

断裂力学简介

周则恭

断裂力学是固体力学中研究带裂纹材料强度的一门新学科。它在生产上有着重要的应用价值，受到航空、造船、交通、原子能、火箭、化工、机械以及军工等各工业部门的普遍重视。近年来，它在国内外都发展很快。

材料在生产和加工过程（例如冶炼、锻造、铸造、焊接、热处理）中，不可避免地会产生这样或那样的缺陷和裂纹。同时在使用过程中，由于氢的渗入、中子的照射、腐蚀作用、疲劳作用都会使材料局部劣化或脆化而产生裂纹。因此，在实际构件中，不论是否被探伤仪器所发现，总是客观地存在着缺陷或裂纹。但是在断裂力学出现之前，人们是以“材料是无缺陷的、连续的、均匀的介质”为前提，来计算构件的承载能力，作为设计产品的依据。可是，由于裂纹的存在和扩展，构件往往在远低于设计的承载能力时，突然断裂（例如，屈服应力为 160 公斤/毫米² 的高强度材料，竟在平均应力不到 70 公斤/毫米² 的压力下破裂）。这种低应力断裂的现象早被人们所发现，但是长期以来不能得到解释及解决。随着钢结构的大型化，高强度材料的使用，新工艺的产生，以及焊接技术的发展，低应力断裂的事故愈来愈严重。据统计，1938—1942 年间，有 40 座焊接铁桥，事前未见任何异常现象，突然折断倒塌；二次世界大战期间，美国近 2000 艘轮船在使用中发生了一千多次脆性破坏事故，其中 238 艘完全报废。五十年代，美国“北极星”导弹机壳由于焊接区存在裂纹而发生爆炸（当时壳体曾经过传统的机械性能的检验，认为全部合格），引起了人们普遍的重视，对低应力脆断问题进行了大量的分析研究。于是，在六十年代中期产生了“断裂力学”这门新学科。

断裂力学首先承认构件或材料内部有裂纹存在，着眼于裂纹尖端局部地区的应力和变形情况来研究带裂纹构件的承载能力和材料抗脆断性能（断裂韧性）与裂纹之间的定量关系。研究裂纹的

发生和扩展的力学规律，从而提出容许裂纹设计方法，来防止脆断。

一般说来裂纹可分为穿透板厚的裂纹、表面裂纹和深埋裂纹。为了研究方便，一般还按裂纹在外力作用下扩展方式分为如图 1 所示的张开型裂纹、滑开型裂纹、撕开型裂纹。由于张开型裂纹较常见也较危险，故近十几年来大量研究了这种类型的裂纹。

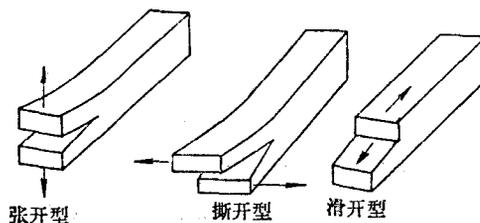


图 1 裂纹在外力作用下三种不同扩展方式

为了叙述简单，我们先讨论中央有长度为 $2a$ 的、穿透厚度的裂纹的板试样（如图 2），在受到均匀拉伸载荷后产生二个现象。（1）是在裂纹尖端张开了一个距离 δ （称裂纹张开位移或简称 COD）。（2）是在裂纹顶端附近有一个半径为 R 的塑性区。区内应力比板件承受的平均应力大得多。应力超过屈服应力而产生塑性变形。裂纹尖端点的局部应力可达到屈服应力的几倍，而随着距裂纹顶端的距离增大，应力下降。在塑性区以外则应力减小到屈服应力以下。因此当载荷继续增加，虽然板件的平均应力不高（低于屈服应力），而裂纹尖端点的应力已超过材料的拉伸强度，裂纹开始快速扩展而造成整个板件的低应力脆性断

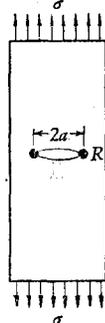


图 2 中心裂纹试样

裂。也有人提出当 COD, 塑性区尺寸 ρ 达到某一定值时导致脆性断裂的看法, 而把临界 COD、临界塑性区尺寸作为脆性断裂的判据。

线性弹性断裂力学以裂纹顶端塑性区比裂纹尺寸小得多为前提, 把整个构件看成弹性体而不考虑塑性区的影响, 就可用线弹性力学的理论来研究有裂纹体的裂纹顶端附近的应力状况。一般地说, 裂纹附近的应力分布形状大都相同, 只要裂纹顶端很尖就可以断言, 外加载荷、裂纹尺寸、结构的几何形状并不能改变裂纹顶点附近各点应力之比(即各点应力分布情况)。可是这些因素决定了各点应力的分布, 它们可以决定这些点的应力按同一比例增大或缩小。这个“放大”和“缩小”应力场强度的比例系数, 被称为应力场强度因子或简称应力强度因子, 用 K 表示。对于张开型、滑开型、撕开型裂纹则分别用 K_I , K_{II} , K_{III} 表示。对图 2 所示的中央裂纹试样 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$, 一般情形下 $K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$, α 是取决于构件形状、载荷状况、裂纹几何尺寸的修正系数。线弹性断裂力学认为, 当 K_I 达到某一临界数值 K_{IC} , 则裂纹快速扩展。 K_{IC} 是表征材料抵抗脆性断裂的固有属性。 K_{IC} 只能通过实验测定, 它称为断裂韧度。对于高强度材料来说, 断裂韧度是评价高强度材料质量的重要指标之一。

由于应力强度因子与构件脆性破坏关系很大, 尤其近年来对其重要性有更深刻的认识, 目前正在不断地进行各种情况下应力强度因子的计算。有些已汇编成手册备用。

由于应力强度因子的表达式建立了材料断裂韧度 K_{IC} 、外加载荷(或断裂应力)以及裂纹尺寸之间的关系, 因此可作为断裂控制设计的理论基础, 同时也带来一些崭新的设计观点。

为了叙述方便, 现仍以中央裂纹板件试样为例。根据断裂力学分析, 板件断裂时承受的平均应力 σ_F 、裂纹长度 $2a$ 以及材料断裂韧度 K_{IC} 三者之间有如下关系:

$$\sigma_F = K_{IC} / \sqrt{\pi a}$$

有了这个关系式, 裂纹就不那么可怕了, 并不是任何裂纹都会导致脆性断裂。通常民用工业中用的中低强度钢的 K_{IC} 很高, 往往为 200—400 公

斤/毫米^{3/2}; 而且工作应力也很低(10—20 公斤/毫米²), 往往临界裂纹长度达几十厘米。因此厚度不大的中小零件, 有裂纹也不会导致脆性破坏。对于高强度材料则不然, 由于断裂韧度低到几十公斤/毫米^{3/2}, 而且工作应力高, 因此几个毫米长的裂纹就有危险了。当裂纹缺陷不超过由工作应力、材料断裂韧度决定的临界裂纹尺寸, 则结构内虽有裂纹也不会有危险。

对于飞机导弹等运载工具, 往往要采用高强度材料以减轻本身重量。开发海洋的深海船和机械、深水潜艇等为了能承受深海中的高压, 也一定要采用高强度材料。按以往的观点设计, 容许应力 = 屈服应力/安全系数。因此材料强度越高, 对于相同的工作应力来说是更安全的。但是从断裂力学观点来看, 应该根据 $\sigma_F = K_{IC} / \sqrt{a}$ 这样的关系, 也就是说发生低应力脆性断裂时的断裂应力与材料断裂韧度以及材料的缺陷或裂纹尺寸有关。因此按照断裂力学的观点来看, 最好采用强度高、韧性好的“强而韧”材料。往往是强度差一点但是韧性好的高强度材料要比强度很高而韧性差的材料更为安全。而以前的观点却误认为强度很高、韧性差的材料好。正是在断裂力学的强度观点影响下, 目前高强度材料的发展方向, 已不再盲目追求强度, 而在研究试制强度好韧性好的材料。

断裂力学在高强度材料的脆性断裂、疲劳裂纹扩展速率、应力腐蚀裂纹扩展速率等课题研究中得到了成功的应用。由于断裂力学的帮助, 使有的材料改变了不合理的工艺加工制度; 有的节省了珍贵的合金; 有的不再单纯追求强度指标, 从而改善了材料的安全性和增加了寿命; 有的甚至可用带裂纹的材料加工部件。断裂力学是高强度结构选材标准、容许裂纹和损伤设计、评价探伤裂纹标准的基础理论。它是研究大型焊接件、大型铸锻件的强度与评价缺陷的基础理论。

由于断裂力学一开始就与生产实际密切联系, 故发展迅速, 在国内已受到许多有关单位的重视。不少单位已取得可喜的成绩。在毛主席革命路线指引下, 断裂力学的研究工作一定会得到蓬勃的发展, 为社会主义建设作出更大贡献。