

金属的断口分析

宏观、微观及破断分析实例

上海交通大学

毛主席语录

阶级斗争是纲,其余都是目。

教育必须为无产阶级政治服务,必须同生产劳动相结合。

鼓足干劲,力争上游,多快好省地建设社会主义。

为了反对帝国主义的侵略,我们一定要建立强大的海军。

在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。因此,人类总得不断地总结经验,有所发现,有所发明,有所创造,有所前进。停止的论点,悲观的论点,无所作为和骄傲自满的论点,都是错误的。

目 录

引言	1
第一章 金属断裂的基本概念	2
第一节 延性断裂与脆性断裂	2
第二节 穿晶断裂与晶间断裂	3
第三节 解理断裂与剪切断裂 切断与正断	4
第四节 疲劳断裂与静载延滞断裂	7
第五节 断裂力学的基本概念	7
第二章 断口的宏观分析	16
第一节 静载荷下的断口宏观形貌	16
1. 光滑圆试样的拉伸断口, 断口三要素	16
2. 带缺口的圆试样的拉伸断口	20
3. 矩形试样的断口	22
第二节 冲击断口的宏观形貌	28
第三节 疲劳断口的宏观形貌	31
1. 弯曲疲劳断口	34
2. 轴向疲劳断口	37
3. 扭转疲劳断口	38
第四节 晶间断裂和解理断裂的断口特征	41
第五节 应力腐蚀及氢脆断口	43
第六节 实际构件(或另件)断口的宏观分析	45
1. 断口特征的判别	45
2. 实际构件裂纹源的确定	46
3. 断口各区域尺寸的测量方法	48
4. 实际构件(或另件)宏观断口的典型例子	50
第三章 解理断裂、剪切断裂的断口微观分析	54
第一节 概述	54
第二节 解理断裂的微观特征	54
1. 解理断裂的电子金相一般特征	56
2. 准解理断裂的电子金相特征	68
3. 珠光体、贝氏体解理断裂的特征	71
4. 瓦纳线	73
第三节 剪切断裂的微观特征	74
1. 滑断与纯剪断	74
2. 微孔聚集型断裂的微观特征	77

3. 断口与断裂韧性 延伸区的意义	88
第四章 疲劳断口的微观分析	98
第一节 疲劳裂纹扩展的二个阶段	100
第二节 第一阶段断口的电子金相特征	102
1. 第一阶段断面的二种形态	102
2. 平面状断面的电子金相特征	104
3. 锯齿状断面的电子金相特征	111
4. 第一阶段疲劳扩展机理概述	111
第三节 疲劳裂纹扩展第二阶段的微观特征	114
1. 疲劳纹的一般特点	114
2. 疲劳纹存在的条件	118
3. 疲劳纹的类型及其形态	121
4. 疲劳纹的形成机理	129
第四节 低周期疲劳断口的特征	135
第五节 疲劳断口的定量分析	136
第五章 晶间断裂的断口微观分析	143
第一节 晶间断裂的断口特征	143
1. 晶界上存在脆性沉淀相	144
2. 晶界弱化	144
3. 环境引起的晶界断裂	147
第二节 应力腐蚀和氢脆断口的微观特征	152
1. 应力腐蚀断口	152
2. 氢脆断口	158
第三节 混合型断口	162
第六章 实际构件的破断分析	164
第一节 破断分析的一般方法	164
第二节 破断分析实例	165

引 言

金属断口分析是一门研究金属断面的科学。人们用肉眼和放大镜观察断口,分析其特征,已有很长的历史,积累了相当的经验。近十多年来,随着电子显微镜技术的发展,已广泛应用它来研究断口,使断口分析获得新的发展。人们借助它,更深刻地认识断口的特征、性状,揭示断裂过程的机制,研究影响断裂过程及断口形态的各种因素,从而更好地指导生产实践,使断口分析发展成为一项研究金属断裂和进行破断分析的科学技术。

我们知道,另件(或结构件)设计时,虽然注意了它的安全性和可靠性,但是在规定的服役期限内,仍常发生突然断裂的意外事故。因此,研究和分析事故发生的原因,从中吸取教训,采取相应的措施,对保障安全生产,避免重大事故的发生有着重要的意义。产生事故的原因可以从内因和外因二方面去寻找。外因主要指外界温度、介质、载荷等条件,内因则指结构材料内在缺陷(如白点、夹杂、组织反常等)和由于设计不当、加工不良等导致的外表缺陷(如尖角、切削刀痕等)。另件(或结构件)从制造到使用,直至破坏,经历了各种加工、负载、温度、介质,其历史过程往往是不太清楚的。如果能从断口的形貌、性状发现其所经历的过程及材料的内在质量,那就能推断破坏的原因,从而改进材质,改善设计或制造方法,或者限制另件的使用条件,或者选择更为合适的材料。

由此,断口分析的目有三:(1)判定断裂的性质,寻找破坏的原因,(2)研究断裂机理,(3)提出防止事故的措施。

断口分析一般包括宏观分析和微观分析二方面。前者系指用肉眼或20x以下的放大镜分析断口,后者指使用光学显微镜或电子显微镜研究断口。断口的宏观分析和微观分析构成了断口分析不可分割的整体,它们之间不能相互代替,只能相互补充、相互促进。过分迷信电子断口金相而忽略宏观分析,则就可能只根据数个视域作出判断,其结果会象瞎子摸象,造成对全局判断的错误。反之,忽视微观分析而只凭一般经验对断口作粗浅的肉眼或低倍观察,也可能得出表面的甚至错误的结论。

实践证明,大多数工程材料的断裂过程包括裂纹核心的形成和裂纹扩展二个阶段。断口分析必须同时研究这二个阶段。

目前对金属断裂的研究有二种不同的方法。一种是断裂力学的方法,它根据弹性力学及弹-塑性理论,并考虑到材料内部存在有缺陷和裂纹而建立起来的,主要是宏观的,另一种是从金属学、金属物理的角度,即从材料的显微组织、微观缺陷、甚至原子和分子的尺度上进行研究。虽然目前这二方面都在取得进展,但它们的研究成果还不能相互充分利用。因为断裂力学所研究的结构材料其显微组织是复杂的,它们在研究的尺度上存在巨大的差异。断口分析,尤其是断口的微观分析,研究断口形貌与显微组织的关系;断裂过程中微观区域(包括裂纹前端)所发生的变化,它将帮助人们在金相、金属物理和断裂力学之间架起联系的桥梁。目前断口分析有许多已从定性的解释进入到破断原因的定量分析,其实用意义和理论意义都是很深远的。

本书从金属破断分析的角度,介绍断口分析的基本方法,它不包括钢厂(或材料使用工厂)为评定材料的冶金质量或热处理质量而作的断口常规检验。

第一章 金属断裂的基本概念

第一节 延性断裂与脆性断裂

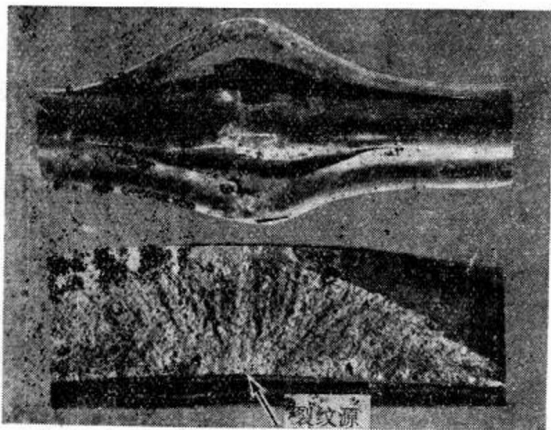
根据金属完全断裂前的总变形量(宏观变形量),可把断裂分为两大类:

脆性断裂: 断裂前几乎不产生显著的塑性变形。

延性断裂: 断裂前发生显著的塑性变形。

这种根据宏观总变形量划分断裂性质的方法,只具有相对的意义。例如,同一种材料,条件变了(如应力、环境、温度等变化),其变形量也可能发生显著的变化。又如,在宏观范围内是脆性断裂,但在局部范围或微观范围内却存在大量的集中变形。

延性断裂对构件和环境造成的危险性远较脆性为小。因为它断裂前的大量塑性变形,将预先警告人们引起注意,或者因变形量超过允许值而使构件在断裂前即告失效。即使破断,也不会产生大量的碎片伤害周围的人们。图(1-1)为枪管延性破断的实物照片。



图(1-1) 枪管的延性断裂

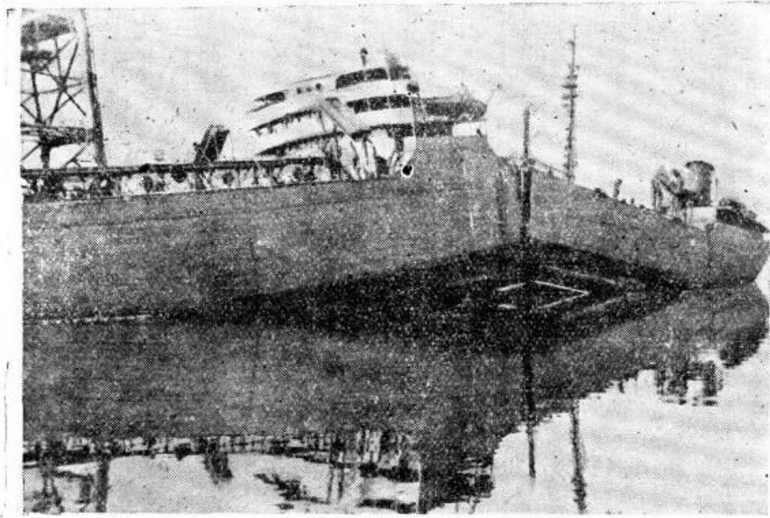


图(1-2) 机关枪管的脆性断裂

与此相反,脆性断裂是一种危险的突然事故。它产生很多碎片,危害性很大。图(1-2)为某机关枪管脆性断裂的实物照片。由于历史上曾经发生过大量的脆性断裂的事故,所以早就引起人们的极大注意。其典型例子如:美国1949~1963年期间服役的船只(2500吨)以上共10,835艘,其中20艘完全断毁。图(1-3)为1943年1月发生的美国一艘油船断成二段的照片。其甲板的计算应力远低于钢的屈服应力。又如1962年7月澳大利亚金斯桥建成仅一年就突然断裂。五十年代,美国北极星导弹固体发动机试验时发生的爆炸事故以及法国核电站的压力容器、英国核电站的大型锅炉爆炸都是脆性断裂的例子,造成过严重的破坏及人身伤亡。

考查这些事故,脆性断裂有以下特点:

(1) 破断时承受的工作应力较低,通常不超过材料的屈服强度,甚至不超过按常规设计程序确定的许用应力。所以此种断裂,又称低应力脆断。

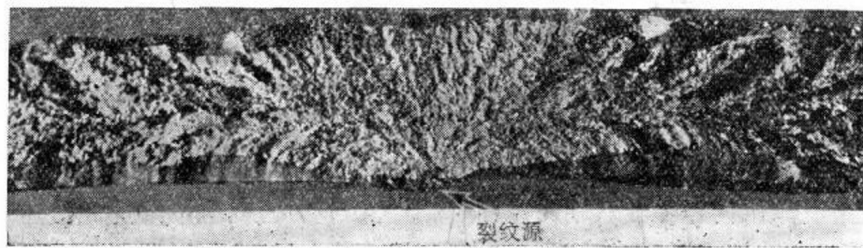


图(1-3) 美国 T-2 型油船破断的实例,当时,它停靠在码头上,发生在风平浪静 -5°C 气温下。

(2) 脆性断裂总是从构件内部存在的宏观裂纹(例如,裂纹从肉眼可见的 0.1 毫米到 1 厘米以上)作为“源”开始的。这种宏观裂纹源可以在工艺过程中产生,如轧制时未消除马氏体时效钢组织上的不均匀性,就会产生细小的裂纹;也可以因设计时考虑不周到,使结构某些地方应力过度集中,而产生裂纹;使用时,由于疲劳或应力腐蚀,也常会产生裂纹。所以金属构件中存在缺陷或裂纹是极其难免的。这种裂纹常在远低于屈服强度的应力下逐渐扩大,最后导致突然断裂。

(3) 中、低强度钢的脆断事故,一般发生在较低的温度,如 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 以下。高强度钢则没有明显的温度效应。

(4) 脆性破坏的断口平齐而光亮,且与正应力相垂直。断口附近的截面,在厚度方向上的收缩很小,一般不超过 3%。断口上常有人字纹或放射花样。图(1-4)

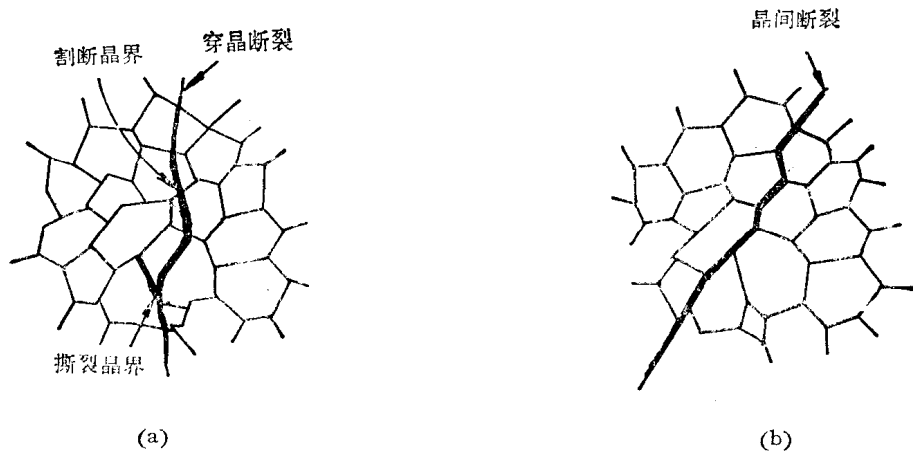


图(1-4) 放射花样的脆性断口

第二节 穿晶断裂与晶间断裂

多晶金属的断裂,依断裂路径的走向,可分为穿晶断裂和晶间断裂二类。前者的特点是裂纹穿过晶粒内部如图(1-5a)。穿晶断裂可以是延性的,也可以是脆性的。

晶间断裂的特点是裂纹沿晶界扩展,如图(1-5b),晶界上存在脆性相、焊接热裂缝、蠕变断裂、应力腐蚀等一般都是晶间断裂。晶间断裂多数属脆性断裂,但也有延性的。



图(1-5) 穿晶和晶间断裂的示意图

第三节 解理断裂与剪切断裂 切断与正断

穿晶断裂依其断裂方式又可分为解理和剪切二种。

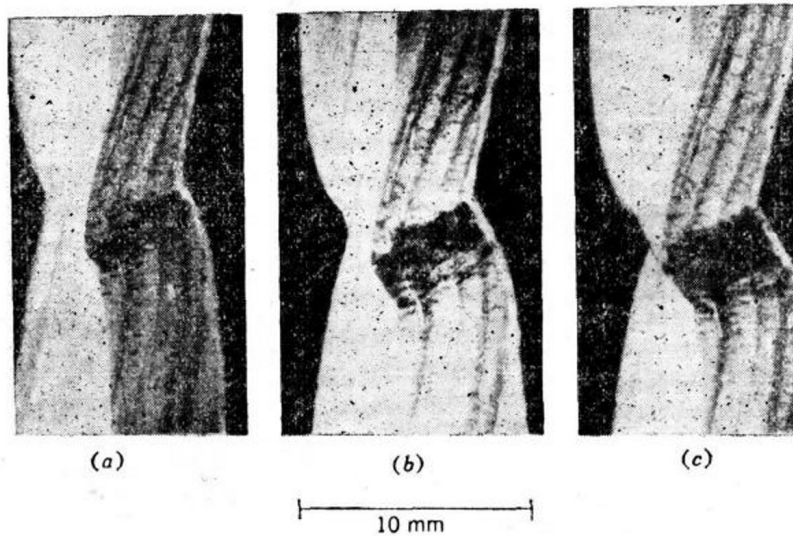
1. 解理断裂 一种在正应力作用下所产生的穿晶断裂,通常沿一定的严格的晶面即解理面分离,但也可沿滑移面或孪晶界分离。解理断裂多见于体心立方、密排六方金属及合金。特殊情况下,面心立方金属如Al等也能解理断裂。低温、应力集中、冲击有利于解理断裂。通常,解理断裂总是脆性断裂。但有时在解理断裂前也呈现很大的延性。所以,不能把解理与脆性断裂二者完全等同起来。

由于解理裂纹,在一定强度的应力场作用下,依靠弹性应变能的释放克服解理面两边原子间的结合力而扩展的,所以裂纹扩展所消耗的能量较小。因此,一旦当裂纹长度达到临界尺寸(满足格里菲斯条件: $\sigma = \left[\frac{2\gamma E}{\pi c} \right]^{1/2}$, 式中 σ —垂直裂纹面的正应力; γ —裂纹面单位面积的表面能; $2c$ —裂纹长度; E —杨氏模量)时,裂纹便迅速扩展,其速度接近声速而不可抑制,常造成构件灾难性的总崩溃。

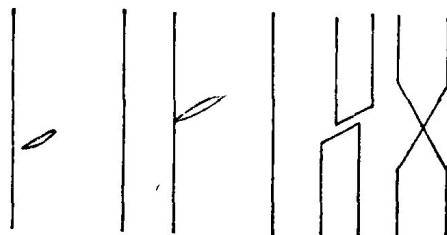
2. 剪切断裂 在切应力作用下,沿滑移面滑移而造成的断裂。它有二类,一类称滑断或纯剪断,一般发生于非常纯的单相金属,特别是纯的单晶体中。金属在外力作用下沿最大切应力方向的滑移面(单轴向拉伸或双轴向拉伸时,最大切应力方向一般与拉伸轴呈 45° 角)滑移,最后因滑移面滑动分离而断裂,其断口常呈锋利的楔型或刀尖型。它的示意图及铝单晶纯剪断的照片如图(1-6)所示。所以滑断或纯剪断是一种由纯粹的滑移流变所造成的断裂。

另一类是微孔聚集型断裂。多见于钢铁等工程结构材料。在外力作用下,因强烈滑移,位错堆积,在局部地方,如缩颈处,产生许多显微空洞;或因夹杂物破碎、夹杂物和基体金属界面的破碎而造成微小空洞。这种空洞在切应力作用下不断长大、聚集连接,并同时产生新的微小空洞,最终导致整个材料的破断。其示意图及照片如图(1-7)所示。

表(1-1)中列出了各种材料、各种晶体构造的解理面及滑移面的晶面指数。由表可知,除面心立方金属外,其它点阵类型的所有金属均同时存在解理面及滑移面。对这类材料,如外界条件的变化(温度、形变速度),便可能由剪切型断裂向解理型断裂转化,或者相反。因此,必然



(a)



(b)

图(1-6) 纯剪断的示意图及铝单晶的纯剪断照片

(a) 铝单晶在一个滑移面上连续滑移而分离, 宏观照片。

(b) 示意图

存在着解理与剪切断裂相互转化的外界条件, 如温度等。

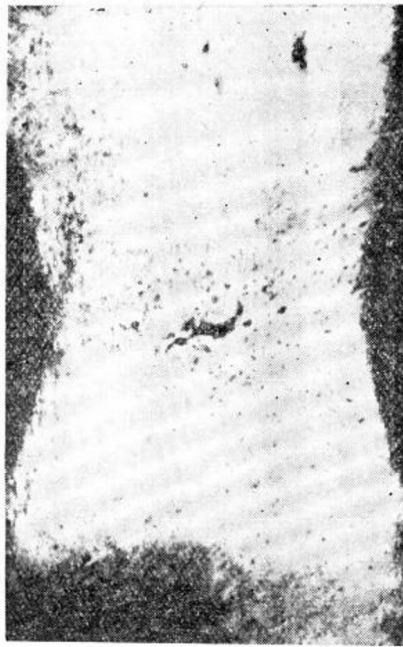
根据断面的宏观取向与最大正应力的交角, 断裂方式又可分为正断型和切断型二种:

(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。

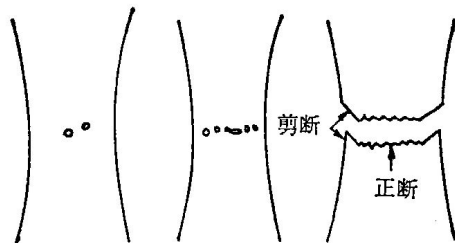
(2) **切断型断裂**: 宏观断面的取向与最大切应力方向相一致, 而与最大正应力约呈 45° 交角。常发生于滑移形变不受约束或约束较小的情况, 例如平面应力*条件下的断裂。

在图(1-7)(b)的拉伸断口示意图中, 接近试样表面的部分即为切断型断裂, 试样中央部分即为正断型断裂。关于这种类型的断口, 我们将在下章深入讨论。

* 关于平面应变和平面应力的概念, 请参见本章第五节(2)。



(a)



(b)

图(1-7) 微孔的形成和长大、连接

- a) 铜拉伸试样塑断过程中, 空洞在缩颈处形成并长大连接
- b) 示意图

表(1-1) 各种材料的解理面和滑移面

晶体结构	金属和合金名称	解理面	主要滑移面
体心立方	Li, Na, K, α -Fe 大多数钢, V, Cr, Mn Nb, Mo, W, Ta, Ti- β	100	112 110
面心立方	Cu, Ag, Au, Al Ni, 黄铜, 奥氏体不锈钢	无	111
密排六方	Be, Mg, Zn, Sn, Ti- α , Cd, U	1000	1122 1010 1000

第四节 疲劳断裂与静载延滞断裂

材料在交变载荷下产生的断裂,叫作疲劳断裂。所谓交变载荷是应力的大小、方向随时间作周期性的改变。疲劳断裂有以下特征:

(1) 疲劳断裂应力(周期载荷中的最大应力 σ_{\max})远比静载荷下材料的抗拉强度 σ_b 低,甚至比屈服强度也低得多。

(2) 不管是脆性材料或延性材料,其疲劳断裂在宏观上均表现为无明显塑性变形的脆性突然断裂,故疲劳断裂一般表现为低应力脆断。

(3) 疲劳破断是损伤的积累。在恒应力或恒应变下,疲劳将由三个过程所组成:(a)裂纹的形成(形核),(b)裂纹扩展到临界尺寸,(c)余下断面的不稳定断裂。在宏观断口上可以清楚地看到b与c两阶段,图(1-8)。所以,疲劳断裂过程不同于一般的静力断裂过程,它是损伤积累到一定程度,即裂纹扩展到一定程度后才突然断裂。在断裂前要经过较长时间的应力循环($10^4, 10^5, 10^6 \dots$)才断裂。所以疲劳断裂是与时间有关的断裂。

(4) 材料抵抗疲劳载荷的抗力比一般静载荷要敏感得多。疲劳抗力不仅决定于材料本身,而且敏感地决定于构件的形状、尺寸、表面状态,服役条件和所处环境等。

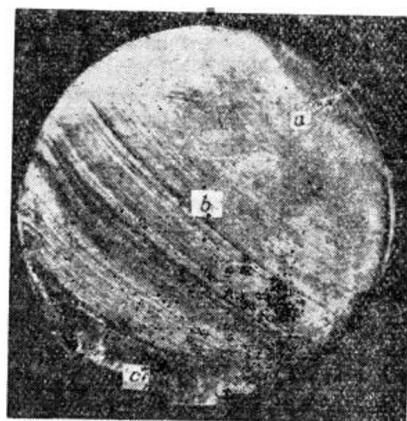
(5) 疲劳断裂一般是穿晶断裂。

所以疲劳断裂与静载破断不同,它比静载破坏的机率高得多。是工程上最常见也是危险的破断。因此,近100多年来对疲劳断裂进行了广泛的研究,在实践上和理论上都掌握了一定的规律。

疲劳的研究,可归纳为两个方面,一个是宏观方面,即从分析疲劳应力或应变着手,研究疲劳载荷下的力学规律,

建立起一系列疲劳抗力指标(如 $\sigma_{-1}, \sigma_a, \frac{dI}{dN} \dots$ 等),为正确选材和安全设计提供直接或间接资料。另一方面是从微观机制着手,研究在疲劳载荷下金属内部的组织结构的变化和断口形态,寻找疲劳裂纹产生的原因和裂纹扩展的机制及影响因素,从而寻找提高疲劳抗力的途径。目前的趋向是把宏观和微观结合起来,综合研究金属疲劳断裂问题。

另一类断裂是静载延滞断裂,或称静载疲劳。它发生于静载条件下,由于环境的作用(如腐蚀、温度、中子辐照等)而引起的一种与时间有关的低应力脆性断裂。属于这类断裂的有应力腐蚀断裂、氢脆、蠕变断裂等。关于它们的断裂特征将分别于以后有关章节中阐述。



图(1-8) 典型的疲劳断口,磨床砂轮轴材料 SCM5 箭头(a)所指为疲劳裂纹的起点(疲劳核心),(b)(c)分别为疲劳裂纹扩展区及瞬时破断区。

第五节 断裂力学的基本概念*

本章第一节曾指出,工程上的脆断事故,总是从构件内部存在的宏观缺陷或裂纹作为“源”

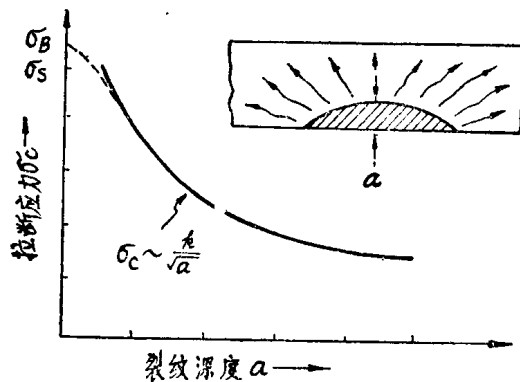
* 为了使未学习过断裂力学基本原理的读者,能够较顺利地看懂本书后面各章节中所引用的断裂力学名词,这里扼要地介绍断裂力学的基本概念。为了力求避免使用数学、力学,在叙述时,有不严格的地方。

开始的。这种裂纹源常在远低于屈服强度的应力下,因疲劳、应力腐蚀等原因而逐渐扩大,最后导致构件突然低应力脆断;载荷的突然增加,环境温度的变化,也会使裂纹源迅速扩展而导致构件断裂。

因此,构件的破断应力,与存在于构件中的裂纹或缺陷有密切关系。断裂力学就是根据任何材料或构件都避免不了带有缺陷和裂纹这一客观实际,研究裂纹扩展的条件;确定材料实际强度的参量及其测定方法;探讨防止构件脆断的途径。

(1) 裂纹深度与断裂强度的经验关系式

为了显示裂纹对断裂强度的影响,将高强度材料的试样,预制有不同深度的表面裂纹,进行拉伸试验,求出裂纹深度与实际断裂强度的关系,如图(1-9)所示。



图(1-9) 断裂强度与裂纹深度的关系曲线

裂纹深度与断裂强度 σ_c 的平方根成反比:

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

(1) 式可以写成

$$\sigma_c = \frac{K}{\sqrt{a}}, \quad \text{或} \quad K = \sigma_c \sqrt{a} \quad (2)$$

式中 σ_c 为断裂强度, a 为裂纹深度, K 为常数。

由(2)式可知

(i) 对应于一定的裂纹深度 a , 存在一个临界的应力值 σ_c , 只有当外界作用应力大于此临界应力时, 裂纹才能扩展, 造成破断, 小于此应力值, 裂纹将是稳定的, 不能扩展, 构件也不会断裂。

(ii) 或者, 换句话说, 对应于一定的应力值, 存在着一个临界的裂纹深度 a_c , 当裂纹深度小于此值时, 裂纹是稳定的; 只有大于此值时, 裂纹才是不稳定的。

(iii) 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。

(iv) 常数 K 不是一般的比例常数, 它表达了裂纹前端的力学因素, 反映材料抵抗脆性破断能力的一个断裂韧性指标。不同的材料, K 值不同。关于它的意义, 我们将在后面讨论。

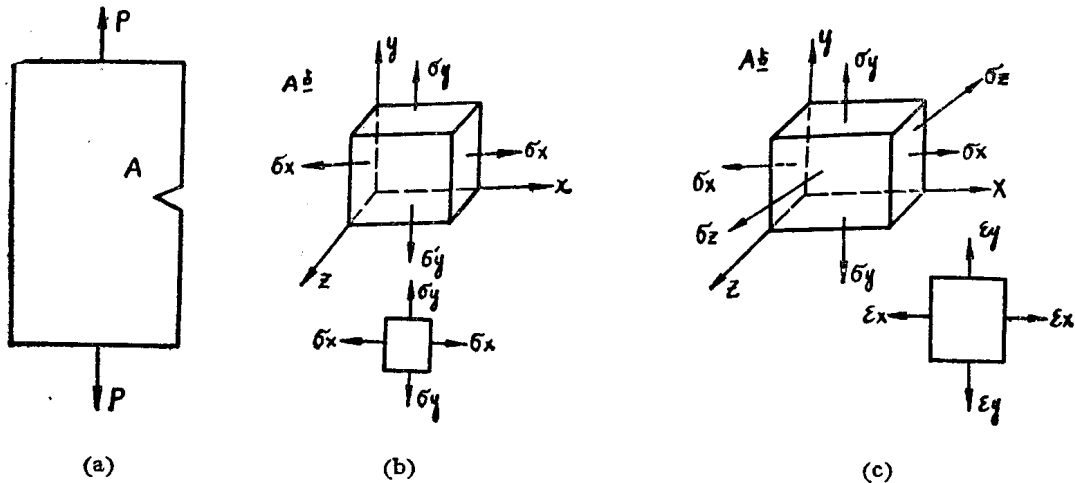
(2) 断裂韧性的基本概念

上面所谈的断裂韧性概念是基于实践得出的经验规律,还没有上升到理性认识。现在,扼要介绍在线弹性理论上发展起来的断裂力学基本概念。

(i) 平面应力和平面应变的概念

一块带有缺口或裂纹的板试样如图(1-10)(a)拉伸时,在缺口或裂纹端部,因应力集中和形变约束,将产生复杂的应力状态。

假若板试样很薄,则裂纹前端(A)附近区域,沿Z方向的变形基本不受约束,可以自由变形,在该方向上的应力 $\sigma_z=0$,但应变 $\epsilon_z \neq 0$ 。此时,裂纹前端区域仅在板宽、板长度方向上受 σ_x 、 σ_y 的作用,应力状态是二维平面型的。此种应力状态,称为平面应力状态,图(1-10)(b)。



图(1-10) 缺口或裂纹前端应力状态示意图。

(a)带缺口的拉伸试样 (b)平面应力状态 (c)平面应变状态

相反,假若是厚板,则裂纹前端区域除了靠近板表面的部位之外,在板的内部,由于Z方向受到严重的形变约束, $\sigma_z \neq 0$,而 $\epsilon_y = 0$ 。所以,应力是三维的,处于三向拉伸状态,但应变是二维的, $\epsilon_x \neq 0$, $\epsilon_y \neq 0$,即是平面型的。这种状态称为平面应变状态,图(1-10)(c)。

裂纹前端所处的应力状态不同,将显著影响裂纹的扩展过程和构件的抗断能力。如若为平面应力状态,则裂纹扩展的抗力较高;若为平面应变状态,则裂纹扩展抗力较低,易脆断。

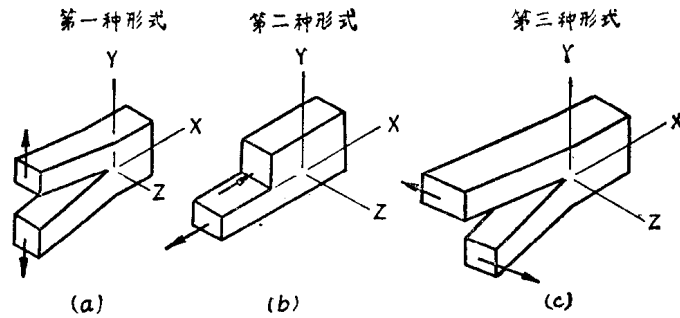
(ii) 断裂过程中裂纹表面的三种位移形式

所谓裂纹表面的位移形式,就是指裂纹二侧的断裂面,在断裂过程中相对运动的方向。它有三种基本形式,如图(1-11)。

第一种型式称为张开型(I型),如图(1-11)(a),裂纹表面移动的方向,与裂纹表面相垂直。这种型式的断裂,常见于疲劳及脆性断裂,其断口齐平,是工程上最常见和最危险的断裂类型。

第二种型式是前后滑移型(或称II型、刃型),如图(1-11)(b),裂纹表面在同一平面内相对移动,裂纹表面移动方向与裂纹尖端的裂纹线垂直。

第三种型式是所谓“出平面剪切型”,(或称III型,螺型),裂纹表面几乎在同一平面内扩展,裂纹表面移动的方向和裂纹线一致,图(1-11)(c)。



图(1-11) 裂纹表面的三种位移形式。

剪切断口,斜断口和扭转断口通常是II型以及II型和III型的组合。

(iii) 裂纹前端的应力和应变分析,应力强度因子的概念。

由于最危险的断裂是张开型(I型)断裂,所以首先研究它的断裂条件:

假设在均匀厚度的无限宽的弹性板中,有一长度为 $2a$ 的穿透裂纹,垂直于裂纹方向作用均匀的单向拉伸应力 σ ,则根据线弹性理论分析,在裂纹前端 A 点处的应力分量,如图(1-12)所示,为:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left\{ \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left\{ \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= 0 && \text{(平面应力时)} \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) && \text{(平面应变时)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left\{ \cos \frac{\theta}{2} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \right\} \quad (6)$$

位移分量为:

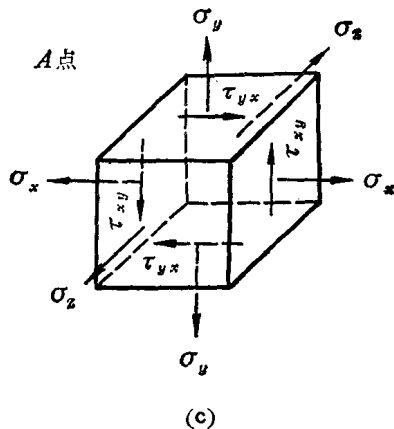
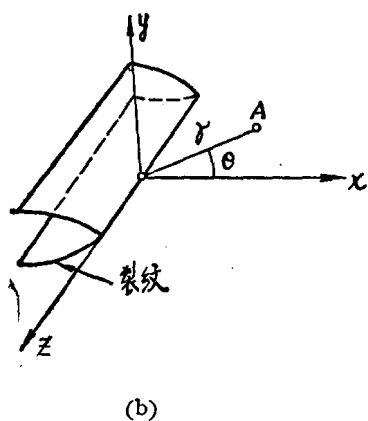
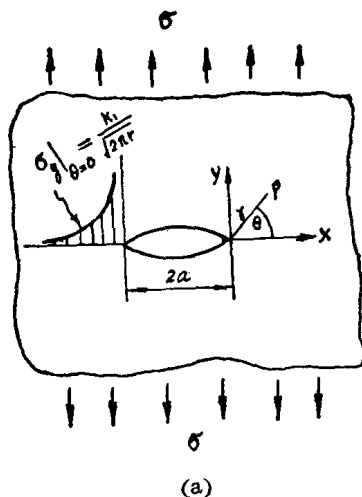
$$\epsilon_x = \frac{K_I}{G} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \left\{ \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \right\} \quad (7)$$

$$\epsilon_y = \frac{K_I}{G} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \left\{ \sin \frac{\theta}{2} \left[2(1 - \nu) - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_z &= 0 && \text{(平面应变)} \\ \epsilon_z &= -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) && \text{(平面应力)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 θ 为极坐标的极角, r 为极轴, ν 为泊桑比, G 为切变模量, E 为杨氏模量。

上述(3)~(9)式中,均有一个共同的因子 K_I ,它表达了裂纹前端应力场的强弱程度,是描述裂纹前端力学因素的参数,称为应力强度因子。其值决定于零件及裂纹的几何参数(形状及大小),载荷型式及大小。应当注意,应力强度因子 K_I 同应力集中系数 K_t 不同,后者仅为零



图(1-12) 裂纹前端 A 点的应力状态

件几何形状的函数。不同的试样和裂纹的几何形状, K_I 的表达式也不同。对于图(1-12)(a)所示的这种无限宽板穿透裂纹, 弹性理论计算表明:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

式中 a 为裂纹半长, σ 为作用在板上的平均应力, K_I 的量纲为公斤·毫米^{-3/2}; 或千磅·吋^{-3/2}。

由式(10)可看出, 应力强度因子 K_I 随作用应力 σ 的提高而提高。当 σ 达到临界值, 即断裂应力 σ_c 时, 裂纹将迅速扩展而使构件破断, 这时, K_I 也达到临界值 K_{IC} 。

对于一定的材料, K_{IC} 为一常值。

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a} = \text{常数} \quad (11)$$

通常, 人们称 K_{IC} 为张开型平面应变条件下的临界应力强度因子, 或称它为材料的“断裂韧性值”。应当指出, 材料的断裂韧性值和它的强度指标 σ_b , $\sigma_{0.2}$ 一样, 也是材料本身所具的一种机械性能指标。

上面这个式子(11)与以前所介绍的经验公式(2)完全相似。显然, 与式(2)一样, 由该式可知, 对应于一定的应力存在着一个导致突然脆断的临界裂纹长度 a_c , 或者对应于一定长度的

裂纹存在着一个临界破断应力 σ_c ；而且裂纹长度愈长，材料的临界应力愈低，由此可以推断，随着裂纹的扩展，所需的断裂应力将越来越小。所以，对于一定尺寸的裂纹，一旦应力达到临界值，裂纹将迅速地扩展，直到材料完全破断或因某种原因（如应力松弛）而停止扩展为止。

不同的载荷和裂纹位移型式，应力强度因子 K 的表达式不同。对于 II 型，应力强度因子表达式为：

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \quad \tau \text{ 为切应力} \quad (12)$$

对于 III 型：

$$K_{III} = \tau \sqrt{\pi a} \quad \tau \text{ 为切应力} \quad (13)$$

(iv) 裂纹前端屈服区的大小以及 K_I 的修正(近似计算)

式(11) $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ 是根据裂纹前端区域应力应变服从线弹性规律而导出的。但是，实际上，即使是很脆的材料，在裂纹前端的区域内，总有或多或少的塑性变形存在。因此，应力与应变关系并不严格地服从线弹性关系，故需加以修正。

当裂纹前端发生塑性变形时，应力将有一定程度的松弛；应力场有所变化；裂纹扩展需消耗的能量也大，所以 K_I 值也将发生变化。为了修正 K_I 值，首先要估计裂纹前端屈服区的大小和形状。

根据弹性理论计算的结果，平面应力时裂纹前端屈服区的边缘方程为：

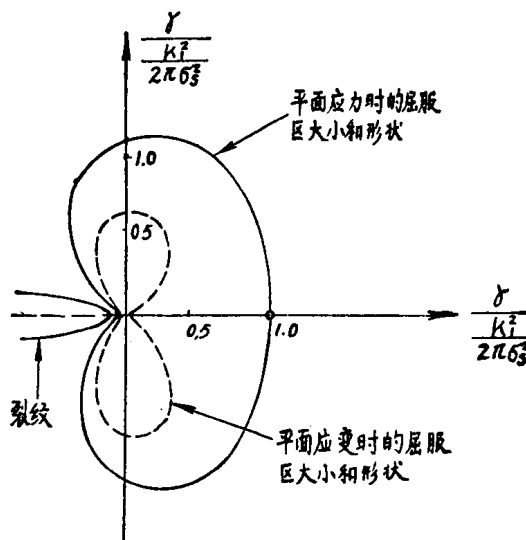
$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_s^2} \left\{ \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \right\} \quad (14)$$

平面应变时，裂纹前端屈服区的边缘方程为：

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_s^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[(1-2\nu)^2 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (15)$$

式中 r 为极轴， θ 为极角， σ_s 为材料的屈服强度。

根据式(14)与(15)，绘制成如图(1-13)所示的屈服区边缘曲线。



图(1-13) 裂纹前端屈服区的大小和形状

由式(14)(15)知,平面应力时在X轴上的 r 值为:

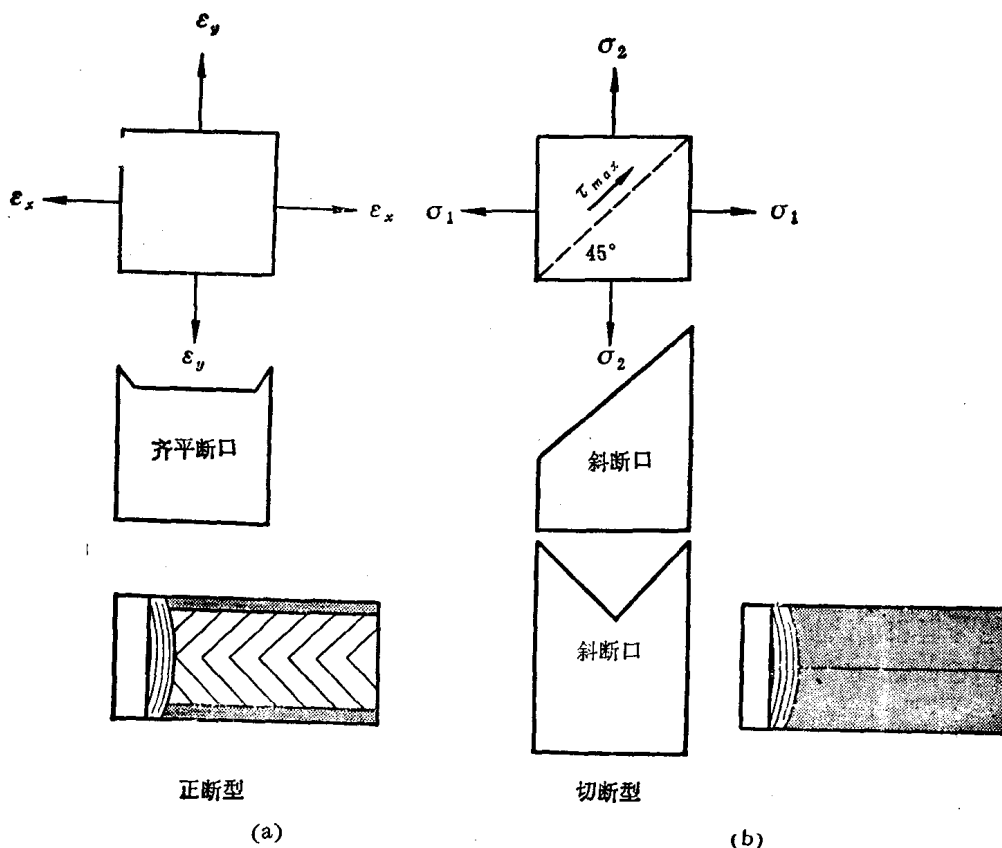
$$r_0 = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_S^2} \quad (16)$$

平面应变时,在X轴上的 r 值为:

$$r_0 = 0.16 \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_S^2} \quad (17)$$

比较(16)和(17)两式的 r_0 值可知,平面应力(如薄板)的 r_0 , 比平面应变的大几倍,这是由于在平面应力时,Z方向可以自由变形,约束较小,因此屈服区大,而在平面应变时,由于三向拉伸作用,约束严重,不易变形,故屈服区小。

屈服区大,消耗能量也大,需要较大的外来能源才能使裂纹扩展,所以平面应力的临界应力强度因子比平面应变的临界应力强度因子要高得多,实际上,在平面应力条件下,形变约束小,滑移剪切相对比较容易,裂纹将沿最大切应力方向扩展,故其断口为与最大拉伸应力轴呈一定角度(通常为 45°)的斜断口。此时,裂纹位移的型式将不是张开型,而是II、III型的组合,其临界应力强度因子用 K_C 表示。平面应变时,由于应变约束大,裂纹将沿垂直于正应力方向的宏观平面扩展,其断口为张开型的齐平断口,临界应力强度因子即为 K_{IC} 。 $K_C > K_{IC}$ 。



图(1-14) 平面应变和平面应力时的断口
a) 平面应变时的断口,正断型。 b) 平面应力时的断口,切断型。