

金属断口分析

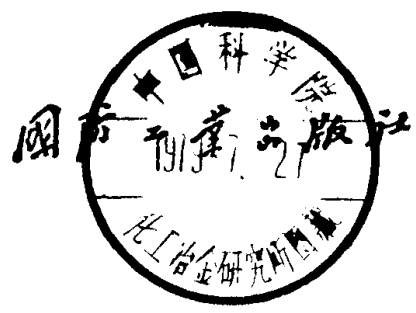
国防工业出版社

75.22
115.2

金属断口分析

上海交通大学《金属断口分析》编写组

3k507/13



内 容 简 介

本书主要介绍金属断口的宏观分析、微观分析以及破断分析的原理及实例；并简单介绍断口定量分析如断口与材料断裂韧性的联系、疲劳裂纹的宏观扩展速率同疲劳纹宽度之间的关系等。

本书可供工厂中心试验室及产品设计人员、金属断裂力学工作者和从事材料金相分析及破坏分析的工人和技术人员参考，也可供高等院校有关专业的师生参考。

金 属 断 口 分 析

上海交通大学《金属断口分析》编写组

国防·工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印张 9 9/16 插页 2 208 千字

1979年 7 月第一版 1979年 7 月第一次印刷 印数：00,001—21,000 册

统一书号：15034·1697 定价：2.10 元

编者的话

在毛主席革命路线指引下，我国建国以来在金属断口分析技术方面发展很快，取得了一定的成就，多年来，从事产品设计制造、金相及金属检验的广大工人、技术人员抓住产品生产和使用过程中的破断事故，深入调查研究，开展破断分析，寻找破断原因，研究改进措施，在保证产品质量和提高使用寿命方面，作出了贡献，积累了经验。为了加速科学技术的发展，普及金属断口分析技术，我们编写了这本《金属断口分析》，供广大读者参考。

本书在编写中尽可能结合我国的实际情况，但也引用了一些国外的合金牌号，由于这些牌号在国内无相应的牌号可供对照，故书中没有作统一处理，一律沿用原来的代号。

为了便于读者查考，在每章之末附有参考资料。

在编写过程中，得到了许多厂、校的热情支持和鼓励，并提供了资料和图片；尤其是上海材料研究所等单位给予了我们很大帮助，在此致以衷心感谢。

由于编者水平所限，书中一定存在缺点和错误，请广大读者批评指正。

上海交通大学《金属断口分析》编写组

34451

目 录

第一章 金属断裂的基本概念	4
第一节 延性断裂与脆性断裂	4
第二节 穿晶断裂与晶间断裂	7
第三节 解理断裂与剪切断裂 切断与正断	8
第四节 疲劳断裂与静载延滞断裂	12
第五节 断裂力学的基本概念	14
第二章 断口的宏观分析	27
第一节 静载荷下的断口宏观形貌	27
1. 光滑圆试样的拉伸断口 断口三要素	27
2. 带缺口的圆试样的拉伸断口	35
3. 矩形试样的断口	37
第二节 冲击断口的宏观形貌	47
第三节 疲劳断口的宏观形貌	51
1. 弯曲疲劳断口	55
2. 轴向疲劳断口的形态及特征	62
3. 扭转疲劳断口	64
第四节 晶间断裂和解理断裂的断口特征	67
第五节 应力腐蚀及氢脆断口	70
第六节 实际构件(或零件)断口的宏观分析	72
1. 断口特征的判断	72
2. 实际构件裂纹源的确定	74
3. 断口各区域尺寸的测量方法	79
4. 实际构件(或零件)宏观断口的典型例子	82
第三章 解理断裂、剪切断裂的断口微观分析	89
第一节 概述	89

第二节 解理断裂的微观特征	90
1. 解理断裂的电子金相一般特征	92
2. 准解理断裂的电子金相特征	110
3. 珠光体、贝氏体解理断裂的特征	114
4. 瓦纳线	116
第三节 剪切断裂的微观特征	117
1. 滑断与纯剪断	117
2. 微孔聚集型断裂的微观特征	122
3. 断口与断裂韧性, 延伸区的意义	136
第四章 疲劳断口的微观分析	151
第一节 疲劳裂纹扩展的二个阶段	153
第二节 第一阶段断口的电子金相特征	156
1. 第一阶段断口的二种形态	157
2. 平面状断口的电子金相特征	159
3. 锯齿状断口的电子金相特征	170
4. 第一阶段疲劳裂纹扩展机理概述	171
第三节 疲劳裂纹扩展第二阶段的微观特征	174
1. 疲劳纹的一般特点	174
2. 疲劳纹存在的条件	180
3. 疲劳纹的类型及其形态	184
4. 疲劳纹的形成机理	194
第四节 低周期疲劳断口的特征	202
第五节 疲劳断口的定量分析	205
1. 疲劳纹间距与裂纹扩展速率	205
2. 疲劳纹间距与断裂力学特性值(K)的关系, 载荷的推算	212
第五章 晶间断裂及其他断裂的断口微观分析	217
第一节 晶间断裂的断口特征	217
1. 晶界上存在脆性沉淀相	217
2. 晶界弱化	220
3. 环境引起的晶界断裂	222
第二节 应力腐蚀和氢脆断口的微观特征	231

1. 应力腐蚀断口	232
2. 氢脆断口	242
第三节 混合型断口	247
第六章 实际构件的破断分析	252
第一节 破断分析的一般方法	252
1. 实际构件破损情况的现场调查	252
2. 断口的宏观分析	253
3. 断口的微观分析	254
4. 金相组织、化学成分、机械性能的检查	254
5. 其它各种因素的考虑	255
第二节 破断分析实例	255
1. 设计不当引起的破坏事故	255
2. 加工不当引起的破坏事故	259
3. 热处理残留应力造成的破断	271
4. 应力腐蚀引起的破坏事故	275
5. 因化学介质腐蚀而造成的破断事故	283
6. 因热处理不当等因素造成的应力腐蚀-疲劳断裂	288
7. 材料冶金质量所造成的断裂事故	296

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,更深刻地认识断口的特征、性状,揭示断裂过程的机理,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,零件(或结构件)设计时,虽然注意了它的安全性和可靠性,但是在规定的使用期限内,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分析。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)。零件(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,或者限制零件的使用条件,或者选择更为合适的材料。

由此,断口分析的目的有三:(1)判定断裂的性质,分析、

找出破坏的原因；(2)研究断裂机理；(3)提出防止断裂事故的措施。

断口分析一般包括宏观分析和微观分析两个方面。前者系指用肉眼或 20 倍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), 断裂可分为两大类:

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。

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 吨以上的共 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

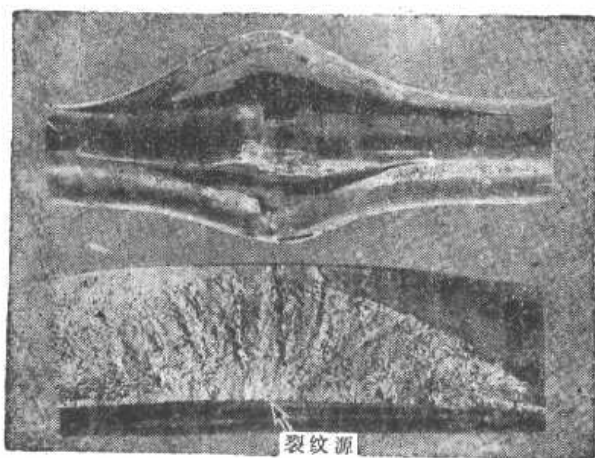


图 1-1 枪管的延性断裂

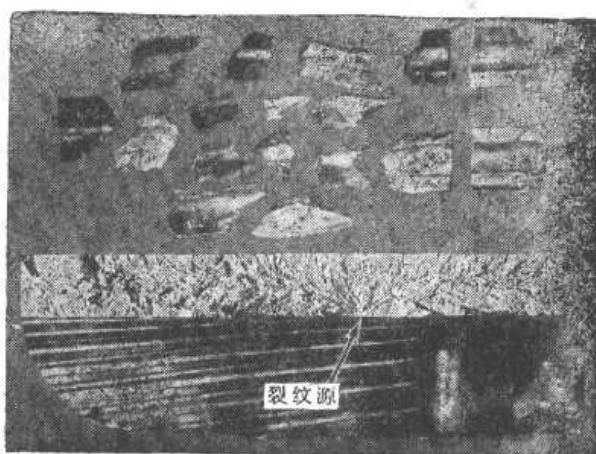


图 1-2 机关枪管的脆性断裂

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。

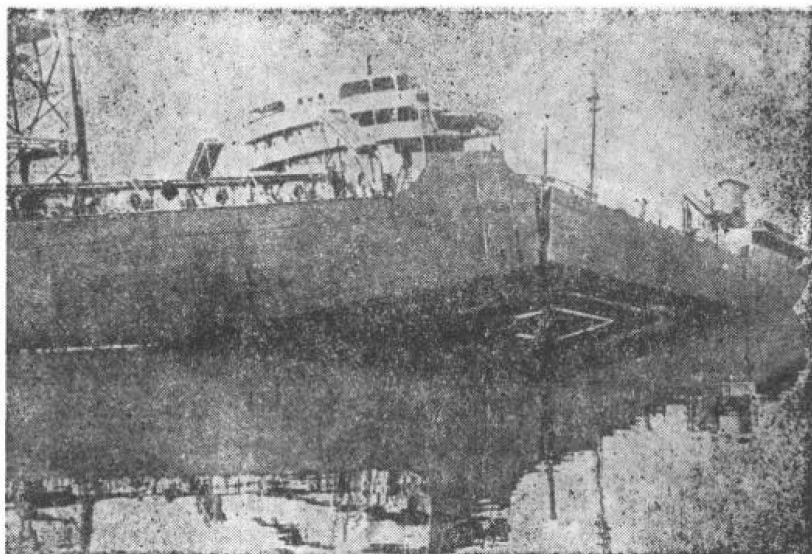


图 1-3 美国 T-2 型油船破断的实例,当时,它停靠在码头上,发生在风平浪静 -5°C 气温下

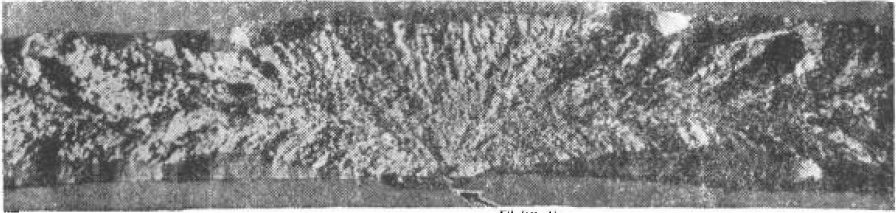
考查这些事故,脆性断裂有以下特点:

(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。

(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。如图1-4。



裂纹面

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1-5(a)。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1-5(b)，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

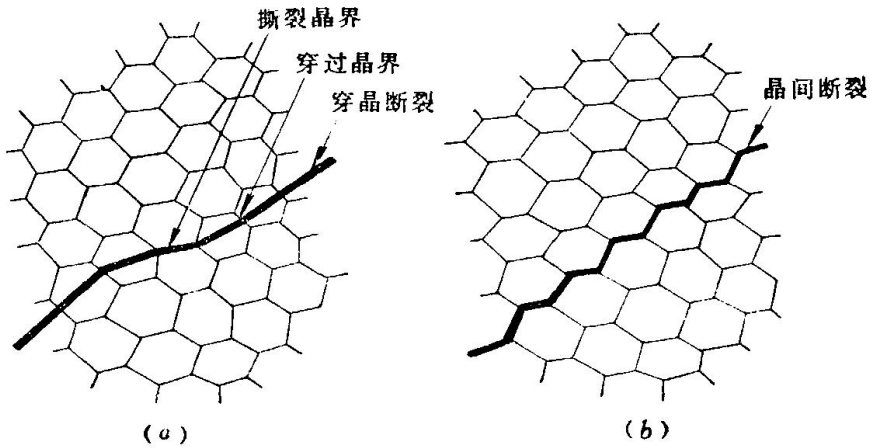


图1-5 穿晶和晶间断裂的示意图

晶间断裂。晶间断裂多数属脆性断裂,但也有延性的。

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。

由于解理裂纹是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 是在切应力作用下,沿滑移面滑移而造成的断裂。它有两类,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。

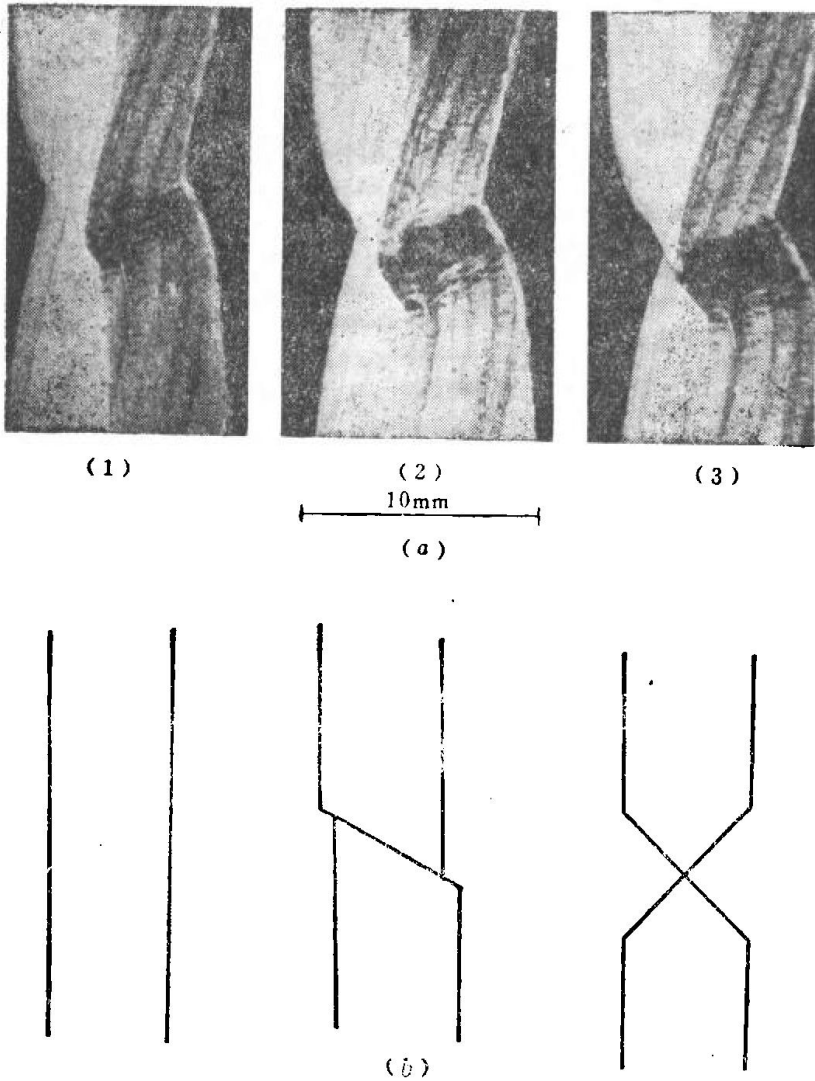
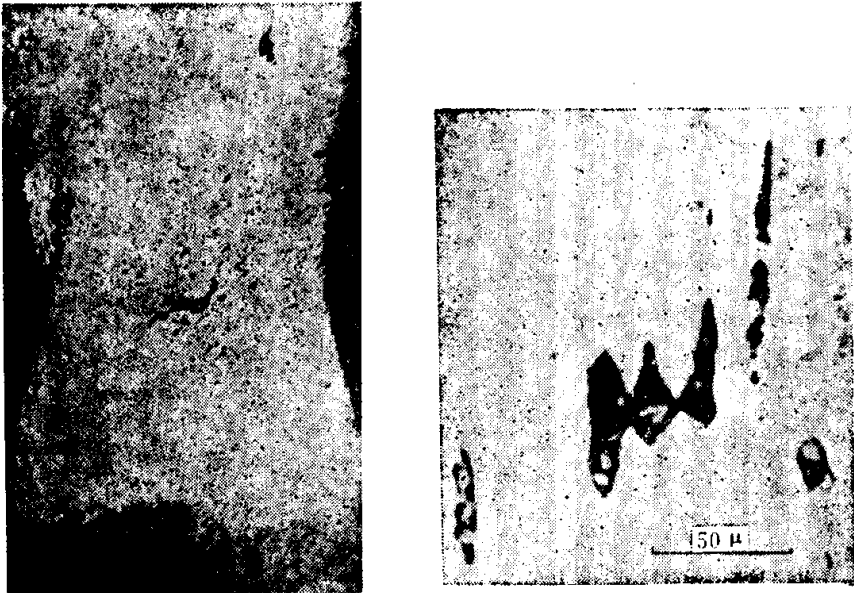


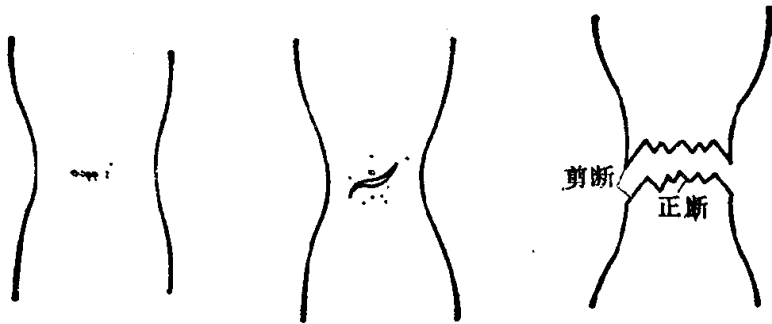
图 1-6 纯剪断的示意图及铝单晶的纯剪断照片

(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。

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



(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。

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。