

# 振动粉碎理论 及设备

● 张世礼 编著

冶金工业出版社

# 振动粉碎理论及设备

张世礼 编著

北京  
冶金工业出版社  
2005

## 内 容 简 介

本书共分8章,主要介绍了振动粉碎的断裂力学理论、振动粉碎机械设备、振动粉碎的应用、振动粉碎的动力学、振动粉碎的设计计算、振动粉碎机械的元件、振动粉碎的专利、振动粉碎的发展及未来展望等。本书理论与实用相结合,可供相关专业的工程技术人员、科技人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

振动粉碎理论及设备/张世礼编著. —北京:冶金工业出版社,2005.7

ISBN 7-5024-3739-8

I. 振… II. 张… III. 机械振动—粉碎 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 041028 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 杨盈园 美术编辑 李心

责任校对 石静 李文彦 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2005年7月第1版,2005年7月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32;7.75印张;203千字;234页;1-2500册

25.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 前 言

粉碎是广泛存在于工、农业部门和高新技术产业中必不可缺少的加工手段,利用粉碎可将大至几米的物料经过一段或多段粉碎加工,实现粗碎、中碎、细碎、粗磨、细磨、超细磨、微粉碎、超微粉碎,将物料加工到从几百毫米至几个微米,甚至到亚微米级。没有粉碎加工这一工艺过程,其他基础行业如化工、冶金、电子、电力、机械制造、耐火材料、水泥、陶瓷、二次资源回收等几乎是不可能大规模存在的,有些行业甚至无法存在。

用于粉碎物料的电耗随着工农业的发展在不断增加,用于粉碎的电耗已达世界总电耗的10%~12%,而在这些行业的初期设备投资中,用于购买粉碎成套设备的费用已达到50%,有的甚至可占70%。因此对粉磨行业的设备工艺更新、降低粉磨的成本已变得非常重要。以往国内外粉磨技术的发展,长期停留在对原有技术的改造上,或是建立在固体力学基础上的,如在压碎、冲击、挤压、研磨、切削等方法的新设备的研制方面,难以打破目前粉磨行业的现状。

建立在传统粉碎方法上的粉碎设备存在着很大的缺点,即对于不同的常规破碎方法(如压碎、挤压、冲击、研磨、切削)都存在着一个不可破碎的硬度或理论强度范围,如对冲击,物料的硬度一般不超过莫氏硬度5~7;对切削,则在莫氏硬度5以下。对压碎和研磨虽然可大一些,但一般的应用均在挤压强度为200 MPa的范围内,更坚硬的物料如挤压强度在200 MPa以上的玄武岩、电刚

五、各种金属碳化物、钢、硬质合金等，利用常规的机械方法，有的不能将它们破碎，有的要在几段过程中才可达到目的。由于这几个过程要消耗大量的能量，故也是不经济的。

采用常规的粉碎方法，粉碎的断面是偶然的，是没有选择的，一方面会产生多数部位不破碎；另一方面又会产生局部的过粉碎，导致有用的部分由于过粉碎而无法回收。

20世纪40年代出现了振动磨。当时的理论并没有发展到像今天一样来解释振动作用的粉碎效率。50年代初期在苏联创造了新型振动、惯性破碎粉碎机械，具有选择性的破碎作用。通过几十年的发展，形成了新的理论体系，研制了如下几个系列的振动粉碎机械，以用于不同的目的。

(1) 振动顎式破碎机(ВЩД)，能破碎多边形大块物料，其平均直径达400 mm；如果是板材(如钢筋混凝土板)，其长度可达几米；

(2) 惯性圆锥破碎机(КИД)用于加工原料块度尺寸小于130 mm的物料，它用于加工各种类型矿石及合金；

(3) 惯性滚筒破碎机用于加工纤维材料；

(4) 振动磨机用于超细磨碎及活化材料。

振动破碎机有以下优点：

(1) 沿物料最薄弱表面内层破碎；

(2) 破碎比最大可达30，在4~30的范围内调整所需破碎比简单，且减少过粉碎；

(3) 当卸料间隙增大时(如衬垫磨损造成)，不会增大破碎产品的平均粒度；

- (4) 可带负荷启动和停车;
- (5) 当不能被破碎的异物进入破碎腔时,不会造成传动装置过载或损坏;
- (6) 减少破碎段数,简化工艺流程,减少辅助设备数量;
- (7) 不需要定量通过给料装置给破碎机供料;
- (8) 不需要重型基础建筑物,降低建设投资 20% ~ 30%。

在惯性破碎机中进行超细内层破碎,与传统设备相比可降低破碎单位能耗 50%,而重新形成的表面积增加 1 倍,这时加工每吨材料所需电耗量降低 1 半。

近几年来,国外一些制造厂和科研单位纷纷和俄罗斯合作,或购买专利许可证或与其联合制造,同时也形成一个开发热潮。我国与俄罗斯接触较晚,但目前在国内也形成小规模的生产能力,如洛阳启星技术开发有限公司已成功研制开发了一系列振动破碎设备,像 PEZ 振动颚式破碎机、PZ 振动圆锥破碎机、PGZ 振动辊式破碎机、ZMF 强制内分级式振动磨、MZD 单筒偏心振动磨等,并已在实际应用中取得较好的效果。

本书是作者在振动粉碎机研制开发过程中,对积累的工作经验和国内外发展情况的总结。书中对行业发展提出了一些粗略的看法,不妥之处请给予批评指正。

作 者

2005 年 5 月

# 目 录

<b>1 振动粉碎的断裂力学理论</b> .....	1
1.1 振动粉碎的理论 .....	1
1.1.1 线弹性断裂判据 .....	14
1.1.2 等效裂纹模型与等效应力强度因子 .....	16
1.1.3 在动载荷的作用下裂缝的扩展 .....	21
1.1.4 在动态扩展中裂纹的分叉 .....	25
1.1.5 裂纹的疲劳扩展 .....	28
1.1.6 影响疲劳裂纹扩展的因素 .....	30
1.2 振动磨矿的粉磨理论 .....	49
<b>2 振动粉碎机械设备</b> .....	51
2.1 振动破碎设备 .....	51
2.1.1 振动颚式破碎机 .....	51
2.1.2 惯性圆锥破碎机 .....	60
2.1.3 振动圆锥破碎机 .....	82
2.1.4 振动辊式破碎机 .....	87
2.2 振动磨矿设备 .....	89
2.2.1 单筒偏心振动磨 .....	89
2.2.2 ZMF 强制内分级式振动磨 .....	92
<b>3 振动粉碎的应用</b> .....	96
3.1 振动破碎设备的应用 .....	96
3.1.1 振动颚式破碎机 .....	96
3.1.2 振动圆锥破碎机(惯性圆锥破碎机) .....	98
3.2 振动磨矿机械设备的应用 .....	123

---

3.2.1	用于陶瓷业 .....	123
3.2.2	用于金属矿山 .....	123
3.2.3	用于非金属矿深加工 .....	124
3.2.4	用于磨料行业 .....	125
3.2.5	用于化工行业 .....	126
3.2.6	用于粉末冶金 .....	126
3.2.7	用于耐火材料 .....	126
3.2.8	用于电子行业 .....	127
<b>4</b>	<b>振动粉碎的动力学 .....</b>	<b>133</b>
4.1	单质体单轴式惯性振动粉碎机械 .....	133
4.2	空间运动的单质体单轴式惯性振动粉碎机械 .....	134
4.3	双轴惯性振动粉碎机械系统 .....	135
4.4	双质体单轴振动系统 .....	136
4.5	单质体线性近共振粉碎机 .....	137
4.6	双质体近共振粉碎机 .....	138
4.7	其他系统 .....	139
<b>5</b>	<b>振动粉碎的设计计算 .....</b>	<b>140</b>
5.1	振动颚式破碎机 .....	140
5.1.1	具有一个动颚和单轴激振器 .....	140
5.1.2	具有一个动颚和双轴激振器 .....	142
5.1.3	具有两个动颚和两个单轴激振器 .....	143
5.1.4	具有两个动颚和两个双轴激振器 .....	144
5.2	振动圆锥破碎机、振动辊式破碎机 .....	144
5.3	惯性圆锥破碎机、惯性圆筒破碎机 .....	144
5.4	振动球(棒)磨机、振动中碎机、振动细碎机、 振动滚式磨机 .....	146
5.5	振动能量磨机 .....	146



---

<b>6 振动粉碎机械的元件</b> .....	148
6.1 电机 .....	148
6.2 激振器 .....	149
6.3 轴承 .....	152
6.3.1 轴承保持架受力分析 .....	154
6.3.2 轴承的设计选用 .....	170
6.4 联轴节 .....	184
6.5 弹簧 .....	185
6.6 润滑 .....	187
6.7 润滑室的设计 .....	190
<b>7 振动粉碎的专利</b> .....	193
7.1 中国振动粉碎专利 .....	193
7.1.1 中国振动破碎机的专利 .....	193
7.1.2 中国振动磨矿机的专利 .....	193
7.2 国外振动粉碎的专利 .....	195
7.2.1 国外振动破碎机的专利 .....	195
7.2.2 国外振动磨矿机的专利 .....	214
7.2.3 国外振动辊磨机的专利 .....	218
<b>8 振动粉碎的发展及未来展望</b> .....	220
8.1 振动破碎机的发展 .....	220
8.2 振动破碎机的未来展望 .....	225
8.3 振动磨碎机的未来展望 .....	226
8.4 振动磨碎机的未来展望 .....	233
<b>参考文献</b> .....	234

# 1 振动粉碎的断裂力学理论

## 1.1 振动粉碎的理论

断裂力学形成系统的理论是近二十年的事,它的发展成功地解释了常规力学问题无法正确解释的疑问。由于粉碎断裂理论才刚刚开始,应用还很不成熟、还有待于更深一步的研究和探讨。

世界上曾出现三大著名的粉碎假说:即表面积假说、体积假说和裂纹假说,20世纪80年代又出现利用辊压机料层的粒间粉碎方法。

表面积假说:由里廷格(P. R. Von. Rittinger)提出,此假设是基于粉碎后产品的比表面积大幅度增加,输入的粉碎能越多,产品的粒度越细,比表面积越大,Rittinger 提出所谓“表面积假说”,即粉碎能耗与粉碎后物料的新生表面积成正比,用公式表示为

$$A = K\Delta S$$

式中  $A$ ——粉碎能耗, kW · h/t;

$K$ ——比例常数;

$\Delta S$ ——物料经粉碎后所增加的表面积,  $m^2$ 。

实践证明,Rittinger 假说对于磨矿(粉碎产品的粒度在 0.01 ~ 1 mm 之间)能耗的计算是较为适用的。

体积假说:由基克(F. Kick)提出,这个假说认为,粉碎所消耗的能量与颗粒的体积成正比,粉碎后颗粒粒度也呈正比减少。用公式可表示为

$$A = K \lg D/d$$

式中  $A$ ——粉碎能耗, kW · h/t;

$D$ ——给料平均粒度, mm;

$d$ ——排料平均粒度, mm;

$K$ ——常数。

实践证明,当破碎产品的粒度大于10 mm(粗碎和中碎)时,采用体积假说是合适的。这时由于破碎产品的粒度较大,颗粒的表面积增加不显著,从而表面积能和颗粒内部结构变化等消耗的能相对减少,局部破碎作用也是次要的,而消耗于物料的变形和粉碎机械传动机构的摩擦等能耗,都与颗粒体积成正比,故可用体积假说来计算破碎能耗。

裂缝假说(邦德理论):由邦德(F. C. Bond)提出,粉碎发生之前,外力对颗粒所作的变形力聚集在颗粒内部的裂纹附近,产生应力集中,使裂纹扩展形成裂缝,当裂缝发展到一定程度时,颗粒即破碎。因此邦德能耗同裂纹长度成正比。颗粒的裂纹长度既与颗粒体积有关,也与颗粒面积有关,故邦德能耗公式为

$$A = D^{2.5}$$

Bond 通过试验得出:计算粉碎能公式

$$A = 100W(1/d_{80}^{1/2} - 1/D_{80}^{1/2})$$

式中  $A$ ——粉碎1 t 物料的能耗, kW · h/t;

$W$ ——功指数, kW · h/t;

$d_{80}$ ——粉碎产品细度,  $\mu\text{m}$ ;

$D_{80}$ ——给料细度,  $\mu\text{m}$ 。

实践证明,邦德公式适用于粉碎产品粒度在1~10 mm 阶段,因为随着粒度的减小,颗粒内部的缺陷和裂纹的数目将减小,物料将出现更高的强度,使粉碎更为困难,反之亦然。

粒间粉碎:修纳特(Schonert)教授利用一个实验装置,得出了对料层利用压力作用的情况下,当压力较小时,体积的变化很大,物料之间此时进行密实,使颗粒相互靠挤近,保持良好的接触,然后应力强度逐渐上升,颗粒之间相互的作用能传递应力,到达颗粒的强度后,颗粒就发生破碎事件,同时由于颗粒的几何性质和强度性质的区别,破碎发生一个较大的应力范围内。由于粉碎事件的不断出现,颗粒之间的环境也在不断改变,已被粉碎的颗粒需重新安排位置,因此物料的体积仍在不断地变化。当粉碎事件已足够,一个粗颗粒已处于细颗粒的包围之中,传力相当分散,此时提高应

力,主要使小颗粒相互紧密接触,就产生了结团现象。利用压应力的辊压机等均应有上述的密实—粉碎—结团三个过程。

由以上四种粉碎的理论可以看出:现有破碎和磨碎过程的理论是建立在经典力学基础上的,它不考虑实际物料是由许多不同相位组成。矿石绝大部分是以晶体的形式存在于自然界,同时由于地质的变化及物料间物理性质和化学性质不同,使矿石内部存在着夹杂、缺陷及不同性质物料间分界面,物料的不均匀性等。在这些晶体的晶面上、夹杂、缺陷及不均匀处的强度要比沿晶强方向弱得多。在传统的破碎磨矿设备设计原则中没有考虑这些有利于粉碎的因素。在多数破碎机中利用挤压力,而矿石及其他硬物料一般具有较高的挤压强度,因此即使是具有刚性运动学系统的最重型机器安装在坚固的基础上,也不能破碎特别坚硬的物料。同时由于常规的破碎机负荷作用地点是偶然的,破碎表现出非选择性,破碎力或磨碎力的作用导致在被破碎对象中形成应变及应力带,超过物料的强度时引起晶体栅形成断裂表面,使物料断开。常规破碎方法的应变带是在料块整个体积中建立的,而应变势能只有较小比例的集中在靠近破碎表面产生有利于破碎的作用,绝大部分能量以热量形式散发掉,常规的破碎粉磨理论是建立在物料强度基础之上的。即:当外力  $F$  产生的应力  $\sigma$  大于物料可承担的最大应力  $\sigma_{\max}$  时、物料被沿着  $F$  作用区断开或屈服,如图 1-1 所示,物料破碎解离的条件如式(1-1)所示。

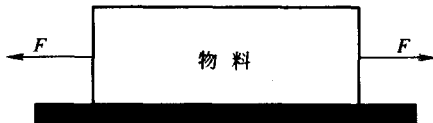


图 1-1 典型传统破碎粉磨力学模型

$$\sigma = F/S > \sigma_{\max} \text{ 或 } \sigma_c > \sigma_{\max} \text{ 或 } \sigma_b > \sigma_{\max} \quad (1-1)$$

式中  $\sigma$ ——外力作用下的应力, Pa;

$F$ ——物料受的作用力, N;

$S$ ——物料的受力截面积,  $m^2$ ;

$\sigma_{\max}$ ——物料可承受的最大应力, Pa;

$\sigma_{s\max}$ ——物料的屈服极限, Pa;

$\sigma_{b\max}$ ——物料의强度极限, Pa。

其过程如下:利用常规的破碎机、粉磨机(如颚式破碎机、圆锥破碎机、球磨机等)的破碎和磨碎作用力,导致在破碎、粉磨物料中形成应变及应力带,随着破碎力及磨碎力的增大,这些应变及应力带也在增大,当超过物料의强度时,物料沿着应力带产生脆性断裂或屈服断裂,将物料破碎,由于应变带是在整个料块中(体积中)建立的,能量积存于整个矿块中(如弹性能量、塑性能量)、而应变势能(外界力  $F$  作的功)只有少量的集中在靠近破碎面地区作破碎作用,成为有用功,其余绝大部分能量(在未破碎面地区)则以热量形式散发掉,成为无用功,因此球磨过程的效率在目前情况下不超过 1% ~ 2% 而破碎机则不超过 5% ~ 15%。

目前现有的破碎机械和粉磨机械的粉磨过程都是建立在上述的固体介质经典力学基础上的,它是以没有内部缺陷的试样作为假想的研究对象,而事实上,任何实际物料都是由许多不同相位组成的,在矿石中它们是不同的矿物的晶体,一般的矿石由于形成时地质条件的不同、组成矿石的成分不同及形成矿石的条件不同,使矿石中存在着大量的原始缺陷,利用断裂力学的选择性破碎即是沿着这些缺陷进行。在断裂力学中,可将这些强度薄弱的地区看作是岩石内部的原始裂纹,可以认为岩石内密集着这样的原始裂纹,在金属及陶瓷材料中是微晶体,在植物中是植物的纤维,在其分界表面上出现各项性质的明显变化。同时由于物料都存在不同程度的原始缺陷。如矿物中矿物和围岩间的界面、原始裂纹、疏松带、铸铁铸钢中心大晶粒、缩孔、缩松、夹渣、热处理应力带等,使物料의强度比理想状态下要低得多。

国外理论证明由于固体中具有微裂纹,或塑性理论中的位错存在,导致物料内部应力集中的出现,固体的实际强度比理论值降低 2 ~ 3 个等级,例如裂纹  $0.1 \mu m$  时,降低物料强度 100 倍。而裂

纹深  $10\ \mu\text{m}$  时降低 1000 倍。

常规的破碎机、磨矿机的负荷作用点是偶然的,破碎有可能是沿着强度最大的面进行的,因此观察到的破碎界面,不一定是原始裂纹裂处、缺陷处、晶体间的晶面上,可能是强度最大的晶体栅上。因此说明了能量不仅只消耗在发展加载线上的初始裂纹上,而且也作用在断裂晶体栅上,即造成过多能量消耗。

因此建立在物料都具有缺陷的基础上,把作用力作用在缺陷处的理论无疑是破碎理论的一大变革。如果在研制破碎、磨矿设备时,最大限度的利用在原子分子之间的界面物料结构缺陷基础上,实现沿相界表面破碎,在这样的物理机制的破碎过程中,具有任何强度的物料均能被破碎,而没有晶体和微晶的过粉碎,因此能量消耗最少,破碎比较高。利用此原理的粉碎设备,无疑将是高效破碎、磨碎设备。

许多人都有破碎某种东西的经验,比如河滩里的鹅卵石,用很大的锤头采用大的作用力可一次将其击碎,但也可用较小的锤头采用较小的作用力多次敲击,同样也可以将鹅卵石破碎。

在大锤的作用下破碎力  $F$  产生的应力  $\sigma$  已大于物料的强度,故产生破碎作用,按常规的强度理论是可以解释清楚的,按此理论开发的设备如颚式破碎机、偏心传动的圆锥破碎机、对辊破碎机、冲击式破碎机等都是一次性破碎力作用下破碎物料的,都具有相当大的破碎力。否则将损坏设备的机构,故在常规理论设计的破碎机中,特别是挤压型的破碎机一般都具有安全保护设施,如断开肘板、可伸缩的弹簧、液压缸等。

在采用小锤敲击物料时,并不是立刻将物料破碎,而是多次敲击后才会破碎,说明小锤敲击下的作用力  $F$  产生的应力值  $\sigma$  始终小于物料的强度,如按传统的理论是无法解释清楚这种现象的。从断裂力学的观点来看,破碎之所以在较小应力下发生,是因为常规的强度理论是把物料看成是理想的均匀连续体,而事实上在物料内部难免存在着可以被看作微裂的缺陷,如:气孔、各种不同成分矿体界面。由于固体中的微裂纹存在,导致矿物内部应力集中

出现,固体的实际强度比实际理论值低2~3个等级,即使是没有夹渣及裂纹的非常好固体,但由于固体均是由晶体组成的,由于固体的晶体间存在着不同的类型的位错,是晶体结构中的薄弱环节,在许多物料中由于外力的作用,使晶体群沿刃状或螺旋位错,产生相对滑动,使晶体产生塑性变形,刃状位错扩展到滑动平面,但方向垂直于滑动向量、他们的运动类似于沿地毯的皱纹位移,比移动整个地毯容易实现。螺旋位错、垂直于滑动平面分布,但其方向平行于滑动方向,在破碎物料和粉磨物料时,即要考虑由于位错积累的微观应力集中、又要考虑裂纹型缺陷引起的宏观应力集中,如图1-2所示。

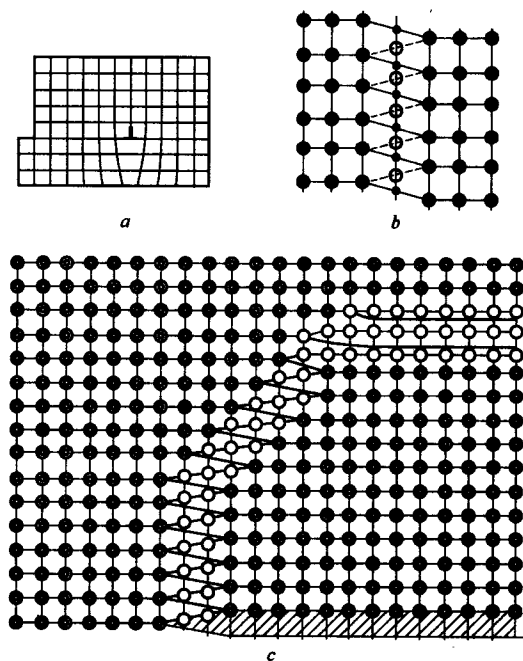


图1-2 各种位错示意图

a—刃状位错;b—螺旋位错;c—复合位错

当剪应力相应的分量达到某个固定的临界值时,开始位错滑动,当明显超过这个值时,物料无规律地破坏。在矿石中有各种方向的滑动向量的位错,单方向的负荷作用在被破碎的物料上,是不能使位错正确移动,如常规的破碎磨碎机器上,不同方向的负荷其应力矢量在位错场中,可能与作用力的方向不重合。

利用断裂力学原理,选择合理的施加作用力方法是非常重要的,形成物料的选择性破碎时,破碎是多阶段进行的,它从晶体栅有缺陷的地方开始进行周期性破坏,然后发生以下几个阶段:

- (1) 积累缺陷,导致局部应力集中。
- (2) 形成初始微观裂纹,即在个别区段上晶团连接的立体性断裂。
- (3) 发展并联合初微观裂纹、并形成宏观裂纹破坏。
- (4) 固体破坏成几个部分。

岩石内的原始裂纹,在脉冲负荷的作用下,裂纹不断扩展最后承受不了外载荷的作用而断裂,图 1-3 所示为裂纹尺寸与载荷循环次数的关系,可以看出随着外载荷循环次数的增加或时间的延长,裂纹尺寸不断增加,如图 1-4 所示为剩余强度与裂纹尺寸的关系,矿石的剩余强度随着循环次数的增加,而逐渐减弱。

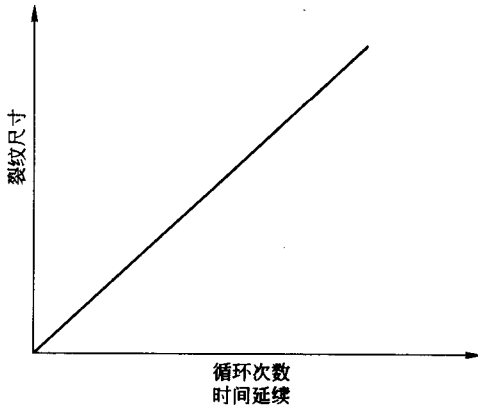


图 1-3 裂纹尺寸与载荷循环次数的关系



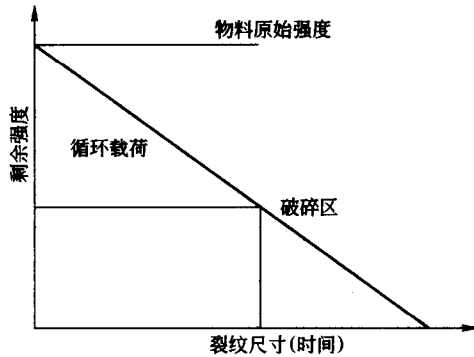


图 1-4 剩余强度与裂纹尺寸的关系

岩石的开裂与断裂：岩石的开裂是矿石内部原有裂纹的扩展，并没有使矿石破碎。岩石的开裂有疲劳开裂和应力腐蚀开裂两种形式。岩石的断裂是随着裂纹的扩展，剩余强度已不能抵抗外部载荷的作用，从而使岩石破碎。岩石的断裂有解理断裂和韧性断裂两种形式。一般说来，矿石的开裂很少引起断裂，只有当裂纹由疲劳或应力腐蚀的作用发展到一定开裂程度时，矿石就以解理断裂或韧性断裂的方式发生破碎。

由以上分析可以看出：断裂是在裂纹开裂与扩展到一定程度时产生的，由裂纹扩展的条件

$$d(U - F + W)/da = 0$$

$$\text{或} \quad d(F - U)/da = dW/da \quad (1-2)$$

式中  $U$ ——材料包含的弹性能；

$F$ ——外力所做的功；

$W$ ——使裂纹形成所需要的能量；

令  $G = d(F - U)/da$  为能量释放率；

$R = dW/da$  为裂纹扩展阻力。

如果  $G \geq R$  则裂纹具备扩展的条件，裂纹扩展，对于像玻璃珠那样完全脆性材料，裂纹扩展需要的能量，即是形成新自由表面所