

断裂韧性

英国钢铁学会

科学出版社

断 裂 韧 性

英国钢铁学会编

余荣镇译

科 学 出 版 社

1 9 7 4

内 容 简 介

本书系统而简要地叙述了断裂韧性的基本原理、数学基础、实验技术和分析方法,讨论了在金属结构材料中冶金学因素和断裂韧性的关系,介绍了断裂韧性在非金属和合成材料中的应用,并且阐明了应用断裂韧性评价材料、估计材料寿命、制定安全标准的方法和根据。

本书可作为从事材料研究和生产的科技人员的入门读物及高等学校有关专业的参考书籍;也可供材料使用和设计部门的工程技术人员参考。

FRACTURE TOUGHNESS

The Iron and Steel Institute, London

1968

断 裂 韧 性

英国钢铁学会编

余 荣 镇 译

*

科学出版社出版

北京朝内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1974年3月第一版 开本:787×1092 1/32

1974年3月第一次印刷 印张 4

印数 0001—9,700 字数 86,000

统一书号 13031·186

本社书号·320·13-2

定价: 0.43 元

译 者 序

断裂韧性是近十多年来金属物理研究方面的一个重要课题。它的产生,在很大的程度上牵涉到尖端领域中发生的一系列工程技术事故。这些事故的发生,引起了一些国家的材料部门和材料使用部门对于高强度金属材料(屈服强度在150公斤/毫米²以上)在尖端技术领域中的应用的严重注意和高度关心。

1958年美国成立了以ASTM为中心的“高强度材料脆性破坏特别委员会”,嗣后日本和欧洲一些国家亦相继成立了相应的对策研究机构,对传统的金属性能指标进行了全面的检查,并发行了关于断裂力学的国际杂志以交流研究成果。

韧性的全新概念,就是上述过程中的重要产物。它的基础,主要是Griffith微裂缝理论直接应用于金属等延性材料的Irwin-Orowan修正理论。

1920年,Griffith指出了裂缝传播的发生是由于材料中弹性贮能的降低;1948年Irwin指出,Griffith型能量必须在贮存于材料中的应变能量和对范性形变做功的表面能量之间平衡;1955年Orowan则证明,修正脆性断裂的Griffith条件具有非常重要的意义。他发现钢材的脆性断口上,存在着—薄的范性形变区,这个形变区的形成,占去了表面能量 S 的大部分。1964年横堀证明:当外力达到 $G_c = 2S$ 时,裂缝尖端的应力集中就达到分子结合力的程度,在此应力以上材料势必断裂。

其实,关于断裂的现代观念,只是古老的合金理论的一个

重要发展。正如本书第一章所指出的，“从石器时代到铁器时代的进程，主要表现在对断裂韧性的理解和应用上的进步”。我国在公元前五世纪就熟练地掌握了生铁冶炼技术，而且早在公元前三百多年，我国学者即已意识到材料结构的不连续性是强度降低的重要原因[如《墨经》“均之绝不，说在所均”以及《列子》“发引千钧，势至等也”等，都说明材料如果均匀而无缺陷(均)，材料各部就都能均匀承受着力(势至等)，那时，即使细如发丝，亦能吊引千钧(发引千钧)]。近时，如三十年代，我国就有一些研究者进行过“氢脆”的研究；解放后，由于党对科学技术的高度重视，在钢的氢脆和夹杂物对材料强度影响的研究中都取得了很大成绩。近几年来，全国对于断裂韧性的研究，亦渐普遍开展。遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的指示，我们翻译了这本小书，作为对于断裂韧性的初步介绍。

本书是一本讲演集，它简要而精确地阐明了断裂韧性的内容、方法和意义，提供了本课题的一个入门。许多著作，如ASTM STP 410, 432, 463等，及本书各章所附参考文献可以进一步充实它的内容。

前 言

本书是由七篇讲演稿编辑而成，其内容曾引起广泛的兴趣。这一系列的讲演是于1968年3月在Sheffield大学冶金系举行关于断裂韧性的两天讲习会上提出来的。这次讲习会有两个目的：一个是简单地介绍断裂韧性这一课题，概括地描述本课题一些突出的特点；另一个是为即将召开的讨论新的工作的两日会议提供先导。由于讲习会与会议紧密衔接，因而在会议记录中未刊载评论性的文章。

本书的内容仅限于研究高强度材料，在这种材料中发生断裂时的负荷低于产生普通屈服所需的负荷。凡读者希望对本课题作一全面的概括的了解，而不要求象写作全面论述评论性论文那样所需的广度和深度，则本书即可作为初步读物。本书各章悉照讲演发表的次序排列，此一排列也最适宜。

第一章概述本课题的起源与范围，涉及科学家对断裂问题初步的研究，以及工程师们的试验要求，通过试验能够比较可靠地证明所选取的材料在应用时有足够的韧性。

二、三两章主要是从理论方面探索本课题。初看起来，探索的水平似觉过度深奥。但若没有此重要的基础，对本课题就不能有进一步完全的理解，对于此点编者感触尤深。参与讲习会的人均支持这一见解，即在数学方面的探索应不厌其详，要在这方面再作进一步的简化或省略，而又不使读者发生误解，确非易事。

第四章论及各种试验技术，对一些能用以提供可靠估计的方法予以评价。第五章进一步考虑各种重要试验的变量以

及冶金学结构与断裂韧性参数之间的关系。在这方面相互的影响往往是极其复杂的，但提供的资料可以迅速用以找出一些主要的特征。

第六章论及各种非金属材料 and 合成材料的韧性概念，将本课题引入更广阔的领域。

第七章讨论应用断裂力学所收到的效益。虽然详尽的理论阐述尚有困难，而常常不得不提出一些近似值，但以断裂力学的研究方法来估计韧性，在材料的发展及其使用方面，确已取得一定的成就。就理想而论，实验室的试验应该揭示在特定应用中最合适的各种材料。编者希望本书在对韧性的实际估计方面，对目前一些具有研究价值的概念的进一步揭示有所助益。

目 录

译者序	i
前言	iii
第一章 断裂韧性的概念	1
第二章 应力分析: 弹性理论	15
第三章 应力分析: 断裂力学	36
第四章 试验技术	58
第五章 冶金学的变量与试验的变量	77
第六章 非金属和合成材料	96
第七章 断裂力学的应用	103

第一章 断裂韧性的概念

固体的极限力学性质

高强度材料的应用范围现正要求日益扩大,与此同时,在很多情况下,也要求保证所用材料不致发生突然的或灾难性的破坏。二者之间的相互让步使彼此都能得到满足,往往是难于实现的,因为在某种程度上,彼此是直接冲突的。

仅就强度而言,有许多材料都达到了高的水平,诸如:石墨、氧化铝、新拉出来的玻璃纤维细丝或晶须型的高熔点金属等,稍次的还有经过强烈加工或热处理的合金块等。这些成就已能探索并能近似地证实材料的极限强度 σ_i 的理论估计,由下述近似公式给出

$$\sigma_i \sim (E\gamma/b)^{1/2}, \quad (1)$$

式中, E 是杨氏模量, γ 是表面能, b 是原子间距。对于熔点在1000和2000°C之间的金属,其典型值是 $E \sim 2 \times 10^{12}$ 达因/厘米²(~ 13000 吨/吋²), $\gamma \sim 2 \times 10^3$ 尔格/厘米², $b \sim 2 \times 10^{-8}$ 厘米,所以从方程(1)得到 $\sigma_i \sim 4 \times 10^{11}$ 达因/厘米²或 $\sim \frac{E}{5}$ (~ 2700 吨/吋²)。达到这样一个值,就会产生 ~ 0.2 的弹性应变。实现这样的强度,必须包括高应变能量的积累,实体弹性畸变的调整,以及为避免弹性不稳定性的精细工程设计等。而且,对强度的绝对极限的这种接近还有更大的困难,因为最强的整块材料在各种应力下,是否发生强烈的断裂,对其表面状态极其敏感。

裂缝的重要性

现在一般都认为,材料较低的强度(与可能的极限强度相比)是由于以下的情况引起的:即裂缝的存在,或者原子形变过程中的成核作用,或者组织的不均匀性等。裂缝会在其尖端的局部地区引起高度的应力集中,材料完全断裂极大的可能是由于裂缝的传播。

裂缝的应力集中效应的分析,给应用数学家提供了无限广阔的领域,在这个领域内的研究正方兴未艾。但是,通晓应力集中,只是通向理解强度以及保证避免实际材料发生破裂

的部分工作,单独研究应力集中的某些不足之处,即使从图 1-1 所示的简单情形也能看得出来。图 1-1 表示在一个均匀的弹性材料中,有一个长度为 $2c$, 尖端半径为 ρ 的狭小裂缝。已经证实,在附加应力 σ 的作用下,裂缝尖端的应力集中 σ_m 由下式给出:

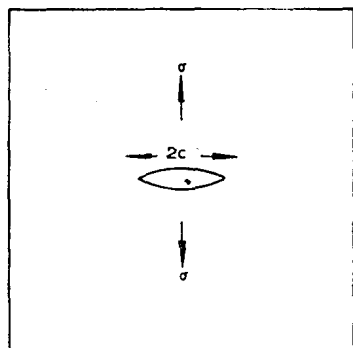


图 1-1 一个垂直于应力 σ , 长度为 $2c$ 的裂缝。在裂缝尖端的应力集中为 σ_m , 尖端半径为 ρ

$$\sigma_m \sim 2\sigma(c/\rho)^{1/2}. \quad (2)$$

将方程 (2) 应用到特殊情况的时候,问题就会立即出现。因为在真实结晶固体中的裂缝必然具有一个形状,而此又必须与原子的排列一并考虑, Elliott 曾提出一个可取的裂缝形状(见图 1-2)。但是,按照方程 (2),当裂缝尖端变成无限地尖锐,即 $\rho \rightarrow 0$ 时,材料的强度就小到可以忽略的程度。这样,问题就直接提出来了:一个具有锐裂缝的材料,有没有有限的强度呢?为了得到一个满意

的答案,我们必须进一步弄清:断裂的必要而充分的条件,是应力水平作为判据呢?还是另有别的更恰当的判据。只要物理过程发生起介面连续分离的机构时,能量的因素对于断裂过程就可能具有特别重要的意义,此点随后将予说明。

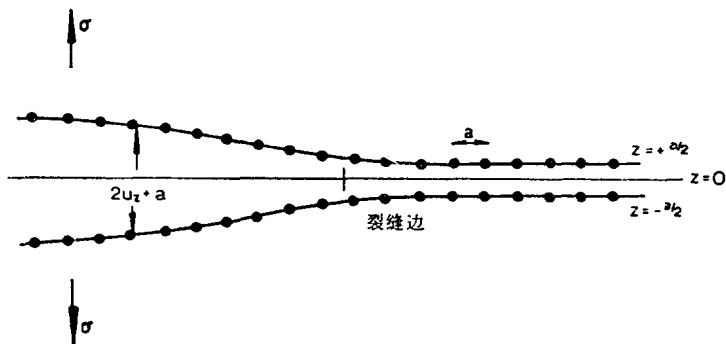


图1-2 在一个劈状裂缝的任意一边上,计算原子平面位移的图解。应力 σ 作用在 x 方向,垂直于裂缝的中心面,在 σ 方向,原子从正常的间距 a 移动了一个距离 u_z (据 H. A. Elliott: Proc. Phys. Soc., 1947, 59, 208.)

能量的因素

Griffith 首先认识到,为了提供产生新表面所需的能量,需要作功。这项需要直接有助于回答前面的问题。只有当一个力移动了一定的距离时才能作功,因此,不管材料内部的裂缝是多少,或者是多么尖锐,只要材料本身不具备内部产生的应力时,它只有在一个有限的外部附加应力作用下才会发生断裂。著名的 Griffith 方程,是由考察在弹性介质中的一个椭圆形裂缝推导出来的。裂缝扩张的判据是:分开表面所需的能量刚好小于裂缝传播时降低的弹性能量。因此,断裂应力 σ 由下式给出:

$$\sigma \sim (\gamma E/c)^{1/2}. \quad (3)$$

在这个公式中,不出现裂缝尖端的根半径,而裂缝长度($2c$)却作为重要的参数出现.比较方程(3)和(1)时可以发现,对于象原子大小的一个裂缝长度(即 $c \sim b$),强度就接近于极限值 ($\sigma \rightarrow \sigma_i$). 进一步考察方程(3)和(2)之间的相互关系,对探究它们的相容性是有益的. 为了描述在断裂点的条件,把方程(3)中的 σ 代入到方程(2),我们得到

$$\begin{aligned}\sigma_m &\sim 2 \left(\frac{\gamma E}{c} \right)^{1/2} \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \\ &\sim 2 \left(\frac{\gamma E}{\rho} \right)^{1/2}.\end{aligned}$$

注意到当裂缝传播发生在 $\sigma_m \sim \sigma_i$ 时,则由方程(1)可以导出断裂点的条件如下述形式:

$$2 \left(\frac{\gamma E}{\rho} \right)^{1/2} \sim \left(\frac{\gamma E}{b} \right)^{1/2},$$

由此可以推导出

$$\rho \approx 4b.$$

这种关系说明,当裂缝有着小于原子间距四倍左右的尖端根半径时,从能量因素来考虑断裂的 Griffith 判据与任何裂缝的有效锐度无关. 因此,从图 1-2 所示形状的裂缝(它具有非常小的,但不是明显确定的尖端根半径),用 Griffith 首先建立起来的研究方法仍可进行分析.

Griffith 的研究方法主要是针对脆性材料而言,而且,可以说明,对于无需特别说明几何形状的内裂缝和表面裂缝,在平面应变和平面应力的条件下,除了数字系数上的微小差别外,可导出同一形式的方程式,并且,这一方程所示的结果已广泛地为实验证实. 把 Griffith 理论推广到不完全脆性材料是我们现在估计断裂韧性性质的基础.

延性的作用

到目前为止考虑的附加应力的作用只在两个方面：要么仅仅使固体弹性变形，要么使固体变形到原子键遭受破坏的程度。最易变形而且用途甚广的结构材料——金属及其合金——在附加应力作用下，显示出多种多样的行为。最主要的特征是它们具有范性流变的能力。

与范性形变有关的许多变量，对估计断裂韧性的复杂性起着主要作用。一般说来，延性对防止破坏显然是最好的保护，但是，问题是如何作到既要有足够的延性而又具备适当的强度。当固体的原子能够具有粘滞的性能，几乎能象液体那样可以相互流通时，就表现出最高的延性。对于某些很软的材料或接近其熔点的材料，这样的行为不是稀奇的，但这种行为是某些材料在低强度状态时所特有的。高强度的材料则不具有这种行为。

从现实的需要来说，我们必须确定延性容许小到什么程度，与此同时，仍要求具有适当的缺口钝度，并在裂缝传播过程中可以引起能量的高度消耗。

在发展范性对断裂影响的定量处理方面，必须考虑到裂缝传播时使材料局部区域发生形变所作的功。在这个过程中，如果没有供给足够的外部能量，则裂缝的传播将被抑止。这时发生的裂缝和瑕是可以容许的，因为裂缝和瑕对于材料的行为已不发生任何影响。

Irwin 和 Orowan 各自独立地得出如下结论：即范性形变所作的功，可以代入裂缝传播的公式中。他们的结果可简单地写成如下的形式：

$$\sigma \sim [(\gamma + \gamma_p)E/c]^{1/2}. \quad (4)$$

在这个方程中，裂缝扩张每单位面积在范性形变中所作

的功 γ_p ，能够大大地超过(有时大到 $\sim 10^3$ 倍)分开表面单位面积的真实表面能 γ 。这一范性形变所需要的功，对裂缝传播是一个极大的障碍，对金属和合金抵抗断裂起了很大的作用。随着材料的不同 γ_p 也显著地不同，即令温度微微升高， γ_p 也能迅速增加。

但是，不加分析地使用方程(4)，可能导致不可靠的结果。当它同完全脆性材料的 Griffith 方程类比走得太远的时候，尤其是如此。显然，对于裂缝较短的材料(即 c 小的裂缝)，在此材料上传播裂缝，必须作大量的范性功(即 γ_p 大的材料)。这时方程(4)可能导致断裂应力 σ 超过本章前面所确定的材料的极限强度，这样的结果可以断定是错误的。因此，只有当裂缝传播的附加应力同材料的极限强度比较起来是很小，并且范性形变被局限在裂缝前头的一个狭窄的区域的时候，Irwin-Orowan 对 Griffith 理论的修正才能得到严格的证明。

裂缝尖端的位移

分离内表面所包含的范性功，可以从多种方式进行考虑。一种最有效的方式是把它与裂缝尖端的应力集中联系起来。当裂缝正处在扩张点时，能量平衡的要求可以写成

$$\gamma + \gamma_p = \sigma_m u, \quad (5)$$

式中 u 称为临界断裂位移。这是位于裂缝前缘材料每个单元中所产生的位移。由此可以推知，在裂缝传播以前，需要高断裂位移的材料本身是坚韧的。对于脆性固体，当其分开表面所作的范性功之大小相当于真实表面能量时，这样的固体材料是具有高度缺口敏感性的，其断裂位移同原子间距才是比较接近的。这一情况就使人认为形变过程发生在缺口根部。一个有用的概念是把局限于裂缝根部附近的材料当作一个微小的拉伸试样来予以考虑。在适当的应力作用下，这部分在

拉伸状态中的材料所具有的延性是非常重要的。如果延性大,例如 30%,则裂缝的传播就需要相当大的能量,材料也不会因为小的缺口而过度减弱其强度。

这种情形在长期的实际应用中即已发现。例如,将硬钢去碳,则其表面就变得较软,易延性亦因之较大。同时由于“增加,材料的缺口敏感性也降低。对于某些非金属材料,可采用另一种方法来处理,即将其外层予以压缩,因而不受外来的损害。

脆性的实验判据

脆性试验是古老的冶金学科目之一。当一个极大的应力突然施加的时候,金属的多方面的性能及其在使用上的巨大范围,确实与其所表现的容忍行为一直是密切相关的。有人甚至说,从石器时代到铁器时代的进程,主要表现在对断裂韧性的理解和应用上的进步。

通常使用的实验方法是用有缺口的试样作冲击试验。这样的试验至今仍保持许多优点。首先是操作简单,在广阔的温度和加荷速率范围内可以随便应用。其次,试样容易制造,而且在使给定的几何形状和大小的材料在发生形变或断裂中所作的功,可以得到一个定量的总的估计。尽管如此,由于对真实数据的需要,以及对增大强度的材料要求有严格的鉴定,用简单方式来完成上述这种试验的局限性,就变得日趋明显了。

举例来说:在冲击弯曲试验中用开裂具有给定几何形状的缺口试样来测量能量吸收,这一方法是比较方便的。同时,还可以推出能量的任意水平,在这个水平以上,材料使用起来可以取得满意的效果。为此,这样的实验方法常被采用。但近几年来发现了这种方法有潜在的危险。因为如果一种增大

拉伸强度的材料同较低强度的材料一样，视为具有相同的能量吸收值，那么，拉伸强度大的材料在使用上就更容易断裂。因为这种材料的延性在断裂前可能大大地降低。由于对这种情况缺乏充分的了解，曾经引起了许多灾难性的事故。

进一步主要考虑的是关于试样大小的问题。现已认识到，小尺寸试样的试验表现出来的断裂强度相对说来可能较高，反之，较大的体积在应力很低的情况下亦可能破裂，象图 1-3 中合金钢中所表明的那样。由于要求结构构件日渐增大，体积这一因素的重要性就日趋明显。

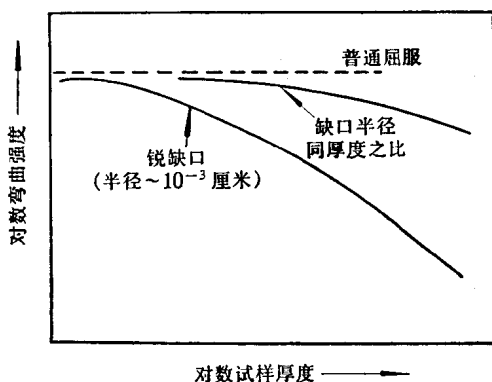


图 1-3 增加试样厚度引起的效应降低了弯曲强度。这种降低对锐缺口最为明显(据 G. D. Lubahn 和 S. Yukawa: ASTM Proc., 1958, 58, 661.)

上述试验方式的一个明显缺点在于缺少用各种方法进行恰当的理论处理。前面几节已概述了系统地建立断裂的定量理论。这一理论系根据能量的因素和发生在裂缝尖端附近的形变过程而得出的。线性弹性理论对裂缝周围的复杂情况的重要应用以及用计算机处理各种困难方程的能力，已为获得许多更加满意的研究手段和新的试验方法开辟了途径。

断裂韧性的概念

当增加强度时,就有降低韧性的倾向。因此,改进强度与韧性这两种性质的定量估计已成为迫切的需要。这一需要在材料的满意应用方面使我们对一些重要因素的理解有了新的启示。一个最有意义的特点就是考虑无瑕的材料已经没有多大的意义了。因为即使首先保证制造无瑕材料是可能的,而要保证材料的表面不受到任何损伤,也还几乎是不可能的。

现在的研究方法,在过去几年里日益为研究工作者所确认。依照这一方法,所有的材料都假定包含有某种大小的瑕。因此,断裂韧性的真实估计恒视具有各种大小的瑕的材料之断裂行为而定。大于某种尺寸的瑕大抵可由检测技术探测出来。所以对于韧性的估计也能密切地与实际相联系。

断裂韧性估计的理论发展

现在,确定断裂理论和具有裂缝和瑕的材料的性状的关系达到何种程度是适当的。对于一个锐缺口来说,可以从方程(4)直接推断出下述关于断裂的一个简单判据:即对于任何给定的材料, $(\sigma^2 c)$ 应当超过一个特定的值。这里 c 是有效裂缝长度或瑕的临界大小的测量值, σ 是裂缝传播时产生的附加应力。只要 c 小于某个已知值时,就对安全应力有了某种保证。参数 $(\sigma^2 c)$ 非常重要,当它的值大时,断裂韧性就有可靠的保证。这个参数的平方根有时称为应力强度因子,用 K 表示。当 K 的值超过材料的典型极限时,裂缝就变成不稳定,这个临界应力强度因子就用 K_c 表示。

对另一个与方程(4)非常近似的参数,也已规定了新术语。这个参数用 G 表示,它指每单位长度裂缝上的裂缝扩张力。在不稳定点时,它的值用 G_c 表示。这个值类似于方程