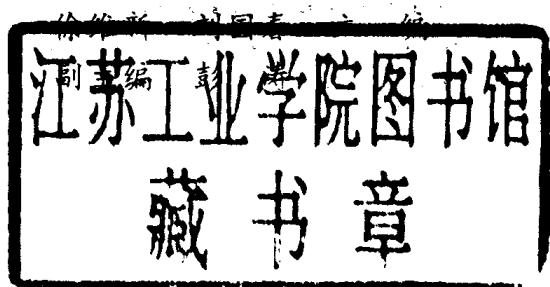


# 机械强度可靠性计算

徐维新 刘国春 主 编

科学技术文献出版社

# 机械强度可靠性计算



科学技术文献出版社

(京)新登字 130 号

## 内 容 简 介

本书论述了机械强度的可靠性计算方法,主要内容有:金属疲劳破坏的过程,简明阐述了机械零件疲劳断裂机理及裂纹扩展规律;用试验法确定抗疲劳特征值;影响机械零件抗疲劳性能的因素,分析了应力集中、摩擦腐蚀等因素的作用,介绍了零件表面强化技术;机械零件变载荷特征值的统计学评估;变载荷机械零件的强度可靠性计算。适于大专院校高年级学生、研究生和有关专业教师阅读,也可供机械可靠性研究人员参考。

## 机械强度可靠性计算

徐维新 刘国春 主 编

\*

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路 15 号 邮政编码 100038)

西安市雁塔区第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

787×1092 毫米 32 开本 8.375 印张 179 千字

1994 年 9 月第 1 版 1994 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—2 000 册

ISBN 7-5023-1877-5/TN·36

定价:15.00 元

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第 1 章 金属疲劳破坏的过程 .....                | 1   |
| § 1-1 疲劳破坏机理和机械零件的疲劳断裂 .....         | 1   |
| § 1-2 疲劳裂纹的扩展规律 .....                | 8   |
| 第 2 章 用试验法确定抗疲劳特征值 .....             | 19  |
| § 2-1 对称循环和非对称循环的抗疲劳特征值 .....        | 19  |
| § 2-2 抗疲劳特征值的离散性和全概率疲劳曲线图的构成 .....   | 33  |
| § 2-3 复合应力状态下抗疲劳特征值的评估 .....         | 41  |
| 第 3 章 影响机械零件抗疲劳性能的因素 .....           | 49  |
| § 3-1 应力集中和横剖面的绝对尺寸 .....            | 49  |
| § 3-2 疲劳破坏的统计学相似理论 .....             | 61  |
| § 3-3 摩擦腐蚀 .....                     | 117 |
| § 3-4 表面处理的性质、腐蚀及试验循环数 .....         | 129 |
| § 3-5 机械零件的表面强化技术 .....              | 140 |
| 第 4 章 机械零件变载荷特征值的统计学评估 .....         | 149 |
| § 4-1 载荷随机变化过程的标准化的方法 .....          | 149 |
| § 4-2 对载荷计算特征值的估计<br>—— 概率论的应用 ..... | 166 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| § 4-3 载荷状态计算特征值的统计学评估 .....        | 181        |
| <b>第 5 章 变载荷机械零件的强度计算</b> .....    | <b>184</b> |
| § 5-1 使用安全系数的计算方法 .....            | 184        |
| § 5-2 不规则变载荷状态耐久性计算法的实验依据<br>..... | 193        |
| § 5-3 变载荷的概率强度计算法 .....            | 203        |
| § 5-4 机械零件概率疲劳计算方法的实际应用 ...        | 237        |

# 第 1 章 金属疲劳破坏的过程

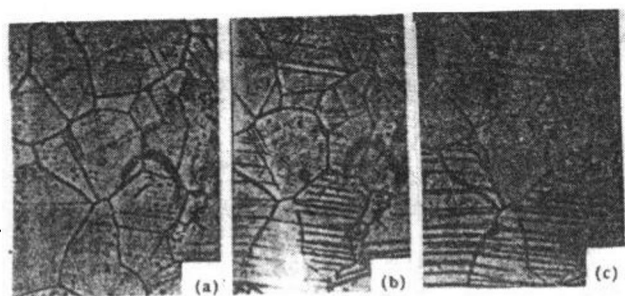
## § 1-1 疲劳破坏的机理和 机械零件的疲劳断裂

普通机械零件（传动轴、齿轮、螺杆、构架、弹簧等）在使用过程中承受着随时间变化的随机应力。当应力数值超过一定限度时，在零件的材料上便会发生损伤并逐渐积累，直到形成准微观裂纹。接着这些微裂纹扩展增大，而后这些裂纹便汇集起来形成长度为  $0.1 \sim 0.5\text{mm}$  的初始裂纹。在裂纹顶端会产生被称之为“应力集中”的现象，它将使裂纹继续扩展，使断面面积逐渐减小，在某一瞬间零件突然破坏。这往往造成损伤事故，产生严重的后果。在变应力的作用下，由于裂纹的形成和扩展，导致材料性质变化，使机械零件的材料产生损伤并逐渐积累，直到最后破坏。这一过程叫做材料的疲劳。

对于疲劳破坏过程物理性质的研究，可用显微镜、电子显微镜、X 射线、热量测定法以及光弹性法。这些方法也可用来测定疲劳破坏时材料的硬度、能量的损耗、转位密度等。

金属破坏过程和机理与材料中各种各样的杂质、晶格缺陷等有关，它们会使金属中的各个晶粒的大小、形状和方位的配置呈现不均匀性。由于这种不均匀性，即使变应力不超过比例极限，也会在不利方位的各个晶粒上沿着某个固定晶

面产生周期性的塑性变形。可以用金相显微镜来观察这些变形的结果。图 1.1 上可以看到纯镍试件在不同周期载荷下的滑移痕迹（滑移线）。



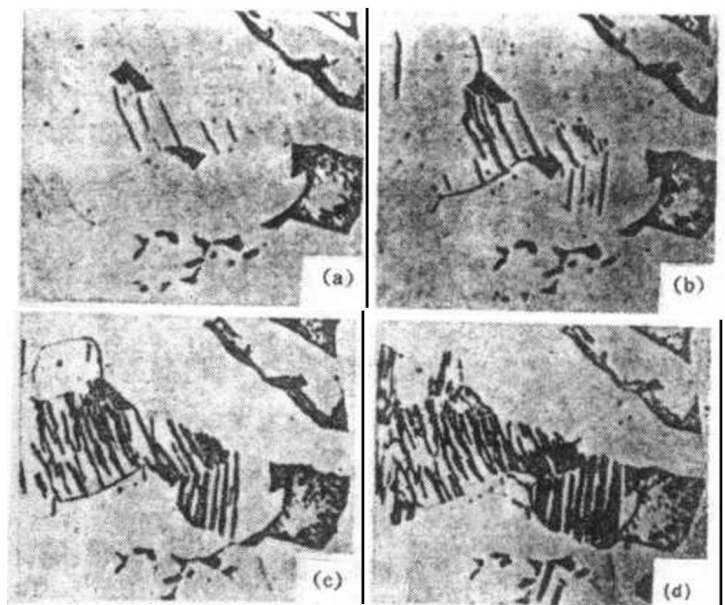
(a)  $10^4$  次循环；(b)  $5 \times 10^4$  次循环；(c)  $27 \times 10^4$  次循环

图 1.1 对于超过疲劳极限的应力振幅，纯镍试件周期性载荷各阶段所产生的滑移线扩展情况

图中可见，试件在加载的最初阶段（到破坏前总循环数的（1~10）%的阶段），在所有的晶粒上就会出现最初的滑移线。随着循环次数的积累，滑移线数随着循环次数的增加而增加，而且向其它晶粒转移，如图 1.1 所示。（这里的载荷振幅超过疲劳极限振幅）。这时周期性塑性变形和滑移线的形成过程几乎遍及试件的全部晶粒。

图 1.2 表明，在低碳钢试件上产生的晶粒滑移线随应力循环数的增加而变化。该应力幅小于疲劳极限。这时的特点是：滑移痕迹只在各个不利方位上的晶粒间形成，甚至在明显的循环数（例如，在  $4.6 \times 10^7$  次循环后，见图 1.2 中的 d 图）之后，也不向邻近的晶粒移动。在这种情况下，既不形

成宏观裂纹也不发生破坏。



(a)  $5 \times 10^4$  次循环后      (b)  $5 \times 10^5$  次循环后

(c)  $6.5 \times 10^6$  次循环后      (d)  $4.6 \times 10^7$  次循环

图 1.2 在循环应力幅不超过疲劳极限的情况下，低碳钢试件的滑移线随周期性载荷循环阶段的发展而扩展

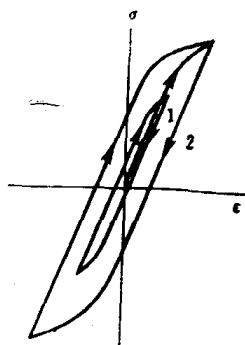
在不超过疲劳极限和比例极限应力的条件下，金属各晶粒的周期性塑性变形要消耗一定的能量，形成弹性迟滞回线，如图 1.3 所示。就各晶粒的塑性变形而言，每一种材料的每一次循环所消耗的能量与迟滞回线面积成正比。对于迟滞回线的面积和应力振幅大小、循环数、材料状态、温度以及其他因

素之间的关系进行研究,可以更深入地了解疲劳破坏机理,也能为制定疲劳破坏准则的能量处理方法准备前提条件。

最初滑移痕迹的形成,通常在试件的表面上。在此范围内,晶粒由于所处的条件和表面微观上的凹凸不平造成的应力集中而开始变形。文献给出纯铜试件疲劳试验的结果:在试验的各个阶段,对试件都要进行抛光,除掉约  $2\mu\text{m}$  厚这么一层。由于在  $0.27 \times 10^6$  次循环(试件循环总数的 7.5%)后进行了电抛光,滑移线

几乎完全被除掉。这个试验证明,在这个变形阶段滑移痕迹的侵入深度不超过  $2\mu\text{m}$ 。在  $1.51 \times 10^6$  次循环后,因电抛光去掉厚度为  $2\mu\text{m}$  的一层,多数滑移痕迹已经消失,但是称为疲劳滑移线的一系列滑移线却被剩下来,说明其深度已经超过了  $2\mu\text{m}$ 。在  $2.8 \times 10^6$  次循环后,若干个疲劳滑移线向邻近的晶粒转移,在  $3.65 \times 10^6$  次循环后,则明显地扩大,进而变成疲劳裂纹,导致最终的破坏。这些试验表明最初的疲劳损伤都集中在很薄的表层内。每当试件试验到最初寿命的 25% 之后,用电抛光除掉所有的疲劳滑移线,将这种试验一直进行完,其结果是试件的总寿命明显地超过最初寿命。

根据疲劳试验,在承受周期载荷的金属表面,观察称之为“挤出”和“陷入”的损伤情况。挤出时表面损伤是随着循环数



1— $\sigma < \sigma_s$ , 2— $\sigma > \sigma_s$   
图 1.3 在应力  $\sigma$  与变形  $\epsilon$  坐标系中,循环变形的迟滞回线

的积累而挤压出很薄的花瓣状突起(见图 1.4)。陷入时表面损伤是侵入金属的内部,逐渐变成疲劳裂纹起点的很浅的裂缝状的沟(或者凹陷)。表面上有挤出和陷入的试件的纵剖面如图 1.5 所示。

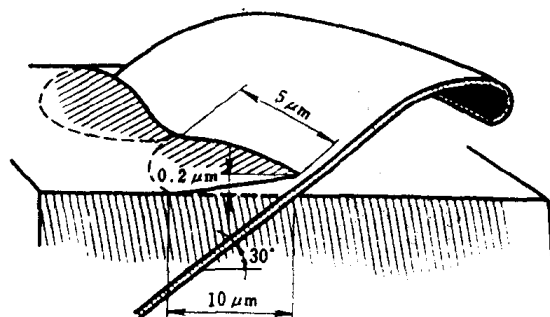


图 1.4 挤出时形成的损伤模式图

这样,由于疲劳滑移线、挤出及陷入,还由于其他的机理,通常在试件表面上就产生最初的宏观疲劳裂纹。靠近产生最初裂纹且从那里开始扩展的点的极微小区域叫做**疲劳破坏中心**。图 1.6 表示曲轴连杆轴颈疲劳破坏断面的状态。此图还能反映出其他破坏特征,如基本破坏特征区域及疲劳破坏和其他破坏形式(在静破坏中的脆性、延性及其他破坏)。

通常,破坏中心出现在表面上某个应力集中的地方,或者在有损伤、裂纹、非金属杂质的地方。当有内部缺陷存在时,或者在表面强化了(例如,渗碳、氮化等)的情况下,破坏中心可能出现在距试件表面一定深度的地方。

将靠近破坏中心,对应于初期宏观裂纹的极其狭窄的区域叫做**破坏源**。在破坏源处,破坏中心与破坏面其它部分比

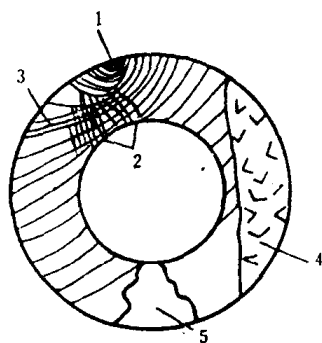
较,破坏中心具有最光亮且表面平滑的特征。破坏源的面上通常不存在疲劳条纹。在同一个破坏面上可能存在几个破坏源。若同时产生几个破坏源,则说明应力很大。破坏源出现的规律性,对于分析疲劳断面、查明破坏原因具有重要意义。



图 1.5 在周期性载荷作用下形成的试件表面的损伤  
(挤出和陷入)

裂纹的扩展部分与扩展中的疲劳裂纹区域是对应的。这个区域具有平滑而光亮的面。关于这点可以看一下断面的特征。疲劳裂纹面的光泽和粗糙度有好多种。最光亮(粗糙度最小)的面只在过载很小的情况下得到。这时裂纹扩展速度小,扩展时间长,某些疲劳裂纹面平滑光亮的形式不像以前所考虑的那样是由于裂纹面的相对配研造成的摩擦和硬化而产生的,而是与疲劳裂纹蔓延的微观选择性有关。在裂纹扩展区域,通常可以见到从破坏源向外辐射的波状疲劳条纹。这种疲

劳条纹是裂纹向前扩展的痕迹。疲劳条纹的出现多半与裂纹扩展方向上的某种变化有关。为此,使用显微镜检查法就能发现断面组织形成了很小的阶梯。产生疲劳条纹的其他原因有:使用过程中过载的大小变化,表面粗糙度的变化。疲劳条纹的形状与零件的形状和载荷的特性有关系。



1— 破坏中心和破坏源;2— 第二次阶梯及其接缝;3— 疲劳条纹;4— 破坏加速扩展区域;5— 瞬间破坏区域

在零件中往往产生从不同的中心出发的几个疲劳裂纹。这时初期裂纹互相平行地向外蔓延。其后

图 1.6 曲轴连杆轴颈疲劳破坏断面模式图

由于这些裂纹汇合的结果,使得在破坏面上形成阶梯和接缝。承受的应力越大,疲劳裂纹源的数目越多,破断面上出现的阶梯和接缝也越多。

初期裂纹的扩展方向往往改变(参照图 1.6),在这种情况下,会形成向其他方向扩展的分支裂纹的萌芽。由于分支裂纹的汇合,形成二次阶梯和接缝 2。加速扩展部分 4 是裂纹固有的疲劳扩展部分和瞬间破坏部分之间的过渡区域。该区域的形成时间比最终破坏要早几个循环。

瞬间破坏区域 5 在破坏的最后阶段形成,且具有宏观脆性破坏的特征。根据疲劳破坏面的形状和性质的研究,多数场

合下能够确定产生破坏之力的特性、已经破坏的零件承受过载的程度等,因而能够正确地确定造成零件破坏的原因,进而能够为预防再次破坏而采取对策。萌芽形成后的裂纹扩展与应力的分布特性有关,但是扩展在多数情况下和垂直应力的影响有关。受变应力(拉伸、压缩或弯曲)作用时,裂纹沿着最大垂直应力的作用面扩展。图 1.7 表示沿螺栓轴和头部结合的疲劳裂纹。裂纹面的法线几乎和最大垂直应力的方向一致。这样,扭转情况下的裂纹和柱面的母线成  $45^\circ$  角,即沿着和最大拉伸应力垂直的方向扩展。

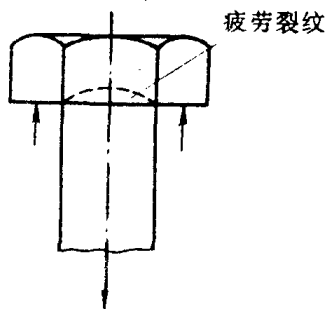


图 1.7 螺栓头部的  
疲劳裂纹

分析疲劳破断面时,广泛使用显微镜检查法来研究疲劳破断面的断口组织。

## § 1-2 疲劳裂纹的扩展规律

从绝大多数不同种类的机械(铁路车辆、汽车、拖拉机、农用及道路建设机械等的运动部分)的使用经验中得知,在使用过程中这些机械的零件将会出现疲劳裂纹。机械零件在制造时产生的缺陷(如,焊接件焊缝中的裂纹、焊接深度不够、铸件中的砂眼等)会形成初期裂纹。零件在工作载荷作用下,裂纹不断扩展,达到临界尺寸后,便会突然破坏。从最初的宏观

疲劳裂纹(其长度通常认为是  $0.1 \sim 0.5\text{mm}$ ) 发生的瞬间到零件最终破坏为止的使用时间(用行车公里数、零件的使用时间——小时数或年数、飞行时间等测量)称为零件的寿命。在工程中“零件寿命”这一概念具有重要意义,因为确定零件或构件具体的预防性安全检查的时间间隔时,需要用“寿命”作为自变量。

研究裂纹的扩展时,要使用断裂力学的方法和概念,特别是应力强度因子  $K_I (\text{N}/\text{mm}^{3/2})$  的概念。下面介绍一下,在简单情况下  $K_I$  的求法。

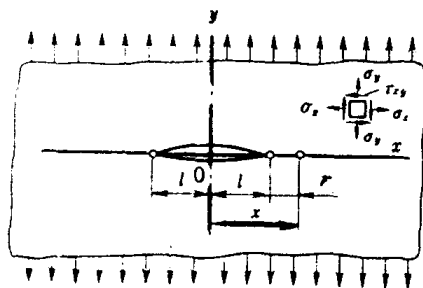


图 1.8 具有  $2l$  长裂纹的无限宽薄板的拉伸

如图 1.8 所示,薄板沿  $x$  轴方向为宽,其宽度无限大,沿  $x$  方向有长为  $2l$  的穿透裂纹,沿  $y$  方向板在无穷远处受到大小为  $\sigma$  的拉伸应力作用,垂直于裂纹面方向的分布应力为  $\sigma_y$ ,由 Irwin 公式

$$\sigma_y = \sigma \frac{x}{\sqrt{x^2 - l^2}} = \sigma \frac{l + r}{\sqrt{2lr + r^2}} \quad (1.1)$$

来决定。这里,  $x = l + r$  是从坐标原点到  $x$  轴上任意点的距离。 $r$  是从裂纹尖端到上述任意点的距离。当使该点趋近裂纹

的尖端时,由式(1.1)知:当  $x \rightarrow l$  或者  $r \rightarrow 0$  时,  $\sigma_y \rightarrow \infty$ , 即应力增到无限大。所以,不能用裂纹尖端的应力来表示具有裂纹的物体应力场强度的某种特征值。为了避开这个难点,可以按下述方法处理。先在式(1.1)的两边乘以  $\sqrt{2\pi r}$ , 进而求出  $r \rightarrow 0$  时的极限,可得

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma(l+r) \sqrt{2\pi r}}{\sqrt{2lr+r^2}} = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (1.2)$$

这样一来,上述的极限便存在了。用  $K_I$  表示等式左端,并称之为应力强度因子。由(1.2)式知,对于在与裂纹面垂直方向上受应力  $\sigma$  拉伸而处在平面应力状态的,具有裂纹长度为  $2l$  的无限宽平板来说(参照图 1.8),由(1.2)式可得应力强度因子为

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (1.3)$$

如果用其极限值  $K_I$  ( $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ ) 代换式(1.2)中极限记号内左边的近似函数,则得到  $\sigma_y$  的近似表达式,实际上在裂纹周围该式与基本公式(1.1)是一致的。 $K_I$  表示仅有拉伸变形,而不考虑剪切变形的情形。对于宽度为  $B$  的有限带状板,如图 1.9(a) 所示,裂纹长为  $2l$ ,沿裂纹面的垂直方向受应力  $\sigma$  拉伸,则  $K_I$  用近似公式

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} \sqrt{\frac{B}{\pi l} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi l}{B}\right)} \quad (1.4)$$

或更准确的公式

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{B}\right)} \quad (1.5)$$

表示。

当  $\frac{2l}{B} \leq 0.45$  时,式(1.4)和(1.5)之间的差别不超过

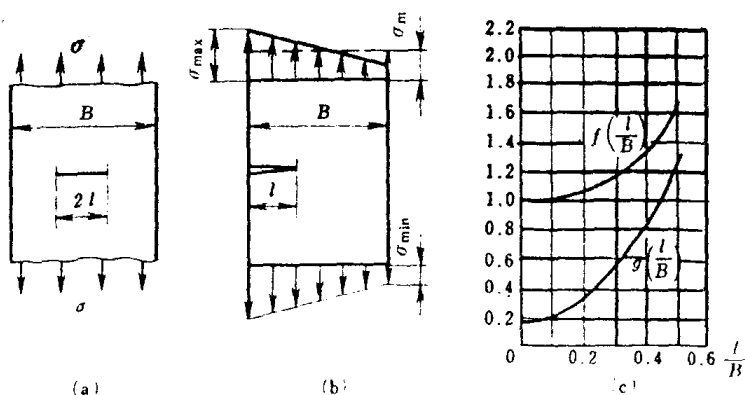


图 1.9 计算应力强度因子的示意图

10%。

图 1.9(b) 表示宽度为  $B$  的平板受偏心拉力作用, 裂纹长度为  $l$ , 拉伸应力呈直线分布, 最大应力为  $\sigma_{\max}$ , 平均应力为

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (1.6)$$

文献指出: 裂纹应力强度因子

$$K_I = \sqrt{\pi l} \left[ \sigma_{\max} f\left(\frac{l}{B}\right) + \sigma_m g\left(\frac{l}{B}\right) \right] \quad (1.7)$$

式中,  $f\left(\frac{l}{B}\right)$  和  $g\left(\frac{l}{B}\right)$  是图 1.9(c) 中所示的无量纲函数。

经研究知, 当裂纹远小于物体尺寸时, 应使用下式计算裂纹应力强度因子

$$K_I = C_1 \sigma \sqrt{\pi l} \quad (1.8)$$

这里,  $\sigma$  是分布在裂纹整个剖面上的标称应力;  $C_1$  是系数, 取值从  $\frac{2}{\pi}$  (相对于半径为  $l$  的圆板状裂纹) 到 1.12 (相对于表面

裂纹或者在根端部深度为  $l$  的裂纹)。

最具危险性的缺陷通常在物体表面,而且危险性大小与这些缺陷的相对尺寸成正比。所以,对这些缺陷的第一次近似而言,都可以取上述的  $C_1$  之值来进行计算。

关于疲劳裂纹扩展规律的研究,有许多论文。对于具有长度为  $2l$  的穿透裂纹的无穷大薄板的疲劳裂纹扩展速率描述,在许多文献中提出了各种各样的公式;然而,它们都可以近似地表示为

$$\frac{dl}{dN} = A\sigma^n l^m \quad (1.9)$$

这里,  $\frac{dl}{dN}$  是裂纹扩展速率(mm/循环);  $\sigma$  是分布于板的整个断面上的标称变应力(Pa);  $l$  是裂纹长度的一半;  $A, m, n$  是常数。

如果设  $m = \frac{n}{2}$ ,再考虑关于应力强度因子  $K_I$  的计算公式(1.3)的话,在公式(1.9)的右边便得到  $K_I$  的函数。考虑到这种情况,Paris 提出了关于疲劳裂纹扩展速率的公式为

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K_I)^n \quad (1.10)$$

这里,  $\Delta K_I = K_{I \max} - K_{I \min}$  是应力强度因子幅( $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ )。根据式(1.3), (1.5 ~ 1.8), 用每次循环的最大应力  $\sigma_{\max}$  和最小应力  $\sigma_{\min}$  取代  $\sigma$ , 在这些应力都是拉应力,即应力比为  $R \geq 0$  (符号不变的循环)的条件下,可求出  $K_{I \max}, K_{I \min}$ 。

如果最小应力是负值(符号变化的应力循环,  $R < 0$ ), 计算公式(1.10)中的  $\Delta K_I$  时, 设  $K_{I \min} = 0$ 。在 Irwin 和 Paris 的论文中, 引用下列的常数值。在室温的大气中做试验, 对于所有的钢均取  $n = 4$ ; 对于强度在中等以下的钢, 其裂纹平均增