

论疲劳缺口减缩系数 K_f^*

姚卫星 顾 怡

(南京航空航天大学)

提 要 本文简要回顾了疲劳减缩系数 K_f 的定义和主要表达式, 在此基础上本文从疲劳损伤的基本机理出发推导了定量描述 K_f 的基本公式, 讨论了影响 K_f 值的主要因素, 并用此理论分析了疲劳实验数值, 获得了较为满意的结果。

关键词 疲劳减缩系数 K_f , 疲劳机理, 场强法

一、 K_f 的定义和表达式的简单回顾

疲劳缺口减缩系数 K_f 在疲劳强度的估算中起着至关重要的作用。但在局部应力应变法中, K_f 是一个既明确又模糊的参数, 说它明确, 因为它的定义明确清晰; 说它模糊, 因为它与众多的因素有关, 它象一个黑匣子, 将众多不易确定的因素包含于它, 而使 K_f 的实际确定带有很多的主观因素。

K_f 的原始定义是光滑试件的疲劳强度 S_e 与缺口试件的疲劳强度 S_N 的比值:

$$K_f = \frac{S_e}{S_N} \quad (1)$$

显然, 确定 K_f 最直接和最可靠的办法是通过试验获得。但在实践中, 用试验的方法获得 K_f 既费时又费钱, 且 K_f 还与试件尺寸有关, 从而使得仅通过试验途径获得 K_f 行不通。所以, 一般的做法是通过某种方法先确定 K_f , 然后再去估算缺口试件的疲劳强度 S_N 。

后来, 又有人按修正的Neuber法来定义 K_f ^[1-3]:

$$K_f = \sqrt{K_\sigma \cdot K_\epsilon} \quad (2)$$

式中的 K_σ 和 K_ϵ 分别为应力集中系数和应变集中系数。以上两种定义有很大的差别。用(2)式的定义, 对于幂硬化材料, 在极小值时 $\frac{K_f}{K_T} = \frac{2\sqrt{3}}{3}$, 在不少情况下 $K_f \geq K_T$, 其中 K_T 为理论应力集中系数, 显然这一定义是很不合适的。

基于定义(1), 已有很多经验的和半经验的表达式。表 I 列出了一些具有代表性的公式, 其中大多数为单参数表达式。

* 航空科学基金资助项目
本文收稿日期: 1994年1月

表中的公式有这样两个特点: ①均属于经验性的或半经验性的表达式, 公式建立的物理基础不太牢固; ②材料常数的取值有很大的主观随意性。目前对 K_f 仍有不少的研究, 如第五届全国疲劳学术交流会上就有多篇论文涉及这一问题。

二、应力场强法与 K_f 表达式的建立

1. 应力场强法

疲劳损伤的微观和宏观研究表明疲劳是一种局部损伤现象, 元构件的疲劳强度取决于危险点处疲劳损伤的累积。局部应力应变法以危险点处的峰值应力为评估参数, 所以局部应力应变法是一个点应力模型, 显然其与疲劳机理不太一致。

文献[11-13]提出了一个疲劳设计的新方法, 这一方法定义了一个有效应力参数—场强 σ_{FI} (图1):

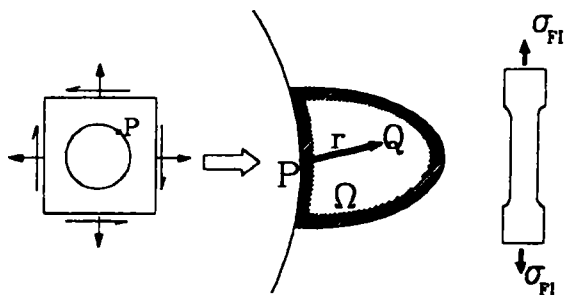


图1 应力场强法模型

$$\sigma_{FI} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} f(\bar{\sigma}) \cdot \varphi(\bar{r}) dV \quad (3)$$

此处: Ω 为疲劳损伤区域, V 是区域 Ω 的体积; $\varphi(\bar{r})$ 是权函数; $f(\bar{\sigma})$ 是等效应力函数。下面对(3)式作一简单的讨论。

① 等效应力函数 $f(\bar{\sigma}_v)$

对不同的材料可用不同的表达式。如对碳钢、铝合金、钛合金等弹塑性材料用Von Mises等效应力, 对铸铁、铸钢等材料用最大主应力。

② 权函数 $\varphi(\bar{r})$

权函数 $\varphi(\bar{r})$ 在物理上表征 P 点处的应力对 $\bar{r} = 0$ 处峰值点应力的贡献, 所以有:

A. $0 \leq \varphi(\bar{r}) \leq 1$, 且 $\varphi(\bar{r})$ 是关于 $|\bar{r}|$ 的广义单调降函数;

B. $\varphi(0) \equiv 1$;

C. 当应力梯度 $G = 0$ 时, $\varphi(\bar{r}) \equiv 1$

因此对各向同性材料 $\varphi(\bar{r})$ 只与缺口的几何参数和外载形式有关, 且可通过解析和数值的办法求得。

③ 破坏准则

对光滑试件, 由于 $G = 0$, 则 $\varphi(\bar{r}) = 1$, 试件中的应力处处相等, $f(\bar{\sigma}) = \text{const.}$, 所以(3)式为:

$$\sigma_{FI} = f(\bar{\sigma}_y)$$

显然, 当 $f(\bar{\sigma}_y) \geq \sigma_j$ 时, 光滑试件破坏。因(3)式不仅适用于光滑试件, 同样也适用于缺口试件, 所以有破坏准则:

$$\sigma_{FI} \geq \sigma_j$$

④ 疲劳破坏区域 Ω

从疲劳机理来看, 裂纹形核通常在试件表面的应力集中处。其尺寸为数个晶粒尺寸范围。目前还不能通过微观的研究, 定量地将 Ω 与疲劳破坏机理联系起来, 并给出不同材料的 Ω 。在本文中暂假定 Ω 的形状为球形或圆形, 其尺寸 D 通过实验拟合确定。

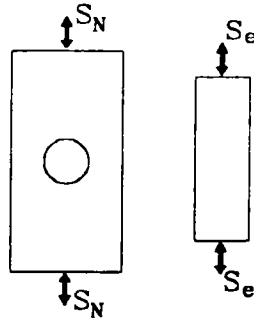
2. 疲劳减缩系数 K_f 

图 2. 建立 K_f 的示意图

设有两个同种材料的试件(图2), 按(3)式有:

对光滑试件, 其场强为:

$$\sigma_{FI}^0 = S_e \quad (4)$$

对缺口试件, 其场强为:

$$\sigma_{FI}^N = \frac{1}{V} \int_{\Omega} f(\bar{\sigma}_y) \varphi(\bar{r}) dV \quad (5)$$

式中: $f(\bar{\sigma}_y)$ 是外载 S_N 的函数。在线弹性情况下, $f(\bar{\sigma}_y) = S_N f(\bar{\sigma}_y)$, $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / S_N$; 在弹塑性情况下, $\bar{\sigma}_y = \bar{\sigma}_y(S_N)$ 。所以(5)可写为:

$$\sigma_{FI}^N = \frac{1}{V} \int_{\Omega} S_N f(\bar{\sigma}_y) \varphi(\bar{r}) dV \quad (6)$$

按照场强法的定义, 不论试件的几何形状和加载方式如何, 只要场强 σ_{FI}^N 达到其临界值 σ_{cr} 时, 试件就出现疲劳裂纹。所以满足:

$$\sigma_{FI}^N = \sigma_{FI}^0 = \sigma_{cr} \quad (7)$$

将(4)式和(6)式代入(7)式可得:

$$S_e = \frac{S_N}{V} \int_{\Omega} f(\bar{\sigma}_v) \varphi(\bar{r}) d v$$

即

$$K_f = \frac{S_e}{S_N} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} f(\bar{\sigma}_v) \varphi(\bar{r}) d v \tag{8}$$

(8)式即为以场强法导出的普遍表达式.

对于平面问题, (8)式可写为:

$$K_f = \frac{1}{S} \int_D f(\bar{\sigma}_v) \varphi(\bar{r}) d s$$

式中: D 为平面场强区域, S 为 D 的面积.

3. 实验验证

本文作者用(8)式分析了大量的疲劳试验数据, 因篇幅所限, 本文仅给出了ST52—3钢中心孔拉—压疲劳试验的分析结果. 图3为试件示意图, 图4给出了 K_f 试验值与计算值之间的比较.

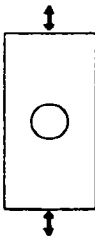


图3. 中心孔试件

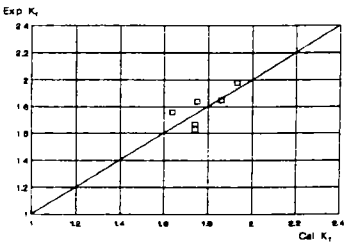


图4. K_f 试验值与计算值的比较

表 II. ST52-3钢中心孔板拉—压疲劳 K_f 的试验值和计算值^[14]

半径 $R(\text{mm})$	板宽 $W(\text{mm})$	K_T	S_N (MPa)	K_f 试验值	K_f 计算值
0	—	1	270	—	—
20	68	2.07	155	1.74	1.63
12	84	2.36	145	1.86	1.85
10	64	2.32	165	1.64	1.76
4	40	2.52	154	1.75	1.84
3	60	2.72	140	1.93	1.98
1	20	2.72	155	1.74	1.67

注: 场径 $D=0.30\text{mm}$

4. 讨论和结论

- (1) 在线弹性情况下, $f(\bar{\sigma})$ 只与试件的几何形状有关, 但 $\varphi(\bar{r})$ 与材料和应力梯度有关, 故在疲劳极限时 K_f 不仅与 K_T 有关, 还与试件的几何形状有关.

- (2) K_f 与材料性能有关, 通常晶粒越细, 材料的疲劳损伤区越小. 故在线弹性时, 晶粒越细, K_f 越接近 K_T .
- (3) 在短寿命区, 由于塑性使缺口根部区域的应力梯度趋于 0, 缺口根部的最大应力较之弹性应力小得多, 故 K_f 与寿命和应力—应变曲线形状有关.
- (4) 应变硬化材料 K_f 随循环数不断增加, 而应变软化材料 K_f 随循环数不断下降.

表1. K_f 的代表性表达式

参数	作者	表达式	材料常数	参考文献
单参数	H.Neuber P.Kuhn	$K_f = 1 + \frac{K_T - 1}{1 + \sqrt{a/\rho}}$	a 是拉伸强度的函数 $a = f(S_b)$	[4]
	R.E.Peterson	$K_f = 1 + \frac{K_T - 1}{1 + a/\rho}$	$a=0.0025\text{in}$ (调质钢) $a=0.01\text{in}$ (正火钢)	[5]
	R.B.Heywood	$K_f = \frac{K_T}{1 + 2\sqrt{a/\rho}}$	$a = f(S_b)$, 取决于 试件的形式和材料	[6]
	M.Stieler E.Siebel	$K_f = \frac{K_T}{1 + \sqrt{1 + S_q \chi}}$	$S_q = f(\sigma_{0.2})$	[7-8]
双参数	A.Buch W.Switek	$K_f = K_T \frac{1 - 2.1[h/(\rho + \rho_0)]}{A}$	A 、 h 取决于试件的形式和 材料, ρ_0 是 A 和 h 的函数	[9]
三参数	赵少汴 王忠保	$K_f = \frac{K_T}{0.88 + A\chi^b}$	A 、 b 取决于 材料和热处理	[10]

注: ρ ——缺口根部半径

$$\chi = \frac{1}{\sigma_{\max}} \cdot \frac{d\sigma}{dx}$$

χ ——相对应力梯度

参 考 文 献

- 1 W Switek, A Buch. The Problem of Maximum Notch Effect in the Flat Components with Transverse Holes. Proceedings of the 3rd Conference on Dimensioning, Budapest, 1968
- 2 聂宏, 吴富民. 一种变 K_f -Neuber法疲劳裂纹形成寿命计算. 航空学报, 1988;9(9):424-429
- 3 平安, 王德俊. 计算疲劳缺口系数的新方法. 第五届全国疲劳学术会议论文集, 威海, 1991.9:354-357
- 4 P Kuhn, H F Hardraht. An Engineering Method for Estimating the Notch-size Effect in fatigue Tests on Steels. NACA TN2805, Washington, 1952
- 5 R E Peterson. Notch Sensitivity, in Metal Fatigue. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959
- 6 R B Heywood. Designing Against Fatigue. London: Chapman & Hall, 1962

- 7 M Stieler. Investigation of the Fatigue Strength of Metallic Structural Components at Room Temperature. Dissertation, Technische Hochschule, Stuttgart, 1954
- 8 E Siebel, M Stieler. Non-uniform Stress Distribution During Fatigue Loading. VDI-Z, 1955;97:121-128
- 9 A Buch. Analytical Approach to the Size and Notch-size Effect in the Fatigue of Aircraft Materials. Materials Science and Engineering. 1974;19
- 10 赵少汴, 王忠保. 常用国产钢的有效应力集中系数的研究. 郑州机械研究所, 1984
- 11 Yao Weixing. On the Notched Strength of Composite Laminates, Composites Science and Technology, 1992;45 :105-110
- 12 郑楚鸿. 高周疲劳设计方法——应力场强法的研究(博士论文). 清华大学, 1984.3
- 13 Yao Weixing. Stress Field Intensity for Predicting Fatigue Life. International Journal of Fatigue, 1993; 15:243-245
- 14 Buch A. Fatigue Strength Calculation. Switzerland:Trans Tech Publications. 1988

ON THE FATIGUE NOTCH FACTOR K_f

Yao Weixing Gu Yi

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract In this paper, the definition and some expressions of fatigue notch factor K_f are briefly reviewed. A new expression of K_f is developed based on the fatigue damage mechanism. Some experimental results are analysed using the expression developed in the paper. It is shown that the predicted results are satisfactory.

Key words fatigue notch factor, fatigue mechanism, stress field strength