http://pmse.scu.edu.cn

碳纤维/橡胶和炭黑/橡胶复合材料力学性能及裂纹扩展损伤有限元模拟

张心怡[1]，贾均红[1]，高飒飒[1]，李洪春[2]，李东升[2]，杨晓东[2]
（1. 陕西科技大学 机电工程学院，陕西 西安 710021；2. 西安航天动力研究所 陕西特种密封技术工程研究中心，陕西 西安 710100）

摘要：为了研究碳纤维/橡胶复合材料和炭黑/橡胶复合材料的力学性能及裂纹扩展机制，首先分析了不同体积分数填充物对复合材料力学性能的影响，然后基于扩展有限元法研究了碳纤维/橡胶复合材料和炭黑/橡胶复合材料裂纹扩展损伤演化，探究了单轴载荷下增强体体积分数对橡胶材料裂纹扩展过程中撕裂能和*J*积分的影响，分析了碳纤维和炭黑增强橡胶基复合材料裂纹扩展损伤规律。结果表明，橡胶复合材料随着增强体体积分数的增大，其有效弹性模量也增大，在大变形条件下材料的力学性能随着增强体体积分数的增加有显著改善。增强体在橡胶复合材料的裂纹扩展过程中可以有效抑制裂纹的扩展过程，但增强体的体积分数并不是越大越好，随着体积分数变大，材料的抗断裂性能有减弱的可能，炭黑和碳纤维增强体的体积含量分别为15%和10%时，在裂纹扩展的过程中所消耗的能量较小。

关键词：橡胶复合材料；随机序列吸附算法；裂纹扩展；代表性体积单元；有限元分析
中图分类号：TQ330.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）07-0094-09

增强橡胶复合材料由于具有高强度、高模量、耐撕裂等优点，被广泛应用于航空航天、汽车船舶等领域中，而复杂服役环境中橡胶复合材料结构的力学性能、多尺度分析技术和优化设计方法是当前的研究热点[1]。随着有限元技术的发展，越来越多的学者采用数值模拟的方法来研究复合材料的力学性能。其中，基于代表性体积单元（RVE）的均匀化方法是一种能有效反映复合材料宏观力学性能与组分材料细观结构参量间关系的细观力学分析方法[2,3]。近年来，刘霞等[4]基于 Python-ABAQUS 二次开发，生成了芳纶短纤维增强橡胶复合材料（AFRC）的二维代表体积单元，对AFRC的数值模型进行仿真，结合力学性能实验分析了界面性质对其拉伸性能的影响。姜剑等[5]建立了短纤维增强橡胶基复合材料(SFRC)的二维细观代表体积单元，研究了纤维体积分数、界面厚度等对材料力学性能的影响。Gao等[6]利用二维有限元分析对AFRC的力学性能进行了评价。但目前对于增强橡胶复合材料的细观模拟大多是生成了二维代表体积单元，这种基于二维模型的计算结果与实际情况有很大的差别，因此无法给出精确的分析结果。目前，对影响裂纹扩展的相关因素还未进行成熟的研究，且大多数研究局限于实验手段。Hamed等[7]采用了一种新型的裤形撕裂测试方法表征了炭黑补强天然橡胶（NR）的撕裂性能。马岩等[8]通过实验比较了芳纶短纤维的类型和用量对氢化丁腈胶料抗断裂性能的影响。崔颂等[9]采用实验的方法研究了单向拉伸应力条件下裂纹对导电橡胶薄膜的影响。这些研究基本上是基于实验的方法，随着有限元数值计算的发展，Daux等[10]提出了扩展有限元技术（XFEM），通过仿真计算任意裂纹的产生和扩展，但这种方法在预测橡胶复合材料的裂纹扩展损伤方面应用较少。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0140
收稿日期：2023-08-28
基金项目：陕西省重点研发计划-一般工业项目（2023-YBGY-346）
通讯联系人：贾均红，主要从事机械摩擦学研究，E-mail: jhjia@sust.edu.cn

因此,本文基于Python-Abaqus 二次开发,分别建立了含炭黑和碳纤维随机分布的橡胶复合材料的三维代表体积单元,计算了2种增强体的体积分数对橡胶复合材料力学行为的响应,采用扩展有限元法对不同体积分数的增强橡胶复合材料进行裂纹扩展损伤计算,模拟其裂纹萌生和扩展过程。

1　理论基础

1.1　建模与数值计算方法

对于含碳纤维和炭黑颗粒增强体随机分布的增强橡胶复合材料,为了使数值计算更加接近于现实,采用随机序列吸附算法(Random sequential adsorption,RSA)来建立复合材料的细观结构模型[11]。由于复合材料的细观结构上碳纤维和炭黑颗粒的分布具有随机性,该方法可以很好地实现位置和取向随机分布的多增强体细观模型的构建。在进行裂纹扩展数值计算时,主要基于扩展有限元法(XFEM),它是目前求解不连续力学问题最有效的数值方法之一[12],保留了常规有限元的所有优点,其所使用的网格与结构内部的几何形状或物理界面无关,克服了在应力应变集中区域对网格进行高密度细化带来的困难,在对裂纹扩展进行模拟时也不需要对网格进行重新划分,也不需要定义初始裂纹位置。扩展有限元法的基本原理是基于单位分解在常规有限单元法位移模式中添加一些加强函数以反映不连续性,单位分解法的基本思想是任意函数$\psi(x)$都可以在求解域内表示成如式(1)的形式,

$$\psi(\chi)=\sum_i N_i(\chi)\varphi(\chi) \tag{1}$$

式中,$\sum_i N_i(\chi)$满足单位分解;$\varphi(\chi)$表示扩充函数,不同的扩充函数将求解不同的问题。扩展有限元法中的位移逼近由连续和不连续两部分组成,连续位移采用常规有限单元法逼近获得,不连续位移则需要根据不连续问题的类型选取相应的加强函数来确定[13]。其核心思想是以单位分解法为基础,采用水平集函数来描述不连续的间断面和构造形函数,同时引入阶跃函数和裂尖渐近函数作为扩充函数来反映不连续面的尖端特性。

1.2　失效准则

本文中裂纹扩展采用基于损伤力学的失效准则,包括定义损伤起始准则和损伤演化规律。根据已有研究结论[12],橡胶复合材料宜采用最大主应力牵引损伤起始损伤准则,在弹性体中预先存在一条裂纹,当裂纹尖端的应力达到材料的最大许用主应力时,就会发生裂纹的萌生和扩展,扩展时遵循定义的演化规律。根据力学特性实验所获得的数据,本文从材料断裂使断裂能的角度进行损伤演化的设置,其中断裂能是指损伤消耗的能量,即Fig.1中三角形OAB所围的部分采用基于能量的线性牵引-分离损伤演化规律,橡胶基体损伤设置为最大许用主应力0.2 MPa,裂纹最大断裂能20 N/mm。

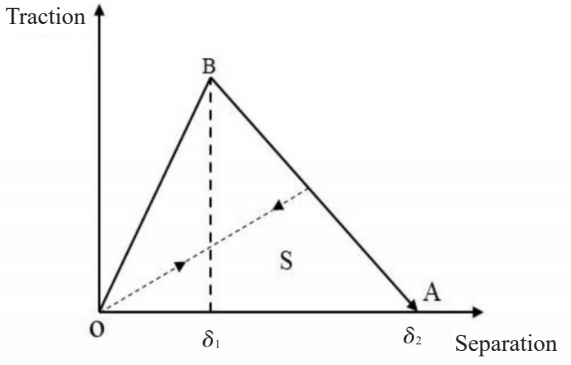


Fig. 1 Bilinear damage evolution

对于有限元模型,用损伤标量D表示模型单元裂纹面平均损伤值,其表达式如式(2)[14]

$$D=\frac{\delta_m^f(\delta_m^{max}-\delta_m^0)}{\delta_m^{max}(\delta_m^f-\delta_m^0)} \tag{2}$$

式中:δ_m^{max}——损伤演化过程中单元最大有效位移;δ_m^f——裂纹扩展损伤时完全破坏的有效位移;δ_m^0——初始有效位移。D的取值范围为[0,1],当损伤开始时其值为0,当进入损伤演化时其值会从0演变为1,当D值为1时,表示扩展有限单元最终失效。

1.3　*J*积分理论

裂纹尖端区域的应力应变场强度可以用J积分来描述,其具有路径不变性及守恒性,所以J积分通常又被人们称之为路径无关积分。J积分的这一性质为其计算提供了方便,能够避开复杂的裂纹尖端应力场、位移场,可以通过有限元方法计算离开尖端处的应力、位移场。Fig.2所示为围绕一端点按逆时针方向做一围线Γ,该围线Γ是由裂纹表面上的任意一点开始按反时针方向绕裂纹尖端并终止于裂纹表面上任意一点的曲线,沿此围线作式(3)的积分,

$$J=\int_R(W\mathrm{d}x_2-T_i\frac{\partial u_i}{\partial x_1})d_s \tag{3}$$

式中：W——平面体内的应变能密度；T_i——张力矢量；u——位移矢量；s——弧长；x_1和x_2——图中所示的坐标。由于积分路径可以避开裂纹顶端，因而可用通常的力学计算方法来计算J积分的值。

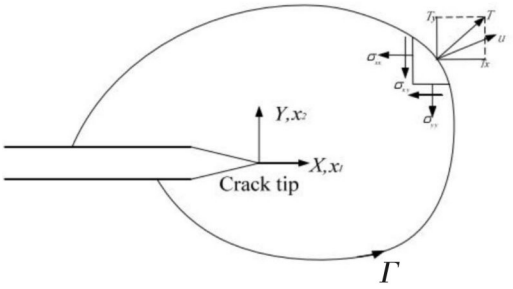


Fig. 2 *J*-integral circuit around crack tip[15]

对非线性弹性裂纹体，J积分是裂纹体总势能对裂纹扩展的变化率，即

$$J=-\frac{\mathrm{d}\Pi}{\mathrm{d}a} \tag{4}$$

式中：Π——单位厚度裂纹体的总势能；α——裂纹长度。对于橡胶复合材料这种非线性超弹性材料来说，可以采用J积分进行断裂行为的分析。

2 有限元模型

2.1 RVE模型的建立

橡胶复合材料可以近似为具有相同细观结构和变形场的RVE的周期性集合，通过编写Python程序，基于ABAQUS二次开发可操纵ABAQUS的内核实现自动建模的功能。本文需要分别建立含碳纤维和炭黑随机分布的橡胶基复合材料，即采用RSA算法利用Python脚本进行ABAQUS二次开发分别建立含碳纤维和炭黑随机分布的橡胶复合材料细观代表体元有限元模型，如Fig.3所示。在建立模型时做出如下假设：(1)增强体之间不存在交叉或其他干涉；(2)增强体在基体中的大小长度统一；(3)增强体随机嵌入均匀的基体中。

增强体之间的相互作用将影响复合材料的整体性能，为了使计算结果更加准确，保证单胞基体能够容纳足够多的增强体，考虑到计算机的运行能力，分别建立了碳纤和炭黑颗粒含量为5%，10%，15%和20%的三维RVE有限元模型，橡胶基体单胞模型尺寸为1 mm×1 mm×1 mm，炭黑颗粒的粒径(R)与基体尺寸(L)的关系为$L/R=6$，碳纤的长径比为5。对带预制裂纹的橡胶复合材料施加单轴拉伸载荷进行裂纹扩展有限元数值计算。

2.2 基体和增强体的材料属性

在对橡胶材料进行力学行为有限元分析时，需要确定合适的橡胶基体材料本构模型及模型中的材料参数。由于橡胶材料是一种超弹性非线性材料，所以在研究材料力学性能时一般选择超弹性本构模型。ABAQUS基于不同的基础理论提供了多种橡胶材料的本构模型，基于分析对比，选择三阶Ogden超弹性本构模型描述橡胶材料的属性，其应变能参数如式(5)，材料具体参数见Tab.1，

$$W=\sum_{i=1}^{M}\frac{2u_i}{a_i^2}(\overline{\lambda_1}^{ai}+\overline{\lambda_2}^{ai}+\overline{\lambda_3}^{ai}-3)+\sum_{i=1}^{1}\frac{1}{D_i}(J_{el}-1)^{2i} \tag{5}$$

式中：W——指单位体积的应变能；μ_i和α_i——描述温度函数的模型参数；M——Ogden本构模型的阶数(本文中M=3)；D_i——材料常数；J_{el}——弹性体积应

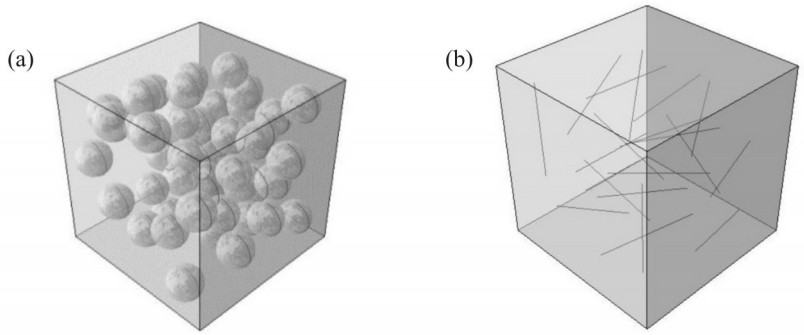


Fig. 3 3D RVE finite element numerical model of reinforced rubber composite materials: (a) RVE model of carbon black reinforced rubber material; (b) RVE model of carbon fiber reinforced rubber material

变比。

Tab. 1 Odgen constitutive model parameters

Serial number	μ	α	D
1	-8.116	1.975	0
2	5.725	2.388	0
3	5.467	-4.495	0

炭黑颗粒材料参数为E=2.5 GPa，μ=0.3[12]；碳纤维材料参数为E=75 GPa，μ=0.3[13]。

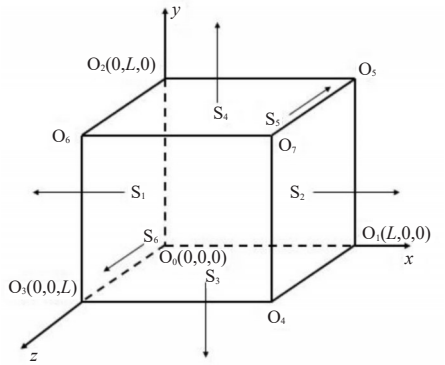


Fig. 4 3D RVE geometric representation of filled reinforced rubber composite materials

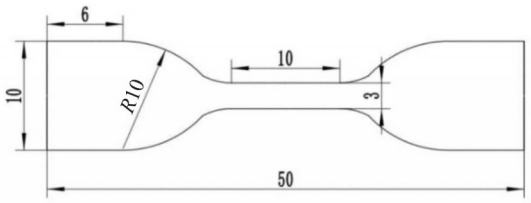


Fig. 5 Shape and dimensions of dumbbell shaped specimens

2.3 周期性边界条件与加载

增强橡胶复合材料的研究通常基于RVE代表性体元模型，利用RVE对复合材料进行细观力学分析时，必须要对RVE模型施加周期性边界条件以保证边界的变形协调。Fig.4所示为填充增强橡胶复合材料的三维RVE几何表述，周期性边界条件主要包括位移连续条件及应力连续条件两方面[16]，其中，位移连续条件是指RVE对应边界始终保持一致，相邻的RVE表现出完全相同的变形场。而应力连续条件是指RVE对应边界上应力矢量大小相等，方向相反，即从当前RVE传递到其邻近RVE的应力场是连续的。对于具有周期性分布的复合材料，Xia等[17]提出了平行边界面的三维RVE模型周期性边界条件，其表达式如式(6)所示

$$u_i^{j+} - u_i^{j-} = \overline{\varepsilon}_{ik}(\chi_k^{j+} - \chi_k^{j+}) = \overline{\varepsilon}_{ik}\Delta\chi_k^{j} \qquad (6)$$

式中：$\Delta\chi_k^j$——常数。式(6)不包括未知周期性位移修正函数。

Tab. 2 Formulation of sample

Ingredients	Content/phr
NR	100
Carbon Black(N330)	30
Stearic acid	2
Accelerator CZ	1
ZnO	5

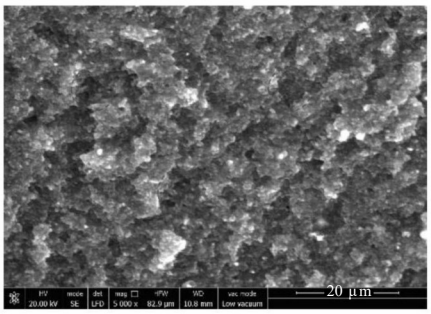


Fig. 6 Fracture morphology of the specimen under uniaxial tensile load

3 模型可靠性验证

随机选取体积含量为15%的炭黑增强橡胶复合材料制成试件进行数值模拟的可靠性验证。委托西安航天动力研究所制备橡胶试样，样品配方如Tab.2所示，将橡胶试件依据GB/T2941制成哑铃型，如Fig.5所示，试样的厚度为(2.0±0.2) mm，长度为(50±0.5) mm，应尽可能保证试样的平整及无毛刺等缺陷。试验在INSTRON 3367万能试验机上进行，加载速度设定为1 mm/min。试验结束后采用扫描电镜（SEM，Tescan Mira3，Czech）观察断面微观形貌，详细的样品制备方法参见前人的研究[18]，采用扫描电压为20 kV，如Fig.6所示，可以看到，断面出现了许多均匀分布的深色“小坑”，这是由韧带剥离产生的。进一步对比试件拉伸实验应力-应变曲线，如Fig.7所示，可以看出，2条曲线基本吻合，当应变较大时，2条曲线出现一定的偏差，可能是由于复合材料在实际情况下的细观结构存在一定缺陷，数值模拟计算时将炭黑/橡胶界面看作是理想粘接界面造成的。在一定的误差范围内，仿真结果与实验结果吻合度较好，本文的模拟分析结果是可靠的。

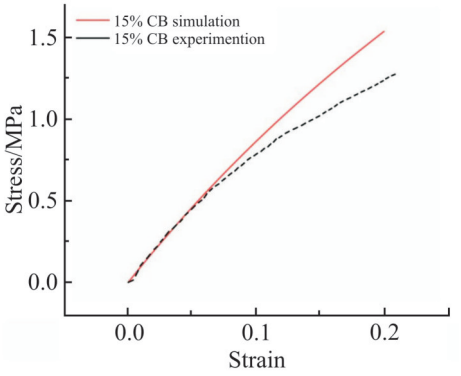


Fig. 7 Comparison of simulated and experimental tensile stress - strain curve of 15% carbon black/rubber composites

4 结果与讨论

4.1 增强体体积分数对力学性能的影响

对体积分数分别为5%，10%，15%和20%的碳纤维和炭黑随机分布的增强橡胶复合材料通过周期性边界条件施加均匀拉伸载荷，Fig.8给出了不同体积含量下2种材料的应力-应变曲线。可以看到曲线呈非线性关系，曲线的斜率都随着增强体体积含量的增大而增大，这表明，2种材料的弹性模量都随着增强体体积含量的增大而增大，所以增强体的添加使橡胶材料抵抗弹性变形的能力增强，并且有效地改善了复合材料的整体性能。正如Tomita等[19]所指出的，增强体在橡胶基体中能够产生一些刚性区域，增强体的存在导致了变形的局部集中，这是增强橡胶复合材料抵抗宏观变形能力的主要机制。此外，相同体积含量下，炭黑含量对橡胶复合材料弹性模量的影响较大，表现为不同体积含量下的曲线斜率差别较大，增大其体积含量可以明显改善材料的刚度。

4.2 增强体体积分数对裂纹扩展的影响

为探究增强体体积含量对橡胶复合材料裂纹扩展的影响规律，本文基于扩展有限元法（XFEM）分别对含炭黑和碳纤维随机分布的增强橡胶复合材料

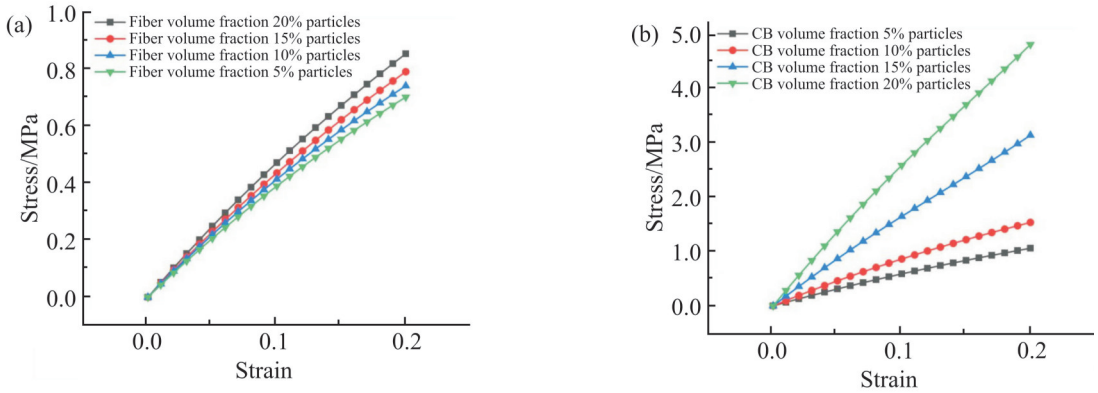


Fig. 8 σ-ε curves of two materials with different volume fractions
(a): σ-ε curves at different fiber volume fractions; (b): σ-ε curves at different CB volume fractions

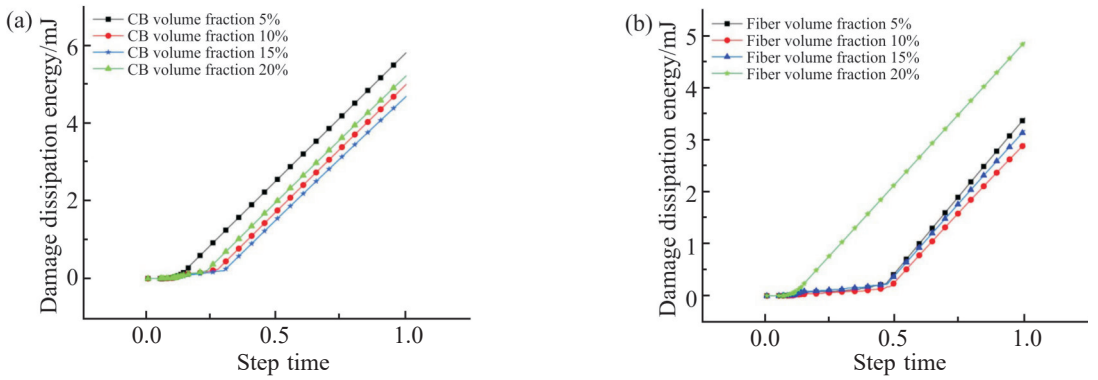


Fig. 9 Fracture energy variation curves of reinforced rubber composites with different volume fractions during crack propagation
(a): fracture energy curves of rubber composites reinforced with carbon black particles during crack propagation; (b): fracture energy curves of carbon fiber reinforced rubber composites during crack propagation

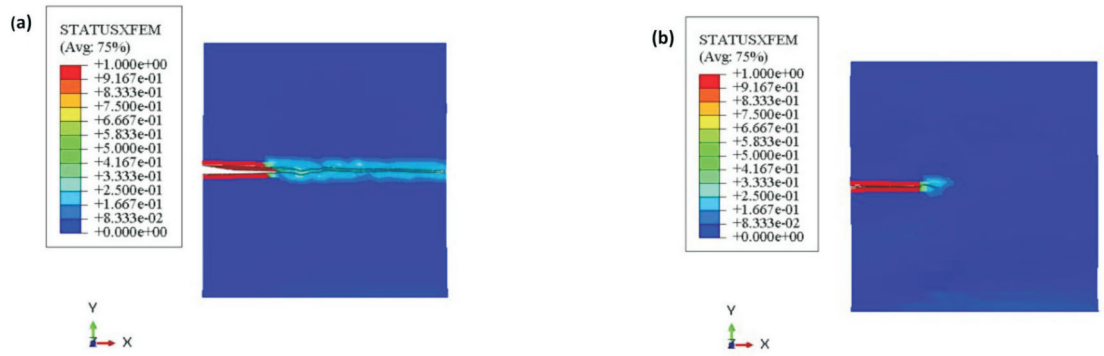


Fig. 10 Two situations during crack propagation

(a): crack continues to propagate around the reinforcement; (b): extension terminated by the obstruction of enhancer

进行裂纹扩展数值模拟，分别模拟了碳纤维/橡胶和炭黑/橡胶增强体体积分数为5%，10%，15%和20%的橡胶复合材料的裂纹扩展过程。Fig.9显示了不同体积含量的增强橡胶复合材料在裂纹扩展过程中橡胶复合材料的损伤断裂能变化，从图中可以看出，体积分数越大，材料的损伤耗散能不一定减小，也就是说，复合材料的抗断裂性能不一定会越强。体积分数变大，材料的抗断裂性能有减弱的可能，因为当增强体的体积分数较大，基体体积分数会减小，增强体之间的间距变小，更多的增强体会约束橡胶基体的变形，使得界面传递能力减弱，材料抗断裂的能力减小。

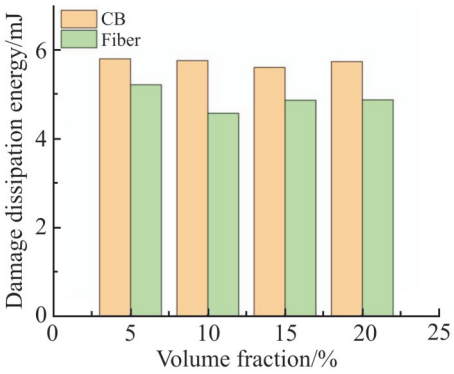


Fig. 11 Comparison of damage dissipation energy of rubber matrix composites with different reinforcement volume fractions

增强体的刚度和模量远大于橡胶基体，所以增强橡胶复合材料的断裂损伤主要是橡胶基体的断裂和增强体的破坏，其发生裂纹扩展时，主要有以下2种情况，一种是基体产生裂纹后遇到增强体，其裂纹将绕过增强体继续扩展，使扩展路径更为曲折，增强体在其中起到桥联的作用，如Fig.10(a)所示；另一种是橡胶基体发生裂纹扩展后遇到增强体无法进一步扩展，增强体的阻碍使得扩展终止，如Fig.10(b)所示。也就是说，在材料发生裂纹扩展损伤时，由于增强体的存在，裂纹发生扩展时遇到阻碍需要改变路径方向，从而抑制了裂纹的快速扩展，所以增强体的加入可以有效抑制裂纹的扩展过程，使其整体性能表现出较好的抗断裂性能。

Fig.11显示了碳纤/橡胶和炭黑/橡胶复合材料在4种增强体体积含量下的损伤耗散能对比，从图中可以看到，增强体的体积分数并不是越大越好，随着增强体体积含量的增大，在裂纹扩展损伤时，2种材料所消耗的能量表现为先减小后增大。当炭黑增强橡胶复合材料的体积含量为15%时，在裂纹扩展的过程中所消耗的能量较小，这是因为随着增强体含量的增多，橡胶基体的富集区域减小，使其抗撕裂性能受到限制，导致材料抵抗变形的能力下降，从而更容易产生裂纹发生断裂破坏。碳纤维增强橡胶复合材料在增强体含量为10%的情况下在裂纹扩展时所消耗的能量最小。这是由于短纤维增强橡胶材料在增强体体积含量不高于10%的情况下，随着纤维体积含量的增大，纤维在裂纹扩展时会起到明显的桥联作用，承受了裂纹扩展时的大部分载荷，对橡胶基体的性能表现影响不大。另外，相比于炭黑增强橡胶复合材料，纤维增强橡胶复合材料在相同的增强体体积含量下，裂纹扩展损伤时所消耗的能量较小。

Fig.12为裂纹尖端应力历史曲线，从图中可以看出裂纹在扩展过程中裂尖单元的应力变化规律。在加载初始阶段，随着载荷的增加，材料的裂尖单元应力值不断增大，在这个过程中单元应力值并未达到损伤起始准则中裂尖单元的临界许用值σ_{max}，此时裂

纹还未开裂扩展，随着载荷的进一步增大，裂尖单元的应力值增大到许用最大主应力值，此时裂纹开始起裂，当裂纹完全开裂，其尖端奇异性消失，该裂尖单元会转变为普通单元，此时裂尖单元的应力值会急剧减小，随后加载继续，单元应力值继续增加，直至加载结束。

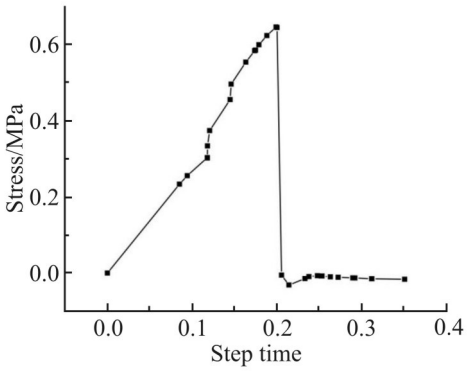


Fig. 12 Stress variation curve of crack tip element

4.3 增强体体积分数对*J*积分的影响

1968年，Rice[20]提出了*J*积分，是一种基于能量守恒原理对非线性断裂问题进行处理的断裂参数，*J*积分也可描述裂纹尖端区域应力应变场。本文中橡胶复合材料属于非线性材料，所以可以采用*J*积分法进行裂纹扩展的分析。经过数值模拟计算，获得2种橡胶材料的裂纹尖端*J*积分曲线，如Fig.13所示。从图中可以看出，在加载初期，裂纹尖端的*J*积分表现为稳定状态的变化，这是因为在加载初期，裂纹的稳步扩展只需要消耗较少的能量就能满足。随后，*J*积分表现为急剧的上升变化，表明裂纹的扩展进入失稳状态，此时的裂纹扩展过程将进入材料的断裂阶段。正如姚鸿等[21]所提到的，增强橡胶材料的裂纹扩展过程存在2种典型的状态，分别为“剥离态”和“断裂态”。这一过程符合非线性材料在发生裂纹扩展后首先经历稳态扩展直至进入失稳状态导致材料断裂的断裂力学理论。从图中还可以发现，碳纤维/橡胶材料在裂纹扩展中裂尖单元的应力场强度远大于炭黑/橡胶材料，因此，炭黑增强橡胶材料在裂纹扩展中相比于碳纤维增强橡胶材料表现为较为稳定的开裂，裂纹扩展更为缓慢。这是因为当在橡胶基体中加入炭黑颗粒增强体时，颗粒会附着于橡胶基体上，在施加载荷时能够承担一定的载荷。当橡胶基体中没有添加增强体时，橡胶基体的承载能力很

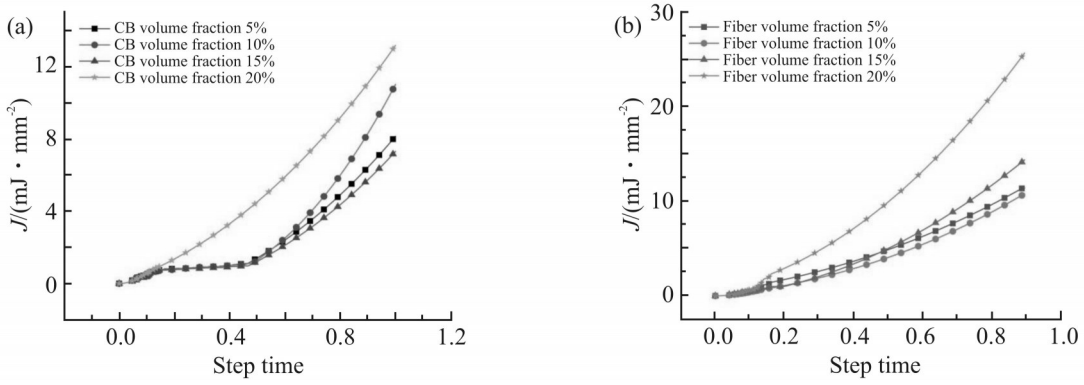


Fig. 13 Curves of *J*-integral at crack tip vs. time
(a): change curves of *J*-integral of crack tip at different carbon black volume fractions; (b): change curves of *J*-integral of crack tip at different fibers volume fractions

小。随着炭黑颗粒的增多，越来越多的橡胶基体通过炭黑颗粒相连接，使裂纹的生长速率趋于均匀，裂纹尖端的开裂会表现出相对稳定的状态。

5 结论

本文以碳纤/橡胶和炭黑/橡胶复合材料为研究对象，采用随机序列吸附算法建立了含碳纤和炭黑随机分布的橡胶复合材料三维RVE数值模型，探究了不同增强体的体积分数对裂纹扩展行为的影响。结果表明，增强体的加入可以有效地改善复合材料的整体性能，增大其体积含量可以明显改善材料的刚度，提高材料的力学性能。增强体在材料的裂纹扩展过程中可以有效抑制裂纹的扩展，但增强体的体积分数并不是越大越好，随着体积分数变大，材料

的抗断裂性能有减弱的可能。本研究揭示了橡胶复合材料裂纹萌生扩展损伤失效机理,可为预测增强橡胶复合材料的损伤失效提供理论依据。

参考文献:

[1] Yifeng D, Ying L. A review on the mechanical property evaluation and optimization design of fabric rubber composite structure[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 8: 100289.

[2] Alvarez P, Mendizabal A, Petite M, *et al*. Finite element modelling of compressive mechanical behaviour of high and low density polymeric foams[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2009, 40: 126-132.

[3] Smit R J M, Brekelmans W A M, Meijer H E H. Prediction of the large- strain mechanical response of heterogeneous polymer systems: local and global deformation behaviour of a representative volume element of voided polycarbonate[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1999, 47: 201-221.

[4] 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 X, Yang X X, Gao J H. 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.

[5] 姜剑, 顾伯勤, 张斌, 等. 大变形条件下短纤维增强橡胶基复合材料的力学行为[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 101-104.
Jiang J, Gu B Q, Zhang B, *et al*. Mechanical behaviors of short fiber reinforced rubber matrix composite on large deformation[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2016, 38(4): 101-104.

[6] Gao J H, JiaoF X, Zhang H J, *et al.* Meso research on the fiber orientation distribution of aramid fiber- reinforced rubber composite[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31: 3281-3291.

[7] Hamed G R, Hiza S. Trouser tearing of a model natural rubber tire belt vulcanizate. part 1：effect of rate of tearing[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2010, 83: 199-212.

[8] 马岩, 逄见光, 朱超, 等. 芳纶短纤维对氢化丁腈橡胶复合材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(9): 29-34.
Ma Y, Pang J G, Zhu C, *et al*. Effect of short aramid fiber on properties of HNBR composite[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2017,33(9):29-34.

[9] 崔颂, 夏志东, 黄培, 等. 单向拉伸碳纤维填充导电橡胶薄膜的裂纹扩展行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(2): 61-67.
Cui S, Xia Z D, Huang P, *et al*. Crack propagation behavior of carbon fiber-filled conductive rubber films under uniaxial tension [J]. Polymer Materials Science & Engineering,2019,35(2):61-67.

[10] Daux C, Moës N, Dolbow J, *et al*. Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 48: 1741-1760.

[11] 金泉, 覃继宁, 张荻, 等. 颗粒和纤维混杂增强复合材料力学性能的三维有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2006, 23(2):14-20.
Jin Q, Qin J N, Zhang D, *et al*. 3D FEM simulation of mechanical property of composites reinforced by both particles and fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(2):14-20.

[12] 周莉萍. 基于细观模拟的橡胶材料损伤特性研究[D]. 合肥: 安徽工业大学, 2017.
Zhou L P. Study on damage characteristics of rubber materials based on microscopic simulation[D]. Hefei: Anhui university of technology, 2017.

[13] 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 X S, Yang X X, Gao J H. 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.

[14] 梁超群, 尧军平, 李怡然, 等. SiC/AZ91D镁基复合材料单轴压缩过程中裂纹萌生扩展机制[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4282-4293.
Liang C Q, Yao J P, Li Y R, *et al.* Crack initiation and propagation mechanism during uniaxial compression of SiC/AZ91D magnesium matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 4282-4293.

[15] 杨廉. 橡胶沥青混合料二维细观结构数值模拟建模方法及虚拟加载试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Yang L. Study on the modelling of two-dimensional numerical rubber modified asphalt mixture and simulation on the virtual loading test[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[16] 李庆, 杨晓翔. 周期性边界条件下炭黑增强橡胶基复合材料有效弹性性能数值模拟[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(1):97-103.
Li Q, Yang X X. Prediction on mechanical behavior of carbon black filled rubber composites based on periodic boundary conditions[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2013, 41(1): 97-103.

[17] Xia Z H, Zhang Y F, Ellyin F. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications[J]. International journal of solids and structures, 2003, 40: 1907-1921.

[18] Chen L, Gu B. Predicting fatigue damage in interphase of short fiber reinforced rubber composites under transverse load[J]. Polymer Composites, 2018, 39: 1455-1467.

[19] Tomita Y, Lu W, Naito M, *et al.* Numerical evaluation of micro- to macroscopic mechanical behavior of carbon- black- filled rubber[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005,48:108-116.

[20] Rice J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notch and cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1968, 35: 379-386.

[21] 姚鸿, 翁更生, 刘衍朋, 等. 炭黑对天然橡胶疲劳裂纹扩展形态的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(12): 78-83.
Yao H, Weng G S, Liu Y P, *et al*. Effect of carbon black on the fatigue crack growth in filled natural rubber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(12): 78-83.

Finite Element Simulation of Mechanical Properties and Crack Propagation Damage of Carbon Fiber and Carbon Black Reinforced Rubber Composite Materials

Xinyi Zhang[1], Junhong Jia[1], Sasa Gao[1], Hongchun Li[2], Dongshen Li[2], Xiaodong Yang[2]

(1.*College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center of Special Sealing Technology, Xi'an Aerospace Prolusion Institute, Xi'an 710100, China*)

ABSTRACT: In order to study the mechanical properties and crack propagation mechanism of carbon fiber/rubber composites and carbon black/rubber composites, the effects of different volume fractions of fillers on the mechanical properties of composites were firstly analyzed. Then, the crack propagation damage evolution of carbon fiber/rubber composites and carbon black/rubber composites was studied based on the extended finite element method. The effects of reinforcement volume fraction on the tearing energy and *J* integral of rubber material in the process of crack propagation under uniaxial load were explored, and the crack propagation damage law of carbon fiber and carbon black reinforced rubber matrix composites was analyzed. The results show that the effective elastic modulus of rubber composites increases with the increase of reinforcement volume fraction.

Keywords: complex rubber material; random sequential adsorption; crack growth; representative volume element; finite element analysis