

# 脆性固体断裂力学

[英] B. R. 劳恩 T. R. 威尔肖 著



地震出版社

# 脆性固体断裂力学

[英] B. R. 劳恩 T. R. 威尔肖著

陈 颢 尹祥础 译

地震出版社

1985

## 内 容 提 要

这是一本国际上著名的断裂力学理论教科书。作者以Griffith概念为基础，综合论述了脆性断裂理论。书中从连续介质力学及微观尺度研究了裂纹扩展的准静态问题及动力学问题，探讨了裂纹成核及扩展的各种过程以及影响裂纹扩展的各种因素。在裂纹扩展理论方面，本书按尺度依次减小的顺序（从宏观尺度到微观尺度，再到原子尺度）来研究裂纹尖端。这种研究顺序不仅逻辑清楚，而且通过实验断裂参数的观测分析，可以深入理解断裂的基本机理。

本书的读者对象为物理学、力学、材料科学、工程技术、地质学、冶金学等方面的科技人员，也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

Fracture of brittle Solids

B. R. Lawn T. R. Wilshaw

Cambridge University Press

### 脆性固体断裂力学

[英] B. R. 劳恩 [英] T. R. 威尔肖 著

陈 颢 尹祥础 译

责任编辑：李树菁

---

北京出版社出版

北京复兴路63号

北京印刷三厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

---

850×1168 1/32 6.75印张 170千字

1985年10月第一版 1985年10月第一次印刷

印数 0001—4,500

统一书号：13180·252 定价：2.00元

# 序

人类自有史以来，就已经敏锐地注意到脆性断裂现象。实际上，利用断裂过程制造原始工具，标志着人类文明的重要起点。后来，工匠们创造了美妙的带有裂纹的图案，作为陶器涂釉和镶嵌装饰的一种艺术形式。最近，断裂问题已成为人们特别是工程师们广泛关心的实际研究课题。灾难性裂纹的出现和扩展，往往在没有事先警告的情况下就对工程结构（如房屋，桥梁，飞机和船舶等）产生了影响，这就促使了大量有关材料强度的经验性资料的积累。而在有关岩石力学的研究方面，地质学中的破坏（如开矿，地震等）也有类似的现象。随着现代材料科学的诞生，以及多种全新材料的相继研究成功（如高强度金属，陶瓷，玻璃，聚合材料和合成材料等），我们对断裂过程的认识也在日益加深和扩大。

断裂理论尽管具备非常有利的学术背景，但作为一门真正的学科，其发展却极其缓慢。由此看来，解决大量实际断裂问题的迫切需要对于确定研究方法有极大的影响。于是，许多基于经验性的断裂理论就应运而生，各自遵循所研究材料的种类（完全脆性，半脆性，非脆性）和断裂的尺度（连续的，粒子的）等条件而沿着本身独特的思路向前发展。有时，断裂理论各个方面有关联的共同思路似乎显得十分勉强，以致一个方面的研究人员很难理解与其密切相关方面所取得的有关进展。

非常奇怪的是，这种共同的思路不仅存在，而且就存在于基本原理之中，不过这一点在形式上经常被疏忽。这种共同的基础就是断裂的能量平衡概念，这是 Griffith 在他 1920 年论述这一问题时的经典论文中所阐明的。他的观点非常简单：对一定的裂

纹系，考虑该系统发生微小变化时所有能量项的变化，可以写出描述裂纹扩展的基本方程。其原则是以力学和热力学的能量守恒定律为基础。这就自然导致将裂纹系方便地分成平衡的或动态的，稳定的和不稳定的，可逆的和不可逆的等类型。虽然 Griffith 最初的论述是针对可逆的平衡裂纹系情况，但他提出的能量平衡概念却普遍适用；在讨论更复杂的情况时，人们只需要在裂纹系总能量表达式中增加一些新的能量项，或对原来的能量项作些修改即可。所有基础扎实的断裂理论，都是从 Griffith 概念中直接推导出的，或者是从某些等效的其他形式的假设中求得的。

本书主要目的是，以 Griffith 概念为基础，综合论述脆性断裂理论。我们将用一些模型材料断裂行为的研究结果作为例子，着重叙述基本原理，而限于描述实际资料。之所以采用这种有些学院式的方法，是想兼顾以下目的。

(1) 在建立普遍的理论体系时，强调思路和理解。为此，在书中凡是可能的地方，对一些基本的假定和假设都作了评论分析。

(2) 将断裂理论的各个方面协调起来，由此建立一个牢固的物理基础，以便研究各种实用问题（承载结构的工程设计；岩石和冰等地质材料的破坏；粒子的碎裂和粉碎，包括磨耗，磨损和侵蚀过程；制作过程，如玻璃和陶瓷的切割与钻孔，宝石的劈开以及在研究表面物理学和表面化学时，“清洁”样品的制备等；器件技术中半导体内小尺度断裂的引进；绝缘体的电介质击穿；生物医学工程，骨骼和牙齿的断裂等）。

(3) 鼓励向有关学科分支（力学，经典热力学和统计热力学；固态、液态和气态物理学和化学；有缺陷的结构；表面科学；工程学，冶金学，地质学等）进行渗透。

(4) 促进脆性断裂理论的发展，特别是在材料科学领域中，使之成为一门有特点的学科。

当然，我们这样做，并不是贬低大家所惯用的偏重于应用的研究方法。相反，我们将根据这种取舍观点，毫无拘束地引用若干权威性参考文献中大量的学术思路和研究成果。

本书第一章，主要叙述历史背景和基础概念，并对 Griffith 及其同时代人的工作进行扼要的评述，提出断裂的两个同等重要的问题：裂纹的成核与裂纹的扩展。第二章专门讨论裂纹成核问题。其它六章全部讨论裂纹的扩展问题。这种章节内容的不均衡只是反映出这样的事实：裂纹的传播涉及一个比较确定的裂纹系，因而更适合于提供断裂基本过程的信息。在裂纹扩展的理论描述方面，我们选择了一种尺度依次减小的方法来研究裂纹顶端的情况，这些尺度为宏观尺度（第三、四、五章），微观尺度（第六章）和原子尺度（第七、八章）。这种作法的主要好处在于逻辑思路清楚，通过（宏观）实验中断裂参数（载荷，裂纹长度和扩展速度等）的观测，使我们最终能理解基本断裂机理。同时，本书一开始就讨论了一种基本的模型：完全脆性体中裂纹扩展是由于裂纹顶端内聚键的依次断裂造成的。这样就可以把“真实”固体的断裂简单地看成偏离理想性状的问题予以研究。

我们对许多同事和研究生在编纂本书时所给予的协助致以谢意。特别值得提出的是 R. W. Cahn，他最初鼓励我们撰写此书并在编写的过程中始终十分关心。有些同事，如 S. J. Burns, J. E. Field, F. C. Frank, J. E. Sinclair, R. Thomson 和 S. M. Wiederhorn 所提出的许多建设性意见和提供的许多原始资料都已反映在本书有关章节中。我们感谢许多研究人员给我们提供了出版物中的照片。我们还感谢苏塞克斯大学和南威尔士大学使我们得以在这两所大学内一起工作。最后向 Valerie 和 Christin 在校对书稿等方面的耐心和宝贵的帮助表示由衷的感谢。

B. R. 劳恩

T. R. 威尔肖

1974年3月

# 目 录

## 序

第一章 Griffith 概念.....	(1)
§1.1 应力集中.....	(2)
§1.2 Griffith 的能量平衡概念.....	(5)
§1.3 均匀拉伸时的裂纹.....	(6)
§1.4 Obreimoff 实验.....	(9)
§1.5 强度的分子理论.....	(12)
§1.6 Griffith 缺陷.....	(13)
§1.7 进一步的问题.....	(14)
第二章 裂纹成核与裂纹形成.....	(16)
§2.1 高度脆性固体中的成核阶段.....	(18)
§2.2 半脆性固体中的成核阶段.....	(27)
§2.3 脆性固体中裂纹的形成阶段.....	(36)
§2.4 非脆性固体.....	(40)
§2.5 微裂纹的闭合和愈合.....	(43)
第三章 裂纹扩展的连续介质理论 (一) ;	
裂纹端部的线性场 .....	(47)
§3.1 研究裂纹扩展的连续介质力学方法.....	(48)
§3.2 裂纹扩展力及应变能释放率.....	(50)
§3.3 裂纹端部场和应力强度因子.....	(52)
§3.4 G 和 K 的等效性.....	(59)
§3.5 特殊裂纹系统的 G 和 K .....	(61)
§3.6 Irwin 理论与 Griffith 概念的统一.....	(69)
§3.7 裂纹路径.....	(70)

第四章	裂纹扩展的连续介质理论 (二) :	
	裂纹端部的非线性场 .....	(78)
§4.1	裂纹端部过程的非线性和不可逆性 .....	(79)
§4.2	Irwin-Orowan 对 Griffith 概念的推广 .....	(82)
§4.3	J 积分 .....	(85)
§4.4	Dugdale-Barenblatt 裂纹端部模型和裂纹 张开位移 .....	(88)
第五章	断裂的动态过程 .....	(96)
§5.1	Mott 对 Griffith 概念的推广 .....	(97)
§5.2	拉伸样品中的扩展裂纹 .....	(98)
§5.3	接近极限速度时的动态效应 .....	(104)
§5.4	动态加载 .....	(111)
第六章	裂纹扩展的微结构理论 .....	(115)
§6.1	高度脆性固体 .....	(116)
§6.2	半脆性固体: 弹性应力场 .....	(131)
§6.3	半脆性固体: 塑性裂纹场 .....	(139)
§6.4	非脆性固体 .....	(146)
第七章	裂纹扩展的原子理论 .....	(148)
§7.1	Orowan 内聚强度模型 .....	(149)
§7.2	点阵模型与裂纹陷阱 .....	(152)
§7.3	计算机模拟 .....	(160)
§7.4	裂纹端部的塑性变形 .....	(168)
§7.5	化学效应 .....	(171)
§7.6	热效应 .....	(175)
第八章	断裂的动力学过程 .....	(177)
§8.1	裂纹扩展的弯结模型 .....	(178)
§8.2	化学强化蠕变断裂 .....	(187)
§8.3	输运控制蠕变断裂 .....	(195)



§8.4 断裂时间试验 .....	(199)
参考文献 .....	(203)

## 第一章 Griffith 概念

当受力超过一定限度后，大多数材料都倾向于断裂。这一事实已被早期材料科学研究人员所熟知。他们认为断裂强度是材料的一种固有性质，这似乎是完全合情合理的。很早就证实了在弹性限度内材料受力后的反应完全可以用特定的弹性常数来描述。于是，就提出了“临界（外加）应力”的假设，此假设成为早期断裂理论的基础。在工程设计上对于确定一个应力极限的想法是非常感兴趣的，因为工程师们只要确保结构部件中的最大应力不超过这个极限就可以了。

然而，随着经验的积累，特别是工程破坏事故的不断增加，临界应力方法的普遍性成了严重的问题。一般，对于一定的材料，其断裂强度测量的离散度较大，有些情况下其变化可达1个数量级。诸如温度、化学环境、加载速率等实验条件的改变，均会导致断裂强度的系统变化。此外，不同类型材料的断裂方式亦很不同。例如，玻璃在临界点之前发生的都是弹性变形，然后在张应力作用下突然发生破坏；而许多固体材料剪切时在断裂之前普遍要发生塑性流动。现有的理论无法说明如此不同的断裂特性。

以上就是本世纪初这个课题的研究情况。回溯以往，不难看出：临界应力准则之所以不适用在于它是纯经验的。固体在某一特定应力水平应该发生断裂这一说法，尽管直观上有些道理，但缺乏可靠的物理基础。因此需要仔细研究固体外部边界受到临界载荷时，其内部发生的情况。例如，施加的应力如何传递到内部实际发生断裂的区域？断裂机理的本质到底如何？回答这些问题对于理解所有断裂现象都是十分关键的。

1920年，Griffith 的经典论文使研究工作出现了突破。Grif-

fith 考虑了固体中受应力作用的一条孤立的裂纹，他根据经典力学和热力学的基本能量理论，提出了裂纹扩展的准则。在这篇开创性论文中提出的原理，以及据此导出的内容，实际上奠基了今日断裂力学的全部领域。我们在本章内将要评论 Griffith 和他同期科学家的贡献。这将使读者了解断裂理论的许多基本概念，同时为本书其他章节提供背景。

### §1.1 应力集中

Inglis(1913)对均匀受力平板的一个椭圆孔进行了应力分析，这是 Griffith 研究工作的重要起点。他的分析表明，锐角槽口和拐弯处的局部应力可以为外加应力的几倍。于是，即使一些亚微观缺陷也可以成为固体弱化的潜在原因。尤其重要的是，Ing-

lis 方程第一次为断裂力学提供了实际的思路：一个无限狭窄的椭圆孔的极限情况可以看作是一条裂纹。

让我们扼要地讨论一下 Inglis 分析的主要结果。如图1.1所示有一受到  $OY$  方向均匀拉伸的平板，其中包含一个半轴分别为  $b$  和  $c$  的椭圆孔。现在的问题是研究椭圆孔对板中应力分布的修正效应。假定胡克定律在板中各点都成立，而且在椭圆孔边界上不受力（这是平衡条件所要求的），半轴  $b, c$  与板的尺度相比是很小的。这时，问题就变成线弹性理论的一个习题。尽管求解的数学处理有些麻烦，包括

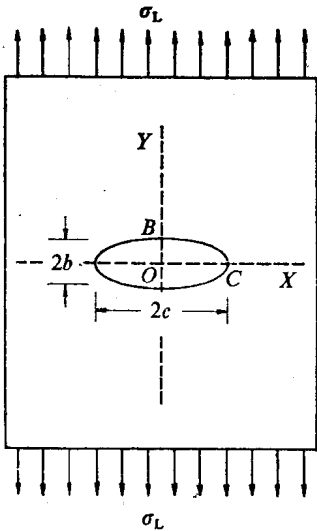


图1.1 受到均匀拉应力  $\sigma_L$  的平板上有一个长、短半轴分别为  $b, c$  的椭圆孔

要使用椭圆坐标，但从分析中可以得到一些明确而简单的基本结果。

我们从椭圆方程开始讨论，

$$x^2/c^2 + y^2/b^2 = 1, \quad (1.1)$$

很容易证明在  $c$  点的曲率半径是

$$\rho = b^2/c. \quad (1.2)$$

最大的应力集中发生在  $C$  点上：

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}(c, 0) &= \sigma_L(1 + 2c/b) \\ &= \sigma_L[1 + 2(c/\rho)^{1/2}]. \end{aligned} \quad (1.3)$$

对于  $b \ll c$  的狭长椭圆孔，这个方程可以变为

$$\sigma_{yy}(c, 0)/\sigma_L \approx 2c/b = 2(c/\rho)^{1/2}. \quad (1.4)$$

式 (1.4) 中的比值通常叫做弹性应力集中系数。很明显，对于狭长的孔，该系数显然比 1 要大得多。我们注意到了应力集中只取决于孔的形状，而不取决于孔的大小。

局部应力沿  $OX$  的变化也是很有意义的，图 1.2 示出了对于一种特殊情况  $c = 3b$  的结果。从图中可以看出， $\sigma_{yy}$  从极大值  $C$  点随距离而下降，在  $x$  很大的地方逐渐趋近  $\sigma_L$ ；而  $\sigma_{xx}$  在离自由应力面很近处很快到达峰值，然后随着距离的加大，与  $\sigma_{yy}$  的变化趋势是一致的。图 1.2 所表示的例子是有普遍意义的，它反映了对外加应力场明显的扰动只发生在大约距孔边为  $c$  的范围内，而最大应力梯度发生在更加局限的区域，这个区域围绕着应力集中最大处，其尺度为  $\rho$ 。

Inglis 继续考虑了多种应力的情况，其结论是：对应力集中有明显影响的几何特点，仅是那些高度弯曲区域的形状。实际上，其本身就是应力集中区。这样方程 (1.4) 可用来估计象图 1.3 所示的那种具有表面切口和表面台阶系统的应力集中系数，这时可以把  $\rho$  看成是最小的曲率半径，而把  $c$  看成是特征长度。因此现在我们就有了一种便于分析许多不规则结构（包括裂纹）对强度降低的潜在影响的方法。

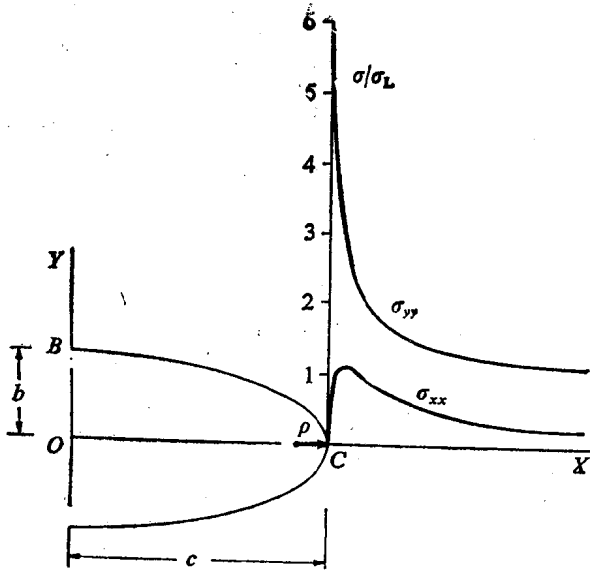


图1.2 椭圆孔( $c = 3b$ )的应力集中  
 应力集中于离孔边 $\approx c$ 的范围, 而高应力梯度区限于离孔边 $\approx \rho$ 的范围内

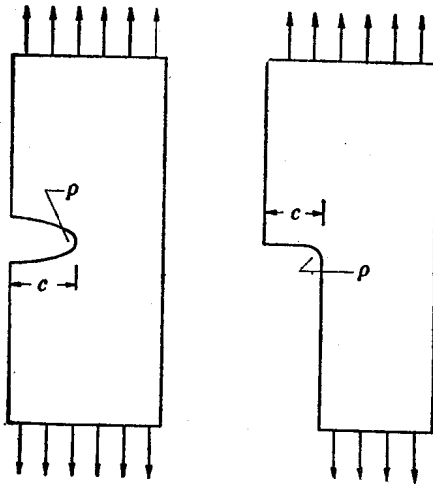


图1.3 表面切口与表面台阶

尽管 Inglis 的工作前进了一步，但是关于断裂机理的本质还不清楚。如果 Inglis 的分析真的可用于裂纹系统，那么为什么实际上中长裂纹比短裂纹容易扩展？这种情况是否违背应力集中系数与裂纹大小无关这一原则？真实裂纹顶端曲率半径的物理意义又如何？这些都是从 Inglis 方法过渡到基本断裂准则的一些障碍。

## §1.2 Griffith 的能量平衡概念

Griffith 根据可逆热力学过程，提出了一个裂纹系统的模型。该系统的主要部分如图1.4所示：弹性体 E 包含一条长  $2c$  的内部裂纹 S，在其外边界 L 上，受到外加载荷的作用。Griffith 设想这样一种简单情况，系统的总自由能为最小，这时裂纹处于平衡状态，而且处于扩展的边缘。

处理此问题时，我们首先要写出系统总能量的表达式。为此，考虑随着裂纹形成而变化的各能量项。首先可以预料，一般情况下裂纹体的外边界会产生某些位移，因此外加载荷将作功  $W_L$ （对于一个真正的可逆系统，我们把  $W_L$  的增加与加载系统势能的减小看作是一样的）。其次，弹性体中储存的应变势能  $U_E$  随系统任何几何情况的改变而发生变化。第三，随着裂纹新表面的产生，势必出现自由表面能  $U_s$ 。对于一个静态的裂纹系统，总能量将是上述三项之和：

$$U = (-W_L + U_E) + U_s. \quad (1.5)$$

因为加载系统和弹性介质两者共同把力传至裂纹区域，所以式 (1.5) 括号中的量称为系统的机械能。当然，如果涉及到动态裂纹系统，式 (1.5) 还应包括动能项。

假想裂纹扩展了  $\delta c$  (图 1.4)，若机械能项和表面能项平衡，则系统就达到了热力学平衡。不难看出，裂纹扩展时机械能必然减小，这是因为在裂纹扩展时， $\delta c$  两侧的约束力突然松弛。

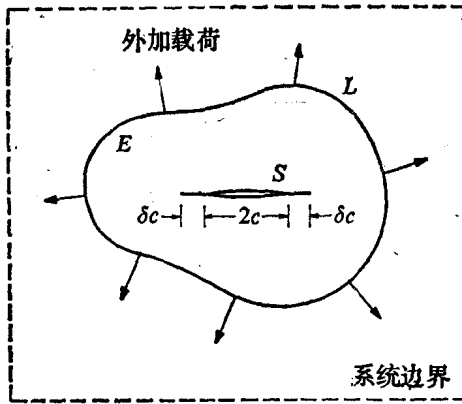


图1.4 静态平面裂纹系统

E——弹性介质；S——裂纹面；L——外加载荷

一般情况下裂纹壁向外加速分开，最终进入能量较低的新状态。另一方面，表面能项却随裂纹扩展而增加，这是由于在新的裂纹面产生时，要克服穿过  $\delta c$  的分子引力造成的内聚力，于是，式 (1.5) 括号中的项促进裂纹扩展，而第二项则阻止裂纹扩展。这就是 Griffith 的能量平衡概念，可由标准平衡方程来正式表述：

$$dU/dc = 0. \tag{1.6}$$

这就是预测物体断裂行为的准则，它是牢固地建立在能量守恒定律上的。因此，如果平衡长度发生一小的变化，裂纹是扩展还是可逆地闭合，视式 (1.6) 左方是负还是正而定。

### §1.3 均匀拉伸时的裂纹

Griffith 的概念是讨论任何守恒力作用下断裂问题的基本出发点。Griffith 试图在实际应用中证实他的理论。首先，为了计算式 (1.5) 中的能量项，他需要一个裂纹模型。为此，他根据 Inglis 的分析，考虑在无限均匀张应力场中狭窄椭圆“裂纹”的

情况( $b \rightarrow 0$ , 图1.1)。为了进行实验验证,他必须找到一种合适的各向同性的模型材料,它在断裂前的所有应力水平下均大致符合胡克定律。由于玻璃能满足这些要求而又非常容易找到,所以用玻璃作为实验材料。

在估计模型中的裂纹系统机械能时,Griffith利用了线弹性理论的结果,即在外加应力不变的条件下,裂纹形成时有:

$$W_L = 2U_E. \quad (\text{常力加载}) \quad (1.7)$$

根据 Inglis 关于应力和应变的解答,容易算出裂纹周围各体积单元的应变能密度。在比裂纹长度大得多的范围内进行积分,对于单位宽度的裂纹(沿裂纹前缘测量),对于薄板情况可得出下式:

$$U_E = \pi c^2 \sigma_L^2 / E. \quad (\text{平面应力}) \quad (1.8a)$$

当厚板情况时,可得出下式:

$$U_E = \pi(1 - \nu^2)c^2 \sigma_L^2 / E. \quad (\text{平面应变}) \quad (1.8b)$$

式中 $\sigma_L$ 是垂直于裂纹面的张应力, $E$ 是弹性模量, $\nu$ 是泊松比, $2c$ 是内部裂纹长度。在与裂纹面平行方向的附加载荷条件下,式(1.8)中应变能项的影响可以忽略不计。对于单位宽度的裂纹,Griffith将裂纹系统的表面能用下式表示:

$$U_S = 4c\gamma, \quad (1.9)$$

式中 $\gamma$ 是单位面积的自由表面能。于是,对于平面应力状态,式(1.5)的总系统能量为

$$U = -\pi c^2 \sigma_L^2 / E + 4c\gamma. \quad (1.10)$$

图1.5表示了机械能 $-W_L + U_E = -U_E$ ,表面能 $U_S$ 和总能量 $U$ 的变化。值得注意的是,按照Inglis的计算,一个长度为 $c$ 的刃型裂纹(图1.3表面缺口的极限情况,这时 $b \rightarrow 0$ ),其能量为长 $2c$ 的内部裂纹能量的一半。

将Griffith的平衡条件式(1.6)用于式(1.10),可得到平面应力状态常载条件下断裂的临界条件:

$$\sigma_L = (2E\gamma/\pi c)^{1/2}. \quad (1.11)$$



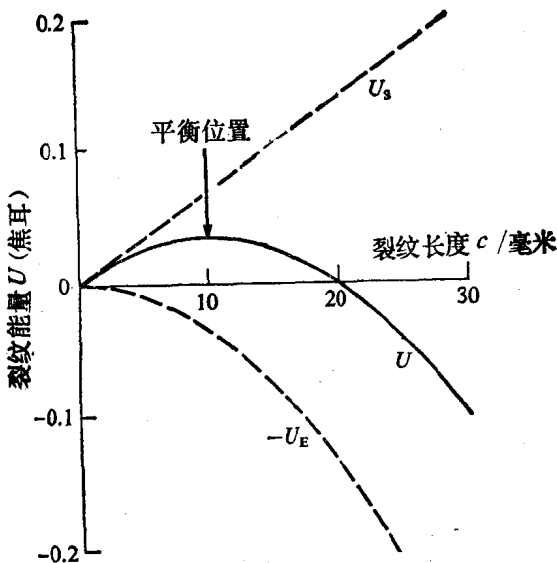


图1.5 均匀拉伸时, Griffith 裂纹的能量变化  
 (数据取自 Griffith 的论文。  $\gamma=1.75$  焦耳·米<sup>-2</sup>,  $E=6.2 \times 10^{10}$  牛顿·米<sup>-2</sup>,  $\sigma_L=2.63 \times 10^6$  牛顿·米<sup>-2</sup>,  $\sigma_L$  的选取是给了给出  $c=10$  毫米的平衡位置)

参照式 (1.8), 只要将上式中的  $E$  简单地用  $E/(1-\nu^2)$  来代替, 就可得到平面应变状态下的相应结果。我们从图 1.5 或从  $\frac{d^2U}{dc^2}$  为负值都能够看出, 平衡时系统的能量为极大, 因此这是不稳定的平衡。特别当施加的应力超过式 (1.11) 所给定的临界值后, 裂纹将不受限制地自发扩展。

下面讨论一下实验方法。Griffith 用玻璃薄壁圆管和球形玻璃灯泡作为断裂样品, 用玻璃刀在样品上划一长 4 到 23 毫米的裂纹, 实验前将样品退火。向中空的玻璃管或玻璃罩内泵入液体使其爆裂, 由样品内的液体压力确定临界应力的 大小。如所预料, 只有垂直于裂纹表面的应力分量才是重要的, 对于含有纵向