

## 6. 断裂力学

首席作者 J. R. Rice  
(哈佛大学应用科学部)

初稿的准备过程中, 曾与 J. W. Hutchinson, C. F. Shih 和 ASME/AMD 断裂力学技术委员会进行了讨论. 初稿的审阅意见由 A. S. Argon, S. N. Atluri, J. L. Bassani, Z. P. Bazaant, S. Das, G. I. Dvorak, L. B. Freund, D. A. Glasgow, M. F. Kanninen, W. G. Knauss, D. Krajcinovic, J. D. Landes, H. Liebowitz, H. I. McHenry, R. O. Ritchie, R. A. Schapery, W. D. Stuart 和 R. Thomson 提供.

**提要** 断裂力学是当前正在向着许多方面推进的一个活跃的研究领域. 对研究趋向和良机的本评述, 指出了非线性断裂力学在近些年很有发展前途. 列举了若干复杂的研究课题, 例如延性-脆性转变, 在很大塑性或蠕变条件下的破坏, 在疲劳载荷下的裂纹顶端过程, 以及对复合材料进行断裂分析所需要的新的有效方法等. 继续把着重点放在细观尺度断裂过程上, 借助于固体力学与材料科学交接处的研究, 有希望了解各种材料的脆性与延性响应的原子层次的理论, 了解细观空洞成核和扩展的机制. 非常需要表征裂纹顶端过程和分离机制的严格的实验. 在岩土工程学和地震断层动力学方面的断裂现象, 同样提出了重要的研究难题.

### 6.1 引言

断裂力学是从了解脆性材料的拉伸破坏而开始的, 它已发展成为一个范围很广而又可以应用的领域. 这门学科所关心的是在各种载荷和环境下材料(结构材料、地质材料、生物材料等)的裂纹或空洞所引起的破坏. 其应用范围从具有几分之一微米空洞的细观尺度材料到具有毫米至厘米尺度裂纹的工程结构材料, 直至需以许多公里计的断层的地震破坏. 目前, 全世界都在发展和应用断裂力学. 在美国报纸上, 几乎每周都刊载与断裂相关的问题. 这些问题包括诸如人工心瓣膜、反应堆管道、桥梁及近海结构的焊接影响区、飞机的起落架、尾翼和发动机装置、船舶结构、公共汽车的底盘、涡轮盘和叶片、气体运输管道、铁轨及火车车轮等的破坏.

Irwin 和 Orowan 在 50 年代和 60 年代初, 重新解释并发展了 Griffith 早在 20 年代关于脆性材料的经典理论, 从而全面地开创了断裂力学近代发展的新阶段. 特别是 Irwin 的方法将理论固体力学的进展, 尤其是裂纹体弹性力学分析的进展, 用于解决裂纹扩展测试和结构完善性等实际问题. 这个领域仍处于这种协同合作的状态. 它的特征是以非线性为重点的先进的理论力学与经常依赖于时间的材料响应之间的紧密联系, 材料在细观尺度上的检验与表征, 裂纹扩展与断裂现象的实验室研究, 以及对保证结构完善性的应用, 这些应用本身促进了材料检测及应力分析方法的新发展.

• 244 •

对断裂的 Irwin 研究方法, 往往称为线弹性断裂力学。它使工程师们能分析较为脆性的结构材料如高强度合金材料等的开裂。断裂韧度(即临界应力强度因子或能量释放率)的精密测量是这种新研究方法的早期成果之一。日益壮大的断裂力学界, 很快就将这种新的研究方法推广到研究疲劳开裂——一个很早就困扰航空工业的问题, 并且今天还有很多复杂课题, 特别是在恶劣环境和高温情况下的疲劳开裂问题。

## 6.2 非线性断裂力学

6.2.1 延性结构金属 以线弹性理论为基础的断裂力学的早期方法和概念, 只限于当塑性(非线性)变形被约束在裂纹顶端邻域的情况下才能应用。线弹性断裂力学理论不能用于涉及某些韧度高、延性好的结构材料, 如很多钢材等的若干重要的开裂问题。这些材料往往只在受到很大的塑性变形之后才发生断裂。实际上, 对于很多这种材料, 线性的方法甚至不可能给出用于超载破坏下断裂韧度的实用性评价。这就使得断裂力学在诸如核反应堆工程、海陆运输系统、管线、储油罐、桥梁安全等方面的应用受到了严重的限制。曾经发展了推广线性理论的粗略的方法, 但这些方法现在已由理论和实验力学研究工作者经过15年来的研究所发展起来的非线性断裂力学所取代。

新方法基于这样一些参数, 如裂纹顶端张开位移(CTOD)和 $J$ 积分这些表征裂纹顶端附近弹塑性变形场强度的参数。这些参数在其有效范围内都是几何不变量, 这对于实验室的试件和有裂纹的结构部件都是相同的。在断裂过程区是充分局限在裂纹顶端, 并且存在足够的约束, 来保证顶端有高的三向应力的条件下, 这些参数已能正确地描述断裂的起始扩展和有限的稳定扩展。而这些条件在很多应用问题中都是充分满足的。所以, 所得到的一套方法在近几年来已被广泛采用。例如, 它为当前核反应堆冷却管道和热冲击下容器的断裂控制提供了依据。建立远处载荷条件与弹塑性裂纹顶端参数之间关系的有效的应力分析, 仍然是很重要的课题。尤其是对于复杂几何结构体内例如喷管接管区的裂纹, 或在力学上的非均匀区的裂纹, 如可能存在很大残余应力的焊接区的裂纹, 其应力分析更为复杂。

另外, 研究涉及从起始延性破坏向脆性低能量解理转变情况下的断裂, 以及研究裂纹的起始稳定扩展发生在过载断裂路径上的情况, 都是很重要、很基础性的研究难题。上述稳定的延性裂纹扩展的分析, 需要克服塑性响应依赖于完全非线性应变路径的困难, 这给力学分析提出了一些难题。此外, 急需改进实验技术, 以便更直接地表征延性状态下的裂纹顶端过程和分离机制。这将促使把先进的计算力学方法用于计算具有弹塑性响应的裂纹扩展。

很大塑性下的断裂对于金属各种成型加工都是重要的。在根据塑性流动集中成细小的颈缩区来估算金属薄板加工过程的极限方面, 已取得了重要进展。在一般情况下, 例如冲压情况下, 薄板平面内各个方向上都存在着延伸, 这种加工延性的令人满意的解释, 是这一领域中最新的进展。目前, 对于裂纹比它的裂纹过程区长得多的情况, 以及对于塑性失稳不受宏观裂纹影响的情况, 延性断裂力学已有了相当好的发展。但在了解例如来自局部化剪切区的断裂成核以及裂纹在经过很大塑性流动区内的扩展方面, 至今几乎没有取得什么进展。

6.2.2 蠕变断裂 高温开裂问题是一个迅速发展的领域。这时必须考虑非线性蠕变变形。对于在材料熔化温度一半以上的温度附近运转的部件, 如燃气轮发动机, 高温开裂问题是很重要的。甚至在简单阶梯载荷下所产生的裂纹顶端应力场中都存在着显著的瞬变过程。虽然在加载以后这种显著的非线性蠕变应变区起初被限制在裂纹顶端附近, 就象在经典脆性

断裂力学中塑性区基本上是被弹性的环境所包围一样,但到最后,完全断裂的部件要经受很大的蠕变变形,其行为与非线性的纯粘性体一样。这种类型的转变不仅从名义上的弹性转向定常的(第二阶段)蠕变,而且包括最初的蠕变和短时塑性效应。在这些情况下,值得重视的问题在于了解如何能够用裂纹顶端场来解释高温下的实验室裂纹扩展数据,并把它们用于合理预估各正在运行部件中的裂纹扩展速率。如在长时间运转的涡轮发动机里,这些部件典型地经受着复杂的温度和应力过程。很幸运,在最近几年,在认识裂纹顶端可能存在的与时间相关的奇异应力/变形场的类型方面,以及在认识阶梯载荷下或其他变载荷下这些场之间的转换时间方面,都取得了较大的进展。其结果对载荷的水平和对蠕变状态下的响应所预期的温度都有很强的依赖性。并且,所得到的合理处理蠕变裂纹扩展数据的依据给人以深刻的印象。在研究诸如蠕变疲劳下的高温裂纹扩展,并适当计及氧化或腐蚀环境的影响等情况下的一般载荷历史方面,还存在着很多疑难问题。

如同较低温度的延性破坏一样,在有些情况下,断裂最好用某一主导的单个裂纹的扩展来模拟,这条裂纹在其顶端的集中变形是自动催化的,而在另外一些情况下,细观空洞引起的蠕变流动和材料的逐渐衰坏(degradation),则发生在部件的相当大的区域中。较老的连续介质损伤理论曾长期用来描述这种衰坏过程。设法使这些理论、方法与破坏的细观机制更好地一致起来,并且了解导致宏观裂纹与分布损伤相对应的条件,看来是很重要的工作。

6.2.3 分布的细观裂纹 很多脆性体,包括建筑用混凝土,某些岩石以及某些纤维增强复合材料,在其断裂分析中,都存在着显著的非线性。它们在主拉伸断裂前都出现广泛的细观裂纹区。可以认为,这种细观裂纹区与延性体中的塑性区或蠕变区近似相等。断裂力学方法对混凝土结构的适用性,由于计及一般细观裂纹而大为扩展。这些细观裂纹可以简单地模拟成裂纹平面延伸方向上的二维材料衰坏区。混凝土实验的协同发展,已经能够将抗拉强度作为横过宏观拉伸破坏距离的递减函数而测出;而强度的逐渐下降,则是由聚集粒子的连接效应,以及聚集粒子和纤维增强物(如果后者存在时)的连接效应所引起的。

在主压应力作用下脆性体的断裂,典型地包括由裂纹的大量的成核、扩展和相互作用所决定的复杂的非线性总体变形。在描述这些压缩破坏的一些特征方面,例如描述在滑动剪切裂隙的边界上成核而平行于主压缩方向的拉伸裂纹的局部稳定扩展方面,已取得重要进展。然而,多裂纹行为的描述和变形最终局部化形成剪切破坏或脱层区,仍是需要研究的难题。

6.2.4 复合材料 在单向和层状两种纤维复合材料的断裂力学分析中,都会遇到显著的非线性。在脆性热固基体的复合材料中,在主断裂之前,常常发现广大的细观裂纹区;在金属基体的复合材料中,裂纹顶端也存在同样广大的塑性变形区。通常,这些区域的大小、形状和损伤强度都随着铺层的方向而变化。在裂纹的自由边界和一般在自由边界附近的层间脱层,使裂纹的几何参数更加复杂了。

虽然传统的断裂力学推广到复合材料,通常采用的是各向异性体的裂纹应力分析,但是,复合材料的破坏过程往往是复杂得无法用各向异性体裂纹模型来描述。未完全拔出的纤维可能连接宏观裂纹的部分表面,裂纹本身向前发展的过程,则可能包括纤维脱胶、层间脱层以及在相当大量的分布损伤和/或塑性变形情况下的纤维破坏。裂纹顶端常常被一个长分离区所代替,实际上,裂纹的尺寸趋于比其形状更为重要;层状复合材料板的强度一般依赖于某一缺陷的长度,例如依赖于孔洞的直径,依赖于切口或裂纹的长度,而与其形状无关。

这里所面临的挑战是发展一种断裂力学理论，它用现有的概念去了解细观层次上的累积损伤原理，并且发展用于复合材料设计中可靠寿命估算的宏观描述。

感兴趣的问题还涉及许多种类的材料。例如最普通的基体材料是聚合物。但为了用于较高温度，发展了金属基体的复合材料。陶瓷纤维与陶瓷基体的复合材料也正在发展之中。

6.2.5 聚合物 聚合物已用来做复合材料的基体，接头的粘接剂，并日益增多地用作承载构件。一般来说，其断裂过程是与时间相关的，它至少部分地反映着聚合物力学响应的粘弹性特性，而在高应力情况下，还可能同时发生永久变形、发裂纹、空洞和剪切流动局部化。已经取得的进展，有对发裂纹区即裂纹顶端常常形成同一方向的分子伸长区结构的解释，有阐明依赖于时间的裂纹扩展同裂纹区及发裂纹区外部响应的粘弹性分析参数之间的关系。同样，与延性断裂力学的裂纹顶端张开位移和  $J$  积分方法相类似的一些成果，现在已经有效地用于一类非弹性响应材料。尽管如此，对于延性较好的聚合物如聚乙烯，在其裂纹扩展到断裂之前，材料内要经受极大的应变，其应变区域的大小与裂纹长度相比往往并不很小。而且，在这种大应变区后面刚刚形成的发裂纹区，是由有限变形的纤维变成的。这就需要能够直接把大应变现象考虑进去的新的分析方法。在聚合物的应用继续激增的情况下，更好地了解这种材料的断裂，了解环境如温度、溶剂等对裂纹扩展和破坏过程的影响，已变得日益重要起来。

### 6.3 疲劳，寿命估算

上述这类非线性及与时间相关的断裂力学的发展，已经达到了为工程系统的寿命估算提供更加可靠的依据的阶段。典型的破坏过程包括在变载荷作用下即疲劳条件下裂纹的成核和向临界扩展。目前，将循环载荷下有代表性的疲劳裂纹扩展的实验数据，用于预测更为一般变载荷下的疲劳裂纹扩展，其依据在很大程度上是经验性的，基本力学模拟几乎没起什么作用。疲劳过程常常受其化学环境的严重影响。如果有足够的腐蚀条件，即使在不变的载荷下，化学环境也可能引起称之为应力腐蚀开裂的裂纹扩展。此外，视材料和应用的情况而定，与时间相关的非弹性响应如高温蠕变等，可能与疲劳裂纹扩展过程相互影响，并引起载荷持续时间及频率的附加效应，就象在变载荷情况下一样。

为了从更根本上了解疲劳裂纹扩展，看来有必要更加充分地搞清楚，载荷历史和材料的本构关系的特性是如何影响裂纹顶端的逐次张开和闭合的，搞清楚裂纹表面突出部分之间不可避免的机械接触（即裂纹闭合）是如何影响这一过程的，搞清楚局部环境影响是如何控制裂纹顶端的几何参数及其张开和闭合过程的相对运动学可逆性的，等等。其中所包括的非线性固体力学的分析问题相当棘手。但是，在超巨型计算机所能攻克的范围之内它们可能仍在用现代数值方法。同样有必要发展相应的观测技术及探测裂纹闭合、测定裂纹在一个加载循环中的扩展等所需要的仪表。

在疲劳分析中出现的一个主要问题，涉及极短裂纹的处理，例如长度量级在 1 个至几个晶粒直径，或长度为局部塑性区的尺度的裂纹的处理。根据应力强度因子的长裂纹（一般说来）的实验数据来进行寿命预估，这样的处理问题的经典的方法，在此看来是不适用的。其困难可能起因于异常的表面闭合、大尺度的非线性、局部环境影响或其他还不清楚的原因。这是一个很重要的研究课题，因为结构寿命的大部分常要涉及这个范围内的裂纹尺寸。而且必须研究小裂纹范围以发展合理的寿命估算方法，包括疲劳裂纹的成核和扩展两个阶段，此

两阶段传统上是被分别处理的。

纤维状和颗粒状两种复合材料的疲劳模型试验仍处于萌芽状态。实验结果指出,在破坏之前,分布的裂纹要引起刚度大幅度减小和强度的大量下降。对分布裂纹现象以及大裂纹疲劳扩展的分析,提出了很多在材料和结构设计方面都很重要的复杂的实际难题。

继续发展对缺陷的无损检测,对于推动适用于工程实际的寿命估算方法的发展是很重要的。同样重要的是,为设计中的寿命估算发展一个坚实的概率方法基础,以考虑损伤过程的不确定性、裂纹尺寸的统计规律和裂纹扩展的随机形态。这样的进展对于了解重要工程系统的可靠性,确定其检查周期,安排其替换零件,都将有重要影响。

#### 6.4 动态断裂力学

动态断裂力学近来受到特别的关注,并且在此领域已取得一些令人振奋的新结果。可能的应用包括裂纹止裂的结构设计和地震断层分析。动态裂纹传播的分析与观测,大大地推进了对裂纹不稳定扩展及其如何受材料特性影响的了解。主要进展来自裂纹非定常扩展的弹性动应力场的解法,来自把非线性断裂力学推广,以便确定材料惯性对裂纹顶端附近应力和塑性变形分布的重要影响。理论和实验技术发展间的紧密结合,有利于深入了解动态断裂。这如实验技术包括受控制的动态载荷的产生,非定常裂纹运动和裂纹顶端变形强度的测量。例些使用光学方法,包括光的反射散焦和高速摄影。

具有很高塑性流动速率的粘塑性材料,其裂纹顶端的动态特性,至今仍是一个了解得很少的领域。而这方面的知识,对于了解例如象从结构钢中延性空洞向具有很低的能量吸收的解理断裂转变的那种断裂模式,可能是非常重要的。同样,高速运动的裂纹有从直线传播转为分叉或分支的趋势,并且常常发展成复杂的几何形状。这种行为的一个极端情况,是将含有资源的岩体之类的固体,在爆炸载荷下,通过多重开裂加以破碎。这是一个需要从根本上搞清的领域,与此相关的还有在高速碰撞下的侵彻和穿孔问题。

#### 6.5 断裂现象的材料科学

力学界和材料科学界研究人员之间的合作,长期以来就是断裂研究的一个特点。目前在几个前沿领域中,这种共同的研究显得尤其明显,甚至更为重要。在设计制造断裂性能得到了改进而又仍旧保留了所期望的强度的材料时,需要对在微观层次上,受材料变形和破坏机制影响的,裂纹的产生及其扩展的力学理论进行更基础的了解。在不同的情况下,在原子、长链聚合物分子、位错、界面、晶粒或其他结构单元等层次上研究微观响应,可能是恰当的。

必须既使用力学方法,又使用材料科学的方法,才能在依据材料的细观结构来描述其宏观断裂特性这样复杂的问题上取得进展。了解裂纹顶端的原子结构,是脆性体解理破坏的一个重要问题。关键问题是原子如何排列,材料的特性,环境中具有的或作为溶质的局部化学成分(它们能使确定的晶格或晶粒界面经受键的原子脆性分离)。而很大的局部延性和塑性剪切过程引起的则是另一种情况的破坏。对于延性更好的结构金属,最重要的是了解由于导致细观空洞成核的位错运动、由于相间界面的空化作用或由于夹杂物或析出物形成的裂纹如何引起应力及塑性流动,了解在宏观破坏中,空洞的继续塑性扩展是如何引起空洞之间相合并,或空洞与较大裂纹顶端相合并的。塑性流动有使局部化形成剪切带的趋势,它常常是这种金属破坏过程的一个重要的部分。局部化严重地限制了延性合金裂纹顶端的断裂韧度,因为它使得细观空洞能在比按照准稳定扩展所预期的裂纹顶端张开位移小得多的情况下失稳

合并。对这种临界的性能了解得甚少，但最近在了解流动局部化及与其相关的现象方面，例如金属中不协调的滑移，延性晶体连续介质塑性方程组解的不稳定性等，已经取得了非常鼓舞人心的进展。

在高温情况下，金属和陶瓷材料中的空洞通过扩散过程，有时还与塑性流动相结合而长大。这种过程的力学解释，在细观尺度上应用于空洞的成核和在晶界上的扩展，已开拓了蠕变范围内断裂研究的一个活跃的领域。另外一些研究打破了力学与材料科学的界限，在了解聚合物中发裂纹及有关的断裂现象方面，也取得了显著的进展。通过利用如相变，裂纹分叉和偏转，以及稳定的细观裂纹等过程的力学理论，来进行具有增强的断裂韧度陶瓷的设计，已经使陶瓷的韧度达到10年前所梦想不到的水平。并开辟了陶瓷材料可能的新的结构应用。但是，很多问题尚待解决。目前，即使对于金属类的材料也仅仅是定性地建立了其宏观特性，如断裂度韧及延性-脆性转变等与其细观结构特性之间的联系。

在金属和陶瓷材料的研究中，现在有意忘却应用力学和材料科学之间的传统界限，并且学科带头人（和他们的学生）已经掌握并有效地应用了来自两门学科中的先进技术。从而，细观断裂力学的研究得以利用如电子显微镜，表面分析之类的现代测量技术。在合金设计及材料加工方面，既能从基本规律的了解方面受益，又能对基本规律的了解有所贡献。对于聚合物和复合材料，也需要促进类似的交叉学科的研究。断裂力学工作者更多地参与测量细观过程的各个细节的实验，将大大增进对断裂的基本规律的了解。

#### 6.6 地震地球物理学和岩土工程学中的断裂力学

对于断裂研究所发展起来的固体力学方法，在岩土工程学和地球物理学中，特别是在地震学中找到了最新的广泛的应用。例如，脆性岩石的受压破坏是由于细观裂纹引起的，并且在了解局部拉应力集中区裂纹的扩展方面，以及在了解（尽管是更有限地）由于断层形成而最终破坏时，细观裂纹阵列之间的相互影响方面，都取得了进展。为了抽取碳氢化合物或地热能而用液压使岩层开裂，是断裂力学的又一活跃领域，类似的技术已能用来测量目前钻探所能达到的深度上的地壳大地构造应力。相关种类的裂纹的模拟，有助于了解火山地区岩浆向地表的迁移。

对于地震过程，最初为了了解张开裂纹或受拉裂纹而发展起来的方法，已用于处理在宏观尺度上看成剪切滑移裂纹的地壳断层。这里，借助于岩石力学实验和断层模拟，来了解可能导致以地震形式出现的滑移失稳同滑移率之间的关系，以及同断层摩擦阻力的历史依赖性之间的关系，已取得了令人振奋的进展。这方面的研究兴趣，在于这些研究在识别大地震破坏来临时的前兆（如小地震的分布和地壳变形）方面的潜力，还在于了解其地震破坏传播的动态特性。尽管如此，在使实验室对临界剪切断裂能量或滑动位移衰减所测出的参数，同根据地震学推断出来的类似参数相协调方面，还存在很复杂的问题。基于地震成核和止裂条件的地震学估算值，一般说来是过大了。这就提出了关于现场条件的尺度效应，以及关于估价断层区复杂的几何因素影响宏观剪切断裂响应等重要课题。由非均匀传播的断层辐射出来的地震弹性动态特性，由于受到来自地质调查和过去地震记录所确定的“粗糙度”或“障碍物”的影响，这在了解地震的地运动以测定地震的危险性及结构响应方面，是人们有强烈兴趣的一个领域。这里也如材料科学一样，研究工作者之间跨学科的联合已发展起来，使根子是古典的地震学这个先前独特的领域，在技术上用的是新的断裂力学方法。

## 6.7 需要开展研究项目一览

现代断裂力学是一个正在向许多方面推进的涉及面很宽的学科分支。需研究的部分项目列举如下:

- 关键性的实验 需要对各类材料和加载方式进行实验,以便更好地描述裂纹顶端过程和分离机制。

- 基本力学分析 结合符合实际的非弹性本构关系、大变形和惯性效应,为裂纹顶端场提供精确的连续介质力学的描述。

- 疲劳 了解在一个载荷循环中,裂纹的扩展是如何发生的,包括环境、温度、裂纹闭合和持续时间的影响。

- 极短裂纹 分辨与长裂纹疲劳响应的区别;在疲劳寿命的估算中将裂纹的成核和扩展两个阶段统一起来。

- 钢材中延性向脆性解理的转变 通过断裂的细观机制和裂纹顶端快速加力过程的粘塑性动力学来研究。

- 延性裂纹扩展 发展一套方法来预估裂纹起始的稳定扩展和最后的失稳条件,特别是  $J$  积分和 CTOD 方法的适用范围外的情况。

- 高温蠕变破坏 描述蠕变体中变载荷、变温度历史情况下的裂纹顶端应力场,包括由空穴成核和扩展形成的分布损伤;发展依赖于时间的断裂发展的预估方法。

- 纤维增强复合材料和叠层材料 发展计及大区域的细观开裂、纤维拔出、脱胶和层间脱层等研究疲劳和断裂的方法。

- 结构分析 在考虑到焊接残余应力和在粘接处应力状态的复杂性等情况下改进应力分析,以提供研究运转中的结构缺陷的断裂力学方法。

- 断裂的原子层次理论 研究脆性裂纹顶端的原子结构,以及确定脆性与延性载荷响应的因素。

- 空洞的成核与扩展 模拟出现在各类材料中的细观空洞的成核及其扩展、合并的塑性过程和/或扩散过程的机制包括宏观裂纹顶端过程和分布损伤机制。

- 剪切局部化 了解导致作为延性空洞损伤机制前兆或催化剂的剪切局部化因素。

- 细观结构设计 进行非均质合金和复合材料的细观结构设计,以促进裂纹分叉和偏转,促进有利的相变和形成抗裂纹扩展的其他特性。

- 受压脆性破坏 模拟受压状态下裂纹的成核、裂纹阵列的相互影响以及最后形成贯穿断层。

- 地震断层动力学 建立导致地震失稳和剪切破坏传播的条件同断层区材料响应的实验室数据之间的关系;研究自然断层的复杂几何因素和尺度效应。

## 6.8 文献目录

有关断裂现象的著作遍及工程固体力学和结构力学的文献,并在很多材料科学甚至地球固体物理学的文献中都能找到。因而,很难列举出所有这方面的原始资料。然而“工程断裂力学”(Engineering Fracture Mechanics, Pergamon)和“国际断裂杂志”

(International Journal of Fracture, Noordhoff)是两种断裂方面的专门期刊。这一领域的许多基本理论力学论文发表在“力学和固体物理学报”(Journal of the Mecha-

*nics and Physics of Solids*, Pergamon) 和“应用力学学报”(Journal of Applied Mechanics, ASME Transactions)上; 美国机械工程师协会(ASME)的其他会刊上也可找到不少这方面的论著, 例如“压力容器技术”(Pressure Vessel Technology)和“工程材料和技术”(Engineering Materials and Technology)。近几年来, “冶金学报”(Acta Metallurgica, Pergamon)是以断裂为主的材料科学期刊。

自1965年起, 每四年举行一次的国际断裂会议(ICF)文集提供了断裂研究的总的展望。最近两次会议的文集为:

Francois, D(Ed)(1981). *Advances in fracture research*, Proc 5th ICF, Cannes, Pergamon, New York.

Valluri, S R, Taplin, DMR, Ramo Rao, P, Knott, JF, and Dubey, R(Ed)(1984). *Advances in fracture research*, Proc 6th ICF, New Delhi, Pergamon, New York.

内容更集中的最近的会议文集为:

Bilby, BA, Miller, KJ, and Willis JR(Eds)(1985). *Fundamentals of deformation and fracture (the Eshelby memorial symposium)*, Cambridge Univ Press, Cambridge.

Bradt, RC, Evans, AG, Hasselman, DPH, and Lange EF(Eds)(1983). *Fracture mechanics of ceramics*, Proc 3rd Int Symp, Plenum, New York, vols 5 and 6.

Latanision, RM, Pickens, JR(Eds)(1983). *Atomistics of fracture*, Plenum, New York.

Shih, CF, and Gudas, JP(Eds)(1983). *Elastic-plastic fracture, second symposium*, ASTM Special Technical Publication 803, Am Soc for Testing and Mat, Philadelphia.

同样, 美国材料试验协会(ASTM)的很多专门技术出版物也热心于断裂的课题, 包括每年一次的ASTM和全国断裂力学讨论会的论文集。

现在已有很多断裂方面的较好的教科书, 在基础固体力学、各种材料和结构应用等方面各有不同的侧重。一本包括了裂纹力学方面, 特别是结构应用方面内容广泛的最新进展的书是: Kanninen, MF, and Popelar, CH(1985). *Advanced fracture mechanics*, Oxford Univ Press/Clarendon Press, Oxford.

此外, 着重脆性体材料性能方面的较早期的, 比较基本的书是: Lawn, BR, and Wilshaw, TR(1975). *Fracture of brittle solids*, Cambridge Univ Press, Cambridge.

张秀琴译自: *Appl. Mech. Rev.*, **38**, 10(1985): 1271—1275.

(何明元校)