

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.015

碳纤维增强聚醚醚酮材料动态冲击数值模拟

唐方红¹, 文周^{1,2}

(1. 东莞职业技术学院, 广东东莞 523808; 2. 西安科技大学机械学院, 西安 710021)

摘要: 为探究不同含量碳纤维(CF)增强聚醚醚酮(PEEK)复合材料在动态冲击载荷下的力学性能, 采用了有限元软件 ABAQUS 基于 VUMAT 子程序开发一个渐进损伤模型, 并结合 Johnson-Cook 材料模型用以模拟材料高应变率响应。通过 Matlab 编程, 构建了四种不同 CF 体积分数(0%, 10%, 20%, 30%)复合材料模型, 并对其进行动态冲击加载模拟。模拟结果表明, 随着 CF 含量的增加, 复合材料在冲击载荷下的应力-应变分布得到了显著改善。具体来说, CF 有效限制了冲击区域的应力集中, 降低了材料的损伤程度。此外, 含 CF 的复合材料展现出更高的等效塑性应变和极限载荷, 这表明材料的强度和刚度得到了增强, 从而提高了其抵抗冲击的能力。分析表明, CF 增强 PEEK 降低了复合材料在冲击过程中的刚度退化, 这有助于提高材料的能量吸收效率, 减少冲击失效的可能性。证实了 CF 对于改善 PEEK 基复合材料冲击性能的积极作用, 并且随着 CF 含量的增加, 材料冲击失效风险得到了有效降低。

关键词: 碳纤维增强聚醚醚酮; 碳纤维含量; 动态冲击; 数值模拟; 冲击损伤

中图分类号: TQ326.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0101-07

Numerical simulation of dynamic impact of carbon fiber reinforced PEEK material

TANG Fanghong¹, WEN Zhou^{1,2}

(1. Dongguan Polytechnic, Dongguan 523808, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract : Focusing on evaluating the mechanical properties of polyetheretherketone (PEEK) composites reinforced with varying levels of carbon fiber(CF) when subjected to dynamic impact loading. To accomplish this, a progressive damage model utilizing the VUMAT subroutine within the ABAQUS finite element analysis software was developed. This model was coupled with the Johnson-Cook material constitutive model to accurately simulate the material's behavior under high strain rate conditions. Utilizing Matlab, four composite models were designed with distinct CF volume fractions: 0%, 10%, 20%, and 30%. These models were subjected to simulated dynamic impact events to assess their structural integrity and response. The simulations revealed that the stress-strain distribution within the composite material significantly improved with increasing CF content. Notably, the incorporation of CF effectively mitigate material damage and localize stress concentrations at the impact site. The composites with CF exhibit higher ultimate loads and plastic stresses, signifying a marked enhancement in material stiffness and strength. This translates to an augmented capacity to withstand impact forces. The analysis indicate that the reinforcement of PEEK with CF result in reduced stiffness degradation during impact, thereby increasing the material's energy absorption capabilities and diminishing the probability of impact-induced failure. In summary, the findings of this study corroborate the positive influence of CF on the impact resistance of PEEK-based composites. It is evident that increasing CF content significantly reduces the risk of failure under dynamic impact conditions.

Keywords : carbon fiber reinforced polyetheretherketone ; carbon fiber proportion ; dynamic impact ; numerical simulation ; impact damage

碳纤维(CF)增强聚醚醚酮(PEEK)是一种复合材料, 由 PEEK 聚合体基体和添加进去的 CF 构

成^[1-2]。尽管 PEEK 本身已具备优异的力学性能、化学稳定性和耐高温性能, 但在某些极端应用条件

基金项目: 广东省教育厅 2020 年度产教融合创新平台项目(2020CJPT019); 东莞市科技局 2022 年社会发展项目(20221800900472)

通信作者: 唐方红, 本科, 副教授, 主要研究方向为机械设计、机电控制

收稿日期: 2023-03-08

引用格式: 唐方红, 文周. 碳纤维增强聚醚醚酮材料动态冲击数值模拟[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5): 101-107.

TANG Fanghong, WEN Zhou. Numerical simulation of dynamic impact of carbon fiber reinforced PEEK material[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 101-107.

下,如航空航天和汽车工业中的高速冲击或高温环境,其性能仍有进一步提升的空间。而CF作为增强体,具有轻质、高强度和高刚度的特点,能够显著提升材料的力学性能^[9]。目前,PEEK/CF在工程领域得到广泛应用,特别适用于对高强度、高刚度和耐腐蚀性能有要求的应用场景^[4-5]。因此,笔者旨在通过引入CF来进一步改性PEEK,以期望获得更加卓越的力学性能和耐久性。

PEEK/CF复合材料的特性可通过调整CF含量、方向、树脂质量以及制造工艺参数来实现。由于PEEK基体属于热塑性材料,其成型过程不同于热固性材料,不需要固化步骤,而是通过熔融和冷却来形成最终结构。Morita等^[6]研究了不同冲击速度(低速冲击)对PEEK/CF复合材料的影响,实验结果表明,冲击速度和层压序列对PEEK/CF复合材料的冲击响应和损伤容限有显著影响。此外,Coskun等^[7]研究了以3 m/s恒定速度进行的一次和两次重复冲击试验,以及冲击次数对PEEK/CF复合材料动态性能的影响。并进行了冲击后压缩试验,以确定重复冲击引起的损坏对残余抗压强度以及临界屈曲载荷、峰值力和轴向刚度的影响。Belingardi等^[8-9]综合考虑能量参数和冲击力阈值对PEEK/CF复合材料撞击速度的依赖性。实验结果表明,在所考虑的应变率范围内,复合材料的力学性能对其应变率效应不敏感。然而,目前对于PEEK/CF复合板低速冲击响应的数值研究较少。在进行PEEK/CF复合板冲击行为的数值研究时,确实需要准确的材料参数来确保模型的可靠性和预测的精确性。Guida等^[10]的研究利用了LS-DYNA显式求解器,这一求解器在预测最大冲击力、最大位移和吸收能方面表现出较高可靠性。

为更精确分析不同含量CF的PEEK复合材料在动态冲击过程中的动态响应,基于Matlab构建了四种不同CF体积分数(0%, 10%, 20%, 30%)复合材料模型,并采用有限元软件ABAQUS/Explicit构建PEEK/CF复合材料在低速冲头冲击过程中的有限元模型。描述了冲击过程中能量和损伤的变化趋势。同时,笔者还讨论了CF含量对PEEK/CF复合材料在冲击测试中的接触力、位移和内能变化规律的影响。

1 CF增强PEEK材料动态冲击响应数值模拟方法

在纤维增强PEEK复合材料中,当遭受冲击负

载时,材料会首先进入塑性变形阶段。只有当应力或塑性变形超过材料的承载极限时,才会发生破坏。为更真实地模拟复合材料在冲击过程中的响应,笔者采用的Johnson-Cook材料模型能够描述材料在广泛应变率范围内的行为,包括低速至高速塑性变形的过程,因此适合用于模拟复合材料在冲击过程中的响应。此外,Hashin破坏准则也被应用于描述PEEK/CF复合材料在冲击失效过程中的破坏机制。Hashin模型能够预测复合材料在复杂应力状态下的破坏,广泛应用于复合材料的疲劳和损伤研究中。通过编写用户定制子程序,Hashin模型被嵌入到有限元分析软件中,实现对材料冲击损伤演化的实时跟踪。

1.1 Johnson-Cook模型

Johnson-Cook材料模型最初是为了描述金属材料在动态载荷下的塑性变形和失效行为而开发的,但它已经被扩展和改进,以适用于非金属材料,包括复合材料的研究。Johnson-Cook本构模型是一个经验式黏塑性模型,可以建立金属材料在动态载荷下的屈服函数形式,即von-Mises流动应力函数。模型成功描述了金属材料在塑形过程中因应变硬化、应变率硬化和温度软化等因素而发生的物理行为变化特征。该函数可以精准描述金属材料塑性变形下由应变、应变速度和温度三大因素共同决定的强度表征。其具体形式为^[11]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)[1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

在该方程中,A,B,C分别代表屈服应力、应变强化参数和应变率敏感系数; m 和 n 分别表示温度软化效应系数和应变强化系数; ε 和 $\dot{\varepsilon}^*$ 分别表示等效塑性应变和无量纲塑性应变率; T^* 是无量纲温度,其表达式为:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

式中: T , T_r 和 T_m 分别为环境温度、参考温度(一般取室温)和材料熔点温度。

1.2 PEEK/CF复合材料Hashin失效准则及渐进损伤

基于纤维拉伸/压缩失效、基体拉伸/压缩失效等失效模型的准确性^[12],笔者采用三维Hashin失效准则^[13]进行PEEK/CF复合材料的三维渐进损伤分析。其失效模型表示如下:

纤维拉伸失效判断准则($\sigma_{11} \geq 0$)见式(3):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

纤维压缩失效判断准则($\sigma_{11} < 0$)见式(4):

$$-\frac{\sigma_{11}}{X_c} = 1 \quad (4)$$

基体拉伸失效判断准则($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$)见式(5):

$$\left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_{23}^2}\right)(\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

基体压缩失效判断准则($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)见式(6):

$$\frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}}\right)^2 + \frac{1}{S_{23}^2} (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

拉伸CF与基体接触界面失效判断准则($\sigma_{33} \geq 0$)见式(7):

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

压缩CF与基体接触界面失效判断准则($\sigma_{33} < 0$)见式(8):

$$\left(\frac{\tau_{12}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \quad (8)$$

式(3)~式(8)建立了复合材料各个方向上的应力-应变关系模型。式中“1”表示纤维方向,“2”和“3”分别表示在基体中的垂直方向和水平方向。 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ 分别代表这三个方向上的拉伸应力。同时, $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ 表示三个方向上的剪切应力。 S_{12}, S_{13}, S_{23} 是对应方向的剪切强度。 $X_t, X_c, Y_t, Y_c, Z_t, Z_c$ 分别代表纤维方向的拉伸强度、压缩强度,以及基体中垂直方向和水平方向的拉伸强度与脱层强度。如果加载过程中复合材料发生损伤,将根据Tan等^[14]提出的材料刚度衰减准则进行模拟。该准则可以很好地描述复合材料受损过程中的刚度变化规律。

1.3 Abaqus/Explicit软件中Vuamt子程序的实现

笔者使用Fortran语言编写Vuamt子程序。该程序的第一部分用于获取用户定义的材料属性。Abaqus/Explicit通过VUMAT子程序向程序提供以下材料属性参数:

- ①当前分析步的应变增量 ΔE ;
- ②应力增量 σ_0 ;
- ③当前分析步所对应的时间增量 Δt ;
- ④相关状态变量SDV,用于储存 $\bar{\varepsilon}^p, \Gamma$ 等变量,

并将其从前一增量步传输至下一增量步。

为确保材料属性在计算过程中的连续性,每个积分点都接收到应力 σ_0 和SDVs变量的值,VUMAT

子程序必须在增量结束时进行传递。

(1) Abaqus子程序接口。

Abaqus子程序接口用于计算参考时间 $t=0$ 的初始值(如通过考虑材料行为计算时间增量 Δt 的值)。为此,需要使用Abaqus提供的虚拟应变增量 ΔE 计算弹性应力 σ_1 ,其计算公式为:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + 2Gdev[\Delta E] + Ktr[\Delta E] \quad (9)$$

式中: G 为剪切模量; K 为与杨氏模量 E 成正相关的体积模量。

(2) 弹性阶段。

为了测试当前分析步是否完全弹性或部分塑性,通过计算预测的弹性应力 S_e 的偏差部分和Von mises等效应力 $\bar{\sigma}_e$,并将其与增量开始时的屈服应力 σ_0^y 进行比较。因此,首先需要将初始应力 σ_0 分解为静水压力(p_0)和偏差(S_0)两个组成部分,见式(10):

$$\begin{cases} p_0 = \frac{1}{3}tr[\sigma_0] \\ S_0 = \sigma_0 - p_0 \end{cases} \quad (10)$$

根据测试结果,使用公式(11)计算压力(p_1)和试验应力张量(S_e)的偏差部分,并将其与增量开始时的屈服应力 σ_0^y 进行比较。根据比较结果,将决定是否对最终应力进行修正。

$$\begin{cases} p_1 = p_0 + Ktr[\Delta E] \\ S_e = S_0 + 2Gdev[\Delta E] \end{cases} \quad (11)$$

如果 $\bar{\sigma}_e \leq \sigma_0^y$,则塑性修正项为0,因此可以跳过塑性修正步骤。假设预测的应力为最终应力 $S_f = S_e$,塑性修正项 $\Gamma = 0$,屈服应力保持不变 $\sigma_1^y = \sigma_0^y$,因此可以直接进行最终计算。如果 $\bar{\sigma}_e > \sigma_0^y$,则该步骤至少部分塑性,并且必须计算塑性修正,以便将预测的应力拉回到当前增量结束时材料的屈服面上。

(3) 塑性阶段。

采用Newton-Raphson算法计算由应变增加引起的修正项 Γ 的值。该参数定义了应变增加引起的校正。为提高计算效率,将 Γ 参数的初始值设置为前一个增量结束时的值($\Gamma = \Gamma_0$)。如果当前增量是第一个塑性增量(即如果 $\bar{\varepsilon}_0^p = 0$),由于无法计算塑性应变为零时 $h(\Gamma)$ 的值,将 Γ 初始化为一个非零的初始值($\Gamma = 10^{-8}$)。然后,通过计算yield函数 $f(\Gamma)$ 及其导数 $f'(\Gamma)$ 来计算 Γ 参数的增量 $\Delta\Gamma$,并与Newton-Raphson精度 ε_{NR} 进行比较。

$$\Delta\Gamma = -\frac{f(\Gamma)}{f'(\Gamma)} \quad (12)$$

如果 $\Delta\Gamma > \varepsilon_{NR}$,需要使用公式(13)迭代计算 Γ 值

的校正,并重新评估 $f(\Gamma)$ 和 $f'(\Gamma)$ 的值;

$$\Gamma \leftarrow \Gamma + \Delta\Gamma \quad (13)$$

如果 $\Delta\Gamma \leq \varepsilon_{NR}$,即可得到 Γ 参数的最终值。应力张量 S_1 的最终偏差部分通过预测值 S_{tr} 和修正项 Γ 计算得出:

$$S_1 = S_{tr} - 2G\Gamma n \quad (14)$$

其中 n 在径向返回算法的框架内,定义为:

$$n = \frac{S_{tr}}{\sqrt{S_{tr}:S_1}} \quad (15)$$

(4) 最终计算。

最终计算的主要工作是更新状态变量(SDVs)。根据方程(10),通过计算初始应力张量 σ_0 的静水压力 p_1 和应力张量的偏差部分 S_1 来得到增量结束时的最终应力张量 σ_1 。此外,还需要根据以下公式计算新的比内能 e_1 :

$$e_1 = e_0 + \frac{1}{2\rho} (\sigma_0 + \sigma_1): \Delta E \quad (16)$$

耗散的非弹性能量 ω_1^p 可表示为:

$$\omega_1^p = \omega_0^p + \frac{1}{\sqrt{6}\rho} (\sigma_0^y + \sigma_1^y) \Gamma \quad (17)$$

其中, ω_0^p 为初始非弹性能量; σ_0^y, σ_1^y 分别表示屈服应力和屈服点对应的应力张量。

2 动态冲击 PEEK/CF 材料有限元模型的建立

PEEK/CF 模型为一个底部设定全约束(即 X, Y 和 Z 方向位移以及沿 X, Y 和 Z 轴的旋转)的复合材料板,其尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。采用直径为 10 mm 的半球形冲击器对复合材料进行动态冲击模拟,冲击器沿 Y 轴的击速度为 1.37 m/s ,如图1所示。笔者旨在分析不同碳含量对复合材料动态冲击过程中的失效行为,因此,在建立有限元模型前首先采用 Matlab 程序生成含量为 $0\%, 10\%, 20\%$ 以及 30% 的碳含量部件信息,设定CF长度为 5 mm ,直径为 0.005 mm 。将CF部件信息导入 ABAQUS/Explicit 软件中,并对CF与基体 PEEK 进行内嵌耦合约束。

为提高 Hashin 失效准则在接触区域附近的准确性,在此区域进行了网格加密,以获取更精确的信息。与此同时,为降低计算量,远离接触区域采用了较为稀疏的网格设置。在 PEEK/CF 复合材料中,使用了 $156\,280$ 个8节点线性单元(CPE8)进行建模,冲击器则采用了 $3\,528$ 个4节点线性四面体单元(C3D4)。此外,对于CF材料,采用了2节点线性三维桁架单元(T3D2),随着CF含量的增加,网格数量

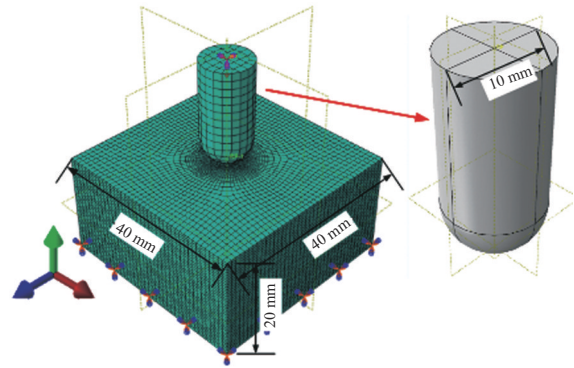


图1 动态冲击有限元模型

Fig. 1 Dynamic impact finite element model

也相应增加。在1.1一节中,详细描述了 Johnson-Cook 理论和 Hashin 渐进损伤理论,以准确描述冲击过程中力学响应行为和失效行为。在有限元建模过程中,分别为CF和PEEK基体材料赋予了力学性能,以符合 Johnson-Cook 理论弹塑性力学行为^[15-16],见表1,并定义了它们的失效准则见表2^[15,17]。

表1 PEEK和CF的Johnson-Cook力学性能

Material	E/GPa	ν	A	B	n	C	m
PEEK	3.6	0.4	132	10	1.2	0.034	0.7
CF	230	0.25	265	426	0.34	0.015	0.1

表2 PEEK和CF损伤准则

Material	Density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Damage strain	Triaxial stress	Strain rate/ s^{-1}
PEEK	1.304	1.1	0.33	0.001
CF	1.62	1.469	0.2	0.001

3 结果与讨论

3.1 PEEK/CF 复合材料应力应变场分析

图2a2、图2b2、图2c2、图2d2展示了不同CF含量时($0\%, 10\%, 20\%, 30\%$)的 PEEK/CF 复合材料 Mises 应力 σ_m 云图分布。通过图2a1、图2b1、图2c1、图2d1,可以清晰地观察到基于 Matlab 程序能够高效地构建CF模型。CF以随机方向均匀分布,形成短线状,并且随着CF含量的增加,基体表面的CF密度明显增加。此外,图2中的蓝色区域表示冲击器的冲击区域,即第二节有限元建模过程中所描述的网格细化区域。通过对比图2a2、图2b2、图2c2、图2d2展示的应力分布情况,笔者可以观察到在冲击过程中,纯PEEK材料的应力沿着冲击区域周围四散分布,而PEEK/CF复合材料的应力主要集中于冲击区域,其他区域则呈现较低的应力状态。随着CF含量的增加,图2中 $50 \sim 140 \text{ MPa}$ 高应力区

域也更加集中。Wen 等^[5]通过对比 PEEK 材料、PEEK/CF 复合材料和玻璃纤维(GF)增强 PEEK 复合材料制成的蜂窝状复合结构的冲击性能,进一步证明了纤维增强 PEEK 复合材料在抑制冲击过程中应力分布方面的有效性。由此表明,通过在基体 PEEK 中添加 CF 可以有效改善冲击过程中由于应力超过强度极限而导致的损伤面积,从而减轻损伤程度。

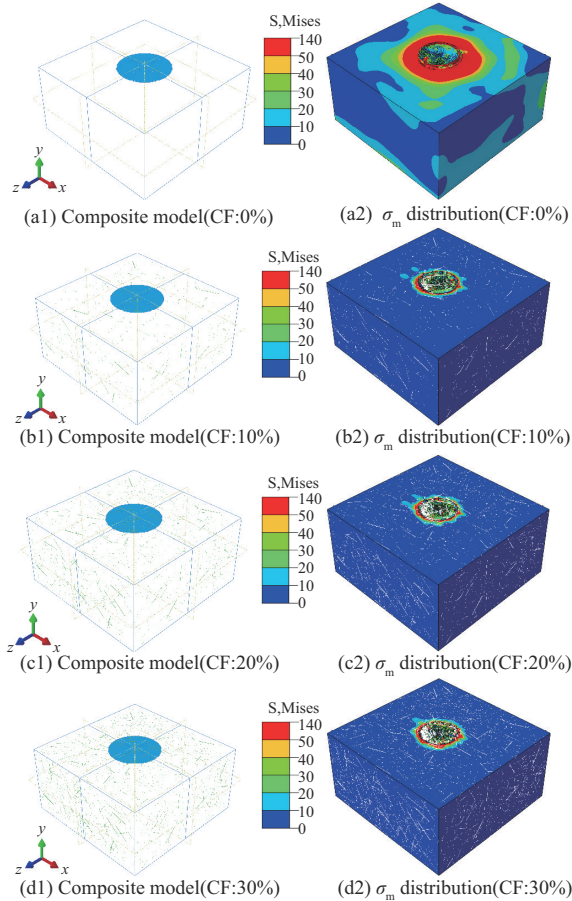


图2 不同CF含量时动态冲击PEEK/CF模型及Mises应力场 σ_m 分布
Fig. 2 Dynamic impact PEEK/CF composite model and Mises stress field σ_m distribution under different CF content

图3为冲击器下压过程中的载荷位移曲线。由图3可观察到,在冲击过程中,随着下压位移的增加,冲击器所施加的载荷经历了两个阶段。在第一阶段,载荷随着位移增加而增加,直到达到峰值后进入第二阶段,此时载荷随着位移的继续增加而减小。这一现象的原因在于,第一阶段的冲击器下压过程中,复合材料发生了塑性变形,但该变形未超过复合材料的极限塑性变形阈值。当载荷达到峰值时,复合材料根据Hashin失效准则开始发生损伤失效行为,导致载荷随着下压位移的增加而减小。

相比之前的研究,该研究考虑到了复合材料的弹性本构模型以及损伤行为,这与Megeri等^[18]的数值模拟结果不同,他们仅考虑了复合材料的弹塑性本构模型,因此呈现出载荷随着下压位移的持续增加趋势。从图3可以看出,在相同冲击速度条件下,纯PEEK材料在冲击过程中达到极限塑性变形时的载荷峰值和下压位移明显大于PEEK/CF复合材料。随着CF含量的增加,冲击器达到极限塑性变形时的下压位移逐渐减小。此外,从载荷-位移曲线可以看出,随着CF含量的增加,载荷在单位下压位移变化的幅度也增大。由此说明PEEK/CF复合材料的极限塑性变形能力明显低于纯PEEK材料,并且随着CF含量的增加,极限塑性变形也相应增加。

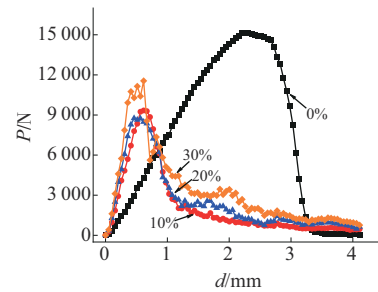


图3 冲击载荷(P)-位移(d)曲线
Fig. 3 Impact load-displacement curves

为进一步分析PEEK/CF复合材料在动态冲击过程中的塑性应变行为,不同CF含量(0%, 10%, 20%, 30%)的PEEK/CF复合材料的等效塑性应变(ε_{eq})云图分布见图4所示。从图4可以观察到,相比纯PEEK材料,PEEK/CF复合材料在动态冲击过程中产生的塑性变形区域明显减小。此外,从复合材料的侧视图可以看出,纯PEEK材料在冲击后表面产生明显的隆起,而PEEK/CF复合材料的基体PEEK材料表面未出现明显隆起,但是CF表面明显受到破坏。这表明CF能够有效抑制动态冲击过程中的塑性变形,从而提高PEEK材料的抗冲击性能。这一结果与Peng等^[19]在对PEEK/CF复合材料进行拉伸实验时得到的结果一致。

3.2 PEEK/CF复合材料冲击失效行为分析

在1.1节中,已经对PEEK/CF复合材料的Hashin失效准则和渐进损伤理论进行描述。图5为PEEK/CF复合材料在动态冲击后的刚度退化云图分布。通过PEEK/CF复合材料的应力-应变场分析可知,添加CF可以有效抑制复合材料在冲击区域的损伤应变分布。同样地,从图5的复合材料刚度

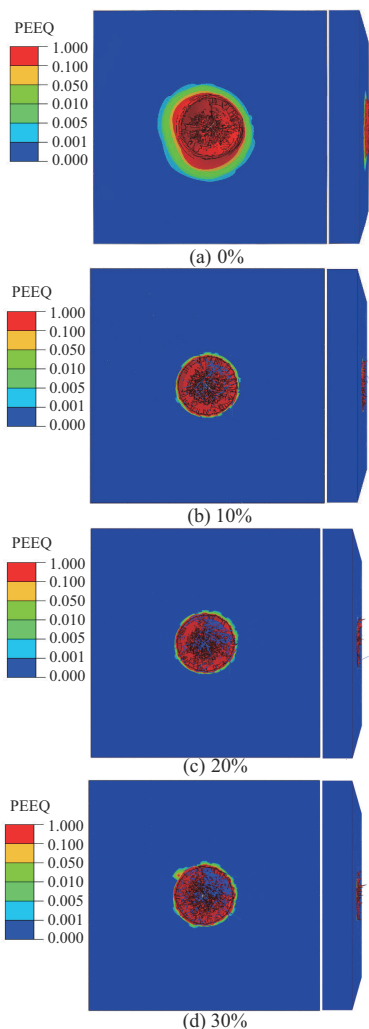


图4 不同CF含量时PEEK/CF动态冲击 ε_{eq} 分布
Fig. 4 PEEK/CF dynamic impact ε_{eq} distribution under different CF content

退化行为可明显看出,与PEEK/CF复合材料相比,纯PEEK材料表现出明显刚度退化,而PEEK/CF复合材料仅在冲击器下压区域出现损伤失效。随CF含量增加,冲击区域显示的CF密度也相应增加。

图6为PEEK/CF复合材料在冲击过程中的吸收能量与冲击时间的关系曲线。与图3中的载荷-位移曲线相一致,图6中的吸收能量与时间曲线也可划分为两个阶段。在第一阶段,随着位移的增加,载荷逐渐增加,同时吸收能量也逐渐增加。在第二阶段,当载荷达到峰值后开始下降,吸收能量逐渐趋于稳定。通过对比可明显发现,在相同的冲击状态下,PEEK/CF复合材料的吸收能量明显高于纯PEEK材料。与载荷-位移曲线一致,随着CF含量的增加,单位位移下的吸收能量增幅也增大。此外,随着CF含量的增加,复合材料的总吸收能量也

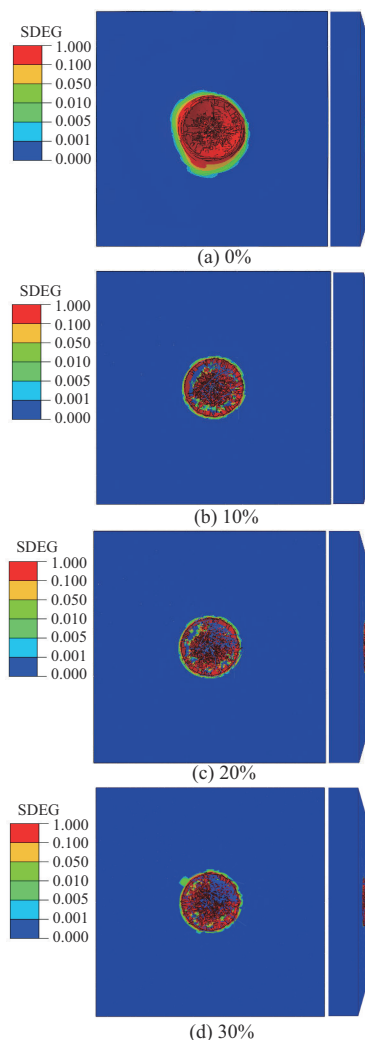


图5 PEEK/CF动态冲击刚度退化分布
Fig. 5 Dynamic impact stiffness degradation distribution of PEEK/CF

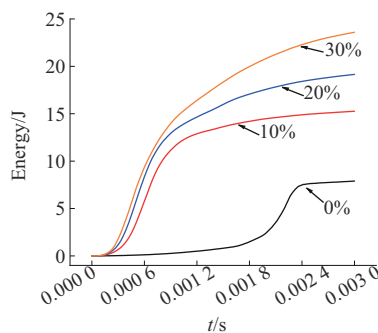


图6 吸收能量-冲击时间曲线
Fig. 6 Energy absorption - impact time curves

增加。这一结论与Wen等^[5]的研究结果一致,他们通过对比PEEK材料、PEEK/CF复合材料和PEEK/GF复合材料制成的蜂窝状复合结构的冲击性能得出相同的结论。综上所述,PEEK/CF复合材料在冲击过程中能够获得更多的吸收能量,从而降低了损伤能量,进而降低了冲击失效的可能性。

4 结论

对不同CF含量的PEEK/CF复合材料的低速冲击响应进行了有限元分析,得到如下结论:

(1) 对比分析不同CF含量时PEEK/CF复合材料冲击区域应力-应变分布。结果表明,通过添加CF可以有效抑制动态冲击过程中的塑性应变,并将冲击过程中产生的应力集中于与冲击器接触的区域。这降低了应力和塑性应变达到强度极限从而导致冲击失效的可能性,进而提高了PEEK/CF复合材料的抗冲击性能。

(2) 比较不同CF含量(10%, 20%, 30%)的PEEK/CF复合材料在相同冲击条件下的动态冲击响应过程,发现随着CF含量的增加,产生冲击损伤失效前的等效塑性应变和极限载荷也随之增加。

(3) 分析不同CF含量对PEEK/CF复合材料冲击区域的刚度退化行为和吸能,发现添加CF可以有效降低冲击过程中的刚度退化失效。此外,在冲击过程中,PEEK/CF复合材料能够获取更多的吸收能,进而减少了损伤能量的积累,从而降低了冲击失效的风险。

参考文献

- [1] 陈意伟,单忠德,杨旭静,等.连续纤维增强PEEK增材制造力学性能与成型质量优化[J].工程塑料应用,2022,50(5):61-67.
CHEN Yiwei, SHAN Zhongde, YANG Xujing, et al. Parameter optimization of mechanical properties and forming accuracy for continuous fiber reinforced PEEK additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):61-67.
- [2] 李伟,杨颜志,王勇.低温环境下PEEK/CF复合材料结构和性能研究进展[J].工程塑料应用,2022,50(2):160-163.
LI Wei, YANG Yanzhi, WANG Yong. Research progress on structure and properties of PEEK/CF composite in cryogenic temperature[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):160-163.
- [3] 周天睿,方立,万明,等.连续CF增强PEEK复合材料层压板的制备工艺[J].工程塑料应用,2016,44(7):52-56.
ZHOU Tianrui, FANG Li, WAN Ming, et al. Preparation process of continuous CF reinforced PEEK composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(7):52-56.
- [4] 李军,刘燕峰,倪洪江,等.航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J].材料工程,2022,50(6):49-60.
LI Jun, LIU Yanfeng, NI Hongjiang, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(6):49-60.
- [5] WEN Z, LI M. Numerical study of low-velocity impact response of a fiber composite honeycomb sandwich structure[J]. Materials, 2023, 16(15). DOI:10.3390/ma16155482.
- [6] MORITA H, HAMAMOTO A, ADACHI T, et al. Influence of impact velocity and lay-up parameter on impact damage resistance of CF/PEEK laminates[C]//36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 1995. DOI:10.2514/6.1995-1284.
- [7] COSKUN T, YAR A, DEMIR O, et al. Residual compressive strength of polyamide fiber-reinforced epoxy composites after low-velocity impact[J]. Polymer Composites, 2023, 44(5):2 671-2 684.
- [8] BELINGARDI G, VADORI R. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(2):213-229.
- [9] BELINGARDI G, VADORI R. Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate[J]. Composite structures, 2003, 61(1-2):27-38.
- [10] GUIDA M, SELLITTO A, MARULO F, et al. Analysis of the impact dynamics of shape memory alloy hybrid composites for advanced applications[J]. Materials, 2019, 12(1). DOI: 10.3390/ma12010153.
- [11] FRONTÁN J, ZHANG Y, DAO M, et al. Ballistic performance of nanocrystalline and nanotwinned ultrafine crystal steel[J]. Acta Materialia, 2012, 60(3):1 353-1 367.
- [12] SHCHEGEL G O, BÖHM R, HORNIG A, et al. Probabilistic damage modelling of textile-reinforced thermoplastic composites under high velocity impact based on combined acoustic emission and electromagnetic emission measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 69:1-10.
- [13] HASHIN Z. Fatigue failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of applied mechanics, 1980, 47(4): 329-334.
- [14] TAN S C. A progressive failure model for composite laminates containing openings[J]. Journal of composite materials, 1991, 25(5):556-577.
- [15] GARCIA-GONZALEZ D, RUSINEK A, JANKOWIAK T, et al. Mechanical impact behavior of polyether-ether-ketone (PEEK)[J]. Composite Structures, 2015, 124:88-99.
- [16] 贾飞,刘彦池,苑大威,等.基于LS-DYNA的巡飞弹安全性分析研究[J].现代信息科技,2021,5(23):43-47.
JIA Fei, LIU Yanchi, YUAN Dawei, et al. Research on safety analysis of cruiser based on LS-DYNA[J]. Modern Information Technology, 2021, 5(23):43-47.
- [17] 张佳琦.碳纤维-铝合金板抗弹击数值分析[J].中国科技信息, 2023(17):108-113.
ZHANG Jiaqi. Numerical analysis of bullet impact resistance of carbon fiber-aluminum alloy plates[J]. China Science and Technology Information, 2023(17):108-113.
- [18] MEGERI S, NAIK G N. Numerical studies of the low velocity impact behaviour on hybrid fiber metal laminates[J]. Materials Today:Proceedings, 2021, 44:1 860-1 864.
- [19] PENG W, BIN Z O U, SHOULING D, et al. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(9):236-246.