

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202601005

基于耗散伪应变能的NEPE固体推进剂 疲劳损伤演化模型

吴凡几^{1,2}, 张文沁^{1,2}, 张大鹏^{1,2*}, 雷勇军^{1,2,3}

(1. 国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073;

2. 天地往返高效运输技术全国重点实验室, 长沙 410073;

3. 火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 针对长时间公路运输后高能硝酸酯增塑聚醚 (nitrate ester plasticized polyether, NEPE) 固体推进剂的疲劳损伤表征问题, 开展了应力控制模式下的循环拉伸试验, 采用耗散伪应变能作为NEPE固体推进剂疲劳损伤过程的损伤因子, 将疲劳损伤演化过程视作是蠕变损伤、拉压疲劳损伤及断裂损伤进程的叠加, 构建了NEPE固体推进剂疲劳损伤演化模型并开展参数分析。结果表明: NEPE固体推进剂在应力控制的循环载荷作用下会表现出明显的应变落后于应力的滞后特征, 并伴随着能量耗散现象, 所定义的损伤因子可以有效量化其损伤演化过程; 疲劳损伤演化模型可以精确表征NEPE固体推进剂在循环加载时的损伤衰减增长、稳态增长和加速增长3个阶段; 加载最大应力对疲劳损伤演化起决定性作用, 加载最大应力降低时, 损伤演化的主导因素会逐渐由蠕变损伤向拉压疲劳损伤转变。

关键词: 固体推进剂; 疲劳损伤; 损伤因子; 耗散伪应变能

中图分类号: V512

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)01-0046-10



听语音
与作者互动
聊科研

固体火箭发动机药柱在运输过程中会受到持续的循环载荷作用, 虽然载荷本身幅值较小, 但长时间的作用同样会对固体推进剂造成损伤。研究表明, 这种由循环载荷所造成的累积损伤会使固体推进剂内部出现微裂纹和空穴, 对其宏观力学性能产生不可忽视的影响^[1-2], 甚至导致药柱出现开裂现象, 严重影响其点火性能, 对固体火箭发动机结构完整性构成重大威胁^[3-5]。因此, 研究NEPE固体推进剂在循环载荷作用下的损伤演化表征方法, 进而实现对NEPE固体推进剂疲劳损伤程度的有效评估, 具有重要的现实意义。

为预示固体推进剂的疲劳损伤演化过程, 国内外学者基于现象学方法、断裂力学方法及损伤

力学方法提出了多种理论模型。崔家源和孙新智等^[6-7]基于现象学方法, 结合S-N曲线和雨流计数法, 使用Miner模型有效评估了受到循环载荷后固体发动机药柱重点部位的损伤累积情况。López等^[8]利用断裂力学方法, 通过建立裂纹发展速率与最大能量释放率之间的联系, 比较了2种不同固体推进剂的疲劳裂纹扩展行为。高艳宾和梁蔚等^[9-11]通过损伤力学的方法, 分别利用疲劳峰值应变、刚度等指标定义损伤因子, 建立疲劳损伤演化模型, 实现了对固体推进剂疲劳损伤演化过程的定量表征。然而, 固体推进剂在受到循环载荷时的力学行为受到黏弹性和损伤的耦合影响, 使用上述模型难以准确描述其疲劳损伤演化过程,

收稿日期: 2025-09-15

修回日期: 2025-10-08

录用日期: 2025-10-21

基金项目: 固体推进全国重点实验室研究基金项目 (2024020404)

第一作者: 吴凡几 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事固体发动机结构完整性分析研究。E-mail: 19973797956@163.com

***通信作者:** 张大鹏 (1989—), 男, 副教授, 主要从事固体发动机结构完整性分析研究。E-mail: zhangdapeng@nudt.edu.cn

引用格式: 吴凡几, 张文沁, 张大鹏, 等. 基于耗散伪应变能的NEPE固体推进剂疲劳损伤演化模型[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (1): 46-55. WU Fanji, ZHANG Wenqin, ZHANG Dapeng, et al. Fatigue damage evolution model for NEPE solid propellant based on dissipated pseudo-strain energy[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (1): 46-55.

而能量耗散与微细观结构演化密切相关^[12-14], 因此从能量角度定义损伤已成为当前研究的热点。但该方法必须首先明确固体推进剂在循环加载过程中的能量耗散特性, 量化分离出与损伤相关的能量耗散变量, 进而提出能够有效反映固体推进剂疲劳损伤演化过程与机制的理论模型。例如, 邓斌等^[15]在研究长期载荷作用下的损伤累积效应时发现, 通过能量耗散定义的损伤因子可以包含更多应力应变信息, 且物理意义明确; Xia等^[16]发现黏弹性材料在受到循环载荷作用时的能量耗散可以分为黏弹性耗散和损伤耗散2个部分。

基于此, 本文针对高能硝酸酯增塑聚醚(nitrate ester plasticized polyether, NEPE)固体推进剂在长时间公路运输过程中的疲劳损伤评估难题, 开展了试样循环拉伸试验和断面电镜扫描试验, 在损伤力学方法的基础上结合耗散伪应变能理论, 分析了不同最大应力加载情况下的NEPE固体推进剂疲劳损伤演化规律, 通过建立疲劳损伤演化模型, 实现对其疲劳损伤的有效表征, 为固体推进剂疲劳损伤分析提供精准量化的理论框架, 并为长期公路运输后固体推进剂的疲劳损伤评估与可靠性评估提供理论参考。

1 疲劳试验设计

1.1 试验方法

根据GJB 770B—2005《火药试验方法》^[17], 本文采用如图1(a)所示的标准哑铃形试样开展循环拉伸试验, 加载系统如图1(b)所示。在循环拉伸过程中保持上夹具固定, 下夹具往复运动, 通过弹簧和压板来保证所施加的恒幅循环应力载荷能够准确传递到试样上^[18], 并利用高低温环境箱来保持试验过程中的环境温度恒定。以加载最大应力 $\sigma_{\max} = 0.3 \text{ MPa}$ 为例, 本文按照图2中的应力-时间曲线对NEPE固体推进剂试样进行加载, 由于NEPE固体推进剂材料较软, 为了避免在加载过程中发生屈曲, 令循环过程中的应力比为零。

1.2 试验方案

根据GJB 150.16A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第16部分: 振动试验》^[19], 组合轮式车在公路运输过程中垂向振动的功率谱密度在频率为5~10 Hz范围内较大, 因此本文统一将试验加载频率设置为5 Hz, 同时参考文献^[20], 将环境温度设置为20 °C。根据前期的预试验结果并对比其他学者的试验方案, 选取合适的疲劳试验时长,

将加载最大应力 σ_{\max} 设置为0.3~0.5 MPa。此时, NEPE固体推进剂试样能够在合适的时间内断裂失效, 在保证试验结果区分度的同时能够缩短试验周期。

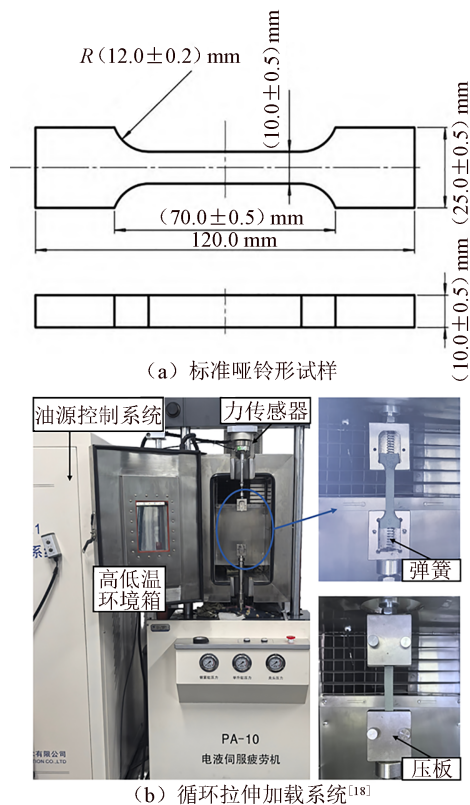


图1 试验系统

Fig. 1 Testing system

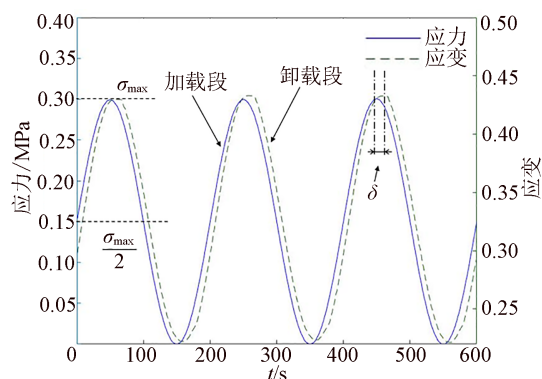


图2 加载过程的应力与应变曲线

Fig. 2 Stress- and strain-time curves in loading

NEPE固体推进剂主要由铝粉、高氯酸铵颗粒、奥克托今粉末以及黏合剂基体等组成, 是一种典型的颗粒增强复合材料, 在受到循环载荷时的损伤机理十分复杂, 涉及到颗粒/基体界面的发展和基体分子链网络的演变。为揭示循环加载过程中NEPE固体推进剂的疲劳损伤演化机理, 在试样失效破坏后采用扫描电子显微镜对断面进行成像分析。

2 疲劳损伤特性

本节主要基于耗散伪应变能理论分析循环加载试验中 NEPE 固体推进剂的疲劳损伤演化规律,并在此基础上结合试样断面形貌来揭示其疲劳损伤机制。

2.1 疲劳行为

对比图 2 中应力-时间曲线和应变-时间曲线可以发现, NEPE 固体推进剂在受到循环载荷时的应变响应与应力输入之间存在相位差 δ (滞后角或损耗角), 这种滞后行为使其在循环加载过程中的应力-应变关系呈现尖叶状滞回环曲线。图 3 展示了在应力控制模式下, 固体推进剂的滞回环曲线随加载周期数 N_i 的演化过程。从图中可以看出, 随着循环周期数的增加, 滞回环曲线不断向右移动, 且斜率逐渐变小, 表明 NEPE 固体推进剂在循环加载过程中存在明显的残余应变积累和动态模量下降等疲劳行为。

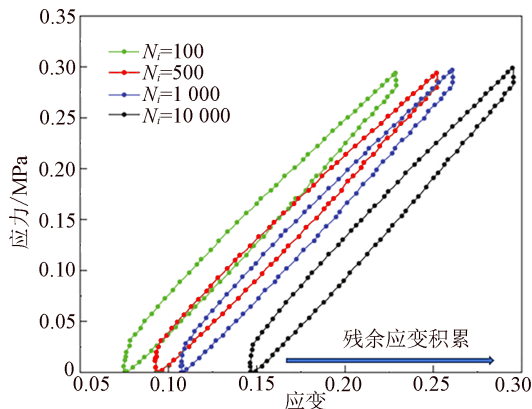


图 3 滞回环曲线随加载周期数的变化
Fig. 3 Variations of hysteresis loop curves with loading cycles

此外, 滞回环曲线还反映出 NEPE 固体推进剂在循环加载过程中的能量耗散行为。对于单位体积的 NEPE 固体推进剂, 一次循环加载时的总机械能输入可以通过对该次循环中的应力与应变进行积分来计算, 可表示为弹性应变能和耗散能之和。单次循环周期内, 加载时积累的弹性应变能可以在卸载过程中得到完全释放, 所以单次加载时 NEPE 固体推进剂的耗散能即为该次循环滞回环曲线所围成的面积。

2.2 损伤因子

能量耗散本质上是分子链间的相对运动和材料内部产生微裂纹、位错等微观结构演化的伴随现象^[21], 可以表征损伤的演化过程。在循环加

载过程中, 耗散能无法在外力卸载时通过形变瞬时释放, 而是以多种形式在材料内部进行复杂的耗散与转化, 表现为热能耗散、声发射、储能和损伤累积等形式, 其中作为热能耗散的部分占大多数, 是疲劳损伤过程的伴随现象, 而非导致损伤的直接原因^[15, 22]。

基于损伤力学方法, 通过耗散伪应变能 (dissipated pseudo-strain energy, DPSE) 的演化过程定义损伤因子, 可以剥离热耗散能对黏弹性材料疲劳损伤的影响^[23-25], 有效反映 NEPE 固体推进剂在循环加载下的疲劳损伤演化特征, 其定义为

$$D(N_i) = \frac{D_{\text{PSE}, N_i}}{D_{\text{PSE}, N_i}} \quad (1)$$

式中: N_i 为循环周期数; N_f 为失效时的周期数; $D(N_i)$ 表示经历 N_i 次循环后 NEPE 固体推进剂所累积的损伤值; D_{PSE, N_i} 为单位体积固体推进剂在第 N_i 次循环周期的耗散伪应变能; D_{PSE, N_f} 为其断裂失效时的耗散伪应变能。

在第 N_i 次循环周期的时间 T 内, 单位体积固体推进剂的耗散伪应变能的计算方式为

$$D_{\text{PSE}, N_i} = \int_{(N_i-1)T}^{N_i T} \sigma(t) d\varepsilon^R(t) \quad (2)$$

式中: $\sigma(t)$ 为应力; $\varepsilon^R(t)$ 为伪应变, 由弹性-黏弹性对应原理给出, 数学表达式为

$$\varepsilon^R(t) = \frac{1}{E_R} \int_0^t E_0(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (3)$$

式中: E_R 为参考模量; E_0 表示试样未受损时的松弛模量; $\varepsilon(\tau)$ 为应变。

2.3 损伤演化规律

依据式 (1) 可得 NEPE 固体推进剂在受到应力控制的循环载荷作用下的损伤演化规律, 如图 4 所示。从图中可以看到, 损伤随加载周期数单调递增, 呈现出明显的三阶段演化规律, 分别为衰减增长阶段、稳态增长阶段和加速增长阶段。

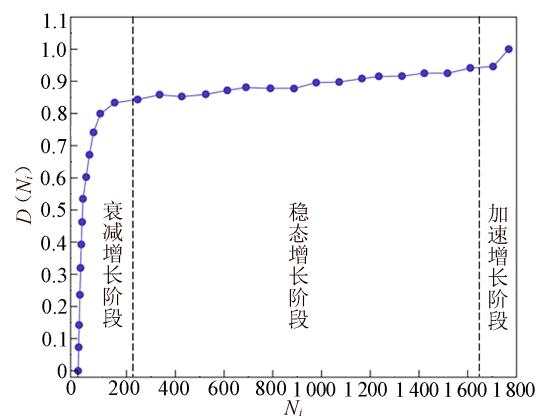


图 4 损伤演化规律 ($\sigma_{\text{max}}=0.45 \text{ MPa}$)
Fig. 4 Damage evolution law ($\sigma_{\text{max}}=0.45 \text{ MPa}$)

由图4可知, 衰减增长阶段占疲劳损伤全过程的很小一部分, 一般在200个周期左右, 该阶段主要是由NEPE固体推进剂的蠕变效应而引起的损伤迅速积累增加所致。循环加载初期, NEPE固体推进剂基体的蠕变效应明显, 应变迅速增大。由于NEPE固体推进剂中的固体颗粒与基体之间的界面强度小于与黏合剂基体之间的强度^[26], 此时损伤主要表现为由应变增大而引起的颗粒和基体界面间的分离, 即“脱湿”现象, 进而导致固体推进剂内部微裂纹、微孔洞不断产生。加载一段时间后应变的变化趋于平缓, 蠕变效应逐渐接近“饱和”, 损伤增长速率衰减, 过渡到稳态增长阶段。

稳态增长阶段占整个推进剂疲劳寿命的70%以上, 该阶段下NEPE固体推进剂损伤程度平稳增加, 此时损伤机理较为复杂。在稳态增长阶段, 随着循环的继续, 新的微孔洞和微裂纹不断产生, “脱湿”处的氧化剂颗粒开始失去承载能力, 载荷逐渐转变为由黏合剂基体承担^[27]。同时, 微孔洞和微裂纹沿着尺寸较大的高氯酸铵颗粒边缘继续撕裂扩展并不断汇聚。

在循环加载后期, 损伤演化发展到加速增长阶段, 宏观裂纹出现, NEPE固体推进剂力学性能迅速劣化, 损伤程度急剧增加, 试样在较短的周期内断裂失效。但是, 在宏观裂纹出现后试样并未立刻断裂失效, 而是继续循环10~100个周期, 这是因为当宏观裂纹出现时, 裂纹尖端的塑性区会出现裂纹闭合效应, 减缓裂纹扩展速率, 在一定程度上延长了推进剂的疲劳寿命^[28]。

图5为不同最大加载应力 σ_{\max} 下NEPE固体推进剂的疲劳损伤演化规律。对比图中曲线可得, σ_{\max} 对推进剂的损伤演化规律具有显著影响, σ_{\max} 越大, 损伤演化速度越快, NEPE固体推进剂在较少循环次数内就能达到较高的损伤程度。随着 σ_{\max} 的减小, 材料会在损伤值更低时进入稳态增长阶段, 且损伤曲线更为平缓。NEPE固体推进剂的疲劳损伤演化过程主要表现为新的微裂纹、微孔洞的形成与旧的微裂纹、微孔洞的扩展和汇聚, σ_{\max} 对这一损伤过程具有一定的影响。

图6为NEPE固体推进剂的断面电镜扫描结果。从图中可以看出, 当 σ_{\max} 较大时, 断面大颗粒与小颗粒附近均存在不同程度的“脱湿”现象, 且大颗粒的“脱湿”更为明显, 随着循环的继续, “脱湿”处的裂纹扩展、汇聚, 直至出现宏观裂纹。而当 σ_{\max} 较小时, “脱湿”现象并不明显, 仅在大颗粒的周围存在微小的缝隙, 这是因为较小

的 σ_{\max} 难以达到小颗粒“脱湿”的条件^[10], 裂纹沿着大颗粒边缘不断扩展、联通, 直至出现宏观裂纹后继而破坏失效。

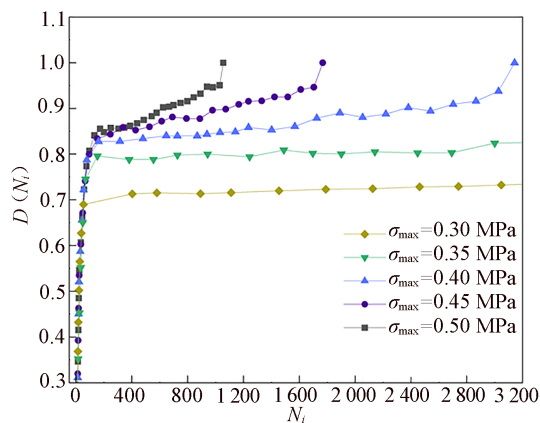


图5 不同 σ_{\max} 下的损伤演化规律

Fig. 5 Damage evolution laws at different σ_{\max}

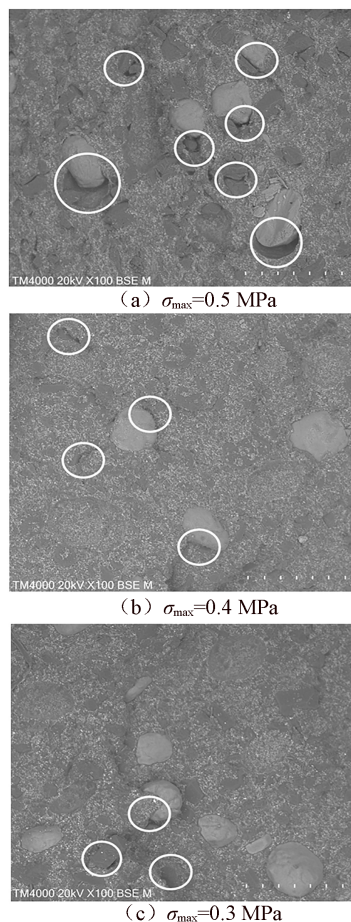


图6 不同 σ_{\max} 下的试样断面电镜扫描结果

Fig. 6 Electron microscope scanning images of the specimen fracture surface at different σ_{\max}

3 基于耗散伪应变能的疲劳损伤模型

本节基于应力控制模式下NEPE固体推进剂

的疲劳损伤演化规律, 将损伤演化分为蠕变损伤、拉压疲劳损伤和断裂损伤 3 个同步的损伤进程, 并根据不同阶段的损伤机理建立疲劳损伤演化模型。

3.1 损伤模型

将半正矢的应力输入根据 Boltzmann 叠加原理分解为恒定应力与交变应力的叠加, 此时 NEPE 固体推进剂的损伤演化可以分为蠕变和拉压疲劳 2 个同步的损伤进程^[10, 29]。宏观裂纹出现前, 上述 2 个损伤进程的叠加可以准确反映推进剂的损伤演化过程。

循环加载过程中的蠕变损伤 $D_c(N_i)$ 是 NEPE 固体推进剂内部微细观缺陷产生与扩展的诱因, 满足二参数的 Weibull 分布规律, 其损伤速率与加载周期的关系为

$$\frac{dD_c(N_i)}{dN_i} = \frac{m}{n} \left(\frac{N_i}{n} \right)^{m-1} e^{-(N_i/n)^m} \quad (4)$$

式中: n 为比例参数; m 为形状参数; $D_c(0) = 0$; $D_c(N_i) = D_1$ 。其中, D_1 为由蠕变所引起的损伤饱和值。对式 (4) 在边界条件上积分可以得到蠕变损伤演化模型, 即

$$D_c(N_i) = D_1 [1 - e^{-(N_i/n)^m}] \quad (5)$$

拉压疲劳损伤 $D_f(N_i)$ 是损伤实质发展的部分, 此时固体推进剂内部微细观缺陷不断发展。因此, 基于热力学的能量原理, 将拉压疲劳损伤速率随加载周期的变化表示为考虑加载最大应力的耗散势函数^[30], 即

$$\frac{dD_f(N_i)}{dN_i} = \left(\frac{S_i}{2ES_1} \right)^{S_1} \frac{2\sigma_{\max}}{r\beta^k [1 - D_f(N_i)]^{\gamma + \alpha + 1}} \quad (6)$$

式中: α 、 β 、 k 、 r 、 S_1 、 S_2 为材料常数; E 为松弛模量, 通过实验测得。对式 (6) 在边界 $D_f(0) = 0$ 、 $D_f(N_i) = D_2$ 上积分可以得到拉压疲劳损伤模型为

$$D_f(N_i) = D_2 [1 - (1 - N_i/N_i)^\gamma] \quad (7)$$

式中: γ 为与材料、载荷等相关的常数; D_2 为由拉压疲劳引起的损伤饱和值。

上述用于描述拉压疲劳损伤的耗散势函数反映了固体推进剂内部的微孔洞、微裂纹形成时整体能量的释放情况。当宏观裂纹出现时, 能量在裂纹尖端处集中释放, 此时采用原本的损伤模型已不再合适。将裂缝扩展速率作为损伤演化速率, 利用 Paris 公式对宏观裂纹出现后的损伤 $D_a(N_i)$ 进行描述, 表达式为

$$D_a(N_i) = D_3 (N_i/N_i)^\eta \quad (8)$$

式中: η 为与载荷相关的参数; D_3 为由断裂损伤引起的损伤饱和值。

NEPE 固体推进剂损伤演化过程可以表示为

上述 3 个部分的叠加, 即

$$D(N_i) = D_c(N_i) + D_f(N_i) + D_a(N_i) = D_1 [1 - e^{-(N_i/n)^m}] + D_2 [1 - (1 - N_i/N_i)^\gamma] + D_3 (N_i/N_i)^\eta \quad (9)$$

式中: $D_1 + D_2 + D_3 = 1$ 。根据损伤的定义给出如下的边界条件, 即 $0 \leq D(N_i) \leq 1$ 。其中, $D = 0$ 表示固体推进剂在加载前处于无损状态; $D = 1$ 表示材料已破坏失效。

3.2 参数标定与模型验证

不同 σ_{\max} 下试样疲劳损伤演化模型的拟合结果如图 7 所示, 模型参数如表 1 所示。由图 7 可得, 模型对不同最大应力加载条件下 NEPE 固体推进剂疲劳损伤演化的 3 个阶段拟合效果良好。同时, 从表 1 中可以看出, 不同 σ_{\max} 下损伤模型的决定系数 R^2 均在 0.99 以上, 表明该模型具有较高的准确性, 其误差主要来源于细观尺度上颗粒的随机分布和裂纹扩展时的不确定性。本文模型充分考虑了 NEPE 固体推进剂微细观特性与损伤机制, 各个参数物理意义明确, 贴合实际损伤过程, 能合理反映不同加载最大应力下的试样疲劳损伤演化过程。

表 1 损伤模型各参数拟合情况

Table 1 Fitting results of different parameters of the damage model

σ_{\max}/MPa	D_1	n	m	D_2	γ	D_3	η	R^2
0.50	0.816	25.4	0.9	0.114	1.365	0.07	59.0	0.991
0.45	0.814	24.9	0.9	0.116	1.260	0.07	55.6	0.990
0.40	0.802	24.3	0.9	0.128	1.038	0.07	50.7	0.994
0.35	0.762	20.3	0.9	0.168	0.857	0.07	46.0	0.991
0.30	0.704	17.9	0.9	0.226	0.613	0.07	42.6	0.994

4 基于损伤模型的疲劳损伤演化分析

为揭示循环加载过程中 NEPE 固体推进剂各损伤阶段的主导机制, 设置 $\sigma_{\max} = 0.35 \text{ MPa}$, 分别计算得到不同损伤进程随循环周期数的演化规律, 结果如图 8 所示。在衰减增长阶段, $D_c(N_i)$ 为陡增的曲线, 而 $D_f(N_i)$ 增长较为缓慢, 且 $D_a(N_i)$ 几乎保持不变, 表明衰减增长阶段的损伤由蠕变损伤主导; 进入稳态增长阶段后, $D_f(N_i)$ 继续缓慢增长, 而 $D_c(N_i)$ 、 $D_a(N_i)$ 几乎不随循环周期数而变化, 表明稳态增长阶段的损伤由拉压疲劳损伤主导; 当损伤演化至加速增长阶段时, 损伤的

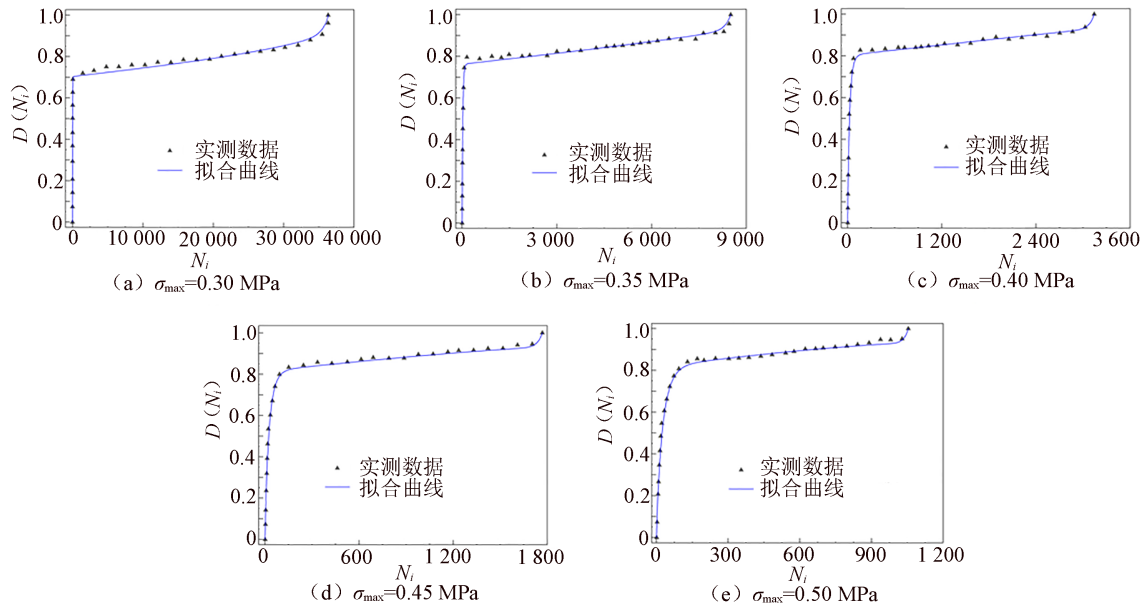


图7 不同 σ_{max} 下损伤模型拟合情况

Fig. 7 Fitting results of damage models at different σ_{max}

突变由 $D_a(N_i)$ 的变化所引起, 表明该阶段由断裂损伤主导。

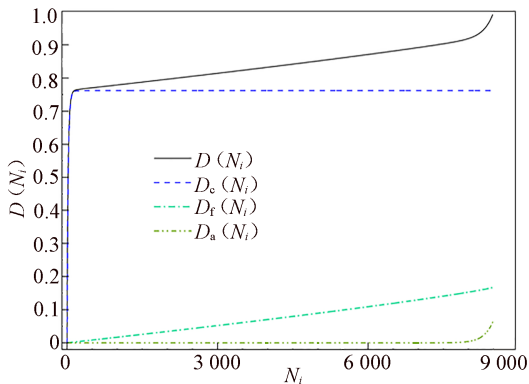


图8 不同损伤进程演化规律 ($\sigma_{max}=0.35$ MPa)

Fig. 8 Evolution laws of different damage processes

($\sigma_{max}=0.35$ MPa)

不同阶段的损伤饱和值 $D_i (i = 1, 2, 3)$ 分别代表了整个损伤过程中不同损伤进程对损伤全过程的贡献大小。蠕变损伤饱和值 D_1 是加载最大应力 σ_{max} 的函数, 其满足

$$D_1 = a_1 (\sigma_{max}/2)^{b_1} \quad (10)$$

式中: a_1 、 b_1 均为常数。

由表1可得, 随着 σ_{max} 的降低, D_1 在总损伤中的占比明显下降, D_2 的贡献比例则随 σ_{max} 的减小而增大, D_3 基本不受 σ_{max} 变化的影响。根据各损伤饱和值的关系和式 (10) 计算可知, 当 σ_{max} 小于 0.052 MPa 时, D_2 在总损伤中的占比超过了 50%, 说明在 σ_{max} 降低时, 循环加载下 NEPE 固体

推进剂的损伤主导因素逐渐由蠕变损伤向拉压疲劳损伤转变。

蠕变损伤 $D_c(N_i)$ 的演化过程由比例参数 n 和形状参数 m 共同决定。 m 为与材料、温度相关的常数, 反映了材料在微细观结构上的固有特性, 故不随 σ_{max} 的变化而变化。图9给出了 n 对蠕变损伤演化进程的影响规律, 当 n 取初始值 $n_0 = 20.3$ 的一半时, 蠕变损伤仅需 50 个周期便趋于恒定, 而取 3 倍 n_0 时则需要将近 400 个周期才能趋于稳定。由表1可得, 比例参数 n 随着 σ_{max} 的减小而减小。当 σ_{max} 越小时, 由蠕变所引起的“脱湿”等微细观损伤则会更快达到饱和, NEPE 固体推进剂的损伤进入稳态发展所需周期数也更少, 此时损伤曲线过渡更加突然。

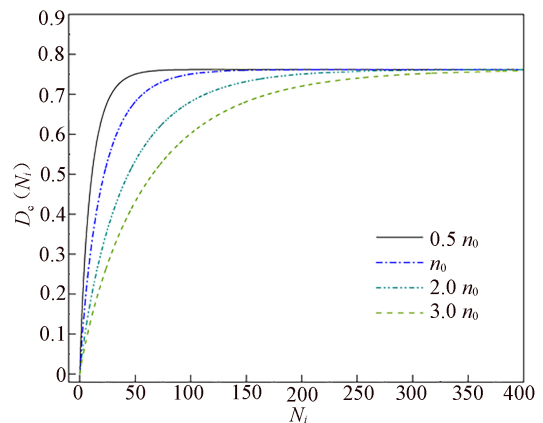


图9 n 对蠕变损伤演化的影响

Fig. 9 Influence of n on creep damage evolution

拉压疲劳损伤 $D_i(N_i)$ 的演化过程由常数 γ 决

定, γ 与材料和所施加给试样的载荷有关, 其作为内状态变量, 反映了材料内部结构状态的变化, 即不可逆的微细观损伤过程。图 10 展示了不同 γ 值下拉压疲劳损伤的演化规律, 其中 $\gamma_0 = 0.857$ 。由图 10 可得, 当 γ 降低时, $D_f(N_i)$ 在初始时的损伤速率更缓慢, 而后呈现逐渐加速发展的趋势。 γ 随着 σ_{\max} 的减小而减小, 意味着 σ_{\max} 较低时, 由“脱湿”所导致的微裂纹萌生和扩展相对较难, 而是在基体上形成更多不影响有效应力的微细观损伤, 导致损伤速率在初期增长缓慢。后续由于较多的微细观损伤不断汇聚、联通而引发裂纹快速扩展, 进而导致损伤发展速率上升。

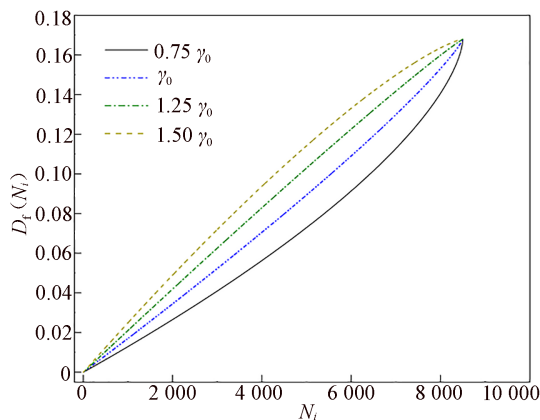


图 10 γ 对拉压疲劳损伤演化的影响

Fig. 10 Influence of γ on tensile-compressive fatigue damage evolution

断裂损伤的演化过程主要由 η 决定。 η 反映了宏观裂纹出现后 NEPE 固体推进剂内部的损伤演化状况。图 11 给出了 η 对断裂损伤的影响规律, 其中 $\eta_0 = 46.0$ 。由图 11 可得, η 越大, 损伤曲线在后期的斜率越大, 损伤累积速率的提升更显著。 σ_{\max} 越大时, η 越大, 说明宏观裂纹出现时材料内部裂纹扩展的驱动力更大, 裂纹更易发生扩展。

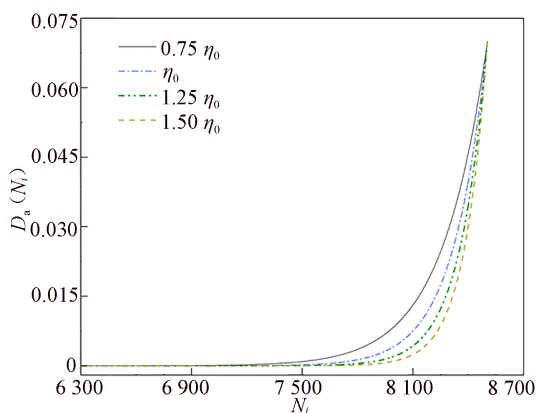


图 11 η 对断裂损伤演化的影响

Fig. 11 Influence of η on fracture damage evolution

5 结论

本文针对 NEPE 固体推进剂的疲劳损伤表征问题, 开展了循环拉伸试验和断面电镜扫描试验。基于耗散伪应变能理论获得了 NEPE 固体推进剂的疲劳损伤演化规律, 结合细观损伤机理, 从 3 种损伤机制出发, 建立了疲劳损伤演化模型并开展疲劳损伤演化分析, 得到如下结论。

1) NEPE 固体推进剂在循环载荷作用下呈现出应力-应变滞后现象, 并伴随着能量的耗散, 但疲劳行为受黏弹性影响较大且损伤过程复杂, 采用耗散伪应变能定义损伤因子的物理意义明确, 能够分离由黏弹性引起的能量耗散的影响, 有效表征疲劳损伤演化规律。

2) NEPE 固体推进剂在应力控制下的损伤演化可以分为衰减增长、稳态增长和加速增长 3 个阶段。其中, 衰减增长阶段主要由蠕变损伤主导, 稳态增长阶段以拉压疲劳损伤为主, 加速增长阶段的损伤突变则由断裂损伤主导。

3) 基于损伤演化机理, 将整体损伤演化过程视作由蠕变损伤、拉压疲劳损伤和断裂损伤的叠加, 可以很好地对循环加载过程中 NEPE 固体推进剂的损伤演化过程进行描述。

4) 加载最大应力对疲劳损伤演化过程具有显著影响。加载最大应力越小, 蠕变损伤对整个损伤演化过程的贡献也就越小, 拉压疲劳损伤的贡献越大, 并且损伤在初期和末期演化速度加快, 在中期则更为平缓。

本文研究内容聚焦于 NEPE 固体推进剂在不同应力幅值的循环加载情况下损伤演化机理及其表征方法, 若考虑实际状况, 则需要在今后的研究中进一步结合损伤累积准则, 对长期运输后固体发动机药柱进行损伤评估, 并通过有限元等方法开展结构完整性分析。

参考文献

- [1] 张文沁, 张大鹏, 雷勇军, 等. NEPE 固体推进剂的低频疲劳特性[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(1): 31-41.
ZHANG W Q, ZHANG D P, LEI Y J, et al. Low-frequency fatigue characteristics of NEPE solid propellant[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 31-41.
- [2] 侯晓, 张旭, 刘向阳, 等. 固体火箭发动机药柱结构完整性研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 566-579.

- HOU X, ZHANG X, LIU X Y, et al. Research progress on structural integrity of solid rocket motor grain[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(4): 566-579.
- [3] 王哲君, 强洪夫, 王稼祥, 等. 复合固体推进剂损伤行为的多尺度研究进展[J]. *含能材料*, 2024, 32(4): 435-464.
- WANG Z J, QIANG H F, WANG J X, et al. Multiscale research progress on damage behaviors of composite solid propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2024, 32(4): 435-464.
- [4] 瞿煌, 孙振生, 胡宇, 等. “锥-柱-槽”药型固体火箭发动机点火过程仿真[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(6): 91-98.
- QU H, SUN Z S, HU Y, et al. Simulation of solid rocket motor ignition process with conical column-groove propellant[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(6): 91-98.
- [5] 强洪夫, 王稼祥, 王哲君, 等. 复合固体推进剂强度、损伤与断裂失效研究进展[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(7): 561-588.
- QIANG H F, WANG J X, WANG Z J, et al. Research progress on strength, damage and fracture failure of composite solid propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(7): 561-588.
- [6] 崔家源, 强洪夫, 王学仁, 等. 公路运输过程中固体火箭发动机药柱的累积损伤评估方法[J]. *固体火箭技术*, 2024, 47(2): 222-230.
- CUI J Y, QIANG H F, WANG X R, et al. Cumulative damage assessment method for solid rocket motor grain during highway transportation[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2024, 47(2): 222-230.
- [7] 孙新智, 何景轩, 沙宝林, 等. 海态环境下舰载固体火箭发动机药柱损伤机理研究[J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(4): 551-556.
- SUN X Z, HE J X, SHA B L, et al. Damage mechanism of shipborne SRM grain in sea environment[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(4): 551-556.
- [8] LÓPEZ R, SALAZAR A, RODRÍGUEZ J. Fatigue crack propagation behaviour of carboxyl-terminated polybutadiene solid rocket propellants[J]. *International Journal of Fracture*, 2020, 223(1): 3-15.
- [9] 高艳宾, 陈雄, 胡少青, 等. 疲劳损伤对NEPE推进剂力学性能的影响[J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(2): 90-93.
- GAO Y B, CHEN X, HU S Q, et al. The effect of fatigue damage on mechanical property of NEPE propellant[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(2): 90-93.
- [10] 梁蔚, 许进升, 陈雄. 应力水平对HTPB推进剂疲劳特性的影响[J]. *功能材料*, 2018, 49(2): 2157-2162.
- LIANG W, XU J S, CHEN X. Effect of stress loading on fatigue properties of HTPB propellant[J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(2): 2157-2162.
- [11] 高艳宾, 许进升, 陈雄, 等. 应变控制下NEPE推进剂非线性疲劳损伤[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(6): 1486-1491.
- GAO Y B, XU J S, CHEN X, et al. Nonlinear fatigue damage of nitrate ester plasticized polyether propellant for strain-control[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(6): 1486-1491.
- [12] 王玉峰, 董可海, 曲凯, 等. 复合固体推进剂振动疲劳损伤耗散特性研究[J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(11): 23-25.
- WANG Y F, DONG K H, QU K, et al. Research on dissipation characteristic of vibration fatigue damage for composite solid propellant[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(11): 23-25.
- [13] TONG X, XU J S, DOGHRI I, et al. A nonlinear viscoelastic constitutive model for cyclically loaded solid composite propellant[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 198: 126-135.
- [14] MAHMOUDI A, KHONSARI M M. Rapid evaluation of fatigue limit using energy dissipation[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2023, 46(6): 2156-2167.
- [15] 邓斌, 董可海, 谢燕. 基于能量耗散的药柱粘弹性累积损伤[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(1): 24-27.
- DENG B, DONG K H, XIE Y. Viscoelastic cumulative damage of solid propellant grain based on energy dissipation[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(1): 24-27.
- [16] XIA Y, JIANG H, YAO C B, et al. Revealing the shear fatigue damage mechanism of soft adhesive: coexistence of viscoelastic and damage dissipation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2024, 185: 105556.
- [17] 国防科学技术工业委员会. 火药试验方法: GJB 770B—2005[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1997.
- [18] ZHANG W Q, ZHANG D P, LEI Y J, et al.

- Research on the low-frequency fatigue behavior of NEPE solid composite propellant based on fractional derivative constitutive model[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 300: 112931.
- [19] 中国人民解放军装备部. 军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分: 振动试验: GJB 150.16A—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [20] 许进升, 杨晓红, 陈雄, 等. HTPB 推进剂疲劳特性试验研究[J]. *火炸药学报*, 2021, 44(3): 372-378. XU J S, YANG X H, CHEN X, et al. Experimental investigation on fatigue properties of HTPB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(3): 372-378.
- [21] 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 关于疲劳能量理论若干问题的讨论[J]. *机械强度*, 2004(S1): 278-281. YAO L J, TONG X Y, LYU S L. Discussion on several questions about the fatigue energy theory [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004(S1): 278-281.
- [22] 孙雅珍, 房辰泽, 王金昌, 等. 基于耗散能相对变化率平稳值的橡胶沥青混合料疲劳寿命预测方法[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(1): 108-112. SUN Y Z, FANG C Z, WANG J C, et al. Method of fatigue life prediction for rubber asphalt mixture based on plateau value of dissipated energy ratio[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(1): 108-112.
- [23] 李辉, 罗雪, 张裕卿. 基于耗散伪应变能的沥青疲劳动力学表征[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 115-124. LI H, LUO X, ZHANG Y Q. Pseudo energy-based kinetic characterization of fatigue in asphalt binders[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 115-124.
- [24] 房辰泽, 郭乃胜, 李辉, 等. 基于动力学理论的沥青疲劳损伤过程表征研究[J]. *中国公路学报*, 2025, 38(3): 241-249. FANG C Z, GUO N S, LI H, et al. Characterization of fatigue damage process for asphalt based on kinetics theory[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2025, 38(3): 241-249.
- [25] 房辰泽, 冷真, 郭乃胜, 等. 考虑加载次序影响的沥青非线性疲劳损伤累积研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(5): 68-76.
- FANG C Z, LENG Z, GUO N S, et al. Investigating nonlinear fatigue damage accumulation of asphalt binders considering loading sequence effect [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(5): 68-76.
- [26] 杨秋秋, 徐胜良, 蔡如琳, 等. 基于数字图像处理的复合固体推进剂细观损伤行为研究[J]. *固体火箭技术*, 2022, 45(1): 83-91. YANG Q Q, XU S L, CAI R L, et al. Mesoscopic damage behavior of composite solid propellants based on digital image processing technology [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2022, 45(1): 83-91.
- [27] 李世奇, 强洪夫, 陈铁铸, 等. 单轴拉伸下 NEPE 固体推进剂细观结构演化行为研究[J]. *含能材料*, 2024, 32(2): 175-182. LI S Q, QIANG H F, CHEN T Z, et al. Mesostucture evolution behavior of NEPE solid propellant under uniaxial tension[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2024, 32(2): 175-182.
- [28] 陆云超, 杨凤鹏, 陈特. 基于裂纹闭合效应的高载迟滞预测模型修正[J]. *力学季刊*, 2019, 40(1): 64-71. LU Y C, YANG F P, CHEN T. A modification of overload retardation model based on crack closure effect[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2019, 40(1): 64-71.
- [29] 吴健栋, 蔡志鹏, 汤之南, 等. 低周疲劳过程损伤变量的复合分析法和三阶段损伤演化模型[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10): 86-95. WU J D, CAI Z P, TANG Z N, et al. Combination analyzing method to characterize damage variable and three stage model of fatigue damage in low-cycle fatigue[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 86-95.
- [30] 杨晓华, 姚卫星, 段成美. 确定性疲劳累积损伤理论进展[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(4): 81-87. YANG X H, YAO W X, DUAN C M. The review of ascertainable fatigue cumulative damage rule [J]. *Strategic Study of CAE*, 2003, 5(4): 81-87.

Fatigue Damage Evolution Model for NEPE Solid Propellant Based on Dissipated Pseudo-Strain Energy

WU Fanji^{1,2}, ZHANG Wenqin^{1,2}, ZHANG Dapeng^{1,2*}, LEI Yongjun^{1,2,3}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of High-Efficiency Reusable Aerospace Transportation Technology, Changsha 410073, China;

3. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: Cyclic tensile tests were conducted under stress-controlled conditions to address the issue of fatigue damage characterization in high-energy nitrate ester plasticized polyether (NEPE) solid propellants after long-term highway transportation. The dissipated pseudo-strain energy was adopted as the damage factor for the fatigue damage process of NEPE solid propellants. The fatigue damage evolution process was regarded as a superposition of the damages from creep, tensile-compressive fatigue, and fracture. A fatigue damage evolution model for NEPE solid propellants was constructed, and parameter analyses were conducted. The results indicate that NEPE solid propellants exhibit a significant stress-strain hysteresis characteristic, with strain lagging behind stress under stress-controlled cyclic loading, accompanied by energy dissipation phenomena. The defined damage factor can effectively quantify the damage evolution process. The fatigue damage evolution model can precisely characterize the three growth stages of NEPE solid propellants under cyclic loading, namely decay, steady-state, and accelerated growth. The maximum loading stress plays a decisive role in fatigue damage evolution. When the maximum loading stress decreases, the dominant factor in damage evolution gradually shifts from creep damage to tensile-compressive fatigue damage.

KEYWORDS: solid propellant; fatigue damage; damage factor; dissipated pseudo-strain energy

(编辑: 刘建民)