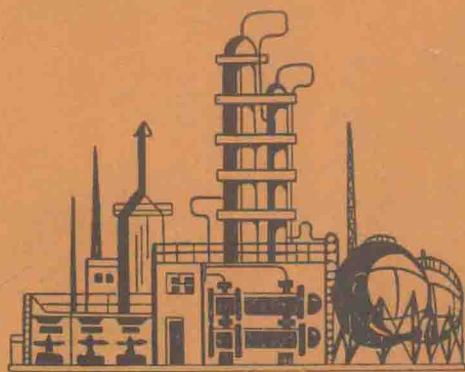


低温用钢结构的脆性断裂

——译文汇编之二——



兰州石油机械研究所

毛 主 席 语 录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

……一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

前 言

在伟大领袖毛主席“备战、备荒、为人民”的战略方针指引下，近年来，以“三大合成”（合成塑料、合成纤维、合成橡胶）为主体的石油化学工业、纯氧顶吹转炉炼钢工业和气体深冷分离工业，在我国得到了迅速发展，从而促进了普低钢在这些低温工程领域中的应用。

大量工程证实，低温下，铁素体钢制压力容器或其他结构，由于种种原因，可能突然发生脆性断裂。因此，对于在工程实践中，如何防止此类问题的产生，国外给予了很大注意。目前，我国有关研究、设计、制造和使用等部门也予以极大关注。

为了促进我国自己的普低钢和低温压力容器制造工艺的发展，继一九七二年六月“低温用钢结构的脆性断裂（译文汇编之一）”出版之后，我们又组织有关单位选译编印了本文集（译文汇编之二），供从事此专业的同志们参考。

参加本文集译校工作的有：哈尔滨锅炉厂、华东石油学院、天津大学、大连工学院、甘肃工业大学、兰州石油机械研究所等单位。

由于水平所限，错误与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

一九七四年十月·兰州

总 目 录

1. 断裂韧性	(1)
2. 钢结构的脆性断裂	(73)
3. 1 吋动态撕裂试验标准方法	(159)
4. 标准与防破措施	
(1) 特殊韧性要求	(171)
(2) 压力容器用钢板却贝 V 形缺口试验要求 (ASTM 标准 A 593—69)	(175)
(3) 却贝冲击试验	(180)
(4) 低温压力容器用碳素钢钢板 (JIS G 3126—1972) ...	(185)
(5) 低 温 操 作	(190)
(6) 防止压力容器破坏的措施	(191)

目 录

绪 言	(1)
第 一 章 断裂韧性的概念.....	(2)
第 二 章 应力分析: 弹性理论.....	(10)
第 三 章 应力分析: 断裂力学.....	(23)
第 四 章 试验技术.....	(37)
第 五 章 冶金的和试验的变量.....	(48)
第 六 章 非金属材料及复合材料.....	(60)
第 七 章 断裂力学的应用.....	(64)

目 录

提 要	(159)
课题现状	(159)
引 言	(159)
一、范 围	(160)
二、方法概要	(160)
三、试验的意义	(161)
四、注意事项	(161)
4.1 标准试样	(161)
4.2 断裂中止	(161)
五、定 义	(163)
5.1 动态撕裂能量	(163)
六、设 备	(163)
6.1 一般要求	(163)
6.2 单摆锤试验机	(163)
6.3 砧块和锤头	(163)
6.4 摆锤和砧块结构	(164)
6.5 摆锤的下落高度和大小	(164)
七、试 样	(164)
7.1 试样尺寸	(164)
7.2 起裂焊缝长度	(165)
7.3 起裂焊缝EB焊接程序	(165)
7.4 焊缝金属DT试样的制备	(166)
7.5 DT试样的标识	(167)
7.6 取向	(167)
7.7 与其他试样的关系	(167)
7.8 试样切取	(168)
八、试验程序	(168)
8.1 总则	(168)
8.2 试样温度的测定	(168)
8.3 试样试验和砧座找正	(168)
8.4 找正工具	(169)

九、报 告	(169)
9.1 内 容	(169)
十、材料鉴定试验	(170)
10.1 DT试验的使用	(170)
10.2 单一温度试验	(170)
参考文献	(170)

绪 言

本书是由于对1968年3月谢菲尔德 (Sheffield)大学冶金系举办的断裂韧性两天讲习班上七篇讲演的内容感到广泛兴趣而编写的。该讲习班具有双重目的：介绍断裂韧性的显著特征；并作为提出和讨论新工作的两天会议的序幕。这样把讲习班和会议紧密地结合起来，可以避免在会议记录中刊登概述性文章的必要。

本书内容限于研究高强度材料在低于其普通屈服载荷时所产生的断裂。本书可供希望对断裂韧性有一个总体而又不是冗长细致（这对于完整的审定性评论来说是必须的）的了解的人们作初步读物。书中各章排列顺序和讲演顺序相同，我们认为这是最适当的顺序。

第一章 概述了这一学科领域的起源和范围，把科学家们研究断裂的方法，与工程师们为了保证其所选用的材料在使用时无容置疑地具有适足韧性的试验要求联系起来。

第二、三章 主要从理论观点讨论问题。初看起来其方法过分高深，但是我们强烈地感到，如果没有这些重要的理论基础就不可能对问题有良好的理解。参加讲习班的人都支持这种看法，即这些数学方法值得很好地仔细钻研，想把它们进一步的简化或删略而又不使读者感到混乱或迷或不解，看来是困难的。

第四章 与实验技术有关，它评论了许多可以用来提供可靠评定的方法。**第五章**则进一步考虑了主要的试验变量以及冶金组织和断裂韧性参数之间的关系。这种相互关系往往是复杂的，但这方面的资料正迅速地用来指明某些主要特征。

第六章 课题涉及到较广的范围，它讨论了非金属和复合材料的韧性概念。

第七章 讨论了应用断裂力学获得的好处。虽然详细的理论比较繁难而经常采用近似法，但是，评定韧性的断裂力学研究，对材料的发展和应用是有一定的推动作用的。理想地说来，实验室的试验应该为特定应用提供最合适的材料。我们希望本书将提供一些途径，能指明那些在现实地评定韧性时表现出有指望的概念。

第一章 断裂韧性的概念

固体的极限机械性能

人们总是不断要求扩大高强度材料的使用范围；但在很多情况下，也同样要求确保避免突然的或灾难性的破坏。由于这两个要求在一定程度上是互相矛盾的，所以在它们之间求得折衷往往是十分困难的。

仅就强度来说，许多材料已经达到了高强度的水平，特别是石墨、氧化铝、新拉制出来的玻璃纤维，高熔点金属制成的细丝或须，以及经过压缩加工或热处理后的大块合金其强度也多少有所提高等。这些成就已接近并大致能证明由下列近似式给出的有关材料极限强度 σ_t 的理论值是正确的。

(1)

$$\sigma_t \approx (E\gamma/b)^{1/2}$$

式中 E 是杨氏模数， γ 是表面能， b 是原子间距。对熔点在1000和2000°C之间的金属而言，其典型值为 $E \approx 2 \times 10^{12}$ 达因/厘米² (≈ 13000 吨/吋²)， $\gamma \approx 2 \times 10^3$ 尔格/厘米²， $b \approx 2 \times 10^8$ 厘米，

因此从(1)式求得 $\sigma_t \approx 4 \times 10^{11}$ 达因/厘米²或 $\approx \frac{E}{5}$ (~ 2700 吨/吋²)。为了达到这样的

数值，要求弹性应变为0.2。利用这样的强度就意味着大量应变能的储备，弹性畸变的调节以及为了避免弹性失稳要进行谨慎的工程设计。此外，这种趋近于强度绝对极限的做法将引起进一步的困难，因为最坚固的单块材料在对其表面状态特别敏感的应力水平下将产生剧烈的断裂。

裂纹的重要性

当前几乎毫无疑问地认为：某些材料的强度之所以相当的低（与潜在的极限强度相比），是由于裂纹的存在，或者由于能够形成裂纹源的原子畸变过程存在，或者是其组成不均匀。裂纹能在其尖端的局部区域上引起高度的应力集中，而材料完全断裂的可能性则取决于裂纹的扩展。

裂纹应力集中效应的分析，为应用数学提供了广阔的天地，在这一领域中正在持续不断地研究。但是，应力集中的知识只是了解强度并保证实际材料免遭破坏的途径之一。即使在如图1所示的均匀弹性材料上存在有长度为 $2c$ 尖端半径为 ρ 的窄裂纹的简单情况中，也可以看出这种方法某些不足之处。已经确定，在应力 σ 作用下，裂纹尖端的应力集中 σ_m 由下式决定：

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

在具体应用(2)式时，问题马上就会出现。实际结晶固体中的裂纹，必须具有如图2所示的，由埃利奥特(Elliott)推导出的形式，它考虑到原子排列，似乎是合理的裂纹形式。但是根据(2)式，当裂纹尖端度为无限尖，即 $\rho=0$ 时，材料强度将微不足道。问

题马上就会提出：具有尖锐裂纹的材料，能具有一定的强度吗？为了得到满意的答案，我们必须进一步研究应力水平的判据是否为断裂的充分必要条件，抑或还有其他更合适的判据。将要表明，若物理过程能引起连续介面分离的机理，那末对断裂过程来说能量的考虑是很重要的。

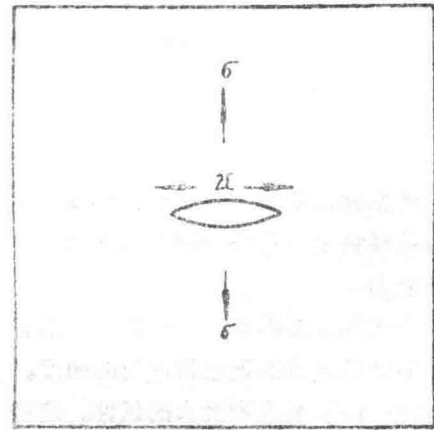


图1 一个垂直于应力 σ 的长度为 $2c$ 的裂纹。裂纹尖端的应力集中是 σ_m ，尖端半径是 ρ 。

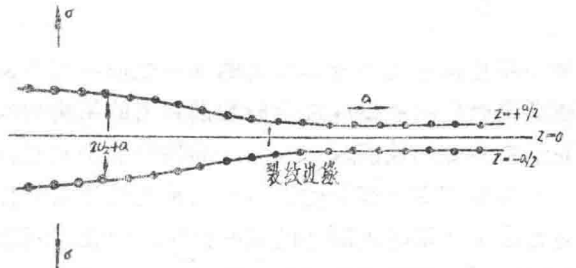


图2 说明在硬币形裂纹两边的原子平面的计算位移。应力 σ 作用在垂直于裂纹中心面的 Z 方向上，而正常相距为 a 的原子在 σ 方向上移动了一个距离 u_z 。

能 量 的 考 虑

格里菲思(Griffith)最先认识到：必须做功以提供产生新表面所需要的能量。这一要帐直接有助于回答我们前面的问题。仅在作用力经过一个有限距离运动时才能做功，那末，不论材料内部有怎样多和怎样尖的裂纹，只要没有内在生成的应力，材料将只在一定的外加应力下断裂。著名的格里菲思方程是研究弹性介质中的椭圆形裂纹推导出的。它的推论是分离界面所需能量，正好低于裂纹扩展时减少的弹性能量。于是，断裂应力 σ 用下式表示：

$$\sigma \approx (\gamma E / c)^{1/2} \tag{3}$$

在该式中未出现裂纹尖端根部的半径，而裂纹长度($2c$)则作为主要参数出现。对比(3)式和(1)式可以看出，对于原子大小的裂纹长度(即 $c \approx b$)，强度趋近其极限值($\sigma \rightarrow \sigma_z$)。进一步研究(3)式和(2)式之间的关系，并探索他们的一致性是有意义的。为了表示断裂时的条件，将(3)式中的 σ 代入(2)式中即得：

$$\sigma_m \approx 2 \left(\frac{\gamma E}{c} \right)^{1/2} \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \approx 2 \left(\frac{\gamma E}{\rho} \right)^{1/2}$$

考虑到 $\sigma_m = \sigma_z$ 时裂纹发生扩展，这种条件可由(1)式以下列形式表示出来：

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

由此可以导出：

$$\rho \approx 4b$$

这一关系说明了根据能量考虑断裂的格里菲思准则，与任何尖端根部半径小于四倍左右原

子间距的裂纹有效锐度无关。这样，如图(2)所示，尖端根部半径非常小而且轮廓不确切的裂纹，仍然服从于格里菲思首创的方法进行分析。

格里菲思的方法主要是针对脆性材料的。并且它表明在平面应变和平面应力条件下，无论其内部或表面裂纹的几何形状如何，均能推导出只是数字系数略有差异的同一形式的方程来。并且，它的论断已为实验所充分证实。把格里菲思理论推广到非完全脆性材料就构成我们评定断裂韧性性能的基础。

延 性 的 作 用

至今所考虑的外加应力的唯一效应，要么使固体仅产生弹性变形，要么使固体变形到原子键折断的程度。最全能和最有用的结构材料、金属及其合金，在外加应力的作用下将显示其多变的性能。而它出众的特征在于其塑性流动的能力。

与塑性变形有关的许多变量是造成评定断裂韧性复杂化的主要因素。一般地说，很容易看出延性是防止破坏的最好保障。但是，问题仍在于要兼顾适当的延性和适当的强度。当固体中的原子能几乎象流体那地作粘滞性的相互流动时，便能观察到最大的延性。这种性能对很软的材料或在熔点附近的材料来说是不足为奇的。但是这种性能是低强度状态下材料的象征。

对于最现实的要求来说，我们需要确定的是可以允许延性小到什么程度，而仍然能给出一个适当的缺口锐度并在裂纹扩展过程中产生高度的能量散逸。

在进一步定量地处理塑性对断裂的影响同时，必须考虑裂纹扩展使材料局部变形所作的功。如果没有足够的外加能量供给这一过程，那么裂纹的扩展将被制止，并且裂纹和缺陷可以容许存在，因为这时它们对材料的性能没有什么危害。

欧文 (Irwin) 和奥罗万 (Orowan) 各自独立地分析了塑性变形功可以归并到裂纹扩展公式中去的方法。他们的结果可以简单地写成下例形式：

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

在此式中，裂纹扩展的单位面积上塑性变形功 γ_p ，可能大大超过被分离面的单位面积上的实际表面能 γ (有时大到1000倍之多)。这种塑性变形所需的功是裂纹扩展的一大障碍，并且在金属和合金抵抗断裂时起了重要的作用。 γ_p 随材料的不同有很大的变化，并且将随着温度的少量升高而迅速地增加。

但是，不加区别的使用(4)式将导致不可靠的判断，特别是把它与用于完全脆性材料的格里菲思方程等同起来就太过分了。显然，材料中的裂纹较短，即 c 值较小时，裂纹的扩展必须消耗大量的塑性功(即需大的 γ_p)，那么，(4)式求得的断裂应力 σ 将超过本章前面所规定的材料极限强度。这样的判断是错误的，因为只有当使裂纹扩展的外加应力小于材料的极限强度，并且塑性变形被局限在裂纹前方的狭窄区域内时，欧文-奥罗万对格里菲思理论的修正才是严格地正确的。

在 裂 纹 尖 端 的 位 移

分离界面的塑性功可由很多途径来考虑，其中最有效的是把它和裂纹尖端处的应力集

中联系起来。当裂纹刚要扩展时，能量的平衡条件为

$$\gamma + \gamma p = \sigma_m u \quad (5)$$

式中 u 称为临界断裂位移。这是在裂纹前端每一单元材料上产生的位移。这就是说，在裂纹扩展前需要大的断裂位移的材料，其本质是韧性的。对脆性固体来说，其分离表面的塑性功只与实际表面能差不多，材料对缺口有高度的敏感性，而断裂位移则与原子间距差不多。这就导致对缺口根部变形过程的研究。将裂纹根部附近的局部材料看成一个微小的拉伸试样是一个有用的概念。该处材料在相应的拉伸应力水平下的延性是相当重要的。如果延性大，例如是30%，那么裂纹扩展就需要相当大的能量而材料不会被小缺口弄得过度的脆弱。

这方面早已有了实际应用，例如，将硬钢脱炭使其表面柔软延性更大，而由于 u 值增加，材料对缺口的敏感性也就减低了。对某些非金属材料则需要另外的解决办法，包括进行某些处理，使表面层受压缩而不易损坏。

脆 性 的 试 验 准 则

脆性试验是最古老的冶金学活动之一。的确，金属的高度全能性及其巨大的应用范围，是和它们承受突然过程的应力载荷时的忍耐能力密切相关的。甚至有人认为由石器时代到铁器时代的发展，主要在于对断裂韧性的认识和应用方面的进步。

最常用的试验方法包括缺口试样的冲击试验。这种试验仍有很多优越性。它们操作简单，便于在广泛的温度和加载速度范围内应用，试验容易制备，并且对给定几何形状和尺寸的材料在变形和断裂时所作的功容易得到全面的定量估计。但是，随着对更接近真实情况的数据的要求已经出现，以及提高了强度的材料，也要求更精确的评定方法。因此，以简单方式进行的这种试验的局限性也就越来越明显了。

举一些例子：可以很方便地测出具有给定缺口形状的试样在冲击弯曲试验中折断时所吸收的能量，并推导出一个适宜的能量标准，如超过这个标准，就可以预期材料满足使用的要求。这种方法在过去是经常采用的，但在最近几年中已发现有某些潜在的危险。如果一个提高了拉伸强度，而能量吸收值与较低强度材料相同的材料被采用了的话，它在使用中的断裂倾向将要大很多，因为它在断裂前的延性可能是大大地降低了。由于缺乏对这方面的充分认识，曾引起许多灾难性的破坏。

进一步的重要考虑是试样的尺寸问题。近来认识到：小试样的试验可表现出相当高的断裂强度，而较大的试样将在低得多的应力下折断，如图3合金钢所表现的那样。由于结构元件要求越来越大的尺寸，所以，尺寸效应的重要性也就随之不断地在增长。

上述试验方式的另一缺点在于缺乏适当的理论处理方法。前几节概述了在能量考虑和裂纹尖端附近所发生的变形过程的基础上，系统

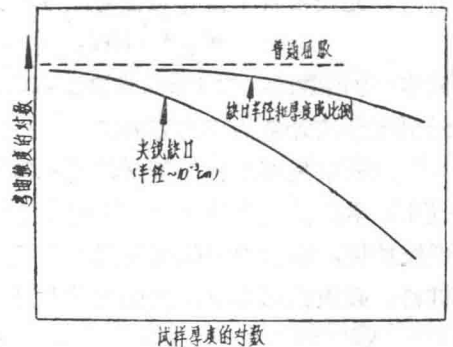


图3 增加试样厚度的影响是降低了弯曲强度。这一降低对于尖锐缺口最大。

地建立了定量的断裂理论。线性弹性理论对裂纹周围复杂情况的具体应用,以及可用计算机解决复杂的方程,已为发展更加满意和完全不同的试验方法开辟了道路。

断 裂 韧 性 的 概 念

强度提高时,韧性普遍降低,因而迫切需要改进强度和韧性两个特性的定量评定。在圆满地使用材料时这种定量评定也给出了重要的鉴别因素的新途径。最重要的一点是人们更为现实了,因为考虑无缺陷材料已不再是聪明的,即使最初能保证生产出这样的材料来,而要保证维护表面不受损伤仍然几乎是不可能的。

近几年来日益获得承认的现行方法,是假定所有材料都包含有某种程度的缺陷。因此它们的断裂韧性的真实评定,取决于材料带有一定尺寸的缺陷时的断裂行为。大于这个尺寸的缺陷大抵能为检验技术所发现,这样断裂韧性的评定便与实践紧密地联系起来。

断 裂 韧 性 评 定 的 理 论 发 展

现在可以确定断裂理论和材料带有裂纹以及缺陷时的性能相连系的过程了。对尖锐缺口可由(4)式立即推论出:对任何给定材料的简单断裂准则仅仅是 $(\sigma^2 c)$ 必须超过该材料的一个特定值,此处 c 是有效裂纹长度或临界缺陷尺寸,而 σ 则是裂纹开始扩展时的外加应力。只要 c 低于某一已知值,就对应该是安全的应力标准有某些保证。 $(\sigma^2 c)$ 这一参数是很重要的。当它有一个大的数值时,它将给断裂韧性以最好的保证。这一参数的平方根有时称为应力强化系数并用 K 来表示。当它的值超过材料的特定极限时,裂纹就变为不稳定,这时的临界应力强化系数则以 K_c 来表示。

新的术语还定义了另一个可以看成与(4)式接近一致的参数。这个参数用 G 表示,称为裂纹单位长度上的裂纹扩展力。在不平时,它的值用 G_c 来表示,这个值数似于(4)式中的 $(\gamma + \gamma_p)$ 项。 K_c 和 G_c 之间的关系可以很容易地推得为

$$K_c^2 \approx EG_c \quad (6)$$

在平面应力情况下的纯剪切断裂时,上述近似关系是严格的。当应力系统相当于平面应变而断口完全垂直于试样表面时(6)式变为

$$K_{IC}^2 = EG_{IC}/(1-\nu^2) \quad (7)$$

式中 ν 为泊桑比, K 和 G 的修饰脚标表示平面应变的状态。脚标亦可取ⅡC或ⅢC,它们表示引起裂纹开裂的应力方向。

试验中裂纹增长的概念,是意味着裂纹扩展力 G 增加到相应于不稳定时刻的数值。图(4)中,曲线A是完全脆性材料的;曲线B表示脆性较低的材料,这种材料遭到碎发的裂纹扩展,以后裂纹的增长又变得比较困难,曲线C表示在所试验的厚度下是完全延性的材料。必须强调指出,试样尺寸对这些曲线有显著的影响,如图5所示。

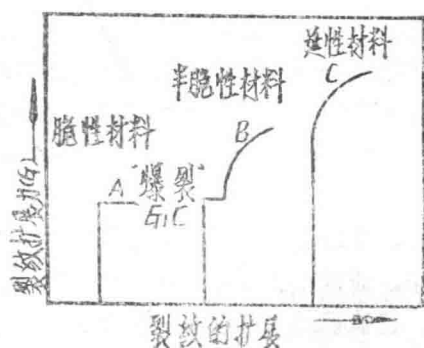


图4 在脆性材料中，直到破坏突然发生以前，裂纹扩展是困难的(曲线A)。对于半脆性材料(曲线B)裂纹扩展先在一个相应于 G_{IC} 的力的平面应变状态下发生，而进一步增长就需要力的增加，因为在这一阶段应力更容易被松弛。延性材料(曲线C)表明快速裂纹增长没有明确的开始。

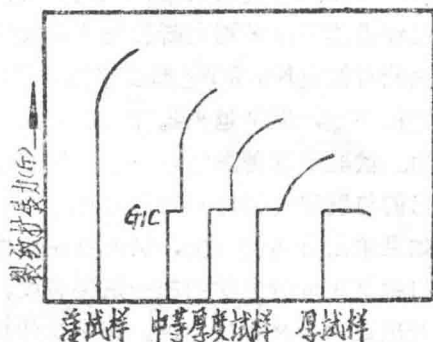


图5 因为在薄试样中应力更容易松弛，而不能达到平面应变状态，所以没有明确的裂纹扩展点。在较厚的截面中，平面应变状态比较容易建立而裂纹扩展在 G_{IC} 发生。最初的裂纹扩展量随着试样厚度的增加而增加，而 G_{IC} 可根据比实际使用中较薄的试样来决定。

它显示出最重要的一点：如果对于所察觉的不连续程度而言，试样厚度有足够厚的话， G_{IC} 的恒定值就与厚度无关。这种情况是断裂模式随厚度增加而变化的反映。所以 G_{IC} 或 G_{IC} 的确定都与试样的尺寸无关，因而是描述材料断裂韧性时广泛应用的参数。当条件切合于平面应力而不是平面应变时，情况就有些不同，但这些条件场合一般不太重要，此时试验应在接近实际使用厚度的材料上进行。

断裂韧性的试验评定

特定材料(极限厚度以上的)的 G_{IC} 及 G_{IC} 的不变性，指出了消除尺寸效应中未知特征的途径。这样，从实验上可以很方便地利用这样的事实。即裂纹突然而可观的扩展，往往在对应于 K_{IC} 的给定载荷时迅速出现，而裂纹的进一步扩展则仅随着载荷的增加逐渐的发生。这种初期的裂纹扩展称为“亚不稳定”状态或“爆裂”(pop-in)*。在迅速增长阶段以后裂纹扩展速度相对缓慢是由于约束力减少，从而使裂纹在接近于平面应力的条件下扩展到试样的表面。

实验上的重要之点是首先产生尖的裂纹，并在它正要迅速增长之前的一刹那确定它的长度。经过适当的疲劳应力处理后，在缺口根部将非常成功地形成裂纹。紧接着检查断裂

* pop-in原意指“使……猛然动作”或“使……突然进入”在此表示“猝发”之意。——译者注

表面，能把相当于不同性质裂纹的区域明显地分辨开来。初期的疲劳裂纹范围，通常是可以测出的，而平面应变的裂纹扩展也表现出它独有的特征。裂纹通常是沿着一条剪切路线（它是平面应力断裂的象征），达到试样外表面的。

已经推荐了很多测定断裂韧性参数的技术，并制备了适于测定断裂韧性的各类试样。某些试验对测定 K_{IC} 和 K_C 都很方便，所以对平面应变和接近于平面应力状态下的行为都可以进行评定，但是越来越强调的是 K_{IC} 值，因为它在应用最广泛的大尺寸元件中是特别重要的。试验步骤是围绕着一个严格的数学分析设计出来的，它包括试样尺寸、加载条件、以及它们与裂纹处引起的应力之间的关系。

如果采用合适的分析，试验可在拉伸或弯曲中进行，在每种场合先把试样开缺口，并在缺口根部用疲劳方法引起一道尖裂纹。在弯曲试验中，通常在加载时试样受拉伸的一侧事先开出缺口，并形成裂纹。在用拉伸机进行试验时，已认识到采用仅在一侧带缺口并形成裂纹的非对称试样，具有很多的优点。这种试验一般所用的材料比形成对称裂纹的试样少得多。此外，前一种情况下较低的试验载荷就够了，并且只需加工一个缺口，在这些情况下断裂的数学处理已有很好的发展，并且与试验情形相当接近。这种技术只有当破坏在普通屈服前发生时才适用。为了获得这个条件，有时要求增加较韧性材料的试样厚度。此外，曾对裂纹端部塑性变形区中的某些应力松弛影响提出了修正，其值要用逐次近似法来求解。

尽管有这些困难，简略地回顾一下还是值得的：较新的断裂韧性评定方法，至少已经部分地取得成绩。现在我们有一个工程设计参数，它综合了可能漏检的最大缺陷尺寸，因为它能与具有给定裂纹长度的材料的韧性相联系。这样就有了一个把质量（它用缺陷、裂纹和夹渣来确定）和因而是满意的性能相联系起来的规准。此外，不同的合金可以在一个比较现实的基础上进行比较，并且还能考虑到一些使用环境对材料的影响。

在进一步发展断裂性试验方面，似乎有很大的余地，但是增加试验的种类将有益于标准化，而且对不同技术得到的结果进行比较也更加困难。

提高断裂韧性的途径

对断裂韧性评定的需要，必须进一步看作是得到提高非常坚固材料的断裂韧性方法的前导。按照这一见解，断裂韧性就不仅仅是基于力学的应力、应变和能量的课题。实际上它也是一个由于从注意发展具有合适显微组织的材料中获得最大好处，而必须周密研究的课题。可以回顾一下获得坚固材料的较早经验，这种经验现在被看作是一种阻止位错运动的过程。当前的要求是获得比较成功地阻止裂纹扩展的方法。要达此目地，显微组织类型还没有完全解决。晶界细小的材料被认为有良好的强度和韧性，因为晶界既阻止屈服也使裂纹传播比较困难。图6定量地说明了这一点，它清楚地表明如果不需要超高强度，屈服应力和延性可以同时提高。

进一步扩大范围的方向是考虑复合材料。这些材料的缺点主要在于制造上的困难，因而生产费用高，但是已经证明，处于有相当塑性的基体中的坚固纤维能兼有高强度和足够韧性的优点。在这些显微组织中的一个重要要求是在软硬组分之间具有一个弱的界面。有

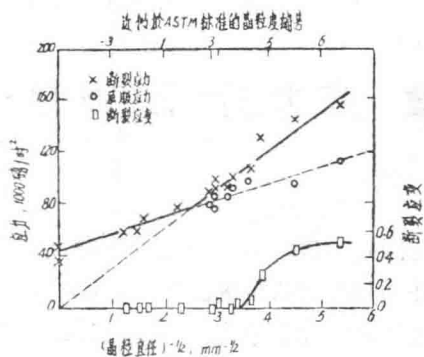


图6 减小晶粒尺寸使屈服应力和延性都增加了。图示为一种低碳钢在 -196°C 时的拉伸试验结果。

证据表明，这种情况或许提供了阻止开裂的最好方法。这种方法给断裂韧性评定这个已经很复杂的课题又带来了许多新变量。

第二章 应力分析: 弹性理论

本章以断裂力学中的某些问题为例,扼要地讲一下弹性理论的要点。对于了解下一章来说,钻研本章的全部内容并不是绝对必要的。但是,我们希望尚未熟习这一问题的读者,可能发现要把复变数理论运用到弹性理论中去,事实上并不很困难,特别是如果我们从反平面应变(模式Ⅳ的变形)的简单情况开始的话。

位 移 和 应 变

当物体变形时,材料上在 (x, y, z) 处的小质点将移到

$$x^1 = x + u(x, y, z)$$

$$y^1 = y + v(x, y, z)$$

$$z^1 = z + w(x, y, z)$$

式中 u, v, w 是位移矢量的分量。

一个棱线平行于坐标轴而长度为 ϵ 的足够小的立方体,将变形或为一个平行六面体(图1)。当知道了汇交于一点的三根棱线的新长度及其之间的夹角后,虽不能确定平行六面体的方位,但能确定其形状(图2)。就最小的(无限小)变形来说,应变分量 e_{xx}, e_{xy} 等由新的棱长 $\epsilon(1+e_{xx}), \epsilon(1+e_{yy}), \epsilon(1+e_{zz})$, 和它们间的夹角 $1/2\pi - 2e_{xy}, 1/2\pi - 2e_{yz}, 1/2\pi - 2e_{zx}$ 所规定。有一点几何知识就可证明:

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \dots e_{xy} = 1/2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (1)$$

应 力

假定在材料中挖去一个面积为 A 法线为 n 的小平面形成一个小洞(图3)。如果材料其余部分的位移和应变都不改变(没有松弛),则必有一个力的分布作用到新形成的表面上。设 F 为作用于平面上的总力;则

$$\sigma = \lim_{A \rightarrow 0} F/A$$

是法线为 n 的表面上的应力。对每一选定的 n 将有一个不同的 $\sigma: \sigma = \sigma(n)$ 。但是如果知道对应于三个不同的 n 的 σ 值,那末就可求出对于任何 n 的 σ 来。设 n 为 $(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)$, 则 σ 分别变为 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (矢量)。它们的分量

$$\sigma_x: \sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}$$

$$\sigma_y: \sigma_{yx}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz}$$

$$\sigma_z: \sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz}$$