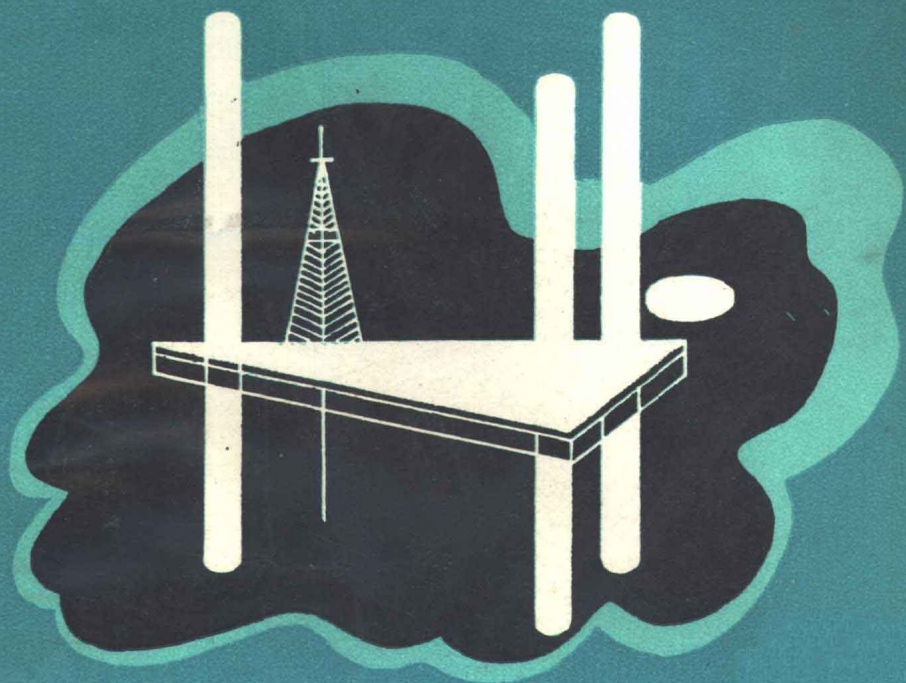


海洋石油建筑工程丛书



郑学祥 主编

船舶及海洋工程结构的
断裂与疲劳分析

海洋出版社

海洋石油建筑工程丛书

船舶及海洋工程结构的
断裂与疲劳分析

郑学祥 主编

海洋出版社

1988年·北京

内 容 简 介

本书系《海洋石油建筑工程丛书》之一种。书中提供了船舶及海洋工程结构的断裂和疲劳分析方面的基础知识，全书共分十九章，分别就结构的断裂理论，断裂韧性试验，疲劳理论，应力腐蚀问题，断裂力学设计与控制方法，疲劳寿命的分析方法等方面作了细致的阐述，介绍了这些方面的新的理论和设计方法，并实际估算了管节点和固定式平台等典型结构的疲劳寿命。

本书说理通俗易懂，行文流畅，图文并茂。可供船舶工程、海洋工程及有关工程结构设计的工程技术人员和大专院校师生作为参考学习之用。

责任编辑 吴宜侗
责任校对 俞丽华

海洋石油建筑工程丛书

船舶及海洋工程结构的断裂与疲劳分析

郑学祥 主编

海洋出版社出版 (北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 顺义兴华印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：10 9/16 字数：190千字插页：1

1988年5月第一版 1988年5月第一次印刷

印数：1—1 000 册

ISBN7-5027-0048-X/TV·3

统一书号：13193·0979 ¥：4.20元

序

本书是以著者在上海交通大学为船舶结构力学高年级学生和研究生所写的讲义为基础，经过修改和补充而编成的。

在编写本书时，主要参考了美国堪萨斯（Kansas）大学罗耳夫教授（S.Rolfe）等所著的船舶断裂与疲劳控制，英国伦敦大学和海洋科技中心杜佛教授（W.Dover）关于海洋工程平台结构的疲劳寿命评估研究报告以及世界各大船级社一些有关船舶和海洋工程结构断裂与疲劳评估方面的资料。

本书着重于归纳和阐明在复杂的海洋工作环境条件下，船舶及海洋平台复杂焊接结构的有关应用断裂力学的方法和基本思路以及衡量的相对准则。

本书第一至十四章以及十九章由郑学祥，洪烈君编写。第十五章，十六章，十七章由郑学祥，束继兴编写。第十八章由郑学祥，钱仍勳编写。附录由洪烈君编写。

由于时间仓促，编著者水平有限，更鉴于工程技术的迅速发展，书中内容和观点亦可能有错误不当之处，希各方面的读者提出批评指正。

编 者

1984年9月

目 录

符号表	(1)
第一章 结构断裂问题的概述	(7)
§ 1-1 引言	(7)
§ 1-2 脆性断裂的特征	(9)
§ 1-3 缺口韧性	(10)
第二章 断裂力学的基本概念	(16)
§ 2-1 裂纹扩展的三种类型	(16)
§ 2-2 裂纹尖端附近的应力场	(17)
§ 2-3 应力强度因子 K_I 与断裂判据	(19)
§ 2-4 几种主要试样和加载方式下 K_I 的表达式	(25)
§ 2-5 工程构件 K_I 的估算	(35)
§ 2-6 裂纹尖端的塑性区及其修正	(41)
§ 2-7 裂纹扩展的能量原理	(48)
第三章 平面应变断裂韧性 K_{Ic} 及 K_{Ic} 的测试	(51)
§ 3-1 引言	(51)
§ 3-2 标准平面应变断裂韧性测试方法的试样尺寸 要求	(53)
§ 3-3 K_{Ic} 测试方法的基本原理	(54)
§ 3-4 载荷-位移曲线	(59)
§ 3-5 低温度的 K_{Ic} 测试	(62)
§ 3-6 动态平面应变断裂韧性 K_{Ic} 测试	(62)
第四章 温度、加载速率及厚度对断裂韧性的影响	(64)
§ 4-1 温度对断裂特性的影响	(64)
§ 4-2 对一些结构钢材 K_{Ic} 及 K_{Ic} 的典型试验 结果	(69)

§ 4-3	结构钢材的断裂韧性水平.....	(72)
第五章	K_{Ic}或K_{Ic}与其他断裂韧度试验之间的相关性.....	(75)
§ 5-1	引言.....	(75)
§ 5-2	却贝V (CVN) 冲击试验与却贝V (CVN) 缓慢弯曲试验.....	(76)
§ 5-3	爆炸鼓胀试验.....	(80)
§ 5-4	落锤试验 (DWT)	(82)
§ 5-5	动态撕裂 (DT) 试验	(84)
§ 5-6	K_{Ic} 与 CVN 上平台部分的相关性	(85)
§ 5-7	K_{Ic} 与 CVN 在转变温度区的相关性.....	(87)
§ 5-8	在 NDT 温度的 K_{Ic} 值.....	(89)
第六章	疲劳问题的基本知识和传统方法	(91)
§ 6-1	疲劳破坏与疲劳载荷的概念.....	(91)
§ 6-2	恒幅载荷下的疲劳.....	(94)
§ 6-3	影响疲劳的几个因素.....	(97)
§ 6-4	变幅载荷下的累积破坏.....	(103)
第七章	疲劳裂纹的起始或疲劳开裂	(105)
§ 7-1	引言.....	(105)
§ 7-2	疲劳的起始与扩展.....	(105)
§ 7-3	在应力集中处的应力场.....	(108)
§ 7-4	应力集中对疲劳开裂的效应.....	(110)
§ 7-5	疲劳开裂与拉伸极限强度的关系.....	(113)
§ 7-6	不会扩展的疲劳裂纹.....	(115)
§ 7-7	有限的疲劳开裂寿命行为.....	(117)
第八章	在恒幅载荷下疲劳裂纹的扩展	(119)
§ 8-1	疲劳裂纹的扩展机理.....	(119)
§ 8-2	疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子.....	(121)
§ 8-3	马氏体钢材.....	(124)
§ 8-4	铁素体-珠光体钢材	(125)

§ 8-5	奥氏体不锈钢	(126)
§ 8-6	钢材疲劳裂纹扩展速率的讨论	(126)
§ 8-7	平均应力对疲劳裂纹扩展行为的影响	(128)
§ 8-8	载荷循环的频率与载荷波形对 $\frac{da}{dN}$ 的影响	(129)
§ 8-9	应力集中即缺口形状对疲劳裂纹扩展速率的影响	(131)
§ 8-10	在钢材焊接处的疲劳裂纹扩展	(131)
第九章 变幅载荷下疲劳行为 (133)		
§ 9-1	过载峰的影响	(133)
§ 9-2	加载方式的影响	(136)
§ 9-3	随机载荷与概率密度曲线	(137)
§ 9-4	瑞利分布的随机载荷下的疲劳裂纹扩展速率	(140)
§ 9-5	各种随机载荷谱下的疲劳裂纹扩展速率	(143)
第十章 应力腐蚀与应力腐蚀疲劳 (145)		
§ 10-1	引言	(145)
§ 10-2	用断裂力学方法研究应力腐蚀脆断的意义	(146)
§ 10-3	应力腐蚀临界应力强度因子 $K_{I\text{蚀}}$	(147)
§ 10-4	应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt	(149)
§ 10-5	应用 $K_{I\text{蚀}}$ 和 da/dt 评述应力腐蚀构件的安全性以及估算其寿命	(149)
§ 10-6	应力腐蚀疲劳	(151)
第十一章 断裂力学设计方法 (154)		
§ 11-1	引言	(156)
§ 11-2	设计名义应力水平和可容忍的裂纹尺寸	(156)
§ 11-3	材料的选择	(160)
§ 11-4	安全寿命设计与破损安全设计原理在防止脆	

断设计中的应用	(162)
第十二章 断裂准则	(165)
§ 12-1 引言	(165)
§ 12-2 结构型材的断裂行为水平	(167)
§ 12-3 载荷速率对材料韧性的影响	(169)
§ 12-4 破坏的后果	(170)
§ 12-5 根据断裂准则来选择材料——转变温度 方法	(171)
第十三章 具体的断裂韧性标准	(174)
§ 13-1 原始的船用钢“20J (15ft · lb) CVN冲击 能量”标准	(174)
§ 13-2 断裂分析图	(178)
§ 13-3 贯穿板厚度的屈服标准	(178)
第十四章 断裂控制计划	(183)
§ 14-1 明确可能引起构件或整个结构破坏的各种因 素, 弄清楚工作条件与载荷并分析其相对的 贡献	(184)
§ 14-2 关于使结构或构件破坏的可能性降到最小的 各种设计方法及相对有效性的决定	(187)
§ 14-3 焊接船壳断裂控制的推荐方案	(191)
第十五章 海洋工程结构的疲劳与断裂分析	(202)
§ 15-1 结构概貌与破坏形式	(202)
§ 15-2 海洋工程结构的环境载荷	(206)
§ 15-3 管节点处的应力分布	(207)
§ 15-4 $S-N$ 曲线、应力范围与应力强度因子	(214)
§ 15-5 疲劳裂纹扩展与疲劳断裂准则	(215)
第十六章 用$S-N$曲线方法估算管节点疲劳寿命	(217)
§ 16-1 用 $S-N$ 曲线方法估算疲劳寿命的内容及影响 节点疲劳寿命的因素	(217)

§ 16-2	几种实用的 $S-N$ 曲线	(218)
§ 16-3	管节点的疲劳试验	(224)
§ 16-4	计算疲劳累积损伤实例	(226)
第十七章	用断裂力学方法估算管节点的疲劳寿命	(229)
§ 17-1	引言	(229)
§ 17-2	一些试验结果	(230)
§ 17-3	固有缺陷法	(233)
§ 17-4	经验方法	(242)
第十八章	海洋固定式平台疲劳寿命估算	(245)
§ 18-1	前言	(245)
§ 18-2	二度随机波浪	(246)
§ 18-3	波浪能量谱	(248)
§ 18-4	海洋固定式平台预估疲劳寿命的离散波方法	(257)
§ 18-5	预估固定式海洋平台疲劳寿命的谱分析法	(263)
§ 18-6	动力响应修正	(269)
§ 18-7	计算结构疲劳损伤的解析法	(270)
第十九章	弹塑性断裂力学	(274)
§ 19-1	引言	(274)
§ 19-2	裂纹顶点张开位移 (COD) 方法	(274)
§ 19-3	COD 方法的基本理论	(276)
§ 19-4	在大范围屈服下的裂纹张开位移	(278)
§ 19-5	全屈服断裂的COD与裂纹尺寸及应变关 系	(280)
§ 19-6	材料的张开位移临界值 (开裂) δ_0 的实验测定 方法	(283)
§ 19-7	J 积分方法	(287)
附录 I	(291)

一、用威斯特噶尔德型应力函数解平面线弹性裂纹 问题	(291)
二、 G_I 与 K_I 的关系	(305)
附录 I	(308)
一、英国规范BS-5400提供的 $S-N$ 曲线	(308)
二、美国ASME压力容器规范所建议的疲劳设计 曲线	(309)
三、美国焊接协会AWS提供的管节点的 $S-N$ 曲线	(310)
附录 II	(312)
一、 $D-M$ 模型的塑性区尺寸及其张开位移	(312)
二、 J 积分的路径无关性	(314)
三、 $J = -\frac{\partial u}{\partial a}$ 的证明	(321)
附录 IV	(328)
单位换算表	(323)

符 号 表

a	裂纹尺寸
a_c	临界裂纹尺寸
a_0, a_i	初始裂纹尺寸
a_0^*	不产生应力腐蚀脆断的裂纹尺寸上限值
a_f	有限裂纹尺寸
a_r	裂纹扩展到第二阶段时的尺寸
c	表面裂纹的尺寸；柔度
CVN	V形缺口试验，或测得断裂时吸收的能量
$\frac{da}{dN}$	疲劳裂纹扩展速率
$\frac{da}{dt}$	腐蚀裂纹扩展速率
B, t	试样厚度、厚度
D	累积疲劳损伤度，弦管直径
D_s	波浪纵坐标均方值
DT	动态撕裂试验
DWT	落锤试验
d	支管直径
E, E'	杨氏弹性模量 $E' = \begin{cases} E & \text{平面应力} \\ E/(1-\nu) & \text{平面应变;} \end{cases}$ 应变能、波浪
	能量
f	无量纲柔性系数、频率、概率密度函数

FTE	= NDT + 33°C弹性负荷破坏转变温度
FTP	= NDT + 66°C塑性负荷破坏转变温度
G_I	I型裂纹能量释放率
G_{Ic}	I型裂纹能量释放率临界值
H	波浪高度
$H_s, H_{1/3}$	名义波高
h	波浪纵坐标
h_s	波浪幅值
$H(\omega)$	结构响应传递函数
J	J 积分
J_{Ic}	J 积分临界值
[K]	结构总刚度矩阵
K, K_I, K_{II}, K_{III}	应力强度因子
K_{Ic}	I型裂纹平面应变断裂韧性
K_c	平面应力断裂韧性
$K_{I,sc}$	应力腐蚀裂纹应力强度因子
K_T	裂纹扩展到第II阶段终点的应力强度因子
K_{Ii}	K_I 的初值
K_{Imax}	K_I 的最大值
K_{Imin}	K_I 的最小值
ΔK_I	= $K_{Imax} - K_{Imin}$ 应力强度因子范围
ΔK_{Ih}	应力强度因子门槛值
K_t	理论应力集中系数
K_f	有效应力集中系数
$\Delta K_f, \Delta K_{eff}$	有效应力强度因子范围

$\left. \frac{\Delta K_I}{\sqrt{\rho}} \right)_{th}$ 疲劳开裂门槛值

L 疲劳寿命, 弦管长度

m_0	功率谱密度函数下的面积
m_n	功率谱的 n 阶矩 = $M_1 \cdot M_2$ 表面裂纹修正系数
M_1	前表面修正系数
M_2	背表面修正系数
M_s	欧文自由表面修正系数
M_w	有限宽度修正系数
NDT	零塑性转变温度
n	硬化指数, 波浪循环次数, 安全系数
N	极限循环次数, 寿命
N_i	疲劳裂纹起始寿命
N_p	疲劳裂纹扩展寿命
N_D	一年中波浪相对于结构入射方向数目
N_j	= $N_i + N_p$ 总寿命
N_s	一年中浪级数目
N_1	初始裂纹出现时的循环次数
N_2	可见裂纹出现时的循环次数
N_3	贯穿裂纹出现时的循环次数
N_4	试验终结时的循环次数
$\{ p \}$	水动力载荷矩阵
p	概率
p, c, f	塑性约束系数
q	敏感性系数
r, θ	极坐标, 支管对弦管的倾斜角度
R	裂纹扩展阻力、应力比
R_c	裂纹扩展阻力的临界值
$R_{j,k}$	浪级 j 方向 k 海况出现概率
R_p	最大塑性区尺寸
r_p	塑性区尺寸

S_c	热点应力集中因子
$S_{A,}$	平均应力集中因子
s	应力强度或疲劳强度
$S(\omega)$	功率谱密度函数
T	温度、波浪周期, 弦管壁厚
T_c	跨峰周期
T_z	跨零周期
t	时间、板厚, 支管壁厚
t_B	计算结构疲劳损伤的基本时间
U	系统总势能
U_p	塑性变形能
u, v, w	位移分量
V_1, V_2	电压降
V_p	冲剪应力
W	外力功, 试样宽度
x, y, z	直角坐标
$X(w)$	结构位移响应
Y	形状系数
$Y(s)$	描述裂纹形状影响的函数
$Y(\sigma)$	描述名义应力改变影响的函数
Y	应力强度校正因子
$Y(\sigma)$	裂纹深度起支配作用时的Y值
α	动力放大系数
$\beta_{i,c}$	平面应变有效系数
Γ	表面能
δ	弹性伸长
μ	剪切弹性模量
ρ	曲率半径, 水密度
$\sigma_i (i=1, 2, 3)$	主应力分量

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ } 直角坐标系应力分量
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ }

$\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ 极坐标系应力分量

σ_c 临界应力

σ_∞ 无限远处应力

σ_{ys} 屈服应力

σ_{eys} 有效屈服应力

$\sigma_{y'd}$ 动态屈服应力

σ_m 平均应力

σ_a 应力幅值

σ_u 强度极限

σ_{max} 最大应力

σ_{min} 最小应力

σ_{eq} 相当应力

σ_e 疲劳持久限

$[\sigma_c]$ 许用的压缩应力

σ_G 热点应力

σ_N 名义应力

σ_L 局部应力

ν, ν' 材料泊桑比, $\nu' = \begin{cases} \nu & \text{平面应力} \\ \nu / (1 - \nu) & \text{平面应变} \end{cases}$

ω 平台结构自振频率

$\tilde{\omega}$ 波浪表观平均圆频率

ε 波谱宽度参数

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ } 直角坐标系应变分量
 $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ }

$\dot{\varepsilon}$ 应变率

Φ 第二类完全椭圆积分



第一章 结构断裂问题的概述

§1-1 引 言

结构材料在没有出现任何塑性变形痕迹之前而刹那间突然发生断裂,其断裂过程中裂纹扩展速度可高达2000m/s,这种破坏显然会造成灾难性的事故,这种断裂称之为脆断。其断裂面呈现平断口,伴有极少的或甚至没有任何剪切唇,如图1-1-1所示。发生脆断的名义应力则低于材料的屈服限。

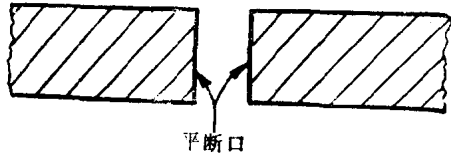


图1-1-1 脆性断口

在二次大战之前,欧洲有许多座四角形撑杆组成的桁架式桥梁在投入营用不久即发生破坏。它们是在受轻载荷、低温条件下发生的。破坏来得非常突然与迅速,是一种脆性断裂。调查结果得出许多焊缝处带有缺陷,大多数破坏起源于焊缝。却贝V冲击试验结果进一步指出其大多数钢材在工作温度下呈现脆性性质。脆断问题直到二次世界大战中由于发生了大量船舶破坏事故之后,才引起了工程界的重视。在二次大战期间所建造的近5000条民船中,到1946年4月前出现了相当尺寸裂纹的船舶就有1000条以上。在1942年至1952年间,有250条船舶的结构部件发生严重脆断事故,结果至少有9条T-2油轮与7条自由轮完全断裂成两段。在自由轮方面大多数断裂起源于仓口角隅,或在舷顶列板上的方角切口处。换言之,即起源于缺口及焊接缺陷处。

在T-2油轮上所发生的大多数断裂则起源于船底壳板的焊缝。