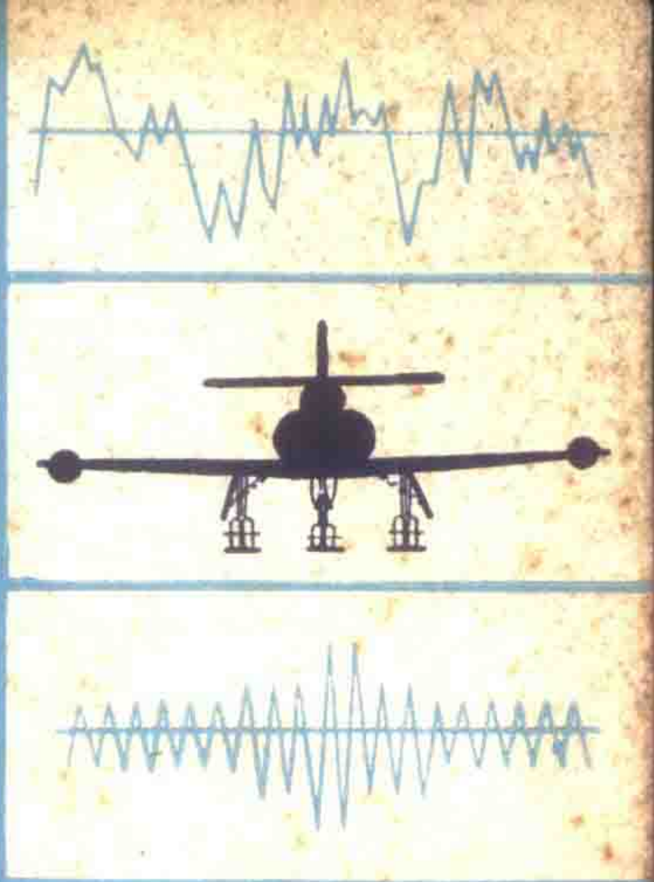

疲劳译文集

（第二集）

国防工业出版社

疲 劳 译 文 集

（第 二 集）

国防工业出版社

内 容 简 介

本译文集（第二集），共包括十二篇文章，除注明者外，均译自 AFFDL TR 70-144(AD)。主要介绍了飞机疲劳设计、试验及疲劳寿命估算等一些问题。由于断裂力学在飞机疲劳设计中已有应用，本译文集也介绍了这方面的文章。

本译文集可供航空工业生产、设计、科研等工程技术人员及从事其他疲劳强度研究工作的有关人员参考。

疲 劳 译 文 集

（第二集）

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32　印张 15 1/8　324 千字

1977年1月第一版　1977年1月第一次印刷　印数：0,001—2,600册

统一书号：15034·1508　　定价：1.55元

(限国内发行)

出版说明

遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，为了配合我国航空工业疲劳强度试验研究工作的开展，继疲劳译文集(第一集)出版后，又出版了译文集（第二集），以后还将陆续组织出版。本集(第二集)，共包括十二篇文章，除注明者外，均译自 AFFDL TR 70-144(AD)。主要介绍了飞机疲劳设计、试验及疲劳寿命估算等一些问题。由于断裂力学在飞机疲劳设计中已有应用，本译文集也介绍了这方面的文章。

在翻译过程中，由于原书图字不清或对原书的词意及缩写字词意未弄清楚等原因，因此有的图及文中个别的字保留了原文，为了不影响读者阅读，而未做其它处理，望读者结合我国的实际情况去参考。

西北工业大学、南京航空学院、力学所及有关科研单位的同志参加了本译文集的译、校工作。

目　录

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

疲劳裂纹扩展规律和理论评论

引　言

疲劳裂纹扩展的一般规律应当考虑以下五个因素：

1. 几何尺寸（裂纹长度，试样尺寸）；

2. 载荷(力的大小和方向，例如均匀受力，楔尖或边缘受力)；

3. 材料的性质(屈服和极限强度，弹性模数，韧性)；

4. 时间(循环次数，应力率和应变率)；

5. 环境（温度，压力，介质)。

至今，已得到的大多数疲劳裂纹扩展方程仅仅考虑了几何尺寸和载荷因素。材料性质，环境和时间因素难于分析和公式化，因而通常包括在所谓“材料常数”中。然而因为疲劳裂纹扩展方程的主要作用是允许外推疲劳试验数据，所以懂得如何考虑后面三个因素是重要的。为了简单起见，在这篇论文中我们假设所考虑的疲劳裂纹扩展速率是和温度、时间和环境无关的。

为了简短地叙述这些不同的疲劳裂纹扩展理论，必须根据理论推导时所采取的方法将它们分类。有四类疲劳裂纹扩展规律或理论：

1. 根据量纲分析的理论规律；

2. 以加工硬化和疲劳损伤模型推导的理论方程；

3. 裂纹尖端开口位移与扩展速率相联系的理论方程；

4. 半经验定律。

本文从材料选择观点总结这些理论，即材料性质如何参与疲劳裂纹扩展定律（见表1材料性质的表示法）。详细的力学分析和数学推导读者可参看Paris[1]和Rice[2]的评论。

表1　材料性质符号

Y	拉伸屈服应力（除非另作申明假定单调和循环流动应力相等）
U	极限拉伸强度
β	循环加工硬化系数
ϵ_F	拉伸断裂应变$\left(\ln \frac{A_0}{A_f}\right)$
ϵ_y	屈服应变
E	弹性模数

量纲分析理论

Frost和Dugdale[3]和以后的Liu[4]根据量纲分析和几何研究考虑无限宽板中长度为$2l$的横向裂纹，证明

$$\frac{dl}{dn}=A(\sigma)\,l\text{。}$$

这个方程假定，当裂纹发展时控制裂纹扩展的因素是保持几何上的相似。他们假设裂纹前缘应变分布是控制因素。Frost[5]根据经验发现$A(\sigma)=B\sigma^3$导出Frost定律

$$\frac{dl}{dn}=B\sigma^3 l, \tag{1}$$

Liu[6]根据在破坏时吸收总滞后能量的概念发现$A(\sigma)=B\sigma^2$导致Liu定律

$$\frac{dl}{dn}=B\sigma^2 l\text{。} \tag{2}$$

方程（1）和（2）说明根据简单量纲分析扩展速率应正比于裂纹长度。最近Yang[7]也靠量纲分析推导出这样型

式的定律

$$\frac{dl}{dn}=f(K), \tag{3}$$

这里K是应力强度因子。在这一点上重要的是要提到大多数疲劳裂纹扩展理论是假设$\sigma_{max}=\Delta\sigma$(应力范围)和$\sigma_{min}=0$。此假设导出$K_{max}=\Delta K$(应力强度因子范围)。

在讨论 Yang 的推导中 Rice[8]反对把应变率作为独立变量。Rice[8]证明取表面能S(量纲：力/长度)为变量，从量纲分析也能得到以下形式的定律：

$$\frac{dl}{dn}=\left(\frac{S}{C}\right)f\left(\frac{K^2}{CS}\right), \tag{4}$$

C是量纲为力/长度^{2}的材料常数。Rice[2]推得更一般的表达式为：

$$\frac{dl}{dn}=\left(\frac{\Delta K}{Y}\right)^2 f\left[\left(\frac{\Delta K}{lY}\right)^2\frac{1}{l}, \epsilon_y, \epsilon_F, N\right], \tag{5}$$

f——一个无量纲函数；

Y——材料屈服强度。

用量纲分析来推导裂纹扩展定律的主要问题在难于列举所有影响裂纹扩展的变量。但是，方程(1)和(2)及(5)理想化地指出在不变的名义应力作用下裂纹扩展率和裂纹长度成正比和材料强度参数的平方成反比。

由加工硬化模型推导的疲劳裂纹扩展理论

Head[9]推导了第一个疲劳裂纹扩展定律。该定律是以代表裂纹尖端塑性区的刚-加工硬化元件模型推出的。断裂标准是每个元件的断裂应力。经修正塑性区大小对裂纹长度的适当依赖关系后，Head 的裂纹扩展定律是

$$\frac{dl}{dn}=\frac{\beta}{12E}\ \frac{\sigma^2 l}{(U-Y)Y}, \tag{6}$$

β——元件的加工硬化系数。

McClintock[10]提出了比较详尽的加工硬化分析，其分析是基于在裂纹尖端大小为ρ的过程区域中塑性应变幅值不断增加引起的疲劳损伤的累积。McClintock 推导是根据以下的假设。

1. 在大小为R的塑性区内，距离裂纹尖端r处的塑性应变幅ϵ_p是

$$\epsilon_p=\epsilon_y\left(\frac{R}{r}-1\right), \tag{7}$$

此处ϵ_y是屈服应变。该式是裂纹开口模型Ⅲ的塑性应变分布精确解。假定该式对裂纹开口模型Ⅰ有效。

2. 疲劳损伤规律是根据低周疲劳的 Coffin 定律(11)

$$N^{1/m}\cdot\epsilon_p=\frac{\epsilon_F}{2},$$

式中ϵ_F是单调断裂的真实断裂应变。疲劳损伤函数是$4(\epsilon_p/\epsilon_F)^m dn$而且当

$$\int_0^N 4\left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_F}\right)^m dn=1 \tag{8}$$

出现断裂。McClintock 取$m=2$对$R\gg\rho$得到下列表达式

$$\frac{1}{\rho}\ \frac{dl}{dn}=7.5\left(\frac{\epsilon_y}{\epsilon_F}\right)^2\left(\frac{R}{\rho}\right)^2, \tag{9a}$$

式中$\frac{1}{\rho}\ \frac{dl}{dn}$给出无量纲扩展率。代入$R=\left(\frac{\Delta K}{2Y}\right)^2$及$\epsilon_y=Y/E$，其中$Y$是屈服应力及$E$是弹性模数，我们得到

$$\frac{1}{\rho}\ \frac{dl}{dn}=\frac{7.5}{16}\ \frac{(\Delta K)^4}{\epsilon_F E^2 Y^2 \rho^2}。 \tag{9b}$$

McClintock 推导的优点在于考虑了材料的力学性质ϵ_p，E及Y(应当指出由于大多数推导是针对高强度材料的，可以粗略地估计流动应力Y为0.01E，则因子E和Y能够互换)。

把 Coffin 定律当作疲劳损伤定律来使用是不完全正确的，因为实质上 Coffin 定律是低周疲劳裂纹扩展定律。但是，一个更精确的损伤定律不会显著地改变结果。取 Coffin 指数为 1.5，此值比较接近许多材料的平均观测值，则推导出扩展速率

$$\frac{dl}{dn}=A(\Delta K)^{3/2}。\tag{10}$$

能够看到扩展速率强烈地依赖于 Coffin 指数，而 Coffin指数也取决于 Tomkins[12]指出的循环应力-应变硬化指数。

McClintock 理论的精确解（见文献〔10〕的图 5 ）预见当塑性区大小等于过程区大小ρ时，裂纹将不扩展。鉴于近来对不扩展疲劳裂纹[13]的ΔK突变区的观察必须重审 McClintock 理论在很低扩展率的应用。例如，铝合金ΔK突变区约为每平方吋 5 千磅相当 25 微米，即比一个晶粒大小还小的过程区。

Tomkins[12]假设塑性区可由两个长为R的塑性剪切带来代表，此带与裂纹尖端裂纹平面成±45°，设疲劳裂纹扩展速率为

$$\frac{dl}{dn}=R\Delta\epsilon_p,\tag{11}$$

$\Delta\epsilon_p$是施加塑性应变范围，与循环应力有下面的循环应力-应变硬化关系

$$\Delta\sigma=k\epsilon_p^\beta。\tag{12}$$

用 Bilby[14]给出的塑性区尺寸

$$R = l\sqrt{2}\left[\sec\left(\frac{\pi}{Y}\frac{\Delta\sigma}{2}\right) - 1\right], \tag{13}$$

Tomkins 推导两个裂纹扩展定律，一个对于低周疲劳，一个对于低应力疲劳裂纹扩展。

a）低周疲劳

$$\frac{dl}{dn} = \frac{\pi^2}{8}\left(\frac{k}{2Y}\right)^2 \Delta\epsilon_p^{(2\beta+1)}\, l \tag{14}$$

且 Coffin 定律从这个表达式导出：

$$\Delta\epsilon_f N_f^{1/(2\beta+1)} = C \tag{15}$$

和 $$2\beta + 1 = m。$$

b）低应力疲劳裂纹

根据表达式为 $\Delta\sigma = k\Delta\epsilon_p^\beta$

和 $$\beta = 0.5$$

的低塑性应变循环加工硬化性质和同样的假设，推导给出

$$\frac{dl}{dn} = \frac{\pi^2}{4}\ \frac{1}{(kY)^2}\Delta\sigma^3\sigma_m l。 \tag{16}$$

根据 $\Delta\epsilon_p$ 为净截面（无裂纹）塑性应变范围，Tomkins 能够使他的推导与 Paris 定律一致。将 $\Delta\epsilon_p$ 换算为总截面应力范围，给出

$$\frac{dl}{dn} = \beta(\Delta K)^4。$$

Tomkins 理论是以方程（11）为基础的，该式是以等效塑性裂纹尖端开口位移来表示裂纹扩展速率。R 表达式是弹塑性问题的简化解，对 Tomkins 所考虑的完全塑性问题是不适用的。然而推导的结果与低周疲劳试验数据很符合。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

在低应力情况下，小塑性应变幅的加工硬化定律还没有扎实地建立起来。加之在小变形（$\sigma \ll Y$）的情况下，净塑性应变将等于0。

Erdogan[15]把裂纹扩展理论建立在假设dl/dn与塑性区内位错密度m〔$m=f_1(R_{max})$〕和对裂纹扩展起作用的位错部分ϕ成正比的基础上。

$$\phi=f_2(R_{可逆的})$$

普遍表达式

$$\frac{dl}{dn}=A\,(R_{max})^{\alpha_1}(R_{可逆的})^{\alpha_2}。\tag{17}$$

Erdogan用的模型过于简化而且也太模糊不清。

Krafft[16]用拉伸带不稳定性模型推导裂纹扩展定律，每一周扩展率等于一个过程区直径。这个定律是

$$\frac{dl}{dn}=\frac{Af(\Delta K/K_{max})}{E^3K_{IC}^2n}K_{max}^4。\tag{18}$$

当Krafft假设疲劳过程区尺寸d_f与拉伸区尺寸d_F之比是：

$$\frac{d_f}{d_F}=\frac{K_{max}^2-K_{min}^2}{(K_{IC})^2}$$

时引进了K_{IC}项。这个定律考虑的加工硬化指数n，它表示颈缩发生前作用于带的拉伸应变。

根据裂纹尖端开口位移模型

Weertman[17]把Bilby, Cottrell和Swinden[18]连续分布小位错裂纹理论用到裂纹扩展问题上。Weertman的断裂准则是当到达裂纹尖端位移D时，疲劳裂纹扩展就发生。得出的裂纹扩展方程是

$$\frac{dl}{dn}=\frac{(\Delta\sigma\sqrt{l})^4}{2\gamma GY^2},\tag{19}$$

式中　γ——塑性功项；

G——剪切模数。

McEvily[19]根据经验修正（19）式提出以下方程

$$\frac{dl}{dn}=A\frac{(\Delta\sigma\sqrt{l})^4}{\left(\frac{Y+U}{2}\right)EU^2\epsilon_F},\tag{20}$$

式中U是极限拉伸应力和ϵ_F是单调断裂应变。McEvily发现这个方程吻合多种材料（钢、铝和镍合金、黄铜）的数据。

Lardner[20]继Bilby理论之后，也推导了疲劳裂纹扩展的位错模型。Lardner假设在卸载中裂纹扩展能够发生，它和所有的观察结果矛盾。Lardner得到的扩展速率是

$$\frac{dl}{dn}=\frac{(1-\nu)}{4GY}(\Delta K)^2\ (G\text{剪切模数})。\tag{21}$$

Lardner假设在裂纹尖端的氧化薄膜对尖端附近位错运动具有阻碍作用，以便说明临界应力强度低于此临界应力强度，裂纹将不扩展。

Frost和Dixon[21]根据裂纹尖端扩展的连续模型提出了疲劳裂纹扩展理论。其主要假设是裂纹扩展速率等于加载卸载间表征裂纹边界的椭圆周边长度的增加。这个长度的增加是取在拉伸正切应力作用下边界的总长。结果是，

$$\frac{dl}{dn}=\frac{\Delta\sigma^2 l}{E^2}\ln\left(\frac{4E}{\Delta\sigma}-1\right)。\tag{22}$$

在塑性修正以后扩展率方程为

$$\frac{dl}{dn}=\frac{32\Delta\sigma^3 l}{E^2Y}。\tag{23}$$

推导的方程符合于 Frost 报告的数据，也和 Pearson[22] 经验定律吻合。

$$\frac{dl}{dn} = 3.43\times10^{7}\left(\frac{K}{E}\right)^{3.6}, \tag{24}$$

McClintock[23]建议以比例常数 C 将裂纹扩展速率与裂纹尖端开口位移联系起来，给出

$$\frac{dl}{dn} = C\ (2u_y)$$

并取 C 为0.5。

$$\frac{dl}{dn} = 2\ \frac{\Delta\sigma^2 l}{EU}, \tag{25}$$

McClintock 发现这个方程和 Pelloux[24]报导的沟痕间距●关联颇佳。

疲劳裂纹扩展的半经验定律

这些定律称为半经验，因为他们企图利用一些基本参数如应力强度因子吻合于试验数据。Paris[25]所得

$$\frac{dl}{dn} = C\,(\Delta K)^m, \tag{26}$$

是典型的半经验定律。$m = 4$ 时扩展速率在五个数量级范围内（从 10^{-8}到 10^{-3}吋/周）能与试验数据吻合良好。

Broek 和 Schijve[26]得形式为

$$\frac{dl}{dn} = C_1\frac{(\Delta K)^3}{1-R}\exp(-C_2R) \tag{27}$$

● 断裂面的放大照片可以看出，每一次循环加载，裂纹便推进一步，这个一次推进量，称为一个 striation，也就是这里的所谓沟痕间距。——校者

的经验公式。

其中 $$R=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}。$$

Forman 提出式(27)

$$\frac{dl}{dn}=\frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_c-\Delta K}。\quad (28)$$

Hudson[28]最近一些工作比较了 Paris 和 Forman 经验公式对 7075-T6 和 2024-T3 铝合金的有效性 指 出 Paris 的方程除在较高扩展速率外对于给定的 R 值吻合试 验 数 据 良好。Forman 方程和 2024 和 7075 两者的数据吻合极好。R 为负值时一切试验数据落入一个狭窄分散带内，这就和 $R=0$ 的数据表明循环的压缩部分对扩展速率没有显著影响。R 为正值时速率对应力强度的数据落入分离的 带中。对 给 定 的 ΔK 应力比越高，裂纹扩展速率越高。

Miller[29] 近来试图测量表达式

$$\frac{dl}{dn}=A\left(K_{max}\right)^n$$

中参数 n 的分散度。69个 n 观测值的平均值是 3.5 并且标准偏差为 0.65。Miller 也用 4340 钢的数据计算常数 A 对力学性质的依赖关系。比较 McClintock，McEvily，Krafft 和 Pearson 所给的方程的数据的吻合情况（见表 2)后，Miller 得到结论，最好的吻合关系为：

$$\frac{dl}{dn}=\frac{B}{K_{IC}EY}\left(K_{max}\right)^n。\quad (29)$$

表 2　在不同理论中疲劳扩展速率对于材料性质的依赖关系

$$\frac{dl}{dn} = A(\Delta K)^n$$

	参考文献	常数 A
McClintock	10	$[E^2Y^2\epsilon_F\rho^2]^{-1}$
McEvily	19	$[EU^2(Y+U)\epsilon_F]^{-1}$
Krafft	16	$[E^3K_{IC}^2n]^{-1}$
Frost	21	$(E^2Y)^{-1}$
Pearson	22	$[E]^{-3.6}$
Miller	29	$(EYK_{IC})^{-1}$
Head	9	$[E(U-Y)Y]^{-1}$

讨　论

本篇疲劳裂纹扩展理论短评指出，可能的形形色色理论是没完没了的。因此有必要用最近所了解到的疲劳裂纹扩展微观机构作为理论的基础。我们的讨论限于对按规则沟痕形成的裂纹扩展，忽略围绕大夹杂的撕裂情况。近期工作[30]已证实裂纹扩展实质上是以剪切或者滑移方式发生的。其结果$\frac{dl}{dn}$应与裂纹尖端开口位移直接关联。一切程序加载试验进一步肯定这个观察：当载荷幅值变化时裂纹扩展量立刻发生变化而没有滞后现象。至少对载荷幅值变化不是很大的情况下是这样（见文献〔31〕的电子显微图片）。大多数加工硬化理论不能说明程序加载试验结果，因为按照损伤准则该理论预计扩展速率的逐渐变化。这并不意味着完全抛弃加工硬化理论，因为在载荷[32]突然变化后也观察到某些逐渐二次量级

扩展速率的变化。

因此裂纹扩展理论应设法把裂纹尖端开口位移(CTOD)和扩展速率$\frac{dl}{dn}$联系起来，CTOD是（l，$\Delta\sigma$，σ_{max}）的函数。第一次近似可以写为

$$\frac{dl}{dn}=\frac{1}{2}\text{CTOD}=\frac{1}{8\pi}\frac{(\Delta K)^2}{YE}。\quad (30)$$

注意这个推导是使$\frac{dl}{dn}$和l成比例，这和大多数报导的裂纹扩展数据相抵触的。也发现一般计算的CTOD比扩展速率[33、34]大很多。为了建立CTOD与扩展速率之间的准确关系，必须作进一步的实验工作。

其次一个问题是要不要在CTOD与$\frac{dl}{dn}$关系式中引进韧性因子以进行修正，因为事实上高流动应力的材料扩展速率不一定低。

$$\frac{dl}{dn}=\frac{1}{8\pi}\frac{(\Delta K)^2}{YE}\frac{1}{\text{韧性因子}}\quad (31)$$

韧性因子应表示平面应变韧性。Miller[29]发现K_{IC}是三维韧性的好量度，与具有高强度钢力学性质的方程（31）吻合良好。另一方面Hahn[33]指出对于大多数钢，扩展速率与韧性和屈服应力无关。Hahn的观察着重确定单调力学性质对疲劳裂纹扩展的作用（如果有的话）的重要性。例如上述方程中流动应力Y应为加工硬化塑性区塑性量度。结果，Y应从循环应力-应变曲线得到并取决于循环历史。无疑理论最难之处在于通过损伤标准和/或残余应力因子考虑随机载荷的影响。

按照以上定义概括疲劳裂纹扩展定律的理论推导需要：

1．对疲劳塑性区大小和形状以及对不同裂纹开口弹-塑

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com