

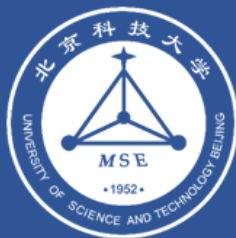


材料科学与工程学院

第12次课（续）

主讲：叶荣昌





材料科学与工程学院

第三章 断裂与断裂韧性（续）



主要内容

课堂教学：

- 断裂分类及断裂微观机制
- 材料脆性断裂的影响因素
- 理论断裂强度与低应力脆断
- 裂纹的形核与扩展
- Griffith脆断理论及其修正
- 应力强度因子理论及其应用
- 材料的韧化

实验教学：

- 40Cr平面应变断裂韧度测试

概 述

一、基本概念回顾

1、材料力学行为与材料力学性能

2、断裂及其分类

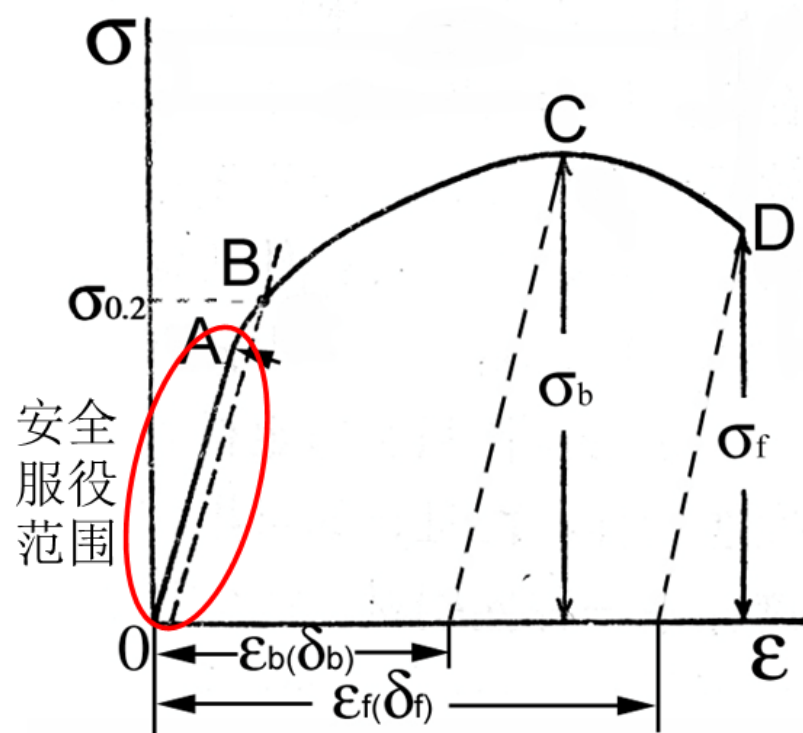
二、工程构件的断裂设计

1、金属材料工程构件断裂失效的表现形式及原因分析

宏观表现	原 因

2、传统强度设计理论

传统强度设计理论根据**构件服役条件及材料力学性能指标**进行结构设计。



典型结构材料拉伸曲线示意图

——采用**强度储备**，可以避免由于过载而引起失效

$$\sigma \leq [\sigma]$$

$$\text{其中, } [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$$

• **中、低强度材料制造的中小型零件**，由于考虑了强度储备，并有一定的塑性、韧性配合，一般都可以安全服役。

3、低应力脆断

随着科技的进步，高强度材料的应用渐趋广泛

→有助于实现构件的小型化、轻型化

采用高强度材料成为一种大趋势，但是，片面追求高强度带来了可怕的后果

——构件的低应力脆断现象——

对于高强度和超高强度材料制作的构件，以及中、低强度材料制作的重型和大型构件，按照传统强度设计理论不能确保安全可靠，断裂应力远低于传统设计的强度指标。

实例：国产45Si2Mn高强度螺栓，淬火并低温回火后材料强度 $\sigma_s = 1920 \text{ MPa}$ ， $\sigma_b = 2110 \text{ MPa}$ ， $K_{IC} = 39.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ ，在使用过程中发生脆性断裂，已知工作应力为 $\sigma = 960 \text{ MPa}$ ，分析断裂原因。

分析：

按传统强度设计理论校核

$$\left. \begin{aligned} n_s &= \frac{\sigma_s}{\sigma} = 2.0 \\ n_b &= \frac{\sigma_b}{\sigma} = 2.2 \end{aligned} \right\} \text{强度储备足够}$$

应该是安全的，实际上发生了低应力脆性断裂。



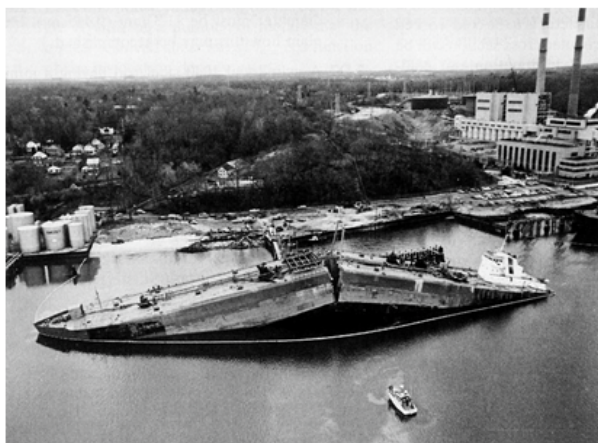
低应力脆断发生时难以察觉，具有突发性的特点，其危害性极大，经常导致灾难性的后果。



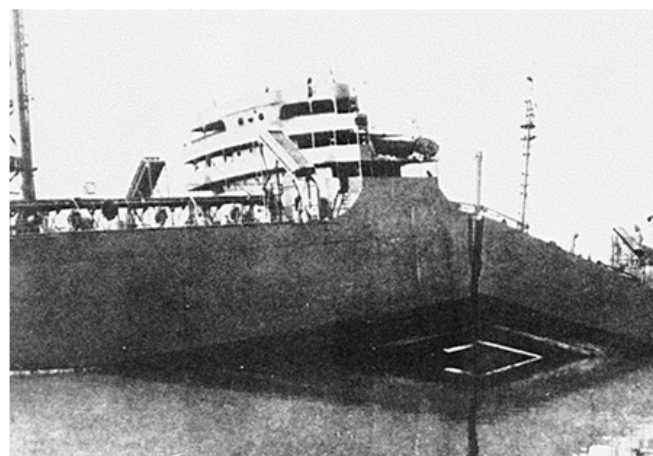
历史上著名的低应力脆断事例：

——低碳钢构件的低应力脆断

低碳钢广泛应用于制造各种金属构件，如船体结构、压力容器、桥梁结构及矿山机械等。



1943年1月，刚刚经过试航的T-2号油轮，停泊在纽约港，突然一声巨响，自行断裂为二。当时甲板的工作应力仅为70MPa，远低于材料的屈服极限。



Schenectady号轮船停靠于太平洋西北码头时，船身完全断裂开

二次世界大战期间，美国制造了近4000艘焊接轮船，包括60艘“海洋号”、3000多艘自由号、以及550余艘T2油船，到1958年底为止，严重断裂的有319艘。

——高强度及超高强度材料构件的低应力脆断

二战后，高强度、超高强度材料的应用日益广泛，低应力断裂事故层出不穷：

- 20世纪50年代初，美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在实验时发生爆炸。
- 20世纪50年代，法国核电站的压力容器、英国核电站的大型锅炉爆炸，造成严重破坏与人员伤亡。
- 1954-1956，美国发生5起电站转子与叶轮的飞裂事故，加拿大发生了2起发电机护环的飞裂事故。
- 1965年12月17日，北海气田“海宝号”海洋钻机脆断事故，造成19人丧生。
- 20世纪70年代初，辽阳化工厂压力容器爆破事故造成数十人伤亡。

.....

问题1：为什么构件会发生低应力脆断？

问题2：如何才能避免构件发生低应力脆断？

问题3：如何才能提高构件的断裂抗力？

——传统强度设计理论无法回答！



大量断裂事故分析表明，上述低应力脆断事故是由于构件中宏观裂纹失稳扩展造成的。

传统强度设计理论的困境：

——把构件材质看成均匀连续的

——以材料强度指标 σ_s 、 σ_b 作为设计依据，仅适用于无裂纹构件的情况

——在实际工程应用中，构件中裂纹存在是不可避免的，而且，裂纹尺寸会发展变大。

课后作业：构件中的裂纹如何产生的？

裂纹的存在会改变构件内部的应力状态，当裂纹扩展到一定尺寸后，会影响断裂性质，因此裂纹的存在是一个隐患！

问题4：

如何评价裂纹对材料力学行为的影响？如何对含裂纹构件的安全性评估，判断其能否安全服役？

传统强度设计理论无法解答，因此，不能再以传统强度设计理论为基础来设计和估算构件的承载能力了，而必须立足于裂纹存在的前提下进行强度设计，这就大大推动了人们对带裂纹体构件断裂问题的研究，从而导致了新的强度设计理论诞生。

4、断裂强度理论的发展

——在承认存在宏观裂纹的前提下，利用弹性力学基本原理定量研究裂纹扩展规律，并提出断裂判据。

• **Griffith脆断理论**（针对玻璃和陶瓷的断裂）

——1950年，Orowan修正G氏理论，可适用于金属材料断裂

• **线弹性断裂力学理论**

→ **应力强度因子理论**：裂纹是否扩展，以多大速度扩展，取决于裂纹尖端附近的应力场分布。

应力强度因子理论较好地解决了含裂纹体构件的低应力脆断问题，因而在工程上得到广泛应用。

三、材料的理论断裂强度

——完整晶体相邻原子面上所有原子键合同时断开时所必须克服的最大正应力。

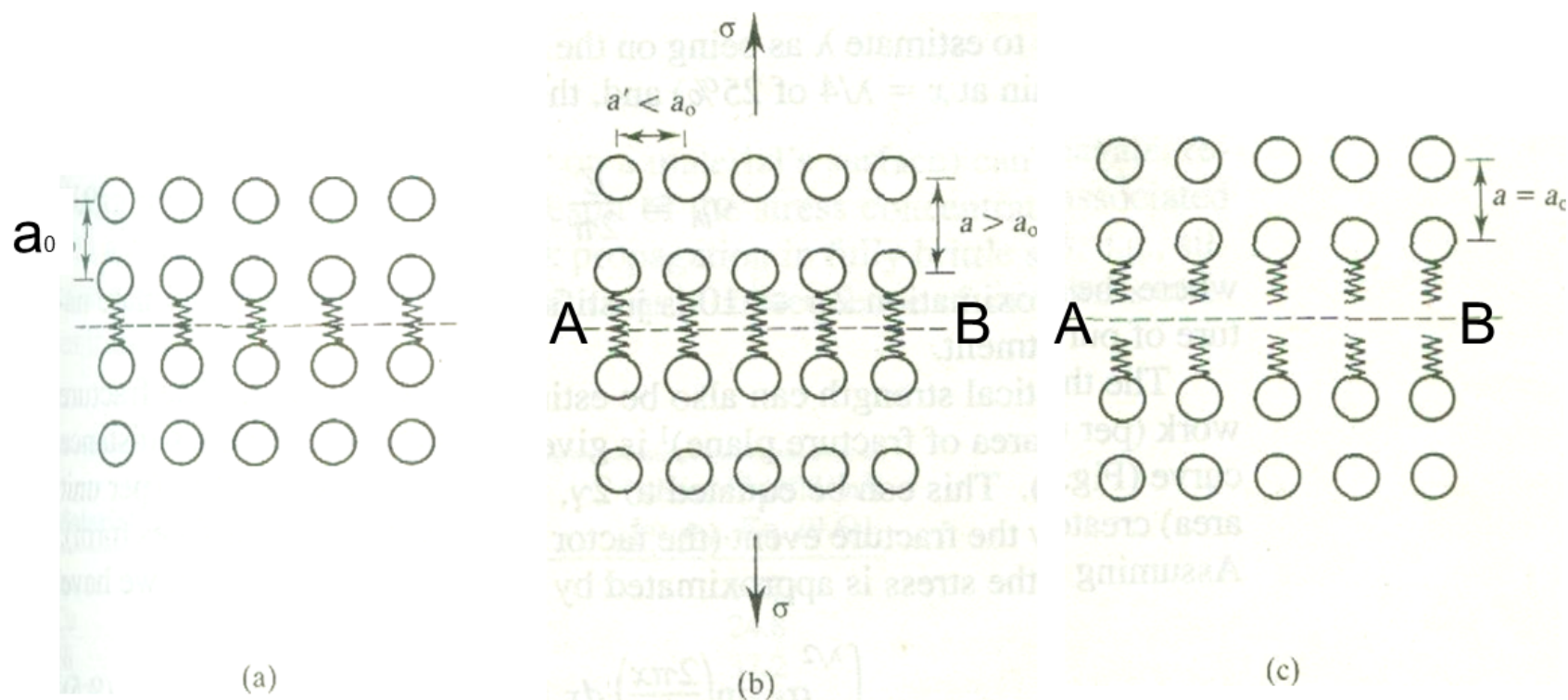
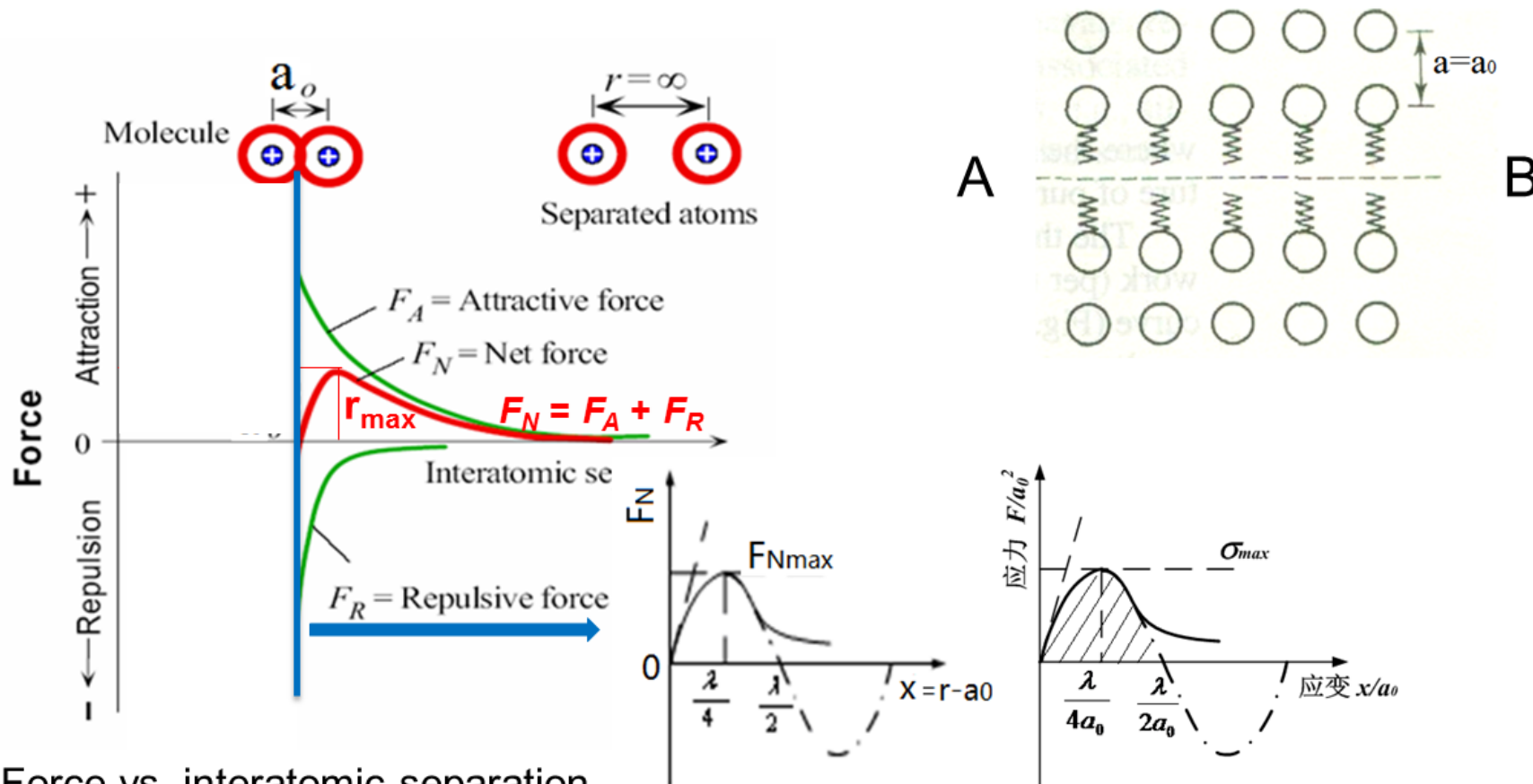


Figure1 Atomistic model of theoretical tensile fracture



理论断裂强度 $\sigma_f^{\text{th}} = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a_0}}$

表1 部分材料的理论断裂强度

Material	$E/10 \text{ (GN/m}^2\text{)}$	$(\gamma E/a_0)^{1/2} \text{ (GN/m}^2\text{)}$
Au	7.8	17.7
Cu	12.1	24.8
Ni	22.5	37.2
NaCl	3.7	6.3
MgO	31	40.8
TiC	≈ 45	28.5
Si	16	28.5

纯铁

- $\gamma_s \approx 2 \text{ J/m}^2$, $a_0 \approx 2.5 \times 10^{-10} \text{ m}$, $E \approx 200 \text{ GPa}$
- 纯铁的抗拉强度只有250MPa左右，远远低于理论值！

主观题 10分

请计算纯铁的最大理论弹性应变。

已知 $\gamma_s \approx 2\text{J} / \text{m}^2$, $a_0 \approx 2.5 \times 10^{-10}\text{m}$, $E \approx 200\text{GPa}$

