

结构完整性原理

〔美〕威廉 S. 佩利尼 著 周馥秋 王克仁 译

国防工业出版社

结构完整性原理

〔美〕威廉 S.佩利尼 著

周骥秋 王克仁 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是关于结构完整性技术的教科书，内容涉及冶金学、焊接技术、断裂力学和断裂物理等学科以及这些学科在潜艇、飞机、导弹和反应堆压力容器等结构中进行断裂控制的应用。可供冶金、机械、力学等方面的设计与研究人员以及高等院校师生参考。

PRINCIPLES OF STRUCTURAL INTEGRITY TECHNOLOGY

William S. Pellini

Office of Naval Research 1976

*

结 构 完 整 性 原 理

〔美〕威廉 S. 佩利尼 著

周骥秋 王克仁 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

*

787×1092¹/₁₆ 印张15¹/₂ 348千字

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷 印数：0,001—7,200册

统一书号：15034·2518 定价：1.60元

译者序

本书把断裂力学的概念和传统工程设计的规范、方法和经验进行了综合、对比和分析，取长补短，从而形成了一整套保证结构完整性的工程设计分析方法。作者长期在美国海军研究局海军研究实验室从事研究工作，不仅具有冶金学、材料学和焊接学等传统知识，而且对断裂力学及断裂物理等近代基础理论也有深入的研究。本书就是作者运用这些理论对海军研制新型潜艇、飞机、反应堆压力容器和导弹等结构进行断裂控制和结构完整性设计的系统总结。正如在序言中所指出的“本书系统地总结了作者历时二十五年以上对实际问题的开拓性研究，是一项不可多得的成就”。

本书应用的断裂力学知识大部分在线弹性断裂力学范围内，因此也属于断裂力学最成熟的部分。书中广泛使用的比值分析图（RAD）将断裂力学与冶金学等传统知识融合在一起，宏微观相结合，科学与工程相沟通。而且工程实例丰富、数据图表详尽、深入浅出、系统完整，便于学习与工程应用。陈箴同志生前称赞此书是“一本有应用价值的难得的好教科书”，蔡其巩同志亦对此书作了很高的评价，并为中译本作了序。的确，像这样学以致用、学以致用的好教科书目前还很少，我们有机会向读者介绍这本书深感荣幸。

由于建设的需要，我们要设计的工程项目一定会愈来愈多，设计要有规范，规范需要根据，结构完整性技术就是为制定规范提供理论和实验的依据，本书介绍的内容可以使我们在这方面有一个很好的出发点。

本书有很多专用名词不见于已出版的辞书，我们根据自己的经验和理解拟了一些译法，不当之处一定很多，希望就正于有关专家与读者。

北方交通大学程育仁同志曾对译文提出一些有益建议，在此表示感谢！

中译本序

从五十年代开始的工程结构和材料断裂研究走着两条不同但又互相依存的道路，一条是以美国海军研究实验室（NRL）的佩利尼为代表所提出的传统工程断裂实验分析法，另一条是建立在固体力学分析基础上的断裂力学方法。

佩利尼在这本书中系统地介绍和总结了传统工程断裂实验和分析方法。书中所介绍的断裂分析图（FAD）是从小范围屈服断裂到全塑性断裂的整个工程断裂范围内，综合地考虑了断裂转变温度、裂纹尺寸、约束和厚度，以及动态传播效应和止裂的影响。这是目前任何断裂力学分析和实验所尚未能充分做到的。

作者在书中首先较成功地把传统工程断裂实验分析法和断裂力学原理结合起来，互相沟通；在基于断裂转变温度的 FAD 和基于强度和约束转变的 RAD 中引入了断裂力学概念和分析方法。虽然书中介绍的断裂力学分析只限于线弹性断裂力学领域，但是，近年来由于弹-塑性断裂力学，尤其是 J 积分控制的稳定扩展理论和动态断裂分析的发展，在弹-塑性断裂甚至高应变断裂领域内这两种途径的结合和沟通也为期不远了。从这个意义上说，这本书所提出的两种途径相结合和沟通的思想和尝试是带有方向性的启示。

因此，本书不仅对从事结构设计和选材的工程技术人员适用，而且，对于从事发展弹-塑性断裂力学研究的工作者来说，熟习这些已被许多工程结构的应用历史所证明是可靠的断裂工艺学方法，弄清其固体力学和物理冶金学依据，将会更有效地促进弹-塑性断裂力学的发展和工程应用。

蔡其巩

一九八一年十二月

序 言

本书系统地总结了作者历时二十五年以上对实际问题的开拓性研究，是一项不可多得的成就。在过去二十多年的时间内，本书作者由于能从燃眉的工程问题的症候看出其症结所在，因而在保证工程设计的结构可靠性方面，提出了一系列崭新的原理，并使许多新材料和工程新技术的实际应用成为可能。

这些先进的材料和技术，一方面刷新了海军舰艇和其他结构的性能，另一方面也往往为工程师和设计师们提出一些伤脑筋的问题，影响了这些材料和技术的应用。佩利尼恰好处处于一个独特的地位，他对于许多关键性的工程和设计问题既很了解，又是亲自经手去处理的。他在海军研究所工作的过程中，解决了若干最为棘手的问题，从而提高了研究所处理基本工艺问题的能力。

佩利尼名声卓著绝非偶然，他早期就注重解决实际问题并瞄准有意义的目标，从而赢得了工程师和设计师们共同的尊敬。他最初处理的是众所周知的舰艇和油船的脆断问题（有时，整条船只在船坞平静的水面上发生断裂），接着他着手研究现代的高性能船只、飞机和导弹。在这些工作中，他都显示了解决工程中基本问题的卓越才干。例如，关于船只的破坏，从性质上说是冶金问题。在着手实际解决问题之前，为了弄清楚问题真正的性质，必须有新的实验室试验方法。

佩利尼在这方面的努力，导致了落锤冷脆转变温度（Drop-Weight NDT）的发明，这是美国材料试验学会（ASTM）为表征金属断裂强度在三十年内采用的新标准方法中的第一个。同时，他根据钢材脆断方面的广泛的研究工作，最后提出了断裂分析图。这种分析图成为钢结构设计中确定该用什么准则的标准。接着，由于新的高强度金属的投入使用以及通用的断裂力学趋于成熟，他又提出了比值分析图（Ratio Analysis Diagram）的概念，这个概念在选材方面已证明是极有价值的。

佩利尼主要的贡献是把影响材料性能的种种变量，综合成为合理的、系统的，从而能为设计师们所理解和应用的工程方法。本书的大部分内容乃是把断裂和裂纹扩展的物理现象转换成便于作工程分析的程式。特别重要的是，他把材料、断裂、设计、制造和环境载荷等概念融汇成为总的**结构完整性**的设计方法。佩利尼所提出的原理，现在正为一些设计和制造未来高性能舰艇的合同所援引，并成为在其他领域内应用结构完整性技术的基础。问题尚未完全解决，一些研究工作继续在揭示新的问题。但是这里阐明的基本技术，过去已表明是有效的，将来也会被证明是适用的。在今后的许多年中，这些基本技术将成为材料结构和工程研究的柱石。

授予佩利尼的种种荣誉称号和褒奖都集中说明了他在全国的科学和工程团体内工作的价值。他取得了国防部和海军为科学和工程成就授予的最高的物质奖，同时也取得了华盛顿科学院、美国海军工程学会、美国铸造学会、美国焊接学会和美国金属学会的最高荣誉奖。他在海军研究所工作期间，发表了一百五十多篇论文，涉及许多领域的内容，并在美国、西欧和亚洲广泛作过演讲。1974年，他被选入全国工程研究院，这是他杰出经历的桂冠。

Peter M. Palermo

前言

背景

过去十年在结构工程方面的突飞猛进，是许多工程研究的共同结果。作为这些研究工作的推动力，则是欲要超越现有技术界限，以获得更良好的结构性能的这一目标。

近十年发展起来的一些崭新的工程系统对结构性能和可靠性提出了一系列要求。在这个目标下做的研究工作，虽然取得了卓越成就，但是也导致了一系列严重的破坏事故。这些破坏事故特别引人注目，它们使得我们在工程知识方面的不足显得极为明显。

一般说来，这些破坏事故是由于对金属的断裂分析和裂纹扩展分析的失败。很清楚，设计、选材、制造等各步骤，尚不能满足分析或保证结构可靠性的要求。于是工程师们不得不根据断裂和裂纹扩展的新知识，去改造现有的工艺原理。

采用断裂和裂纹扩展作为新的、更为合理的特征参数，是此后合理研制和选择合金的关键。这种基于程式分析方法的研究工作，对于结构工艺有深刻的意义。在这之前，研制和选择合金主要是根据其强度水平。

类似地，合理的和先进的制造技术所要遵循的原则也得到了澄清。对于焊缝金属，不再把强度水平作为研制和选材的主要依据，这是一个重要的里程碑。

系统分析方法在贯彻新原理方面的作用应予充分强调。把设计、材料和制造等方面的研究工作联合成一个整体，这是极端重要的。

目的

根据本书的主题，我们不可能就与结构完整性（SI）有关的诸工程领域的各自作用作抽象的阐述。对于专门的工程领域，我们在讨论检验结构可靠性的合理方法中联系断裂和裂纹扩展加以考察。

本书的主要目的是对于那些在设计过程中必须加以综合考虑的主要工程领域，作实际的和内容充实的阐述。

把一些专门领域综合成为一个整体的总体系统方法，是本书所有讨论的中心。对于一些非用专门术语不可的科学原理，则在附录内加以介绍。

我们希望本书能对工程师和学工程的学生提供一个指导性的引论。本书依次介绍了结构完整性原理的科学基础、工程准则、分析步骤、典型例子、普遍化原理以及检验要求。

对于不同型式的结构，我们考察了设计、材料特征、制造和检验等各个环节的相互影响。我们主要应用断裂力学的比值分析和断裂状态准则把各章节贯穿起来，从而把结构完整性这个题目作为一个有机的整体加以处理。除此之外别无其他方法，能够如此有效地使力学和冶金等方面的种种考虑彼此得到呼应。

那些对于结构完整性有一般兴趣的读者，选读本书的若干章节即可以得到一定的入门

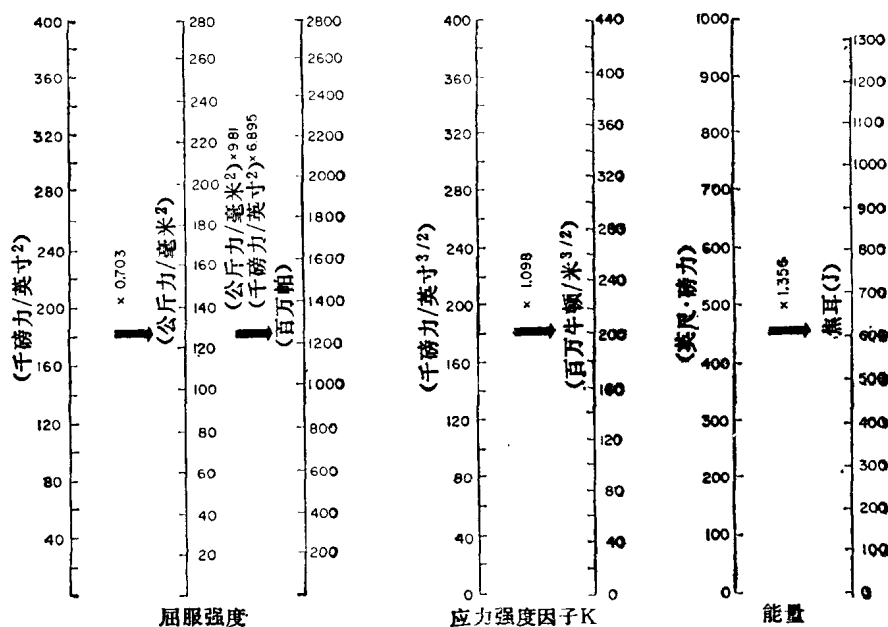
知识。例如，本书关于工程断裂力学的章节，对于那些想一般地了解一下的读者将是很有用的。本书关于焊接和焊接冶金学的章节，乃是该领域的一个简明扼要的导论，这些内容对于学习力学或从事力学工作的读者一般是陌生的。

我们希望本书能作为工程科目一个学年的基础教材，从而可以熟练掌握结构完整性的概念。对于一般工程技术人员，若把本书仔细阅读一遍，再加上一至三天集中的讲课，即可对结构完整性有相当的了解。

英制和公制单位的联合使用

我们希望，本书可以满足在不同领域从事工作和学习的工程师和大学生近期的和远期的需要。为了照顾各种不同的需要，我们采用了英制、米制和国际单位制（SI）相对照的方法。

在下面列出的图表中，绘出了应力和应力强度因子（ K_I ）从英制到公制或从公制到英制的近似换算值。在图内强度采用的单位是千磅力/英寸²（ksi）和公斤力/毫米²（kgf/mm²），而在文句内用的单位则是千磅力/英寸²（ksi）和百万帕（MPa）。应力强度因子（ K_I ）的单位则只用千磅力/英寸^{3/2}（ksi^{1/2}）（在一些专门的表内例外）。



温度和长度换算值的小数点后的位数取在测量的误差范围以内。

上述种种做法，是为了使文字简化，同时为大多数读者保留其熟悉的单位制。

致 谢

本书叙述的结构完整性技术，乃是在海军研究部（ONR）资助下、海军研究所（NRL）的研究成果。从 1950 年到 1975 年这二十五年之中，这两个组织为了发展断裂力学和机械冶金学这些新的工程原理，提供了必要的资金和研究机会。

直接应用这些科学原理去处理海军用的种种结构，这标志着这些科学原理已发展成为一门成熟的工程技术。在海军组织中历届主任工程师的兴趣所在，是至为重要的。整个海军的武器系统，可以说都在被用来验证这些新的原则。

从工程应用的这一基础出发，这些原则在联邦政府内和工业界得到了愈来愈广泛的应用。决不可低估这些应用者的重要性。他们的经验是现在有信心在工程中应用这些原理的基础。

这套系统的直接研究费用在一亿美元以上。实验室研究占四分之一，另外四分之三用于实验性的应用和试用。

根据这些保证可靠性的新原则来设计系列生产的结构（例如潜水艇和飞机），一开始的费用是十分庞大的。但是这样设计出来的结构，在实际投入使用的过程中，为新技术的可靠性提供了令人信服的证据。回忆起作出这些开创性决定的人们的贡献，我们是十分感激的。

研究活动自始至终，海军研究所（NRL）冶金研究室和力学研究室一些研究和工程小组出色的协同工作，表现出了高度的首创精神。这两个研究室，堪称在该领域内的佼佼者。有机会与他们共事，是我极大的荣幸。由于这两个研究室的联合工作，海军研究所已被公认为发展结构完整性技术的重要的国际中心。这个地位，一直保持了二十年之久。

目 录

术语表	1
断裂力学术语	1
工程术语	1
第一章 引论	3
背景	3
结构完整性方法的发展	3
设计原理	4
一般步骤	4
鉴定的目的	5
教育方面的需要	5
第二章 裂纹扩展的微观力学过程	7
主要过程	7
微观断裂在工程上的意义	13
解理断裂	16
微观断裂转变的影响	21
空洞成长的微观机制	23
第三章 断裂力学准则	25
关于断裂状态的若干关系	25
约束的物理意义	26
约束松弛	29
断裂状态的意义	31
约束转变的冶金特点	32
断裂传播过程	35
截面尺寸的影响	36
平面应变转变的影响	38
约束能力的定义	39
约束明确的试验方法	40
第四章 呈现温度转变的钢的断裂特征和断裂分析	44
普遍原则	44
金属质量的统计特点	47
加载速率的影响	48
特征的 K_{Ic} 曲线	49
第五章 断裂的特征参数和断裂分析: 强度转变的影响	50
强度的参考坐标	50
比值分析图 (RAD) 介绍	50
推广的比值分析图方法	53
K_{Ic} 坐标和动态撕裂坐标的联合使用	56

质量走廊的冶金学基础	57
性能的统计偏差	59
钛合金和铝合金	63
临界边缘的概念	64
标准的比值分析图格式	65
第六章 断裂控制原理：温度转变问题	69
起裂与止裂的早期研究	69
自然裂纹的试验	75
止裂试验	81
断裂分析图 (FAD)	83
DT试验的演进	90
截面尺寸效应	93
FAD的扩大模型	96
决定性的分析方法	97
第七章 断裂控制原理：强度转变问题	99
强度转变问题的发展过程	99
强度转变的低范围	102
强度转变的高范围	103
强度转变的中间范围	105
成本分析	109
检验中冶金因素的作用	110
概率评定	111
第八章 焊缝区裂纹状态的控制与特征	113
焊缝区结构的临界状态	113
焊缝区的断裂性能	115
焊缝区开裂的一般问题	121
氢助长开裂的现象	124
约束开裂的现象	126
焊缝因素的系统分析	127
附录：焊接冶金学与焊接工艺的介绍	130
钢的焊接冶金学	130
珠光体钢	131
淬火与回火的合金钢	133
焊接工艺	136
电极的技术条件与合金成分	140
第九章 持续载荷下裂纹扩展分析准则	143
参考体系	143
特性鉴定准则	144
K_{Isc} 转变的分析意义	148
环境效应	152
影响裂纹扩展速率的因素	154
冶金方面的考虑	155
第十章 疲劳和腐蚀疲劳的特性描述与极限包络曲线	158

技术发展状况	158
疲劳裂纹扩展的特性描述	159
综合分析	163
疲劳分析的结构完整性 (SI) 任务	166
第十一章 特定的结构问题: 塑性应力体系的断裂控制	168
背景	168
塑性断裂的物理模型	170
塑性断裂的控制原理	173
通用性问题	174
第十二章 在按照规范、章程与标准对结构可靠性进行正式鉴定中分析方法 所起的作用	180
鉴定原理	180
断裂控制在规范、章程与标准中的应用	181
技术条件系统的现代化	182
通过分析鉴定现有结构	185
反应堆压力容器的典型例子中正规鉴定的技术受益	187
以水翼艇为典型例子说明有关裂纹扩展特定问题的鉴定技术要求	189
以宇航结构的典型例子说明关于参考断裂状态的技术要求	191
附录 A 线弹性平面应变断裂力学引论	194
理论原则	194
平面应变试验方法	198
断裂力学的术语和方程式	201
附录 B 利用 K_{Ic} 特征曲线的图解分析	203
方法介绍	203
图解分析实例	207
附录 C 强度转变: 实例和表格	213
基于止裂原则和起裂原则的设计实例	213
高强度钢的合金成分	216
附录 D 结构钢简介	219
标准级别钢的合金成分	219
附录 E 用 R 曲线描写的裂纹扩展阻力的基本意义	221
断裂力学理论	221
R 曲线的物理意义	222
R 曲线的特征描写	223
在比值分析图中加入 R_p 数据	228
参考文献	229

术 语 表

断裂力学术语

a	深度、半长或裂纹的半长
B	板或试样的厚度
COD	裂纹张开位移
ΔK	疲劳裂纹扩展中 K 值的范围
E	杨氏模量
ϵ	拉伸应变
ϵ_c	ϵ 的失稳临界值
$\mathcal{G}$	裂纹扩展的应变能释放率
$\mathcal{G}_{Ic}$	$\mathcal{G}$ 的弹性断裂临界值
K, K_I	应力强度因子 (下标 I 指张开型裂纹扩展)
K_c	裂纹顶端起裂的平面应力条件; 也表示裂纹扩展时的裂纹条件
K_{Ic}	缓慢加载 (静态) 平面应变断裂韧度
K_{Id}	动态平面应变断裂韧度
$K_{I,ss}$	应力腐蚀环境中缓慢裂纹扩展的 K 的最低值
J_c	J 积分断裂韧度指标
L	在某一断裂型式下平面应变的极限
PZS	塑性区尺寸
r	塑性区半径
R_p	塑性断裂时 R 曲线斜率的数值
σ, σ_{ax}	作用应力
σ_{yd}	动态加载下的屈服强度
σ_{ys}	缓慢加载下的屈服强度
R	塑性裂纹扩展的特征阻力
Ratio(比值)	指 K_{Ic}/σ_{ys} 、 K_{Id}/σ_{yd} 或 $K_{I,ss}/\sigma_{ys}$
$2c$	裂纹宽度
YC	屈服准则

工 程 术 语

NDT	由落锤试验求得的冷脆转变温度
FTE	弹性断裂转变温度
FTP	塑性断裂转变温度

DWT	落锤试验
DT	动态撕裂试验
CAT	Robertson 止裂温度
C _v	却贝 V 形缺口试验
ECST	裂纹引发爆破试验
ETT	爆破撕裂试验
FAD	断裂分析图
RAD	比值分析图
IAD	失稳分析图
PWE	断裂时的塑性能量
TL-F	断裂性能工艺极限
NDI	无损检验

第一章 引 论

背 景

在过去,工程师并无可靠的方法来定量确定结构的断裂性能和裂纹扩展性能,他们只得依靠专家作定性的估计。因此,为了排除在试验或运行中出现的破坏事故,必须反复进行改进,这是花费很大的。

结构完整性(SI)技术作为一种新的工程方法体系对这些问题提供了实际的解决办法。结构完整性方法,使设计师在制造前就有可能保证结构满足结构完整性提出的定量标准。对于满足这种保证所提出的要求正在逐步增加,而且在许多场合下,结构完整性的保证现在已是合同所提出的要求。

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,结构完整性技术的基础是利用断裂力学的试验方法去精确测量断裂和裂纹扩展的性能。采用有尖锐缺口或裂纹的试样作试验,可以定量地确定金属的开裂性能,从而预测金属的破坏条件。结构完整性技术的目的是按照标准编制客观分析用的数据表。这样的分析可以代替征求专家意见的传统方法,以此为基础可以提出一定的规范以鉴定结构的完整性。鉴定应建立于对材料性能合理的和定量的描写之上,而专家的定性估计则是无法加以标准化的。

在涉及公共利益和安全的场合下,这种基于结构完整性原理的鉴定可以用法令加以规定。这时,结构完整性的原理可以为提出标准和履行标准这两方面提供可以相互理解的参考内容。

结构完整性方法的发展

结构完整性分析是沿着一条颇为笔直的道路发展起来的,在过去二十年中,紧张的研究活动此起彼伏。对于运行过程中破坏事故的分析,不但确认材料断裂性能是重要的,而且发现,设计和制造过程也很重要。对于材料的力学研究,产生了断裂力学这门科学。冶金学家建立了金属材料性能的参考体系。系统分析则综合了结构完整性的这些方面,从而为建立正式的、系统的规范与法则以及标准创造了条件。

对使用中失效的早期研究清楚地指明:必须更精确地确定金属对裂纹的敏感性。但是,用以定量分析断裂和裂纹扩展的断裂力学方法取得的成功,在引起人们兴趣的同时也遭到了一些异议。人们提出的异议有:(a)断裂力学的分析限于脆性金属,从而并不包括许多实用的金属;(b)断裂力学的分析要假定所有的结构都是有缺陷的。

故障分析以及改进的无损检验使人们清楚地看出,分析结构中的裂纹状态是必不可少的,同时也促使人们把裂纹状态的分析作为设计的一个组成部分。要是大家普遍地接受了这一点,那么只要再加上可以用于设计的具体准则以确定裂纹尺寸统计上限,则正式的结

构完整性分析方法即告诞生。这个裂纹上限的确定，取决于采用种种结构及制造方法的实际工程经验，以及定量地检测裂纹技术的能力。

设计原理

虽然对裂纹敏感的金属来说，在达到临界应力强度因子时裂纹即会扩展这一事实是材料固有的特性，但是工程师并不因而只使用对裂纹不敏感的金属。结构完整性技术为使用裂纹敏感性不太大又不太小的金属提供了应遵循的可靠的程式。而且，结构完整性技术还必须对于具体的结构设计提出可以接受的、最高的裂纹敏感度。对于大多数高性能结构所用的金属，结构完整性技术提供了工程分析与准则的唯一依据。

在工程实际中应用的金属必须有确定的（即可以控制的）裂纹状态和裂纹敏感性，由此产生了交叉的极限分析。为了容许裂纹应力强度因子极限的提高，必须令金属的裂纹敏感性降低，反之亦然。

应用交叉分析作出工程上的调整，必须把设计的细节和制造质量考虑进去，这些因素极关紧要。如果结构的细部设计欠佳或制造不良，裂纹的应力强度因子就会很大，从而必须使用裂纹敏感性很小的金属。相反，如果使各部分的应力分布很平缓（通常要采用锻造方法），把连结处做得很光滑，在应力高的区域不采用焊缝（因其本身处于较严重的裂纹状态），那么我们就可以容许金属具有较高的裂纹敏感性，因为这时设计和制造所造成的裂纹应力强度因子较小。例如，我们可以使用强度较高的（裂纹敏感度较高的）金属而不影响安全。

结构完整性技术需对工程中的各种可能方案作反复的分析。必须全面考虑诸如备选的金属系统、裂纹状态的控制、结构设计的细部以及制造过程等各种因素。把这些因素在一定的使用条件 and 经济因素的范围内进行调整，在设计的过程中最后可以得到一个合理的和精确的方案。进行调整的这些步骤必须满足结构工程中鉴定的要求。

一般步骤

控制断裂和裂纹扩展的计划是一步一步付诸实践的。这些步骤是与初步设计阶段和细部设计阶段密切相结合的。分析的复杂程度取决于设计问题本身。对于新的结构、新的金属材料或复杂的设计，就必须多方面分析：必须考虑各种备选的设计方案和制造方法；必须收集新的数据；必须作模拟试验。对于常规结构和常规材料，问题就很简单，只要在几种可供选用的金属中，根据已知的数据，按金属的性能进行选择就可以了。

分析的复杂程度主要决定于各种冶金学的因素。各种金属系列的转变特性则是起决定作用的最重要的冶金因素。一般，对于所有结构用金属，当其强度增加（特别对于钢）或温度降低时，它们对于断裂或裂纹扩展的敏感性显著增加。

在一定的温度和强度水平下，金属的微观结构性能及截面尺寸效应决定其内在的裂纹敏感性。在一级分析中所用的数据必须能给出各种金属在给定的不同温度和强度水平下的裂纹敏感性的范围。

在本书中所用的那种分析图对于确定诸金属系列（钢、铝、钛等）在给定的强度水平下的性能的范围是必不可少的。提高或降低屈服强度的结果在图上表现为明显的转变；图

中还明确地指明了金属的性能从低劣变为优良所带来的好处。

最初的冶金分析指明在设计和制造中要把结构完整性方法应用到何种程度。分析表明,各种金属按裂纹敏感性可以分为下列三种类型:

不敏感的——使用这种金属结构即为可靠的,这种金属确保了结构完整性计划实施;

非常敏感的——除非在设计中用于多余受力部位,不然的话,无法获得可靠的结构完整性计划;

中等程度敏感的——设计和制造均需根据敏感水平作精确的控制。

一级冶金分析是关键,通过分析可以及早调整规定的屈服强度或金属的质量。许多有关导弹、飞机和舰艇的灾难性事故,都是由于仅仅根据强度水平或成本来选择金属的结果。这样选出的金属往往裂纹敏感性过大。因此,反复的求解也无法得到可靠的结构完整性计划。

但是,这种痛苦的经验为结构完整性技术提供了重要的资料。若无结构的破坏造成的危机,即不会在这方面投入如此庞大的研究力量和资金,从而会使结构完整性技术的进展推迟。

冶金分析步骤的规范化是结构完整性技术的一大进展。幸好,因为结构完整性技术的这一部分是最基本的,从而是最直接可以用于教学的部分。

关于设计和制造的结构完整性步骤则较难加以表述,因为这些步骤涉及随设计问题的性质而异的专门的鉴定目标。但是,一般的原则还是可以用为规范、法则和标准所规定的鉴定目标来加以描写的。

鉴定的目的

对于许多结构而言,结构完整性鉴定均有法律上的规定和合同上的要求。但是有时即便并无法律和合同的约束,为了工程可靠起见,也必须把结构完整性计划执行到底。

在宇航和航空领域内发生的破坏事故,主要是由于采用的结构和材料并无前例可援造成的,从而提出了愈来愈严格的鉴定要求。原子能反应堆设计的鉴定要求则长期来一直是严格的和保守的。海军在历史上也一直采用保守的结构完整性原理来鉴定舰艇。这些要求不断被修改,以适应材料和设计方法的发展。

对于那些要求使用高强度金属(裂纹敏感性高)的结构,一般需要最严格最彻底的鉴定。必须精确地确定裂纹敏感性和检验可靠性的容限,必须严格控制设计和制造。一般来说,对于裂纹敏感性不怎么高的金属,鉴定的要求也相应降低。当然,这些一般的原则应根据诸如结构破坏可能造成的后果以及使用金属的费用等等因素来作修正。鉴定要求一般随问题不同而异,但是现在发展的趋向是采取较有普遍意义的方法。

教育方面的需要

有关结构可靠性的文献、教科书和大学课程通常范围很窄,内容极偏。而且重点放在断裂力学的理论方面,把它作为一个抽象的工程学科来加以介绍。

这种理论基础是很有用的,但并不够。事实上,过分强调断裂力学的理论会有相反的效果,因为理论集中讨论的是线弹性(极脆的)金属,而忽视了延性较好的、弹-塑性的或