



断裂力学 在石油管柱中的应用

石油工业出版社

断 裂 力 学

在石油管柱中的应用

肖 芳 淳 编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书对断裂力学的基本原理及应用,特别是在石油管柱中的应用,作了较为系统的介绍。主要包括断裂力学的力学基础和工程应用理论基础,及其在石油管柱中的应用三部分。

本书特点是循序渐近,由浅入深,简明易懂,便于自学,可供石油钻采、储运、机械工程等专业的大学生、研究生以及有关的师生和科技人员阅读,也可作为从事力学、土建、冶金和应用学工作者的参考书。

断 裂 力 学 在石油管柱中的应用

肖 芳 淳 编

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)

妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 10印张 219千字 印1—1,600

1986年9月北京第1版 1986年9月北京第1次印刷

书号: 15037·2611 定价: 2.00元

前 言

断裂力学的研究,虽然可以追溯到二十年代,但当时并未引起人们的重视。以后,随着生产和科学技术的发展,断裂力学蓬勃兴起,特别是近一二十年来,得到了广泛的应用,受到世界各国的普遍重视,引起了许多学者从多方面进行研究,取得了可喜的成就。目前,断裂力学已向纵深开拓,显示出它的巨大作用,推动了技术和生产进步,解决了工业、交通、军事等要害部门所出现的低应力脆断、疲劳和应力腐蚀等问题,为发展新材料、新工艺以及合理选材指明了方向。

断裂力学从理论研究发展到各种工程实践应用中去,现已扩展到石油工程的领域中来,如岩石断裂、氢脆和油气管道止裂等等。但是,解决石油管柱中所出现的断裂问题,只在杂志上有所刊载,而专著却少见。为了便于研究学习,将断裂力学力学基础、断裂力学工程应用理论基础、断裂力学在石油管柱中的应用三方面的内容编写成书。

本书主要为石油机械工程研究生编写,经三届教学试用,反映内容虽深,但能循序渐进,由浅入深,简明易懂,便于自学。该书适应性广泛,也可供从事断裂力学研究的其他人员参考。

本书有些章节采取了与其他书籍不同的叙述方法。如 Westergaard方法,由假定 $\varphi(z)$ 、 $\psi(z)$ 导函数与复变函数 $Z(z)$ 的关系出发来加以推证。对圆柱筒壳的鼓胀效应系数,

直接从微分方程求解，在求解过程中，采用了马丢函数，逻辑性强，推证严密，自学也能掌握。书中有些章节的内容，如塑性区尺寸因子断裂判据，系编者的体会，又如圆柱筒壳基本方程求解一节，引用了本人指导研究生所得的成果。此外，还根据参考资料编译、引用、改编和重新推证，特此说明并向这些作者致谢。

本书承蒙西南交通大学孙训方教授和西南石油学院郝俊芳副教授审阅，并提出了宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，加之断裂力学是一门新兴的学科，特别在石油管柱中的应用，有待探索的问题还很多，所以书中的谬误和缺点在所难免，希望读者批评指正。

编 者

1984年6月完稿于西南石油学院

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 断裂力学的基本概念	2
第二章 线弹性断裂力学的二维裂纹问题	6
第一节 求解二维双调和方程	6
第二节 用复变函数表示应力、位移分量与边界条件	10
第三节 位移、应力分量的坐标变换	16
第四节 Westergaard方法(解 I、II 型裂纹问题)	18
第五节 保角变换法	37
第六节 积分变换法	54
第七节 边界配位法	85
第八节 二维调和方程及其求解	101
第九节 Westergaard方法(解 III 型裂纹问题)	104
第十节 保角变换法	107
第十一节 积分变换法	111
第十二节 Williams特征函数展开方法	117
第十三节 裂纹尖端塑性区的修正	119
第三章 线弹性断裂力学的三维裂纹问题	126
第一节 三维裂纹尖端附近的应力分析	126
第二节 圆片状裂纹问题	128

第三节	椭圆片状裂纹问题·····	151
第四节	表面裂纹与深埋裂纹·····	156
第四章	线弹性断裂力学的复合型断裂判据·····	162
第一节	概述·····	162
第二节	应变能密度因子断裂判据·····	163
第三节	塑性区尺寸因子断裂判据·····	167
第四节	最大周向应力断裂判据·····	172
第五节	最大应变能释放率断裂判据·····	175
第六节	复合断裂判据的工程应用·····	179
第五章	弹塑性断裂力学·····	184
第一节	概述·····	184
第二节	裂纹张开位移及其判据·····	185
第三节	J积分及其守恒性·····	193
第四节	J积分判据及其有效性·····	198
第六章	裂纹的快速扩展与止裂·····	205
第一节	概述·····	205
第二节	马丢函数简介·····	206
第三节	Ⅲ型裂纹的动态扩展问题·····	209
第四节	裂纹的快速扩展·····	215
第五节	裂纹的分叉·····	217
第六节	止裂原理·····	219
第七章	带裂纹圆柱筒壳的应力分析·····	224
第一节	圆柱筒壳的基本方程·····	224
第二节	带裂纹圆柱筒壳基本方程的求解·····	232
第三节	“鼓胀”效应系数·····	250
第四节	带裂纹圆柱筒形壳体的应力场·····	252
第八章	石油管柱的断裂判据·····	255

第一节	用COD法计算石油管柱的断裂应力·····	255
第二节	J积分在石油管柱中的应用·····	260
第九章	疲劳裂纹扩展与应力腐蚀问题·····	262
第一节	概述·····	262
第二节	疲劳裂纹扩展规律·····	265
第三节	影响疲劳裂纹扩展的因素·····	269
第四节	疲劳裂纹扩展的寿命估算·····	273
第五节	应变疲劳裂纹的扩展问题·····	275
第六节	应力腐蚀的裂纹扩展·····	278
第七节	腐蚀疲劳裂纹扩展简介·····	284
第十章	断裂力学在石油管柱中的应用·····	287
第一节	复合型断裂判据的临界应力·····	287
第二节	石油管柱断裂应力的计算·····	295
第三节	复合型断裂判据在油气管道中的应用·····	298
第四节	油气管道中的止裂·····	306
第五节	钻柱的疲劳破坏·····	308
第六节	管材的氢脆破坏·····	310

第一章 绪 论

第一节 概 述

什么是石油管柱？石油管柱系指钻井用的钻柱，固井用的套管串，采油的油管柱和抽油杆，以及储运的油气管道而言。这些均属于圆柱形壳一类的压力容器，要使其安全可靠又经济合理，就需得进行强度计算。

若按传统强度计算方法来设计这些管柱，一般说来，安全可靠，均能确保其正常工作，不致因强度不足而突然断裂。可是，在石油工程实际中，常遇到一些管柱突然断裂的事故。这些事故，用传统强度计算方法难以解释。如美国某输气管线破裂长达十三公里^[1]，我国某石油超深井距井口600米处套管接箍断裂，997米处套管接箍穿孔等，在其他工业、交通、军事等部门，也时有类似事故的发生，因而引起了人们的广泛重视。

石油管柱为什么会突然断裂？如何才能防止？传统理论为什么难以解释？其原因就在于没有考虑材料或石油管柱中存在的初始裂纹或缺陷，而把材料当作均匀连续介质来处理的缘故。实际上，在材料或石油管柱中，总是不可避免地存在着各种裂纹源。这些裂纹源，可能来自冶金缺陷，也可能产生于焊接、淬火等加工过程，还可能是在使用中因腐蚀、疲劳载荷等作用所引起的，一旦在外力作用下，这些裂纹可能迅速扩展，导致石油管柱低应力脆断。所谓低应力脆断，

系指石油管柱或结构的断裂应力往往远低于材料的屈服极限，甚至低于许用应力，尽管材料是塑性的，也以脆性方式断裂（简称脆断），故称为低应力脆断。低应力脆断、疲劳和应力腐蚀竟成了工程断裂事故的三种主要形式，前面提到的一些脆断事故，就是这些形式的典型实例。血的教训，提醒人们必须对材料或石油管柱中的微小裂纹或缺陷，作进一步力学分析，否则，将会产生不堪设想的后果，古语云：“千里之堤，溃于蚁穴”。这些微小裂纹问题如何进行分析，有必要将断裂力学应用到石油管柱上来。

断裂力学就是研究构件中裂纹的发生与扩展规律及其防断措施的一门学科。它是六十年代发展起来的，许多学者对各种断裂现象，通过长期观察、分析研究和试验，逐渐摸索出一套解决强度问题的新理论、新方法。它并没有，也不可能全盘否定传统理论，只是补充不足之处，从而使在强度计算中考虑得更为全面、周到，犹如古树开新花，大放异彩。它对解决工程结构的强度问题，起了独特的作用，特别是用来解决高强度钢或超高强度钢材制作的结构强度问题，传统理论，望尘莫及。因此，断裂力学随着生产和科学技术的发展而蓬勃兴起，以适应其日益发展的需要。

下面先讲断裂力学的基本概念，然后再分章进行叙述。

第二节 断裂力学的基本概念

断裂力学解决问题的方法和手段比较特殊，主要是引入了应力强度因子 K ，作为衡量材料的断裂韧性指标。一般说来，石油管柱或试样中的裂纹，由于外力作用方式不同，其扩展方式有三种基本形式（图 1-1），即张开型（Ⅰ型）、滑开型（Ⅱ型）和撕开型（Ⅲ型），相应的应力强度因子用

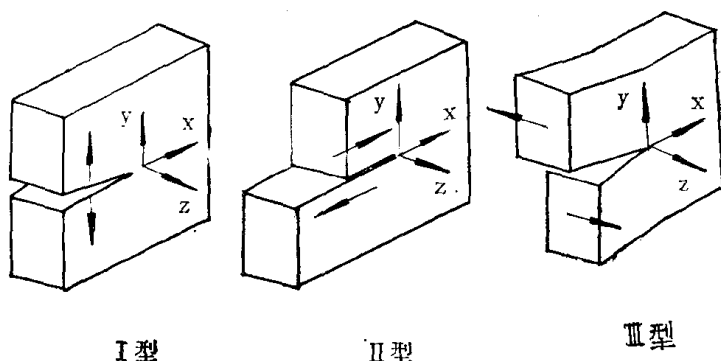


图 1-1 裂纹扩展的三种基本形式

K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 来表示[2、3、4、5]。

现将裂纹的三种可能扩展方式，分别介绍如下：

1. 张开型 (I 型)

由图 1-1 (I) 中可以看出，正应力和裂纹面垂直，在正应力作用下裂纹尖端张开，扩展方向仍与正应力垂直，裂纹的这种扩展方式，称为张开型。如长输油气管道，在管壁径向有一个径向裂纹时，受管壁的环向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 作用，裂纹张开沿着径向扩展，如图 1-2 所示。

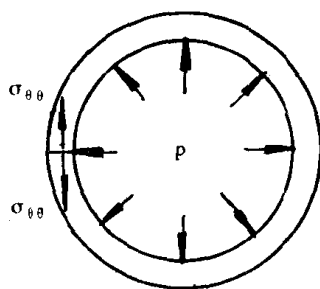


图 1-2 管道 I 型裂纹

2. 滑开型 (II 型)

如图 1-1 (II) 所示，在平行裂纹面的剪应力作用下，裂纹便沿着裂纹面滑开扩展，称裂纹的这种扩展方式为滑开型。若两块厚板用大螺栓连接，如图 1-3 所示，当板受拉力 P 时，在接触面上有一对剪应力作用，此时若在螺栓

内部AB面上有一裂纹,则在剪应力作用下,属于滑开型裂纹(Ⅱ型)。

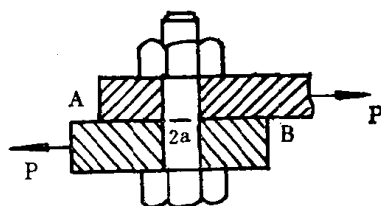


图 1-3 连接螺栓中的Ⅱ型裂纹

3. 撕开型(Ⅲ型)

如图 1-1 (Ⅲ) 所示,在剪应力作用下,裂纹面上下错开,裂纹便沿着原来的方向扩展向前,这种扩展方式,称为撕开型。例如,用剪刀开口,然后撕布,又如传动轴工作受扭时,即轴上受一对剪力作用,这时轴上有一环向裂纹。

综上所述,三种裂纹扩展方式,由理论研究和实验证实,其应力强度因子 K ,应力 σ 和裂纹半长 a 三者间,都有如下关系,统一表达为:

$$K = Y \sigma \sqrt{a} \quad (1-1)$$

式中 Y 为物体的裂纹几何形状因子,从上式可以看出,当应力 σ 增加时, K 值也增加,则有 $K \propto \sigma$,反之,则有 $\sigma \propto K$,因为 K 与 σ 成线性关系,所以 K 就能确定裂纹尖端附近应力场的强弱程度,通常把 K 称为“应力强度因子”,简称“ K 因子”。 K 的右下脚标分别用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ来表明为Ⅰ型(张开型)、Ⅱ型(滑开型)、Ⅲ型(撕开型)的应力强度因子,分别记为 K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 。

当应力 σ 达到某一临界值时,裂纹就迅速扩展而破坏,此时 K 值就称为“临界应力强度因子”,分别记为 K_{Ic} 、

K_{IC} 、和 K_{ICc} 。当石油管柱实际受力的 K 小于 K_c 时，管柱有承载能力， K_c 就表示材料阻止裂纹扩展能力的指标。在石油管柱内部，张开型（I型）裂纹最危险，容易引起低应力脆断，故在实验室内均以I型裂纹进行试验，因而 K_{IC} 为材料的断裂韧性，系指带裂纹试样（或管柱）材料阻止裂纹失稳扩展能力的指标。

实验指明，就平面问题而言，平面应变状态下得到的 K_{IC} 是最小值，因此，用平面应变状态的试样取得的 K_{IC} 值作为设计的依据是合理的，也是可取的。应用材料在常温的 K_{IC} 值时，可查有关资料。

参 考 文 献

- 〔1〕 潘家华：“断裂力学在油气管道工程上的应用”，管道科学技术 科学报告会论文集，第二集，《油气管道技术》编辑出版，1980。
- 〔2〕 北京钢铁研究院金属物理室编，《工程断裂力学》，上册，国防工业出版社，1977。
- 〔3〕 Hahn, H.G., Bruchmechanik, B.G. Teubner Stuttgart, 1976.
- 〔4〕 范天佑编著：《断裂力学基础》，江苏科技出版社，1978。
- 〔5〕 D.布洛克著，王克仁等译：《工程断裂力学基础》，科学出版社，1980。

第二章 线弹性断裂力学的二维裂纹问题

第一节 求解二维双调和方程

一、建立二维双调和方程

在图 2-1 中, 系从裂纹体内任取 $dx \cdot dy \cdot 1$ 的一个单元体, 若重量不计, 则由静平衡条件得:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (2-1, a)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (2-1, b)$$

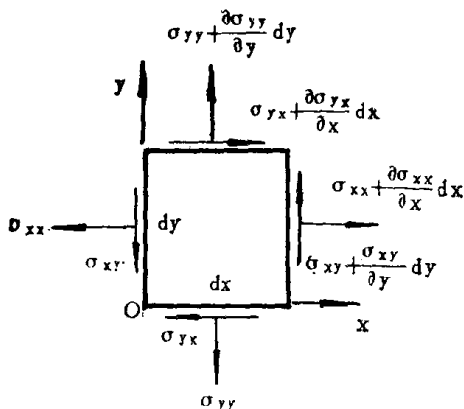


图 2-1

从几何关系得位移分量与应变分量间有如下关系, 若命

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \text{ 则有}$$

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2-1, c)$$

从前式中消去 u 、 v ，使得如下的相容方程：

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (2-1, d)$$

再由广义虎克定律推知

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E'} (\sigma_{xx} - \nu' \sigma_{yy}) \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E'} (\sigma_{yy} - \nu' \sigma_{xx}) \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1 + \nu'}{E'} \sigma_{xy} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2-1, e)$$

式中平面应变 $E' = E/(1 - \nu^2)$, $\nu' = \nu/(1 - \nu)$;

平面应力 $E' = E$, $\nu' = \nu$ 。

把(2-1, e)式代入(2-1, d)式中，考虑在(2-1, a)、(2-1, b)两式中，分别对 x 、 y 求偏导数，相加其结果整理后，即得应力分量表示的相容方程：

$$\frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \sigma_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial y^2} = 0 \quad (2-2)$$

如果应力函数用 U 表示，则由平衡微分方程可得

$$\nabla^2 \nabla^2 U = 0 \quad (2-3)$$

式中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 。

因此，平面问题归结为在定解条件下，求解四阶偏微分方程，方程(2-3)为二维双调和方程，其解 $U(x, y)$ 系双调和函数，也就是Airy应力函数^[1, 2]。

二、求解二维双调和方程

由(2-3)式得知

$$\nabla^2 \nabla^2 U = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)^2 U = 0 \quad (a)$$

为了用复变函数方法求解 (a) 式, 可设 $z = x + iy$, 其共轭复变数为 $\bar{z} = x - iy$, 从而有

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial \bar{z}}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = i, \quad \frac{\partial \bar{z}}{\partial y} = -i \quad (b)$$

分别对 x 、 y 求一次、二次复合偏导数, 得

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \cdot \frac{\partial \bar{z}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \quad (c)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \cdot \frac{\partial \bar{z}}{\partial y} = i \left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \right) \quad (d)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} = \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \right)^2 \quad (2-4, a)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} = \left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \right)^2 i^2 = - \left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \right)^2 \quad (2-4, b)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial y} = i \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial \bar{z}^2} \right) \quad (2-4, c)$$

把 (2-4, a)、(2-4, b) 两式代入 (a) 式, 并考虑 $[(a+b)^2 - (a-b)^2]^2 = 16a^2b^2$, 化简得

$$16 \frac{\partial^4 U}{\partial z^2 \partial \bar{z}^2} = 0 \quad (2-5)$$

对 z 积分一次, 得

$$2 \frac{\partial^3 U}{\partial z \partial \bar{z}^2} = \frac{1}{8} F(\bar{z}) = \varphi''(\bar{z})$$

对 z 再积分一次, 得

$$2 \frac{\partial^2 U}{\partial \bar{z}^2} = z \varphi''(\bar{z}) + X''(\bar{z})$$

对 $\bar{z}$ 积分一次, 得

$$2 \frac{\partial U}{\partial \bar{z}} = z \varphi'(\bar{z}) + X'(\bar{z}) + \varphi(z)$$

对 $\bar{z}$ 再积分一次, 得

$$2U = z \varphi(\bar{z}) + X(\bar{z}) + \bar{z} \varphi(z) + X(z)$$

上式经整理后而有

$$U = \frac{1}{2} [\bar{z} \varphi(z) + z \varphi(\bar{z}) + X(z) + \overline{X(\bar{z})}] \quad (e)$$

$$\text{从(2-3)式中可以看出, } \nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy},$$

由于应力分量 σ_{xx} 、 σ_{yy} 为实变函数, 其和仍为实变函数, 因而得知 $\nabla^2 U$ 也应该是实变函数。如此, 只有保证 U 为实变函数, 才能得以实现。为此, 只有 $\varphi(\bar{z}) = \overline{\varphi(z)}$, $X(\bar{z}) = \overline{X(z)}$, 才能使 $\varphi(\bar{z})$ 、 $X(\bar{z})$ 为 $\varphi(z)$ 、 $X(z)$ 的共轭复变函数; 同时, 还需要复变函数 $\varphi(z)$, $X'(z) = \psi(z)$ 在给定域内为复变数 z 的解析函数。只有这样, 才能保证 (e) 式中的应力函数 U 必定为实变函数。因此, (e) 式可改写为

$$U = \frac{1}{2} [\bar{z} \varphi(z) + z \overline{\varphi(z)} + X(z) + \overline{X(z)}] \quad (2-6)$$

式中 U 便是二维双调和方程的解 [3、4、5]。找出 U 的最终目的, 就是为了求出 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{xy} 、 u 、 v 等五个未知量, 在这里只建立这些未知量与复变函数 $\varphi(z)$ 、 $\psi(z)$ 间的关系式。具体解法, 分别结合实例讲述。