

断裂力学简介*

中国科学院力学研究所十二室断裂力学调查小组

断裂力学的兴起是近一、二十年内的事情。60年代以来，由于各方面的重视，在实验和理论方面均有迅速的发展。

与经典的固体力学不同，断裂力学主要研究裂纹周围的材料的形状。断裂力学理论的一个中心点就是所谓“断裂韧度”，它已成为近几年以来材料试验的重要指标。

对于工业、国防中广泛应用的金属材料，人们通常用一系列指标来衡量它们的力学性能，如屈服强度、延伸率、断面收缩率、冲击功、疲劳极限、持久强度等等。但是，随着工艺水平的提高及高强度材料的引入，人们发现，对于传统的力学性能指标均满足要求的结构材料，在安装、试验、使用的过程中，常常发生所谓“低应力脆性破坏”。据记载，在第二次世界大战期间，美国近五千艘全焊接“自由轮”货船，在使用过程中发生了一千多次脆性破坏事故，其中238艘因此完全报废。其破坏处的设计应力常常不到钢板屈服强度的一半。当时，由于处于战时，对这类问题没有进行深入的研究。

在50年代，美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在实验发射时发生的爆炸事故引起了普遍的重视。该壳体使用D6AC高强度钢，屈服强度为140公斤/毫米²，而且经过传统的韧性检验而被认为合格的。破坏应力据估计不到屈服极限的一半。当时组织了二十多个研究单位进行分析研究，开始认识到裂纹在低应力脆性破坏中的重要作用。结构在工艺过程中（如焊接，咬边），使用过程中（如应力腐蚀，疲劳）往往很难避免出现裂纹。实验事实表明，脆性破坏总是由这种裂纹（其深度从0.1毫米至1厘米不等）扩张引起的。对于一定的结构，一定尺寸的裂纹，存在某一应力水平，在低于它的时候，裂纹是稳定的，在高于它时，裂纹就失稳扩张，往往引起破坏。对这个临界状态的研究，导致了断裂韧度概念的出现。

在1959年，美国国家航空和宇宙航行局（NASA）、材料试验协会（ASTM）、海军等研究单位在美国国防部和科学院的建议下，组成了一个特别委员会，专门研究断裂韧度问题。有很多原来搞疲劳、弹塑性力学及材料试验的科学家参加。在有关部门的配合下，几年时间内就取得了显著的进展。1964年，上述委员会（ASTM, E24）发表了第一本研究报告集（ASTM STP381），总结了五年内研究的成果。断裂力学已经以很严密的理论武装起来，而且有很丰富的实验资料。取得的结果大致可以归结为下列几点：

（一）断裂力学的线弹性理论。一个结构在外力作用下，其裂纹前缘有一个塑性变形区，其外面是弹性变形区。对于一些高强度材料，在接近平面应变的条件下，塑性变形区很小，裂纹失稳扩展的条件基本上可由其外面的弹性变形区的应力状态决定，这就是线弹性断

* 本文系参阅新金属材料编辑部编的《断裂韧性的基本原理、测试技术及应用》及陈篪同志所写《线弹性断裂力学简介》，以及有关国外资料综合写成。

断裂力学的基本假定。从弹性力学的分析（不计塑性变形）可知，裂纹前缘的应力状态可由 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 等三个参数来表示，它们代表裂纹三种可能的扩展方式（即张开型、滑开型和撕开型）。其中以张开型为最常见，因此研究得比较多的是 K_I ，被称为应力强度因子，通常有下列关系：

$$K_I = \sigma \sqrt{a} Y$$

其中 Y 为物体几何形状的函数， a 为裂纹的长度。研究表明，当 K_I 达到临界值 K_{IC} 时，裂纹失稳扩展。 K_{IC} 是材料的一个参数，称为平面应变断裂韧度，它表示了材料阻止裂纹扩张（也即脆性破坏）的能力。由此就可以算出具有某种尺寸的裂纹的构件的实际强度。

（二） K_I 的计算及测定 K_{IC} 的实验技术。随着上述特别委员会的成立及理论工作的进展，也不断发展了一套测定 K_{IC} 和计算 K_I 的方法。美国材料试验协会在这个工作的基础上已经制定了各种结构形式试件的标准尺寸，以及标准试验方法。

（三）裂纹前缘塑性区的初步分析。可以在一定的结构形式下确定塑性区域的大小。研究表明，在结构件的厚度 B ，裂纹的长度 a ，韧带宽度 $(W-a)$ 都满足 $\geq 2.5 (K_{IC}/\sigma_Y)^2$ 的条件下，线弹性断裂力学的理论可以应用，其中 σ_Y 为材料屈服应力。

60年代以后，一方面，断裂力学的知识开始广泛深入地应用到工程设计及力学研究的各个领域中去，另一方面理论也在朝着深入的方向发展。其应用大概可以分下列几个方面：

（一）设计工作。断裂力学的分析表明：单纯追求高强度并不能保证安全，相反，可能因为断裂韧度的下降反而变得不安全。只有当材料具有足够的 K_{IC} 时，它的强度才能得到发挥。因此，在精确了解应力状态的前提下，采用尽可能低的强度安全系数是有利于提高材料的 K_{IC} 从而保证安全的。目前在对外某些用途的材料已取 $\lambda=1.15$ 或更低的安全系数。

目前在设计工作中出现的所谓“断裂—安全”的概念也是在断裂力学理论的基础上提出来的。由于一般结构在工艺制造过程中不可避免有缺陷和裂纹，因此如何对待这种缺陷和裂纹就成为设计工作的一个重要课题。在以前，一般采取提高安全系数的办法，但是灾难性的破坏事故依然层出不穷。在断裂力学理论的基础上，就可能探讨，在一定的结构和应力状态下，什么缺陷和裂纹是允许的，如果不允许，应取什么补救方法。这一点即为“断裂—安全”设计思想的基础。

（二）疲劳研究。断裂力学与疲劳的密切关系是很清楚的。在裂纹的长度小于临界尺寸时，在静力的作用下，裂纹是稳定的，并不扩展。但是在交变载荷的作用下，由于裂纹前缘反复的加载和卸载，加工硬化，从而使裂纹有缓慢扩展，一直到裂纹达到临界尺寸，从而引起疲劳破坏。因此，如果从断裂力学的观点来处理疲劳问题，就是要得出裂纹在交变载荷下缓慢扩展的规律。一旦这种规律求得，安全寿命的问题就可以迎刃而解了。从60年代以来，有人陆续在这方面做了不少工作，已取得可观的成绩。当然这尚属开始，还有很多问题有待于进一步的理论和实验工作。

（三）此外在应力腐蚀等方面，断裂力学也有许多应用。

1964年以后，断裂力学愈来愈引起人们的重视，在这方面的研究也继续朝着深度和广度进军。一方面，在线弹性断裂力学的基础上，计算应力强度因子 K_I 及测定断裂韧度 K_{IC} 的技术日益完善起来。弹性力学中行之有效的分析法，复变函数法，有限单元法等方法均在断裂力学中有广泛的应用，而且根据断裂力学的特点，也发展了一套特有的分析方法。另一方面，对塑性变形区的深入研究，最后有助于彻底弄清断裂韧度的本质。有人已经证明，在 $\epsilon \propto \sigma^N$ 的硬化律假设下，在小范围屈服时，塑性变形区内也可以引入一个应力强度因子，它与 K_I

有一一对应的关系。所以，两者的临界状态判据是等效的。当塑性变形区尺寸增大时，情况就不一样了。这是其中的一个研究途径。总之，对这个问题尚有待于深入研究，问题很重要，困难也很多。看来，目前塑性力学还不能完全解决问题，因此可以预料，断裂力学的发展，在一定意义上会推动塑性力学的发展。

断裂力学兴起的历史尚很短，但已显示出了巨大的生命力。概括其原因不外是：（一）它为工程技术实践所迫切需要；（二）它有弹性力学、塑性力学作为其理论的基础。目前，在美国已有相当多的部门在从事这方面的研究。在近几年，英、日、苏等国也很重视这项工作。我国在近几年内，已有不少单位开始注意这个研究领域，并开展了工作。随着我国工业技术的发展，断裂力学这一课题的重要性也会日益显示出来。