

疲劳裂纹扩展的门槛值的 确定方法及其影响因素

中国科学院力学研究所 曾志华

疲劳裂纹扩展的大量研究和试验表明,对于存在一定尺寸裂纹或缺陷的材料和构件,并非在任意交变应力幅值下裂纹都是扩展的,只有当裂纹尖端的应力强度因子达到或超过某一值时,裂纹才会在交变应力的作用下扩展。当裂纹尖端的应力强度因子小于这一值时,裂纹在交变应力作用下不发生扩展,这个应力强度因子值就是界限应力强度因子幅值 ΔK_{th} ,在疲劳研究中称此值为疲劳裂纹扩展的门槛值。

门槛值 ΔK_{th} 疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 一样,是反映带裂纹或缺陷构件抗疲劳性能的一个重要指标,是工程机械或构件设计选材和安全性分析的不可缺少的重要参数。

在实际工程结构中,对于一些重要的承力构件,常需要根据材料的门槛值 ΔK_{th} 来确定其工作应力水平,即根据构件上存在的初始裂纹尺寸或无损探伤检验方法所能发现的初始裂纹尺寸 a_0 ,再根据门槛值 ΔK_{th} 去求出该裂纹在疲劳载荷下不发生扩展的界限应力,按照界限应力确定构件的允许工作载荷。或者反过来,在给定的工作载荷下,可根据门槛值 ΔK_{th} 确定不发生扩展的允许裂纹尺寸,或根据门槛值可以判断已存在缺陷的构件中,哪些缺陷会在承载过程中扩展,以便监视和防止灾难性破坏事故的发生。因此,研究疲劳裂纹扩展门槛值及其影响因素,对于工程设计具有十分重要的实际意义。

一、门槛值的确定方法

近一、二十年来,许多研究人员对疲劳裂纹扩展的门槛值进行了深入的研究与分析,从大量的理论分析和实验基础上建立了一些计算疲劳裂纹扩展门槛值的公式。目前,从已取得的成果上分析,大致可从下列四条途径去确定疲劳裂纹扩展的门槛值。

1. 用屈服极限确定门槛值

一些学者通过大量的实验和分析,发现疲劳裂纹扩展门槛值与材料的屈服极限密切相关,而且认为疲劳裂纹扩展的门槛值可以由材料的屈服极限确定,比较有名的公式有下列几个:

Toshio Matsumoto, Hideo Kitagawa公式⁽¹⁾:

$$\text{对弯曲受力} \quad \Delta K_{th} = 0.85\sigma_y$$

$$\text{对拉伸受力} \quad \Delta K_{th} = 0.42\sigma_y$$

式中 σ_v 为材料的屈服极限,当材料为高韧性材料时,要用材料的拉伸极限 σ_s 代替公式中的 σ_y 。

Kitagawa 公式〔1〕:

$$\Delta K_{th} = a(-1E - mB\sigma_y)$$

式中 $A = 1.905 \times 10^{-3}$ $B = 1.655 \times 10^{-1}$

对于平面对称弯曲 $n = m = 1$

对于其它加载形式 $n = 0.5 \sim 0.75$, $m = 0 \sim 1$ 。

Fine 公式〔3〕: $\Delta K_{th} = 2 \left[\frac{H_{nc}}{2} \cdot \rho \right]^{\frac{1}{2}} \sigma_{yc}$

式中 H_{nc} 为常数,由 $\frac{\sigma}{\sigma_{yc}} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{yc}} \right)^{nc}$ 决定;

ρ 为缺口根部半径; σ_{yc} 为循环屈服应力极限。

黄明志等人推出的公式〔4〕:

$$\Delta K_{th(\varepsilon)} = \frac{1-R}{2} (\pi \rho_0)^{\frac{1}{2}} \sigma_{yc}$$

式中 ρ_0 为材料从弹性钝化到塑性钝化的临界值,是一材料常数;

R 为应力比; σ_{yc} 为材料的循环屈服极限。

在上面几个公式中,最通常使用的是前两个公式,因为它十分简单和实用,只要从材料手册中查出屈服极限,就立刻可推算出疲劳裂纹扩展的门槛值,实践证明,它与实验结果也较吻合。

2. 用疲劳极限确定门槛值

不少学者证明,疲劳裂纹扩展门槛值与材料的疲劳极限有密切的关系,因而认为疲劳裂纹扩展的门槛值可由材料的疲劳极限确定。几个比较重要的公式为:

西冈邦夫公式〔5〕: $\Delta K_{th} = C \sqrt{\rho} \sigma_w$

式中 $C = 0.97 + 8.75 \times 10^{-3} \sigma_B$; σ_w 为疲劳极限;

ρ 为缺口尖端的曲率半径; σ_B 为材料的拉伸极限。

Mccivilly 公式〔6〕:

$$\Delta K_{th} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1-R}{1+R} \right) \pi \rho \right]^{\frac{1}{2}} \sigma_w$$

式中 $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ 为应力比

ρ 是 Irwin—Neuber 关系 $K_t = \lim_{\rho \rightarrow 0} \sqrt{\frac{\pi}{2}} K_t \sigma \sqrt{\rho}$ 中 $\rho \rightarrow 0$ 时的极限值;

K_t 为应力集中系数; σ 为外加应力; σ_w 为疲劳极限;

ρ 为裂纹尖端根部曲率半径。

Lukas 公式〔7〕：

$$\Delta K_{th} = 1.122(\pi L_c)^{1/2} \sigma_w$$

式中 L_c 为裂纹在疲劳极限时的临界裂纹长度，是一材料常数；
 σ_w 为疲劳极限。

上面三个公式使用都比较方便，只要从常用材料手册中查出疲劳极限，或通过试件疲劳试验确定出疲劳极限，门槛值便能算出。但目前更为广泛应用的是西冈帮夫的经验公式，因为它最简单，不需要去确定材料常数。

3. 用局部应力或应变确定门槛值

许多学者认为疲劳裂纹扩展门槛值与疲劳裂纹尖端局部地区的应力应变分布、塑性区的状况和位错情况有关，并建立了门槛值与裂纹尖端局部地区应力应变或启动裂纹尖端位错源的应力之关系式，从而求得裂纹扩展门槛值比较重要的几个公式是：

Weiss 公式〔8〕：

$$\Delta K_{th} = 1.5(0.1E)^2 \rho^*$$

式中 E 为杨氏模量；
 ρ^* 为 Neuber 显微支承效应常数，它等于 250 \AA 。

黄维扬推导的公式〔9〕：

$$\Delta K_{th} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \varepsilon_s K_{max}$$

式中 ε_s 为材料常数；

K_{max} 为应力强度因子最大值。对加工硬化材料 $\Delta K_{th} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\rho_{max}} \sigma_{yc}$

式中 σ_{yc} 为循环屈服应力； ρ_{max} 为根部最大曲率半径。

于崇华、颜鸣皋推出的公式〔10〕：

$$\Delta K_{th} = 2\sigma_y \left(\frac{E \varepsilon_f}{2\sigma_y} \right)^{\frac{1+n}{2}} \sqrt{2\pi\rho}$$

式中 ε_f 为真实应变， $\varepsilon_f = l_n \left(\frac{1}{1-\Psi} \right)$ ；

Ψ 为材料的断面收缩率；

ρ 为疲劳裂纹尖端根部半径； σ_y 为屈服极限。

Fine 公式〔11〕： $\Delta K_{th} = \alpha \sigma_s (s)^{1/2}$

式中 α 为塑性削减裂纹尖端应力峰的能力，是一无量纲常数；

σ_s 为启动裂纹尖端距离为 S 的位错源所需的应力；

S 与晶粒尺寸有正比关系。

张平生等人推出的公式〔12〕：

$$\Delta K_{th} = \frac{1}{2} \left[\frac{E \varepsilon_{fc}}{\sigma_{yc}} \right]^{\frac{1+n_c}{2}} (\pi \rho_c)^{1/2} \sigma_{yc}$$

式中 σ_{yc} 为循环屈服应力； ε_{fc} 为循环真实应变；

ρ_c 为循环载荷下缺口根部半径; n_c 为常数。

Radhakrishnan 公式⁽¹³⁾ :

$$\log \Delta K_{th} = \left(1.11 - \frac{1.25}{m} \right) + r \log(1 - R)$$

式中 R 为应力比; m 和 r 为材料常数。

Yokobori 公式⁽¹⁴⁾ :

$$\Delta K_{th} = \Delta K_i + M_0 \left(\frac{\rho'}{N^*} \cdot \frac{d}{b} \right)^{\frac{1}{2-\beta}}$$

式中 d 为晶粒直径; b 为柏氏矢量;

N^* 为位错反映的数目; m 和 β 为常数;

$$\Delta K_i = Gb / (1 - \nu) \sqrt{\pi x};$$

ν 为波桑比;

G 为剪切模量;

$$M_0 = 2G\sqrt{b} \left(\frac{\beta N^*}{K^2(m)} \right)^{1/2} \left(\frac{N^*}{\rho'} \cdot \frac{1}{r(m)} \right)^{1-\beta} \left\{ \frac{1}{[f(\beta)]^m} \frac{mr(m)}{a_1} \frac{\tau_0}{G} \right\}^{\frac{1+\beta}{2-\beta}};$$

$$r(m) = 1.396m^{-1.45};$$

ρ' 为单位体积内增长的体积密度。

以上几个公式中, 比较简单的是 Weiss、黄维扬和 Fine 公式, 用起来比较方便而且跟实验结果较为吻合。

4. 用实验方法确定门槛值

用实验方法确定门槛值的具体步骤是, 第一阶段是用三点弯曲试样在疲劳试验机上测定裂纹扩展速率, 开始用较大的交变载荷引发裂纹, 引发出裂纹后, 让裂纹扩展到预定的初始裂纹长度后, 把载荷降到预定的疲劳载荷。在试验过程中, 用工具显微镜观测, 每当裂纹扩展的长度增加 0.1 或 0.2 毫米时, 记下疲劳载荷的循环次数 N , 这样便可得到裂纹长度 a 与循环次数 N 的曲线, 再用中值法求出不同 a 值下的 $\frac{da}{dN}$, 以得到 $\frac{da}{dN} \sim \Delta K$ 关系曲线。第二阶段

是在上面得到的 $\frac{da}{dN} \sim \Delta K$ 关系曲线上定出裂纹扩展速率为 10^{-6} 毫米/次时的 ΔK 值,

记为 ΔK_{-6} , 则 $\Delta K_{th} \leq \Delta K_{-6}$ 。在实验时可把 ΔK 取小些, 如果经过 $10^6 \sim 10^7$ 次循环, 裂纹一直不扩展, 把这 ΔK 记为 ΔK_0 , 则有 $\Delta K_{th} \geq \Delta K_0$ 。测出了 ΔK_{-6} 和 ΔK_0 后, 那么门槛值便可由下式确定:

$$\Delta K_0 \leq \Delta K_{th} \leq \Delta K_{-6}$$

由实验方法确定门槛值虽然要花较长的试验时间和较多的费用, 但对一些工程结构中特殊需要的材料, 又无法从常用材料手册中查出屈服极限或疲劳极限时, 这种方法就显得十分必要。

二、影响门槛值的主要因素

疲劳破坏是一个十分复杂的过程，它受许多因素的影响，大量的研究表明，疲劳裂纹扩展门槛值也受许多因素的影响，这些因素主要有：

1. 平均应力或应力比 R 的影响

平均应力或循环应力比对疲劳裂纹扩展门槛值的影响十分显著，一般是门槛值随着应力

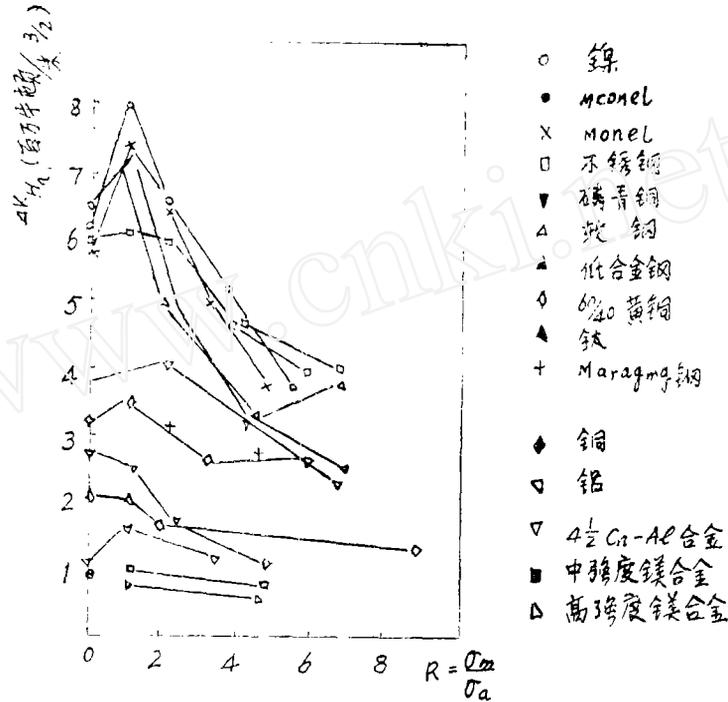


图1 各种材料门槛值与应力比之关系

表1 几种中碳钢的门槛值 (不同应力比 R 下)

材 料*	应力比 R	Δk_{th} (百万牛顿/米 ^{3/2})	材 料*	应力比 R	Δk_{th} (百万牛顿/米 ^{3/2})
1 FP (6mm厚)	0.26	6.61	4 MP	0.34	8.16
	0.27	6.60		0.50	6.13
	0.34	5.45	5 MP	0.27	8.50
	0.51	4.42		0.36	7.67
2 P	0.34	5.63	0.37	7.50	
		3 P	0.26	7.25	0.37
0.34	6.10		0.50	6.00	

*含碳量约0.55%。含Mn量0.66~2.22%。

比 R 的增加而降低。例如Cooke等人⁽¹⁵⁻¹⁶⁾用许多材料试验都证明应力比是影响门槛值的一个重要因素，并且都遵循门槛值随应力比增加而下降的规律，试验结果见图1，几种不同碳钢的试验数据如表1所示。

邓蓉英等⁽¹⁷⁾证明循环应力比 R 对门槛值的影响表现为两种情况，在低循环应力比下，门槛值明显地随应力比的增加而降低， R 和 ΔK_{th} 之间呈线性关系；当 R 增加到一定值后，门槛值几乎不随 R 的变化而改变，保持一恒值，试验结果如图2所示。

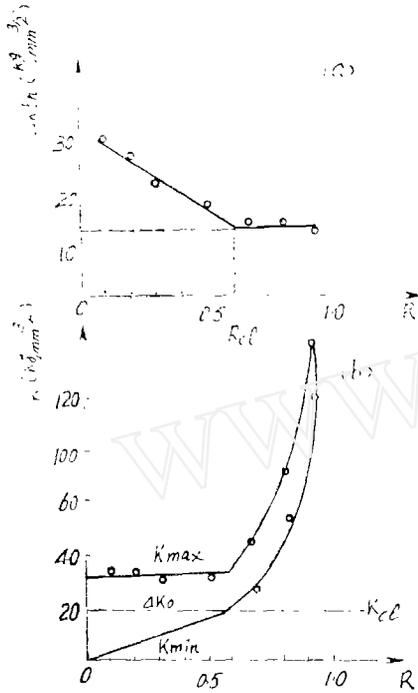


图2 门槛值与应力比关系(a) ΔK_{th} 与 R 关系 (b) K_{max} 、 K_{min} 与 R 关系

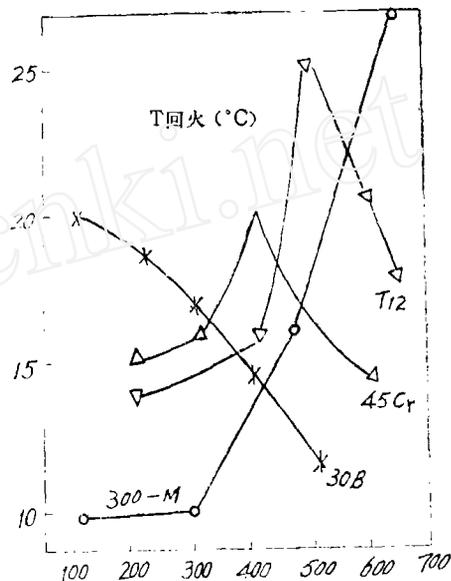


图3 门槛值与回火温度之关系

2. 热处理工艺的影响

疲劳裂纹扩展门槛值与热处理工艺有较大的影响，例如西安交大曾研究过七种热处理工艺对45Cr钢门槛值的影响⁽¹⁸⁾，证明门槛值并不是随回火温度单调地变化，而是在中温回火时门槛值有一峰值。试验结果见表2和图3。

表2 45Cr钢不同热处理状态下的 ΔK_{th} 值

热处理状态	$\Delta K_{th} (kg/mm^{3/2})$					平均
淬火，200°C回火	15.4,	15.9,	16.5,	14.8		15.6
淬火，300°C回火	15.4,	15.7,	15.9			15.7
淬火，400°C回火	20.4,	20,	18.4,	21.7,	17.5	19.0
淬火，500°C回火	16.1,	15.6,	16.6			16.1
淬火，600°C回火	14.5,	14.8,				14.7
300°C等温淬火	30.4,	25.4,	29.1,	25.8		27.7
400°C等温淬火	18.0,	19.1,	18.0,	15.2		17.6

3. 试验频率的影响

关于试验频率对门槛值的影响问题,目前仍有不同的观点,Paris等⁽¹⁹⁾认为在200Hz以下,加载频率对 ΔK_{th} 没有显著的影响。Schmidt⁽²⁰⁾却认为有影响,特别在342~800Hz范围内,频率对 ΔK_{th} 的影响很大,随着频率的增加, ΔK_{th} 显著下降。当频率超过832Hz时,频率的影响就很小了,结果如图4所示。

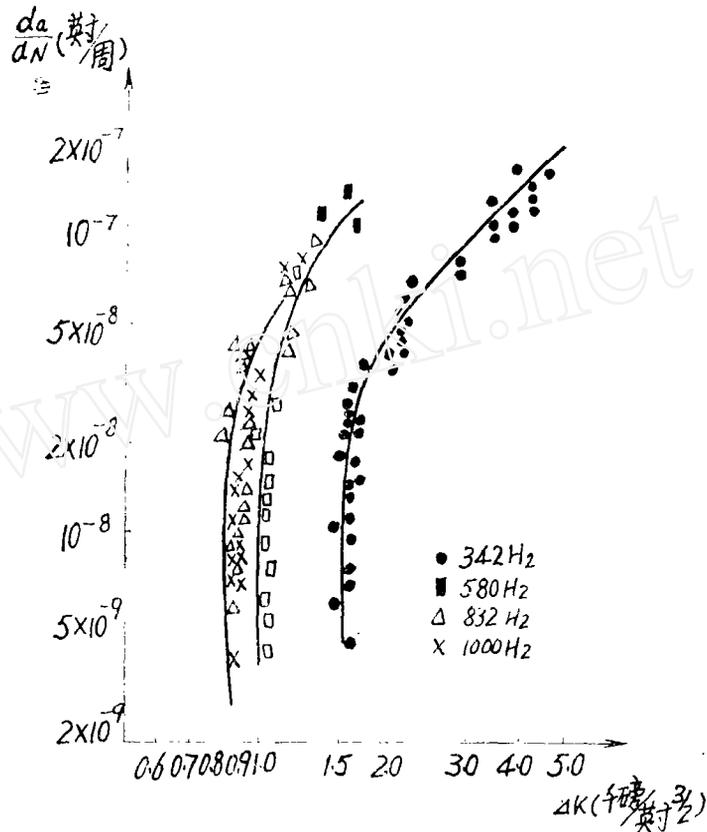


图4 2024-T3 铝合金在不同频率下的扩展速率

4. 其它一些影响因素

不少人研究过试样厚度对门槛值的影响,指出 ΔK_{th} 一般是随厚度的增加而减小⁽²⁾。

金属显微组织对门槛值也有一定的影响, ΔK_{th} 随晶粒尺寸,随显微组织的百分体积比的变化而变化,并得到一些相应的经验公式⁽²¹⁾。

环境对门槛值的影响也有一些学者研究过,证明在高应力比时,盐水对 ΔK_{th} 无影响,但在低应力比下,盐水中的 ΔK_{th} 将比空气中低。

三、分析和讨论

到目前为止,疲劳裂纹扩展门槛值的究研已取得了较大的进展,建立了许多确定门槛值的经验公式,这些公式都有人采用。为了确保结构的安全可靠,可以先用经验公式推算出门槛值,然后再用实验去验证这门槛值是否可行。

应当看到,不管是用经验公式,还是用实验方法确定门槛值,因为门槛值一般并不就是

疲劳极限、屈服极限等的单值函数,而是受许多因素的影响,有些因素对门槛值的影响还十分显著,所以在确定门槛值的时候,必须考虑这些因素的影响,才能确保结构的安全与可靠,才能使设计更为合理。

从本质上分析,门槛值是与缺口尖端局部地区的状态密切相关的,也就是说,门槛值主要取决于尖端地区的应力应变场。如果应用有限元等方法把尖端地区的应力应变场算得精确些,门槛值将会比较精确。另一方面,疲劳研究当前正朝着宏观和微观相结合的方向发展,门槛值又跟裂纹尖端地区的位错变形密切相关,如果用宏观与微观相结合的方法探讨门槛值,将会有所突破。

参 考 文 献

- [1] Toshio Matsumoto, Hideo Kitagawa, Mechanical Behavior of Materials, Vol. 2, pp. 218~221, 1973.
- [2] J. K. Musawa and J. C. Radon, Advances in Fracture Research, Vol. 3, 1365~1372.
- [3] M. E. Fine, Y. H. Kim and T. Mura, Engng Fracture 1977.
- [4] 黄明志等, 西安交大科学技术报告79—0911979.4
- [5] 西冈帮夫, 《疲劳とおお最近の诸问题第11回 疲劳 シンポジラム, 大阪, 1977. 11. 21—22》, 1978, 11—16.
- [6] A. J. McEvily, Metall. Trans. Vol. 26, P 1233, 1977
- [7] P. Lukas and M. Klesnil, Mater. Sci. Eng. Vol. 31, (1978), No.1.
- [8] V. Weiss and P. N. Lai, Metall. Trans. Vol. 5 (1974), P 1946.
- [9] 黄维扬, 南京航空学院科技资料248号, 1979.
- [10] 于崇华, 顾鸣皋, Fat. Engng. Mater. Struc. 3 (1980), 189.
- [11] M. E. Fine, Metall. Trans. Vol. 11A (1980) No. 3, P 365.
- [12] 张平生、蔡和平, 西安交大科学技术报告, 80—012 (1980. 3).
- [13] V. M. Radhakishnan, Engng. Fract. Mech. 13 (1980), 129.
- [14] A. T. Yokobori and T. Yokobori, Advances in Fracture Research, Vol. 3, 1373—1380, 1981.
- [15] R. J. Cooke and C. J. Beevers, Engng. Fract. Mech. 1973, Vol. 5, No. 4, P 1061.
- [16] L. P. Pook and A. A. Beveridge, ASTM—STP520, (1973), P 179.
- [17] 邓蓉等《机械强度》, 1982, 1, P 22.
- [18] 西南交大金属材料及强度研究室, 《机械强度》, 总第11期, P 25.
- [19] P. C. Paris, W. Weiss, E. T. Wessel and A. F. Anderson, On Threshold for Fatigue Crack Growth, Presented at the Fifth International Symposium on Fracture Mechanics, 1977.
- [20] O. Janas and R. P. Wei, Inter. J. Fract. Mech. 7 (1971), 116—118.
- [21] J. C. Radon (1979), Effect of Environment on Cyclic Crack Growth in Metals, In Recent Research of Mechanical Behaviour of Solids, University of Tokyo Press, Japan, 359—387.