

确定性疲劳累积损伤理论进展

杨晓华^{1,2}, 姚卫星¹, 段成美²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016; 2. 海军航空工程学院青岛分院, 山东青岛 266041)

[摘要] 著名的 Miner-Palmgren 线性累积损伤理论的提出已有 70 余年, 但由于疲劳问题的复杂性, 迄今为止还没有一个模型的工程应用价值能与该理论媲美。疲劳累积损伤理论仍在发展与完善中。文章根据疲劳损伤与疲劳累积损伤理论的特点, 将确定性疲劳累积损伤理论分成两大类, 即线性累积损伤理论和非线性累积损伤理论, 并将主要的非线性累积损伤理论分成五类: a. 基于损伤曲线法的非线性累积损伤理论; b. 基于材料物理性能退化概念的非线性累积损伤理论; c. 基于连续损伤力学概念的非线性累积损伤理论; d. 考虑载荷间相互作用效应的非线性累积损伤理论; e. 基于能量法的非线性累积损伤理论。文章分析了每一类模型中有代表性模型的物理背景, 回答了模型在疲劳累积损伤理论中存在的主要问题, 简要评述了模型的优缺点, 讨论了确定性疲劳累积损伤理论的几个关键问题。

[关键词] 疲劳; 线性与非线性; 累积损伤; 损伤力学; 能量

[中图分类号] V215.52 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)04-0081-07

1 引言

大多数工程结构或机械的失效是由一系列变幅循环载荷产生的疲劳累积损伤造成的。疲劳累积损伤理论是研究在变幅疲劳载荷作用下疲劳损伤的累积规律和疲劳破坏准则, 它对疲劳寿命的预测十分重要。

2 疲劳损伤

疲劳损伤的定义: 受损物体在交变载荷作用下价值或用途减小。其物理解释通常是将损伤概念与失去完整性相联系, 如形成微观裂纹、物理性能下降等。疲劳损伤在物理上的形式是多种多样的, 这是造成疲劳强度和疲劳寿命分析困难的根本所在。目前定义损伤变量有两种途径: a. 微观的或物理的; b. 宏观的或维象的。不论采用何种损伤定义, 疲劳损伤都有以下特点:

1) 不可逆性。疲劳损伤无论在空间上还是在

时间上都是一个连续变化的内变量, 是材料真实缺陷对材料力学行为影响的笼统表观量。因此, 真实损伤与损伤状态变量之间有一定的函数关系。按照连续介质损伤力学的观点, 疲劳累积损伤是在交变载荷作用下, 材料内部结构不可逆变化过程的宏观连续变量; 从能量观点看又是一种能量耗散的不可逆过程^[1]。损伤力学从宏观角度用材料的微观裂纹和微孔洞数量, 或材料弹性模量、屈服极限、质量、密度等的变化, 来表征材料内部损伤变量^[2], 该变量与时间过程具有单调性。因此, 无论宏观上还是微观上, 疲劳损伤都是一个不可逆过程。

2) 随机性。疲劳损伤的随机性主要来自两方面^[3]: a. 材料内在因素的随机性。微观观测表明, 材料的实际损伤是各向异性的, 分布是随机的, 演化过程也是随机的、不连续的; 而宏观疲劳损伤正是微观结构与组织的分布不确定性引起大量微损伤的集体贡献。材料的内在因素同样引起材料宏观性能如弹性模量、屈服极限、抗拉强度、断裂韧性等

物理性能的随机分布。**b.** 外部因素的随机性。外载荷、加工工艺、伺服环境等外部条件在疲劳损伤过程中伴有随机性, 这种随机性也可引起疲劳损伤的巨大分散性。在实验室可以通过控制实验条件把这种分散性降低到最小。然而, 即使严格控制试验载荷谱、试验条件及试验件, 疲劳寿命和疲劳特性数据仍表现出相当大的分散性。

3 确定性疲劳累积损伤理论

任何一个疲劳累积损伤理论必定以疲劳损伤 D 的定义为基石, 以疲劳损伤的演化 dD/dN 为基础。一个合理的疲劳累积损伤理论, 其疲劳损伤 D 应该有比较明确的物理意义, 有与试验数据比较一致的疲劳损伤演化规律, 以及使用比较简单。

按照疲劳累积损伤规律, 目前的疲劳累积损伤理论, 从方法论上划分, 可归纳为宏观维象的疲劳累积损伤理论和基于某种损伤机制的、半分析的疲劳累积损伤理论; 从事物的不确定性上划分, 有确定性疲劳累积损伤理论和用于疲劳可靠性分析的疲劳累积损伤统计理论。笔者在这里只研究确定性疲劳累积损伤理论。

构造一个疲劳累积损伤理论, 不论它有效与否, 必须定量地回答三个问题: **a.** 一个载荷循环对材料或结构造成多大损伤; **b.** 多个载荷循环时损伤是如何累加的; **c.** 失效时临界损伤有多大。

对这三个问题的不同回答, 构成了不同的确定性疲劳累积损伤理论, 见表 1。

表 1 累积损伤理论

Table 1 Damage cumulative rule

一个载荷循环造成的损伤	损伤如何累加	失效时临界损伤大小
线性	等损伤累积	1
非线性	非等损伤累积	α

按照表 1, 应有 8 类疲劳累积损伤理论, 但实际上在目前的所有疲劳累积损伤理论中, 基本上都是等损伤累积。除了少数几个模型外, 绝大多数模型理论上的临界损伤为 1, 因此, 笔者将疲劳累积损伤理论分成两大类: 线性的等损伤累积理论和非线性的等损伤累积理论, 习惯上称为线性累积损伤理论和非线性累积损伤理论。

3.1 线性累积损伤理论

线性累积损伤理论系指在循环载荷作用下, 疲劳损伤与载荷循环数的关系是线性的, 而且疲劳损

伤可以线性累加, 各个应力之间相互独立和互不相关; 当累加的损伤达到某一数值时, 试件或构件就发生疲劳破坏。线形累积损伤理论中最典型的理论是 Miner - Palmgren 理论, 简称 Miner 理论^[4]。

1) Miner 理论的物理背景。**a.** 在任意等幅疲劳载荷下, 材料在每一应力循环中吸收等量的净功, 净功累积到临界值, 即发生疲劳破坏; **b.** 在不同等幅及变幅疲劳载荷下, 材料最终破坏的临界净功全部相等; **c.** 在变幅疲劳载荷下, 材料各级应力循环中吸收的净功相互独立, 与应力等级的顺序无关。

2) Miner 理论对三个问题的回答

a. 一个循环造成的损伤为

$$D = \frac{1}{N}, \quad (1)$$

式中 N 是对应于当前载荷水平的疲劳寿命。

b. 等幅载荷下 n 个循环造成的损伤为

$$D = \frac{n}{N}, \quad (2)$$

变幅载荷下 n 个循环造成的损伤为

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i}, \quad (3)$$

式中 N_i 是对应于当前载荷水平 S_i 的疲劳寿命。

c. 临界疲劳损伤 D_{CR} 。若是常幅循环载荷, 显然当循环载荷次数 n 等于其疲劳寿命 N 时, 发生疲劳破坏, 即 $n = N$, 由式 (3) 得到

$$D_{CR} = 1. \quad (4)$$

3) Miner 理论简评。Miner 理论可以认为是线性损伤、线性累积循环比理论, 其成功之处在于大量的实验结果 (特别是随机谱试验) 显示临界疲劳损伤 D_{CR} 的均值确实接近于 1, 在工程上因简便而得到广泛的应用, 其他确定性的方法则需要进行大量试验来拟合众多参数, 精度并不比 Miner 理论更好。Miner 理论的主要不足是: **a.** 损伤与载荷状态无关; **b.** 累积损伤与载荷次序无关; **c.** 不能考虑载荷间的相互作用。

为了克服 Miner 理论的不足, 许多学者提出了各种修正的线性累积损伤理论, 代表性的模型有 Grover^[5] 和 Manson^[6] 等提出的双阶段线性损伤理论。

3.2 非线性累积损伤理论

自 Miner 准则提出以来, 针对其不足, 提出了大量的累积损伤理论, 其中绝大多数为损伤非线性、等累积损伤理论。这些理论大致可分为 5 类:

- a. 基于损伤曲线法的非线性累积损伤理论；b. 基于材料物理性能退化概念的非线性累积损伤理论；c. 基于连续损伤力学概念的非线性累积损伤理论；d. 考虑载荷间相互作用效应的非线性累积损伤理论；e. 基于能量法的非线性累积损伤理论。

3.2.1 基于损伤曲线法的非线性累积损伤理论
这类模型最早由 Marco - Starkey 提出^[7]，后来 Manson - Halford 等发展了不同的损伤曲线法^[8]。这里仅介绍 Manson 的方法。

1) Manson 模型对三个问题的回答

a. 一个循环造成的损伤为

$$\begin{cases} D = \left(\frac{1}{N_i}\right)^{q_i}, \\ q_i = BN_i^\beta, \end{cases} \quad (5)$$

式中 N_i 是对应于当前载荷水平的疲劳寿命， B 和 β 为材料常数。

b. 多个循环造成的损伤为

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i}\right)^{q_i}. \quad (6)$$

c. 临界疲劳损伤 D_{CR} 。显然临界疲劳损伤 $D_{CR} = 1$ 。

Marco - Starkey 用该模型很好地解释了被广泛引用的两级载荷作用下的载荷次序效应，但没有给出 q_i 的具体表达式，Manson - Halford 基于有效微观裂纹增长的概念完善了该模型，并给出材料常数 $\beta = 0.4$ 。在两级载荷下 Manson 给出的经验公式为

$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right)^{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0.4}} + \frac{n_2}{N_2} = 1. \quad (7)$$

2) Manson 模型简评。此类模型可称之为损伤幂指规律、等损伤累积规律。Manson 理论对两级载荷试验的结果吻合较好，但并没有证明对多级或随机载荷有效，另外该模型无法考虑载荷间的相互作用效应。

3.2.2 基于材料物理性能退化概念的非线性累积损伤理论
早在 1938 年和 1955 年，Kommers 和 Henry 就将疲劳极限的变化作为损伤的度量^[9,10]，Cheng Guangxu 和叶笃毅等将疲劳损伤过程中材料韧性的耗散作为疲劳损伤的度量^[11,12]，而文献^[13]用剩余刚度定义损伤。Bui-Quoc 则认为在循环载荷作用下材料的疲劳强度将不断下降。基于这一认识，Bui-Quoc 发展了一系列的混合模型^[14]，这些模型可以考虑平均应力和平均应变作用以及高温疲劳、蠕变疲劳作用下的疲劳累积损伤。这里介

绍叶笃毅的韧性耗散模型。

1) 叶笃毅模型的物理背景。疲劳过程中弹性模量 E 和屈服强度 σ_b 的下降主要与循环载荷下试样内部不断萌生的裂纹及其扩展过程中引起的试样承载面积减损有关，塑性性能下降过程微观上对应了材料内可动位错的逐渐耗尽与位错运动壁垒的形成过程，韧性下降则是上述强度与塑性在疲劳损伤过程中劣化的综合表现。

叶笃毅韧性耗散模型中的损伤表达式为

$$D_n \approx \frac{-\ln\left(1 - \frac{n}{N_f}\right)}{\ln N_f}. \quad (8)$$

2) 叶笃毅模型对三个问题的回答

a. 一个循环造成的损伤为

$$D_1 \approx \frac{-\ln\left(1 - \frac{1}{N_f}\right)}{\ln N_f}. \quad (9)$$

b. 多个循环载荷作用造成的损伤。等幅谱下多个循环载荷作用造成的损伤即为等式 (8)，在多级疲劳载荷谱下，疲劳累积损伤公式以两级载荷谱为例，假定第一级应力 σ_1 作用 n_1 次，那末在第二级应力 σ_2 作用下的剩余循环比即为

$$\frac{n_2}{N_2} = \left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right)^{\frac{\ln N_2}{\ln N_1}}. \quad (10)$$

c. 临界疲劳损伤。临界疲劳损伤 $D_{CR} \approx 1$ 。

由式 (10) 容易得出，按高低顺序加载时，

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} < 1; \text{按低高顺序加载时, } \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} > 1.$$

3) 模型简评。叶笃毅韧性耗散模型虽然具有较好的物理基础，但在最后的损伤表达式中只含一个参量，即循环数 n ，不含其他力学参量，实际上是另一种形式的幂指数模型，其优点是形式简单，不需要其他试验常数，但同样它也不能考虑载荷间的相互作用。

3.2.3 基于连续损伤力学概念的非线性累积损伤理论
将连续损伤力学方法系统地应用到疲劳寿命预测的，首推 Chaboche^[15]，其后文献^[16]对该方法做了系统的总结和更深刻的研究。这里仅介绍文献^[16]的方法。

1) 模型的物理背景。疲劳损伤的发展是一个不可逆的能量耗散过程，耗散的能量可分解为外状态变量与内状态变量，内状态变量反映材料内部结构状态的变化，当其变化到一定程度时，材料便丧失了抗疲劳的能力，以致发生疲劳破坏。从这一概

念出发并假设：**a.** 加载过程中材料中的不可逆应变仅为微观塑性应变；**b.** 损伤变化率对有效应力的影响很小。于是得出疲劳损伤部分的非线性的损伤演变方程为

$$\dot{D} = \frac{Z\sigma_{\text{eq}}^{r-1}\dot{\sigma}_{\text{eq}}}{\beta^m(1-D)^{r+\alpha}}, \quad (11)$$

式中 $Z = \left(\frac{S_1}{2ES_0}\right)^{S_1} \frac{m}{K}$, $r = 2S_0 + m$, $\alpha, \beta, m, S_0, S_1$ 为材料常数, E 为弹性模量, S_1 为三轴应力因子, σ_{eq} 为有效应力, D 为损伤。于是单位循环时的疲劳损伤为

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{2Z(\sigma_{\text{max}}^r - \sigma_{\text{min}}^r)}{r\beta^m(1-D)^{r+\alpha}}, \quad (12)$$

当初始条件为 $N = 0$ 时, $D = 0$, 对上式进行积分得

$$D = 1 - \left[1 - \frac{2Z(\sigma_{\text{max}}^r - \sigma_{\text{min}}^r)(r + \alpha + 1)}{\beta^m \cdot r} N\right]^{\frac{1}{r+\alpha+1}}, \quad (13)$$

设 $N = N_f$ (即断裂失效) 时, $D = 1$, 材料的疲劳寿命为

$$N_f = \frac{\beta^m \cdot r}{2Z(\sigma_{\text{max}}^r - \sigma_{\text{min}}^r(r + \alpha + 1))}, \quad (14)$$

于是损伤表达式 (13) 可改写成

$$D = 1 - \left[1 - \frac{N}{N_f}\right]^{\frac{1}{r+\alpha+1}}. \quad (15)$$

2) 模型对三个问题的回答

a. 一个循环造成的损伤为

$$D = 1 - \left[1 - \frac{1}{N_f}\right]^{\frac{1}{r+\alpha+1}}. \quad (16)$$

b. 多个循环载荷作用造成的损伤。等幅谱下多个循环载荷作用造成的损伤即为等式 (15)。多级疲劳载荷谱下, 疲劳累积损伤公式以两级载荷谱为例, 假定第一级应力 σ_1 作用 n_1 次, 那末在第二级应力 σ_2 作用下的剩余循环比为

$$\frac{n_2}{N_2} = \left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right)^{\frac{r_2+\alpha_2}{r_1+\alpha_1}}. \quad (17)$$

c. 临界疲劳损伤。显然临界疲劳损伤 $D_{\text{CR}} = 1$ 。

3) 模型简评。新兴的损伤力学研究方法已应用到疲劳研究领域, 损伤力学方法以热力学原理为背景, 借助严密的数学、力学概念建立表征损伤演变规律的发展方程。此法突破了维象研究的范畴, 研究前景广阔。其不足是理论性很强, 材料常数难以确定, 现阶段尚难于在工程上推广。

3.2.4 考虑载荷间相互作用效应的非线性累积损伤理论 考虑载荷间相互作用效应的非线性累积损伤理论有三类。第一类包括 Corten - Dolan 模型^[17]和 Freudenthal - Heller 模型^[18]。这两种模型都是基于对 S - N 曲线的修改。Spitzer 和 Manson 在文献 [19, 20] 中对上述模型做了改进。第二类和第三类模型均由 Bui-Quoc 提出, 第二类模型可以称之为假想载荷法^[21], 第三类模型基于对循环比的修正^[22]。目前只有 Corten - Dolan 模型在工程上有应用, 故这里仅介绍 Corten - Dolan 模型。

1) Corten - Dolan 模型对三个问题的回答

a. 一个循环造成的损伤为

$$D = m^c r^d, \quad (18)$$

式中 m 为材料损伤核的数目, 应力越大, m 越大; r 为损伤发展速率, 它正比于应力水平 S , 即 $r \propto S$; c, d 为材料常数。

b. 等幅载荷下 n 个循环造成的损伤为

$$D = nm^c r^d, \quad (19)$$

变幅载荷下 n 个循环造成的损伤为

$$D = \sum_{i=1}^p n_i m_i^c r_i^d, \quad (20)$$

式中 n_i 为第 i 级载荷的循环次数, $\sum_{i=1}^p n_i = n$ 。

c. 临界疲劳损伤。临界疲劳损伤 $D_{\text{CR}} = N_1 m_1^c r_1^d$ 。 (21)

对于常幅载荷, N_1 为对应于此疲劳载荷的疲劳寿命; 对于变幅载荷, 式中下标“1”代表已作用的载荷系列中最大一级载荷所对应的疲劳寿命。于是, 在 p 级载荷作用下, 累积损伤为

$$D = \sum_{i=1}^p n_i m_i^c r_i^d = N_1 m_1^c r_1^d. \quad (22)$$

因为疲劳损伤核产生后在后面的疲劳加载过程中不会消失, 只会增加, 所以 $m_i = m_1$, 式 (18) 成为

$$\sum_{i=1}^p n_i r_i^d = r_1^d N_1. \quad (23)$$

由于损伤发展速率 r 正比于应力水平 S , $r_i \propto S_i$, 所以

$$1 = \sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_1} \left(\frac{S_i}{S_1}\right)^d, \quad (24)$$

式中 S_1 为本次载荷循环之前的载荷系列中最大一次的载荷, N_1 为对应于 S_1 的疲劳寿命, d 为材料常数。Corten - Dolan 基于疲劳试验数据建议:

$$d = \begin{cases} 4.8 & \text{高强度钢,} \\ 5.8 & \text{其他.} \end{cases} \quad (25)$$

2) 模型简评。Corten - Dolan 损伤理论使用二级程序试验测定 d 值, 并认为 d 值不变。但实际上二级程序试验与结构件承受的随机载荷谱有很大不同, 而且 d 值并非不变, 是随载荷的增大而降低的, 所以工程应用时, 为了可靠, Corten - Dolan 损伤理论仍需做大量的试验。

3.2.5 基于能量法的非线性累积损伤理论 Inglis 首先发现滞后能与材料疲劳行为间的关系^[23], 随后 Halford 和 Niu 等发展了多种基于能量法的疲劳累积损伤理论^[24,25]。这里只介绍 Niu 等提出的模型。

1) Niu 模型的物理背景。Niu 等在考察了应变疲劳试验数据后发现, 在循环过程中应变循环硬化系数在变化, 应变循环硬化指数则变化不大。据此提出了新的应力应变关系为

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = K^* \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2} \right)^{n^*} r\beta, \quad (26)$$

式中 K^* 和 n^* 分别为接近失效时 ($r = n/N_f = 1$) 的循环硬化系数和循环硬化指数, β 为循环硬化速率, 其表达式为

$$\beta = a \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \right)^b, \quad (27)$$

式中 a 和 b 为常数。

塑性应变能增量表达式为

$$\frac{dW}{dN} = 4 \frac{1 - n^*}{1 + n^*} r^\beta K^* \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2} \right)^{(1+n^*)}. \quad (28)$$

引入参数 ϕ , 令 $\phi = \frac{W}{W_f} = r^{(1+\beta)}$, 构造的疲劳损伤函数为

$$D = \phi^{1/(n'+\alpha)(1+\beta)} = r^{1/(n'+\alpha)}, \quad (29)$$

式中 $\alpha = (\Delta\sigma\Delta\epsilon_p/4)^{2b}\sqrt{a}$, n' 为循环应变硬化指数。

2) Niu 模型对三个问题的回答

a. 一个循环造成的损伤为

$$D_1 = \left(\frac{1}{N} \right)^{1/(n'+\alpha)}. \quad (30)$$

b. 多个循环造成的损伤。由于损伤与应力应变历程有关, 因此模型给不出损伤的显式表达, 这里引用文献 [26] 提出的累积损伤方程, 实际上无论是线性的还是非线性的, 可适用方程为

$$D = D_1 + D_2 |_{D_1=f(\epsilon_1, R_1)} + D_3 |_{D_2=f(\epsilon_2, R_2)} +$$

$$\dots + D_i |_{D_{i-1}=f(\epsilon_{i-1}, R_{i-1})} =$$

$$\sum_j^n D_j |_{D_{j-1}=f(\epsilon_{j-1}, R_{j-1})}. \quad (31)$$

c. 临界疲劳损伤。临界疲劳损伤 $D_{CR} = 1$ 。

3) 模型简评。由于损伤与加载的过程有关, 因此模型可以考虑载荷次序效应以及载荷间的相互作用效应, 同时该模型还考虑了加载过程中应变硬化指数的变化。模型的理论性强, 但需要确定的参数多, 因而难于在工程上推广。

4 确定性疲劳累积损伤理论讨论

4.1 关于损伤等效累积

迄今为止, 疲劳损伤等效累积的“合理性”是毋庸置疑的, 在处理复杂载荷条件下的疲劳问题时, 仍在广泛地应用以等效损伤状态为前提的损伤累积方法。无论是线性还是非线性疲劳累积损伤理论, 对于两个不同水平的循环应力 σ_1 和 σ_2 , 均假设: 若 σ_1 作用 n_1 次, 造成的损伤为 D , 则 σ_2 应有一个对应的当量循环次数 n_2 , 使得 σ_2 作用 n_2 次造成的损伤也等于 D , 即材料在 σ_2 作用 n_2 次后的损伤状态与 σ_1 作用 n_1 次后的损伤状态完全相同。

现在的问题是这样的损伤等效状态是否存在, 疲劳等累积损伤是否合理。文献 [27] 在三个方面研究了不同水平循环载荷作用下材料“疲劳损伤等效状态”是否存在的问题, 指出: a. 对于高层错能材料, 由于在较高水平的循环应力与较低水平的循环应力作用下产生的位错结构不同, 可以设想高应力与低应力引发的疲劳机理与造成的损伤状态是有区别的; b. 从疲劳问题的概率特征上看, “损伤等效”并非对应着失效概率等效; c. 从疲劳累积损伤的非线性特征来看, 并非在各种情况下都能在不同水平的循环载荷之间找到当量循环次数。

尽管如此, 由于疲劳问题的复杂性, 尚未发现建立在非等累积损伤基础上的疲劳损伤累积理论。

4.2 关于疲劳损伤临界值

目前绝大多数确定性疲劳累积损伤理论的损伤临界值在理论上均为 1, 但在实验或在工程实践中, 临界损伤值常出现不是 1 的情况。为此, Walter Schutz 提出了相对 Miner 法则^[28]。该法则的实质是: 取消临界损伤值为 1 的假设, 由实验或经验确定临界损伤值; 使用的条件为: 一是构件相似, 主要是疲劳破坏发生的高应力区几何相似 (应

力集中相等);二是载荷谱相似,主要是载荷谱形相似,载荷大小可以不同。实际上该法则可以推广至各种疲劳累积损伤理论。

5 结论

1) 倪侃在文献 [29] 中指出,任何一个理论或模型,都应具有四大特性:可证性、可适性、可验性、可行性。疲劳累积损伤理论目前尚不完善,根本原因在于疲劳损伤演化机理十分复杂。对照上述四大特性,Miner 线性疲劳累积损伤理论具有很好的可证性、可适性、可验性、可行性,因而仍在工程上得到广泛的应用。特别是当结构或材料受到随机载荷作用时,如果随机载荷系列中的疲劳载荷几乎都处于 HCF 区,用 Miner 线性疲劳累积损伤理论就足够了;如果随机载荷系列中有相当比例的疲劳载荷处于 LCF 区,则用相对 Miner 法则效果较好。

2) 基于材料物理性能退化概念的非线性累积损伤理论,基于连续损伤力学概念的非线性累积损伤理论,以及基于能量法的非线性累积损伤理论,具有很强的物理基础和严密的数学逻辑证明,能够考虑多种疲劳现象,因此此类模型有很广阔的应用前景,但是,由于缺少实验数据的支持,此类模型目前很难在工程上得到应用。

3) 笔者以为,对于确定性疲劳累积损伤理论,无论是何种载荷谱,损伤模型无论是线性的还是非线性的,都可以用式 (31) 表达累积损伤,因此式 (31) 可以看作疲劳累积损伤的普适方程。循环续循环的累积损伤结合局部应力应变法或其他疲劳分析方法可以考虑多种疲劳现象,如载荷次序效应、载荷间的相互作用效应、包氏效应和记忆特性等。虽然计算复杂,但在计算机上可以轻易实现。

参考文献

- [1] 童小燕,王德俊,徐灏. 疲劳损伤过程的热能耗散分析[J]. 金属学报, 1992, 28(4): 163~169
- [2] 余寿文,冯西桥. 损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1997
- [3] 姚卫星,杨晓华. 疲劳裂纹随机扩展模型进展[J]. 力学与实践, 1995, 17(3): 1~7
- [4] Miner M A. Cumulative damage in fatigue [J]. J Appl Mech, 1945, 12(3): A159~164
- [5] Grover H J. An observation concerning the cycle ratio in cumulative damage [A]. In Symposium on Fatigue of Aircraft Structures [C]. ASTM STP 274, Philadelphia, 1960. 120~124
- [6] Manson S S, Freche J C, Ensign S R. Application of a double linear damage rule to cumulative fatigue [A]. In Fatigue Crack Propagation [C]. ASTM STP 415, Philadelphia, 1967. 384~412
- [7] Marco S M, Starkey W L. A concept of fatigue damage [J]. Transaction of the ASME, 1954, 76: 627~632
- [8] Manson S S, Halford G R. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage [J]. Int J Fract, 1981, 17(2): 169~192
- [9] Kommers J B. The effect of overstressing and understressing in fatigue [J]. Proceeding, America Socioety Testing and Materials, 1938, 38(PartII): 249~268
- [10] Henry D L. A theory of fatigue damage accumulation in steel [J]. Transaction of the ASME, 1955, 77: 913~918
- [11] Cheng Guangxu, Plumtree A. A fatigue damage accumulation model based on continuum damage mechanics and ductility exhaustion [J]. Int J Fatigue, 1998, 20(7): 495~501
- [12] 叶笃毅,王德俊,童小燕,等. 一种基于材料韧性耗散分析的疲劳损伤定量新方法[J]. 实验力学, 1999, 14(1): 80~88
- [13] 翟红军,姚卫星. 化学纤维增强树脂基复合材料的疲劳剩余刚度研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(1): 80~88
- [14] Bui-Quoc T. Cumulative damage with interaction effect due to fatigue under torsion loading [J]. Experimental Mechanics, 1982, (22): 180~187
- [15] Chaboche J L, Lesne P M. A non-linear continuous fatigue damage model [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1988, 11(1): 1~7
- [16] 方华灿,陈国民. 模糊概率断裂力学[M]. 山东东营:石油大学出版社, 1999
- [17] 徐灏. 疲劳强度[M]. 北京:高等教育出版社, 1988
- [18] Freudenthal A M, Heller R A. On stress interaction in fatigue and cumulative damage rule [J]. Journal of the Aerospace Science, 1959, 26(7): 431~442
- [19] Spitzer R, Corten H T. Effects of loading sequence on cumulative fatigue damage of 7071-T6 aluminum alloy [J]. Proceedings, American Society for Testing and Materials, 1961, 61: 719~731
- [20] Manson S S, Nachigall A J, Freche J C. A proposed

- new relation for cumulative damage in bending [J]. Proceedings, American Society for Testing and Materials, 1961, 61: 679~703
- [21] Bui-Quoc T. An interaction effect consideration in cumulative damage on a mild steel under torsion loading [A]. Proceeding of the 5th International Conference on Fracture [C]. Pergamon Press, 1981. 2625~2633
- [22] Bui-Quoc T. A simplified model for cumulative fatigue damage with interaction effects [A]. In Proceedings of the 1982 Joint Conference on Experimental Mechanics [C]. Brookfield center CT, 1982. 144~149
- [23] Inglis N P. Hysteresis and fatigue Wohler rotating cantilevers specimen [A]. The Metallurgist [M]. 1927. 23~27
- [24] Halford G R. The energy required for fatigue [J]. Journal of Materials, 1966, 1(1): 3~18
- [25] Niu X, Li G X, Lee H. Hardening law and fatigue damage of a cyclic hardening metal [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 26(2): 163~170
- [26] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 44~50
- [27] 谢里阳. 疲劳损伤状态的等效性[J]. 机械强度, 1955, 17(2): 100~104
- [28] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- [29] 倪侃. 随机疲劳累积损伤理论研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 43~65

The Review of Ascertainable Fatigue Cumulative Damage Rule

Yang Xiaohua^{1,2}, Yao Weixing¹, Duan Chengmei²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Naval Aeronautical Engineering Academy Qingdao Branch, Qingdao, Shandong 266041, China)

[Abstract] Famous Miner - Palmgren linear damage rule has been presented for 70 years. Because of the complicity of fatigue research, no model could be compared with the Miner rule in engineering application to this day. Fatigue cumulative damage rule has been perfecting and developing. Based on the characteristics of fatigue damage and cumulative damage rule, this paper divided the rules of ascertainable fatigue cumulative damage rule into two main categories. One is linear cumulative damage rule. The other is non-linear cumulative damage rule (NLCDR). The latter can be classified into five categories: NLCDR based on damage curve method; NLCDR based on the degradation of materials performances; NLCDR based on continuous damage mechanics; NLCDR considering the effects of load sequencing on the fatigue life; NLCDR based on energy rule. The representative model of every category is analyzed in physical background and briefly commented. The main questions of fatigue cumulative damage rule are answered. Finally, the several issues are discussed.

[Key words] fatigue; linear and nonlinear; cumulative damage; damage mechanics; energy