

断裂力学在抽油杆 缺陷评定中的应用

钟伯明 魏嘉荃 著



石油工业出版社

登录号	127261
分类号	TF933
种次号	008

断裂力学在抽油杆 缺陷评定中的应用

钟伯明 魏嘉荃 著



石油0121135

石油工业出版社

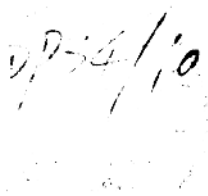
(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书系统地论述了断裂力学在抽油杆缺陷评定中的应用,其中相当一部分内容是著者多年的研究成果。

全书分为五章,内容包括:与抽油杆有关的断裂力学基本理论;抽油杆各部位表面裂纹应力强度因子表达式;与抽油杆材料有关的各种断裂力学性能测试原理和方法;抽油杆各部位表面缺陷临界尺寸、门槛尺寸及剩余寿命的计算方法;抽油杆各部位表面缺陷规格化和评定步骤等等。

本书可供石油机械有关科研人员、工程技术人员和石油院校师生参考。



断裂力学在抽油杆 缺陷评定中的应用

钟伯明 魏嘉荃 著

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

大庆石油学院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1156毫米 32开本 4.125印张 110千字 印1—1000

1993年11月北京第1版 1993年11月大庆第1次印刷

ISBN 7-5021-1173-5/TE·1081

定价: 4.50元

前 言

断裂力学是固体力学近代发展的一个分支，是评定含缺陷构件或材料强度的理论基础，是有史以来第一个能够将构件的缺陷几何，构件的受力状态和构件的材料性能三者定量联系在一起的力学学科。它用新的观念，建立了一系列的理论、实验和方法。因此，用断裂力学解决含缺陷构件的强度问题就自然显得特别有效。

在国外，断裂力学已经应用到各个工业部门的40多个工程分支。国内最早是应用到压力容器的安全评定，现在也逐渐扩展深入到机械等其他行业。例如1986年由辽河石油勘探局研究院矿机所、中国科学院金属研究所、中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院机械所、东北输油管理局铁岭机械厂、大庆石油学院机械系等五个单位联合开展的原石油部科研项目“旧抽油杆检测与修复技术研究”中应用了断裂力学^①。随后不久，大庆石油学院机械系又承担了中国石油天然气总公司装备局的科研攻关项目“抽油杆缺陷评定技术理论研究”，又应用断裂力学系统地研究了抽油杆缺陷评定技术，取得的成果为抽油杆判废标准的制定奠定了理论基础^②。这项研究工作也得到了中国石油天然气总公司科技局的资助。此外，西安交通大学强度研究所和玉门石油管理局机械厂，也用断裂力学研究了抽油杆^③。

① 辽河石油勘探局研究院矿机所、中国科学院金属研究所、中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院机械所、东北输油管理局铁岭机械厂、大庆石油学院机械系，“旧抽油杆检测与修复技术研究”，项目鉴定会资料，1988.7。

② 大庆石油学院机械系，“抽油杆缺陷评定技术理论研究”，项目鉴定会资料，1990.11。

③ 西安交通大学强度研究所、玉门石油管理局机械厂，“抽油杆断裂力学分析”，项目鉴定会资料，1991.3。

用断裂力学方法研究抽油杆问题是生产发展的需要。据统计,目前我国有近七万口机械采油井,其中部分进入开采后期,有杆抽油井中的抽油杆断裂事故逐年增加,各个油田都面临着如何防止或减少抽油杆的井中断裂事故,如何合理使用抽油杆和提高抽油杆的科学管理水平等问题。在这些问题中,有许多问题必须结合断裂力学方法才能解决。如果这本书能够对断裂力学在抽油杆缺陷评定中的应用有所帮助,或者能够起到抛砖引玉的作用,著者的目的就已经达到了。

这本书的内容涉及到与抽油杆缺陷评定有关的断裂力学理论和实验,提出了一套对抽油杆各部位表面缺陷的断裂力学评定方法。其中有相当一部分是著者的研究成果。

最后,对中国石油天然气总公司装备局、科技局,在著者进行这一研究工作期间,给予的支持和资助,以及对安锦高总工程师和其他领导给予的支持和鼓励,一并表示感谢。

著者于大庆石油学院

1993年5月

目 录

第一章 断裂力学基础知识	(1)
第一节 裂纹顶端三种基本变形型式	(1)
第二节 裂纹顶端弹性应力分量和位移分量	(3)
第三节 应力强度因子	(6)
第四节 裂纹顶端塑性区	(16)
第五节 断裂韧度	(17)
第六节 断裂判据	(21)
第七节 疲劳裂纹扩展	(22)
第八节 应力腐蚀裂纹扩展	(24)
第九节 腐蚀疲劳裂纹扩展	(26)
第二章 抽油杆各部位表面裂纹应力强度因子表达式 ..	(33)
第一节 抽油杆杆体及过渡段表面裂纹应力强度 因子	(33)
第二节 抽油杆螺纹段表面裂纹应力强度因子	(53)
第三节 抽油杆扳手方表面裂纹应力强度因子	(67)
第三章 抽油杆材料断裂力学性能测试方法	(76)
第一节 K_{IC} 测试方法	(76)
第二节 J_{IC} 测试方法	(82)
第三节 da/dN 和 $\Delta K_{I,k}$ 的测试方法	(88)
第四节 $K_{I,SCC}$ 和 da/dt 的测试方法	(97)
第五节 $(da/dN)_F$ 和 $(\Delta K_{I,k})_{CF}$ 的测试方法	(103)
第四章 抽油杆各部位表面缺陷临界尺寸、门槛尺寸 及剩余寿命的计算方法	(105)
第一节 抽油杆各部位表面缺陷临界尺寸	(105)
第二节 抽油杆各部位表面缺陷门槛尺寸	(111)

第三节	抽油杆剩余寿命计算方法	(114)
第五章	抽油杆表面缺陷规格化和评定方法	(118)
第一节	表面缺陷的抽象和规格化	(118)
第二节	表面缺陷的评定方法	(123)

第一章 断裂力学基础知识

所谓断裂力学，简言之，就是裂纹体力学，也就是材料或构件中含有裂纹的力学学科。实际上，任何材料或构件都不可避免地存在缺陷，缺陷顶端曲率半径无限小时，就是裂纹。裂纹是缺陷中最常见，最危险的一种，断裂力学研究缺陷的几何模型就是裂纹。在使用过程中，材料产生分离，或构件产生断裂，分析其主要原因，多数都是由于裂纹的存在、扩展和合并而引起的。断裂力学就是研究这种破坏规律的学科。

由于断裂这一宏观物理现象受到微观组织和微观断裂机理的影响，因此，研究断裂要采用多学科的方法，涉及的领域很广。但是断裂力学属于力学的领域，它主要以弹性力学和塑性力学的理论为基础，用力学的方法研究材料或构件含裂纹时的力学问题，建立它自己的概念、理论和实验，形成了固体力学的一个很大的分支，内容包括线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学。本章只介绍在抽油杆应用中有关的断裂力学基础知识，它主要包括裂纹顶端的三种基本变形型式、裂纹顶端的弹性应力分量和位移分量、应力强度因子、裂纹顶端塑性区、断裂韧度、断裂判据、疲劳裂纹扩展、应力腐蚀裂纹扩展、腐蚀疲劳裂纹扩展。

第一节 裂纹顶端三种基本变形型式

图1-1 (1) 所示为一裂纹顶端，设裂纹前缘上任意点 o 为坐标原点，在该点，包含在裂纹面内的主法线为 x 轴，垂直于裂纹面的副法线为 y 轴，切线为 z 轴，这样就构成了裂纹前缘的直角坐标系 (x, y, z) ；若在 xy 平面内取极坐标 (r, θ) ，于是又

构成了裂纹前缘的圆柱坐标系 (r, θ, z) 。这些都是断裂力学中通常规定的坐标系。在这些坐标系中的任一点P, 其应力分量如图1-1(2)所示。相应于 x, y, z 的位移分量分别为 u, v, w 。

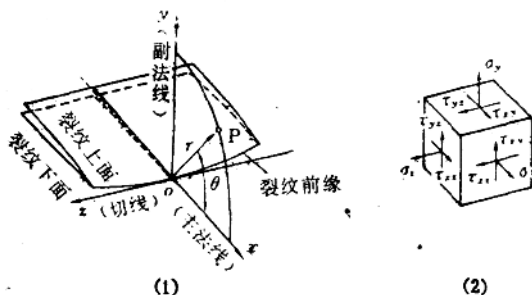


图1-1 裂纹顶端前缘的坐标系和应力分量

为了建立弹性体裂纹应力分析方法, 在图1-1(1)中的点 o 附近取出微小部分, 从弹性力学的叠加原理考虑, 可以得到裂纹顶端的三种基本变形型式如图1-2所示。这三种裂纹的基本变形型

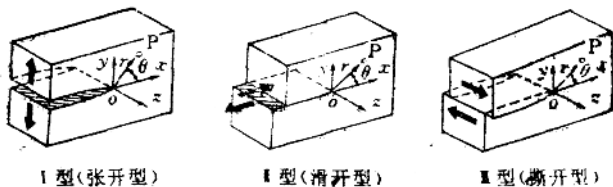


图1-2 裂纹顶端附近三种基本变形型式

式分别称为 I 型(张开型)、II 型(滑开型)、III 型(撕开型)。这三种裂纹基本变形型式的受力特点是: I 型裂纹受垂直于裂纹面的拉伸作用, 使裂纹上下两表面产生沿 y 轴的相对张开变形; II 型裂纹受平行于裂纹面而垂直于裂纹前缘的剪应力作用, 使裂纹上下两表面沿 x 轴产生相对滑开变形; III 型裂纹受既平行裂纹面又平行于裂纹前缘的剪应力作用, 使裂纹上下两表面沿 z 轴在 xy 平面外产生相对撕开变形。

这三种基本变形 I、II、III 的每一种，都对应着裂纹顶端附近的某一种基本应力场。因此，裂纹顶端的变形可以看作是这三种基本变形 I、II、III 之一或组合。而裂纹顶端的应力场可以看作是这三个基本应力场 I、II、III 之一或组合。

第二节 裂纹顶端弹性应力分量和位移分量

Irwin^[1]用 Westergaard^[2]方法，求出了 I、II、III 型裂纹顶端应力分量和位移分量为

I 型：

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{pmatrix} \quad (1-1)$$

$$\tau_{yx} = \tau_{zx} = 0$$

$$\sigma_z = \begin{cases} \nu(\sigma_x + \sigma_y) & (\text{平面应变}) \\ 0 & (\text{平面应力}) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{2K_I}{E'} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{cases} \cos \frac{\theta}{2} \left[(-\nu') + (1 + \nu') \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - (1 + \nu') \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \end{cases} \quad (1-2)$$

$$w = \begin{cases} 0 & (\text{平面应变}) \\ -\int \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) dz & (\text{平面应力}) \end{cases}$$

I 型:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_{\text{II}}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zy} = 0$$

$$\sigma_z = \begin{cases} \nu(\sigma_x + \sigma_y) & (\text{平面应变}) \\ 0 & (\text{平面应力}) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{2K_{\text{II}}}{E'} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{pmatrix} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + (1 + \nu') \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ \cos \frac{\theta}{2} \left[-(1 - \nu') + (1 + \nu') \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \end{pmatrix} \quad (1-4)$$

$$w = \begin{cases} 0 & (\text{平面应变}) \\ -\frac{\nu}{E} \int (\sigma_x + \sigma_y) dz & (\text{平面应力}) \end{cases}$$

II 型 (面外剪切):

$$\begin{pmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \frac{K_{\text{III}}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \quad (1-5)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0$$

$$w = \frac{2(1+\nu)}{E} K_{\text{III}} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1-6)$$

$$u = v = 0$$

式 (1-1) ~ (1-6) 中的

$$E = \begin{cases} \frac{E}{1-\nu^2} & (\text{平面应变}) \\ E & (\text{平面应力}) \end{cases}$$

$$\nu' = \begin{cases} \frac{\nu}{1-\nu} & (\text{平面应变}) \\ \nu & (\text{平面应力}) \end{cases}$$

E ——弹性模量；

ν ——Poisson系数。

以上三种裂纹变形型式的应力分量可以用下标记号分别缩写成

$$\sigma_{i,j}^I(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{i,j}^I(\theta) \quad (1-7)$$

$$\sigma_{i,j}^{II}(r, \theta) = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{i,j}^{II}(\theta) \quad (1-8)$$

$$\sigma_{i,j}^{III}(r, \theta) = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{i,j}^{III}(\theta) \quad (1-9)$$

式(1-7)~(1-9)表明，裂纹顶端弹性应力分量在三种基本型式的每一种都是由三部分组成： $f_{i,j}(\theta)$ 称角函数，是确定的； $r^{-\frac{1}{2}}$ 称为裂纹顶端应力场 $r^{-\frac{1}{2}}$ 阶奇异性，也是确定的； K 是裂纹顶端 $r \rightarrow 0$ 的待定常数，是应力分量的共同因子，表征裂纹顶端应力场强度，简称应力强度因子(Stress Intensity Factor, SIF)，由裂纹体不同的具体情况而确定，不同具体情况，其应力强度因子是不相同的。应力强度因子是断裂力学中的一个重要物理量， K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分别称为I、II、III型裂纹的应力强度因子。从式(1-1)~(1-6)不难看出，当裂纹体的应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 确定之后，该裂纹体裂纹顶端的应力分量、位移分量也就完全确定了。

当裂纹体中I、II、III型裂纹同时存在的复合型情况(一般

情况), 裂纹顶端应力场可以用式(1-7)~(1-9)三种之和表达, 即

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [K_I f_{ij}^I(\theta) + K_{II} f_{ij}^{II}(\theta) + K_{III} f_{ij}^{III}(\theta)] \quad (1-10)$$

第三节 应力强度因子

一、应力强度因子定义

研究在 x 轴上, $\theta=0$ 的裂纹顶端应力分量, 可将式(1-1)、(1-3)、(1-5)代入式(1-10), 得到

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2\nu \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

于是可将应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 定义为

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_x(r, 0) \quad (1-11)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy}(r, 0) \quad (1-12)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{yz}(r, 0) \quad (1-13)$$

由此可知, 应力强度因子 K 只是在裂纹顶端附近才存在, 在裂纹顶端精确地存在, 在裂纹顶端附近近似地存在。式(1-11)~(1-13)用于由应力分量确定应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 。

确定应力强度因子的方法很多, 按采用的主要手段, 大致可分为三种类型: 解析法; 数值算法; 实验研究法。复杂的裂纹体问题, 目前多用数值算法或实验研究法。

二、应力强度因子实例

1. 均匀拉应力无限板中心穿透裂纹

如图1-3所示，这是二维裂纹的简单例子，用Westergaard应力函数法可以求得应力强度因子的精确解为^[3]

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-14)$$

$$K_{II} = K_{III} = 0$$

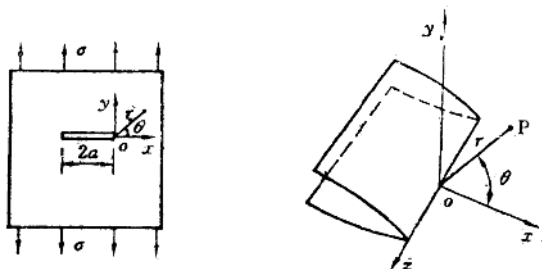


图1-3 均匀拉应力无限板中心穿透裂纹

2. 均匀拉应力无限板一系列长度相等、间距相同的共线穿透裂纹

如图1-4所示，这也是二维问题，用Westergaard应力函数法可以求得应力强度因子的精确解为^[3]

$$K_I = \left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-15)$$

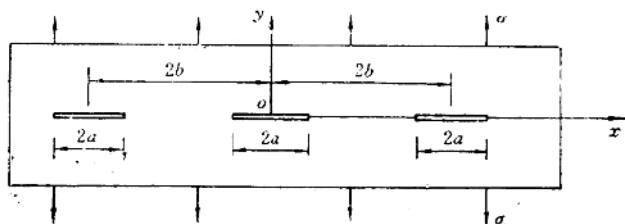


图1-4 均匀拉应力无限板一系列共线穿透裂纹

由于式(1-15)中的系数 $\left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b}\right)^{1/2} < 1$ ，因此，一系列共线裂纹间的相互影响，使应力强度因子比图1-3中的单个裂纹时提高了。只有当 $b \gg a$ ，裂纹间相距甚远，使 $\left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b}\right)^{1/2} \rightarrow 1$ 时，则共线多裂纹问题才能作为单裂纹考虑，否则是偏于危险的。

3. 均匀拉应力无限板一系列等长度、等间距的平行穿透裂纹

如图1-5(1)所示。其应力强度因子为^[4]

$$K_I = Y_I \left(\frac{a}{h}\right) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-16)$$

式中 $Y_I\left(\frac{a}{h}\right)$ 由图1-5(2)的图线查得。

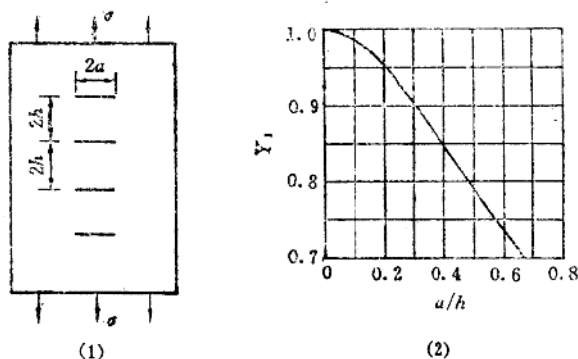


图1-5 均匀拉应力无限板—系列平行裂纹

将式(1-16)与式(1-14)比较可知，平行多裂纹的相互影响，使应力强度因子比单裂纹时减小。当 $a/h \rightarrow 0$ 时， $Y_I(a/h) \rightarrow 1$ ，即表明，当平行裂纹间距与裂纹长度之比很大时，平行多裂纹问题与其中一个单裂纹问题近似。同时还表明，将平行多裂纹视为

一个单裂纹考虑在工程上是偏于安全的。

4. 均匀拉应力半无限板边穿透裂纹

如图1-6所示, 可视为从图1-3中取出一半构成。此时左边的自由边界对裂纹顶端应力强度因子有影响, 用积分变换法得应力强度因子为^[6]

$$K_I = 1.1215\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1-17)$$

5. 均匀拉应力有限宽板单边穿透裂纹

如图1-7所示。由于有限宽板增加了右自由边界对裂纹顶端应力强度因子的影响, 故其应力强度因子不同于半无限大板边穿透裂纹的式(1-17), 而为^[6]

$$K_I = \left[1.12 - 0.23\left(\frac{a}{W}\right) + 10.55\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.70\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.35\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1-18)$$

当 $a/W \ll 1$, 式(1-18)成为 $K_I \approx 1.12\sigma\sqrt{\pi a}$, 于是图1-7所示情况就近似于图1-6的半无限板边穿透裂纹的情况。

6. 均匀拉应力有限宽板中心穿透裂纹

如图1-8所示。由于有限宽板的边界对裂纹顶端应力强度因



图1-6 均匀拉应力半无限板边穿透裂纹

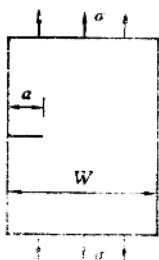


图1-7 均匀拉应力有限宽板单边穿透裂纹

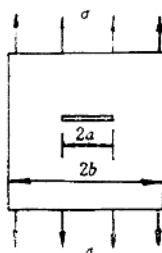


图1-8 均匀拉应力有限宽板中心穿透裂纹

子的影响，故不同于图1-3的情况。一种简单的办法是，从图1-4中截取图1-8所示的情况，此时，其应力强度因子可近似为

$$K_I \approx \left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-19)$$

由此可见，有限宽板边界的影响使应力强度因子比无限宽板时提高了。当板足够宽时，例如 $a/b = 0.1$ ，则有 $\left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \approx 1.004$ ，可见当板宽 $2b$ 大于裂纹长 $2a$ 一个数量级时，将有限宽板视为无限宽板就能满足工程精度要求。

此外，对这一问题尚有以下一些近似式，例如

$$K_I = \left(\sec \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-20)$$

$$K_I = \left[1 + 0.128 \left(\frac{a}{b} \right) - 0.288 \left(\frac{a}{b} \right)^2 + 1.525 \left(\frac{a}{b} \right)^3 \right] \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-21)$$

7. 均匀拉应力矩形板中心穿透裂纹

如图1-9(1)所示，它既不同于图1-3所示的无限板，也不同于图1-8所示的有限宽无限长板的情况。因为矩形板有限宽 $2b$ 的边界和有限长 $2h$ 的边界对应力强度因子都有影响，此时应力强度因子为^[7]

$$K_I = Y_I(\alpha, \beta) \sigma \sqrt{\pi a}, \quad \alpha = \frac{a}{b}, \quad \beta = \frac{h}{b} \quad (1-22)$$

式中 $Y_I(\alpha, \beta)$ 由图1-9(2)的图线查得。

由此不难看出，图1-9的情况与图1-3、图1-8的情况相比较，其应力强度因子值都较大，原因就是有限边界的影响。

8. 集中力矩形板中心穿透裂纹

如图1-10(1)所示。虽然裂纹体与图1-9(1)完全相同，
— 10 —