

弹塑性断裂分析 工程方法

〔美〕 V.库默 M.D.杰曼 C.F.施 著

国防工业出版社

弹塑性断裂分析工程方法

〔美〕 V. 库默 M. D. 杰曼 C. F. 施 著

周洪范 周黉秋 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍的是美国通用电气公司研究发展中心对含裂纹构件进行弹塑性断裂分析研究的基础上提出的一整套工程估算方法。内容包括四种通用试样和三种典型构件的全塑性解、 J 积分、裂纹张开位移、加载点(线)位移等弹塑性断裂分析的理论模型及计算图表。书中给出了经试验验证和有限元验算的三种工程设计实用图形及一组不同裂纹尺寸比与硬化指数的相关曲线。全书共分八章,前五章论述现代弹塑性断裂分析的理论基础及试样和典型构件的全塑性解和评定方程。后三章论述裂纹驱动力图、稳定性评定图和失效评定图及其工程应用。

本书可供从事产品设计、选材、强度研究、寿命估算的广大科研人员及高等院校从事弹塑性断裂力学教学的师生参考。

An Engineering Approach for Elastic-Plastic
Fracture Analysis

V. Kumar M. D. German C. F. Shih

Electric Power Research Institute, Inc. 1981

*

弹塑性断裂分析工程方法

〔美〕V. 库默 M. D. 杰曼 C. F. 施 著

周洪范 周贇秋 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 $1/32$ 印张5 $9/4$ 125千字

1985年9月第一版 1985年9月第一次印刷 印数: 0,001—3,560册

统一书号: 15034·2916 定价: 1.10元

科技新书目 103—133

译者序

工业中广泛应用的中低强度钢及高温构件材料，由于其裂纹前端的相对塑性区很大，处于大范围屈服条件，对于此类构件及材料，线弹性断裂力学方法是不适用的。

七十年代以来，用弹塑性断裂力学方法分析研究诸如压力容器管道、焊接构件、抗蠕变构件等低应力脆断问题已取得了可喜的进展。 J 积分理论和裂纹张开位移(COD)理论均得到相应的发展。美国材料试验学会(ASTM)于1977年及1981年召开了第一届和第二届国际弹塑性断裂力学会议，会议论文、涉及弹塑性断裂力学理论分析、断裂判据、测试技术和工程应用等方面。《弹塑性断裂分析工程方法》是美国通用电气公司研究发展中心在第二届国际弹塑性断裂力学会议召开前夕编辑的。反映了当前有关弹塑性断裂力学研究应用成果，提出了一整套工程估算方法。以四种通用型断裂试样，三种典型构件的大量试验数据为依据，通过有限元计算验证，归纳出三种直接用于工程设计的图形——裂纹驱动力图(据以分析构件从裂纹起始至失稳扩展全过程)、稳定性评定图(据以确定构件出现稳定或失稳状态的载荷范围)、失效评定图(据以作出构件安全或破坏的快速判断)。

书中论述了现代弹塑性断裂理论基本概念，提出了标准试样及典型构件的全塑性解、 J 积分、裂纹张开位移、加载点(线)位移等弹塑性分析理论模型和图表。给出了一组不

同裂纹尺寸比与硬化指数的相关曲线。具有理论与实际相结合的特点，因而它对产品设计选材、强度研究、寿命估算，以及材料试验如何与结构设计相结合等方面，均有一定参考价值。

为了更好地将弹塑性断裂分析方法应用于工程实际，我们翻译这本书供有关人员参考。由于译者水平有限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

概要	1
第一章 前言	3
1.1 背景	3
1.2 断裂分析	4
1.3 工程方法	5
1.4 本报告中的结构	8
参考文献	8
第二章 理论基础	10
2.1 引言	10
2.2 工程方法的技术基础	11
2.2.1 裂纹尖端参量	11
2.2.2 J控制裂纹扩展	15
2.2.3 J控制裂纹扩展的条件	16
2.2.4 用J积分方法分析裂纹扩展及稳定性	18
2.3 全塑性解	19
2.4 弹-塑性评定方法	22
2.5 用工程方法进行断裂分析	23
参考文献	25
第三章 试验用试样的全塑性解	29
3.1 前言	29
3.2 紧凑拉伸试样	31
3.2.1 全塑性解	31
3.2.2 弹-塑性评定方程	35

3.3 受拉伸的中心开裂平板	36
3.3.1 全塑性解	36
3.3.2 弹-塑性评定方程	40
3.4 三点弯曲单边开裂平板	42
3.4.1 全塑性解	42
3.4.2 弹-塑性评定方程	46
3.5 受均匀拉伸的单边开裂平板	47
3.5.1 全塑性解	47
3.5.2 弹-塑性评定方程	51
3.6 受拉伸的双边开裂平板	52
3.6.1 全塑性解	52
3.6.2 弹-塑性评定方程	56
参考文献	57
第四章 含裂纹圆筒的弹性解及全塑性解	60
4.1 前言	60
4.2 内部含轴向裂纹的内压圆筒	62
4.2.1 弹性解	62
4.2.2 全塑性解	63
4.2.3 弹-塑性评定方程	65
4.3 内部含环向裂纹远处受拉伸的圆筒	66
4.3.1 弹性解	66
4.3.2 全塑性解	67
4.3.3 弹-塑性评定方程	70
参考文献	71
第五章 喷嘴角裂纹的二维平板模型	73
5.1 前言	73
5.2 全塑性解	74
5.3 弹-塑性评定方程	75

参考文献	76
第六章 裂纹驱动力图: 工程方法的应用与验证	77
6.1 前言	77
6.2 紧凑拉伸试样裂纹驱动力图实例	78
6.3 用裂纹驱动力图进行失稳分析	85
6.4 受拉伸的含环向裂纹圆筒的裂纹驱动力图	88
6.5 承受内压的含轴向裂纹圆筒的裂纹驱动力图	93
6.6 工程方法的其它应用	95
6.6.1 载荷-位移特性的预测	95
6.6.2 根据载荷-位移记录确定 J_R 曲线	96
6.7 结束语	99
参考文献	100
第七章 稳定性评定图	102
7.1 前言	102
7.2 紧凑拉伸试样稳定性评定图	106
7.3 含轴向裂纹圆筒受内压时的稳定性评定图	108
7.4 含环向裂纹圆筒远处受拉伸时的 稳定性评定图	109
参考文献	110
第八章 失效评定图	112
8.1 前言	112
8.2 按 J 控制裂纹扩展建立的失效评定图	113
8.3 几种裂纹形状的失效评定图	118
8.3.1 无裂纹扩展时的失效曲线	118
8.3.2 裂纹尺寸变化时的失效曲线	123
8.4 失效评定图的应用	124
参考文献	125
附录 A 几种应力-应变法则的估算公式	126
附录 B 修正的 J 积分表达式	129
附录 C h 函数与 $1/n$ 关系图	132

概 要

本报告包含了用于弹塑性断裂分析的工程方法要点。这种方法提供了一种对含裂纹构件所用材料在弹塑性和全塑性变形范围内预测断裂的简便方法。工程方法的要点是：(i) 以手册形式汇编的 J 积分全塑性解，各种形状的裂纹的裂纹张开位移和加载线位移。(ii) 可算出基于全塑性解和现有弹性解相结合的方法所得到的含裂纹体弹塑性裂纹驱动力解的工程评定方法。(iii) 用裂纹驱动力估计值与用标准试样得到的阻力曲线相结合来预测裂纹起始、裂纹稳定扩展和失稳的简便图解法。根据上述要点，我们可求得含裂纹构件的承载能力和安全极限等重要结果。

全塑性解的数据包括各种形状的试样和一些通用型构件的解。试样有中心开裂平板、双边开裂平板、单边开裂平板（拉伸及弯曲），以及紧凑拉伸试样。这些解均按平面应力和平面应变两种情况给出。构件包括含轴向裂纹和环向裂纹的圆筒以及一种喷嘴角裂纹二维模型。用一种不可压缩有限元法求出全塑性解。

工程方法简要归纳了弹性解和全塑性解而形成弹塑性评定法。对评定方法进行了大量验证研究，并将其结果与实验数据以及完全有限元裂纹解作比较。在所有情况下均证实，工程评定法得到的解具有足够的精度。用建立的 J 积分裂纹驱动力解和由实验求得的材料 J 阻力曲线进行含裂纹构件的断裂分析，可预测裂纹起始、稳定扩展、失稳以及其他与整

个断裂行为有关的参数值。根据使用情况，可建立几种不同的分析图。这些图通常称为“裂纹驱动力图”，“稳定性评定图”和“失效评定图”。裂纹驱动力图可对裂纹起始至失稳扩展的整个裂纹扩展过程进行有效的分析。其他两个图中，稳定性评定图可确定出现稳定及失稳行为的载荷范围。失效评定图可作出构件是否发生破坏的快速判断。报告中列举了一些说明上述图形结构及其应用的实例。

第一章 前 言

1.1 背 景

目前,核动力系统的结构完整性是根据严格遵守美国机械工程师学会(ASME)锅炉和压力容器规范及各项调试标准的设计来保证的。这些规范和标准提出的技术要求是根据线弹性断裂力学(LEFM)概念制订的。严格说来,线弹性断裂力学仅适用于材料性能主要表现为弹性和脆性断裂的情况。然而,在核动力系统的大部分或全部工作温度范围内,材料是在高于脆性-延性转变温度下承载,材料为延性断裂,并产生大量塑性变形。这时如用线弹性断裂力学方法,将会作出不确切的断裂分析。其结果将使设计不能充分发挥材料的全部承载能力。这种不确切的设计,不仅在核动力工业中,在动力发电厂、化工厂以及飞机推进系统等工业中也同样存在。

近年来,弹塑性断裂力学研究表明:用弹塑性断裂力学分析方法,可以更精确地测定断裂性能和设计范围。在这方面,过去七年来已取得了一些重要的进展。其典型进展见文献[1-1]~[1-10]所述。

弹塑性断裂力学的开拓者,在建立表征延性断裂过程的参量中是卓有成效的。为了评定材料的断裂抗力,他们研究出实验技术和断裂分析方法。然而对这些方法进行必要的计算,还要作精确的分析。通常可借助于先进的有限元方法来

完成。这种方法昂贵、费时，并要求具备较深的专业知识。这说明应用弹塑性断裂力学概念时，会遇到一些困难。

为了克服上述困难，提高弹塑性断裂力学的实用价值，这种方法允许由那些并非断裂力学专家或弹性分析专家们来完成含裂纹构件的断裂分析，而且不必进行任何有限元计算，只需进行案头计算和简单的图解法。这种廉价的方法，便于工程设计人员掌握。

1.2 断 裂 分 析

弹塑性范围内的断裂分析，包括大量在弹性范围内不会出现的复杂问题。首先是材料变形的非线性及显著的几何形状的变化。更复杂的是裂纹起始前，顶端明显地钝化和最终断裂前裂纹的稳定扩展。这种断裂模型与脆性断裂模型截然不同。在脆性断裂模型（如解理型）中，裂纹起始和快速扩展几乎是同时进行的。第三个问题是复合型断裂的分解问题。即在延性断裂时，既有平直的也有斜向的裂纹扩展。

本文提出的延性断裂方法，除复合型断裂可能性外，包括以上讨论的所有问题。目前仅限于像厚壁压力容器中出现的可能出现的平直形延性撕裂型断裂分析。延性断裂过程中各阶段，可用图 1-1 作定量的描述，并列举如下：

1. 原始尖裂纹的钝化；
2. 裂纹起始；
3. 裂纹缓慢（稳定）扩展；
4. 裂纹失稳扩展。

延性断裂过程中的失稳点，很大程度上取决于加载系统。对于单调递增的载荷控制系统来说，含裂纹构件的最大承载能力即表明裂纹失稳扩展的开始，进一步增加载荷，将导致

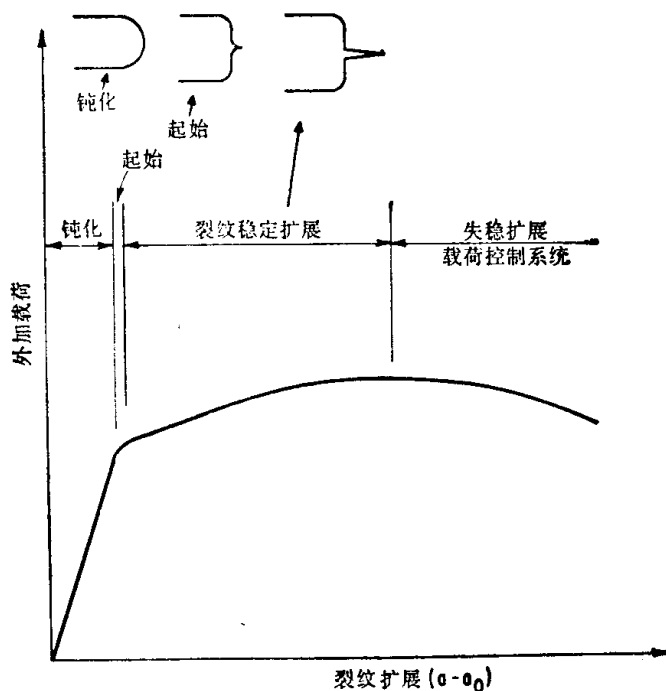


图1-1 延性材料的典型裂纹扩展行为

裂纹快速扩展。对于位移控制情况来说，含裂纹构件不必达到最大承载能力就会造成失稳。在远离最大载荷的某点，可能发生失稳，或根本不会发生失稳。载荷控制和位移控制的情况，表明构件和系统柔度的极限值。更普遍的情况是处于这两个极限之间的某一柔度。本方法允许使用者将系统柔度和失稳分析结合起来。

建

1.3 工程方法

通过裂纹尖端表征参量 J 积分[1-1]，对上述延性断裂过程各阶段作了定量分析，从而建立了工程方法。本报告第

二章讨论了 J 积分在延性断裂分析中的分析基础及其使用局限性。这里还提出了如何用 J 积分构成工程方法的详细说明。本方法包括以下基本要点:

1. 以手册形式汇编的含裂纹全塑性构件的 J 积分解。手册也包括裂纹嘴张开位移及加载点位移的解。
2. 综合全塑性条件和现有的弹性解手册数据, 从而得到构成含裂纹体弹塑性解的评定法 (裂纹驱动力评定)。
3. 综合裂纹驱动力评定和由标准试样测定的阻力曲线, 建立预测裂纹起始、裂纹稳定扩展和失稳的简便方法。

全塑性解分类, 包括各种形状的试验室试样和一些常见的构件。试样有中心裂纹平板、双边裂纹平板、单边裂纹平板 (拉伸及弯曲)、以及紧凑拉伸试样。这些试样的平面应力和平面应变解均用表列出。常见构件包括含轴向及环向裂纹的圆筒, 含二维角裂纹的喷嘴。并用专门的不可压缩有限元方法处理全塑性解。

评定方法实质上是综合弹性和全塑性解而形成弹-塑性评定。如图 1-2 所示。现已进行了大量的验证研究, 在研究中将评定方法的解与实验数据及完全的有限元裂纹解作了比较。在上述所有情况下, 均证实评定方法的解是足够精确的。

将评定方法得到的 J 积分裂纹驱动力与用实验测定的材料 J 阻力曲线结合起来, 可预测含裂纹构件的裂纹起始、稳定扩展和失稳。通常提出几种不同的分析图形。这些图形称为“裂纹驱动力图”、“稳定性评定图”、及“失效评定图”。按照裂纹驱动力图, 可详细分析从裂纹起始到失稳的断裂全过程各阶段。其余两个图为决定出现稳定或失稳行为的承载范围的稳定性评定图, 以及快速判断是否存在断裂问题的失效评定图。用于本报告的方法如图 1-3 所示。

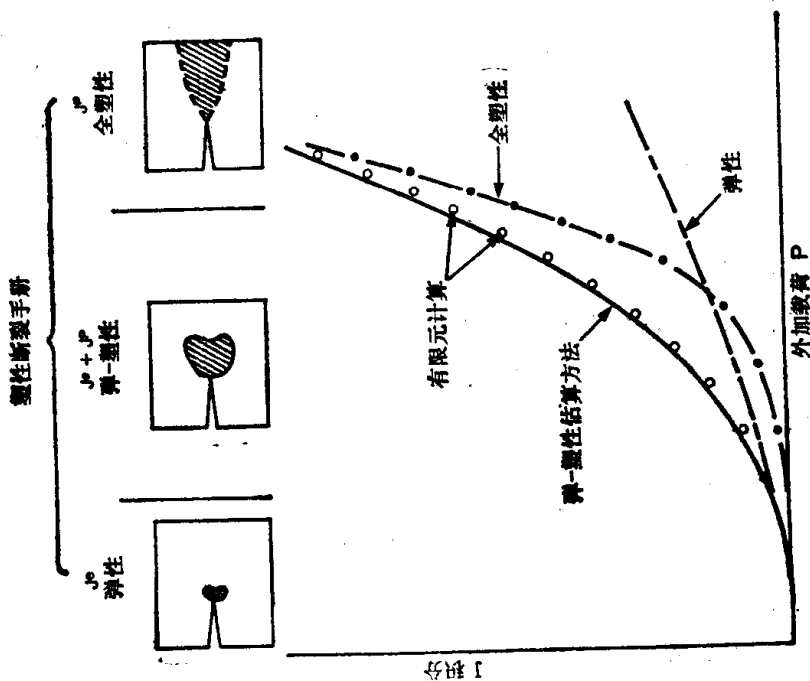


图1-2 弹-塑性评定方法的说明

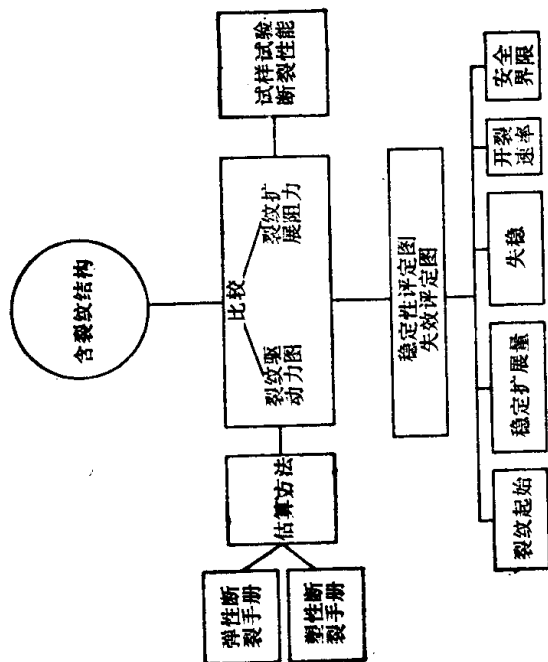


图1-3 检验含裂纹构件裂纹扩展及稳定性的工程方法示意图

1.4 本报告中的结构

本报告共分八章。下接的第二章为构成工程方法的理论基础。在第二章中，明确了 J 积分和 J 控制裂纹扩展率的概念。报告还给出了按撕裂模量 J 积分进行稳定性分析的概念。并简要说明了推导全塑性解的理论基础、评定方法、以及各种断裂分析图。第二章的材料选自附录 A，其中对评定方程作了详细说明。

第三、四、五章包括目前已得到的全塑性解。第三章为试样的全塑性解。第四章为圆筒构件全塑性解。第五章为喷嘴角裂纹模型全塑性解。第四章和第五章还包括本文提出的弹性解。因为这些解尚未在文献中发表过。每章中的解均按表格及附录 B 的图形给出。每章均给出构成全塑性解的详细技术说明以及个别构件的具体评定方程。

报告的最后三章，第六、七、八章，对各种断裂分析图的构成，以及许多阐明其用法的例子作了详细说明。很多例子用于验证工程方法。第六章为裂纹驱动力图。第七章为稳定性评定图。第八章为失效评定图。

读者中的很多人，可不必掌握本方法的全部理论基础及其使用局限性方面的知识。当然掌握这些知识也无妨。这样，第二章中很多内容都可以略去不读。应用全塑性解时，只需阅读 2.3、2.4 及 2.5 各节，以及列表给出全塑性解的各章的前言部分。为了构成各种分析图，使用者可根据具体情况阅读第六、七、或第八章。

参 考 文 献

- [1-1] J. R. Rice, "Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture," in Fracture (ed. by H. Liebowitz), 1968, Vol. II, Academic Press, New York pp. 191-311,

- [1-2] J. F. Knott, Fundamentals of Fracture, John Wiley and Sons, New York, 1973.
- [1-3] Elastic-Plastic Fracture, Edited by J. D. Landes, J. A. Begley and G. A. Clarke, ASTM Special Technical Publication 668, American Society for Testing and Materials, 1979.
- [1-4] Fracture Mechanics, Edited by P. C. Paris, ASTM Special Technical Publication 700, American Society for Testing and Materials, 1980.
- [1-5] J. W. Hutchinson, Nonlinear Fracture Mechanics, Technical University of Denmark, 1979.
- [1-6] Developments in Fracture Mechanics -1, Edited by G. G. Chell, Applied Science Publishers, Ltd., London, 1979.
- [1-7] Post-Yield Fracture Mechanics, Edited by D. G. H. Latzko, Applied Science Publishers, Ltd., London, 1979.
- [1-8] Advances in Elasto-Plastic Fracture Mechanics, Edited by L. H. Larsson, Applied Science Publishers, Ltd., London, 1980.
- [1-9] EPRI Ductile Fracture Research Review Document, Edited by T. Marston, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1978.
- [1-10] EPRI Ductile Fracture Research Review Document, Edited by D. M. Norris, et al., Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1980.