

断裂力学的基本概念



第 1 章 图片

1.1 断裂力学概述

断裂力学是固体力学的一个重要领域^[1],其将力学、材料学、物理学与数学、工程科学紧密结合,是一个涉及多学科交叉融合的固体力学专业。断裂力学的主要研究内容是结构在受到应力和应变等作用下的裂纹体的行为,如裂纹的萌生和扩展规律等。这些作用的应力和应变可以来自外加载荷或自平衡应力场(如残余应力)。

断裂力学所研究的裂纹是宏观的、肉眼可见的裂纹。工程材料中存在的各种缺陷也可近似地看作裂纹。由于在实际情况中无法制造没有缺陷的完美材料,在结构设计和评估中,不能只考虑均匀材料的强度因素。断裂力学中引入了新的材料参数将试验数据和真实的结构设计相联系,即“裂纹驱动力”。裂纹驱动力的临界值称为“断裂韧性”,用于描述材料存在裂纹时抵抗断裂的能力。当裂纹驱动力等于断裂韧性时,施加载荷、裂纹尺寸和结构几何之间会建立联系。断裂力学就是研究含有裂纹的结构破坏条件、在一定的载荷下可允许结构中存在的裂纹尺寸、裂纹尺寸随时间变化、在含有裂纹和特定的工作条件下结构的剩余寿命等内容的学科。

断裂力学有一个假设:所有工程材料从其包含的裂纹处开始失效。因此需要格外关注裂纹附近的应力分布。具体做法是用裂纹尖端周围的渐进场来描述裂纹尖端周围的局部变形,这些裂纹尖端的渐进场是由外部加载或自平衡应力场和结构整体的几何形状参数来衡量的。根据裂纹尖端非弹性变形的程度又发展了线性和非线性理论用于处理断裂物体的应力场。

断裂力学的研究分类有不同的方法:按照材料断裂的难易程度划分,可以分为脆性断裂和韧性断裂;按照材料的弹塑性特征划分,可以分为线性弹性断裂力

学和弹塑性断裂力学；按照研究的尺度划分，可以分为原子尺度($<10^{-8}$ m)的材料断裂、亚微米尺度($10^{-8} \sim 10^{-4}$ m)的材料断裂、试样尺度($10^{-4} \sim 10^0$ m)的材料断裂和工程尺度($>10^0$ m)的材料断裂；按照裂纹扩展的速度划分，可以分为静止裂纹、亚临界裂纹扩展和裂纹失稳扩展。

1.2 材料的断裂机制

典型的工程材料，如金属材料和非金属材料，有两种主要的断裂模式：脆性断裂和韧性断裂，与之对应的材料分别称为“脆性材料”和“韧性材料”。断裂的主要表征量为材料的断裂韧度，是材料在断裂前的弹塑性变形中吸收能量的能力。脆性材料对应于断裂韧度较低的材料，而韧性材料对应于断裂韧度较高的材料。

(1) 脆性断裂

尽管脆性断裂在人类社会中是再普遍不过的现象，如劈柴、雕塑、材料切割等手工作业或结构建筑过程，但此类问题在全焊接结构诞生后才日益尖锐。在通过铆钉等构件连接的结构中，断裂常常终止于连接处；但在焊接结构中，裂纹却会通过焊缝扩展。典型的例子是第二次世界大战期间，在未考虑断裂力学因素而存在设计缺陷的油轮和货船上，常伴随巨大的断裂声。

对于脆性断裂，在一定的载荷作用下，裂纹迅速扩展，结构整体几乎没有塑性变形发生。如玻璃、粉笔和陶瓷等，均属于低韧度、低塑性的材料，它们在发生断裂前，没有明显的塑性变形发生。绝大多数脆性断裂起始于材料的初始缺陷，扩展速度快，大多发生于低温环境。

此外，对于脆性材料，即使施加到结构上的载荷不再增加，材料中产生的裂纹往往会继续扩展。典型的脆性断裂示意图如图 1-1 所示。



图 1-1 典型的脆性断裂示意图

作为脆性断裂的一个特殊例子，多晶体材料的脆性断裂表现为穿晶断裂(裂纹)或沿晶断裂，这取决于晶界是比晶粒更强还是更弱。如果晶界更强，则易发生穿晶断裂，反之则易发生沿晶断裂，二者的示意图如图 1-2 所示。

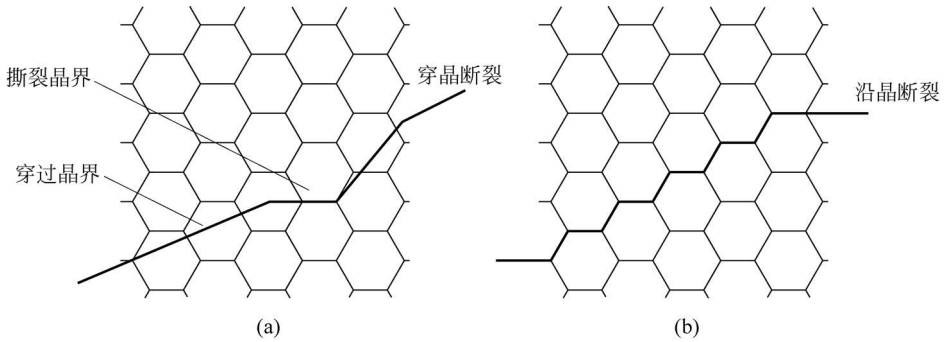


图 1-2 穿晶断裂和沿晶断裂的示意图

(a) 穿晶断裂；(b) 沿晶断裂

(2) 韧性断裂

韧性断裂是指构件经过大量变形后发生的断裂行为。其主要特征是发生了明显的宏观塑性变形(不包括压缩失稳),如杆件的过量伸长或弯曲、容器的过量鼓胀。断口的尺寸(如直径、厚度)相对于原始尺寸也有明显变化。韧性断裂的断口(图 1-3)一般能发现明显的纤维区和剪唇区,形成凹陷的、杯状的断口外观。当断口尺度较大时还会出现放射形和人字形山脊状花纹。形成纤维区断口的断裂机制一般是“微孔洞的聚合”,在电子显微镜中呈韧窝状花样。总之,韧性断裂表面有较大的颈部区域,总体上比脆性断裂的裂纹表面更加粗糙。

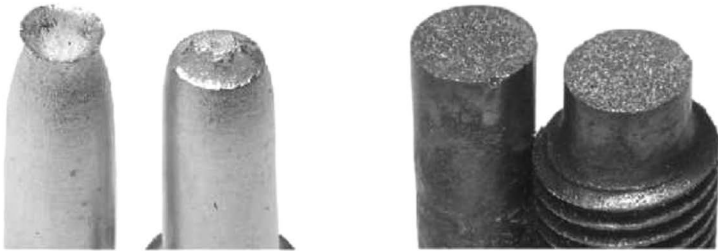


图 1-3 韧性断裂的断口形貌

高韧度材料不容易发生断裂,在断裂前往往有明显的塑性变形发生,会吸收大量能量。如低强度合金钢,在断裂前必定会伸长并发生颈缩现象,是塑性大、韧度高的金属材料。

材料在发生韧性断裂的过程中通常有三个典型的阶段:孔洞成核、孔洞生长和孔洞连接凝聚形成裂纹,如图 1-4 所示。韧性断裂的裂纹通常扩展得较为缓慢,并伴有明显的塑性变形。除非施加到结构上的载荷继续增加,否则韧性裂纹通常不会扩展。

为了有效预测材料的断裂过程,人们提出了不同的理论:

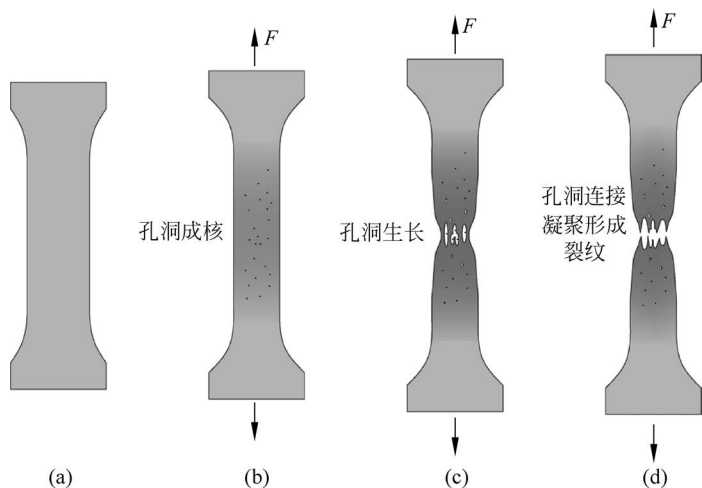


图 1-4 典型的韧性断裂过程示意图

(1) 线性弹性断裂力学理论 (linear elastic fracture mechanics, LEFM)

线性弹性断裂力学是线性弹性力学的一个分支,线性弹性断裂力学理论假设全场的材料均处于弹性状态,由线性弹性力学的基本方程可以推得裂纹尖端具有奇异性的特征,可主要用于解决脆性材料的断裂问题。

(2) 内聚力区模型 (cohesive zone model, CZM)

内聚力区模型在裂纹尖端引入了内聚力的概念,裂纹表面的内聚力表示为裂纹张开位移的函数,避免了线性弹性力学中裂纹尖端的奇异性问题,被广泛应用于解决具有一定黏结能力的界面断裂问题等。

(3) 弹塑性断裂力学理论 (elastic-plastic fracture mechanics, EPFM)

弹塑性断裂力学是弹塑性力学的一个分支,弹塑性断裂力学理论假设材料是弹塑性的(针对具体问题,还会有更多的假设,以获得解析解),可用于解决韧性材料的断裂问题。

后续章节将对上述理论分别进行说明和讨论。

1.3 线性弹性断裂力学

断裂力学的早期发展是建立在线性弹性力学理论基础之上的,即材料是理想的线性弹性材料,如玻璃、岩石、陶瓷等非常脆的材料。对于常见的工程材料,在一定的条件下,可将其看作理想的线性弹性材料,通过 Irwin 和 Orowan 的修正引入塑性功,在假设裂纹尖端塑性区远小于裂纹特征尺寸的前提下,可以成功应用线性弹性断裂力学理论^[2]。线性弹性断裂力学的一个主要目的是预测脆性材料中裂纹扩展的临界载荷,也可用来评估工作载荷下材料容许的最大裂纹尺寸。

1.3.1 断裂模式

线性弹性断裂力学根据上下裂纹面的运动方式考虑了材料的三种相互独立的断裂模式：I型断裂、II型断裂和III型断裂，如图1-5所示，所有裂纹表面的变形模式都可以看作这三种模式的叠加。

(1) I型断裂：施加的力(载荷)垂直于裂纹面，将裂纹拉开。这种断裂模式也被称为“张开断裂模式”(opening mode)。

(2) II型断裂：施加的力(载荷)与裂纹面平行，从而产生了一个剪切裂纹。这种断裂模式也被称为“面内剪切断裂模式”(sliding mode)。具体而言，II型断裂是一个力将裂纹的上半部分向后推，另一个力将裂纹的下半部分向前拉，两个力都沿着同一条直线，裂纹沿着面内方向滑动。这两个力只会引起面内的变形，不会引起面外的变形。

(3) III型断裂：施加的力(载荷)是横跨裂纹的，导致材料分离并沿着裂纹面的平行方向发生横向的滑动，从而离开了原来的裂纹平面。这种断裂模式也被称为“面外剪切断裂模式”(tearing mode)。

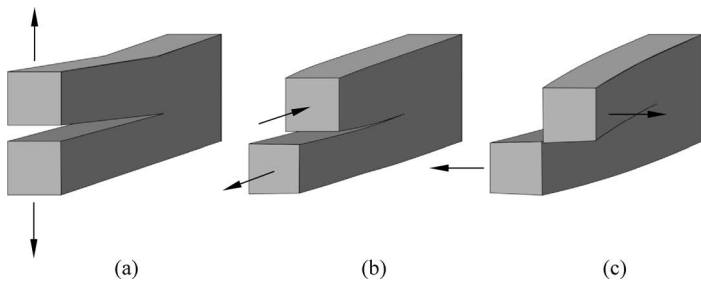


图 1-5 线性弹性断裂力学中的三种断裂模式

(a) I型断裂；(b) II型断裂；(c) III型断裂

1.3.2 应力强度因子

对于各向同性的线性弹性材料，线性弹性断裂力学理论使用单一参数，即应力强度因子 K ，来描述线性弹性(脆性)材料中的局部裂纹尖端应力场的强度(应力强度)^[3]。应力强度因子是损伤容限学科中的一项关键力学参数，主要用于提供脆性材料的失效准则。应力强度因子的概念也适用于在裂纹尖端表现出小规模屈服的材料。应力强度因子具有以下典型特性：

(1) 应力强度因子取决于作用的应力、裂纹的长度和位置，以及试样的几何形状和尺寸。

(2) 应力强度因子是由远程加载下尖锐裂纹尖端附近的弹性应力场(或残余应力场)定义的。

(3) 应力强度因子可以用于预测裂纹尖端附近的应力状态(这也是“应力强度”这个概念的来源)。

(4) 当应力强度因子到达一个临界值时,小裂纹就会增长(“扩展”),材料就会失效。这个临界值(K_C)即表示材料的断裂韧性(它是一种材料属性,将在后文进一步讨论)。

施加载荷、裂纹长度和几何因素对于裂纹尖端局部应力场的影响都是通过应力强度因子描述的;也就是说,就算断裂物体的施加载荷、裂纹长度和几何因素不同,如果应力强度因子相同,裂纹尖端的应力场和变形场也相同。

应力强度因子的确定主要通过理论计算、数值方法和试验测试来确定。对于裂纹形状和边界条件简单的情况,可以通过理论计算来确定;但对于其他复杂情况,需要通过数值模拟和试验测试来确定。数值方法是本书的一个重点,详情见第7章。

1.3.3 裂纹尖端的渐进解

裂纹尖端附近的应力场和应变场采用裂纹尖端周围的系列渐进解表示,且只在裂纹尖端附近的一个小区域内有效。这个区域的大小是由小范围屈服假设(稍后讨论)来量化的。应力强度因子是将局部裂纹尖端区域与问题的整体联系起来的参数。

考虑如图1-6所示的裂纹尖端的局部坐标系,裂纹尖端应力场的渐进解的主导项的表达式为

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{II}(\theta) + \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{III}(\theta) \quad (1-1)$$

式中, r 是到裂纹尖端的距离, $\theta = \arctan\left(\frac{x_2}{x_1}\right)$, K_I 是 I 型裂纹(张开模式)的应力强度因子, K_{II} 是 II 型裂纹(面内剪切模式)的应力强度因子, K_{III} 是 III 型裂纹(横向剪切模式)的应力强度因子, f_{ij}^a 定义了断裂模式 a ($a = I, II, III$) 的应力随角度的变化函数。

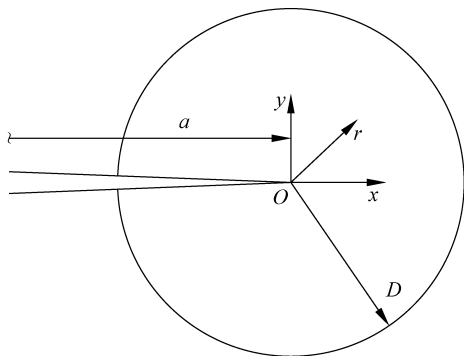


图 1-6 裂纹尖端的局部坐标系

1.3.4 裂纹尖端的奇异性

在线性弹性(脆性)材料中,预测的裂纹尖端的应力状态拥有平方根奇异性,称为裂纹尖端的“奇异性”,其反映了线性弹性断裂力学理论中裂纹尖端的应力场(或应变场)具有集中的特点:

$$\sigma_r \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (1-2)$$

但是,据此关系必然可以得出裂尖点处($r=0$)的应力或应变为无穷大,此即裂纹尖端的奇异性,与真实情况不符。在现实结构中,不会出现无穷大的应力场或应变场,裂纹尖端总是被断裂过程区包围,在断裂过程区内会发生塑性变形和材料的损伤与破坏,应力的水平也受到了限制。因此,在这个区域内,线性弹性断裂力学理论的奇异解是无效的。在这个区域之外(离断裂过程区足够“远”的地方),只要塑性区或损伤区足够小,就可以认为线性弹性断裂力学理论的解是准确的,这就是所谓的小范围屈服(后文会进一步讨论)。

1.3.5 双参数断裂力学

在线性弹性材料中,围绕尖锐裂纹的 I 型断裂的应力场相对于 r (距裂纹尖端的距离)的威廉姆斯扩展(Williams' expansion)可以表示为

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T\delta_{1i}\delta_{1j} + O(r^{1/2}) \quad (1-3)$$

因此,应力 T 代表平行于裂纹面的应力。应力 T 的大小影响着塑性区的大小和形状,以及裂纹尖端前面的拉伸三轴区域。对于正的应力 T ,存在 J 积分主导性,单一参数 J 可用于断裂准则。对于负的应力 T ,需要采用双参数方法(J, T)来描述应力场的特征。

1.3.6 关于断裂韧性的一些讨论

材料的断裂韧性在很大程度上取决于温度,一个典型的金属材料的断裂韧性随温度的变化曲线如图 1-7 所示。当温度较低时,材料的断裂韧性较低,材料表现为偏脆性的行为;当温度较高时,材料的断裂韧性较高,但是不会随温度的增高持续增高,而是存在一个上限,材料表现为偏韧性的行为;从脆性到韧性存在一个过渡区,在该过渡区内,材料的断裂韧性随温度升高有大幅升高。

典型金属的脆性-韧性转换温度范围取决于材料自身。对于许多普通的金属材料,它可能位于设计的合理操作温度范围内,因此在研究其断裂时,必须考虑断裂韧性的温度依赖性。

大量的实验表明,材料的断裂韧性 K_C 是试样厚度的函数,典型金属材料的断

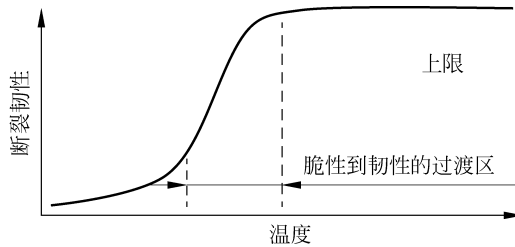


图 1-7 典型金属材料的断裂韧性随温度的变化曲线

断裂韧性随试样厚度的变化曲线如图 1-8 所示。在平面应变条件下,可以给出 K_{IC} 的实际最小值。平面应变条件下的断裂韧性通常是通过实验确定的数值。然而,如果是薄板材料的断裂研究,选择 K_{IC} 介于平面应力和平面应变条件之间是比较合适的。

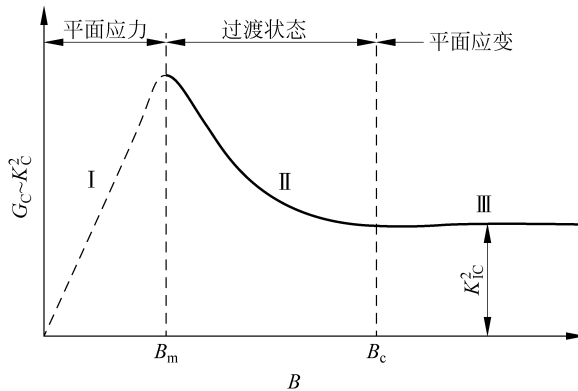


图 1-8 典型金属材料的断裂韧性随厚度的变化曲线

G_C 为材料的临界能量释放率; B 为材料的厚度; B_m 为平面应力状态转换到过渡状态的临界厚度; B_c 为过渡状态转换到平面应变状态的临界厚度

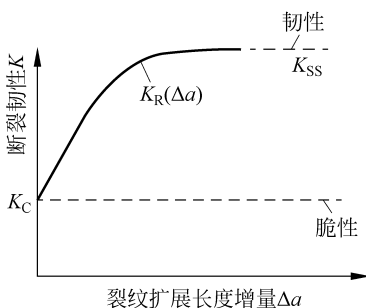


图 1-9 裂纹扩展的阻力曲线

除了温度和试样厚度,材料的断裂韧性也是裂纹扩展长度 Δa 的函数,记为 $K_R(\Delta a)$ 。作为裂纹扩展长度的函数的断裂韧性称为裂纹扩展的“阻力曲线”(图 1-9),其通常被用来预测裂纹扩展的稳定性。当 $\Delta a = 0$ 时, $K_R(\Delta a = 0) = K_C$ 。

1.3.7 裂纹扩展的稳定性

如果初始裂纹扩展导致裂纹尖端阻力的变化相对于裂纹尖端载荷的变化为负值,即使加载保持不变,裂纹也会继续扩展。此时,裂纹被定义为不稳定的;反之,则为稳定的。

当裂纹的长度为 $a + \Delta a$ 时, 裂纹持续扩展的条件为

$$K_{\text{applied}} = K_{\text{R}}(\Delta a) \quad (1-4)$$

因此, 裂纹稳定持续扩展的条件是

$$\left. \frac{\partial K_{\text{applied}}}{\partial a} \right|_{\text{load}} < \frac{dK_{\text{R}}}{d\Delta a} \quad (1-5)$$

1.3.8 小范围屈服

小范围屈服 (small scale yield, SSY) 是断裂力学中一个非常有用的概念。当裂纹尖端塑性区域的线性延伸相对于试样特征尺寸和裂纹长度很小时, 裂纹尖端的应力场就被认为是材料内部的弹性力所导致的^[4]。小范围屈服不是一个精确的定义, 一般是指裂纹尖端的非弹性变形区域完全包含在线性弹性断裂力学渐进解所主导的区域内, 因而在该区域外, 线性弹性断裂力学的理论仍然适用。为了使线性弹性断裂力学理论有效, 在裂纹尖端周围必须有一个环形区域, 其中线性弹性力学的渐进解对完整的应力场有一个很好的近似, 该区域通常称为“K 主导区”, 如图 1-10 所示。

需要指出的是, 断裂过渡区和塑性区的尺寸必须足够小, 这样才能满足小范围屈服的条件。裂纹尖端塑性区的典型形状如图 1-11 所示。

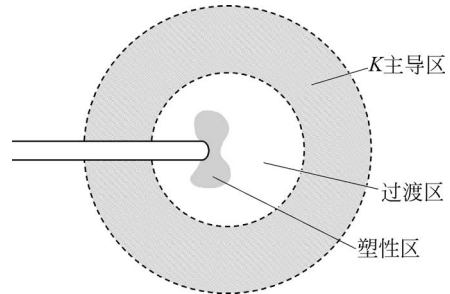


图 1-10 裂纹尖端的区域划分示意图

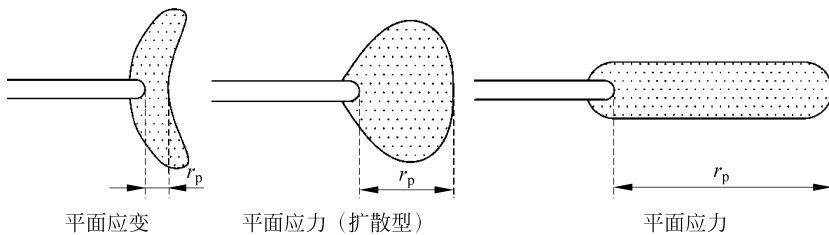


图 1-11 裂纹尖端塑性区的典型形状

设 t 为厚度, 对于平面应变的情况, $r_p \ll t$; 对于平面应力的情况, $r_p \gg t$ 。塑性区的大小可以通过在线性弹性断裂力学渐进解中设置 $\sigma_{22} = 0$ 来估计。其中, σ_0 是材料的屈服应力。这就得到了裂纹尖端塑性区 (I 型断裂) 的大小:

$$r_p \approx \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_{\text{I}}}{\sigma_0} \right)^2, \quad \text{平面应变} \quad (1-6)$$

$$r_p \approx \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{\text{I}}}{\sigma_0} \right)^2, \quad \text{平面应力(扩散型)} \quad (1-7)$$

$$r_p \approx \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_0} \right)^2, \quad \text{达格代尔模型 (Dugdale model)} \quad (1-8)$$

由于跨越塑性区边界的牵引力没有净力或力矩(圣维南原理, Saint-Venant principle), 其对塑性区周围的弹性场的影响随与边界距离的增大迅速衰减, 在约 $3r_p$ 时可以忽略。

线性弹性断裂力学预测裂纹尖端的应力是无限的——显然这是不现实的。但是, 如果裂纹尖端附近的非弹性变形区域足够小, 在这个区域之外有一个有限的区域, 使线性弹性断裂力学的渐进解是准确的, 就可以使用线性弹性断裂力学的结果。

若 a 是断裂问题中的一个特征尺度(如剩余韧带的尺寸或厚度或裂纹长度), 那么, 为了有一个 K 场占主导地位的有限区域(半径 r_K), 需要满足以下条件:

$$a/5 > r_K > 3r_p \approx \frac{1}{2} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (1-9)$$

或

$$a > 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (1-10)$$

这是 ASTM 标准 E-399 中对有效 K_{IC} 测试试样尺寸的限制。 K_{IC} 是 I 型断裂中的 K_C (断裂韧性)。断裂韧性代表启动裂纹生长所需的 K 的临界值。

对于一些典型的金属材料, r_p 是通过匹配 K 场的屈服应力和米塞斯应力来计算的, 最小特征长度是用 ASTM 标准极限来计算的。表 1-1 所示为典型材料的相关参数。对于具有高断裂韧性的材料, 进行有效断裂试验的试样尺寸非常大。

表 1-1 典型材料的相关参数

材 料	$T/^\circ\text{C}$	σ_0/MPa	$K_{IC}/(\text{MN}/\text{m}^{3/2})$	r_p/mm	特征尺寸/mm
A061-T651(铝)	20	269	33	5	38
A075-T651(铝)	20	620	36	0.35	8.4
AISI 4340(钢)	0	1500	33	0.05	1.2
A533-B(钢)	93	620	200	11	260

1.3.9 断裂力学中的能量考虑

在 20 世纪 20 年代初, 英国航空工程师格里菲斯(Griffith)首先应用能量原理的方法, 通过一系列实验、应力分析和对先前工作的综合分析, 建立了脆裂应力、裂纹尺寸和材料性质之间的定量关系, 奠定了现代断裂力学的理论基础^[5]。格里菲斯理论(Griffith theory)指出, 当因裂纹增长而发生的势能减少大于或等于因产生新的自由表面而增加的表面能时, 裂纹就会扩展。格里菲斯理论适用于以脆性方式断裂的弹性材料。

格里菲斯理论在研究断裂力学问题中发挥着重要作用, 这是因为裂纹的扩展