

短纤维增强橡胶复合材料中纤维形态的表征 及其对力学性能的影响研究

魏大文¹, 杨晓翔^{1,2}, 高剑虹³

(1. 福州大学机械工程及自动化学院, 350108 福州; 2. 福建商学院, 350108 福州;

3. 泉州师范学院化工与材料学院, 362000 泉州)

摘 要: 为了提高短纤维增强橡胶复合材料的性能预测精度, 考虑短纤维增强橡胶复合材料内部的纤维大多呈现随机的波浪形, 使用了一种离散化建模方法, 建立了具有波浪形纤维的短纤维增强橡胶复合材料二维代表性体积单元模型。对数值模型进行单轴拉伸模拟并与实验测量值进行对比, 并分析了纤维形态对短纤维增强橡胶复合材料力学性能的影响。结果表明: 数值模拟结果与实验测量值可以很好地吻合, 模型具有良好的可靠性; 纤维的波浪形弯曲减弱了纤维的增强性能; 纤维形态对短纤维增强橡胶复合材料力学性能的影响机制与纤维含量相关, 在低体积分数情况下, SFRC (short fiber-reinforced rubber composite) 的模量随模型的卷曲率的升高而降低; 在高体积分数情况下, SFRC 的模量随模型的卷曲率的升高呈现先增后减的趋势。

关键词: 短纤维增强橡胶复合材料; 短纤维; 纤维形态表征; 力学性能; 卷曲率

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

文章编号: 1000-4939(2025)05-1106-13

Characterization of fiber morphology and its effect on mechanical properties of short fiber reinforced rubber composites

WEI Dawen¹, YANG Xiaoxiang^{1,2}, GAO Jianhong³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, 350108 Fuzhou, China;

2. Fujian Business University, 350108 Fuzhou, China;

3. College of Chemical Engineering and Material, Quanzhou Normal University, 362000 Quanzhou, China)

Abstract: In order to improve the prediction accuracy of short fiber reinforced rubber composites performance, considering that most of the fibers inside short fiber reinforced rubber composites present random wavy shapes, a discrete modeling method was used to establish a two-dimensional representative volume element model of short fiber reinforced rubber composites with wavy fibers. The uniaxial tensile simulation of the numerical model was carried out and compared with the experimental values. The influence of fiber morphology on the mechanical properties of short fiber reinforced rubber composites was analyzed. The re-

收稿日期: 2023-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11972005); 福建省自然科学基金资助项目 (No. 2021J01963)

通信作者: 杨晓翔, 教授. E-mail: yangxx@fzu.edu.cn

引用格式: 魏大文, 杨晓翔, 高剑虹. 短纤维增强橡胶复合材料中纤维形态的表征及其对力学性能的影响研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5): 1106-1118.

WEI Dawen, YANG Xiaoxiang, GAO Jianhong. Characterization of fiber morphology and its effect on mechanical properties of short fiber reinforced rubber composites[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5): 1106-1118.

sults show that the numerical simulation results fit well with the experimental measurements and the model has good reliability. The wavy bending of fibers weakens the strengthening properties of fibers. The influence mechanism of fiber morphology on mechanical properties of short fiber reinforced rubber composites is related to fiber content. At low volume fraction, the modulus of SFRC decreases with the increase of the model crimp percentage. In the case of high volume fraction, the modulus of SFRC increases first and then decreases with the increase of the volume crimp percentage of the model.

Key words: rubber composite material; short fiber; fiber morphological characterization; mechanical property; crimp percentage

短纤维增强橡胶复合材料(short fiber-reinforced rubber composite, SFRC)是橡胶基体内均匀分布有短切纤维的复合材料,与未加入短切纤维的橡胶相比,具有高强度、高模量、耐撕裂、抗溶胀等特点,已有许多学者对其力学性能进行了研究^[1-3]。然而这些研究大多集中于SFRC的宏观力学性能,对其内部的性能变化机理并没有深入探究。这主要是因为材料的宏观力学性能可以通过实验来测量,但对于其细观结构很难基于实验手段直接进行测量,因此建立材料的细观结构和宏观力学性能之间的联系就变的尤为重要^[4]。

现阶段,建立细观结构和宏观力学性能之间的联系主要采用多尺度力学分析方法,即细观尺度上建立材料代表性体积单元(representative volume element, RVE),通过代表性体积单元的力学响应与宏观力学性能建立起联系^[5]。该方法已经在众多短纤维增强复合材料研究中得到实践,并取得了较好的成果^[6-8]。

目前,国内外对于SFRC的数值模拟研究相对较少,仍处于起步阶段。GAO等^[9]测试了SFRC的整体力学性能,获取了SFRC的SEM显微图像,基于SFRC的显微图像建立了力学模型,并进行了数值模拟计算,分析了不同边界条件对数值模拟结果的影响,给出了适合SFRC数值模拟的模型与方法。林晓珊等^[10]在GAO的模型基础上研究了SFRC的抗撕裂性能,分析了纤维分布对SFRC的抗撕裂性能的影响。刘霞等^[11-12]基于纤维与橡胶基体之间的界面特点,采用有限元方法分别研究了纤维与橡胶基体之间的界面性能对纤维拔出与SFRC弹性模量的影响。

但是GAO的模型具有较大的局限性,随着纤维长度的增加,数值模拟结果产生了一定的误差,实验值小于数值模拟值。经过分析,GAO的模型对短纤维在橡胶内部的纤维形态采用了长直性假设,而大

量的图像表明实际的橡胶基体内部的纤维是呈现一种波浪形^[13-15],这可能是误差产生的重要原因。

针对这一问题,本研究使用一种离散化建模方法建立具有波浪形纤维的短纤维增强橡胶复合材料二维代表性体积单元模型,对SFRC数值模型进行数值模拟分析并与SFRC单轴拉伸实验测量值进行对比,验证模型的可靠性。通过对纤维形态分析,探究纤维形态对SFRC力学性能的影响机制,以期短纤维增强橡胶复合材料的性能预测以及设计提供参考。

1 有限元模型

短纤维在橡胶基体中基本不沿着橡胶基体的厚度方向取向、SFRC成品基本呈薄板状等特点给RVE模型的构建带来了方便,使得模型可以简化为二维平面应力模型^[9]。

1.1 纤维建模方法

对于如何建立具有波浪形几何形态的高长径比纤维,本研究参考碳纳米管复合材料研究领域的成果,作为同样具有高长径比的纤维型增强材料,在基体内部也具有相似的波浪形几何形态,两者的建模方法可以认为基本一致。在研究中有将纤维视作正弦形^[16-18]或更为简单的弓形^[19-20],然而实际上用规则的形态去表征具有复杂弯曲情况的波浪形纤维与实际有偏差,因此一种基于离散化思想、考虑纤维细观结构的建模方法更为合适^[21-22]。

基于离散化思想,每根纤维可以离散为一系列的纤维段。纤维段的总数与长度将根据显微图像预估,第一段纤维段的起始点坐标 P_0 将在模型边界内随机选取,同时随机生成起始角度 α_0 ,根据预设的纤维段长度 d 可以计算出第二段纤维段的起始坐标 P_1 ,根据 P_0 、 P_1 可以生成第一段纤维段,这时再生

成随机偏转角度 β_1 , 根据第二段纤维段的起始坐标 P_1 与随机偏转角度 β_1 就可以计算出第三段的起始坐标 P_2 并生成第二段纤维段, 通过这样的不断重复操作, 最终生成波浪形的短纤维。图 1 展示了详细的算法思路, 表 1 为算法所需参数的详细定义。该操作可以通过 PYTHON 编写程序, 导入 ABAQUS 软件实现。

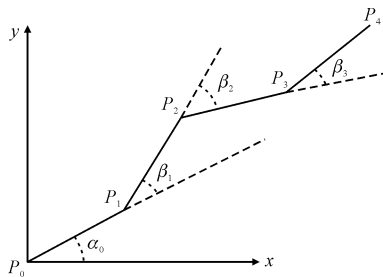


图 1 短纤维建模算法思路

Fig. 1 Modeling algorithm of aramid staple fiber

表 1 算法参数定义

Tab. 1 Algorithm parameter definition

符号	符号定义
L	RVE 的尺寸
t	RVE 模型的厚度
α_0	初始纤维段与坐标轴的角度
β_i	纤维段间的偏转角度
$\beta_{\max}$	β_i 的取值范围为 $(-\beta_{\max}, \beta_{\max})$
L_f	纤维长度
r	纤维半径
d	离散化后的纤维段长度
N_s	纤维段总数
V_f	纤维的体积分
N_f	满足体积分 V_f 的纤维数量
C	纤维段尝试生成次数
$C_{\max}$	纤维段尝试生成最大次数

由于思路来自于离散化思想, 为了获得更可靠的结果, 需要获取纤维段的合理长度, 该长度与纤维的细观结构相关。本研究通过 SFRC 的电镜显微图像预估了纤维段的合理长度^[21]。SFRC 的显微图像^[9]如图 2 所示, 黄色的点之间代表纤维的波峰点, 黄点间可以分为 2 个纤维段。经过统计, 平均 $300 \mu\text{m}$ 大概可以划分为 12 段纤维段, 即段长 $d = 0.025 \text{ mm}$ 。通过纤维段长度 d 与纤维长度 L_f 便可以计算出纤维段的总数, 计算公式如下。

$$N_s = L_f/d \quad (1)$$

为了确定纤维模型的几何形态, 算法设置了纤维段之间的最大偏转角度 $\beta_{\max}$, 后文统一称为最大偏转角 $\beta_{\max}$, $\beta_{\max}$ 主要表征纤维细观结构的弯曲情况, 定义为随机偏转角 β_i 的取值范围, 即随机偏转角 β_i 为范围 $(-\beta_{\max}, \beta_{\max})$ 内的一个随机取值。如图 3 所示, 可以看出随着 $\beta_{\max}$ 的设置, 纤维的几何形态出现了明显的差异, 随着 $\beta_{\max}$ 的增加, 纤维的波浪形几何形态变得更加明显。

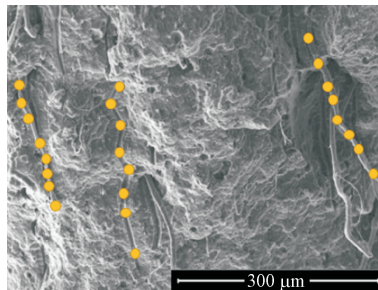


图 2 短纤维显微图像

Fig. 2 Microscopic image of aramid staple fiber

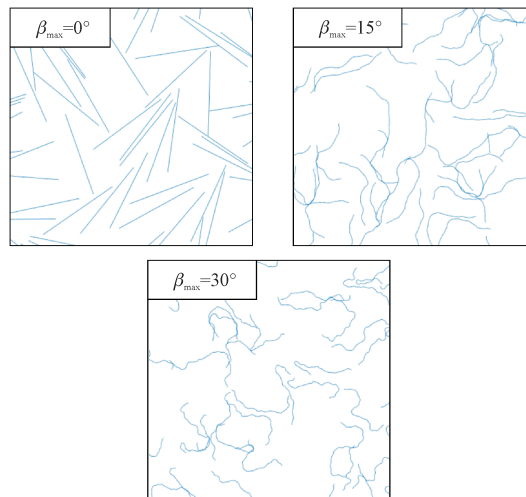


图 3 生成的纤维

Fig. 3 The generated fibers

整体纤维模型的构建采用随机顺序吸附 (random sequential adsorption, RSA) 算法, 基于纤维不相交假设, 依次在模型内随机生成满足体积分 V_f 的纤维, 体积分 V_f 与纤维数量 N_f 具有如下关系。

$$N_f = \frac{L^2 t V_f}{\pi r^2 L_f} \quad (2)$$

式中: L 为 RVE 模型的尺寸; r 为纤维的横截面半径; t 为模型的厚度。

为了避免纤维相交, 算法将在每段纤维段生成前判定是否与其他纤维段相交, 如果相交则变更随机偏转角度 β_i , 自动搜索可以生成纤维段的路径。面对难以找到路径的情况, 可以认为纤维间出现了

元。纤维网格使用线性梁单元(B21H), 网格尺寸为0.025 mm, 单根1.5 mm纤维划分60个单元, 单根3.0 mm纤维划分120个单元。

1.5 约束与边界条件

本研究使用 ABAQUS 软件中的嵌入式约束(embedded region)建立纤维与橡胶基体的接触, 在嵌入式约束中, 主区域(host region)设置为橡胶基体, 嵌入区域(embedded region)设置为短纤维。

RVE 模型的理论基础是连续介质力学, 因此几何模型的对应边必须满足连续应力与连续位移的要求, 以确保变形场的协调性^[24]。本研究对模型施加位移周期性边界条件, SFRC 的二维 RVE 几何表述如图 5 所示, 周期性边界条件如下。

$$u_{M_1} - u_{M_0} = u_{x=L} - u_{x=0} \quad (4)$$

$$u_{M_2} - u_{M_0} = u_{y=L} - u_{y=0} \quad (5)$$

式中, u 为节点的位移, 下标表示节点位置。

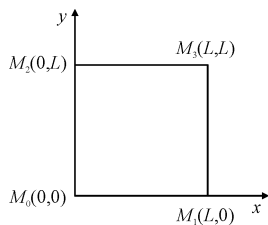


图5 边界条件施加

Fig.5 Boundary condition application

通过在 ABAQUS 软件中使用 Equation 模块施加

约束方程建立周期性边界条件。

2 数值模拟与模型验证

2.1 评价参数

本研究主要研究纤维形态对增强橡胶的拉伸模量的影响, 由于橡胶材料的非线性以及不可压缩性质, 橡胶的力学模型一般采用名义应力描述。根据周期性边界条件, 面上的平均应力可以通过在节点上施加集中载荷等效^[24], 本研究通过在 M_1 处施加位移载荷与限制在 y 方向上的位移, 限制 M_0 在 x 方向与 y 方向上的位移, 限制 M_2 在 x 方向上的位移, 实现单向拉伸的数值模拟。名义应力通过约束反力(RF)除以对应边的初始表面积获得。

$$\sigma = \frac{RF}{L \times t}, \quad \varepsilon = \frac{U}{L} = \frac{u_{M_1}}{L} \quad (6)$$

式中: RF 为面上的节点反作用力总和; u 为节点的位移; 下标表示节点位置。

2.2 模型验证

本研究根据材料配方建立了有限元模型, 并将数值模拟结果与实验数据进行了对比。其中材料配方与实验数据来自本研究实验室^[9,25-26], 材料配方如表 2 所示。

表2 短纤维增强橡胶复合材料配方

Tab.2 Formula of aramid fiber-reinforced rubber composites

配方代号	短切芳纶/份	其他橡胶成分/份	纤维长度/mm	纤维质量百分比/%	纤维体积分数/%
K1-1	1	168.4	1.5	0.59	0.49
K1-2	3	168.4	1.5	0.75	1.46
K1-3	5	168.4	1.5	2.88	2.43
K1-4	7	168.4	1.5	3.99	3.40
K2-1	1	168.4	3.0	0.59	0.49
K2-2	3	168.4	3.0	0.75	1.46
K2-3	5	168.4	3.0	2.88	2.43
K2-4	7	168.4	3.0	3.99	3.40

根据每个配方的纤维体积分数与纤维长度, 本研究分别建立了长直模型($\beta_{\max} = 0^\circ$)与波浪形模型($\beta_{\max} = 7.5^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ, 30^\circ$)进行数值模拟, 将模拟结果与实验数据进行对比, 如图 6 所示。

从图 6 中, 可以看出波浪形模型的数值模拟结果可以较好地贴合实验数据, 与实验数据相贴合的模型如表 3 所示。波浪形模型有效减少了长直模型

在计算 SFRC 力学性能时产生的误差, 虽然数值模拟结果均在应力达到 1.5 ~ 2.0 MPa 时出现了与实验数据的分离, 这主要是由于本研究假设纤维与橡胶基体之间界面为理想界面, 而事实上当应力达到一定程度存在纤维与橡胶基体之间界面的脱黏现象, 后续将对这一现象进行研究, 但显然现有结果已经可以体现波浪形模型在应力小于 1.5 MPa 时的可靠性。

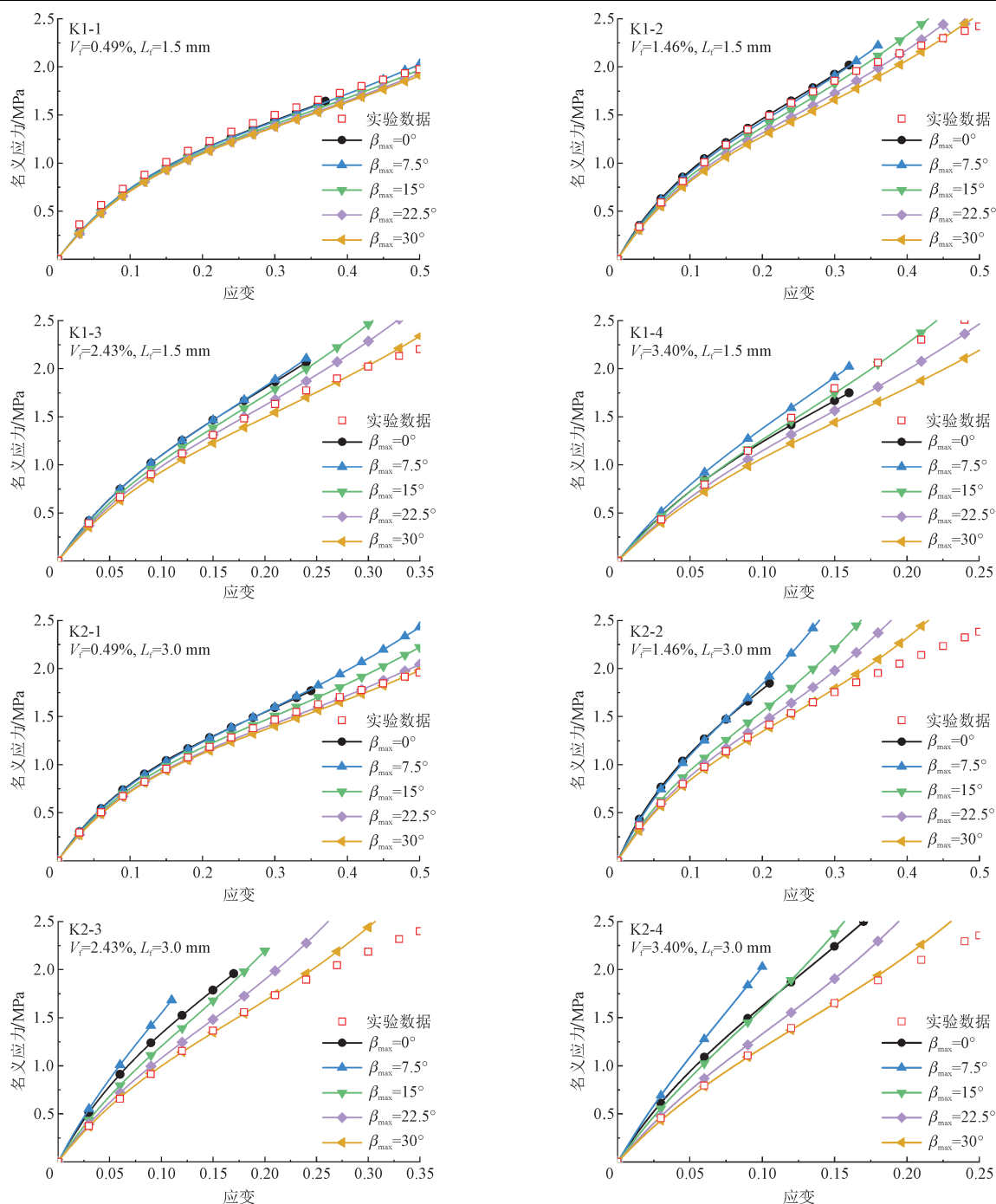


图6 数值模拟应力应变曲线与实验数据对比

Fig. 6 Comparison between simulated stress-strain curves and experimental data

表3 实验数据对应模型

Tab. 3 Experimental data correspond to models

配方编号	K1-1	K1-2	K1-3	K1-4	K2-1	K2-2	K2-3	K2-4
$\beta_{\max}/(^{\circ})$	7.5	7.5	22.5	15	15	30	30	30

3 纤维形态对 SFRC 性能的影响

根据上文,可知使用离散化方法建立的波浪形

模型可以很好地与实验数据贴合,但是由于在建模过程中使用的是设定最大偏转角,通过自动搜寻纤维生成路径的方法建立纤维模型,因此在相同 $\beta_{\max}$ 条件下,不同建模参数(例如,体积分数、纤维长度

等)建立的模型的纤维形态可能并不相同。针对这一情况,本研究使用卷曲率对纤维的几何形态进行了评价,并根据纤维模型的卷曲率,对纤维形态对 SFRC 性能的影响规律进行了研究。

3.1 纤维几何形态表征

针对纤维的形态,在纤维工业中一般采用卷曲率(ρ_c)结合纤维卷曲时的波数与波高对纤维的形态进行表征, ρ_c 为纤维伸展后的长度(L_c)减去纤维的卷曲长度(L_{in})与纤维伸展后的长度的比值

$$\rho_c = \frac{L_c - L_{in}}{L_c} \times 100\% \quad (7)$$

但是在橡胶基体内的纤维形态与纤维在自然环境下的形态并不相同,主要是纤维在橡胶内的卷曲并没有明确的波高与波数,波的形态也呈现无规则状,因此本研究借鉴卷曲率(ρ_c)的含义,定义了用于表征橡胶基体内纤维形态的卷曲率(ρ)。 ρ 为纤维长度(L_f)减去纤维卷曲后的长度(l)后与纤维长度的比值,通过 ρ 与纤维卷曲后宽度对纤维形态进行表征。

$$\rho_c = \frac{L_f - l_m}{L_f} \times 100\% \quad (8)$$

对于纤维卷曲后的长度(l),本研究通过连接纤维段的纤维节点计算获得,通过最小二乘法对纤维节点进行一次拟合运算,计算出用于表征纤维方向的基准线,将纤维在基准线上的投影长度作为纤维卷曲后的长度(l)。

对于纤维卷曲后的宽度,采用纤维节点到纤维基准线上的距离的平均值(γ)与方差(δ)进行表征。表征效果如图7。

模型整体的纤维形态采用求取模型整体纤维的代表性纤维形态进行表征,代表性纤维形态的卷曲长度(l_r)、节点距离基准线的距离平均值(γ_r)与方差(δ_r)、卷曲率(ρ_r)通过对模型内每一根纤维卷曲后的卷曲长度(l_i)、节点距离基准线的距离平均值(γ_i)与方差(δ_i)、卷曲率(ρ_i)求取平均值获得。

$$l_r = \sum_{i=1}^{N_f} l_i / N_f \quad (9)$$

$$\gamma_r = \sum_{i=1}^{N_f} \gamma_i / N_f \quad (10)$$

$$\delta_r = \sum_{i=1}^{N_f} \delta_i / N_f \quad (11)$$

$$\rho_r = \sum_{i=1}^{N_f} \rho_i / N_f \quad (12)$$

式中,下标*i*为纤维编号。

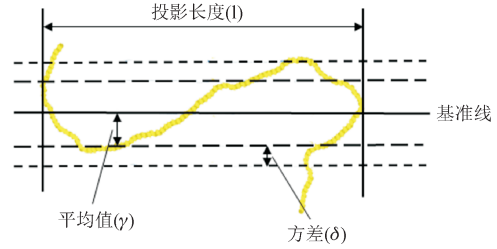


图7 表征示意图

Fig. 7 schematic diagram of characterization

3.2 纤维形态对 SFRC 模量的影响

本研究计算了每个模型的代表性纤维形态参数 l_r 、 γ_r 、 δ_r 、 ρ_r 。图8给出了卷曲率(ρ_r)与最大偏转角(β_{max})曲线,根据 ρ_r 与 β_{max} 的对应关系,给出了不同模型的纤维形态参数 l_r 、 γ_r 、 δ_r 与 ρ_r 的对照关系,如图9。

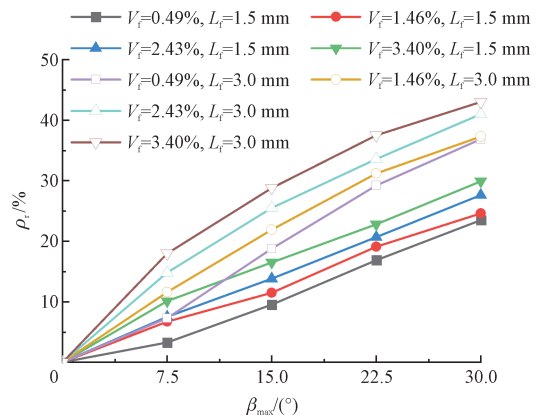


图8 不同模型的卷曲率 ρ_r 与最大偏转角 β_{max} 曲线

Fig. 8 ρ_r - β_{max} curves of different models

从图9可以看出,不同模型的 l_r 、 γ_r 、 δ_r 与 ρ_r 的对照曲线基本一致,这表明 ρ_r 与模型的纤维形态具有一一对应性。因此本研究采用 ρ_r 作为指标分析纤维形态对 SFRC 模量的影响。

根据 β_{max} 与 ρ_r 的对应关系,图10给出了不同体积分数的模型在应变等于0.1情况下的定伸应力对比,从图中可以看出,随着体积分数的升高,应力随卷曲率的变化趋势发生了改变。对于 $L_f = 1.5$ mm, $V_f < 2.43\%$ 与 $L_f = 3.0$ mm, $V_f < 1.46\%$ 的模型,随

着 ρ_r 增大,定伸应力呈现单调递减的趋势。这表明,当体积分数较小的情况下,纤维的卷曲均会造成模型的模量下降,长直纤维具有最好的增强性能。对于 $L_f = 1.5 \text{ mm}$, $V_f > 2.43\%$ 与 $L_f = 3.0 \text{ mm}$, $V_f > 1.46\%$ 的模型,随着 ρ_r 增大,定伸应力呈现先增后减的趋势。这表明,当体积分数较大时,在橡胶加工中能够具有一定卷曲率的纤维具有较好的增强效果。

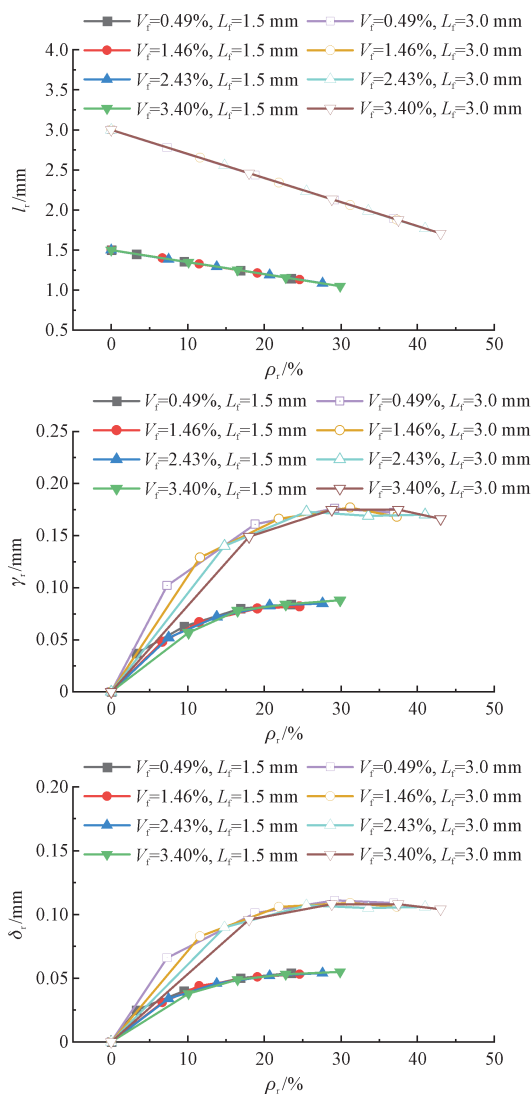


图9 不同模型的纤维参数对比

Fig. 9 Comparison of fiber parameters in different models

由图10可以看出:在纤维长度等于1.5 mm,体积分数等于3.4%的情况下,模型的卷曲率在10%附近,有较好的增强效果;在纤维长度等于3.0 mm,体积分数等于2.43%的情况下,模型的卷曲率在15%附近有较好的增强效果;在纤维长度等于3.0 mm,体积分数等于3.40%的情况下,模型的卷曲率在18%附近有较好的增强效果。

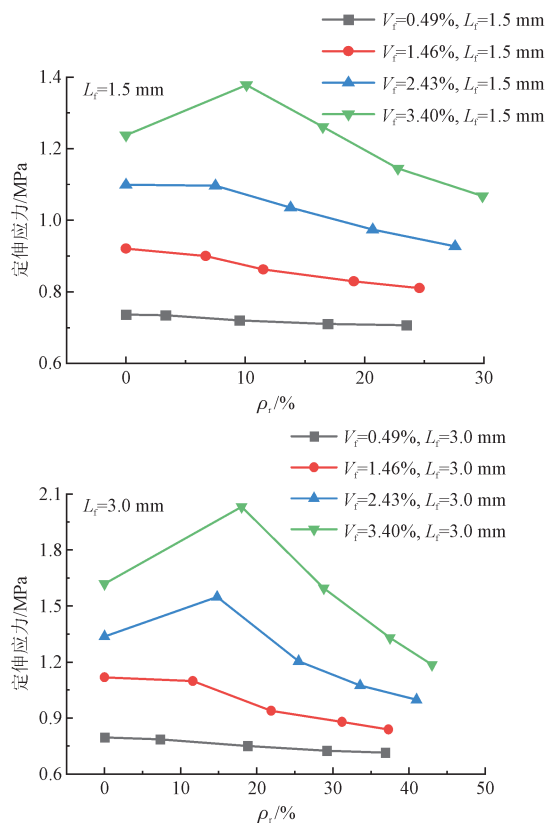
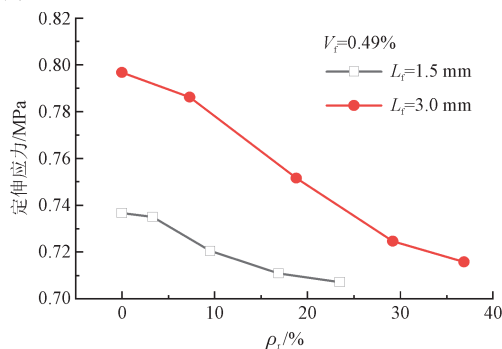
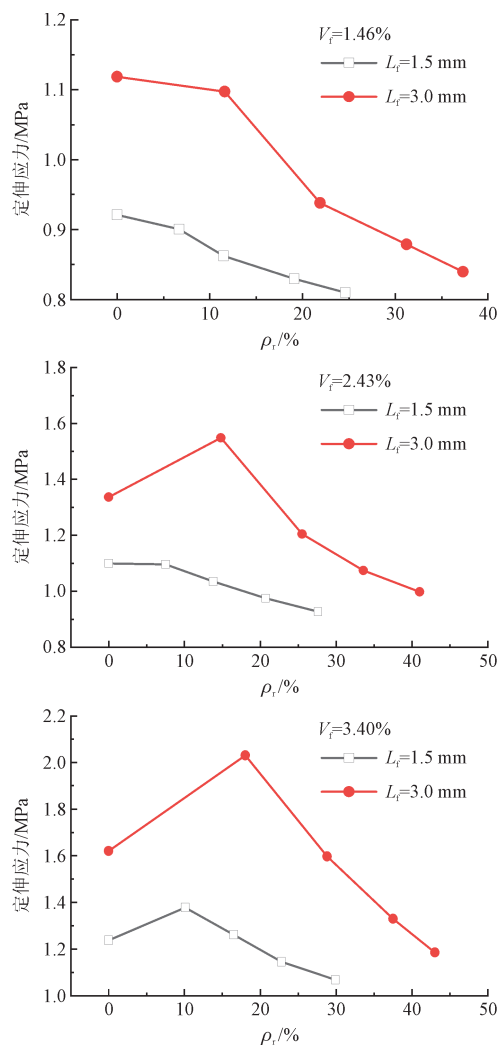


图10 不同体积分数模型的定伸应力($\varepsilon = 0.1$)对比

Fig. 10 Comparison of stress at a given elongation of different volume fraction models ($\varepsilon = 0.1$)

图11给出了不同纤维长度的模型在应变等于0.1情况下的定伸应力对比,从图中可以看出,在纤维具有相同卷曲率的情况下, $L_f = 3.0 \text{ mm}$ 模型的应力总是高于 $L_f = 1.5 \text{ mm}$ 模型的应力,这表明在卷曲率相近的情况下,较长纤维对SFRC模量的增强效果是要好于较短纤维的;同时可以看出,当较长纤维的卷曲率较大时,会出现其定伸应力与较短纤维在卷曲率较低时的定伸应力相同的情况,这表明在不同长度纤维模型的卷曲率相差过大时,会存在较短纤维对SFRC模量的增强效果与较长纤维相当或更优的情况,这可能是在许多短纤维复合材料研究中,随着纤维长度增加,材料模量的增加不明显甚至出现下降的原因之一。



图 11 不同纤维长度模型的定伸应力 ($\varepsilon = 0.1$) 对比Fig. 11 Comparison of stress at a given elongation of different fiber length models ($\varepsilon = 0.1$)

3.3 纤维形态对 SFRC 模量的影响机制

根据上文可知,低体积分数情况下纤维形态对 SFRC 力学性能的影响与高体积分数情况下纤维形态对 SFRC 力学性能的影响是不同的,本研究以 $V_f = 0.49\%$, $L_f = 3.0$ mm 与 $V_f = 3.40\%$, $L_f = 3.0$ mm 为例,在周期性边界条件下,对模型 M_1 处施加 x 方向的集中力载荷进行模拟,分析在不同体积分数情况下纤维形态对 SFRC 力学性能的影响机制。图 12 给出了 $V_f = 0.49\%$, $L_f = 3.0$ mm 模型在集中力为 0.432 N (平均应力 $\sigma = 1.5$ MPa) 时的 von-Mises 应力云图。图 14 给出了 $V_f = 3.40\%$, $L_f = 3.0$ mm 模型在集中力为 0.432 N (平均应力 $\sigma = 1.5$ MPa) 时的 von-Mises 应力云图。

由图 12 可以看出,在低体积分数情况下,橡胶基体内的应力分布并不均匀,低应力区域分布在承载纤维承载部分附近,在承载纤维承载部分的端部存在应力集中区域,纤维之间存在大量的橡胶承载区域,可以看出纤维对橡胶的增强主要与纤维自身的增强性能相关。这表明在低体积分数情况下,随着 ρ_f 增大, SFRC 模量的下降主要是由于纤维增强性能的下降导致的,同时也表明了随着 ρ_f 增大,纤维的增强性能也呈现单调下降的趋势。

对比不同模型,随着 ρ_f 增大,基体内的低应力区域与应力集中区域面积逐步减少。由于低应力区域与应力集中区域是纤维承载导致的,其面积与分布在一定程度上可以表现纤维的承载情况。这表明,随着 ρ_f 增大,纤维的承受载荷出现了下降。

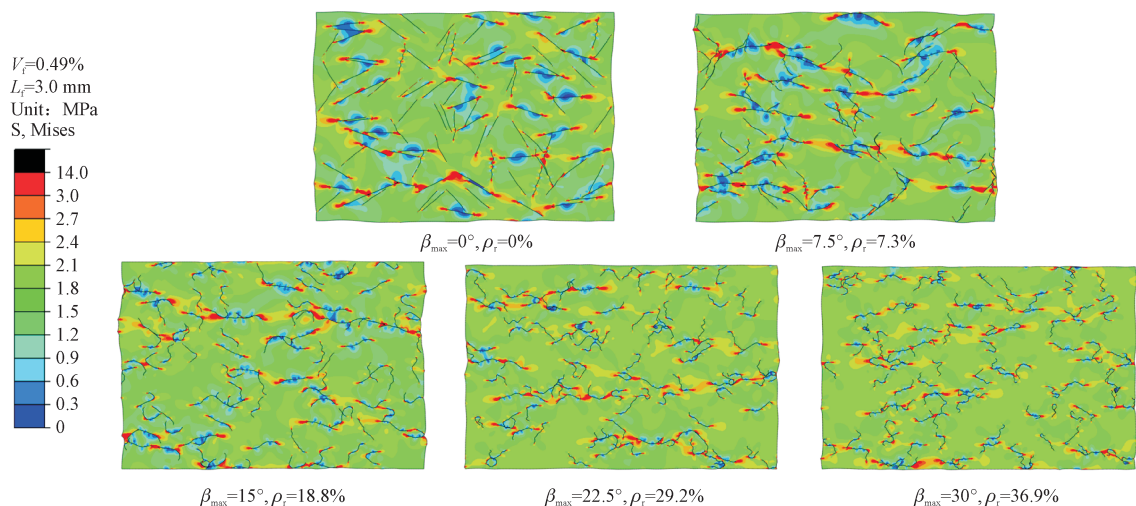


图 12 低体积分数模型的应力分布对比

Fig. 12 Comparison of stress distribution in low volume fraction models

图 13 给出了纤维附近区域的 von-Mises 应力等值线图。由图 13 可以看出:应力梯度集中于纤维附近,长直纤维的应力梯度相对平缓;卷曲纤维的应力梯度较大,并且存在细小的低应力区域与应力集中

区域沿纤维频繁交替出现的情况,由于应力集中是纤维承载的标志,这表明纤维的承载区域不连续。显然,这种纤维承载区域不连续的现象是导致纤维增强性能减弱的重要原因。

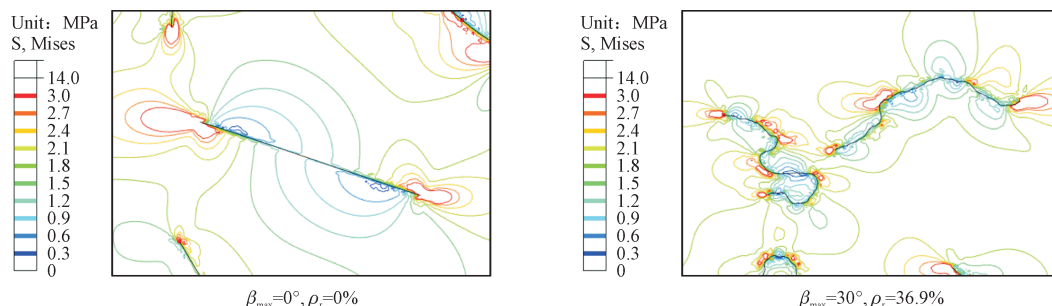


图 13 纤维附近的 von-Mises 应力等值线图

Fig. 13 The distribution of von-Mises stress near the fiber

由图 14 可以看出,高体积分数情况下,橡胶基体的应力分布,与低体积分数的 SFRC 基体相比,高体积分数的 SFRC 基体内部的低应力区明显增多。比较不同模型,可以发现,随着 ρ_r 增大,橡胶基体内部的低应力区域面积呈现先增后减的趋势,其中低应力区域面积的增加发生在 $\beta_{\max}=0^\circ$ 模型与 $\beta_{\max}=7.5^\circ$ 模型之间,可以看出 $\beta_{\max}=0^\circ$ 模型的纤维为长直模型,在高体积分数情况下,在低应力区域之间存在较为明显的高应力区域,相较而言, $\beta_{\max}=7.5^\circ$ 模型的低应力区域分布更加的均匀,形成类似框架结构,纤维间的高应力区域较少; $\beta_{\max}=7.5^\circ$ 之后的模型,随着 ρ_r 增大,呈现出了低应力区域面积逐步减小

的趋势,通过对比 $\beta_{\max}=7.5^\circ$ 模型与 $\beta_{\max}=30^\circ$ 模型可以看出,纤维间的高应力区域出现了明显的增多,低应力区域减少,框架结构消失。显然,在高体积分数情况下,过于长直的纤维会在橡胶内部形成多根纤维在同一区域沿同一方向分布的情况,因此容易出现局部区域纤维基本不沿载荷加载方向取向,导致出现明显的高应力区域,而具有一定弯曲的纤维则可以带来更合理的分布,纤维卷曲导致的纤维增强性能减弱也会因为足够的纤维数量补足,从而提升 SFRC 的模量。只有当 ρ_r 增大到一定限度,纤维的数量不足以弥补纤维卷曲导致纤维增强性能减弱, SFRC 的模量就出现了下降。

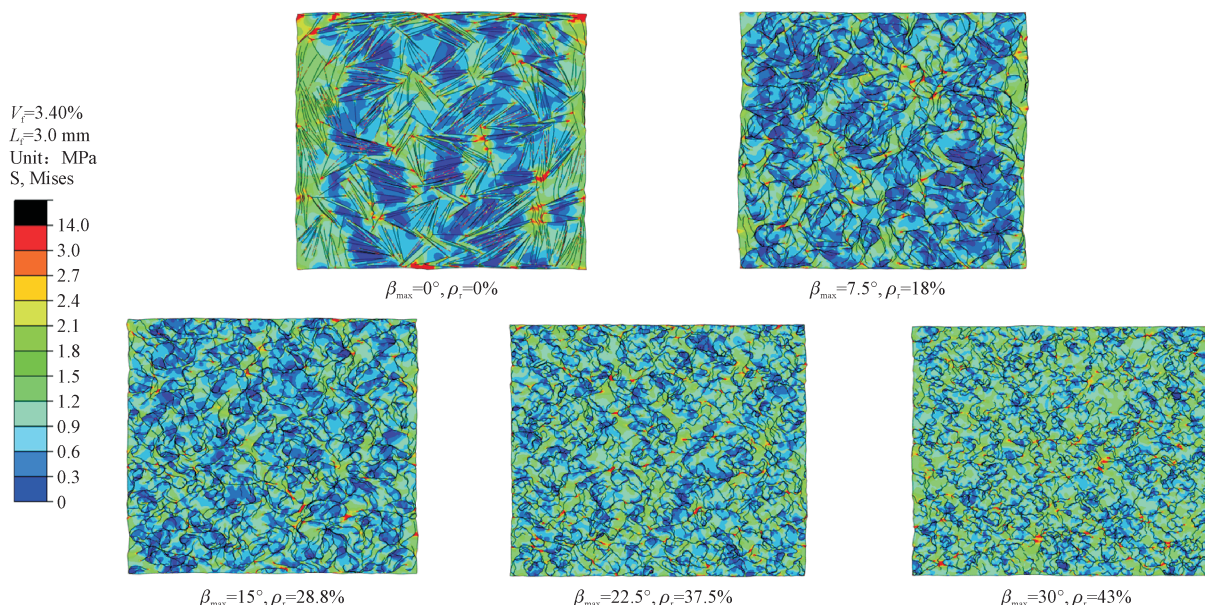


图 14 高体积分数模型的应力分布对比

Fig. 14 Comparison of stress distribution in high volume fraction models

3.4 纤维长度、体积分数对纤维形态的影响

通过上文可知纤维形态对 SFRC 的模量具有较大影响,在 SFRC 的设计过程中应当予以考虑。但是橡胶内部的纤维形态在目前是较难通过实验观测得到的。而通过数值模拟结果与宏观力学试验数据对比,在数值模拟结果与宏观力学试验数据相符的情况下,可以认为数值模型的几何结构与材料真实情况是相近的。基于此,本研究通过数值模拟与宏观力学试验数据的对比结果,估计纤维在橡胶基体内部的大致形态,对纤维长度、体积分数对纤维形态的影响规律进行了分析。

本研究根据图 6 中与实验数据相符的数值模拟结果,统计了不同体积分数对应的波浪形模型的最大偏转角 ($\beta_{\max}$),根据最大偏转角与卷曲率 (ρ_r) 的对照关系,给出了不同体积分数对应的波浪形模型的 ρ_r ,如图 15 所示。

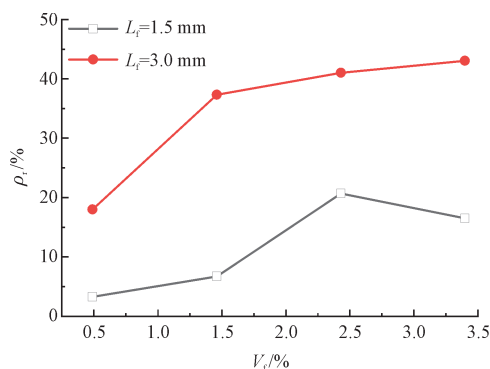


图 15 不同配方对应模型卷曲率

Fig. 15 Different models correspond to crimp percentage

由图 15 可以看出,随着纤维含量的增加,纤维的卷曲率总体上呈现上升趋势,在体积分数 0.49%~3.40% 区间内,纤维长度为 1.5 mm 的 SFRC 卷曲率由 3.3% 提高到了 16.5%,纤维长度为 3 mm 的 SFRC 卷曲率由 18.8% 提高到了 43%,表明纤维的卷曲率受到体积分数的影响,随着体积分数的增加,纤维的卷曲率也会有所提高,这与董智贤^[27]基于实验的研究结果相吻合。

对比 $L_f = 1.5$ mm 与 $L_f = 3.0$ mm,可以发现,在相同体积分数情况下, $L_f = 3.0$ mm 的卷曲率是 $L_f = 1.5$ mm 的卷曲率的 226.5%~556.7%,表明在体积分数相同的情况下,较长的纤维在橡胶内部是较为卷曲的,这与王杰等^[28]基于实验的研究结果相吻

合。这主要是由于在橡胶的加工过程中,在相同加工条件下,较长纤维不易随胶料流动,使得纤维往往承受更大的弯曲内力。这很好的说明了,长直模型随着纤维长度增加,误差增大的原因,即试件内部的纤维具有过高的卷曲率,纤维的增强性能减弱。在一定程度上验证了模型对于预测橡胶内部纤维形态的能力。

4 结 论

1)通过对纤维增强橡胶电镜图像的分析,建立了更为符合纤维真实形态的波浪形纤维模型。通过数值模拟与实验的对比,结果表明,波浪形纤维模型的数值模拟结果与实验结果吻合良好,有效减少了长直模型在预测使用较长纤维的 SFRC 力学性能时产生的误差。

2)纤维增强性能随纤维卷曲率的上升而下降。纤维卷曲造成的承载区域不连续是导致纤维增强性能减弱的重要原因。

3)纤维形态对 SFRC 模量的影响机制与纤维体积分数相关:在体积分数较低的情况下(纤维长度等于 1.5 mm,体积分数小于 2.43%;纤维长度等于 3.0 mm,体积分数小于 1.46%),由于纤维较少,纤维之间基本不发生相互作用,纤维对 SFRC 的增强效果主要与自身增强性能相关,随着模型的卷曲率升高,SFRC 模量呈现单调递减趋势;在体积分数较高的情况下(纤维长度等于 1.5 mm,体积分数大于 2.43%;纤维长度等于 3.0 mm,体积分数大于 1.46%),纤维之间会发生相互作用,纤维对 SFRC 的增强效果还与纤维的分布相关,具有一定弯曲能力的纤维对 SFRC 的增强效果要更优,随着模型的卷曲率升高,SFRC 的模量呈现先增后减的趋势。

参考文献:

- [1] CATALDO F, URSINI O, LILLA E, et al. A comparative study on the reinforcing effect of aramide and PET short fibers in a natural rubber-based composite [J]. Journal of macromolecular science, part b, 2009, 48(6): 1241-1251.
- [2] RAJESH C, DIVIA P, DINOPLAL S, et al. Dynamic mechanical analysis of nylon 6 fiber-reinforced acrylonitrile butadiene rubber composites [J]. Polymers and polymer composites, 2021, 29(9S):

- S1328-S1339.
- [3] 万胜,李英哲,李琳,等.纤维表面处理对短纤维/丁腈橡胶复合材料性能的影响[J].合成橡胶工业,2020,43(4):274-279.
WAN Sheng, LI Yingzhe, LI Lin, et al. Effects of fiber surface treatment on properties of short fiber/nitrile rubber composites[J]. China synthetic rubber industry, 2020, 43(4): 274-279 (in Chinese).
- [4] PAN Y, IORGA L, PELEGRI A A. Numerical generation of a random chopped fiber composite RVE and its elastic properties[J]. Composites science and technology, 2008, 68(13): 2792-2798.
- [5] 陈玉丽,马勇,潘飞,等.多尺度复合材料力学研究进展[J].固体力学学报,2018,39(1):1-68.
CHEN Yuli, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale mechanics of composite materials[J]. Chinese journal of solid mechanics, 2018, 39(1): 1-68 (in Chinese).
- [6] LI Z Y, LIU Z, LEI Z, et al. An innovative computational framework for the analysis of complex mechanical behaviors of short fiber reinforced polymer composites[J]. Composite structures, 2021, 277: 114594.
- [7] AHMADI H, HAJIKAZEMI M, VAN PAEPEGEM W. Predicting the elasto-plastic response of short fiber reinforced composites using a computationally efficient multi-scale framework based on physical matrix properties[J]. Composites part b: engineering, 2023, 250: 110408.
- [8] ZHAO J, GUO C J, ZUO X B, et al. Effective mechanical properties of injection-molded short fiber reinforced PEEK composites using periodic homogenization[J]. Advanced composites and hybrid materials, 2022, 5(4): 2964-2976.
- [9] GAO J H, YANG X X, HUANG L H. Numerical prediction of mechanical properties of rubber composites reinforced by aramid fiber under large deformation[J]. Composite structures, 2018, 201: 29-37.
- [10] 林晓珊,杨晓翔,高剑虹.基于扩展有限单元法的短纤维/橡胶复合材料裂纹扩展分析[J].固体力学学报,2022,43(1):81-94.
LIN Xiaoshan, YANG Xiaoxiang, GAO Jianhong. Crack propagation analysis of short fiber reinforced rubber composites based on extended finite element method[J]. Chinese journal of solid mechanics, 2022, 43(1): 81-94 (in Chinese).
- [11] 刘霞,焦文祥,杨晓翔.纤维增强橡胶复合材料界面力学性能有限元分析[J].力学季刊,2021,42(2):253-262.
LIU Xia, JIAO Wenxiang, YANG Xiaoxiang. Finite element analysis of interfacial mechanical properties of fiber reinforced rubber composites[J]. Chinese quarterly of mechanics, 2021, 42(2): 253-262 (in Chinese).
- [12] 刘霞,杨晓翔,高剑虹.芳纶短纤维增强橡胶复合材料界面力学性能表征及有限元模拟[J].福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 392-399.
LIU Xia, YANG Xiaoxiang, GAO Jianhong. Characterization and finite element simulation of interfacial mechanical properties of short aramid fiber reinforced rubber composites[J]. Journal of Fuzhou University (natural science edition), 2022, 50(3): 392-399 (in Chinese).
- [13] 田少萌,俞科静,徐阳,等.不同种类短纤维对天然橡胶/丁苯橡胶复合材料性能的影响[J].合成橡胶工业,2022,45(3):207-212.
TIAN Shaomeng, YU Kejing, XU Yang, et al. Effect of different type of short fibres on properties of natural rubber/styrene-butadiene rubber composites[J]. China synthetic rubber industry, 2022, 45(3): 207-212 (in Chinese).
- [14] YU B H, REN J B, WANG K S, et al. Experimental study on the characterization of orientation of polyester short fibers in rubber composites by an x-ray three-dimensional microscope[J]. Materials, 2022, 15(10): 3726.
- [15] HINTZE C, SHIRAZI M, WIESSNER S, et al. Influence of fiber type and coating on the composite properties of EPDM compounds reinforced with short aramid fibers[J]. Rubber chemistry and technology, 2013, 86(4): 579-590.
- [16] FISHER F T, BRADSHAW R D, BRINSON L C. Fiber waviness in nanotube-reinforced polymer composites—I: modulus predictions using effective nanotube properties[J]. Composites science and technology, 2003, 63(11): 1689-1703.
- [17] FISHER F T, BRADSHAW R D, BRINSON L C. Effects of nanotube waviness on the modulus of nanotube-reinforced polymers[J]. Applied physics letters, 2002, 80(24): 4647-4649.
- [18] PANTANO A, CAPPELLO F. Numerical model for composite material with polymer matrix reinforced by carbon nanotubes[J]. Meccanica, 2008, 43(2): 263-270.
- [19] NAFAR DASTGERDI J, MARQUIS G, SALIMI M. The effect of nanotubes waviness on mechanical properties of CNT/SMP composites[J]. Composites science and technology, 2013, 86: 164-169.
- [20] SHAO L H, LUO R Y, BAI S L, et al. Prediction of effective moduli of carbon nanotube-reinforced composites with waviness and debonding[J]. Composite structures, 2009, 87(3): 274-281.
- [21] HERASATI S, ZHANG L C. A new method for characterizing and modeling the waviness and alignment of carbon nanotubes in composites[J]. Composites science and technology, 2014, 100: 136-142.
- [22] 范桃桃,李晓拓,肖文凯.碳纳米管对环氧树脂热导率影响的模拟研究[J].武汉大学学报(工学版), 2019, 52(1): 77-82.

- FAN Taotao, LI Xiaotuo, XIAO Wenkai. Effect of carbon nanotubes on thermal conductivity of epoxy based on simulation method[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2019, 52(1): 77-82 (in Chinese).
- [23] OGDEN R W. Nearly isochoric elastic deformations: application to rubberlike solids[J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 1978, 26(1): 37-57.
- [24] 李庆, 杨晓翔. 基于周期性边界条件的炭黑填充橡胶复合材料力学行为的预测[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 159-167.
LI Qing, YANG Xiaoxiang. Prediction on mechanical behavior of carbon black filled rubber composites based on periodic boundary conditions[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2013, 30(6): 159-167 (in Chinese).
- [25] GAO J H, YANG X X, HUANG L H. A numerical model to predict the anisotropy of polymer composites reinforced with high-aspect-ratio short aramid fibers[J]. Advances in polymer technology, 2019, 2019(1): 5484675.
- [26] 高剑虹, 杨晓翔. 芳纶短纤维增强橡胶复合材料大变形力学性能的相关性实验[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 677-684.
GAO Jianhong, YANG Xiaoxiang. Experimental study on the dependent factors of mechanical properties of aramid short fiber reinforced rubber composites at large deformation [J]. Journal of Fuzhou University (natural science edition), 2018, 46(5): 677-684 (in Chinese).
- [27] 董智贤. 马来酸酐接枝改性天然橡胶的制备及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [28] 王杰, 吴卫东, 周洪福, 等. 短纤维对丁苯橡胶复合材料性能的影响[J]. 化工新型材料, 2020, 48(2): 224-227, 231.
WANG Jie, WU Weidong, ZHOU Hongfu, et al. Influence of short fiber on the property of SBR composite[J]. New chemical materials, 2020, 48(2): 224-227, 231 (in Chinese).

(编辑 张璐)