

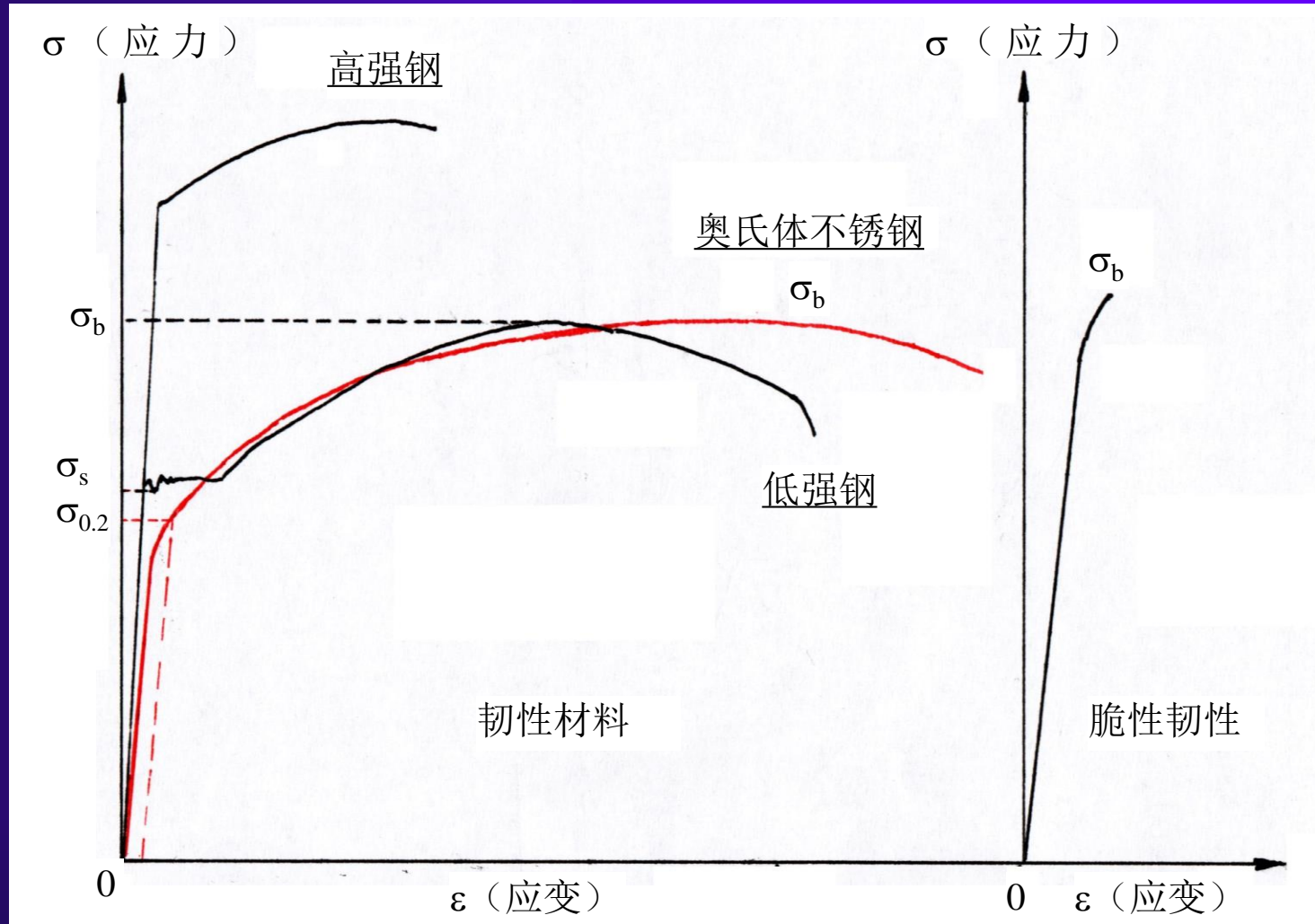
失效分析简介



关凯书

材料的韧断与脆断

拉伸曲线

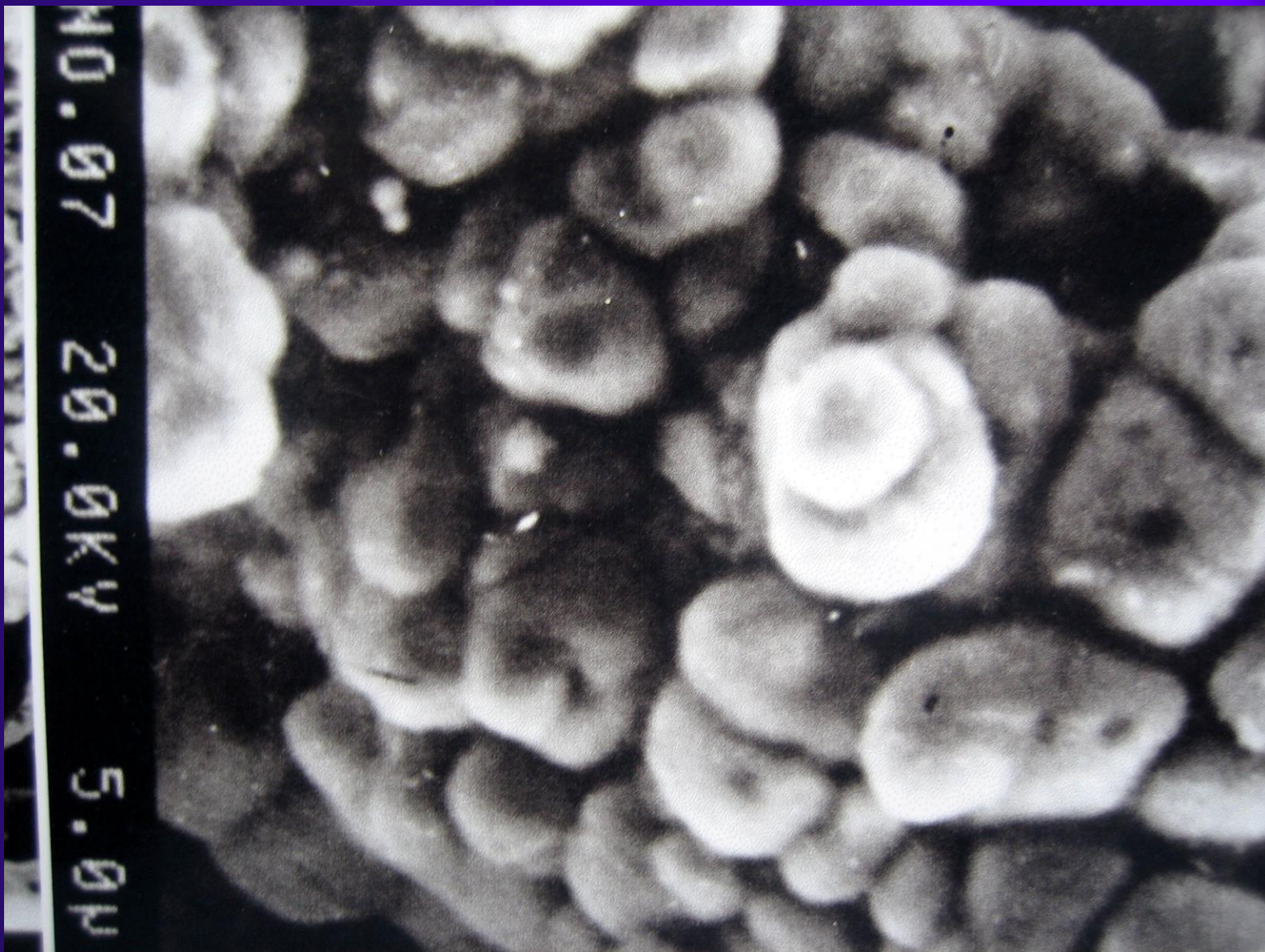


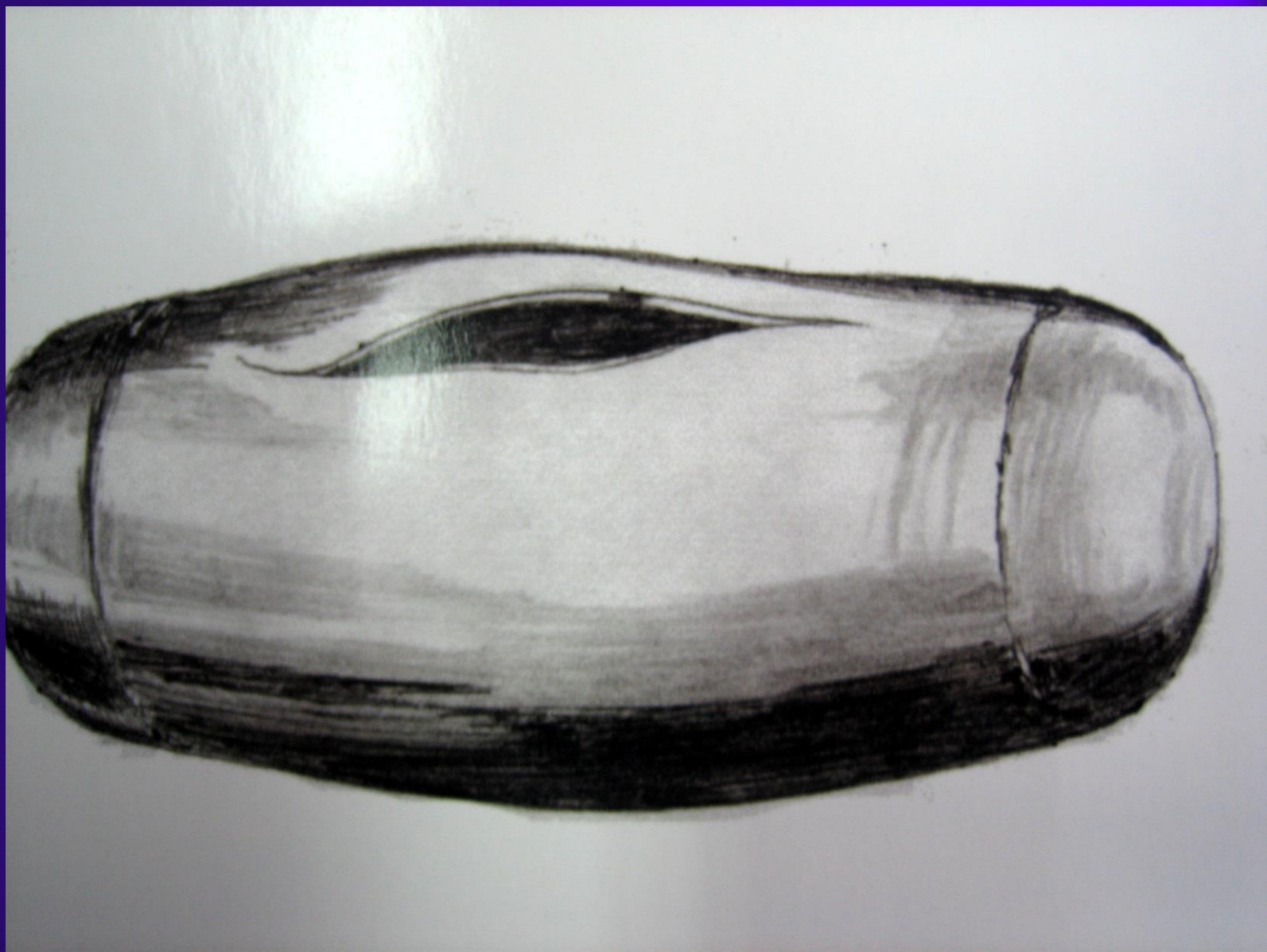
材料的韧断与脆断



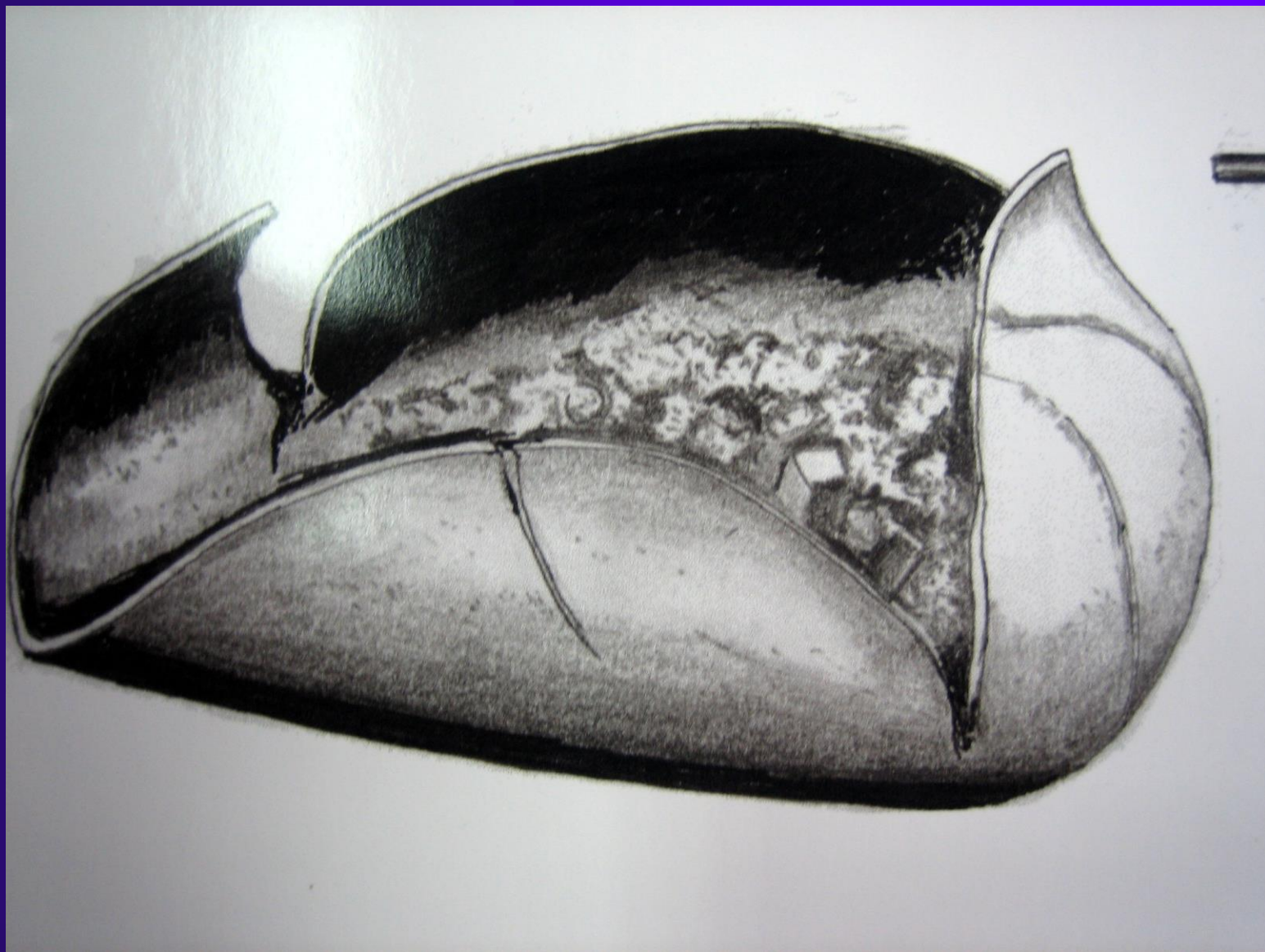
引起脆性断裂的原因

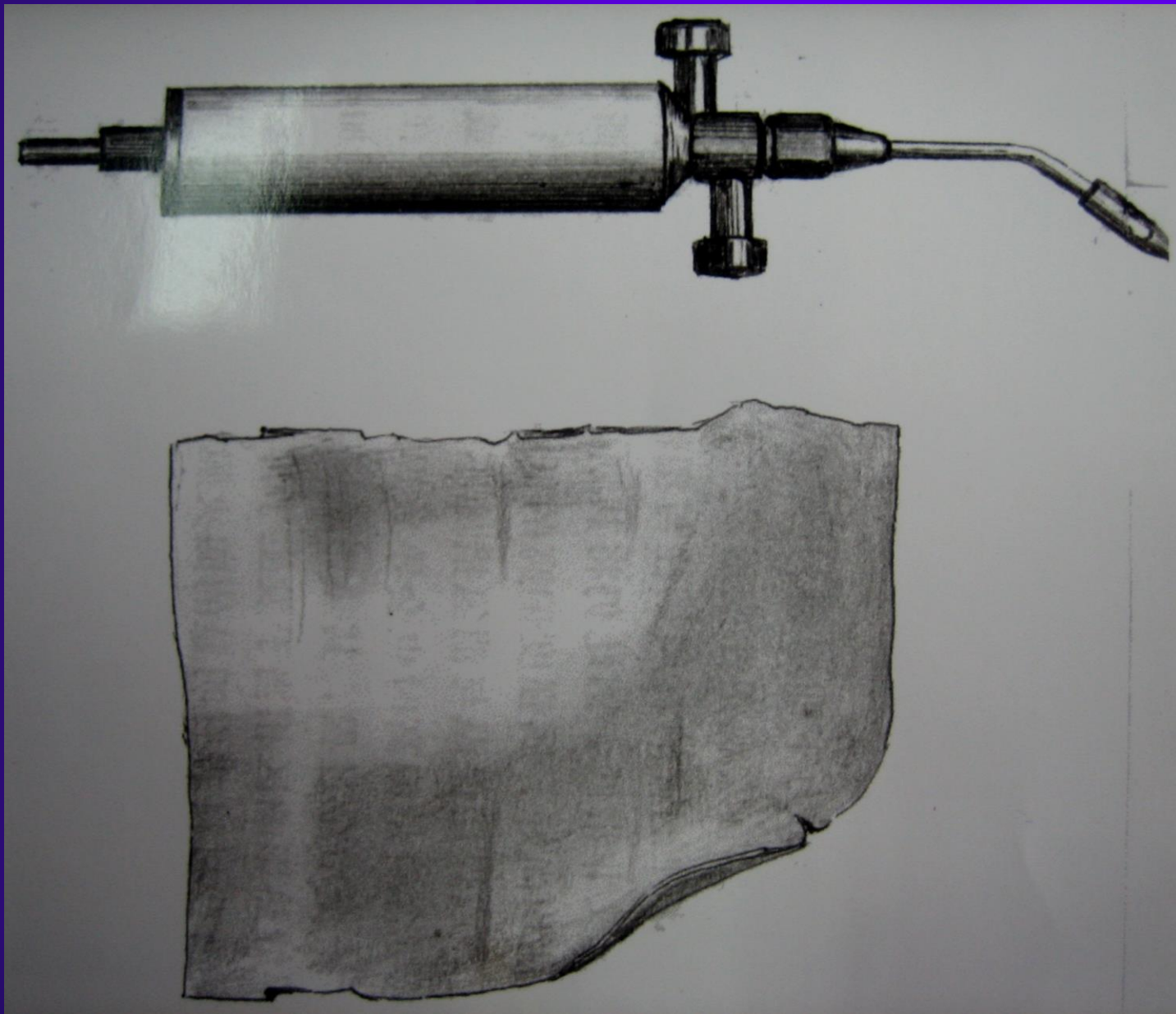
- ◆ 材料是脆性材料（无塑性变形的能力）
- ◆ 材料的低温冷脆转变
- ◆ 材料含氢量过高引起氢脆
- ◆ 材料高温下长期服役后脆化：
 - 石墨化、回火脆化、蠕变脆化
 - 奥氏体钢的碳化物析出、 σ 相析出
- ◆ 材料存在各种严重缺陷：
 - 疏松、裂纹、未焊透、未熔合等

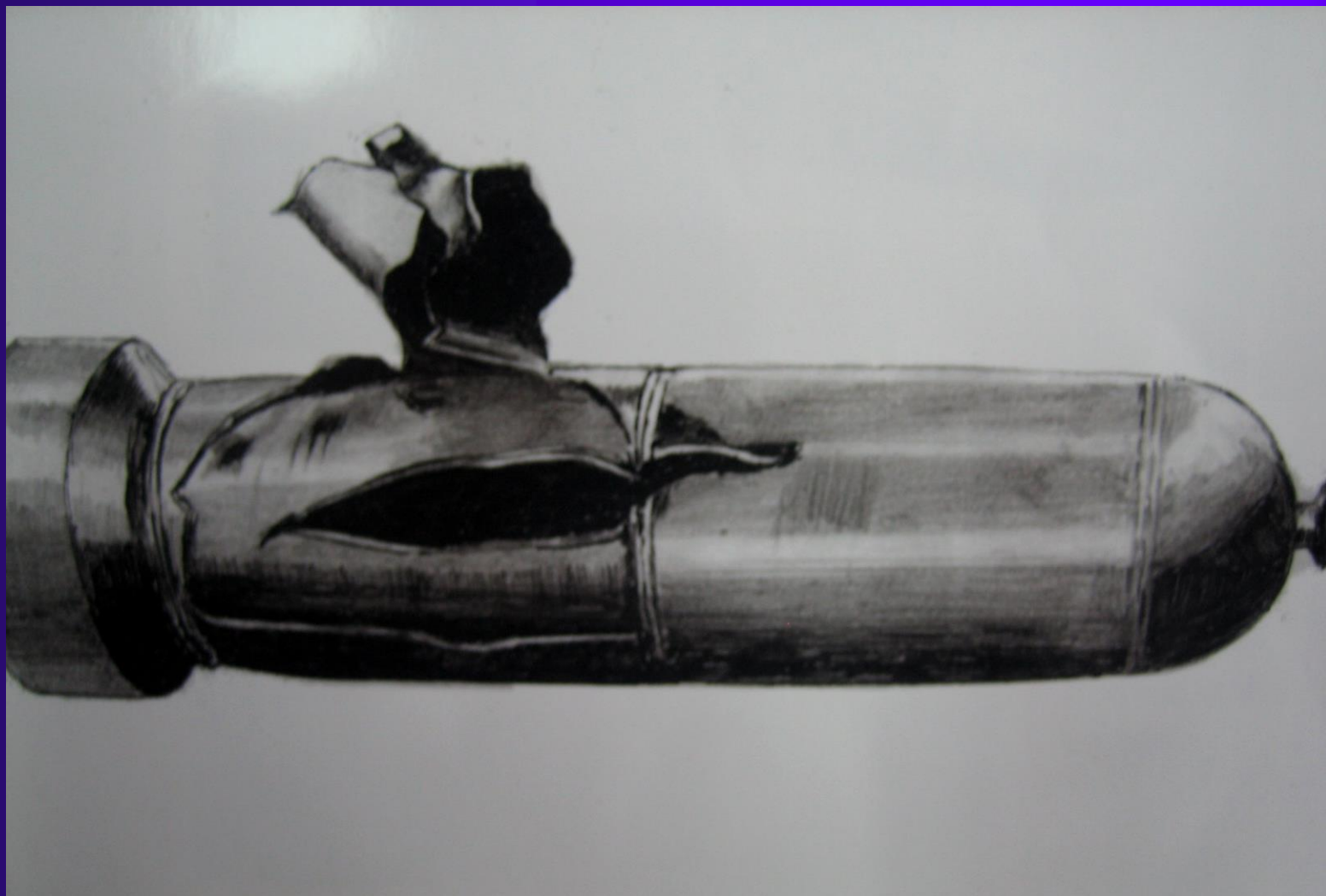


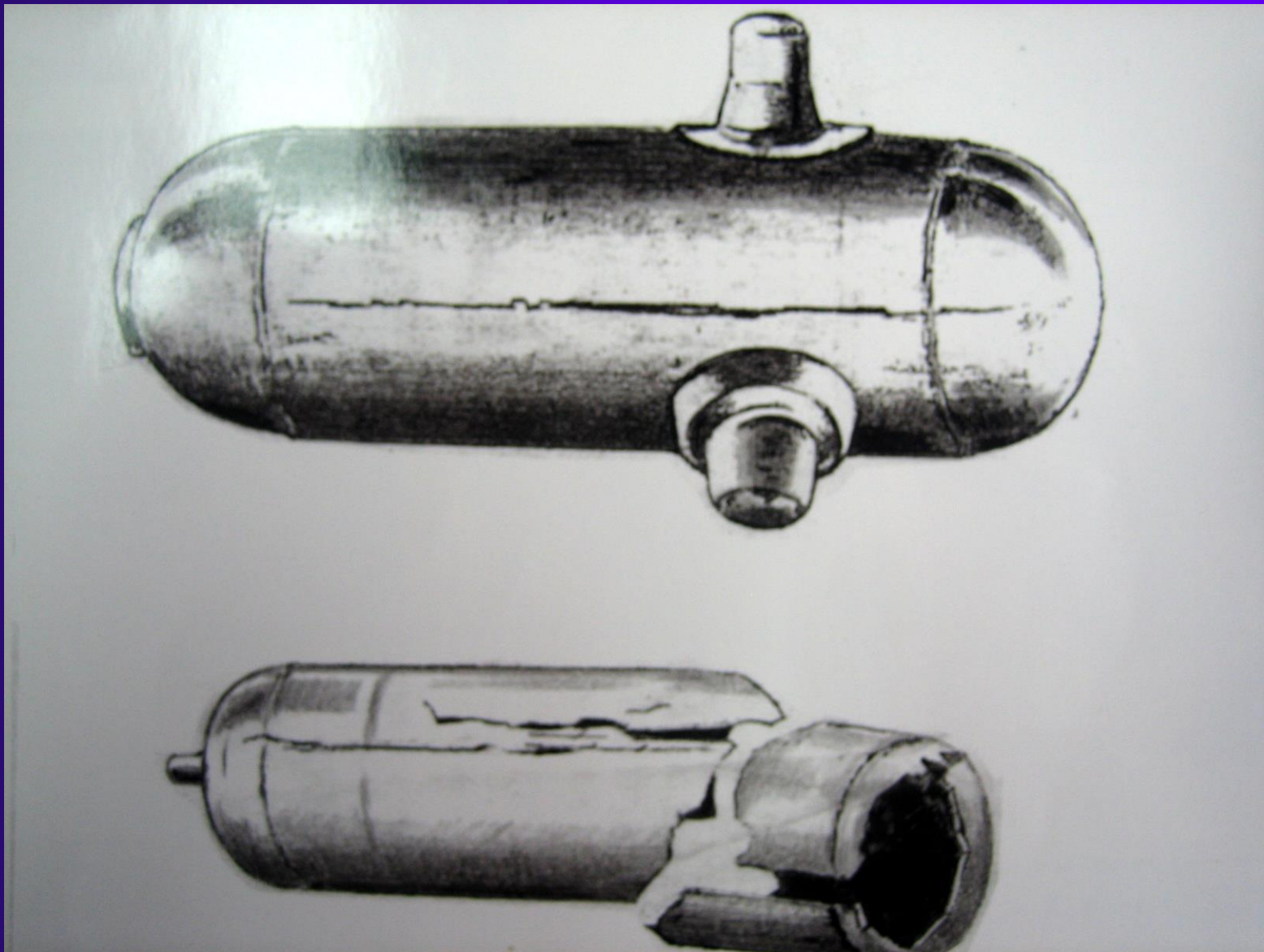






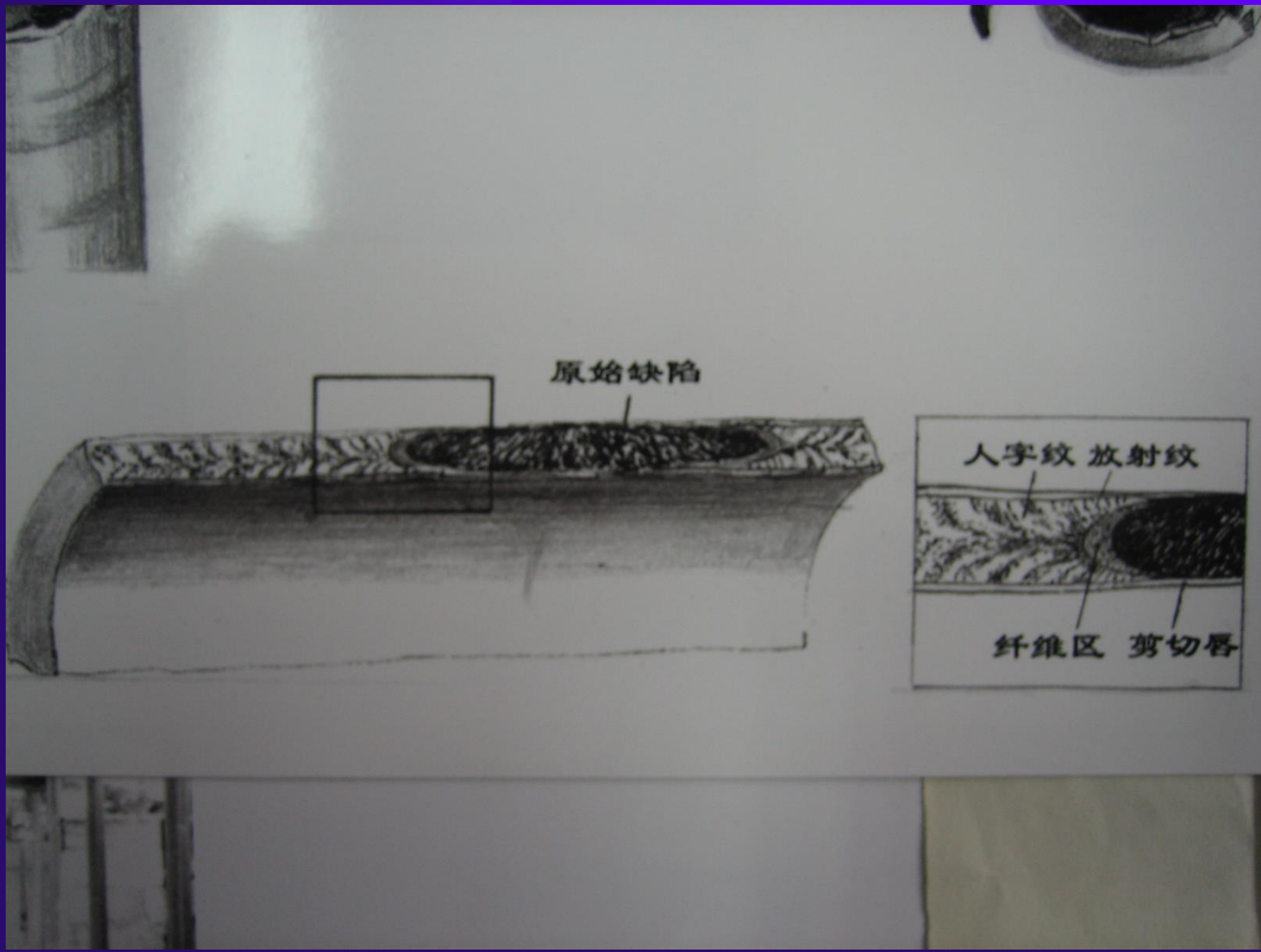


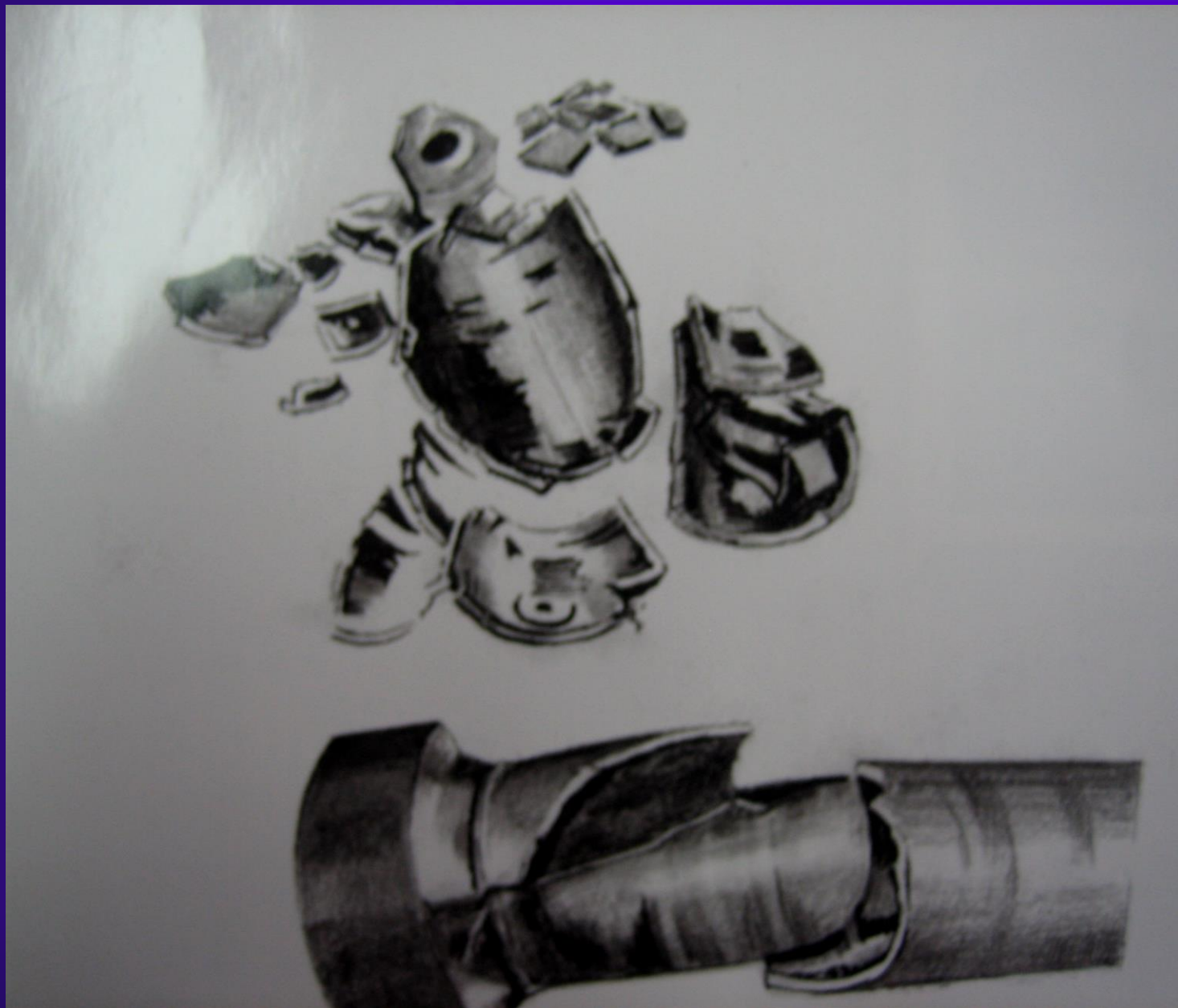












1.1 失效形式的分类

1、常见失效形式的分类

失效是一个广义的概念，不局限于断裂、腐蚀等狭义的失效。但较为通用的分类方法可将失效形式断裂失效和表面损伤失效

(1) 断裂失效

断裂失效可进一步分为5种类型。这是从断裂表现出的形态(脆断或韧断)、或引起断裂的原因(载荷、环境等)、或断裂的机理(解理、疲劳、蠕变等)进行综合考虑的混合分类方法。综合来说,分为韧性断裂、脆性断裂、疲劳断裂、环境(腐蚀)断裂和蠕变断裂等五种基本的断裂失效。

(2) 表面损伤失效

表面损伤失效主要分为磨损和表面腐蚀两类。表面损伤失效既涉及到载荷、应力和介质的性质,也与材料的有关性能有关。

按习惯分类方法

- ◆ (1) 韧性失效 (过度变形) 包括塑性大变形和韧性断裂。
- ◆ (2) 脆性断裂失效 包括材料脆性(化)引起的脆断和缺陷引起的脆断。
- ◆ (3) 疲劳失效 主要阐述由交变载荷引起的疲劳开裂及疲劳断裂失效。
- ◆ (4) 腐蚀失效 主要涉及介质引起的材料表面腐蚀损伤及腐蚀引起的变形、泄漏或断裂。
- ◆ (5) 蠕变失效 主要指高温下材料的蠕变损伤、变形与断裂。
- ◆ (6) 密封失效 有静密封与动密封的失效, 涉及密封垫片、固定件、压紧件的多种失效。不是一种独特的失效类型

1.2 韧性失效

金属构件超载时会发生塑性变形，使宏观尺寸发生明显变化。当其应力应变增大到材料的抗拉强度时，结构便出现断裂失效。一般将发生过明显塑性变形之后的断裂称为韧性(或称延性)断裂失效。

1.2.1. 韧性断裂的宏观特征

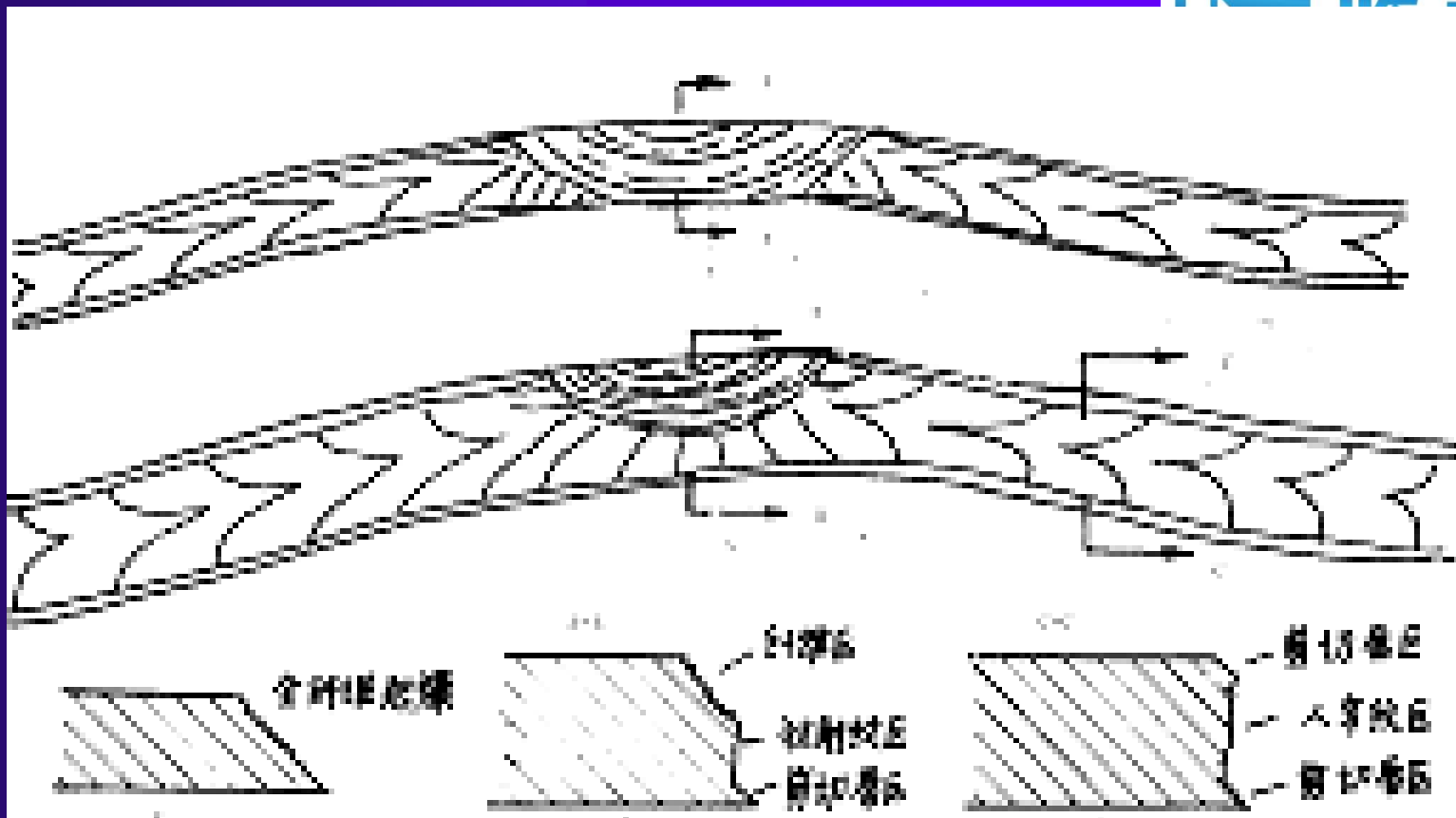
- ◆ 1、有明显的塑性变形
- ◆ 2、爆破口是长缝或有分叉，但无碎片

1.2.2 韧性断裂的断口特征

断口上的纤维区、放射纹区(或人字纹区)、剪切唇区是断口的三个要素。

纤维区无金属光泽，色质灰暗。越是灰暗说明材料的塑性越好，断裂时的拉伸塑性变形量越大。放射纹区是继纤维区的断裂发展到临界尺寸之后，随即发生快速撕裂时断口上留下的痕迹。放射纹是快速撕裂的痕迹。

剪切唇一般是断裂扩展到接近构件的边缘时在平面应力状态下由最大剪应力引起撕裂的痕迹，最大主应力约成 45° 夹角。



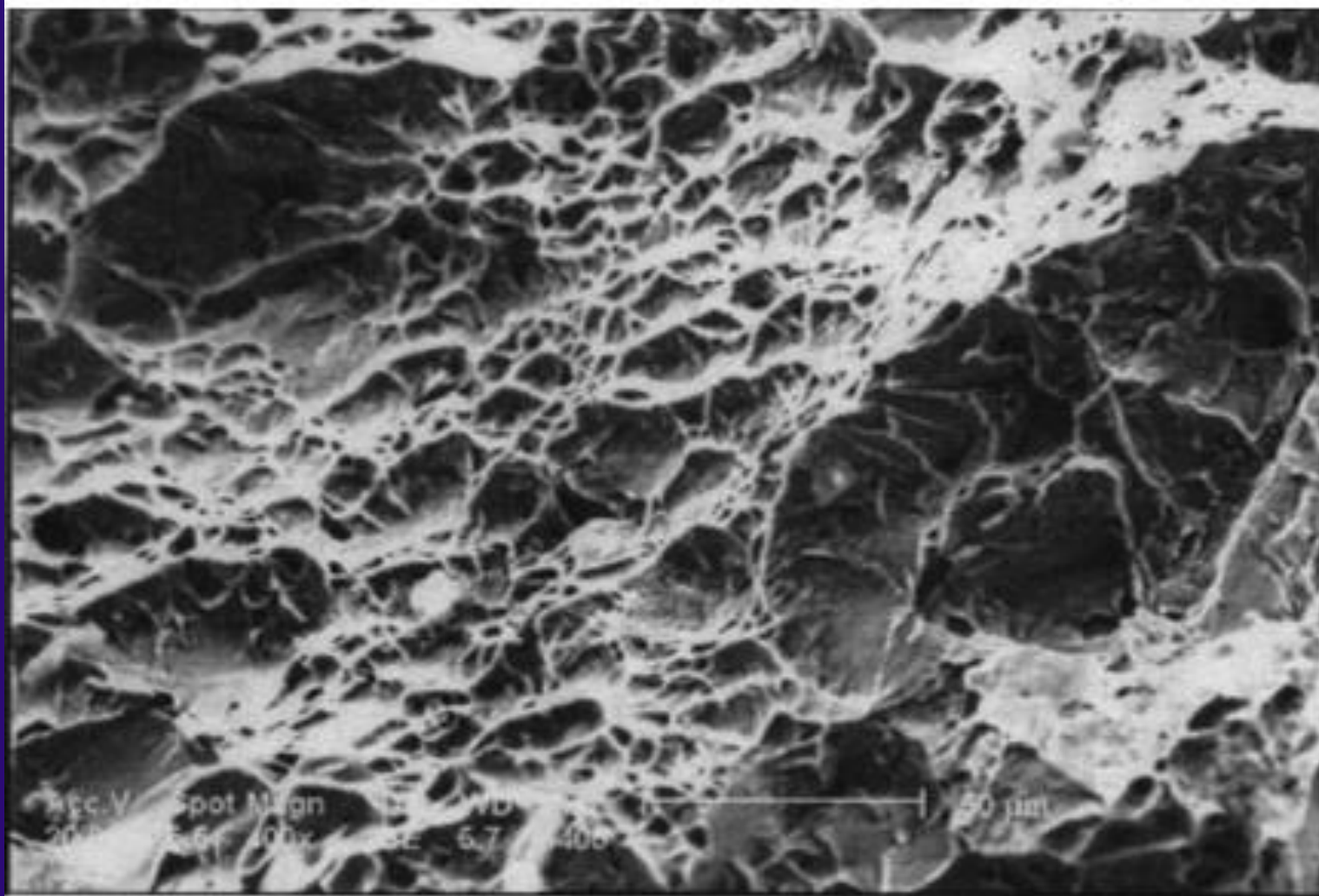
容器韧性爆破断口的三要素和断口取向

- (a)、(b) 容器断口常见形貌； (c) A—A断面全剪切起爆口；
 (d) B—B断面的断口取向； (e) C—C断面的断口取向

2、断口的显微形貌特征

(1) 纤维区的显微形貌

电镜中显示的纤维区形貌特征是呈“韧窝”花样，韧窝花样显示了金属的这种断裂机制的“微孔聚积”



“韧窝” 花样

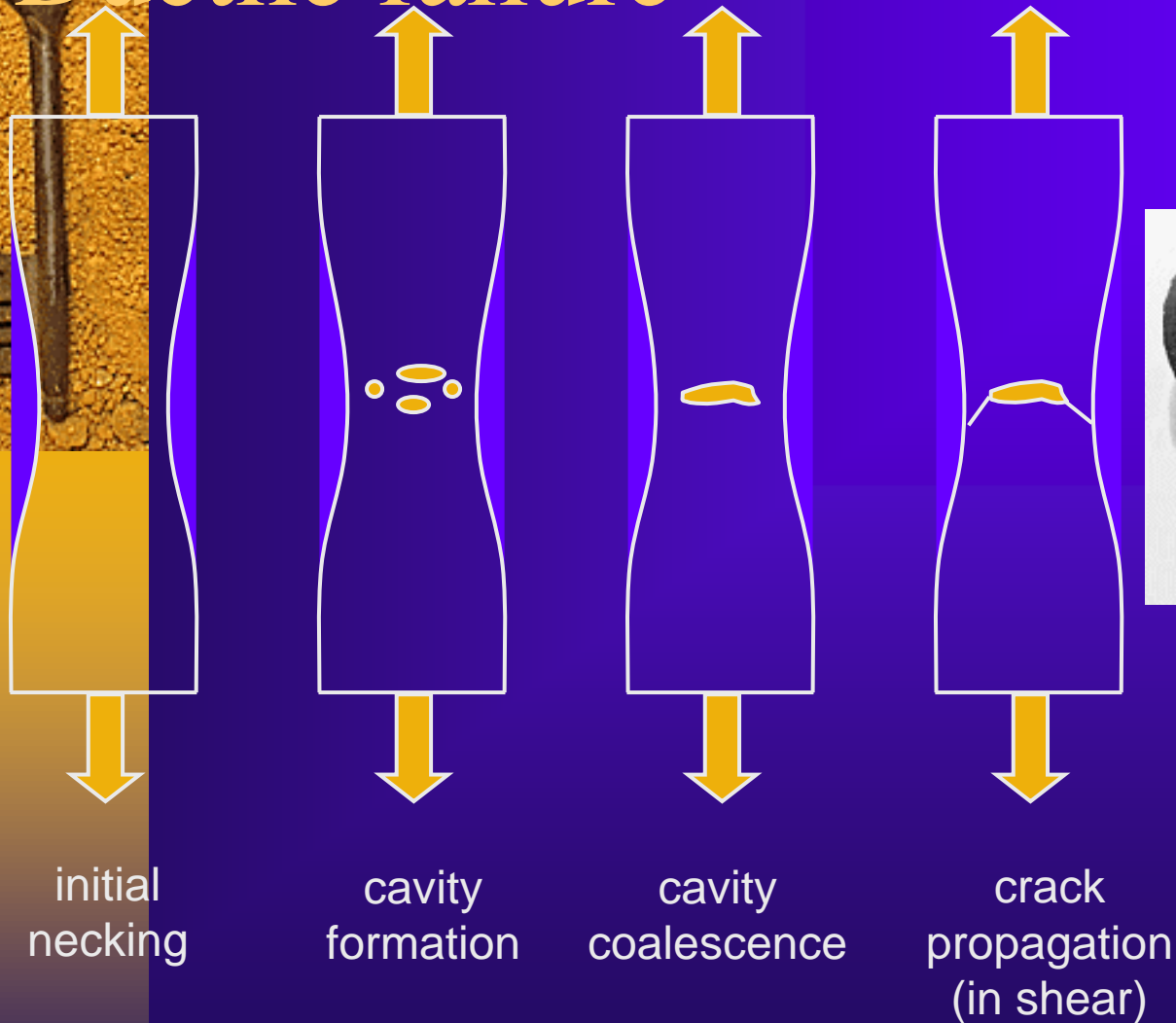
(2) 放射纹和人字纹区的显微形貌

在裂缝快速撕裂扩展过程中形成的人字纹，其断裂的机理比较特殊，在电子显微镜中显示的形貌既不是严格按结晶面断开的解理断裂机制，也不是像韧性断裂的微孔聚积，因此被称为“准解理”。

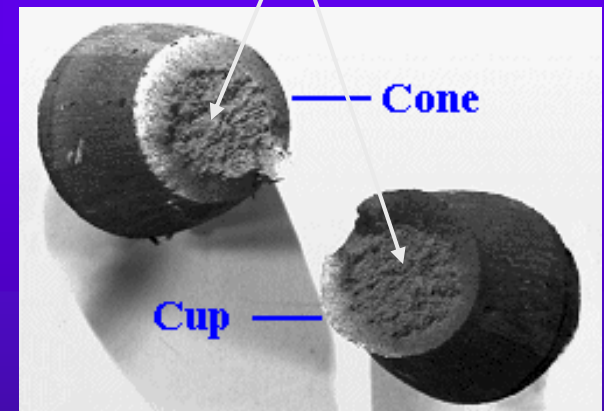
(3) 剪切唇的显微形貌

一般属于拉长韧窝型的形貌。

Ductile failure



rough surface from plastic deformation



characteristic cup-and-cone shape of ductile fracture

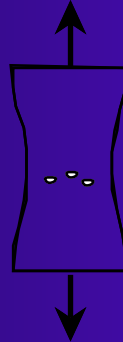
Ductile fracture (Moderately)

- Evolution to failure:

necking



void nucleation



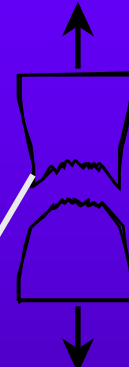
void growth and linkage



shearing at surface

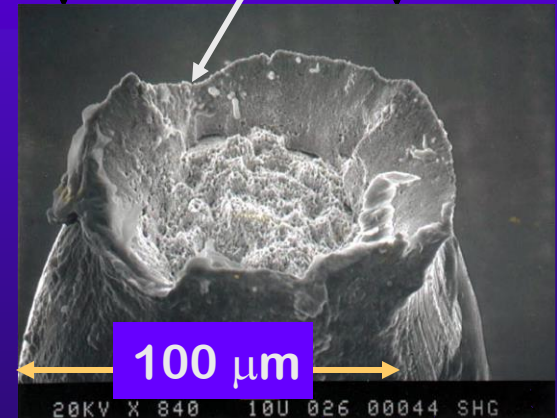
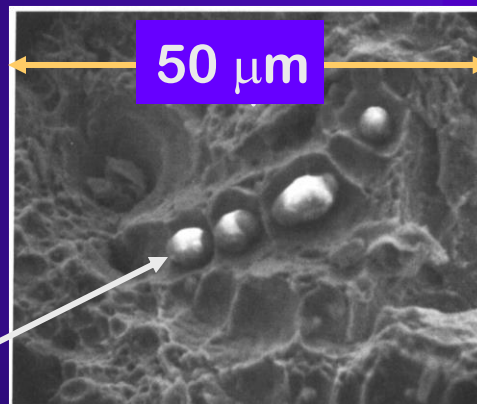


fracture



- Resulting fracture surfaces (steel)

particles serve as void nucleation sites.



1.2.4 韧性断裂的预防措施

- ◆ (1) 防止超载
- ◆ (2) 防止壁厚减薄

1.3 脆性断裂失效

脆性断裂失效主要是指设备在没有发生塑性变形时就发生断裂或爆炸。其基本原因一是由于材料的脆性转变而引起的脆断；二是由于构件出现了严重的缺陷（如裂纹）导致发生低应力水平下的脆断，这称为低应力脆断。

1.3.1 脆性断裂的宏观特征

- ◆ (1) 宏观变形量很小

主要指塑性变形量小到几乎用肉眼从宏观上觉察不到，例如容器的变形看不到鼓胀，周长几乎测量不到变化，壁厚几乎没有减薄。爆破时体积膨胀量极小。

- ◆ (2) 易有碎片

1.3.2 脆性断裂的断口特征

1、由材料脆性引起脆断的断口特征

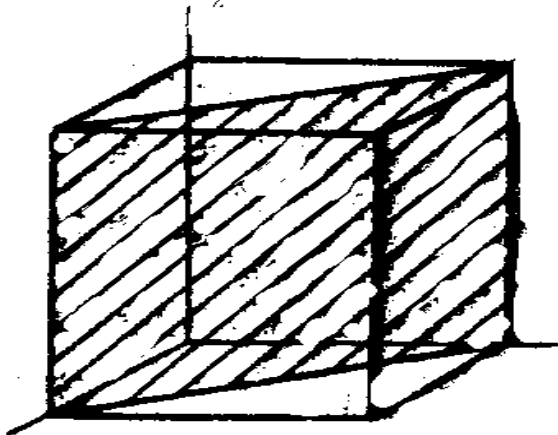
(1) 断口的宏观特征

①断口平齐，断口和最大主应力方向相垂直，断口边缘不会出现剪切唇，断口上不会留下记录断裂方向的人字形或放射形纹路。

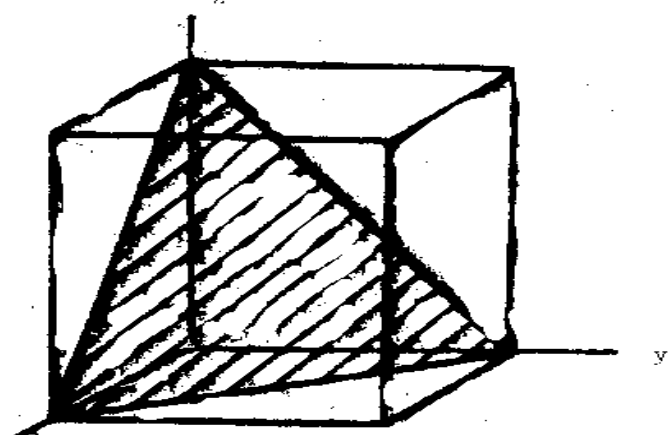
②断口上呈现金属闪光

(2) 断口的显微特征

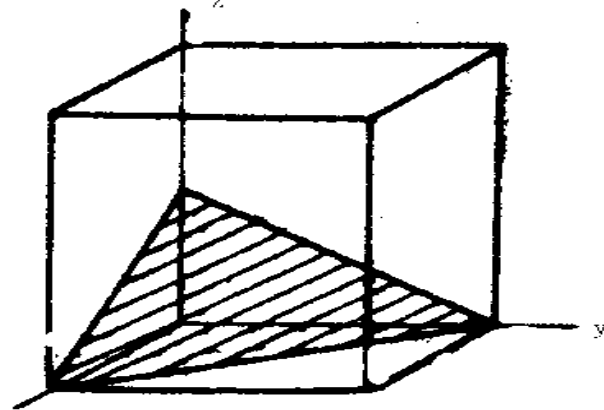
①解理断裂，沿晶体某一结晶学平面的断裂称为解理断裂。面心立方结构的晶体(如奥氏体不锈钢)在任何温度下(包括深度冷冻的温度下)也不会发生解理型的脆断。



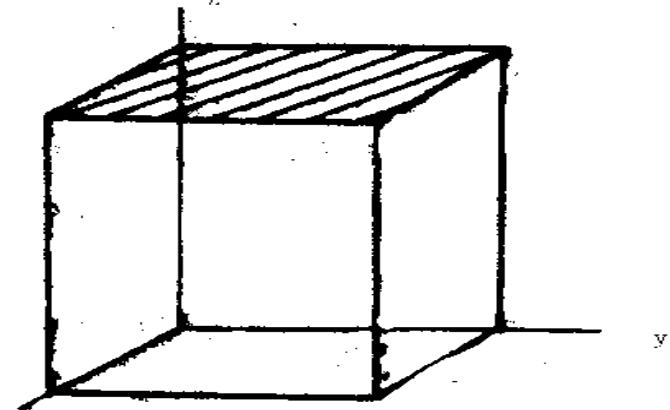
{110}



{111}

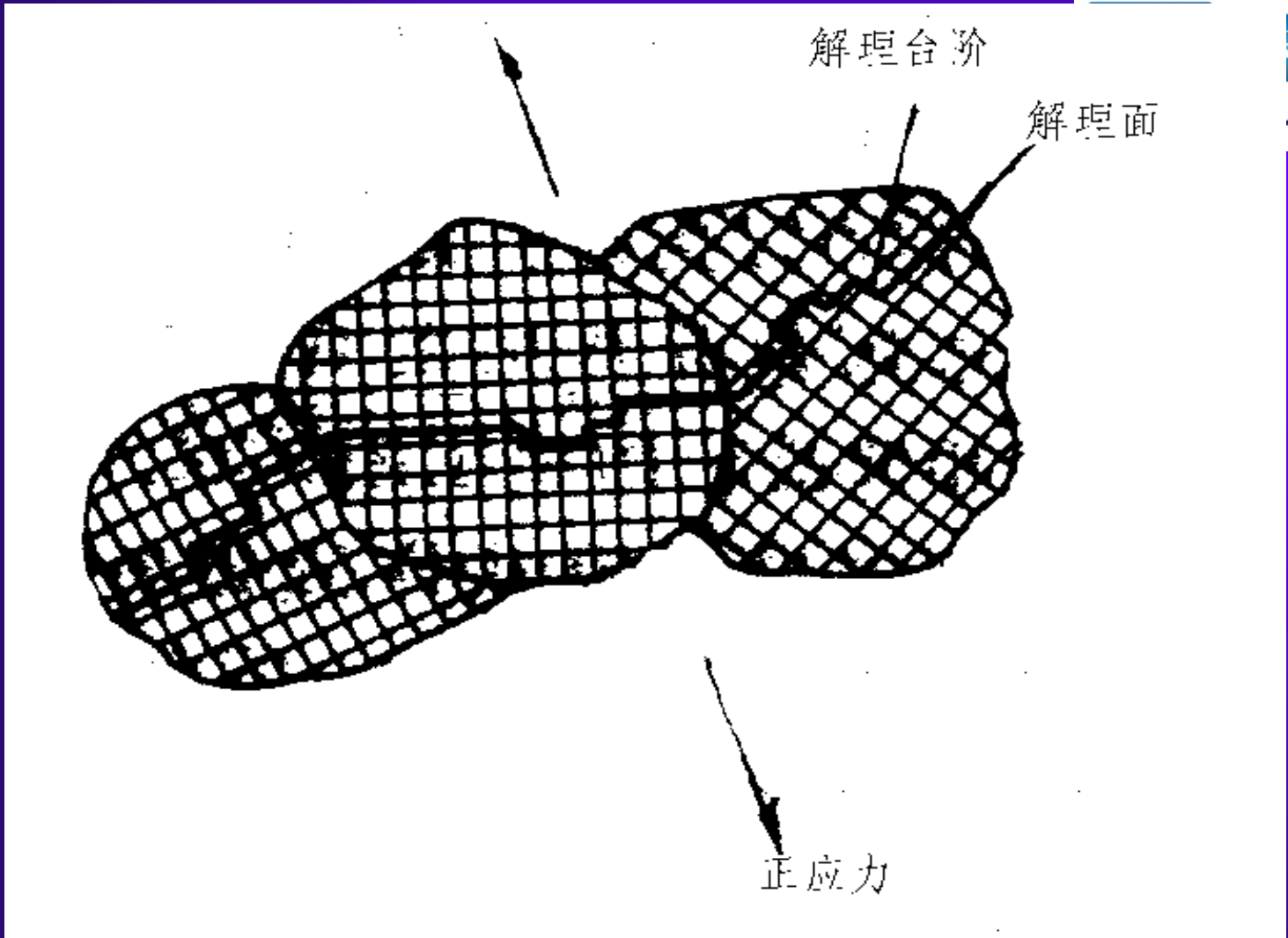


{112}



{001}

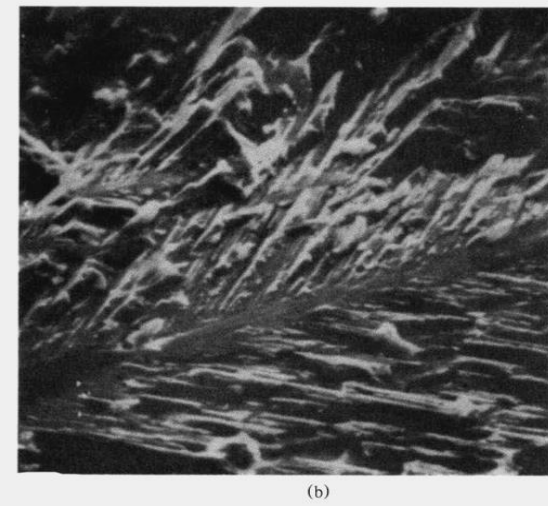
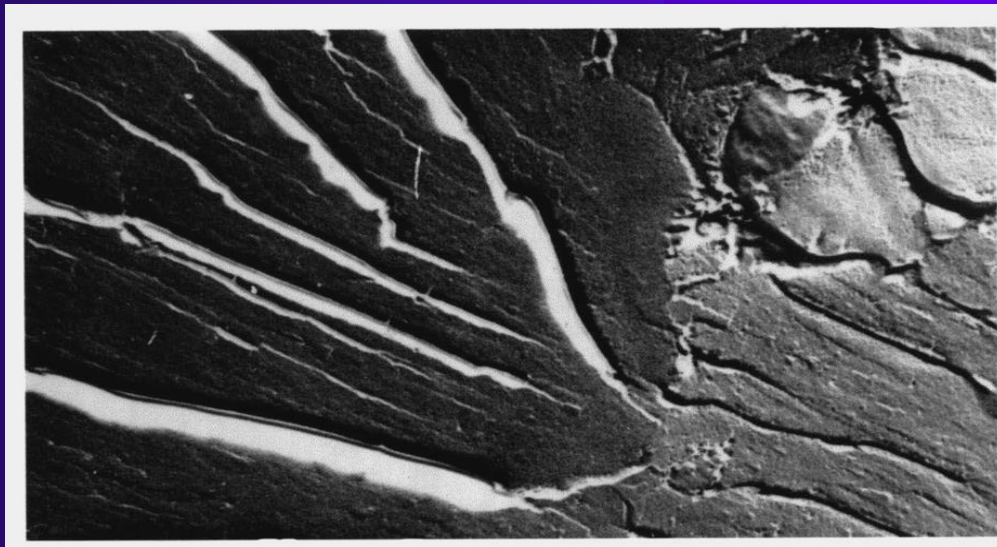
体心立方晶胞的几种典型晶面



多晶体解理断裂的路径和解理面

由于解理是沿某一结晶面断裂的，因此解理必然是一种穿晶断裂。

- ②解理断裂断口的显微特征，解理断裂后的断口在电子显微镜中显示出最重要的显微形貌特征是河流状的花样。



解理断裂后断口的典型河流花样


2、由严重缺陷引起低应力脆断的断口特征

容器设备存在严重缺陷时（如裂纹、未焊透或未熔合），只要载荷达到一定程度即会引起断裂。如果材料相对较脆，则断裂时载荷不会很大，结构总体上尚未屈服，这就是低应力脆断。判断是否属低应力脆断的准则有两条：一是总体塑性变形是否明显；二是断裂时的应力是否达到屈服的程度。

(1)断口的宏观特征

断口与单纯因材料脆性造成的脆断有明显的差别。最重要的差别是断口上有一明显的原始缺陷。

①原始缺陷区

- 
- ◆ ②在加载过程中缺陷逐步扩展引起的撕裂过程区,宏观上是较窄的纤维区
 - ◆ ③快速撕裂区 宏观上是呈放射纹及人字纹区,通常不出现金属闪光。
 - ◆ ④边缘剪切唇区
 - ◆ (2)断口的显微特征

断口在撕裂过程区(纤维区)、快速撕裂区形成的人字纹与放射纹以及边缘的剪切唇区的显微特征与前面所述的韧性断裂断口并无本质区别。

原始缺陷区域的显微特征则相当复杂，在电镜中观察到的形貌也变化多端。

1.3.3 脆性断裂的预防措施

- ◆ (1) 确保材料有足够的韧性
- ◆ (2) 避免和降低结构的应力集中
- ◆ (3) 热处理消除容器的残余应力
- ◆ (4) 加强制造的和在役的无损检测,避免结构中存在的各种缺陷。

1.4 疲劳断裂失效

载荷的交变和结构存在应力集中是疲劳断裂失效的两大基本原因。

1.4.1 疲劳断裂的宏观特征

1、疲劳断口的宏观特征

疲劳断口宏观上具有两大特征：

- 一，是断口比较平齐光整
- 二，是断口上有明显的分区。

因此疲劳断口较易与其他断口相区别。疲劳断口总体上虽然平齐光整，但与解理脆断带有闪光的“结晶状”断口不同，也与沿晶脆断的粗糙晶粒断口不同

疲劳断口的三个区域

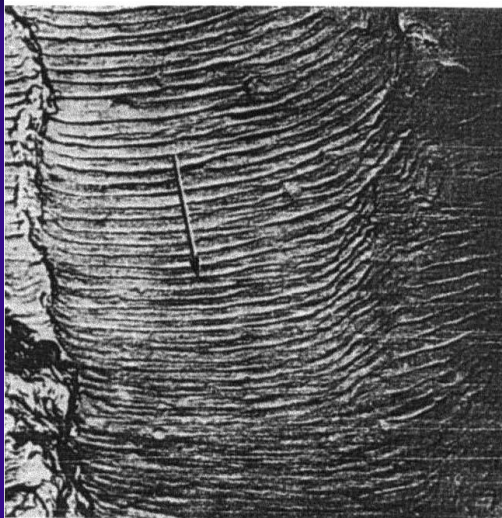
- ◆ ①萌生区的几何尺度极小，从失效分析的角度有时却很重要，需弄清萌生区是否有冶金缺陷、制造缺陷、或腐蚀形成的缺陷。
- ◆ ②疲劳扩展区 是疲劳断口中最具特别形貌的区域。不但平齐光整而且用肉眼可以观察到特殊的贝壳纹路即犹如贝类外壳上的弧状条纹，而贝壳状纹路的中心就是疲劳裂纹的萌生区或原始缺陷区。
- ◆ ③瞬断区 是疲劳断口上最终断裂区，是放射纹及人字纹区，可能在加剪切唇

1.4.2 疲劳断口的显微特征

在电镜中放大至千倍(以致上万倍)时可以观察到的主要特征是“海滩状”的“疲劳辉纹”。不是所有金属材料的电子显微疲劳断口都有清晰整齐的海滩状辉纹。一般是铝合金和镍合金的疲劳辉纹十分清晰整齐；奥氏体不锈钢疲劳断口的疲劳辉纹也较清晰；而低合金钢，特别是强度较高的低合金钢这类铁素体和珠光体类钢的辉纹往往很不清晰。需要说明的是，宏观上观察到断口上的“贝壳纹”不是电镜中的海滩状的疲劳辉纹，但两者有密切联系。只有在变载荷时才会形成宏观上的贝壳纹。

实际上由于每一循环就在断口上留下一个疲劳辉纹，因此从辉纹间测得的间距大体可以计算出疲劳扩展速率。

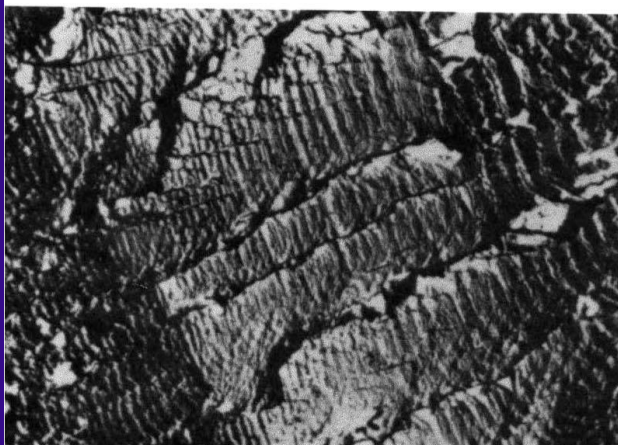




(a)



(b)



(c)



(d)

扫描电镜中观察到的几种典型疲劳辉纹

1.4.3 疲劳断裂失效的预防

1、一般预防原则

降低应力水平和减小应力集中。

减小构件的应力集中，涉及结构设计、加工制造和原材料的冶金或轧制质量诸多方面。

2、压力容器低周疲劳失效的预防措施

(1) 选用合适的抗疲劳材料

(2) 尽量降低结构的应力集中程度

要保证有较大的过渡圆角。一般不应将关键的焊缝设计成角焊缝，应改为对接焊缝



(3) 制造和在役检验中应注意的问题

在原有应力集中的部位不得有材料内部及表面的缺陷，不得允许保留引弧坑和焊疤

(4) 预压应力处理

对承受交变载荷的构件表面(最容易形成表面疲劳裂纹的地方)预先施加压应力(如喷丸处理或表面滚压)。

(5) 过载处理


发现有疲劳开裂时，可以采取比正常设计载荷高出1.3~2.0倍的载荷进行一次过载(超载)处理，可以将疲劳寿命提高好几倍

1.5 腐蚀失效

腐蚀的机理上有电化学腐蚀和化学腐蚀两大类。压力容器和设备的腐蚀形态可以分为8大类型：即：(1) 全面腐蚀（均匀腐蚀）、(2) 孔蚀（点蚀）、(3) 缝隙腐蚀、(4) 晶间腐蚀、(5) 应力腐蚀、(6) 氢腐蚀、(7) 冲蚀、(8) 双金属腐蚀。

1.5.1 晶间腐蚀失效

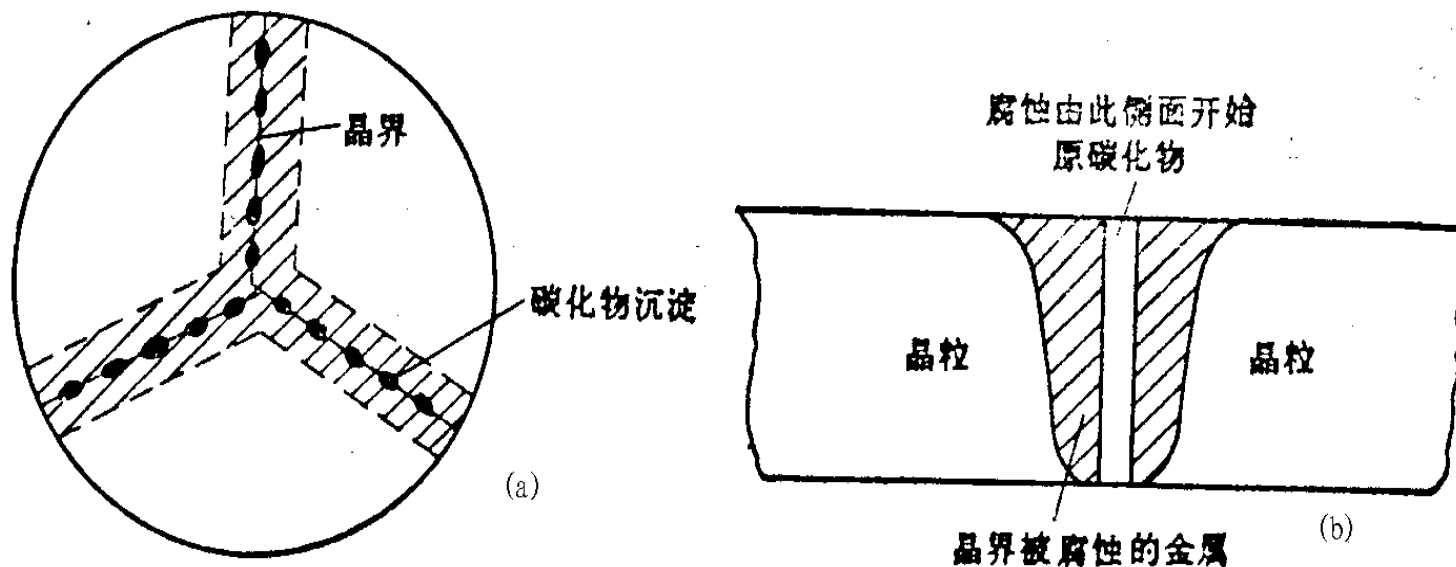
晶间腐蚀就是指沿晶界发生的腐蚀，包括晶界及其附近很窄的区域在内的区间发生的腐蚀。20世纪30年代初提出了能较好解释奥氏体不锈钢晶间腐蚀的晶界贫化理论



常见的奥氏体不锈钢的晶间腐蚀主要发生在焊接区，特别是母材的焊接热影响区，因为母材部分在轧制成板材或管材出厂之前已进行过固溶化处理与敏化效应减少焊缝发生晶间腐蚀的主要方法是采用含碳量很低的母材焊条焊丝（ $C \leq 0.08$ 低碳， $C \leq 0.03$ 超低碳）同时含有更能快速形成碳化物的铌、钛元素，以防止形成 $Cr_{23}C_6$ ，

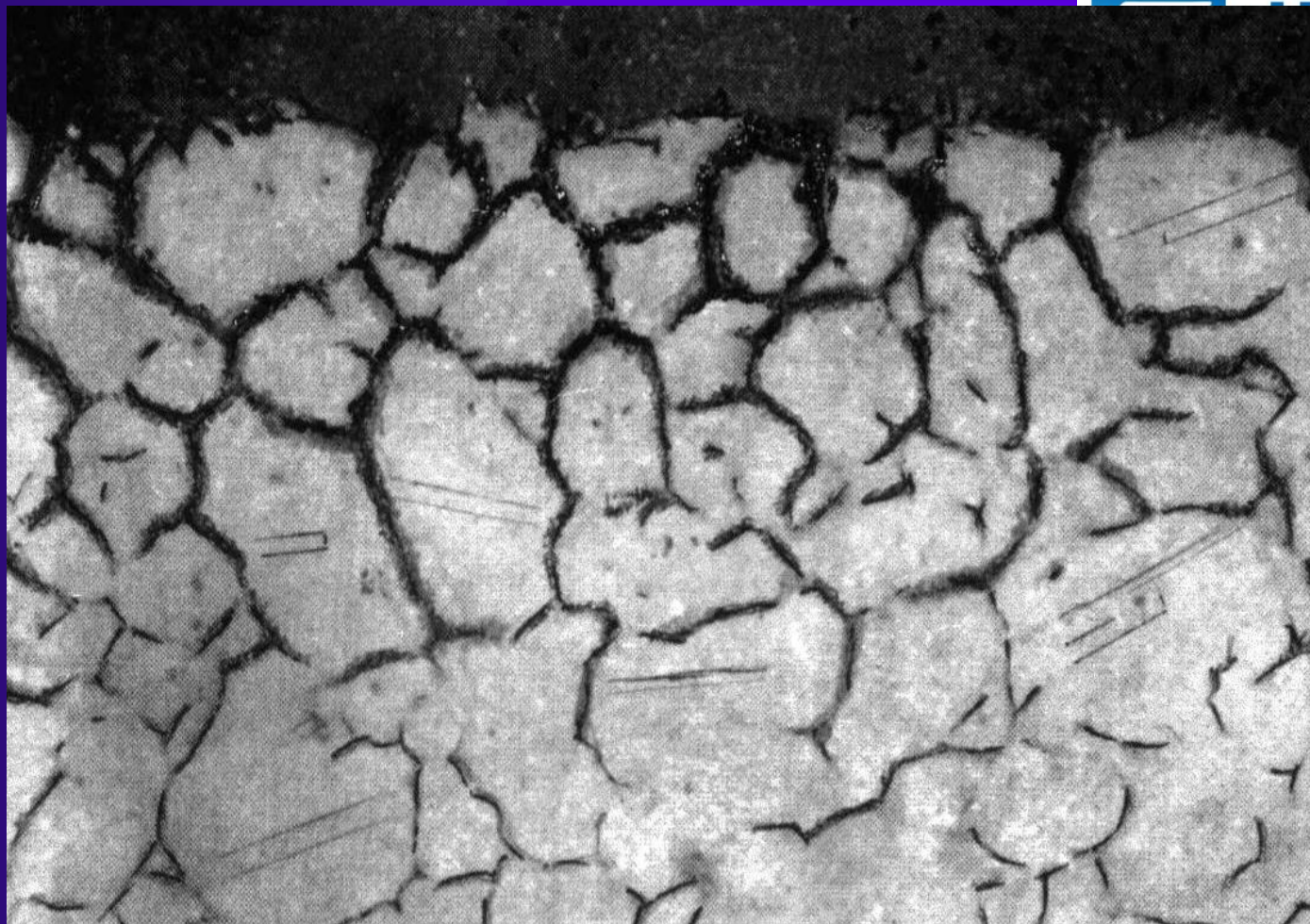
稳定化处理是将奥氏体不锈钢加热至 $900^{\circ}C$ 让钛或铌首先与碳形成碳化物，于是就没有可能再在晶界析出碳化铬和出现贫铬区。

1、晶间腐蚀的金相检验



18—8奥氏体不锈钢形成敏化晶界区和晶间腐蚀的原理

(a) 敏化晶界区形成贫铬区； (b) 晶界区的腐蚀过程



晶间腐蚀的剖面金相

2. 晶间腐蚀的预防

原则上以采用能抵抗介质晶间腐蚀的材料为宜。例如当采用304不锈钢发现有晶间腐蚀时，则可改用超低碳(含碳量小于0.03%)的304L不锈钢。

1.5.2 应力腐蚀失效

金属材料的应力腐蚀在材质、介质和应力(主要是拉应力)三个因素的共同作用和耦合下才会发生。应力腐蚀的表现形态主要是形成不断扩展的裂纹，这是一种在应力作用下的局部腐蚀,危害性特别大。

1、应力腐蚀裂纹的形貌特征

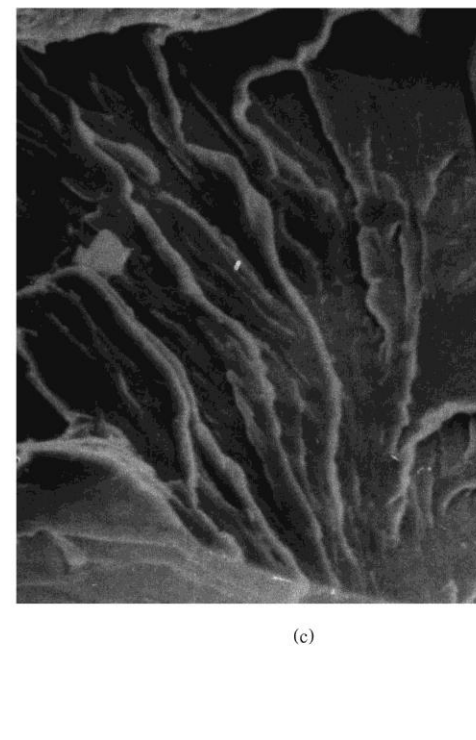
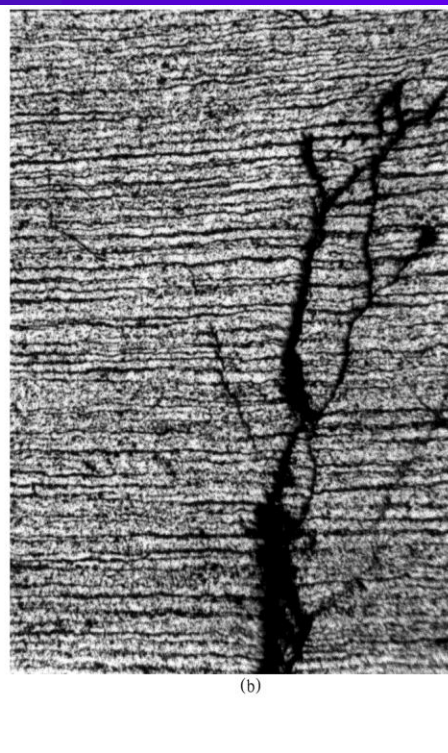
(1) 宏观形貌

用肉眼或借助放大镜观察这类裂纹，发现应力腐蚀裂纹宏观上具有多源、分叉、宏观总体走向与最大主应力基本相垂直等三大特征。

应力腐蚀裂纹往往起源于结构的应力集中处。焊缝的咬边、引弧坑以及孔蚀的凹坑、甚至焊缝的焊波处均是容易引发应力腐蚀裂纹的地方，因此常常是多源的裂纹，不是只有一条裂纹。

(2) 显微形貌

用金相显微镜或扫描电镜观察时，可以发现腐蚀扩展的途径有穿晶扩展，沿晶扩展和混合型(即既有穿晶同时又有沿晶扩展)三种类型。



穿晶型应力腐蚀裂纹金相与断口

2、奥氏体不锈钢的应力腐蚀

据近年统计的不锈钢腐蚀失效事例中，几乎50%是应力腐蚀失效。奥氏体型不锈钢对氯离子的应力腐蚀(俗称氯脆)十分敏感。凡奥氏体不锈钢经过敏化温度(450~850℃)加热(包括焊接区)，过饱和的碳形成碳化物沉淀并在缓冷过程中易形成晶界贫铬的。晶界的耐蚀性下降，晶界的负电位更低，容易形成沿晶的应力腐蚀。低碳、超低碳的奥氏体不锈钢或不经敏化温度热加工的，则不易形成沿晶的应力腐蚀，但易形成穿晶应力腐蚀。特别是经过冷作加工的更易形成穿晶应力腐蚀。

防止或减缓奥氏体不锈钢应力腐蚀的基本途径为：

- ①采用低碳与超低碳不锈钢可以减缓沿晶应力腐蚀开裂及扩展，但不能消除应力腐蚀开裂的敏感性
- ②尽量避免敏化温度下的加热与冷却
- ③尽量作消除残余应力处理。
- ④如果奥氏体不锈钢经深度冷加工而出现较多马氏体组织而硬化的结构件（如波纹形膨胀节等），对应力腐蚀更为敏感。

防止发生应力腐蚀，目前新发展的不锈钢品种

- ◆ ①高镍Cr-Ni不锈钢, 即镍的含量达45%以上
- ◆ ②超纯铁素体不锈钢,
- ◆ ③铁素体—奥氏体双相不锈钢

奥氏体不锈钢，还对高温高压纯水(例如电厂纯水、核电站纯水)、连多硫酸、湿 H_2S 、NaOH水溶液、海水与海洋大气等环境也有应力腐蚀开裂的敏感性。

3、碱脆

低碳钢和低合金钢在苛性碱溶液中的应力腐蚀称为碱脆。较多发生在用NaOH处理过的软化水系统中。

当碱浓度大于5%~15%时才可能出现碱脆，浓度达到30%时最为敏感。设备中容易发生NaOH富集浓缩的地方尤易出现碱脆，产生碱脆的最低温度为60~65℃，温度愈高愈易发生，在沸点附近最容易发生碱脆。含碳量低于0.20%的低碳钢和低合金钢较敏感。合金元素Al、Ti、Nb、V、Cr等的加入可以降低甚至消除碱脆敏感性。

能导致碱脆的介质还有KOH、LiOH及K₂CO₃、铝酸钠等。

4、硝脆

生产硝酸钠、化肥及炼油的催化裂化再生器的碳钢低合金钢设备发生过很多硝脆失效事例。硝脆是指在含硝酸根或其他氮氧化物介质环境中，钢材的应力腐蚀开裂。硝脆比碱脆更容易发生。硝脆应力腐蚀倾向由大到小的排列次序是：



露点腐蚀引起的应力腐蚀最为有效的防治措施是设法提高壁温。

5、无水液氨对碳钢和低合金钢的应力腐蚀


(1) 腐蚀机理

含水量低于0.2%的液氨可称为无水液氨。

采用强度较高的低合金钢后出现了大量的焊缝开裂问题，并认为这也是应力腐蚀问题。仍属于阳极溶解型的电化学过程。并发现裂尖腐蚀产物中有碳的聚集，可能与液氨中杂质 CO_3^{2-} 有关。微量的氧会促进液氨的应力腐蚀。

(2) 预防措施

钢的强度高直接影晌抗液氨应力腐蚀的性能。如果采用强度较低的($\sigma_s \leq 350\text{MPa}$,)铁素体钢制造,而且焊后进行了消除应力



热处理，则应力腐蚀的危险性最小。化组织CEOC提出的建议文件(编号R43 / CEOC / CP82def)中指出，对于-20℃以上储存无对于-20℃以储存无水液氨的容器应采用强度较低的钢材($\sigma_s < 450\text{MPa}$)，如有可能则采取整体或局部的消除应力处理，而且检验周期应不超过4年

直至1998年化工部标准HG 20581-1998《钢制化工容器材料选用规定》才对液氨储罐用材作出规定：要求所用材料的 $\sigma_s \leq 355\text{MPa}$ ， $\sigma_b \leq 630\text{MPa}$ ；并对碳当量提出要求：低碳钢和碳锰钢的 $C_d \leq 0.4\%$ ，低合金钢 $C_d \leq 0.45\%$ ；热处理状态至少为正火、或正火十回火、退火、

调质；硬度规定值为：低碳钢HV(10) ≤ 220 ；合金钢HV(10) ≤ 245 (均指单个值)；原则上应进行焊后消除应力热处理。

国外还提出两条措施：

- ◆ 1，用水作为缓蚀剂
- ◆ 2，让储罐处在 -33°C 条件下也可使应力腐蚀的危险性最小

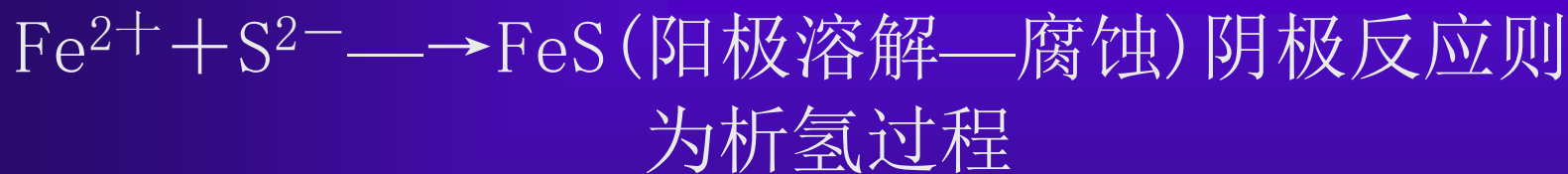
有的分叉有的不分叉。这种裂纹的扩展途径往往是混合型的，既有穿晶的，也有沿晶的。



6、湿硫化氢的应力腐蚀和氢损伤

湿硫化氢环境中钢材开裂实际上有两类开裂现象。一种是应力诱导的氢致开裂(SOHIC)，也是应力腐蚀；另一种是与应力无关的氢鼓泡(HB)和氢致开裂(HIC)。

电化学阳极反应方程可简单的表达为



(1) 湿硫化氢引起的应力腐蚀开裂



电化学阳极反应方程可简单的表达为



阴极反应则为析氢过程



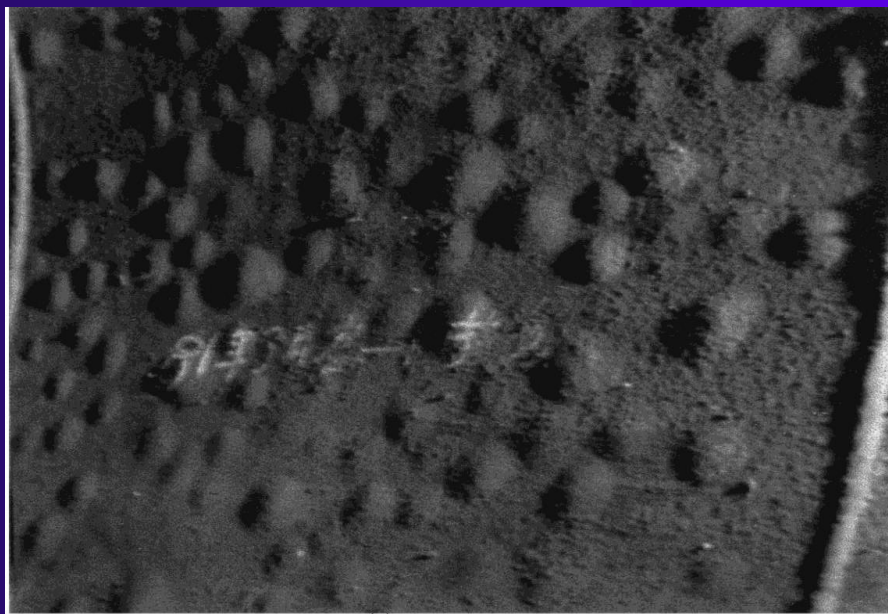
溶液的pH值对这一应力腐蚀过程有重要影响。pH很低时很容易开裂和造成试样断裂。推荐应采用 $\text{HB} \leq 200$ 的钢作为油气田选用钢材的标准，屈服强度大于 $900 \sim 1000\text{MPa}$ 的高强度钢在湿硫化氢环境很易发生这种应力腐蚀，不应用于此种环境。

(2) 湿硫化氢引起的氢鼓泡

硫化氢溶于水之后 离子氢渗入钢中成原子氢，再形成了氢分子并聚积成氢气团，且有很高的压力。当这些氢气团仅存在于接近钢材表面的表层时，很容易在平行于轧制方向的带状组织的层间鼓胀，使钢材表面出现鼓泡，鼓泡还可能破裂。湿硫化氢引起的氢鼓泡最容易发生在钢中硫化物夹杂处，且在常温下最易出现。

(3) 湿硫化氢引起的氢致开裂

基于与氢鼓泡相同的机理。钢材的含硫良高，形成MnS夹杂亦多，导致层状开裂的机会就多。氢致开裂的突点是不需外加应力的诱导。

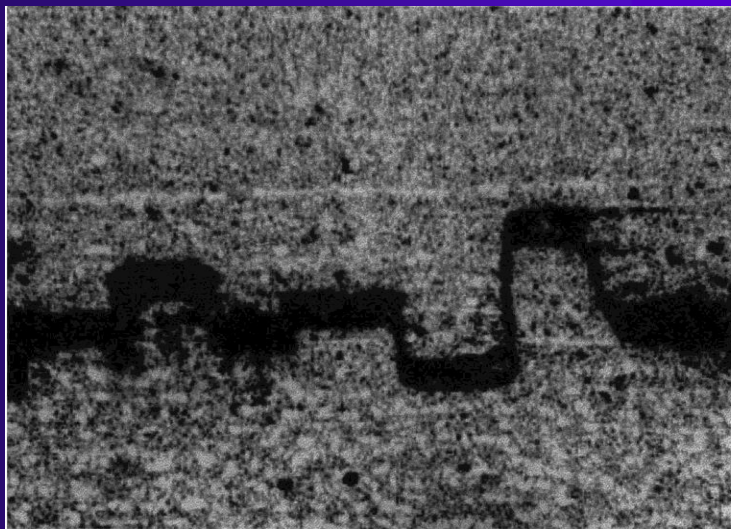


(a)

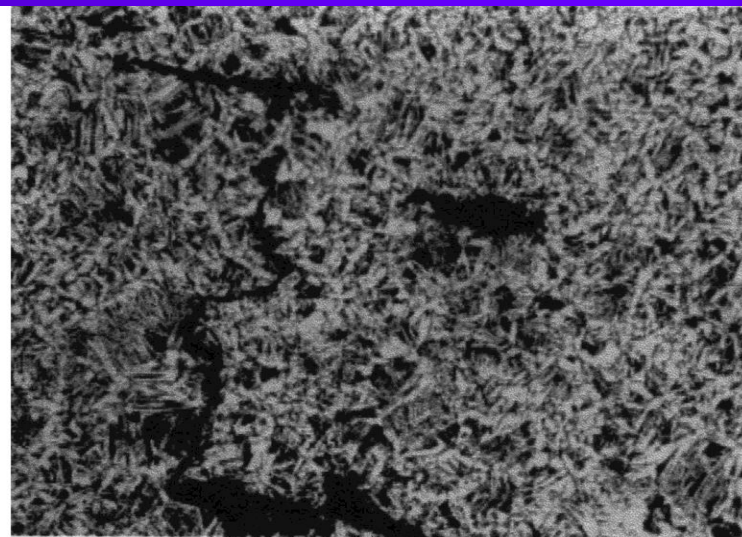


(b)

低强度钢在湿 H_2S 环境中的氢鼓泡



(a)



(b)


低碳钢在湿硫化氢环境中出现氢致开裂的金相照片

(4)奥氏体不锈钢在湿硫化氢环境中的应力腐蚀开裂

除 Cl^- 的原因外，湿硫化氢所引起的奥氏体不锈钢的应力腐蚀开裂问题往往被忽视。

重要的是失效分析中如何判断是湿硫化氢引起的还是 Cl^- 引起的。湿硫化氢导致奥氏体不锈钢应力腐蚀裂纹有以下几个特点：

- ①剖面金相检验时其裂纹虽是穿晶扩展较多，但分叉少，不象 Cl^- 引起的应力腐蚀裂纹分叉那么突出。
- ◆ ②裂纹的断口进行扫描电镜分析时往往呈解理状，不象 Cl^- 应力腐蚀断口的河流状解理断裂那么明显。
- ◆ ③断口上有二次裂纹，但比 Cl^- 应力腐蚀断口的二次裂纹少得多



④断口腐蚀产物在扫描电镜中做能谱分析时能出现显著的硫元素峰，比金属中的含硫量要大若干个数量级。(5) 湿 H_2S 应力腐蚀的预防

主要方法是：控制介质中的有害成分，即改善腐蚀环境；选用合适的材料；必要时对焊缝采取消除应力退火热处理。

1.5.3 腐蚀疲劳失效

腐蚀疲劳是在腐蚀环境中的疲劳问题

1.5.4 氢腐蚀失效

氢对钢材有各种各样的损伤，本小节主要讨论高温高压条件下氢对钢材的腐蚀损伤。



氢腐蚀是一种化学腐蚀

1.5.5 腐蚀失效破坏形式

1、均匀腐蚀失效破坏形式

(1) 韧性失效

因厚度大范围减薄而导致韧性失效，可以说因均匀腐蚀导致的韧性破坏是一种低载荷(而不是低应力)的韧性破坏。

(2) 脆断失效

由于均匀腐蚀导致金属的全面脆化就会引起脆断。

例如氢腐蚀已使材料全面致脆，此时就有发生脆断的危险。

2、局部腐蚀失效破坏形式

(1) 局部鼓胀变形及爆破失效

(2) 泄漏失效

①孔蚀泄漏

②腐蚀裂纹泄漏

(3) 低应力脆断

(4) 脆化引起的脆断

1.5.6 腐蚀失效预防措施

(1) 在役设备腐蚀失效的防护措施
隔离防护法

1.6 高温蠕变失效

材料在高温下持续长时期受载，会产生非常缓慢的蠕变变形。这种蠕变的积累将会导致宏观的永久变形，从而出现蠕变断裂或松弛。

发生蠕变的起始温度随金属材料而异。低碳钢为 370°C ，奥氏体铁基高温合金为 540°C ，镍基和钴基高温合金为 650°C 。 $T_{\text{蠕}} \geq 0.4T_{\text{熔}}$

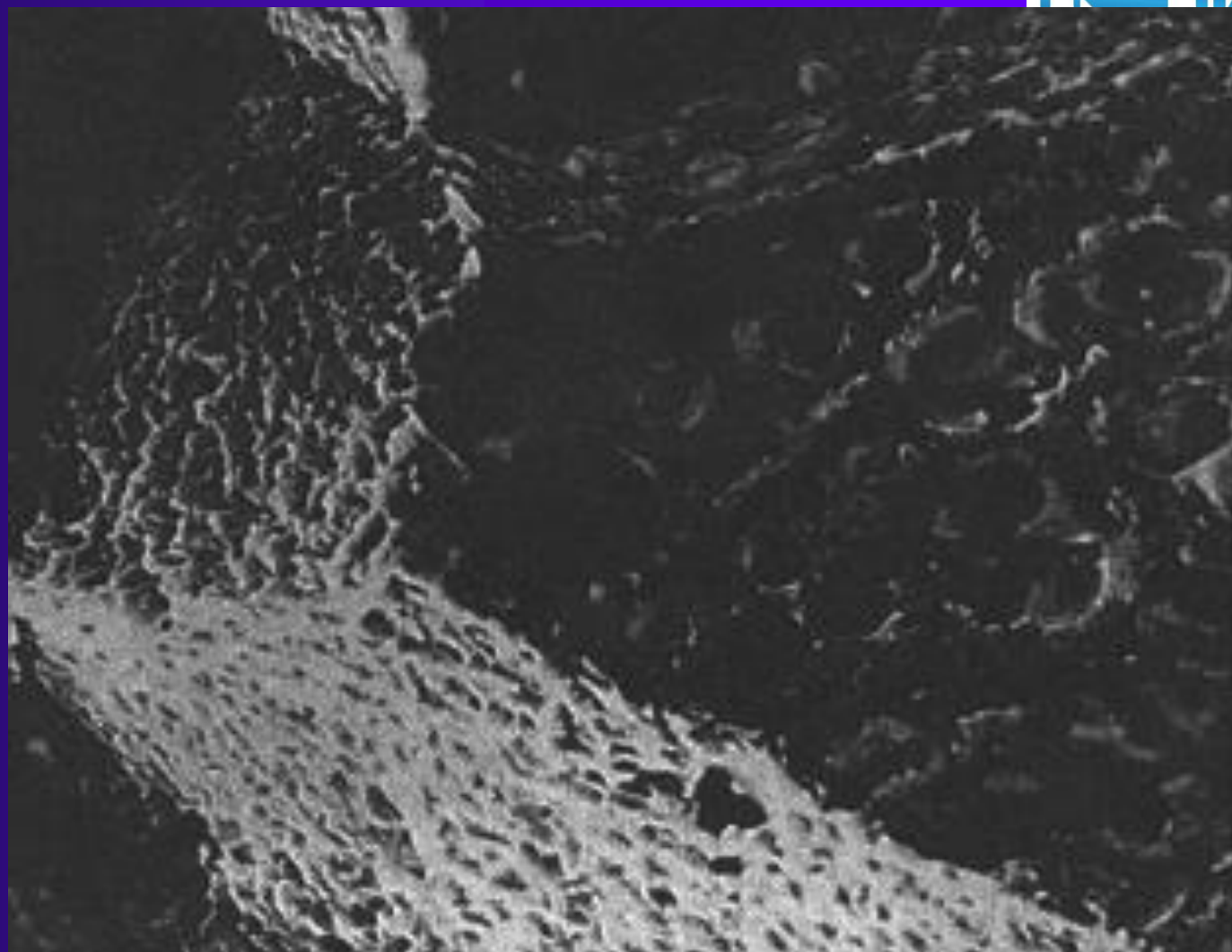
(K) 蠕变失效的宏观特征主要显示出过度的变形

(1) 金相检验

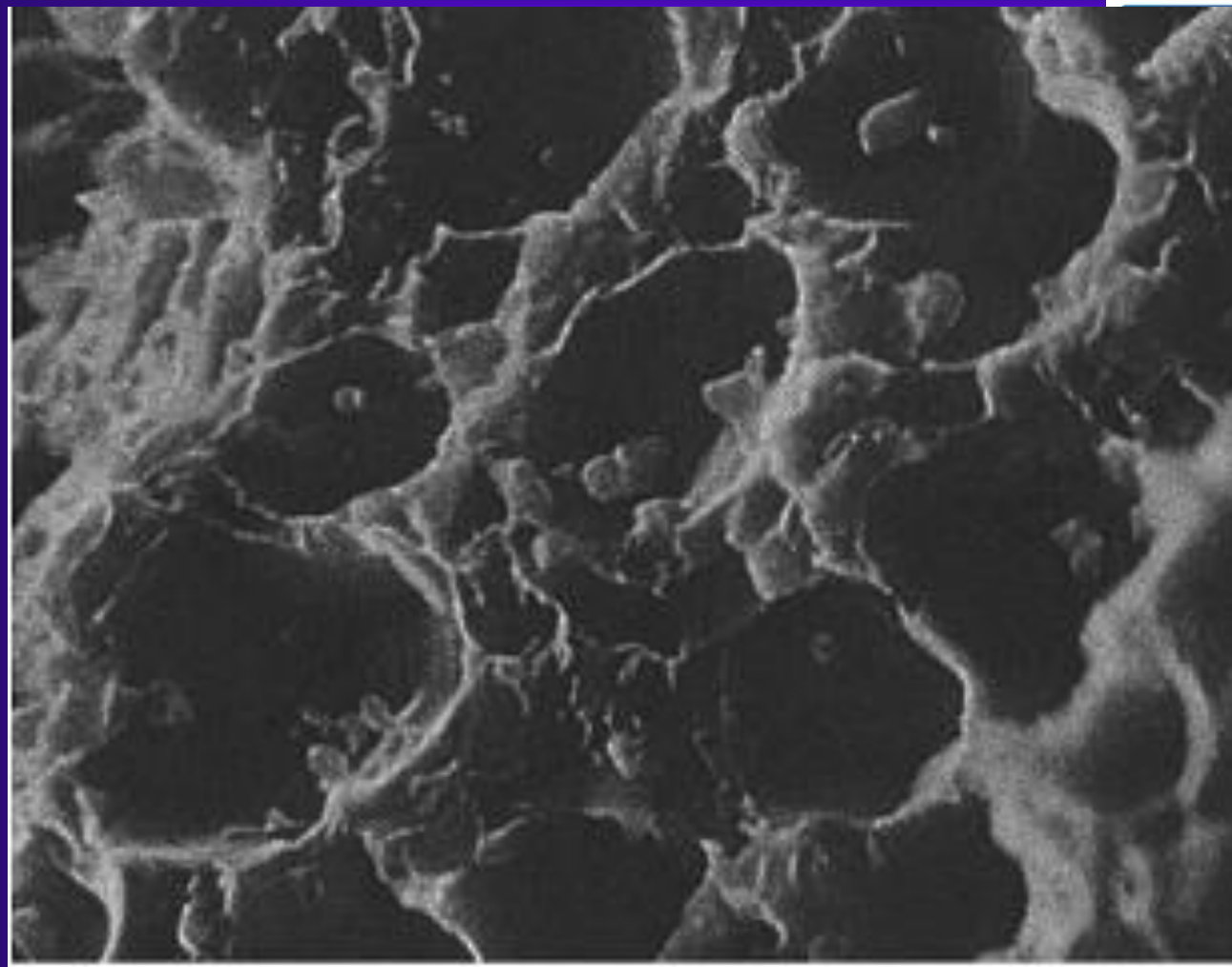
只有在等强温度(晶内强度与晶界强度相等的温度)以上的蠕变脆断,在金相上才有蠕变特点。主要是沿晶空洞,严重时不但有空洞还会有沿晶微裂纹,甚至有宏观裂纹

(2) 断口检验

大多数蠕变失效属蠕变脆断,其蠕变断口主要有两个特征,一是呈现岩石状的沿晶蠕变断裂,二是晶界上具有若干韧窝,即洞形的空洞



Nimonic 105合金800°C沿晶蠕变断口 (SEM800×)



Nimonic 105合金800°C沿晶蠕变断 (SEM3300×)

1.7 密封失效

密封失效不属于基本失效形式。它涉及到密封结构系统（如法兰、垫片、紧固螺栓）中每个构件的自身失效行为，最终反映出泄漏失效。


法兰垫片及紧固螺栓三者构成一个密封系统。一对法兰的接触面上总是存在粗糙度的，不用垫片而仅靠螺栓夹紧实际是做不到密封不漏的。

- ◆ (1) 初始密封 也就是预紧密封，在装配时就已完成。
- ◆ (2) 工作密封 预紧后的法兰垫片螺栓三构件系统，当受到工作介质压力作用之后，一对法兰的两个密封面将被迫发生相对分离，保持密封界面上仍有足够以维持密封的残留垫片应力（压应力），以保证将流体介质密封住。

1.7.2 垫片密封的失效

垫片密封的失效主要是泄漏。

不同仪器的灵敏度不一样，其“零泄漏”时的微泄漏量实际上就不一样。所以“密封度”实际上是个相对的概念。



工程上只能采用“允许泄漏率”来要求和衡量密封结构能有效满足设计或生产所要求的允许的泄漏率。

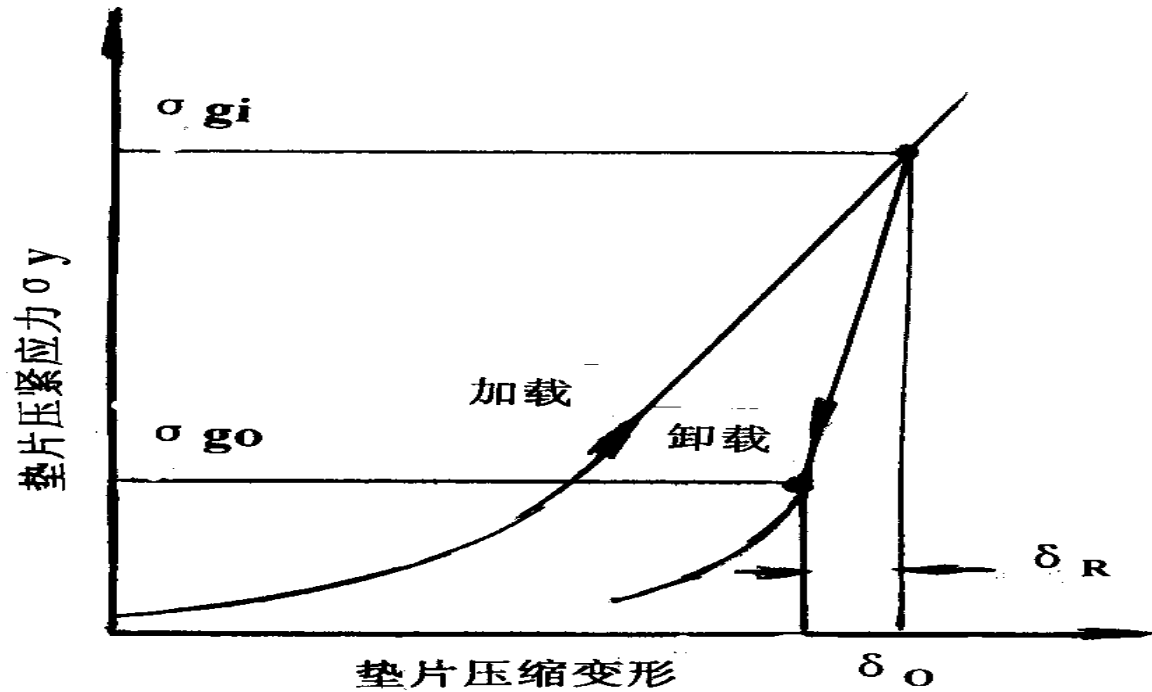
达到什么泄漏状态应判为失效，这些都没有统一的标准。对于易燃易爆或有毒物料的泄漏则应规定更严的垫片密封失效标准，特别是极毒性物料。但都没有统一标准，企业需要自己从严制订执行标准。

泄漏失效时，虽然总的表现形态就是显著泄漏，但垫片损坏的形态基本上有两种。一种是垫片的密封面上出现泄漏通道。另一种则是垫片被吹出，造成垫片大块缺损。


1.7.3 影响垫片密封失效的重要因素

(1) 垫片的压缩—回弹性能，垫片的许多性能。其中更为重要的是垫片材料的载荷—变形行为，其中也包含压缩后的回弹性能。另外垫片材料的蠕变松弛性能也直接影响到密封性能。应当注意的是，不同预紧应力下卸载将得到不同的卸载线，其回弹量 δ_R 也不相同。垫片压紧后卸载时的回弹量愈大，同时残余的压紧应力 σ_{go} 也愈大，则垫片在工作状态下的密封性能也愈好。

显然，预紧时的预紧点 σ_{gi} 的选择非常重要。



垫片压缩与卸载时的应力—应变曲线



垫片装配时的压紧应力是影响密封性能的重要影响因素，预紧载荷不够，加上垫片的压缩回弹性能差，易导致垫片密封的失效

(2) 垫片的蠕变松弛行为

长期运行后,垫片的厚度还会不断减少,垫片上的压紧应力也相应不断递减,这就是垫片的应力松弛.垫片的蠕变与松弛同时产生,蠕变是指恒应力作用条件下材料不断发生变形的行为,而松弛是指恒变形(固定的变形量)条件下材料的应力不断发生变化的

行为,温度较高时垫片的蠕变松弛更为明显。

每种垫片材料都有允许的最高使用温度 (T),但同时还规定其可以使用的最高压力 (P)

(3) 螺栓的影响 垫片压紧应力的大小,不管是预紧阶段还是进入工作状态下的压紧应力都是在螺栓紧固时所施加的。因此螺栓的强度与刚度就显得非常重要。

设计是一回事,而装配是另一回事。因为装配中螺栓预紧的程度带有很大的不确定性,螺栓在高温下的蠕变与松弛也是引起密封泄漏失效的常见原因。

失效事故的技术检验

1. 事故现场处理和调查

(1)现场保护与记录

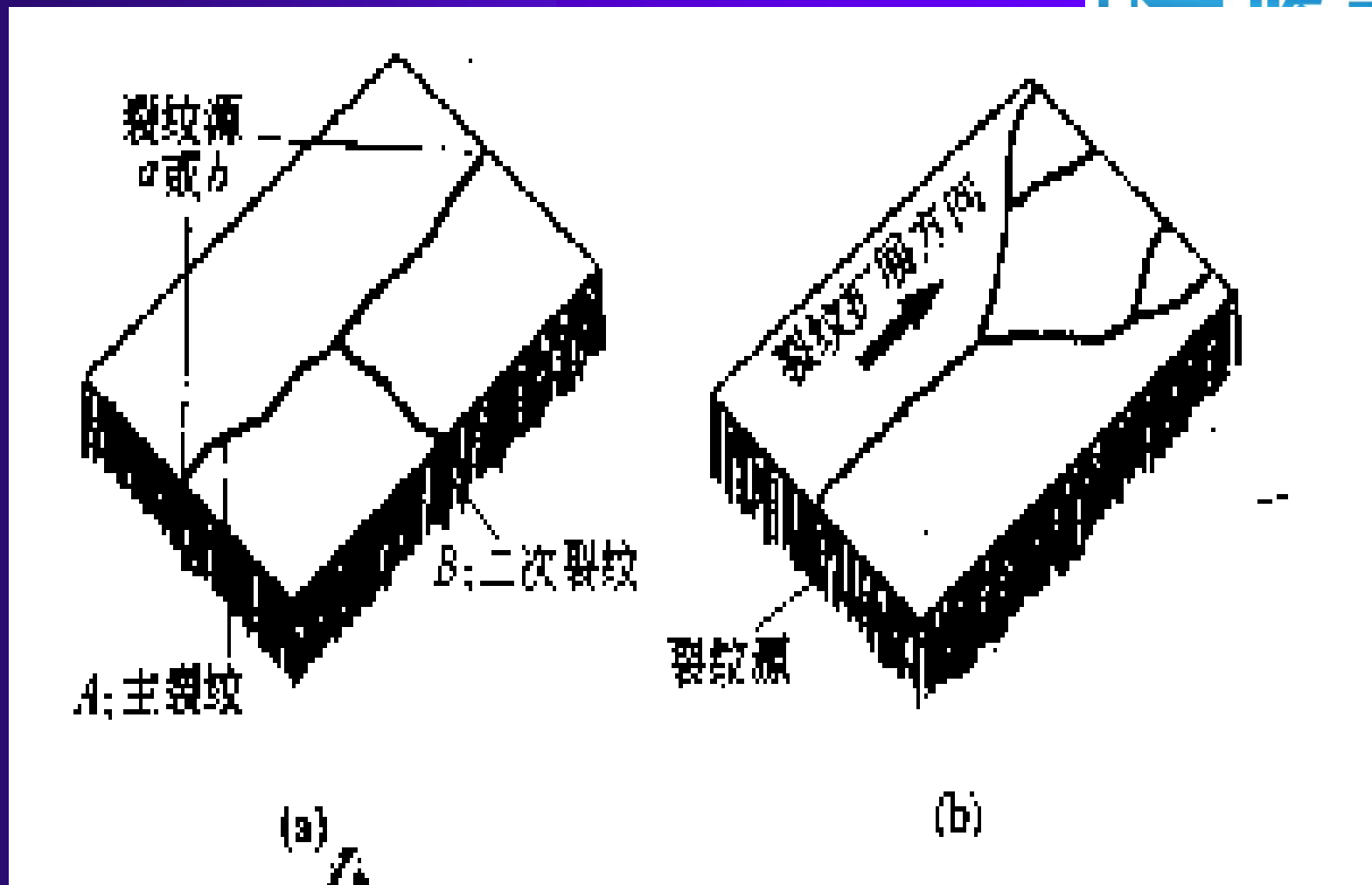
- ◆ ①首先要收集现场的各种操作记录、仪表损坏时指针位置，安全阀是否有泄放的迹象，爆破片的破坏或完好状况。
- ◆ ②断口保护工作极其重要
- ◆ ③事故后应立即做好现场记录

(2)事故调查分析的要求和内容

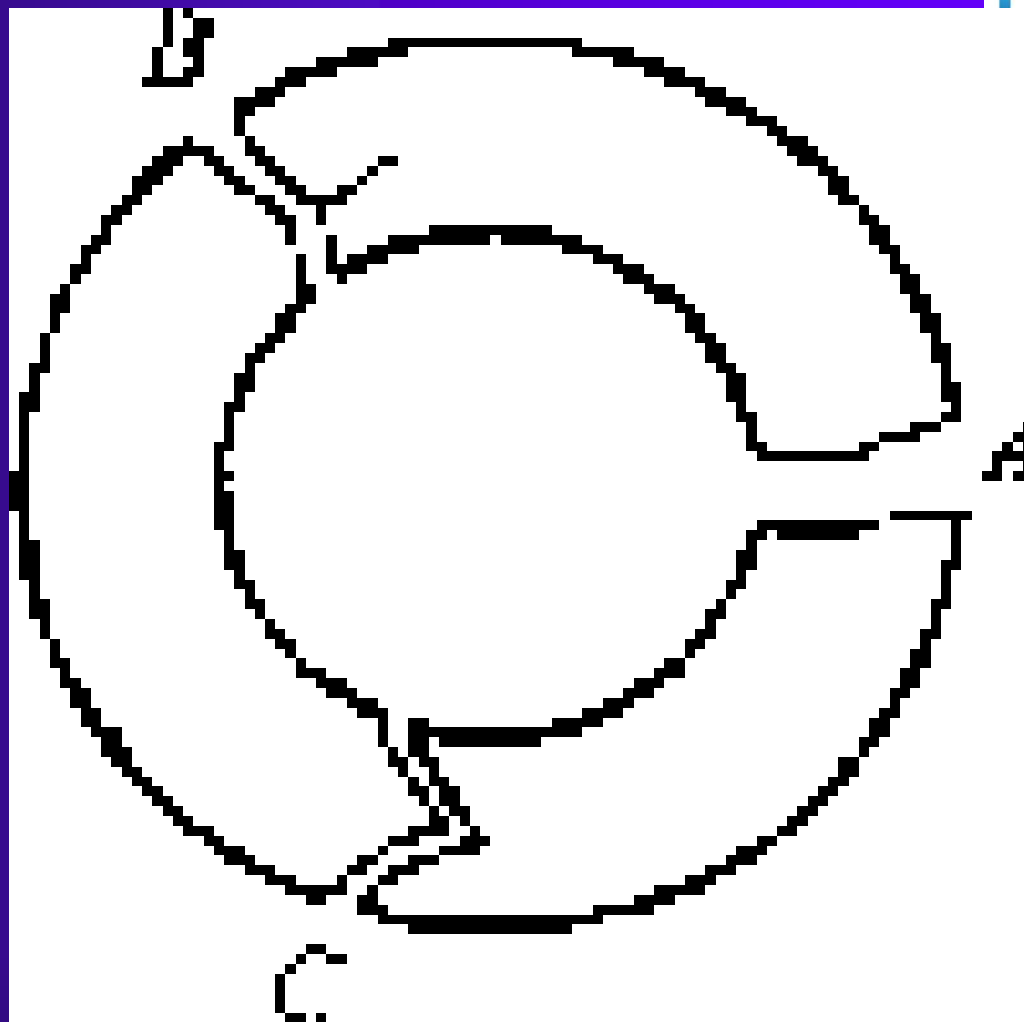
- ◆ ①明确划定事故现场的范围，做好现场护栏和现场保护工作
- ◆ ②了解事故过程的有关情况
- ◆ ③设备发生失效或事故往往不是某一原因产生的，调出全部服役历史的文档
- ◆ ④进行必要的技术检验与鉴定工作
- ◆ ⑤提出事故处理意见和必要的整改要求与措施，杜绝事故的再次发生

2.1.2 失效状况的外观检查

- ◆ 1、变形情况检查
- ◆ 2、裂纹检查



交叉裂纹的断裂次序判断



销孔断口的断裂顺序为A先于B和C

◆ 3、表面状况检查

指的是腐蚀与磨损的状况

2.1.3 材料的检验和鉴定

- ◆ (1) 化学成分检验
- ◆ (2) 力学性能检验
- ◆ (3) 金相检验

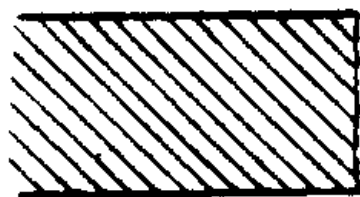
2.1.4 断口形貌的检验和鉴定

- ◆ 1、断口的宏观检验和分析
- ◆ (1) 断口宏观分析的主要内容
- ◆ ① 确定断裂时裂纹的扩展方向

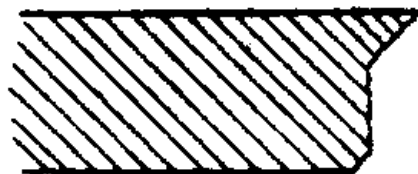
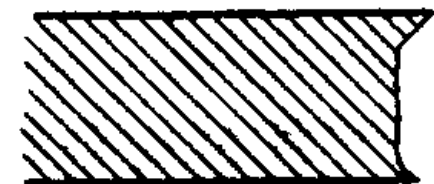
②确定断裂的裂源位置

③初步判断断裂的类型

- ◆ (2) 断口三要素的应用
- ◆ ①起裂源区是放射纹及人字纹所指向的地区。也是这些纹路的收敛区。
- ◆ ②起裂源区一般在韧性良好的状态下就是纤维状区。
- ◆ ③起裂源区不存在剪切唇。
- ◆ ④当有明显原始缺陷时，缺陷的某一边缘区常常存在很小的纤维区，就是起裂源区。



(a)



(b)



(c)

断口的断裂方向

- (a) 完全正断口（脆断）； (b) 混合断口（韧断）；
(c) 剪切断口（韧断）

2、断口的显微检验和分析

在扫描电镜中对若干小区观察分析的目的如下。

- ◆ (1) 分析断裂的机制
 - ◆ (2) 分析材料的夹杂物状态
 - ◆ (3) 分析材料的固态相变劣化程度
 - ◆ (4) 弄清应力腐蚀的原因
- ### ◆ 2.1.5 压力容器爆炸的能量

爆炸是一种突发的能量释放过程，其过程极为迅速。爆炸所引起的破坏是所有事故中最为严重的

物理爆炸（包括气体和液体）是一种释放的物理过程。

物理爆炸的释放能量可以用热力学方程进行计算。

化学爆炸是化学物质发生激剧反应、分解、快速燃烧（混合爆炸气云的爆轰）时产生的瞬时能量计算极为复杂，且不易算准。

爆炸能量的计算至少可以获得这样的结论，若现场破坏所相当的TNT炸药量爆炸时的冲击波能量基本上等于按物理爆炸计算出的能量，则可判定所发生的是物理性爆炸。




若现场破坏所相当的TNT炸药爆炸时释放的冲击波能量大大地大于容器物理破坏所能释放的能量，则应判为化学爆炸。

不论物理爆炸还是化学爆炸，释放出的能量将形成巨大的冲击波。压力容器发生气体爆炸时所释放的能量中一小部分用于撕裂容器及抛出碎片，而大部分能量则产生冲击波。

2.1.6 失效分析中的验证性试验

- ◆ 1、材料的验证性试验
- ◆ 2、腐蚀失效的验证性试验
- ◆ 3、模拟应力测试试验和有限元应力分析

- 
- ◆ 4、模拟爆破试验和安全泄放试验
 - ◆ ①安全阀的压力试验
 - ◆ ②爆破片的爆破试验
 - ◆ ③压力容器的爆破试验是较少见的，主要是因成本较高

2.2 压力容器失效事故的综合分析和诊断

- ◆ 2.2.1 失效事故的综合分析
- ◆ (1) 过度变形
- ◆ (2) 过度磨损
- ◆ (3) 泄漏
- ◆ (4) 断裂
- ◆ (5) 爆炸

2、确定失效类型

按习惯分：韧性失效(或破断)，脆性破断，疲劳失效，腐蚀失效和蠕变失效等五种基本失效类型。除此，还有复合型的交互失效(如腐蚀疲劳、蠕变疲劳等)，以及密封失效和磨损失效等

3、确定失效事故的原因

- ◆ (1) 材料因素
- ◆ (2) 结构因素
- ◆ (3) 受力因素
- ◆ (4) 环境因素
- ◆ (5) 使用、维修和管理因素

2.2.2 失效事故的综合诊断

1、综合诊断的基本原则和基本方

(1)基本原则

- ◆ ①整体性原则 ②从现象到本质原则 ③动态原则

(2)具体方法

- ◆ ①系统方法 ②逻辑方法

2、综合诊断的方法

- ◆ (1)经验分析法
- ◆ (2)特征-因素图法
- ◆ (3)事故树分析法(Fault Tree Analysis, 简称FTA)

2.3 事故处理

1、事故分类

- ◆ **特别重大事故** 是指造成死亡30人（含30人）以上，或者受伤（包括急性中毒、下同）100人（含100人）以上，或者直接经济损失1000万元（含1000万元）以上的设备事故。
- ◆ **特大事故** 是指造成死亡10~29人，或者受伤50~99人，或者直接经济损失500万元（含500万元）以上1000万元以下的设备事故。
- ◆ **重大事故**，是指造成死亡3~9人，或者受伤20~49人，或者直接经济损失100万元（含100万元）以上500万元以下的设备事故。

- ◆ **严重事故** 是指造成死亡1~2人，或者重伤2~9人（含9人）以下，或者直接经济损失50万元（含50万元）以上100万元以下，以及无人员伤亡的设备爆炸事故。
- ◆ **一般事故** 是指无人员伤亡，设备损坏不能正常运行，且经济损失50万元以下的设备事故。

2、事故报告

3、事故调查

4、事故处理