

第一卷 下册  
(线弹性断裂力学)

袁懋昶 编著

# 断裂力学理论及其工程应用

Duanlie Lixue Lilun  
Jiqi Gongcheng  
Yingyong

重庆大学出版社

50.5521

52.5521

8909122

# 断裂力学理论 及其工程应用

第一卷 下册  
(线弹性断裂力学)  
袁懋程 编著

重庆大学出版社

## 内 容 简 介

本书第一卷下册由第三和第四两编组成。第三编论述固体材料的断裂与断裂准则,分为第九、十、十一等三章,这三章依次讨论延性断裂、解理断裂、断裂韧性与断裂准则。

第四编专门讨论动态裂纹问题,由第十二和第十三两章组成。在第十二章动态应力强度里讨论了动态应力强度因子与动态断裂韧性两类问题。第十三章讨论动态裂纹传播过程中诸问题,如裂纹传播速度、裂纹分支、裂纹曲曲(Crack Curving)、裂纹曲折(Crack Kinking)以及裂纹传播路径(方向)的稳定性。

### 断裂力学理论及其工程应用 第一卷 下册(线弹性断裂力学)

袁懋昶 编著

责任编辑 朱庆祥 周任

\*

重庆大学出版社出版发行  
新华书店经销  
重庆大学出版社印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 1/16印张: 11.25字数: 281千  
1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷  
印数: 1—2000

标准书号: ISBN 7-5624-0132-2 定 价: 2.28元  
O·20

# 目 录

## 第三编 固体材料的断裂与断裂准则

第九章 固体材料的延性断裂.....	( 1 )
一、固体材料断裂概论.....	( 1 )
(一) 普通材料试验里光滑试样的断裂 .....	( 1 )
(二) 断裂韧性的意义.....	( 1 )
(三) 固体材料的断裂模式.....	( 2 )
(四) 固体断裂的物理意义.....	( 5 )
二、固体材料的脆性断裂.....	( 5 )
(一) 固体的纯脆性断裂 .....	( 5 )
(二) 脆性断裂与塑性变形 .....	( 5 )
(三) 脆性断裂与解理断裂 .....	( 6 )
三、固体材料的延性断裂.....	( 7 )
(一) 断裂表面的宏观和微观外貌 .....	( 7 )
(二) 微孔成核 .....	( 9 )
(三) 微孔成核和长大的位错理论 .....	( 10 )
(四) 微孔的长大 .....	( 11 )
(五) 微孔聚合理论 .....	( 12 )
(六) 连续撕裂理论 .....	( 14 )
(七) 滑移与延伸理论 .....	( 14 )
四、延性断裂几个新论点及其理论分析.....	( 15 )
(一) 亚悉比的延性断裂理论 .....	( 15 )
(二) 麦克林多的圆柱形微孔长大理论.....	( 17 )
(三) 在球形夹杂附近的应力场 .....	( 21 )
(四) 汤姆孙与汉可克的延性断裂理论 .....	( 25 )
参考文献.....	( 27 )
第十章 固体材料的解理断裂.....	( 29 )
一、解理断裂概论.....	( 29 )
(一) 解理断裂的意义.....	( 29 )
(二) 解理断裂的类型 .....	( 30 )
二、解理与准解理断口的显微特征.....	( 32 )
(一) 解理断裂表面显微照像图的特征外貌 .....	( 32 )
(二) 解理台阶的形成 .....	( 34 )
(三) 准解理断裂的特征 .....	( 35 )
三、解理裂纹的萌生与传播.....	( 37 )
(一) 解理裂纹的萌生 .....	( 37 )
(二) 解理裂纹的形成和长大 .....	( 38 )

(三) 解理裂纹的穿晶传播 .....	(41)
(四) 成核与长大控制穿晶解理断裂 .....	(43)
四、解理断裂理论 .....	(44)
(一) 几个重要的基本概念 .....	(44)
(二) 皮奇的屈服和解理断裂理论 .....	(45)
(三) 斯特洛的解理断裂理论 .....	(47)
(四) 柯出耳的解理断裂理论 .....	(49)
(五) 其他几种解理断裂理论 .....	(55)
五、脆性-延性转变 .....	(57)
(一) 脆性-延性转变需要的应力 .....	(57)
(二) 脆性-延性转变的温度影响 .....	(58)
(三) 脆性断裂的概率 .....	(59)
(四) 应变率 $\dot{\epsilon}$ 的影响 .....	(61)
(五) 晶粒尺寸的影响 .....	(62)
六、切槽脆性断裂理论 .....	(62)
(一) 麦纳吉-路德维克切槽脆性断裂古典理论 .....	(63)
(二) 奥罗文切槽脆性断裂理论 .....	(63)
(三) 斯特洛切槽脆性断裂理论 .....	(64)
(四) 柯出耳切槽脆性断裂理论 .....	(65)
参考文献 .....	(66)
第十一章 断裂韧性与断裂准则 .....	(68)
一、固体材料的断裂韧性 .....	(68)
(一) 断裂韧性的意义 .....	(68)
(二) 断裂韧性的准确定义 .....	(71)
(三) 断裂韧性 $K_{Ic}$ 的影响因素 .....	(72)
二、平面应力断裂韧性 $K_{Ic}$ .....	(75)
(一) 平面应力断裂韧性的意义 .....	(75)
(二) 厚度对于平面应力断裂韧性 $K_{Ic}$ 的影响 .....	(78)
三、断裂准则 .....	(80)
(一) 断裂准则依据的物理原理 .....	(80)
(二) 格里菲斯能量平衡断裂准则及其修正 .....	(81)
(三) 伊尔文应力强度因子 $K$ 准则 .....	(82)
四、断裂准则的工程应用 .....	(83)
(一) 箱形截面10吨行车主梁的抗断裂安全分析 .....	(83)
(二) 火箭圆柱形壳体的强度与抗断裂安全设计 .....	(86)
(三) 发电机转子裂纹护环的抗断裂安全分析 .....	(87)
五、复合型断裂准则 .....	(91)
(一) 复合型断裂准则概论 .....	(91)
(二) 复合型断裂准则分类 .....	(93)
(三) $MS$ -准则——最大环向法应力准则 .....	(94)
(四) $S$ -准则即最小应变能密度准则 .....	(97)

(五) $MG$ -准则即最大能量释放率准则 .....	(109)
(六) 塑性区尺寸因子复合断裂准则 .....	(102)
(七) $S$ -准则的修正理论 .....	(103)
参考文献 .....	(105)

#### 第四编 动态裂纹的几个问题

第十二章 动态裂纹的应力强度 .....	(108)
一、动态裂纹问题的研究情况 .....	(108)
(一) 动态裂纹问题的研究概况 .....	(108)
(二) 关于动态裂纹传播的几个问题 .....	(109)
二、动态裂纹应力强度因子的确定法 .....	(109)
(一) 动态裂纹的应力强度概论 .....	(109)
(二) 板条裂纹体动态应力强度因子的理论分析确定法 .....	(110)
(三) 动态应力强度因子的电测确定法 .....	(114)
(四) 动态应力强度因子的焦散线确定法 .....	(116)
三、动态断裂韧性的意义及其测试方法 .....	(120)
(一) 动态断裂韧性 $K_{I_d}$ 的意义 .....	(120)
(二) 动态断裂韧性 $K_{I_d}$ 的测试法 .....	(121)
(三) 美国钢铁研究所关于 $K_{I_d}$ 的试验方法 .....	(121)
(四) 美国里海大学的 $K_{I_d}$ 测试法 .....	(122)
(五) 动态屈服强度 $\sigma_{yd}$ .....	(124)
(六) 温度和加载速率对 $K_{Ic}$ 及 $K_{I_d}$ 的影响 .....	(125)
(七) 结构钢典型的 $K_{Ic}$ 和 $K_{I_d}$ 测试结果 .....	(126)
(八) 裂纹的韧性性能 .....	(128)
四、裂纹的止裂原理 .....	(129)
(一) 能量止裂原理 .....	(129)
(二) 应变率对于裂纹止裂的影响 .....	(130)
(三) 楔力加载双悬臂梁(DCB)试样的裂纹扩展与止裂 .....	(131)
参考文献 .....	(132)
第十三章 动态裂纹传播及其方向的稳定性 .....	(133)
一、动态裂纹的传播速度 .....	(133)
(一) 中心裂纹拉伸无限板的裂纹传播速度 .....	(133)
(二) 拉伸裂纹板的格里菲斯断裂准则 .....	(136)
(三) 解理断裂的裂纹传播速度 .....	(138)
(四) 解理断裂准则 .....	(140)
二、裂纹分支 .....	(142)
(一) 裂纹分支问题概论 .....	(142)
(二) 裂纹分支(Crack Branching) .....	(143)
(三) 裂纹分支准则导言 .....	(145)
(四) 康格勒顿的裂纹分支应力强度准则 .....	(146)
(五) 裂纹分支角问题与卡尔弱夫的研究 .....	(148)

(六) Nakasa等对于裂纹分支角的研究.....	(150)
三、裂纹曲曲 (Crack Curving) .....	(154)
(一) 裂纹曲曲问题研究概况.....	(154)
(二) 动态裂纹曲曲准则.....	(155)
四、裂纹曲折 (Crack kinking) .....	(157)
(一) 关于裂纹曲折问题的研究.....	(157)
(二) 裂纹曲折问题的数字表示法.....	(158)
(三) 对于小曲折角问题的一阶解.....	(161)
五、裂纹传播路径的稳定性 .....	(163)
(一) 裂纹传播路径的稳定性问题.....	(163)
(二) 柯特尔裂纹传播路径的方向稳定性理论.....	(164)
(三) 斯特勒特和芬尼关于裂纹方向的稳定性理论.....	(167)
(四) Nakasa和Takei关于分支裂纹稳定扩展概念.....	(171)
参考文献 .....	(172)

# 第三编 固体材料的断裂与断裂准则

## 第九章 固体材料的延性断裂

### 一、 固体材料断裂概论

#### (一) 普通材料试验里光滑试样的断裂

在本书第一章和文献〔1〕里曾介绍了工程结构和固体材料脆性断裂的若干情况。这些断裂现象大都是外地或外国的情况，非我们亲眼所见，因而是熟悉的。对于工程技术人员和工程院校的师生说来，最熟悉的断裂现象可能要算普通材料试验里几种光滑试样的断裂了。因此，我们首先从这里谈起。

通过对普通材料试验里光滑试样断裂现象的观察，根据试样断裂后塑性变形的大小，人们把在室温下的固体材料区分为脆性和塑性(延性)两大类，而且通常是以铸铁和低碳钢分别作为脆性和延性材料的典型代表。试验时，圆柱体铸铁拉伸试样是沿着横断面发生断裂的，断裂面同轴向拉应力作用方向垂直，断裂表面呈现光亮的晶粒状平断口拉断形式，断裂后没有明显的塑性变形可测量出。人们把这种断裂形式叫做脆性断裂(Brittle fracture)。

圆柱形低碳钢拉伸试样在单轴载荷作用下于断裂前夕首先出现缩颈(Necking down)而后继续伸长到极限状态时，试样发生断裂，断口呈现杯锥形式。如果仔细观察这种断口形式可以看出，断口周围有相当宽的一圈斜平面剪切唇，表明它是由最大剪应力引起的滑移式剪断；中心区域呈现灰暗色纤维状拉断式平断口。因此，杯锥形式的断裂实际上是由断口中心区域纤维状拉断和周围滑移式剪断两种断裂模式组合而成的。人们把这种杯锥形式的断裂叫做延性断裂(Ductile fracture)。

根据上面论述的脆性和延性断裂形式的基本含义不难判明，低碳钢圆柱体试样在扭矩作用下沿着横截面被扭断以及铸铁圆柱体试样在单轴压力下大致沿着 $45^\circ$ 倾斜面被压碎都应该是延性断裂。铸铁圆柱体试样在扭矩作用下沿着 $45^\circ$ 方向被扭断以及石料和砖瓦立方体试样在单轴压力下的纵向(轴向)破碎都应该是脆性断裂。

#### (二) 断裂韧性的意义

从上面介绍的普通材料试验结果知，在室温下属于脆性材料的铸铁，拉伸断裂时塑性变形小，拉伸图面积小即断裂时消耗或吸收的能量很少；但是作为在室温下延性材料的低碳钢，拉伸断裂时塑性变形大，拉伸图的面积大即断裂时消耗或吸收的能量很大；前者表现出抵抗断裂的能力小而反映脆性断裂特征，后者表现出抵抗断裂的能力大而反映延性断裂特征。两种情况的共同特性是**两类固体材料都具有抵抗断裂的能力，只是有程度不同而已**。那么用什么物理量来表征固体材料抵抗断裂能力的大小呢？

为了能定量地综合表征固体材料抵抗断裂能力的大小程度，特把**固体材料在断裂前和断裂过程中承受塑性变形与吸收断裂能量的能力定义为固体材料的韧性(Toughness)或叫韧度，或叫做断裂韧性(Fracture toughness)**。脆性材料断裂时，承受塑性变形和吸收断裂能量的能力较低，因而断裂韧性也较低，算是低韧性断裂。延性材料断裂时，承受塑性变形和吸收断裂能量的能力较高，因而断裂韧性也较高，算是高韧性断裂。高韧性断裂也可以叫做韧性



断裂。韧性断裂就是延性断裂。低韧性断裂就是脆性断裂。对于结晶固体材料而言，脆性断裂有时叫做解理断裂（Cleavage fracture）。

必须指出，固体材料断裂时吸收断裂能量能力的大小不但与材料性质有关而且与裂纹扩展机理或断裂模式有关。亚特金和梅依（A.G. Atkins and Y.W. Mai）就六种裂纹扩展机理或断裂模式的断裂表面能即比值如表1〔2〕。

表1 各种裂纹扩展机理的断裂比能数值表〔2〕

裂纹扩展机理或断裂模式	断裂比能数值 (J/m <sup>2</sup> )
无滑移解理 (“解理或B.I.F. 1和2”)	1—100
以滑移为前导的解理 (“解理或B.I.F. 3”)	30—300
混合纤维和解理	10 <sup>3</sup> —2×10 <sup>4</sup>
失稳剪切；孔穴层联合(Void sheet linkage)	10 <sup>3</sup> —10 <sup>5</sup>
纤维，由孔穴长大与聚合 (“延性断裂”)	10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>
塑性破断 (Plastic rupture)	10 <sup>6</sup> —10 <sup>7</sup>

(三) 固体材料的断裂模式

从普通材料试验结果看，固体材料光滑试样的断裂似乎只有脆性（或解理）和延性（或韧性）这两种极端断裂形式了。但是近代的研究结果表明，固体材料的断裂形式并非只有这两种极端形式而是有一些中间断裂形式存在。别捷门(C.D. Beachem)把固体材料的断裂模式区分为A、B、C三类及其间的“混合”形式。他把各种断裂模式排列在一幅圆盘形图里如图1所示〔3〕。

从别捷门1968年这幅断裂模式分类示意图可以看出，内容是相当详尽的。

但是，他的分类法未同断裂的具体形貌、应力大小和温度高低相联系，而且不形相不生动。总之别捷门方法虽详尽而有诸多缺点。最近亚悉比等人(M. F. Ashby et al)的分类法几乎全部更正了这些缺点。

亚悉比等人于1979年根据圆柱体光滑试样在单轴加载下的破坏特征把固体材料的断裂模式结合微观机理区分为七类。基于低温和高温两种状态用宏观同微观相结合的试样断裂外形

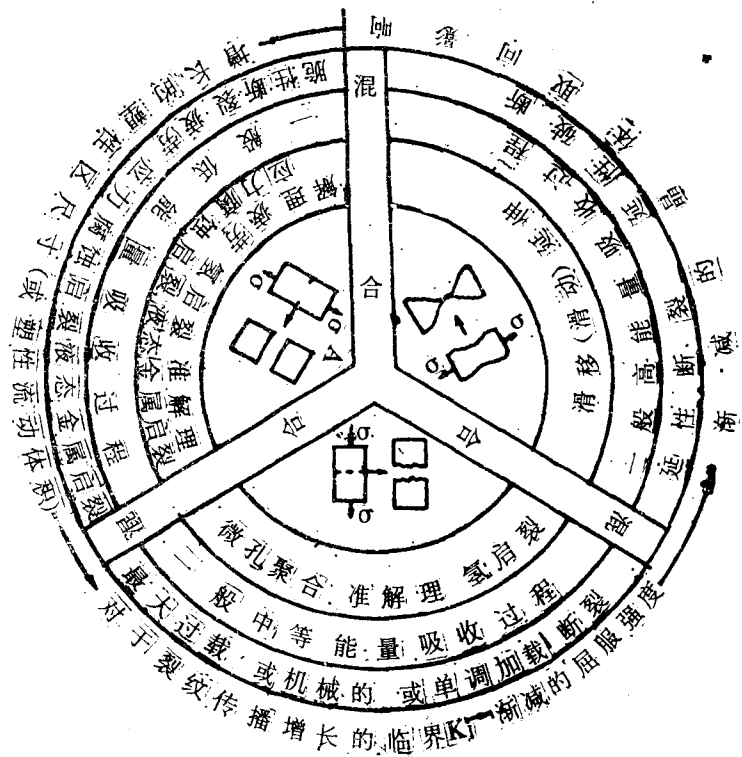


图1 基于裂纹传播方式的三种基本断裂模式的类型（内圈）〔3〕

图形相比表示六种断裂模式的机理,并叫做**断裂机理最简分类图**(The simplest classification of fracture mechanisms)。在低温 ( $T < 0.3T_M$ ) 时塑性流动不强烈地依赖于温度和时间,拉伸试样可能由解理或脆性晶界(B. I. F)破坏;或由延性方式破坏,(见图2上列)。在高温( $T > 0.3T_M$ )时,拉伸试样可能按各种蠕变断裂方式破坏,有些是穿晶的,有些是晶界的。所有这些破坏模式都可以用一种材料例如钨表示出来。

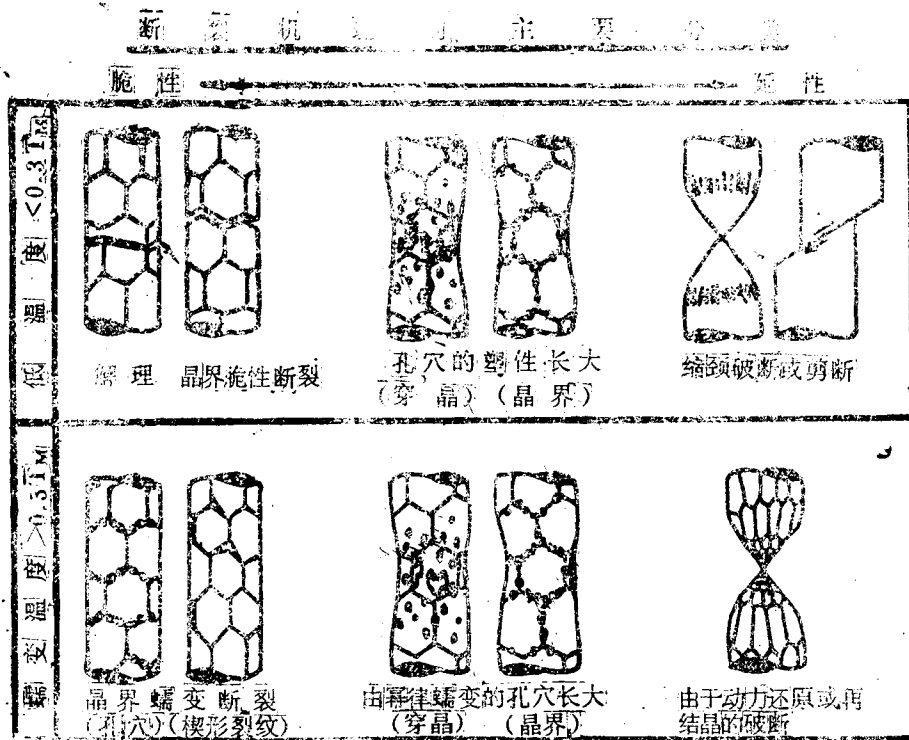


图2 断裂机理最简分类图——上列指 $T < 0.3T_M$ 低温下断裂,塑性流动不强烈地依赖于温度和时间;下列指温度 $T > 0.3T_M$ 的断裂,材料蠕变〔4〕

亚悉比和甘地(C. Gandji and M. F. Ashby)两人于1979年10月发表了他们表示断裂机理的所谓“断裂图”(Fracture maps)〔5〕。该断裂图是采用相对温度(Homologous temperature) ( $T/T_M$ )为横坐标以规一化应力 $\sigma_n/E$ 为纵坐标绘出的。 $\sigma_n$ 是名义法向应力, $E$ 是杨氏弹性模量。亚悉比等的断裂图如图3〔5〕。

如果我们舍去亚悉比最简断裂机理分类图里三种高温蠕变断裂问题暂不讨论,则由亚悉比低温分类图和别捷门盘形断裂模式图里三种断裂形式再结合到皮奇(N. T. Petch)的纯脆性体(Truly brittle solids)概念〔6〕,编者打算就固体材料断裂分成四类问题研究:

(1) 纯脆性断裂(Truly brittle fracture)——也可以叫做极端脆性断裂(The fracture of very brittle solids)〔6〕。例如,只有金钢石和在低温下的岩盐(NaCl)等少数几种固体才可能在完全没有塑性变形条件下发生纯弹性断裂〔6〕(p. 356)。

(2) 脆性断裂或解理断裂——这里指的就是一般脆性断裂。这种断裂形式相当于亚悉比低温第一类模式和别捷门A类模式里的断裂形式。

(3) 延性断裂——或叫做一般延性断裂。微孔长大聚合引起的断裂或由连续断裂产生的断裂就是这类断裂模式;这种断裂模式相当于亚悉比低温第二类模式和别捷门盘形分类图

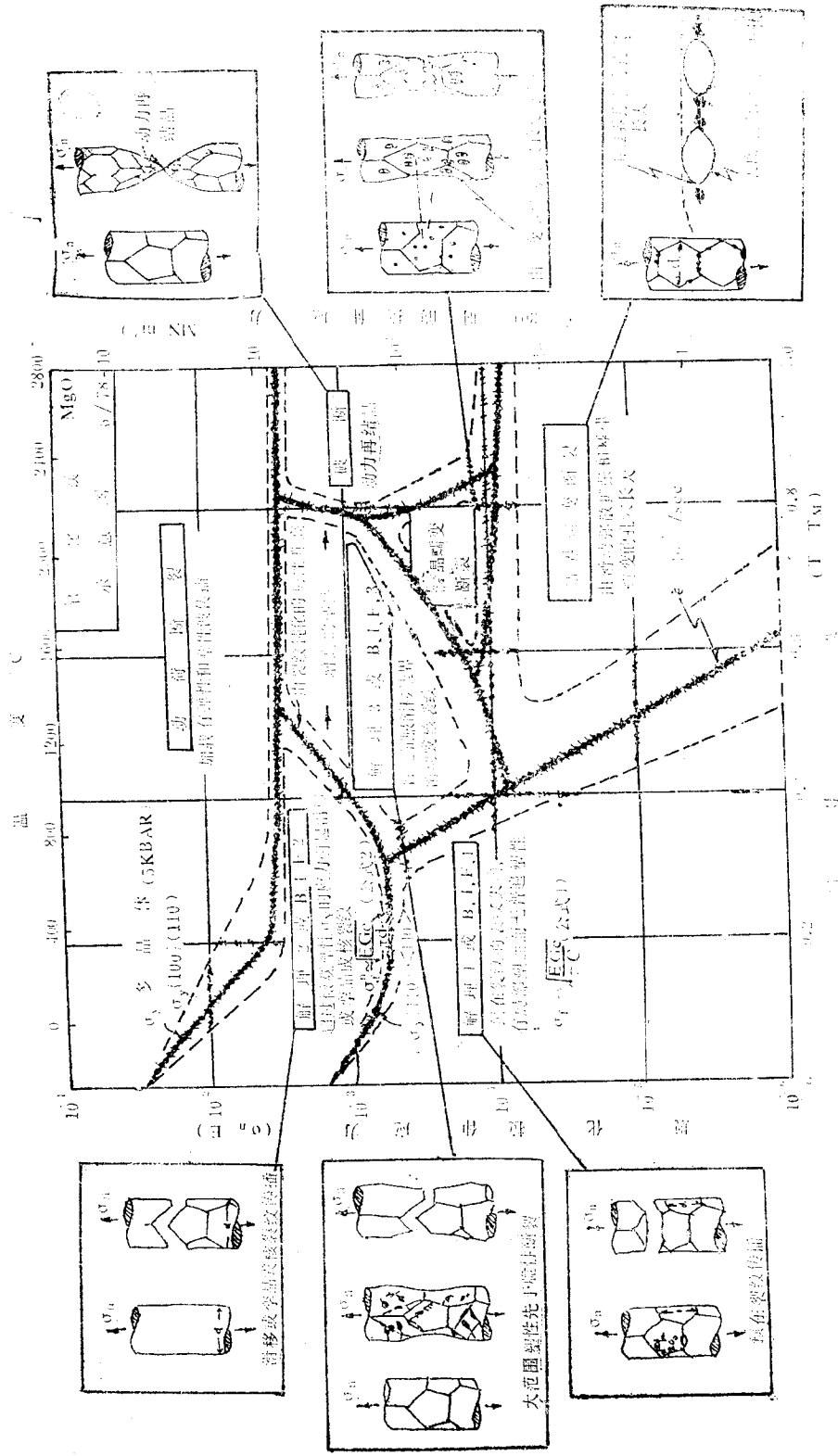


图 3 六种断裂机理图示意图〔5〕

ⅡB类模式的断裂形式。

(4) 纯延性断裂——也可叫做极端延性断裂。由剪切滑移引起的断裂或由试样局部缩颈直到横截面积收缩到零的一种断裂形式。亚悉比低温断裂第三类模式和别捷门盘形分类图里C类模式就是这种断裂形式。

**切槽试样或裂纹体的断裂**——切槽试样或裂纹体的断裂模式与光滑拉伸试样的断裂模式大同小异。详细说来，切槽试样或裂纹体的断裂模式有脆性、准脆性和延性等三种断裂形式。从断裂机理上看，脆性和准脆性两种断裂形式都是解理断裂或准解理断裂。因此，切槽试样或裂纹体的断裂，实质上只可以区分为解理（准解理）和延性两种断裂形式。

我们把延性材料裂纹体或切槽试样发生的脆性断裂叫做准脆性断裂。

#### (四) 固体断裂的物理意义

什么是固体的断裂呢？或者固体断裂的物理意义是什么呢？根据在教学工作中对这个问题的说法，固体材料断裂的物理意义似乎有以下几项说法：

- (1) 固体材料的断裂是在热力学不可逆方式下固体内新表面形成现象；
- (2) 固体材料的断裂是固体内一种裂纹成核和长大的过程；
- (3) 固体材料的断裂是固体内微孔或微裂纹聚合与连续断裂的过程。

这些断裂物理意义的解释都是针对固体断裂过程中出现的某种现象说的。固体断裂最本质的意义究竟是什么呢？上面几种解释似乎均未涉及到。严格说来，固体的断裂实质上就是固体内某些部份原子与原子之间内聚力（cohesion）或原子键的破坏，即所谓脱键分离（Decohesion）。

## 二、 固体材料的脆性断裂

在这一节里拟就固体脆性断裂问题提出几个概念供讨论。这几个概念是纯脆性断裂、脆性断裂和解理断裂。

### (一) 固体的纯脆性断裂

什么是固体的纯脆性（True brittleness）呢？按照皮奇（N.J.Petch）的说法〔6〕，固体的纯脆性断裂（Truly brittle fracture）就是在格里菲斯裂纹纯弹性扩展意义下的断裂。因此，纯脆性性质就是在完全没有塑性变形状态下固体的纯弹性裂纹扩展和断裂的性质。这种性质长时期来被看成是共价体和离子体两种固体材料的普遍性质。可是从本世纪三十年代到六十年代由于大批研究成果涌现出来便否定了这种传统看法〔6〕。

皮奇（N.J.Petch）在总结了大批研究工作后认为〔6〕，纯脆性性质不是固体材料的普遍性质。在客观世界里，只有金钢石、低温下的岩盐以及在某种平面原子键结合较弱的云母等两三种固体才是真正的纯脆性体。因此，可以说纯脆性固体几乎不存在了。如此说来，在亚悉比和别捷门两家断裂模式的分类法里均未列入纯脆性断裂也许不无道理了。

### (二) 脆性断裂与塑性变形

什么是脆性断裂呢？所谓脆性断裂，严格说来就是断裂前不存在任何塑性变形。但事实上对金属而言，绝对的脆性断裂是不存在的，一般总是或多或少在断裂前有一定的塑性变形，故有半脆性之称“〔7〕（P601）”。这种说法的前半部份正是我们已经描述过的脆性断裂了。后半部份可以叫做一般脆性断裂，或就叫脆性断裂。根据皮奇等许多学者的说法，脆性断裂是会有少量塑性变形先于断裂发生。皮奇说，“在脆性温度下长时期来被看成是脆性

体的硅石、玻璃和铝矾土等固体，事实上会在塑性变形过程中断裂”〔6〕。

为了表明固体断裂性质，皮奇根据克利（A. N. Cleib）的数据把8种固体的拉伸强度 $\sigma_{max}$ 和剪切强度 $\tau_{max}$ 的数值列入在表2里供比较研究。他认为固体的理论拉伸强度 $\sigma_{max} = E/5$ ，最大剪切强度 $\tau_{max} = E/30$ ；而且还认为根据固体受到的应力状态（平面应力或平面应变）和波桑系数情况，其 $\sigma_m \approx (2 \sim 4) \tau_{max}$ 〔6〕。

表2 八种固体材料理论拉伸强度和剪切强度的估计值〔6〕

(1) 固体材料	(2) 晶格形式	(3) E 10 <sup>6</sup> psi	(4) $\sigma_{max}$ 10 <sup>6</sup> psi	(5) $\tau_{max}$ 10 <sup>6</sup> psi	(6) E/30 10 <sup>6</sup> psi	(7) $\tau_{max} < \frac{E}{30}$	(8) (2~3) $\tau_{max}$ 10 <sup>6</sup> psi	(9) 备注
铜 Cu	FCC	18	3.6	0.2	0.6	V		
银 Ag	FCC	18	3.4	0.1	0.6	V		
钨 W	BCC	50	12.5	2.4	1.67			
铁 Fe	BCC	30	6.0	1.0	1.0			$\alpha$ -铁
镁土 MgO		35	5.4	2.1	1.17		4.2~6.3	
铝矾土 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		60	6.7	2.5	2.0		5~7.5	
金刚石 C		150	30.0	18.0	5.0		36~48	
岩盐 NaCl		6.4	0.6	0.4	0.21		0.8~1.2	

本表数据来源于克利；表内(6)~(9)四行由编者补充。

皮奇认为，面心立方金属的理论剪切强度 $\tau_{max}$ 低于 $E/30$ ，因而剪切变形要比拉伸分裂容易，也就是容易首先出现塑性变形而后断裂。体心立方金属剪切强度较高，较难出现塑性变形。共价体和离子体的拉伸强度 $\sigma_{max}$ 大约是剪切强度 $\tau_{max}$ 的2到3倍，因而剪切变形同拉伸分离之间存在着大体上的平衡；就是说塑性变形同拉伸断裂有首先或至少是同时出现的可能。只有金刚石和岩盐才是真正的纯脆性体。皮奇最后认为，“在裂纹条件下，存在着塑性变形要比纯弹性扩展容易的可能性”〔6〕。因此，固体在脆性断裂时先有少量的或不很明显的塑性变形就不奇怪了。

不论是纯脆性断裂或是一般脆性断裂均有两个明显的特点：一是在断裂时没有明显的塑性变形；二是实际断裂强度 $\sigma_f$ 远远低于其理论断裂强度 $\sigma_{f,th}$ 。脆性固体通常大约是在外应力等于 $E/500$ 下破坏。这个应力要比 $E/5$ 小得多，其原因是脆性固体存在着格里菲斯裂纹。

### (三) 脆性断裂与解理断裂

对结晶固体材料说来，存在着解理断裂、一般延性断裂和纯延性断裂三种断裂形式。晶体材料的解理断裂就是脆性断裂，两者的涵义是完全一致的。但是编者认为，如果离开晶体材料这个大前提，脆性断裂和解理断裂这两个概念的涵义是不等同的，至少是不完全等同的。

原因有二：

(1) 非结晶固体（或名无定形体）如玻璃和交联聚合物（Crosslinked polymers）等也会在一定条件下发生脆性断裂，但这种脆性断裂不是解理断裂；

(2) 虽然一般脆性断裂不能排除微量的塑性变形，但是严格说来，脆性断裂是纯弹性断裂或几乎是纯弹性断裂，本质上不要求是否有塑性变形；而解理断裂却不是这样，总是需

要有一定的塑性变形为前导的一种断裂形式。因此，脆性断裂和解理断裂这两个概念不但  
不一致，而且应该是有原则性区别的。

编者认为，脆性断裂可以区分为纯脆性和一般脆性断裂两种类型；可是皮奇却把脆性断裂  
区分为三种类型，即纯脆性体(Truly brittle solids)、极脆性体(Very brittle solids)和半脆  
性体(Semi-brittle solids)。“极脆性体是格里菲斯的传统材料”；“半脆性体很可能是  
相当延性的(Quite ductile)，但它们也可能发生解理”；“这些都是断裂位错理论的传统材  
料”〔6〕。编者认为，皮奇的极脆性体很可能就是编者所说的一般脆性体，即很可能相当于  
亚悉比分类法里的解理1或解理2固体；他的半脆性体便相当解理3固体。

结晶固体材料与解理断裂问题后面有专题讨论，这里就不谈了。

### 三、 固体材料的延性断裂

延性断裂又名韧性断裂。如果把延性断裂同脆性断裂作比较，至少可以看出三个显然不  
同的明显特点：一是有较大的塑性变形；二是断裂时消耗或吸收的断裂能量较多，属于高韧  
性断裂；三是断裂形式和断裂表面的外貌不同。除了这几条表现特点外，延性断裂还有若干  
重要特性值得深入讨论。特论述之。

#### (一) 断裂表面的宏观和微观外貌

##### 1. 光滑圆柱体拉伸试样延性断裂的表现形式

金属固体材料光滑圆柱体单轴拉伸试样有四种不同的表现形式。

(1) 杯锥型断裂——在室温下低碳钢圆柱形试样的单轴拉伸试验里，试样随着不断增  
长的加载而逐渐伸长，伸长到一定程度会在标距长度内出现缩颈(Necking down)并在缩颈  
部份继续伸长到某种程度时，试样被拉断成两段。其断裂外形呈现杯锥型式如图4(a)。

(2) 双杯型断裂——在某些金属试样的拉伸试验里可能会发现，试样在缩颈断裂时的  
断裂形式会呈现双杯型如图4(b)。罗格尔(H.C.Rogers)指出〔8〕，像铜、铅、银、金和  
铄这样一些金属的断裂可能会出现这被修正的“杯锥”型断裂，或叫做  
“双杯”型断裂，其外形如图4(b)所示。

(3) 平面型断裂——这种断裂形式的外形虽然同铸铁拉伸试样断裂形式相似，但是由于断裂表面外貌不  
同和有较高韧性两个特征不同于铸铁的断裂，断裂本质是延性的。这种断裂形大都会在室温下高碳钢的拉伸试验  
里发现。其断裂形式的外形如图4(c)。

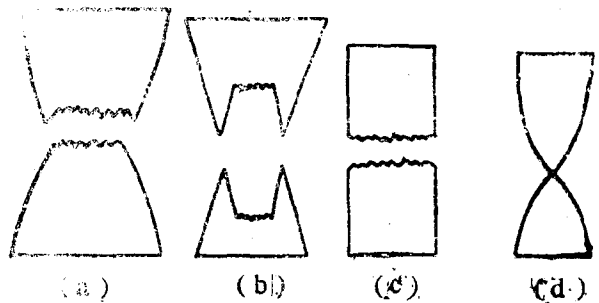


图4 光滑圆柱体试样几种延性断裂形式：(a)杯  
锥型；(b)双杯型；(c)平面型〔7〕；  
(d)凿刃断裂型

(4) 凿刃型断裂(chisel-edge fracture)——“在几乎没有第二相粒子存在非常纯  
的金属里，塑性变形有可能在成对的滑移面上进行到使试样以100%的面积收缩率缩颈到最后  
成尖点”而断裂〔9〕(P.38)。这种断裂形式叫做凿刃型断裂。这种断裂形式就亚悉比分类  
图(图1)里低温第三类断裂模式和别捷门分类图(图1)里C类断裂模式，其断裂外形图如图  
4(d)。耶达浪(A. Kadar)在他的名著里曾经论述过这种断裂形式；他介绍纯铝金属光滑

圆柱形拉伸试样的断裂就是这种形式。

## 2. 延性断裂表面的显微照像图

如果把延性断裂后的断口(断裂表面)复型(Replica)放在电子显微镜下观察,如同克鲁沙尔等(Crussard et al)和别捷门(C.D. Beachem)曾经发现过的显微结构那样可以发现,其断裂表面是由相邻的许多小的杯状凹坑(Small cupules)组成。人们通常把延性断裂表上的这种小杯状凹坑叫做韧性窝坑(Dimples),单称为韧窝。韧窝形貌如图5和6所示。

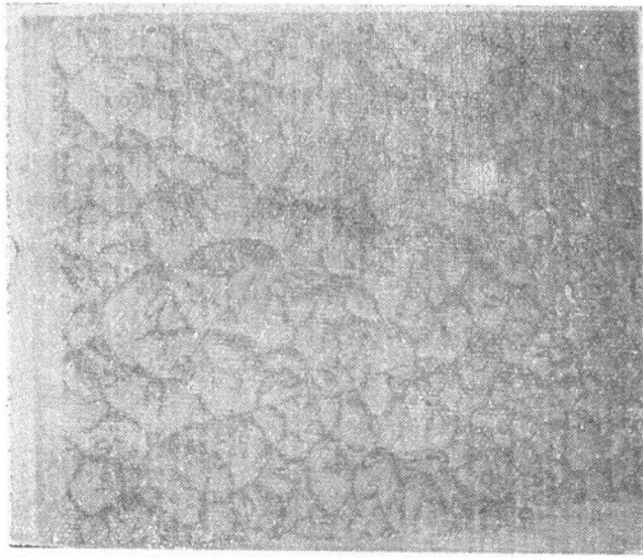


图5 在7075-T6铝金属里的等轴形韧窝,二级复型(原放大30,000×)〔3〕

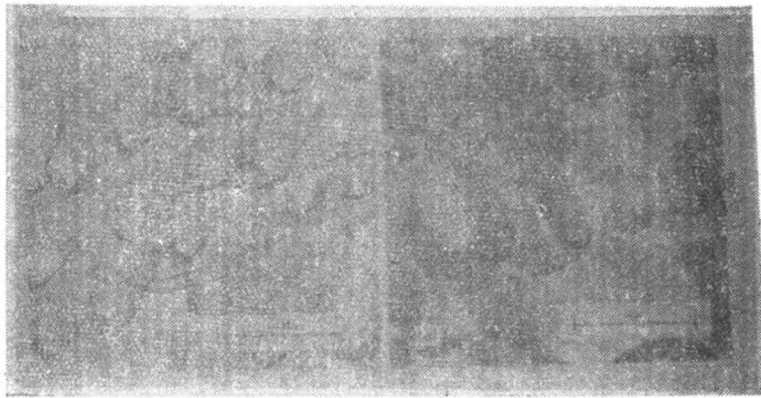


图6 剪切加载下微孔聚合引起“伸长韧窝”形态图。(a)在(TEM)照片上的抛物形凸起;(b)在(SEM)照片上的长沟状实际“韧窝”〔10〕

韧性窝坑的形状通常是不规则的。但是根据外形特征和形成原因可以粗略地把韧性窝坑分为两类三种情况。即等轴形和抛物形两类，而抛物形又有同向和反向两种情况〔3，9〕。

呈现等轴形韧性窝坑的断口高倍显微结构如图5所示。呈现抛物形韧性窝坑的断口高倍显微结构如图6所示。

## (二) 微孔成核

延性断裂的重要机理是微孔聚合理论。郑某某和雷敦(C.Q.Zheng and J.C.Radon)在研究这种理论时把微孔聚合过程分为微孔成核、长大和聚合三个阶段〔11〕。在这里我们首先讨论微孔成核(Nucleation)或萌生(Initiation)。延性断裂的微孔聚合机理是以在材料内部或表面上首先形成若干孔穴(Voids)为前提的。人们通常把这些孔穴叫做微孔(Microvoids)或微裂纹(Microcrack)。微孔是怎样成核的(Nucleated)呢?从事微孔聚合理论研究的人员如克鲁沙尔等(Crussard et al)、罗格尔(H.C.Rogers)、别捷门(C.D.Beachem)、皮奇(N.J.Petch)、布洛克(D.Broek)和雷敦(J.C.Radon)等等均一致认为,微孔是在材料里第二相粒子(夹杂物)处首先形成或萌生。

微孔如何形成?打算介绍皮奇、布洛克和雷敦等几家的研究成果。

皮奇对微孔萌生的论点是,“在变形过程中,在夹杂物和基体之间由于弹性和塑性性质上的差异导致分界面(Interface)的分裂(Separation)并拉长是环绕夹杂物的空腔(Cavity)”〔6〕。

沙凯宜用显微照像图显示微裂纹如何在扩展裂纹尖端前面沿着脆性第二相粒子处形成和长大〔12〕。

布洛克(D.Broek)对微孔如何形成的问题,论述比较具体而深入。他在论述微孔聚合机理时是根据他对13种铝合金断裂表面复型电子显微镜的检查结果。他同沙凯宜一样用断口显微照像图证明了微孔发源于脆性第二相粒子。但是他进一步把脆性第二相粒子分成大、中、小三等,并认为这些脆性第二相粒子大体上是由碳化物、沉淀粒子以及各种合金元素的复杂化合物组成〔9,13〕。

大粒子尺寸量级为 $1-20\mu\text{m}$ ,中等粒子尺寸量级为 $0.05-0.5\mu\text{m}$ ,小粒子尺寸量级为 $0.005-0.05\mu\text{m}$ 。布洛克强调指出,“大夹杂物能确定延性断裂时刻和位置而对断裂过程本身不起作用”。“断裂最终是由细小得多的亚微米尺寸(Sub-micronsize)中等粒子引起的”。在文献〔13〕里指出,“微孔萌生于小夹杂(Small inclusions)”。总之,布洛克认为微孔是由亚微米尺寸量级的中小夹杂物引起的;且断定,如果微孔真的是小粒子处发源,那么韧性窝坑的尺寸应该等于这些小夹杂物的间距。

布洛克为了证明他的论断,从13种铝合金箔和断裂表面复型在电子显微镜里对每种材料各取得10张电子显微图,从每张图里大约数出韧窝和夹杂物各100个,并分别测定100韧窝和夹杂物所占面积。今以 $A$ 和 $A_1$ 分别代表1000个韧窝和1000个夹杂物的面积,且以 $d_m$ 和 $s_m$ 分别表示韧窝平均尺寸和平均夹杂间距。其数值由下式算出,

$$d_m = \sqrt{A/N}, s_m = \sqrt{A_1/N} \quad (1)$$

由断裂表面复型显微图测量出的平均韧窝尺寸 $d_m$ 和平均夹杂间距 $s_m$ 的关系,布洛克用曲线图表示在图7里〔13〕。在图7里环绕数据点的“光”圈表示各种显微照片测出结果的标准差。直线表示在 $s_m$ 和 $d_m$ 之间预期的一一对应关系。这样布洛克认为,小夹杂物的确是形成孔穴的主要原因的论断已被证明是正确的〔13〕。在实验验证过程中也曾发现, $d_m$ 有稍大于 $s_m$ 的倾向。布



洛克认为如果孔穴不是在该区域内每个夹杂物上萌生,这种差异就会发生[13]。

同布洛克相类似的结果也由卡尔洪与斯多洛夫(C.D. Calhoun and N.S. Stollhoff)观测到[14]。他们对镁合金的观测结果是,初窝尺寸性质上是同断裂表面复型观察到的小夹杂物距离相吻合的。

从上面布洛克等两家观测的结果均一致证明了微孔(微孔)是在小夹杂物处形成。这种结论似乎已成定论。

不过,最新的研究成果对这一结论作了某种程度的修正和补充。

郑某和雷敦(C.Q. Zheng and J.C. Radon)通过对低合金钢BS4360-50D(英国北海油田平台用钢)圆柱形拉伸试样的观结果表明[11],微孔在何种粒子上成核视塑性应变 $\epsilon_p$ 的大小而异,不一定在小粒子上,大粒子对于微孔成核也不是不起作用。他们观测的结果是,从屈服过程开始直到塑性应变 $\epsilon_p = 0.10$ 时微孔和球形空腔开始出现;在最大载荷下 $\epsilon_p = 0.16$ 时,缩颈过程开始,应变增加新孔穴继续成核;当 $\epsilon_p = 0.14 \sim 0.60$ 和更高即接近破断时,微孔环绕 $MnS$ ,  $(CaO)_x \cdot (Al_2O_3)_y$ ,  $CaS$ ,  $MnO \cdot FeO$ ,  $Ca_x(Al_2O_3)_y \cdot SiO_2$ 和  $(MgO)_x \cdot (Al_2O_3)_y \cdot MnO$ 这样一些粒子成核和长大。当应变 $\epsilon_p = 0.60$ 以上时,孔穴环绕一些更小的粒子,如像直径不大于 $1.3\mu m$ 的Cu粒子,直径小于 $1\mu m$ 的 $Al_2O_3$ 小球形粒子以及直径小于 $0.7\mu m$ 的小而规则的 $MnS$ 球形粒子成核。

因此他们作出结论,在低应变下在特定应力场里孔穴从最大的夹杂处产生,而在高应变下成核过程转换到更小夹杂的边界上。

应该注意到,在郑某和雷敦论点里的小粒子尺寸量级是 $0.7 \sim 1.0\mu m$ 比布洛克论点里的中等粒子尺寸量级 $0.05 \sim 0.5\mu m$ 要大,很明显郑和雷敦论点里的大粒子对布洛克论点说来也许算是特大粒子了。

综合上面布洛克和郑与雷敦两家的论点,可以认为,微孔可能在大、中、小各种尺寸量级的粒子上成核;在较大的塑性应变 $\epsilon_p$ 的数值下,微孔可能主要在中小粒子上成核。

### (三) 微孔成核和长大的位错理论[9, 13]

孔穴(Voids)的形成和长大曾经有过各种各样的模型,但都不能同延性断裂观察到的现象完全一致[9]。布洛克从韧性窝坑外形研究结果提出了孔穴形成和长大的位错模型[13]。布洛克从断裂表面复型的研究中获得这样两条有益的结果:

(1) 韧性窝坑是浅坑。因为从复型横截面测量和立体测量均获得深度对宽度的比值是小的。

(2) 从韧性窝坑证实,孔穴是侧向长大的,即孔穴或空腔如像聚裂纹那样是在垂直于拉应力方向上优先扩展。

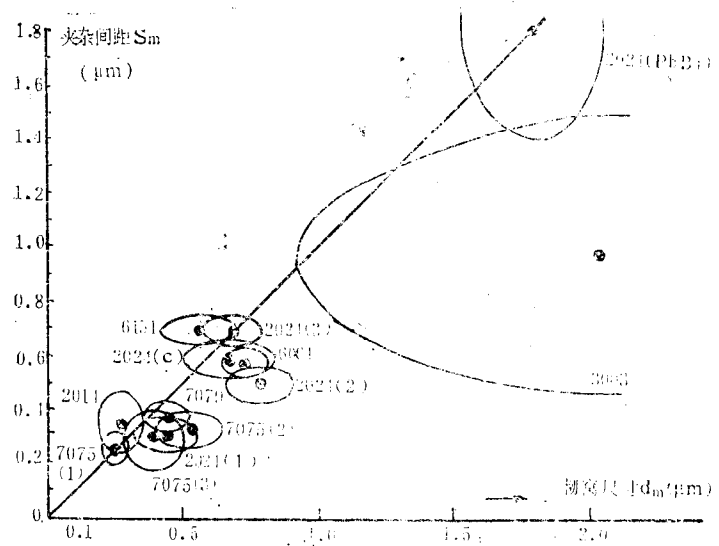


图7 在初窝尺寸和夹杂间距之间测量出的关系[13]