

# 金属断口分析

崔约贤 王长利 编著

哈尔滨工业大学出版社

TG115

C98

429199

# 金属断口分析

崔约贤 王长利 编著  
姚 枚 主审



00429199

哈尔滨工业大学出版社

02/40/102

## 内 容 提 要

本书主要讲述金属断裂的分类、材料的韧性及断裂力学知识,断口分析技术与典型断口的宏观、微观特征和断裂机制,还列举了机械零件失效实例及其分析过程。

本书可作为大专院校材料、机械等专业教材,也可供从事失效分析、产品质量检验及管理的专业人员参考。

## 金 属 断 口 分 析

Jinshu Duankou Fenxi

崔约贤 王长利 编著

姚 枚 主审

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

\*

开本 850×1168 1/32 印张 7.625 字数 191 千字

1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—5 000

ISBN 7-5603-1290-X/TG·40 定价 12.00 元

# 前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合性的技术,在一些国家中已将它作为一门新的独立学科加以研究和发展。编写本书的目的在于让读者了解失效分析中经常涉及的断裂力学基本知识,金属材料断裂的分类,断口分析及典型断裂:延性断裂、解理断裂、准解理断裂、疲劳断裂、氢脆断裂、应力腐蚀断裂及其它断裂断口的宏观、微观特征,断裂失效机理及影响因素。结合机械零件失效实例按分析程序对失效零件进行案例分析,以使读者对分析过程有所了解,对材料断裂的研究除要在宏观全面细致分析外还必须深入微观领域,否则断裂的机理弄不清楚,对宏观断裂的现象就不能深入了解,甚至对一些宏观现象无法解释。作者力图较系统地对本领域的有关成果加以介绍,为读者了解金属断裂分析技术,掌握机械失效分析理论奠定基础。

本书写作得到了第一重机厂姚铁光高级工程师的大力支持,为本书提供了有价值的资料与照片。全书由姚枚教授主审,姚老师给予了热情指导并提出了宝贵的修改意见,在此致以衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中一定存在缺点和错误,请广大读者批评指正。

编 者  
1998年3月

# 目 录

<b>第一章 金属的断裂</b> .....	1
第一节 断裂的分类.....	1
第二节 材料的韧性及断裂力学简介.....	5
<b>第二章 断口分析技术</b> .....	21
第一节 裂纹源位置的判别 .....	21
第二节 断口试样的截取、清洗及保存.....	24
第三节 断口分析技术 .....	27
<b>第三章 延性断裂</b> .....	34
第一节 韧窝断口的宏观形貌特征 .....	34
第二节 韧窝断口的微观形貌特征 .....	36
第三节 韧窝裂纹的萌生扩展及韧窝形成的微观机理 .....	40
第四节 滑移分离 .....	45
<b>第四章 解理断裂</b> .....	52
第一节 解理断口宏观形貌特征 .....	53
第二节 解理断口微观形貌特征 .....	53
第三节 解理裂纹的萌生和扩展 .....	66
第四节 解理断裂的影响因素 .....	69
<b>第五章 准解理断裂</b> .....	71
第一节 准解理断口形貌特征 .....	71
第二节 准解理断裂机理 .....	73
<b>第六章 疲劳断裂</b> .....	76
第一节 疲劳断口的宏观形貌特征 .....	77
第二节 疲劳断口的微观特征 .....	92
第三节 低周疲劳断口的特征 .....	120
第四节 疲劳破坏机理.....	124
第五节 疲劳断口的定量分析.....	138

<b>第七章 氢脆断裂</b> .....	154
第一节 氢脆断口的形貌特征.....	155
第二节 钢中的白点.....	159
第三节 氢脆的机理.....	163
<b>第八章 应力腐蚀破裂</b> .....	165
第一节 应力腐蚀断口形貌和特征.....	169
第二节 应力腐蚀破裂过程及机理.....	174
第三节 常用金属材料的应力腐蚀.....	181
第四节 应力腐蚀的影响因素及防护措施.....	195
<b>第九章 其它断裂</b> .....	202
第一节 脆性沿晶断裂.....	203
第二节 延性沿晶断裂.....	211
第三节 过烧断口.....	213
第四节 蠕变断裂.....	213
第五节 混合断裂.....	216
<b>第十章 失效分析举例</b> .....	219
第一节 材料缺陷引起的失效.....	219
第二节 机械加工中的缺陷引起的失效.....	228
第三节 机械过载引起的损坏事故.....	230
<b>参考文献</b> .....	235

# 第一章 金属的断裂

工程构件或机械零件的尺寸、形状或材料性能都会在某种外界因素的作用下发生变化,甚至发生局部或整体的破断,导致其无法或不能满意地执行预定的功能,我们将其称之为机械失效现象。只有能正确地辨认和评价可能影响设计和产品生产的全部潜在失效形式,才能成功地设计并生产出能够防止过早出现失效现象的产品。这就要求设计人员、生产技术人员至少能熟悉可在现场观察到的各种失效形式,以及这些失效形式发生的条件,它们的特点,并且掌握失效预测的分析技术和实验技术、故障的分析的综合技能,只有这样才能在设计中,在失效预防上采取主动而有效的措施,根据对性能、寿命、重量、成本等所有要求的评价准则,作出最佳设计。同时,这些知识,对于科学地应用机械产品也具有指导意义。

## 第一节 断裂的分类

通常,根据失效形式,导致失效的因素和失效的部位对失效进行分类,基本的失效形式有以下四种:

过大的弹性变形;塑性变形;破裂或断裂;材料变化(包括金相变化、化学变化和核变化)。

导致失效的有以下主要因素:力、时间、温度、工作环境的影响。失效的部位分为:整体型和表面型。

在四种失效形式中,破裂特别是断裂是最主要的最具危害性的失效。为了掌握断裂产生的机理,寻找预防断裂失效的措施,材料科学家、力学工作者及工程技术人员对断裂问题作了大量的实验研究和理论分析工作。而对已出现的各类断口的实际观察与研究

究就是其中最常采用的有效手段。

不同的材料和受力状态,不同的作用时间和温度以及不同的环境条件下产生的断裂,可表现为断口形貌特征的具体差异,具体地分析各种断口形貌与各种因素的内在关系是借以揭示金属断裂机理,进行事故分析及采取预防措施非常重要的方面。因此,近年来断口分析技术和分析仪器发展很快,断口分析也取得了大量理论的和实用性成果。

## 一、宏观脆性断裂与延性断裂

从宏观现象上看,断裂可分为脆性断裂和延性断裂。

脆性断裂表现为以材料表面、内部的缺陷或微裂纹为源,在较低的应力水平下(通常不超过材料的屈服强度),在无塑性变形或只有微小塑性变形的情况下裂纹急速扩展。在出现宏观裂纹后裂纹的扩展速度迅速上升到某个极限速度,大约可达声波在该材料中传播速度的三分之一。在多晶体材料中,断裂是沿着各个晶体内部的解理面产生的,但由于材料中各个晶体及解理面的方向是变化的,因而断裂表面在外观上呈现粒状。脆性断裂有时主要沿晶界产生,因而称为晶间断裂。脆性断口较平齐,且与正应力相垂直,断口附近的截面,在厚度上的收缩很小,一般不超过 3%。断口上常有人字纹或放射花纹。由于脆性断裂前很难发现预兆,断裂时又容易产生很多碎片,是一种非常危险的突发事件,危害较大。

延性断裂是在较大的塑性变形之后发生的断裂。它是由于裂纹的缓慢扩展而造成的,而这种裂纹扩展又起源于孔穴的形成和合并。延性断裂的断口表面外观特征为无光泽的纤维状。大多数多晶体金属的拉伸试验的延性断裂有三个明显的阶段。首先,试样开始出现局部“颈缩”,并在“颈缩”区域产生小的分散的空穴,接着这些小空穴不断增加和扩大并聚合成微裂纹,裂纹方向一般垂直于拉应力方向。最后,裂纹沿剪切面扩展到试件表面,剪切面方



向与拉伸轴线近似成  $45^\circ$ 。这三个阶段就构成了通常所见的典型的“杯锥”失效断面。因为延性断裂在断裂前出现大量的塑性变形,有明显的失效预兆,它对构件和环境造成的危险性远小于脆性断裂。

## 二、穿晶断裂与沿晶断裂

依裂纹扩展途径的不同,可把断裂分为穿晶断裂和沿晶断裂,也有二者兼而有之的混合型。

多晶金属的断裂若是以裂纹穿过晶粒内部的途径发生的,称为穿晶断裂,如图 1-1(a)所示。穿晶断裂可能是延性的,也可能是脆性的。若断裂是穿过晶体沿解理面断开,但并无明显的塑性变形时为脆性断裂。若穿晶断裂时出现明显的塑性变形则为延性断裂。

若断裂是以裂纹沿着晶界扩展的方式发生的,称为沿晶断裂,如图 1-1(b)所示,晶界上存在脆性相,焊接热裂纹,蠕变断裂、应力腐蚀一般都呈沿晶断裂特征。沿晶断裂多数属脆性断裂,但也有延性的。若断裂是沿晶进行,但晶粒无明显的塑性变形的属脆性断裂,如钢中因回火脆性后的断口,应力腐蚀断口,氢脆断口等。

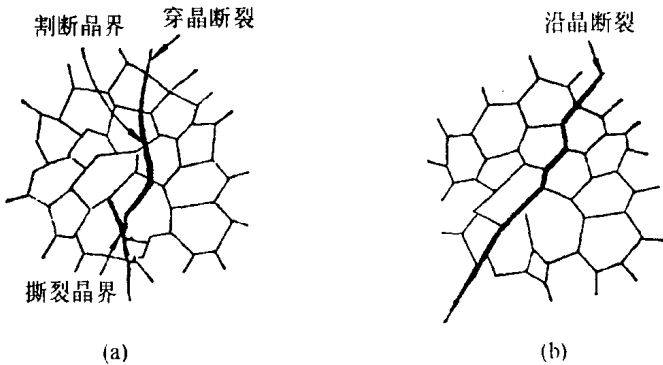


图 1-1 穿晶断裂(a)沿晶断裂(b)示意图

若沿晶界断裂,而晶粒又可见塑变即为延性断裂,如某些材料在高温下的拉伸断口。

### 三、韧窝、解理(及准解理),沿晶和疲劳断裂

从微观断裂的机制上可把断裂分为韧窝、蛇形滑移、解理、准解理、沿晶和疲劳断裂等。以后的章节将作详细讨论。

### 四、正断与切断

根据断面的宏观取向与最大正应力的交角,断裂方式又可分为正断型和切断型两种。

1. 正断型断裂,宏观断面的取向与最大正应力相垂直,常见于解理断裂或形变约束较大的场合,例如平面应变条件下的断裂。

2. 切断型断裂,宏观断面的取向与最大切应力方向相一致,而与最大正应力约呈  $45^\circ$  交角,常发生于滑移形变不受约束或约束较小的情况,例如平面应力条件下的撕裂。

### 五、工艺性断裂及使役性断裂

以初始裂纹形成的原因可分为工艺性断裂及使役性断裂,分清两种类型,对故障分析及诊断是重要的。

1. 工艺性断裂,若断裂是由某一工艺所致的初始裂纹扩展而发生的,属工艺性断裂。常见的工艺裂纹有铸造裂纹、锻轧裂纹、焊接裂纹、白点、热处理裂纹、磨削裂纹和皱裂、皱折等,粗糙的机加痕迹或其它可引起过大应力集中的几何形状也是引发工艺裂纹的潜在因素。

2. 使役性断裂,因使役环境条件、温度及时间等原因而萌发裂纹,并扩展导致断裂的属使役性断裂。应力腐蚀(包括氢脆),疲劳断裂,蠕变及韧性撕裂等属使役性断裂。

## 第二节 材料的韧性及断裂力学简介

### 一、低应力脆断及材料的韧性

人们在对船舶的脆断、无缝输气钢管的脆断裂缝、铁桥的脆断倒塌、飞机因脆断而失事、石油、电站设备因脆断而发生重大事故的分析中,发现了一些它们的共同特点:

1. 通常发生脆断时的宏观应力很低,按强度设计是安全的;
2. 脆断事故通常发生在比较低的工作温度环境下;
3. 脆断从应力集中处开始,裂纹源通常在结构或材料的缺陷处,如缺口、裂纹、夹杂等;
4. 厚截面、高应变速率促进脆断。

由此,人们发现了传统设计思想和材料的性能指标在强度设计上的不足,试图提出新的性能指标和安全判据,找到防止脆断的新的设计方法。

传统的强度设计所依据的性能指标主要为弹性模量  $E$ 、屈服极限  $\sigma_s$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ ,而塑性指标延伸率  $\delta$  和面收缩率  $\psi$  在设计中只是参考数据,通常还会考虑应力集中现象,即使如此,设计的安全判据仍不足以防止脆断的发生,这说明材料的强度、塑性、弹性这些性能指标还不能完全反映材料抵抗脆断的能力。经过对众多脆断事故的分析和研究,人们提出了一个便于反映材料抗脆断能力的新的性能指标——韧性,从使脆性材料和韧性材料断裂所消耗的能量不同,归纳出韧性的定义为:所谓韧性是材料从变形到断裂过程中吸收能量的大小,它是材料强度和塑性的综合反映。例如图 1-2 为球墨铸铁和低碳钢的拉伸曲线,可以用拉伸曲线下的面积来表示材料的韧性,即

$$U_r = \int \sigma d\epsilon$$

图中可见,虽然球墨铸铁的抗拉强度  $\sigma_b$  比低碳钢高,但其断裂时的塑性应变  $\epsilon_p$  确远低于低碳钢小,综合起来看,低碳钢的韧性高。

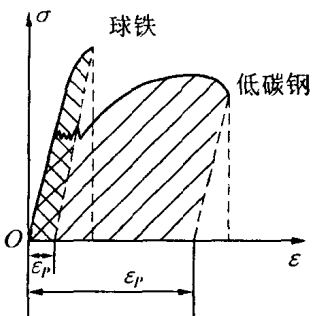


图 1-2 球铁和低碳钢拉伸曲线表示的韧性

材料的韧性可用实验的方法测试和判定。应用较早和较广泛的是缺口冲击试验,这种方法已经规范化。具体方法是将图 1-3 所示的缺口试样用

专用冲击试验机施加冲击载荷,使试样断裂,用冲击过程中吸收的功除以断面面积,所得即为材料的冲击韧性,以  $\alpha_k$  表示,单位为  $J/cm^2$ 。目前国际上多用夏氏 V 型缺口试样,我国多用 U 型缺口试样。由于缺口冲击试验能较准确地测定材料的韧性且简单易行,至今仍有广泛使用。设计中材料的冲击韧性是一个参考数据,由经验来确定对材料冲击韧性值的要求。

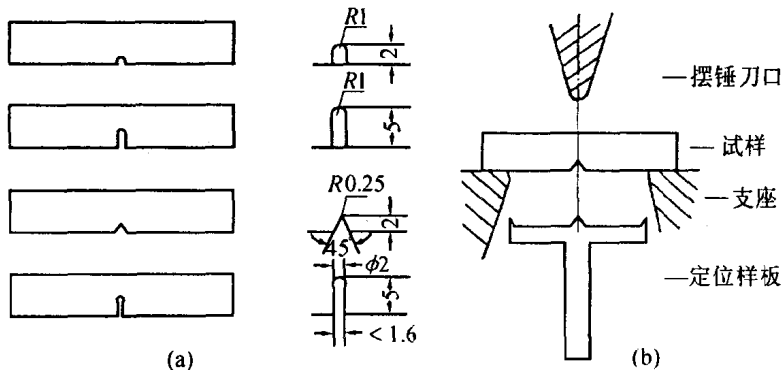


图 1-3 横梁式冲击试验

(a) 冲去试样(试样外形尺寸  $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$ ) (b) 冲击试样安放

实践证明,环境温度对材料的韧性有很明显的影响,随着温度的降低,材料的韧性将减小,当温度降到某一值  $T_T$  后,冲击韧性

值将大大降低,材料变脆。美国的焊接船舶发生脆断事故都是发生在 $-10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 的较低温环境下,因此有人用材料的脆性转变温度 $T_T$ 作为防止脆断的安全判据,设计时根据结构的工作温度来选择具有合适脆化温度 $T_T$ 的材料,以保证工作温度高于脆化温度来防止脆断。现在测定材料脆性转化温度 $T_T$ 的标准方法为落锤试验。方法如图1-4所示,在大于16 mm厚度的板状试样的中心堆焊小焊球,在焊球上制备一个缺口,缺口不伤及母板,试样放在图示的试验装置上,用60~100磅的重锤从4~14英尺的高度上自由下落冲击试样中央。在系列不同温度条件下进行试验,即可测得材料的脆性转化温度 $T_T$ 。

以冲击韧性 $\alpha_k$ 或脆性转变温度 $T_T$ 作韧性指标,在研究钢材的热加工工艺对材料韧性的影响上是很方便的,但是在设计中这些指标不能用于计算发生脆断时的载荷,而只能作为一种定性的参考依据。

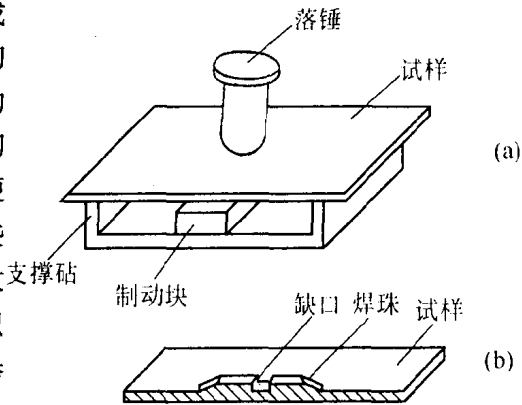


图1-4 落锤试验方法示意图

(a)装置示意图; (b)试样反面的焊珠和切口

为了在设计中直接应用材料的韧性指标,人们又用力学知识分析脆断问题与材料断裂韧性的关系,研究反映脆断裂纹发生和发展的力学参量,在大量实验的基础上对带裂纹材料的断裂韧度进行了深入的研究,探索了带裂纹构件在各种工作条件下裂纹的扩展、失效和止裂的规律,建立了可用于工程设计的准则,形成了新的力学分支——断裂力学。

## 二、断裂力学简介

断裂力学是一个以带裂纹体为研究对象的新的力学分支。主要研究裂纹萌生和扩展的条件与机理,确定裂纹体材料实际强度的力学参量和测定方法,探讨防止构件脆断的途径。现在断裂力学研究取得了很大的进展,特别是线弹性断裂力学取得了很多成熟的成果,弹塑性断裂力学正成为该领域科研工作者的主攻方向。但在许多方面还有相当多的问题有待进一步努力。本节仅介绍一些与断裂力学有关的基本概念和断口分析用得到的重要的断裂力学结论。

### (一) 裂纹尺寸与断裂强度的关系

在研究断裂行为时,一个重要的经验结果就是:构件断裂时名义应力的大小与结构内部的裂纹尺寸和形状有关。例如,用带有不同深度的表面裂纹的高强材料试样作拉伸试验可得出如图 1-5 所示的裂纹深度  $a$  与实际断裂强度的关系,证明其断裂应力与裂纹深度的平方根成反比

$$\sigma_c \propto \frac{1}{\sqrt{a}} \quad (1-1)$$

(1-1)式可具体写成

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{\pi a}}$$

或

$$K = \sigma_c \cdot Y\sqrt{\pi a} = K_{Ic} \quad (1-2)$$

式中  $\sigma_c$  为断裂应力,称为剩余强度;  $a$  为裂纹深度;  $Y$  为形状系数,与试样几何形状,载荷条件和裂纹位置有关;  $K_{Ic}$  是个常数,是一个反映材料抵抗脆性断裂能力的物理参量,称

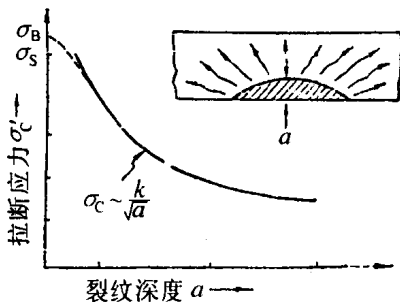


图 1-5 断裂强度与裂纹深度的关系曲线

为材料的断裂韧性。

由(1-2)式可知:

1. 对应于一定的裂纹尺寸  $a$ , 存在一个临界的应力值  $\sigma_c$ , 只有当外界作用所致应力大于此临界应力时裂纹才扩展, 造成断裂, 小于此值时裂纹将是稳定的, 不能扩展。换言之, 对应于一定的应力值, 存在一个临界的裂纹深度  $a_c$ , 即  $a_c = K_{Ic}^2 / Y^2 \cdot \pi \sigma^2$  当裂纹深度小于此值时, 裂纹是稳定的。

2. 裂纹愈深, 材料的临界断裂应力愈低, 或者作用于试样上的应力愈大, 裂纹的临界尺寸愈小。

以上结论说明, 带裂纹的构件只要裂纹达不到临界尺寸, 或裂纹尺寸一定时, 只要应力不大于临界应力, 都是安全的。这样, 考虑了裂纹的存在, 根据裂纹失稳条件所得的断裂应力, 与传统强度条件得出的结果就不一定相同了。例如, 有的材料  $\sigma_s, \sigma_b$  较高, 但其断裂韧性  $K_{Ic}$  却很低, 而有的材料  $\sigma_s, \sigma_b$  较低, 但其断裂韧性  $K_{Ic}$  却很高。在相同裂纹深度条件下, 后一种材料反而能够承受高于前者的断裂应力。所以, 从这一新观点出发, 盲目地追求高强度材料, 并不一定能保证安全可靠, 而具有足够的断裂韧性才是防止脆断的根本保证。

## (二) 应力场强度分析与断裂韧性

从本世纪 20 年代 Griffith 得到带裂纹玻璃的断裂理论的定量表达以来, 许多力学工作者在断裂体力学上作了大量工作, 特别是 50 年代中 William 和 Irwin 等应用弹性理论对裂纹前沿应力应变场进行了解析, 完善了线弹性断裂力学, 并在裂纹设计和失效分析中得到了广泛的应用。

为了对裂纹尖端应力进行分析, 定义了三种基本应力场, 每一种应力场都与裂纹变形的特殊方式有关。如图 1-6 所示。

I 型是裂纹张开型, 这时裂纹的两个表面直接分离, II 型是边缘滑开型或正向滑开型。它表现为裂纹的两个表面沿垂直于裂纹前缘方向相互滑移。III 型是侧向滑开型或撕开型, 亦称平行剪切

型,它们的特征是两个裂纹表面在平行于裂纹前缘的方向上相互滑移。若将这三种基本型式叠加,就可以完整地描述局部裂纹尖端变形和应力场的最一般的三维情况。三种基本型中最危险也是较常见的是 I 型张开型裂纹。因此我们着重讨论 I 型裂纹问题:

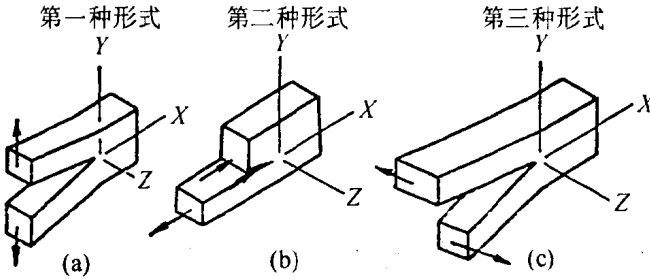


图 1-6 裂纹表面的三种位移形式

(1) 裂纹尖端的应力和位移分析及应力强度因子的概念:

设一无限大板,具有长度为  $2a$  的中心穿透裂纹,受双轴拉力作用,如图 1-7 示。按弹性力学的平面问题求解,得出裂纹尖端附近的应力场为

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\quad (1-3)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

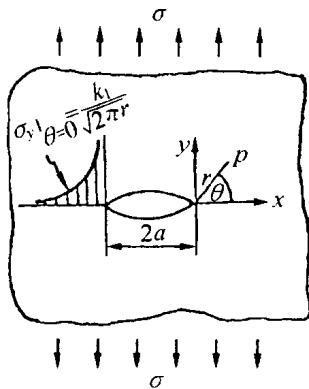
$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{平面应变})$$

$$\sigma_z = 0 \quad (\text{平面应力})$$

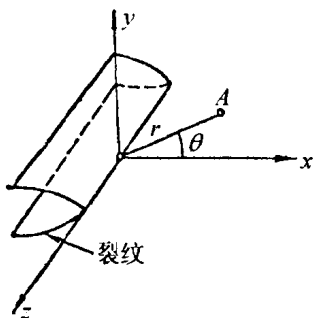
位移场为

$$u = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

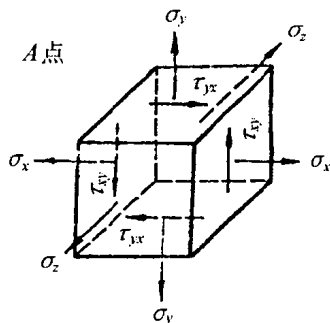




(a) 受力示意



(b) 裂尖坐标示意



(c) A(r, theta)点应力状态

图 1-7 裂纹前沿应力场

$$v = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$w = 0 \quad (\text{平面应变})$$

$$w = - \int \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) dZ \quad (\text{平面应力}) \quad (1-4)$$

式中  $r, \theta$  为裂纹尖端附近点的极坐标;  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  为应力分量;  $u, v, w$  为位移分量;  $G$  为剪切弹性模量;  $E$  为扬氏模