

//



GT

陈国华 编著

结构完整性评估

21 世纪 固 体 力 学 丛 书

科学出版社

21 世纪固体力学丛书

结构完整性评估

陈国华 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

结构完整性技术是 20 世纪末国际工程界十分关注的课题,而风险工程学则被美国列为 21 世纪四大闪光技术之一。本书以结构完整性技术的最新进展、基本原理、评定方法、工程应用为主线,结合结构完整性保障技术(风险工程学),较全面地介绍结构完整性技术体系。主要包括:结构完整性评定基础,结构完整性评定方法,结构完整性概率评估方法,缺陷参数不确定性的工程处理方法,焊接接头断裂韧性分布规律与试验研究,结构完整性评估的无损检测技术,结构完整性技术的工程应用,结构完整性保障技术。

本书力求做到:博采精选,融会贯通;章节独立,自成体系;原理应用,相辅相成;简明扼要,深入浅出,以满足不同层次的读者需求。本书可供从事工厂设备安全管理、结构完整性评估及无损检测等研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构完整性评估/陈国华编著. —北京:科学出版社,2002
(21 世纪固体力学丛书)
ISBN 7-03-010943-0

I. 结… II. 陈… III. 工程结构-完整性-可靠性估计
IV. TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 088995 号

责任编辑:匡 敏 沈 建 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:张 放

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源 海 印 制 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 11 月 第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2002 年 11 月第一次印刷 印张: 11 3/4

印数: 1 - 3 500 字数: 233 000

定价: 24.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈兰各〉)

《21 世纪固体力学丛书》编委会

主 编 黄培彦

副主编 韩 强

编 委 (以姓氏笔画为序)

汤立群 陈国华 罗 毅

贺玲凤 贾乃文 曾庆敦

总 序

自从产业革命以来,在工业技术的发展中,力学曾大显身手。特别是 20 世纪中叶以来,近代力学基础性、探索性的超前研究曾对当代产业例如航空、航天工业的发展起到过主导的作用。从中国固体力学取得了令人瞩目的成就。

随着知识经济和信息时代的到来,21 世纪我国经济建设将会加速发展。一大批高新技术产业和跨世纪骨干产业的形成,将会带来许多新的复杂的工程实际问题,这不仅为固体力学提供了大量的新课题,而且亦成为固体力学学科发展的新动力。固体力学既要适应生产实际的发展,面向工程实际,解决生产难题,同时亦应从工程实际中提炼出具有普遍性的问题进行系统的研究,促进各分支学科的成长,从而推动整个固体力学学科的发展。

中青年学者尤其青年学者是 21 世纪我国固体力学研究领域的主力军。目前,一大批优秀的青年学者已经成长为新一代的学科带头人,活跃在固体力学的诸多前沿研究领域。由他们联合撰写的固体力学系列专著,从各自不同的研究角度出发,反映了最新的研究成果及其发展趋势,对该学科的发展具有重要的影响和参考价值。毫无疑问,《21 世纪固体力学丛书》在这方面做了一个很好的尝试。

《21 世纪固体力学丛书》围绕固体力学的若干前沿研究领域,基于近代固体力学理论的最新研究成果,在结构的疲劳设计、概率断裂力学、复合材料强度理论、非线性力学以及新的实验测试技术等方面进行了系统的总结。该丛书不仅阐述了基本概念、基本理论、基本方法,而且有许多内容是作者们多年来卓有成效的研究成果,具有理论与应用并重的特色,有助于初次涉足这一领域的学生和研究人员在较短的时间内从较高的起点上开展固体力学的研究工作。

我相信,《21 世纪固体力学丛书》的出版将会对固体力学的理论研究和工程应用发挥积极的促进作用。

高镇同

前 言

现代工业发展的趋势是工厂大型化、生产规模化、装置或结构的大型化、高参数化,这一方面对结构的安全可靠性和使用寿命构成较大的威胁,另一方面对材料、工艺、制造、安装及工程质量和系统安全可靠性的要求。为确保结构的强度、寿命和安全性,需要建立一套科学、完整的质量保证体系及可应用于工程实际的标准、规范、方法。从产品的设计、选材、制造、安装、运行、检修、安全评估等各过程进行系统、严格、科学的管理,并制定相应的标准或规范,这是大型化、高参数化装置安全高效运行的有力保证。以断裂力学(包括概率断裂力学)、弹塑性力学、材料科学、可靠性工程、系统工程、风险工程学为基础的更为科学的标准,是以“适用性”或“合于使用”为原则的标准,是兼顾了结构的安全可靠性和经济性而建立起来的结构完整性评估理论及工程应用方法,人们可以由此获得巨大的经济效益。

根据结构完整性评估技术和风险工程学发展的新趋势,考虑到我国“八五”科技攻关项目新编制的相应规程(综合稿)中尚未涉及含缺陷焊接结构安全评定的可靠性(概率)及风险工程学的应用内容,为此,以国家自然科学基金资助项目“基于可靠性理论和模糊方法的焊接结构缺陷安全评定研究”(批准号:59575028)及“结构可靠性在线超声智能评价技术研究”(批准号:50005006)已开展的部分基础性研究成果,并结合国内外学者在结构完整性及风险工程学领域的研究工作,作为本书的主要内容进行较为系统的分析,以期作为对结构完整性评估技术的开拓性探索。

本书的基本特点在于将含缺陷焊接结构可靠性评价理论、工程方法、应用软件、工程案例等贯穿成线、有机结合、融为一体。本书一方面较深入地探讨了目前结构完整性评价技术的最新进展和动态,在分析和研究国际上现有规程和方法的基础上,提出自己的观点,为结构完整性评价提供了重要的手段;另一方面将概率安全评定原理、方法应用于工程实际,并简要介绍了结构可靠性智能超声无损检测的若干关键技术及原理,设备管理、维修、诊断的一体化保障技术,确定设备维修周期和延长设备寿命的方法,国外的设备安全可靠性管理技术,如 RCM 技术、RBI 技术、RII 技术,风险工程学的基本原理、分析方法及其工程应用等内容。

在本书的编著过程中,作者特别感谢南京工业大学戴树和教授、茂名石油化学公司顾望平副总工程师、华东理工大学李培宁教授、华南理工大学黄培彦教授,以及所有关心、支持、鼓励作者的同仁和朋友,他们给作者提供了宝贵的资料。本书参考了国内外众多学者的研究成果,在此一并表示感谢!

由于作者水平所限,缺点和错误在所难免,真诚欢迎广大读者不吝赐教!

目 录

总序

前言

第一章 结构完整性评定基础	1
1.1 结构完整性基本概念	1
1.2 结构完整性评定的基本原理	2
1.3 结构完整性评定的力学基础	4
1.4 结构完整性评定的基本程序.....	15
1.5 结构完整性技术的发展.....	17
1.6 本书主要内容简述.....	21
第二章 结构完整性评定方法	23
2.1 概述.....	23
2.2 基于双判据准则的结构完整性评定方法.....	25
2.3 结构完整性评定的概率方法.....	28
2.4 结构完整性评定规范新内容.....	29
2.5 小结.....	46
第三章 结构完整性概率评定方法	47
3.1 概述.....	47
3.2 基于双判据准则的概率安全评定分析框图.....	49
3.3 基于双判据准则概率安全评定随机干涉模型.....	50
3.4 失效概率 P_f 的计算表达式	52
3.5 失效概率 P_f 的计算方法	52
3.6 主要评定参数的不确定性.....	55
3.7 有二次应力存在时含缺陷焊接结构概率安全评定方法.....	56
3.8 概率安全评定参数敏感性分析.....	59
3.9 概率失效准则.....	60
3.10 计算程序的有效性检验	60
3.11 应用简例	61
3.12 小结	64
第四章 缺陷尺寸参数的工程处理方法	66
4.1 概述.....	66
4.2 缺陷尺寸分布规律研究进展.....	66

4.3	缺陷尺寸参数的工程处理方法	68
4.4	缺陷参数不确定性工程处理方法	78
4.5	小结	79
第五章	焊接接头断裂韧性分布规律与测试	80
5.1	概述	80
5.2	Weibull 断裂统计理论及其发展	83
5.3	J - R 阻力曲线的测试方法——单试样卸载柔度法	84
5.4	WDL 钢焊接接头 J - R 阻力曲线及断裂韧性 J_{IC}	88
5.5	WDL 钢焊接接头断裂韧性统计分析	91
5.6	小结	94
第六章	结构完整性评估的无损检测技术	96
6.1	NDT 技术概论	96
6.2	压力容器 NDT 技术	97
6.3	NDT 技术的研究热点	105
6.4	NDT 检出概率	106
6.5	结构活性缺陷的检测	109
6.6	结构可靠性智能超声检测若干关键技术	112
6.7	NDT 技术在锅炉压力容器安全中的应用展望	118
6.8	小结	120
第七章	结构完整性评估技术的工程应用	121
7.1	概率安全评定方法的计算程序及其工程应用	121
7.2	天然气球罐的可靠寿命评估	126
7.3	石化压力管道的完整性评定	129
7.4	核压力管道的概率安全评定	136
7.5	航空发动机结构完整性	141
7.6	小结	145
第八章	结构完整性保障技术	146
8.1	设备管理、维修、诊断的一体化保障技术	146
8.2	正确确定设备维修周期和延长设备寿命	155
8.3	国外设备安全可靠性管理技术	159
8.4	风险工程学及工程应用	164
8.5	小结	171
参考文献		172

第一章 结构完整性评定基础

本章主要介绍结构完整性的基本概念及评定步骤,结构完整性评定的力学基础(包括线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学、概率断裂力学、计算断裂力学及模糊断裂理论基础),各国结构完整性评定方法、标准、规范的发展概况等,同时阐述了结构完整性评定的工程应用背景和社会效益。

1.1 结构完整性基本概念

结构完整性(Integrity)是指结构中所含缺陷对满足规定功能要求和安全性与可靠性的影响程度。结构完整性或适用性评价(Fitness for Service or Fitness for Purpose Assessment)是对含缺陷结构能否继续使用的定量评价。

现代工业发展的趋势是工厂大型化、生产规模化、装置或结构的大型化、高参数化,石油炼制和化工装置更是如此。油气输送管道的发展趋势是大口径、长距离输送、高压输送和海底管道厚壁化。这一方面对结构的安全可靠性和使用寿命构成较大威胁,另一方面对材料、工艺、制造、安装及工程质量和系统安全可靠性的提出了更高、更严的要求。为确保结构的强度、寿命和安全性,需要建立一套科学、完整的质量保证体系及可应用于工程实际的标准、规范、方法。对产品的设计、选材、制造、安装、运行、检修、安全评估等各过程进行系统、严格、科学的管理,并制定相应的标准或规范,这是大型化、高参数化装置安全、高效运行的有力保证。目前,工程上有四类标准:第一类是产品设计标准,产品的设计方案对其本质可靠性起到决定作用;第二类是建造标准或质量控制标准,主要以工程实践经验为基础,用于产品质量、安全性控制和管理,建造标准适用于结构安装运行前的质量控制;第三类是运行过程安全监控标准,如《压力容器安全技术监察规程》等;第四类是以“适用性”或“合于使用”为原则的标准,是以断裂力学(包括概率断裂力学)、弹塑性力学、材料科学、可靠性工程、系统工程、风险工程学为基础的更为科学的标准,这类标准兼顾了结构的安全可靠性和经济性,可获得巨大的经济效益。

结构安装运行后,制造工艺或运行损伤造成的缺陷就会暴露出来,如依据质量控制标准判断,会导致巨大损失,这时应采用以“适用性”或“合于使用”为原则的标准。适用性评价包括定量检测结构中的缺陷,依据严格的理论分析来判定缺陷对结构安全可靠性的影响,对缺陷的形成、扩展及构件的失效过程、后果等做出判断,最后可按以下四种情况分别处理:

- 1) 对安全生产不造成危害的缺陷允许存在。

2) 对安全性虽不造成危害但会进一步发展的缺陷要进行寿命预测,并判定是否允许在监控下使用。

3) 若含缺陷构件降级使用时可保证安全可靠要求,可降级使用。

4) 对含有对安全可靠构成威胁的缺陷的构件,应立即采取措施,返修或停用。

适用性评价是对质量控制标准的必要补充和完善,在保证安全的前提下,可获得巨大的经济效益,如美国在石化工业中采用适用性评价标准每年可节约 10 亿美元以上,英国适用性评价标准的采用,也取得了可观的经济效益。

结构完整性评定规程作为一种新的方法体系是建立在合于使用的技术路线基础之上,并对这些问题提供了实际的解决方法。结构完整性方法,是为了使设计师在制造前就有可能保证结构满足结构完整性而提出的定量标准。结构完整性技术集中考虑尖锐裂纹以及冶金缺陷的影响,它们常常是大型结构的破坏源。结构完整性的基础是利用断裂力学的实验方法来精确测量断裂和裂纹扩展的性能,从而预测金属的破坏条件。

结构完整性技术需对工程中的各种可能方案作反复分析,必须全面考虑诸如备选的金属材料、裂纹状态的控制、结构设计的薄弱环节以及制造过程等各种因素。因此,结构完整性评定涉及诸多复杂因素。金属材料的裂纹敏感性则是重要因素之一,尤其对那些要求使用高强度金属(裂纹敏感性高)的结构,更应严格控制它的设计和制造。

结构完整性评定要进行定量无损检测,确定缺陷的种类、取向和大小;进行应力分析,根据构件承受的荷载,计算和测定构件有缺陷部位所受应力;测定或估算缺陷部位残余应力的大小;确定材料的力学性能,包括断裂强度 σ_b 、屈服强度 σ_s 、断裂韧性 K_{IC} 、疲劳裂纹扩展速率等,对于一般的材料可以从手册或专著查到这些数据,否则就要进行测定;根据应力大小、材料性能及缺陷情况进行断裂力学计算,判断缺陷的危险程度,还要考虑材料的使用环境,例如温度、腐蚀介质等。缺陷评定方法显然比质量控制方法复杂,涉及到工程结构、材料科学、无损检测等许多学科,因此,常常是由多种专业的人员来共同完成。

1.2 结构完整性评定的基本原理

结构完整性是在保证安全的前提下,评定对象能否满足原设计功效的一种度量指标。完整的结构必须保证在设计寿命或规定的检验周期内的任一时刻 t ,结构的广义实际应力 $\sigma_r(t)$ 始终小于结构的广义实际抗力 $S_r(t)$,即 $\sigma_r(t) < S_r(t)$ 。但由于许多不确定因素的影响,使得实际评定时难以准确地获得所需的 $\sigma_r(t)$ 和 $S_r(t)$,因此常采用简化的方法从偏保守的方向对 $\sigma_r(t)$ 和 $S_r(t)$ 进行估算,并利用下式进行结构完整性评定:

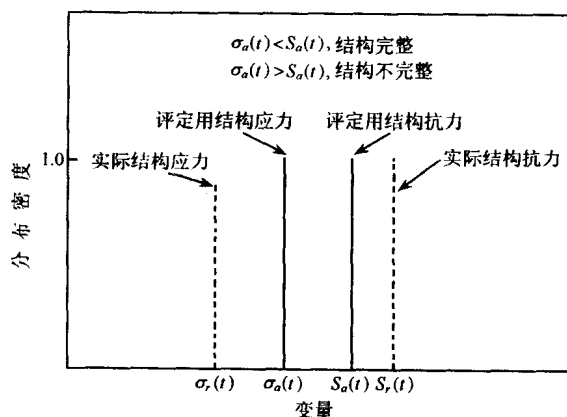
$$\sigma_r(t) \leq \sigma_a(t) < S_a(t) \leq S_r(t) \quad (1.1)$$

式中, $\sigma_a(t)$ 和 $S_a(t)$ 分别为评定时所用的广义结构应力和广义结构抗力。

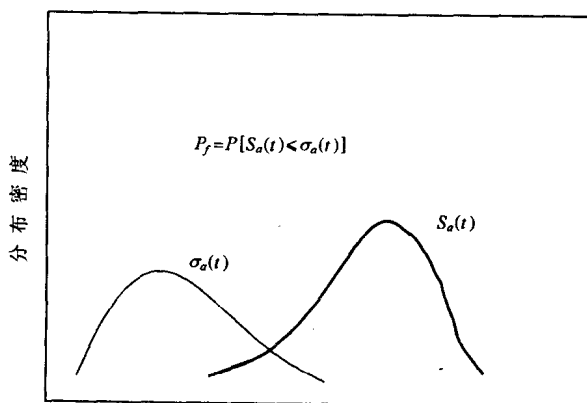
式(1.1)所表示的即是结构完整性的评定原理; 评定用的广义结构应力必须小于评定用的广义结构抗力, 即 $\sigma_a(t) < S_a(t)$; 评定用的广义结构应力必须大于或等于实际的广义结构应力, 即 $\sigma_r(t) \leq \sigma_a(t)$; 评定用的广义结构抗力必须小于或等于实际的广义结构抗力, 即 $S_a(t) \leq S_r(t)$ 。

1.2.1 确定性评定方法

如图 1.1(a) 所示, 在应用确定性评定方法进行结构完整性评定时, 将结构的广义实际应力和广义实际抗力均视为确定性值, 并按保守原则确定评定用广义结构应力和评定用广义结构抗力, 通过比较 $\sigma_a(t)$ 与 $S_a(t)$ 对结构的完整性进行评定。



(a) 确定性评定方法的基本原理



(b) 概率安全评定方法的基本原理

图 1.1 结构完整性评定的基本原理示意图

现行的结构完整性评定规程大多是以确定性评定方法为基础的,如美国机械工程师学会发表的《锅炉压力容器规范》第十一卷中所采用的缺陷评定方法、美国电力研究院发表的“含缺陷核压力容器和管道完整性评定步骤”研究报告、英国标准学会出版发行的《焊接结构中缺陷评定方法指南》、英国中央电力局发表的《含缺陷结构的完整性评定》(简称 R6 方法),以及我国的《压力容器缺陷评定规范》(CV-DA-84)和《在役含缺陷压力容器安全评定规程》(SAPV-95)等就是如此。

1.2.2 概率安全评定方法

如图 1.1(b)所示,概率安全评定方法是指在进行结构完整性评定时,以反映结构真实情况为原则,分析影响结构完整性参数的数值特性(确定性或随机性),确定评定用广义结构应力和评定用广义结构抗力的分布规律,再用下式计算评定对象的失效概率 $P_f(t)$:

$$P_f(t) = P[S_a(t) \leq \sigma_a(t)] \quad (1.2)$$

上式右端的 $P[S_a(t) \leq \sigma_a(t)]$ 表示 $S_a(t)$ 小于等于 $\sigma_a(t)$ 的概率。

在将工作应力 σ 、裂纹深度 a 、裂纹形状参数 a/c (裂纹短长轴之比)、断裂韧性 K_{IC} 和材料流变应力 $\bar{\sigma}$ 等结构完整性评定参量作为随机变量处理时,失效概率 P_f 的计算公式为

$$P_f = \int_0^\infty f_\sigma(\sigma) \int_0^\infty f_{\bar{\sigma}}(\bar{\sigma}) \int_0^1 f_{a/c}(a/c) \int_0^\infty f_{K_{IC}}(K_{IC}) \times \int_{a_c}^t f_a(a) da dK_{IC} d(a/c) d\bar{\sigma} d\sigma \quad (1.3)$$

式中, $f_{x_i}(x_i)$ 为随机变量 x_i 的概率密度函数; a_c 和 t 分别为临界裂纹尺寸和结构厚度。

由此可见,除极简单的情形外,通常都必须进行复杂的数值计算才能确定评定对象的失效概率。

1.3 结构完整性评定的力学基础

在很长一段时期内,结构的设计是以抗拉强度 σ_b 和屈服强度 σ_s 为基础的。一般的设计公式为 $\sigma \leq [\sigma]$, $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{\alpha}$ 或 $[\sigma] = \frac{\sigma_b}{\beta}$, 这里 α 和 β 叫做安全系数, $[\sigma]$ 叫做许用应力。这种设计把缺陷笼统地考虑在安全系数当中,并没有考虑缺陷的具体情况。用这种方法显然无法指出一个具体的缺陷是否会引发事故。另外,结构使用期间由于疲劳、腐蚀等因素诱发的裂纹,在特定的情况下,可能失稳扩展而导致结构关键部位或结构本身的破坏。断裂力学主要研究有裂纹的材料受力后会发生什么变化,应用连续介质力学的理论研究含有裂纹状缺陷的材料和结构的破坏本质,并用定量的方法来确定承载裂纹体扩展的规律及产生失效的条件。其他缺陷可以近

似地当作裂纹处理,这种做法虽然不十分精确,但是可使评定结果偏于安全。断裂力学的任务就是研究和确定这种特殊情况,并为此提供一种合适的、定量的解析或数值的评定方法。断裂力学理论与工程应用的发展为结构完整性评定提供了力学基础和手段,其主要包括:线弹性断裂力学(Linear Elastic Fracture Mechanics)、弹塑性断裂力学(Elastic-Plastic Fracture Mechanics)、概率断裂力学(Probability Fracture Mechanics)、计算断裂力学(Computational Fracture Mechanics)、断裂力学中的模糊数学方法(Fuzzy Mathematics Method in Fracture Mechanics)等。

1.3.1 断裂力学基础

1. 线弹性断裂力学

线弹性断裂力学是线弹性力学的一门分支,它主要研究脆性断裂的问题。线弹性断裂力学的理论和工程应用已有一套成熟、完整的体系。

(1) 应力场强度因子 K_I

实际上材料内部不可避免的存在各种缺陷(夹杂、气孔等),由于缺陷的存在,使材料内部不连续,这可看成材料的裂纹在裂纹尖端前沿产生应力集中,形成一个裂纹尖端应力应变场。表示应力应变场强度的参数称为“应力场强度因子”。根据 Irwin 的观察研究,可将裂纹分为三种基本型:张开型或拉伸型[I型,见图 1.2(a)],同平面剪切型或滑移型[II型,见图 1.2(b)],反平面剪切型[III型,见图 1.2(c)]。由两种或两种以上基本形式组合的便是复合型裂纹。

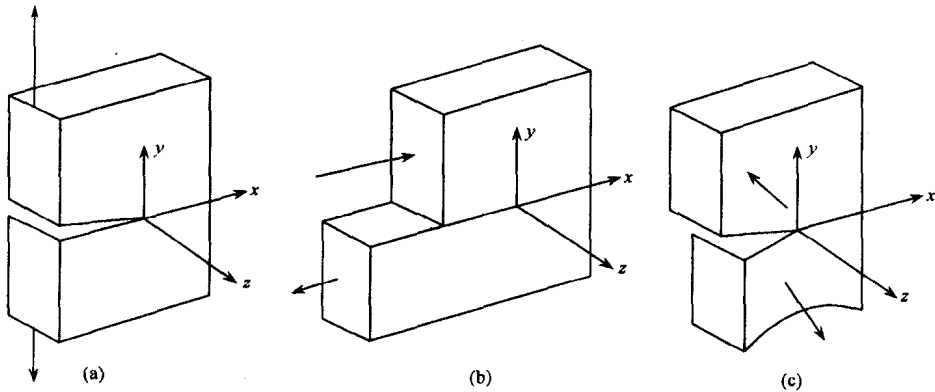


图 1.2 裂纹的基本开裂类型

I 型开裂应力场强度因子 K_I 的计算式通常为

$$K_I = \beta \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1.4)$$

式中, σ 为应力; a 为裂纹尺寸; β 为量纲为 1 的应力强度因子或结构构型因子。表 1.1 为几种常用的 β 因子。

表 1.1 几种常用的 β 因子

β	情 况
1.0	无限大板, 中心穿透裂纹, 远处均匀拉伸
1.12	半无限大板, 边缘裂纹, 远处均匀拉伸
$2/\pi$	无限大体, 半径为 a 的内埋圆盘裂纹, 远处均匀拉伸
$\sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}}$	有限宽板, 中心穿透裂纹, 远处均匀拉伸

(2) 断裂韧性

对于一个有裂纹的试样, 在拉伸应力作用下, 当外力逐渐增大或裂纹长度逐渐扩展时, 应力场强度因子 K_I 也不断增大, 当 K_I 增大到某一值时, 就可使裂纹前沿某一区域的内应力大到足以使材料产生分离, 从而导致裂纹突然失稳扩展, 即发生脆断。这个应力场强度因子的临界值, 称为材料的断裂韧性, 用 K_{IC} 表示, 它表明了材料有裂纹存在时抵抗脆性断裂的能力。因此, 线弹性断裂力学的基本判据如下:

$K_I > K_{IC}$ 时, 裂纹失稳扩展, 发生脆断。

$K_I = K_{IC}$ 时, 裂纹处于临界状态。

$K_I < K_{IC}$ 时, 裂纹扩展很慢或不扩展, 不发生脆断。

K_{IC} 可根据相应标准通过实验测得, 它是评价阻止裂纹失稳扩展能力的力学性能指标, 是材料的一种固有特性, 与裂纹本身的大小、形状、外加应力等无关, 而与材料本身的成分、热处理及加工工艺有关。

2. 弹塑性断裂力学

线弹性断裂力学在评价材料抗开裂性能及预测材料寿命等方面已经得到广泛应用, 但是它也存在着很大的局限性。这是因为金属材料的裂纹尖端在断裂前总存在着一个或大或小的塑性区, 当塑性区尺寸与裂纹尺寸相比很小时 (属小范围屈服), 经过修正, 线弹性断裂力学方法尚可应用。但当塑性区尺寸与裂纹尺寸相比达到同一数量级时 (属大范围屈服), 虽经过修正, 其误差仍不能忽视。因此在工程实际中大量应用的中低强度钢, 除非温度很低、截面很厚或应变速率很高仍能应用这一判据外, 在平常状态下由于裂纹尖端的塑性变形很大, 而使得线弹性断裂力学方法无效。弹塑性断裂力学便由此产生并迅速发展起来。

目前, 弹塑性断裂力学已经得到普遍应用, 最具代表的便是英国焊接研究所提出的 COD (裂纹张开位移) 法和美国电力研究院 (EPRI) 于 1971 年提出的 J 积分方法。

(1) COD 法

COD 判据是指裂纹体受 I 型荷载时, 裂纹尖端张开位移 δ 达到其极限值 δ_c 时, 即 $\delta \geq \delta_c$ 时构件失效的判据。目前 COD 判据已广泛应用于焊接结构抗开裂性能评定中。然而, 其物理意义仍不十分明确, 目前对 COD 的定义仍未统一, 最流行

的有两种:一是英国焊接研究所提出的,即以原始裂纹的张开位移作为 COD,该位移值是由裂纹尖端塑性区处材料,在平板内发生与荷载垂直方向的收缩而成,即伸张区宽度(注意:它不是裂纹扩展形成的新表面);二是美国人 Rice 提出的,即在裂纹尖端作 90° 角,该角所正对的弦值即为 COD。前者便于用实验法测定,后者便于用有限元法计算。已有证明,二者是等效的。

(2) J 积分方法

用弹塑性断裂力学要直接获得裂纹尖端区的应力应变场的强度是相当复杂和十分困难的,所以必须避开直接求解裂纹尖端区的应力应变场的强度,而改寻一个力学参量,此力学参量可以综合度量裂纹尖端区应力应变场强度,并可根据此参量来建立韧性断裂的判据,最后建立一套实验方案来验证理论的可靠性,这便是 J 积分产生的工程背景。

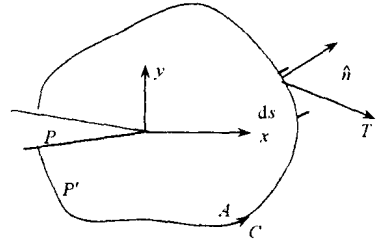


图 1.3 积分线路 C

1) J 积分的物理意义。

如图 1.3 所示的单位厚度平板,考虑一条环绕裂纹尖端点的积分线路 C ,线路光滑且没有交叉点,所围绕的面积在线路方向的左边。积分线路元素用 ds 代表,其外法线单位向量为 $\hat{n}$,同时有面力 T 作用于 ds 上,线路内部面积为 A 。Sanders 和 Rice 先后指出:线路 C 外部对内部作功的速率,大于或等于储存于 A 中内能的改变率和不可恢复的损耗能量率之和。若用表达式,即

$$\int_C T_i \frac{du_i}{dt} ds \geq \frac{d}{dt} \int_A W_1 dA + \frac{dD}{dt} \quad (1.5)$$

式中, T_i 为面力分量,与应力关系为 $T_i = \sigma_{ij} n_j$, n_j 为 $\hat{n}$ 在 x 方向或 y 方向的投影; u_i 为位移分量; W_1 为内能密度; D 为损耗能。当大于号成立时,表示裂纹在扩展,动能在改变;若为准静态,等号成立。

Rice 在 Sanders 的研究基础上,进一步得到了 J 积分的表达式

$$J = \int_C W_1 dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \quad (1.6)$$

2) J 积分的线路无关性。

只要线路的起止点都在裂纹的表面上(可以不是被裂纹隔开的相对两点),线路光滑无交点,则 J 积分值就不变。如图 1.4 所示,任意选取两逆时针方向的线路 C_1 和 C_2 ,加上裂纹表面的积分线路 C_3 (由 P' 点至 Q' 点)和 C_4 (由 Q 点至 P 点),可定义线路 $C = C_1 + C_3 - C_2 + C_4$,此线路是闭合回路,该封闭回路的面积为 A ,则有

$$\int_{C_1} W_1 dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds = \int_{C_2} W_1 dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \quad (1.7)$$

这就是 J 积分的守恒性,这一点非常重要,因为只有这样才能避开裂纹尖端应力应变复杂的“禁区”,而在“禁区”外进行线能量分析,这样 J 积分的断裂判据才是

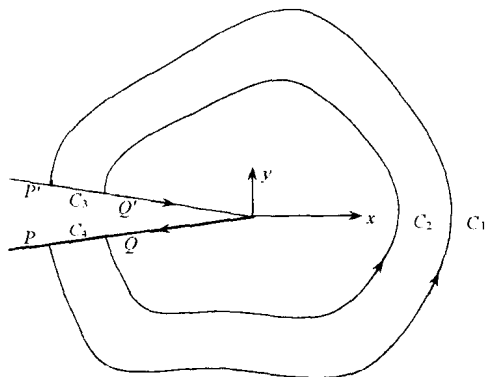


图 1.4 J 积分线路无关性积分回路示意图

有效的。

3) J 积分的启裂判据。

J 积分只能作简单加载时含裂纹弹塑性体的启裂判据,而不能作为失稳断裂判据。对于非线性弹性体和简单加载的弹塑性体,裂纹启裂判据为

$$J \geq J_i \quad (1.8)$$

式中, J_i 为启裂的 J 积分值。

由于 I 型裂纹是最常见的, J 积分理论也主要应用于 I 型裂纹。启裂后很快发生失稳断裂的启裂 J 积分值用 J_{IC} 表示,此时积分启裂判据或断裂判据为

$$J \geq J_{IC} \quad (1.9)$$

对于大部分金属材料,必须在相当严格的试件尺寸要求下,才能测出常数 J_{IC} 。脆性材料的 J_{IC} 值与平面应变的 G_{IC} 值相当,随着材料的韧性增加或试件的尺寸不够规格, J_i 可能会偏离 G_{IC} 。因此用

$$J_{IC} = K_{IC}^2 / E_1 \quad (1.10)$$

来换算 K_{IC} ,只在脆性断裂时才成立。对于一般中低强度钢,在不易测得 J_{IC} 的情况下,通常用阻力曲线来表示 J 积分断裂韧性。

4) J 积分值工程估算方法。

J 积分的求解非常繁琐,它要用有限元方法来计算,而且只有采用被专家认同的有限元程序计算出的 J 积分值才被认可,这更为 J 积分的工程应用带来不便。目前国际上出现了不少工程计算方法,这些方法对推动 J 积分的工程应用极其有利。尤其是 EPRI 弹塑性 J 积分工程计算方法,它受到工程界广泛的重视和应用。

美国通用电器公司的 Kumar 等人受 EPRI 委托,提出了弹塑性 J 积分值工程估算法和评定判据。

该方法认为材料的真应力和真应变特性遵循 Ramberg-Osgood 幂律关系,同时该方法还认为材料的弹塑性 J 积分值 J_{ep} ,可以通过 J 积分的弹性解 J_e (裂纹长

度包括塑性区修正)和全塑性解 J_p 之和来求解,其最终判据为

$$J_{ep} = J_{IC} \quad (1.11)$$

另外,还有一些 J 积分值的工程估算方法,如线弹性模型法(LSM)、线弹簧边界元法(LSBEM)、等刚度模型法等。

1.3.2 概率断裂力学

传统的断裂力学方法对裂纹的最大尺寸、瞬时荷载、材料机械性能及裂纹扩展速率等做出偏于安全的假设。但由于这些量实际上往往不是确定值而是服从统计分布规律,只有采用概率统计的方法(即引入可靠性理论,探索结构存在的不确定性因素及其分布),去代替断裂力学中那些确定性的假设,才能使断裂力学在工程实践中发挥更大的作用。这便是概率断裂力学的内涵。常用的统计方法有两种:一是通过收集和分析类似体系历史上破坏的资料,对破坏概率进行实质上的分析研究,建立类似体系结构母体与欲估算的特定结构之间的定量关系;二是掌握引起结构破坏的各种参数的统计规律,通过对破坏概率的综合理论分析,预测结构的破坏概率。

结构脆性断裂的可靠性用 q 维随机变量矢量 $\mathbf{b}$ 表示来自于荷载、材料特性、裂纹几何形状的随机性变量。一般情况下,如果 $\mathbf{b}$ 中的随机变量缺少充分的分布信息,工程上可将其作为正态分布处理。工程实际中的很多随机变量并不服从正态分布,但可用 Rackwitz-Fissler 方法作正态化的当量处理后再按正态分布的情形处理,描述裂纹长度的随机变量正是属于这种情形。在结构的脆性断裂中,用能量释放率能很好地描述结构的断裂特性,即当能量释放率 G 超过相应的临界值 G_c 时,结构或构件就会发生断裂,对 I 型和 II 型断裂,基于给定的随机变量矢量 $\mathbf{b}$,采用能量释放率 G 的功能函数可以表示为

$$g(\mathbf{b}) = G_c - G \quad (1.12)$$

式中, G_c 为材料机械性能常数,它也是一个随机变量。于是,可靠性分析中结构的安全状态、失效状态和极限状态分别表示为

$$g(\mathbf{b}) > 0, \quad g(\mathbf{b}) < 0, \quad g(\mathbf{b}) = 0 \quad (1.13)$$

可靠性指标是指在标准正态变量空间中坐标原点到极限状态曲面 $g(\mathbf{b}) = 0$ 的最短距离,即

$$\beta^2 = \min(\gamma^2, \gamma) \quad (1.14)$$

式中, γ 为随机变量矢量 $\mathbf{b}$ 经过标准化后得到的标准正态随机变量矢量。采用最小化的优化方法可求得结构的可靠性指标,在此基础上,可用一阶可靠性方法给出结构脆性断裂的失效概率。

考虑到结构在实际工程应用中荷载的随机性、材料性能的分散性、工况的复杂性和计算模型与方法等不确定因素,20 世纪 50 年代末 60 年代初,在航空与土木结构中开始采用概率方法评定结构的安全性。60 年代核设备与近海平台也采用概