 CCFRTP 复合材料建立了机械性能的数学模型。Wan 等^[4] 研究了不同方式制备的 CCFRTP 复合材料拉伸性能与其纤维长径比的关系; 在此研究中, Mori-Tanaka 模型可以成功预测基体中的带状材料长度对复合材料拉伸性能的影响, 并且可根据计算机模拟预测结果计算出增强带状材料的最佳长度。Hashimoto 等^[3] 提出了一种新的预测方法——逐层分析方法 (LWM), 用于预测具有任意纤维取向角的不连续纤维增强复合材料的拉伸强度。目前, CCFRTP 复合材料的相关数学模型研究通

常都基于 Mori-Tanaka 给出的模型^[7]。综上所述, 有效的预测方法可为 CCFRTP 复合材料的制备提供参考。

由于可控变量较多, 开发造纸法制备 CCFRTP 复合材料的工艺实验步骤繁复, 研发成本较高, 而利用计算机仿真模拟, 分析实验过程中增强纤维的可控变量对材料性能的影响, 可大大提高研发速度, 并为 CCFRTP 复合材料其他制备方法的研究提供帮助。本课题采用 Digimat 软件中多相材料非线性材料本构预测工具 (MF) 模块进行仿真模拟, MF 模块具有预测材料性能和快速建立复合材料模型的功能^[4, 8-10], 研究碳纤维含量、碳纤维长径比与基体中碳纤维取向对碳纤维增强聚丙烯 (CF/PP) 复合材料力学性能、导热性能和导电性能的影响。

1 实验

1.1 原料

CF 和双组分聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 纤维由日本帝人株式会社提供, PP 纤维由慈溪金轮复合纤维有限公司提供。

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 电气及新能源用纸基复合材料制备技术 (2017YFB0308200)。

作者简介: 孙胜然, 女, 1995 年生; 硕士; 主要研究方向: 纸基复合材料。

E-mail: sunshengran1021@163.com

1.2 实验方法

CF/PP 复合材料制备方法如图 1 所示。经过多次实验验证与文献参考^[11]可知, CF/PP 复合材料的最佳制备条件为: 将 CF、PP 纤维和双组分 PET 纤维(由于 PP 的熔融温度较高, 因此, 在 CF/PP 复合材料的制备过程中加入双组分 PET 纤维, 可使 CF/PP 复合材料在造纸工艺的温度下成形)在纸浆标准解离器中解离, 利用抄纸器制得定量为 80 g/m² 的湿纸张。随后, 湿纸张在鼓式干燥器中干燥成形, 干燥温度为 140℃。将纸张裁切成一定形状, 置于模具中, 在已预热的层压机中预热 1 min 后, 施以 5 MPa 压力热压 1 min, 热压温度为 180℃, 即得 CF/PP 复合材料。

1.3 材料参数与模型

1.3.1 平均场均质化方法和 Mori-Tanaka 模型

对于两相复合材料来说, 平均场均质化方法即等效体积单元 (Representative Volume Element, RVE) 法是预测短纤维增强复合材料性能的有效方法, 其目的是, 在宏观应力和应变的 RVE 层级和每个组分相层级上统一计算复合材料应力和应变场的体积平均值^[12]。Mori-Tanaka 模型是平均场均质化方法中的一个有效应用模型, 主要用于不连续且在基体中随机分布的纤维增强复合材料 (FRTP), 该模型由 Mori 和 Tanaka 于 1973 年提出^[13], 模型示意图如图 2 所示。Benveniste^[7]给出了 Mori-Tanaka 模型的简单解释, 即

真实 RVE 中每个夹杂体的表现是孤立于真实基体材料的, 该材料是无限的, 且施加了和宏观应变一样的平均基体应变, 材料刚度张量 E 的数学模型如式(1)所示。MT 表示 Mori-Tanaka 模型, f 、 m 分别表示纤维与基体, I 为单位向量, V 表示体积分数, $\{ \}$ 表示纤维平均方向。

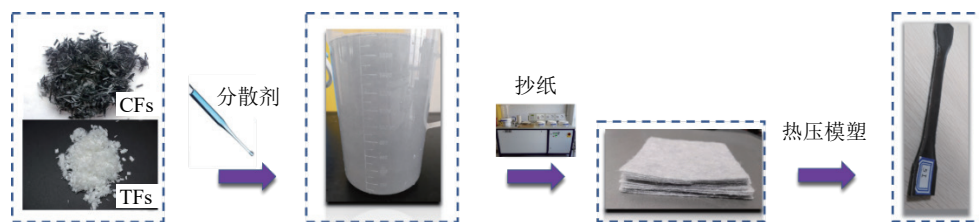
$$E^{MT} = E_m + V_f \{ (E_f - E_m) : T \} : [V_m I + V_f \{ T \}]^{-1} \quad (1)$$

其中, 张量 T 可以用式(2)表示, S_m 为单夹杂体中的 Eshelby 张量。

$$T = [I + S_m : E_m^{-1} : (E_f - E_m)]^{-1} \quad (2)$$

1.3.2 纤维取向的定义

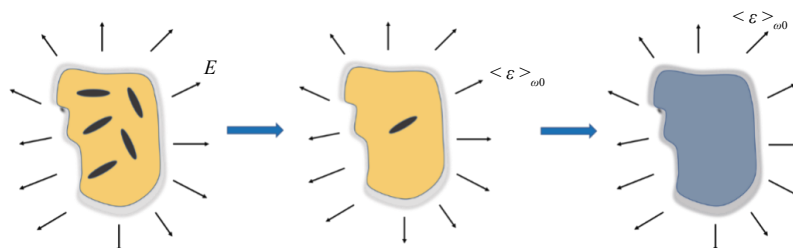
假设单根纤维在基体中挺直无弯曲, 则可将纤维取向角度定义为平面内角度 (θ) 与平面外角度 (φ)^[4], 如图 3(a) 所示。其中, P 为纤维取向方向上的任意一点, A_{ij} 为特定位置上纤维的取向分布概率, 由式(3)计算可得。将二阶张量 A_{ij} 分解, 可以得到特征值 λ 与特征向量 \bar{e} , 纤维取向的三维空间可由椭圆柱体表示, 如图 3(b) 所示。由原点到空间椭圆上的特定一点形成的取向向量, 表示在该方向上纤维分布的概率。单根纤维 k 的取向分布可由 θ 与 φ 表示, 如式(4)所示。对于某一区域中的 n 根纤维, 它们在这一区域的取向分布 a_{ij} 可由式(5)表示, 取 n 根纤维分布张量的平均数值^[14]。



注 热塑性纤维(TFs)为 PP 与 PET 的混合物。

图 1 CF/PP 复合材料制备方法

Fig. 1 Preparation of CF/PP composite



注 $\langle \epsilon \rangle_{\omega 0}$ 是平均应变。

图 2 Mori-Tanaka 模型示意图

Fig. 2 Schematic of Mori-Tanaka model

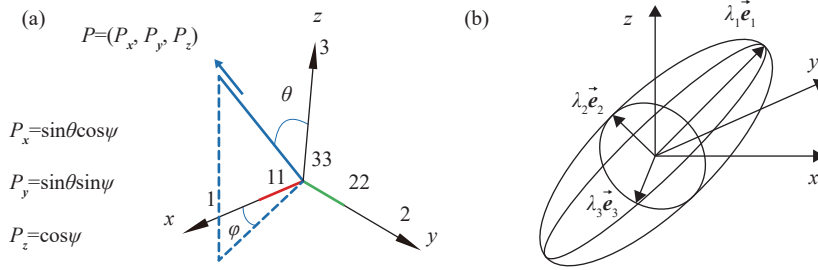


图3 纤维方向定义(a)和纤维取向张量几何定义(b)

Fig. 3 Definition of fiber orientation (a) and fiber orientation tensor (b)

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [\vec{e}_1 \quad \vec{e}_2 \quad \vec{e}_3] \quad (3)$$

$$[a_{ij}^k] = \begin{bmatrix} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi & \sin^2 \theta \sin \theta \cos \varphi & \sin \theta \cos \theta \cos \varphi \\ \sin^2 \theta \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \theta \sin^2 \varphi & \sin \varphi \sin \theta \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{ij}^k \quad (5)$$

1.3.3 复合材料机械性能模拟的失效指标

分析复合材料机械强度时, 失效模型选择为 Component Model, 当模拟过程中出现的指标值小于 1 时, 表示为安全状态, 当指标值大于 1 时, 则认为发生故障。复合材料的拉伸失效指标($f(A)$)和压缩失效指标($f(B)$)分别如式(6)和式(7)所示。其中, X_t 与 X_c 分别表示最大拉伸强度与最大压缩强度; $F_A(\sigma)$ 和 $F_B(\sigma)$ 分别表示拉伸模拟指标和压缩模拟指标; σ 和 σ_{ij} 分别表示软件模拟拉伸强度和在某个方向上的模拟拉伸强度。

$$f(A) = F_A(\sigma) \text{ with } F_A(\sigma) = \frac{\sigma_{ij}}{X_t}, \quad \text{if } \sigma_{ij} > 0, 0 \text{ otherwise} \quad (6)$$

$$f(B) = F_B(\sigma) \text{ with } F_B(\sigma) = -\frac{\sigma_{ij}}{X_c}, \quad \text{if } \sigma_{ij} < 0, 0 \text{ otherwise} \quad (7)$$

1.3.4 傅里叶模型和欧姆模型

Digimat 软件对复合材料导热性能的分析是基于线性傅里叶模型、仅考虑导热系数的前提下; 根据傅里叶定律, 对热力学第一定律进行改写, 热力学第一定律如式(8)所示。在封闭系统内, 能量随时间的推移守恒。其中, ρ 、 c 、 T 、 t 、 q 和 r 分别代表密度、比热、温度、时间、热流密度和体积供热, k^h 表示热导率矩阵。傅里叶定律对热力学第一定律的改写如式

(9)所示。

$$\rho c \frac{dT}{dt} = -\text{div}(q) + r \quad (8)$$

$$q = -k^h \cdot \text{grad}(T) \quad (9)$$

Digimat 软件对复合材料电导率的分析是基于欧姆模型, 其数学模型如式(10)所示。其中, J 为电流密度, V 为电位, k^{el} 为电导率矩阵。

$$J = -k^{el} \cdot \text{grad}(V) \quad (10)$$

1.3.5 材料及研究对象参数

CF/PP 复合材料由造纸/热压模塑法制备而得, 表 1 给出了 CF 和 PP 在 Digimat 软件中的相关性能参数。PP 与 CF 分别选用弹塑性模型与弹性模型, CF/PP 复合材料微观力学性能选用 Mori-Tanaka 模型, PP 的应力-应变曲线选用 J_2 -plasticity 模型。

表 1 CF 与 PP 的相关性能参数

Table 1 Parameters of CF and PP

材料性能	PP	CF
本构关系	弹塑性模型	弹性模型
密度/kg·m ⁻³	900	1800
杨氏模量/MPa	1400	235000
泊松系数 γ	0.35	0.22
纤维直径/ μm	—	7
屈服应力 σ_y /MPa	7.5	—
硬化模量 R_p /MPa	21	—
硬化指数	179.9	—
比热/J·(kg·K) ⁻¹	1900	800
导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.22	4.3×10 ⁻⁷
导电系数/ $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$	1×10 ⁻¹⁴	500

2 结果与讨论

2.1 碳纤维含量、长径比和取向对 CF/PP 复合材料 RVE 机械性能的影响

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 机械强度的影响, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 碳纤维含量变化范围为 5 wt%~30 wt%, 曲线斜率为弹性模量; 应力和应变为线性关系, 即图

4 中所示各个材料所受应力为弹性工作阶段。在弹性工作阶段，随着碳纤维含量的增加，CF/PP 复合材料 RVE 的应力-应变曲线斜率显著提高；表明 CF/PP 复合材料弹性模量随碳纤维含量的增加而增大，CF/PP 复合材料材料在受到外界应力时不易发生变形。碳纤维含量从 5 wt% 提高至 30 wt%，CF/PP 复合材料的弹性模量提高了约 290%。

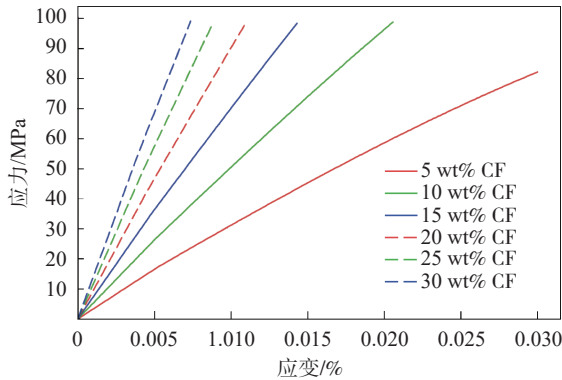


图 4 碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 机械强度的影响
Fig. 4 Effect of carbon fiber content on the RVE mechanical strength of CF/PP composite

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 机械强度的影响，结果如图 5 所示。其中，碳纤维长径比变化范围为 100~700，纤维长径比定义如式(11)所示。

$$K = \frac{l}{d} \tag{11}$$

式中， l 表示纤维长度， d 表示纤维直径。

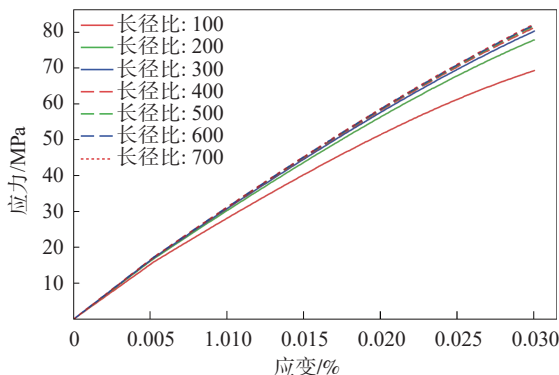


图 5 碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 机械强度的影响
Fig. 5 Effect of carbon fiber aspect ratio on the RVE mechanical strength of CF/PP composite

从图 5 可以看出，在弹性工作阶段内，随碳纤维长径比的增大，CF/PP 复合材料 RVE 的弹性模量有较明显的提高。当碳纤维长径比由 100 提高至 200 时，CF/PP 复合材料弹性模量变化最显著；碳纤维长径比在 200~700 的范围内，CF/PP 复合材料弹性模量差异

较小。这是由于，当碳纤维长径比较小 (<100) 时，CF/PP 复合材料的刚度性质未发挥作用；而碳纤维长径比增大 (100~200)，碳纤维承受的平均应力增大，CF/PP 复合材料的弹性模量也相应提高；当碳纤维长径比达到一定值后 (>200)，碳纤维承受大部分外部载荷，刚度性质充分发挥作用，CF/PP 复合材料弹性模量的增大趋于平稳，接近连续纤维增强热塑性复合材料的弹性模量值^[15]。

研究碳纤维取向分布对 CF/PP 复合材料 RVE 机械强度的影响时，由 CF/PP 复合材料的制备工艺可知，手工抄纸过程中，纤维在平面内的分布不受约束，因此，使取向角度张量 $a[1,1]$ 和 $a[2,2]$ 的模拟取值固定并使其相等。另据 Wan 等^[4] 的研究可知，相似工艺制备的短切 CF/PP 复合材料在张量 $a[1,1]$ 和 $a[2,2]$ 的值约为 0.490；因此，为研究碳纤维取向对 CF/PP 复合材料性能的影响，将张量 $a[1,1]$ 与 $a[2,2]$ 的取值范围限定在 0.485~0.495，碳纤维长径比固定为 714 (此时，取真实值)，含量固定为 5 wt%。利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维取向对 CF/PP 复合材料 RVE 机械强度的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，在弹性工作阶段内，碳纤维取向张量对 CF/PP 复合材料 RVE 的应力-应变曲线影响不明显，3 条曲线在图中几乎重叠。

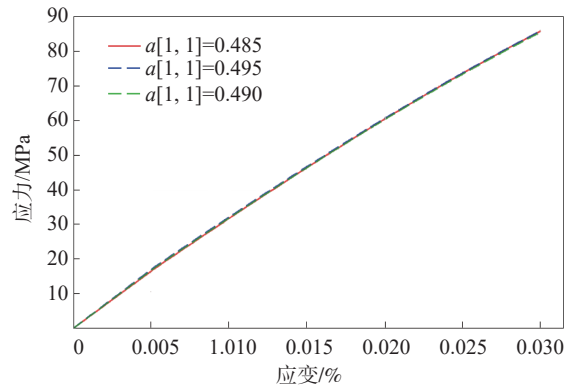


图 6 碳纤维取向对 CF/PP 复合材料 RVE 机械强度的影响

Fig. 6 Effect of carbon fiber orientation on the RVE mechanical strength of CF/PP composite

2.2 碳纤维含量、长径比和取向对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响，结果如图 7 所示；其中，横坐标为 CF/PP 复合材料在纤维分布方向 x 轴上的温度梯度变化范围；纵坐标为 CF/PP 复合材料在此方向上的热流密度。由图 7 可知，热流密度与温度

梯度成正相关关系,即温度梯度增大,热流密度提高。碳纤维含量在 5 wt%~30 wt% 范围内,每种碳纤维含量对应的 CF/PP 复合材料 RVE 的温度梯度-热流密度变化如图 7(a)所示。热流密度与温度梯度的比值(图 7(a)中的曲线斜率)为 CF/PP 复合材料 RVE 的导热系数。由图 7(a)可知,碳纤维含量增加,曲线斜率降低,即 CF/PP 复合材料 RVE 的导热系数降低。此外,利用 Digimat-MF 软件模块对 CF/PP 复合材料 RVE 的导热性能进行模拟时,可根据给定参数模拟计算不同情况下 CF/PP 复合材料 RVE 的比热容,结果如图 7(b)所示。随着碳纤维含量的增加,CF/PP 复合材料 RVE 的比热容下降,碳纤维含量与 CF/PP 复合材料的比热容呈线性相关关系。

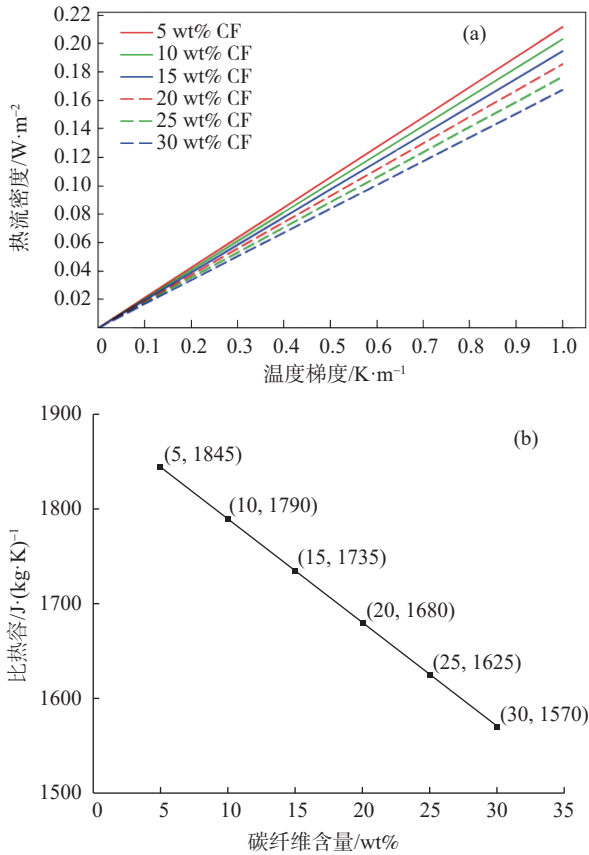


图 7 碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响

Fig. 7 Effect of carbon fiber content on the RVE thermal conductivity of CF/PP composite

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响,结果如图 8 所示;其中,碳纤维长径比变化范围为 100~700,碳纤维含量固定为 30 wt%,碳纤维取向固定为 $a[1,1]=0.490$ 。从图 8 可以看出,当碳纤维长径比从 100 提高至 700,各 CF/PP 复合材料 RVE 的热流密度-温度梯度

曲线几乎完全重合。因此可知,当碳纤维含量和取向固定不变时,碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响可忽略不计。此外,不同长径比碳纤维对应的 CF/PP 复合材料 RVE 的比热容数值在模拟结束同时被记录,按模拟结果所示,碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 的比热容没有影响,碳纤维取向一定时,30 wt% 碳纤维含量的 CF/PP 复合材料 RVE 的比热容为 $1570 J \cdot (kg \cdot K)$ 。

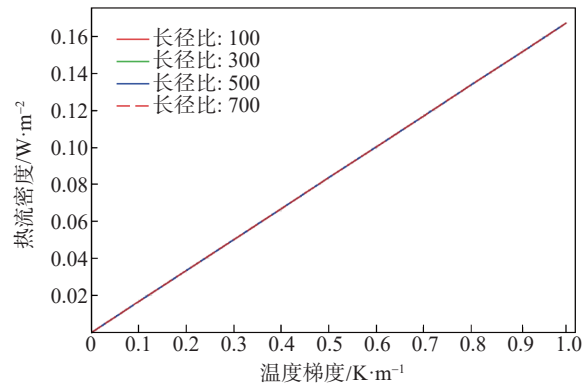


图 8 碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响

Fig. 8 Effect of carbon fiber aspect ratio on the RVE thermal conductivity of CF/PP composite

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维取向对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响,结果如图 9 所示;其中,碳纤维取向张量 $a[1,1]$ 取值范围为 0.485~0.495。由图 9 可知,在 x 轴上,CF/PP 复合材料 RVE 导热系数随碳纤维取向张量 $a[1,1]$ 的增大保持基本不变,因此,3 条曲线完全重合。此外,不同取向碳纤维对应的 CF/PP 复合材料 RVE 的比热容数值在模拟结束同时被记录,按模拟结果所示,碳纤维取向对 CF/PP 复合材料 RVE 比热容的影响可忽略不计。

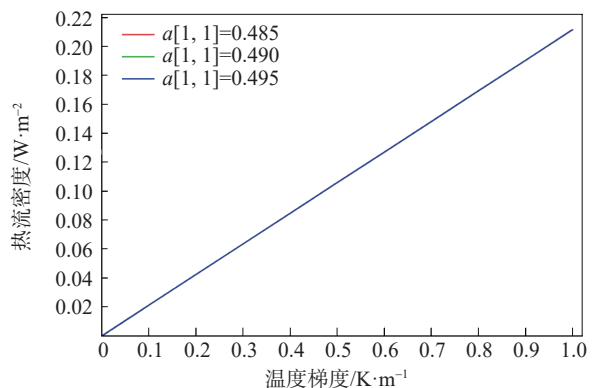


图 9 碳纤维取向对 CF/PP 复合材料 RVE 导热性能的影响

Fig. 9 Effect of carbon fiber orientation on the RVE thermal conductivity of CF/PP composite

2.3 碳纤维含量、长径比和取向对 CF/PP 复合材料 RVE 导电性能的影响

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 导电性能的影响, 结果如图 10 所示; 其中, 横坐标为 CF/PP 复合材料 RVE 在平面内 x 轴方向上的电位梯度变化, 纵坐标表示在相同方向上的电流密度, 电流密度与电位梯度的比值为 CF/PP 复合材料 RVE 的电导率, 如式(10)所示。电导率与体积电阻率成反比, 其大小可用于表征材料的导电性能, 电导率值越高, 说明材料导电性能越好。由图 10 可知, 当碳纤维含量从 5 wt% 增至 30 wt%, CF/PP 复合材料 RVE 在 x 轴方向上的电导率提高了约 750%。

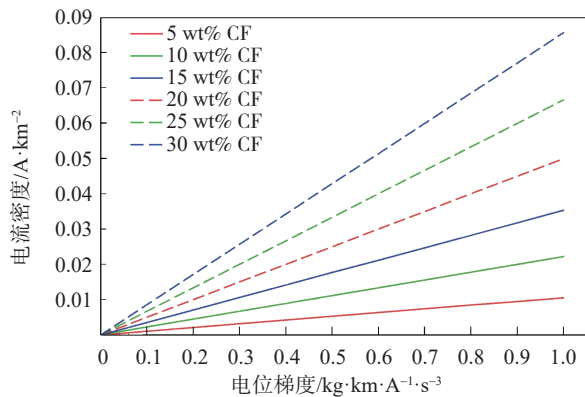


图 10 碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 导电性能的影响

Fig. 10 Effect of carbon fiber content on the RVE electrical conductivity of CF/PP composite

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 导电性能的影响, 结果如图 11 所示; 其中, 碳纤维长径比范围为 100~700、碳纤维含量固定为 5 wt%、碳纤维取向固定为 $a[1, 1]=0.491$ 。由图 11 可知, 随着碳纤维长径比的提高, CF/PP 复合材料 RVE 在 x 轴方向的导电性能随之提高, 与碳纤维

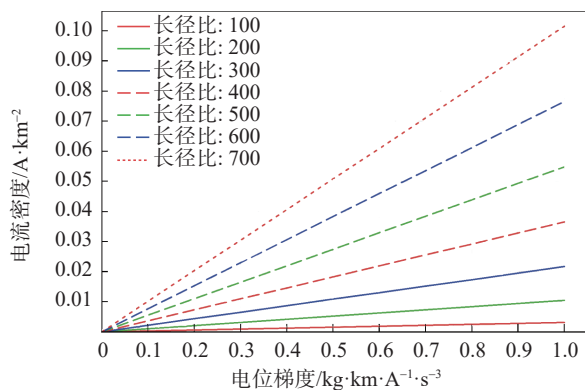


图 11 碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 导电性能的影响

Fig. 11 Effect of carbon aspect ratio on the RVE electrical conductivity of CF/PP composite

长径比为 100 的 CF/PP 复合材料相比, 碳纤维长径比为 700 的 CF/PP 复合材料 RVE 的电导率提高了 54 倍。

利用 Digimat-MF 软件模块模拟碳纤维取向对 CF/PP 复合材料 RVE 导电性能的影响, 结果如图 12 所示; 其中, 碳纤维的取向张量 $a[1, 1]$ 的范围为 0.485~0.495, 碳纤维含量和碳长径比分别固定为 5 wt% 和 714。由图 12 可知, CF/PP 复合材料 RVE 的电导率随碳纤维取向张量的增大而提高, 但提高幅度很小 (28%), 说明碳纤维取向分布对 CF/PP 复合材料的导电性能影响较小。

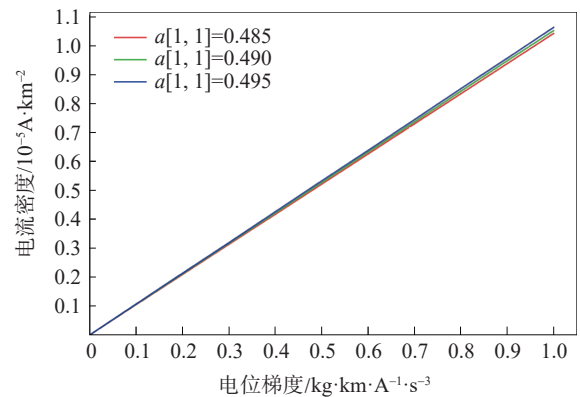


图 12 碳纤维取向对 CF/PP 复合材料 RVE 导电性能的影响

Fig. 12 Effect of carbon orientation on the RVE electrical conductivity of CF/PP composite

2.4 模拟结果验证

采用造纸/热压模塑工艺制备的 CF/PP 复合材料的实际力学性能如图 13 所示; 其中, 曲线斜率为 CF/PP 复合材料的弹性模量, 碳纤维含量为 5 wt%、10 wt% 和 20 wt% 的 CF/PP 复合材料的实际弹性模量分别为 0.7、1.2 和 1.5 GPa。以实验数值为参考量, 碳纤维含量为 5 wt%、10 wt% 和 20 wt% 的 CF/PP 复合材料的弹性模量模拟结果与实验结果之间的误差值分别为

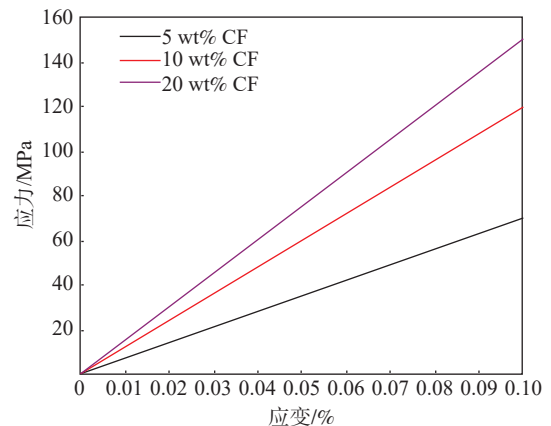


图 13 CF/PP 复合材料的拉伸应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curves of CF/PP composite

343%、316% 和 367%。此误差来源可能是由黏结纤维所导致，由于聚丙烯纤维与碳纤维的表面均很光滑，造纸过程中纸张不易成形，需要添加黏结物质。实际实验过程中，添加的黏结纤维在 CF/PP 复合材料中所占比例较高，可达 20%。

当碳纤维含量为 5 wt%、长径比为 700、 $a[1,1]$ 为 0.491 时，CF/PP 复合材料 RVE 的导热系数模拟值为 0.211 W/(m·K)，与制备的 CF/PP 复合材料的实验数值十分接近。在 80°C 下，对制备所得的 CF/PP 复合材料进行导热性能检测，其导热系数为 0.214 W/(m·K)，以实验数值为参考量，模拟导热系数与实际导热系数之间的误差为 1.40%；100°C 时，以实验数值为参考量，模拟导热系数与实际导热系数（0.210 W/(m·K)）之间的误差为 0.48%。结果表明，Digimat-MF 软件模块对 CF/PP 复合材料导热性能的模拟结果较准确。

3 结 论

本课题基于等效体积单元（RVE）层级，利用 Digimat 软件包的多项材料非线性材料本构预测工具（MF）模块模拟研究了碳纤维含量、碳纤维长径比和基体中碳纤维取向对由造纸/热压模塑法制得的碳纤维增强聚丙烯（CF/PP）复合材料 RVE 力学性能、导热性能和导电性能的影响，主要结论如下。

3.1 碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 的机械强度影响最大，与碳纤维含量为 5 wt% 的 CF/PP 复合材料相比，碳纤维含量为 30 wt% 的 CF/PP 复合材料 RVE 的弹性模量提高了约 290%。碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 的弹性模量影响较小。结合造纸技术特点可知，在 x 轴上，碳纤维取向张量的变化范围较小时，其对复合材料机械性能的影响基本可忽略不计。

3.2 碳纤维含量对 CF/PP 复合材料 RVE 的导热性能影响较小，随着碳纤维含量增大，CF/PP 复合材料 RVE 的导热系数呈略微下降趋势。碳纤维长径比和取向对 CF/PP 复合材料 RVE 的导热系数无影响。此外，模拟结果显示，当碳纤维含量变化时，CF/PP 复合材料的比热容也随之变化，且其随碳纤维含量的增加呈线性下降趋势。在 80°C 和 100°C 时分别测定 CF/PP 复合材料的导热系数；结果表明，以实验数值为参考量，实验结果对模拟结果的误差分别为 1.40% 和 0.48%，表明 Digimat-MF 软件模块的模拟结果较准确。

3.3 碳纤维含量、长径比和取向三者共同影响 CF/

PP 复合材料 RVE 的导电性能；当碳纤维含量从 5 wt% 增至 30 wt%、碳纤维在 x 轴方向上的取向张量从 0.485 增至 0.495，CF/PP 复合材料 RVE 的电导率分别提高了 750% 和 28%；而碳纤维长径比对 CF/PP 复合材料 RVE 的电导率影响最显著，当碳纤维长径比从 100 增至 700，CF/PP 复合材料 RVE 的电导率可提高约 54 倍。

参 考 文 献

- [1] Andriyana A, Billon N, Silva L. Mechanical response of a short fiber-reinforced thermoplastic: Experimental investigation and continuum mechanical modeling [J]. *European Journal of Mechanics-A Solids*, 2010, 29(6): 1065-1077.
- [2] 杨铨铨, 梁基照. 连续纤维增强热塑性复合材料的制备与成型 [J]. *塑料科技*, 2007, 35(6): 34-40.
YANG Q Q, LIANG J Z. Preparation and Forming of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics Composites [J]. *Plastics Science and Technology*, 2007, 35(6): 34-40.
- [3] Hashimoto M, Okabe T, Sasayama T, et al. Prediction of tensile strength of discontinuous carbon fiber/polypropylene composite with fiber orientation distribution [J]. *Composites Part A*, 2012, 43(10): 1791-1799.
- [4] Wan Y, Takahashi J. Tensile properties and aspect ratio simulation of transversely isotropic discontinuous carbon fiber reinforced thermoplastics [J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 137(12): 167-176.
- [5] Flemming T, Kress G, Flemming M. A new aligned short-carbon-fiber-reinforced thermoplastic prepreg [J]. *Advanced Composite Materials*, 2012, 5(2): 151-159.
- [6] Sato N, Kurauchi T, Sato S, et al. Microfailure behaviour of randomly dispersed short fibre reinforced thermoplastic composites obtained by direct SEM observation [J]. *J Mater Sci*, 1991, 26: 3891-3898.
- [7] Benveniste Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials [J]. *Mechanics of Materials*, 1987, 6(2): 147-157.
- [8] Trzepieciński T, Rzyńska G, Biglar M, et al. Modelling of multilayer actuator layers by homogenisation technique using Digimat software [J]. *Ceramics International*, 2016, 43(3): 3259-3266.
- [9] 高真, 曹鹏, 孙新建, 等. 基于 DIGIMAT 的混凝土等效弹性模量研究 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(5): 186-192.
GAO Z, CAO P, SUN X J, et al. Digimat-based Study on Equivalent Elastic Modulus of Concrete [J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2018, 49(5): 186-192.
- [10] 孙显俊. 聚丙烯及其复合材料注塑件翘曲变形数值模拟与实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
SUN X J. Warpage of Injection Molded Parts Manufactured with Polypropylene and its Composite [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [11] 颜鑫, 王习文. 基于湿法造纸工艺制备碳纤维增强热塑性树

- 脂复合材料的研究[J]. 中国造纸, 2018, 37(8): 8-13.
- YAN X, WANG X W. Study on the Preparation of Carbon Fiber Reinforced Plastic Based on Papermaking Process [J]. China Pulp & Paper, 2018, 37(8): 8-13.
- [12] 刘振宇, 叶燎原, 潘文. 等效体积单元(RVE)在砌体有限元分析中的应用[J]. 工程力学, 2003, 20(2): 33-37.
- LIU Z Y, YE L Y, PAN W. Application of Representative Volume Element (RVE) in the Finite Element Analysis of Masonry Structures [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(2): 33-37.
- [13] Smit R J M, Brekelmans W A M, Meijer H E H. Prediction of the mechanical behavior of nonlinear heterogeneous systems by multi-level finite element modeling [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 155(1-2): 181-192.
- [14] Advani S G. The Use Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites [J]. Journal of Rheology, 1987, 31(8): 751-784.
- [15] 柯毓才, 李振福, 潘平来, 等. 纤维长径比对环氧树脂复合材料动态力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 1991, 8(2): 51-56.
- KE Y C, LI Z F, PAN P L, et al. Effects of Fiber Aspect Ratio on the Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Composite [J]. Acta Material Compositae Sinica, 1991, 8(2): 51-56.

Properties Analysis of Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composites based on Digimat-RVE

SUN Shengran^{1,2,*} WU Dongle^{1,2} LUO Jiaqian^{1,2} XU Yue^{1,2} LIU Wen^{1,2} XU Kaili^{1,2}

(1. China National Pulp and Paper Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100102;

2. National Engineering Lab for Pulp and Paper, Beijing, 100102)

(*E-mail: sunshengran1021@163.com)

Abstract: The Digimat software package was used to build representative volume element (RVE) for carbon fiber reinforced polypropylene (CF/PP) composites prepared by papermaking/hot press moulding and the influence of the carbon fiber content, aspect ratio, and fiber orientation in the matrix on the mechanical properties, thermal conductivity, and electrical conductivity of the CF/PP composites was investigated. The simulation results showed that the composite elastic modulus and electrical conductivity increased by 290% and 750%, respectively as carbon fiber content increased from 5 wt% to 30 wt%. Electrical conductivity of the CF/PP composites increased by around 54 times when the aspect ratio of carbon fibers rose from 100 to 700. The fiber orientation tensor had negligible effect on the elastic modulus and thermal conductivity of the CF/PP composites. When comparing the experimental results and the simulation results under test condition of 100°C, the error of thermal conductivity was 0.48%, indicating that the simulation results from Digimat software package was highly accurate.

Keywords: Digimat; carbon fiber composites; papermaking; RVE

(责任编辑:杨 艳)