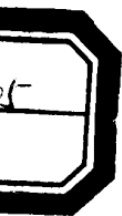


焊接结构 疲劳断裂与寿命预测

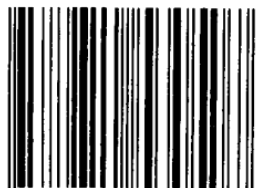
管德清 著



湖南大学出版社

责任编辑/张高明

ISBN 7-81053-050-X



9 787810 530507 >

ISBN7-81053-050-X/TG.2

定价：10.00 元



湖南省自然科学基金、电力工业部中华电力教育基金
及长沙电力学院科学基金资助

焊接结构疲劳断裂与寿命预测

管德清 著

湖南大学出版社

1996年·长沙

内 容 简 介

本书是一部系统介绍焊接结构疲劳断裂与寿命预测的著作。主要内容包括:焊接结构的应力应变场数值计算方法、焊接结构的疲劳强度预测理论、S-N 曲线及 P-S-N 曲线预测方法、裂纹形成寿命和扩展寿命预测,最后介绍了复杂载荷下焊接结构的疲劳寿命预测研究成果。

本书内容丰富,可供从事固体力学、焊接结构教学的高等学校教师及从事该方面研究的工程技术人员参考。

焊接结构疲劳断裂与寿命预测

Hanjie Jiegou Pilao Duanlie Yu Shouming Yuce

管德清 著

责任编辑 张高明

☆

湖南大学出版社出版发行

(长沙岳麓山 邮政编码 410082)

湖南省新华书店经销

湖南大学印刷厂印装

☆

850×1168 32 开 6.75 印张 163 千字

1996 年 11 月第 1 版

1996 年 11 月第 1 次印刷

印数:1-500

ISBN 7-81053-050-X/TG·2

定价:10.00 元

(湖南大学版图书凡属印装差错,请向承印厂调换)

前 言

焊接结构已广泛地应用于工程实际的许多领域。由于交变载荷作用而产生的疲劳断裂事故,往往给人们带来灾难性的损失,因而有关焊接结构的疲劳断裂研究受到理论工作者和工程技术人员普遍关注。目前,预测焊接结构的疲劳寿命仍主要依赖于试验。由于影响疲劳破坏的因素很多,使得完全用疲劳试验来研究焊接结构疲劳特性的方法显得十分不够,因而,建立用较少的试验获得准确可靠的疲劳强度及寿命预测理论,对工程应用具有实际价值。同时,这也是国内外一些学者致力追求的目标。

为了推动焊接结构疲劳断裂及寿命预测研究的发展,作者在多年研究所取得成果的基础上撰写成此书。其中部分成果曾先后在国内外学术刊物及国际学术会议上发表,而许多研究则是作者近年来在湖南省自然科学基金、电力工业部中华电力教育基金及长沙电力学院自然科学基金资助下所取得的新成果。此外,在撰写本书的过程中,作者还广泛参考了国内外有关文献资料。

本书主要从焊接结构应力场及裂纹尖端应力强度因子的数值计算、S-N曲线及P-S-N曲线的预测、疲劳裂纹形成寿命及扩展寿命预测等几方面系统地介绍了焊接结构疲劳断裂及寿命预测的理论和方法。本书第一章是绪论,介绍了疲劳断裂的基本特征、疲劳寿命曲线及构件疲劳寿命预测的基本方法。第二章和第三章介绍了焊接结构应力场和裂纹尖端应力强度因子的数值计算理论。第四章讨论了影响焊接结构疲劳性能的主要因素。第

五章和第六章详细地介绍了有关焊接结构的疲劳强度预测理论、中周 S-N 曲线和 P-S-N 曲线以及低周疲劳寿命曲线的预测方法,其中许多是作者尚未公开发表的新成果。第七章和第八章分别介绍了焊接结构疲劳裂纹形成寿命和疲劳裂纹扩展寿命的预测方法。第九章介绍了复杂载荷作用下焊接结构疲劳裂纹形成寿命及裂纹扩展寿命的预测问题。

本书的出版,得到了湖南省自然科学基金、电力工业部中华电力教育基金和长沙电力学院科学基金的资助,作者在此谨表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中论述及观点难免有不当之处,尚望读者批评指正。

作 者

1996 年 9 月

目 次

1 绪论	1
1.1 疲劳断裂及寿命预测研究的意义	1
1.2 焊接接头的基本类型	1
1.3 疲劳断裂的基本特征	3
1.4 疲劳寿命曲线	5
1.5 预测构件疲劳寿命的基本方法	7
2 焊接结构应力场的数值计算理论	10
2.1 应力场数值计算理论简介	10
2.2 五面体 6 节点和 15 节点单元	11
2.3 五面体 6~15 节点单元	18
2.4 六面体 8~21 节点单元	22
2.5 半圆柱体等参单元及奇异单元	25
2.6 三棱柱体奇异元及拟协调奇异元	30
2.7 线弹簧单元	36
2.8 应力强度因子的数值计算理论	49
3 理论应力集中系数及应力强度因子的计算	54
3.1 线性代数方程组的建立	54
3.2 应力场的计算	56
3.3 常见焊接结构的理论应力集中系数公式	59
3.4 表面裂纹应力强度因子的计算	65

4	影响焊接结构疲劳性能的因素	73
4.1	应力集中	73
4.2	尺寸效应	76
4.3	平均应力	78
4.4	残余应力	80
4.5	材质和力学非均匀性	80
4.6	焊后热处理及焊缝修整技术	82
4.7	腐蚀	84
5	焊接结构的疲劳强度及 S-N 曲线预测	86
5.1	焊接结构的 S-N 曲线	86
5.2	疲劳切口系数理论	88
5.3	对称循环时的有效应力集中系数预测	96
5.4	非对称循环时的有效应力集中系数预测	109
5.5	疲劳强度预测的厚度效应	115
5.6	S-N 曲线预测的一点法	124
5.7	对称循环时的 S-N 曲线预测	127
5.8	非对称循环时的 S-N 曲线预测	135
5.9	管节点 S-N 曲线预测方法	143
5.10	低周疲劳 S-N 曲线预测方法	148
6	焊接结构的 P-S-N 曲线预测	152
6.1	构件的 P-S-N 曲线	152
6.2	P-S-N 曲线预测的一点法	154
6.3	利用均方差曲线预测 P-S-N 曲线	157
6.4	P-S-N 曲线预测的极大似然法	160

7 焊接结构的疲劳裂纹形成寿命预测	163
7.1 预测疲劳裂纹形成寿命方法简介	163
7.2 局部应力应变分析的 Neuber 法	164
7.3 局部应力应变分析的能量法	168
7.4 焊接结构疲劳裂纹形成寿命预测方法	171
8 焊接结构疲劳寿命预测的断裂力学方法	177
8.1 疲劳裂纹扩展方程式	177
8.2 疲劳裂纹扩展寿命预测	179
8.3 疲劳裂纹扩展的超载效应	183
8.4 疲劳寿命预测的两阶段法	184
9 复杂载荷下焊接结构的疲劳寿命预测	189
9.1 疲劳累积损伤理论	189
9.2 复杂载荷下的疲劳寿命预测	192
9.3 复杂载荷下疲劳裂纹形成寿命预测	194
9.4 复杂载荷下疲劳裂纹扩展寿命预测	195
参考文献	198

1 绪 论

1.1 疲劳断裂及寿命预测研究的意义

焊接是许多重大结构的主要连接方式,焊接结构在航空航天、电力、机械、船舶及海洋工程中得到广泛应用。通常许多焊接结构都受交变载荷的作用。大量的研究表明,受交变载荷作用的构件,在工作应力低于材料的静强度,甚至低于材料的屈服强度条件下,经历了一定循环次数的交变载荷以后,可能发生突然断裂,从而产生灾难性的事故,结构的这种破坏形式,也就是我们所熟悉的疲劳断裂现象。为了保证焊接结构在服役期内的安全性,研究其疲劳断裂特性,预测它们的疲劳寿命,为工程应用提供科学的指导,具有重要意义。

焊接结构的失效主要是疲劳断裂所引起的。国内外已有许多因焊接结构疲劳破坏而产生灾难性事故的实例。因此许多发达国家越来越重视研究焊接结构的疲劳断裂问题。目前,许多在役焊接结构制成的重大设备在设计初并未考虑其疲劳失效问题,因而这些结构潜伏着危机。此外,随着焊接结构向大型化、高参数的方向发展,对结构的寿命要求更高更准确可靠,所以,我们应该高度重视焊接结构的疲劳断裂研究。

1.2 焊接接头的基本类型

根据结构联接的需要,在焊接结构中可以采用不同形式的

焊接接头,通常的焊接结构有板接头和管接头两大类。具体来说,板接头中有对接接头、T型接头、角接头和搭接头四种基本形式。其结构示意图分别如图 1.1~图 1.4 所示。



图 1.1 对接接头

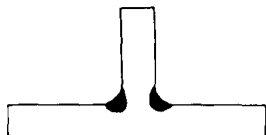


图 1.2 T型接头

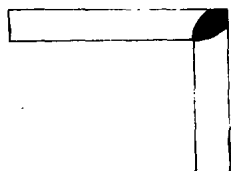


图 1.3 角接头

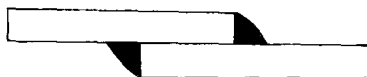


图 1.4 搭接头

管接头中有 T型管节点、Y型管节点、K型管节点、X型管节点,其结构示意图分别如图 1.5~图 1.8 所示。

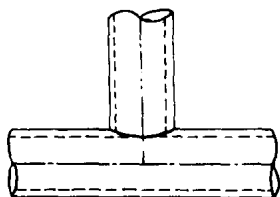


图 1.5 T型管节点

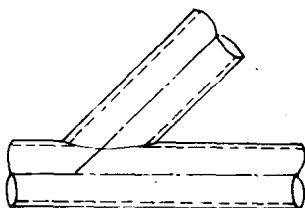


图 1.6 Y型管节点

在许多工程结构中所采用的焊接结构主要是板接头,而在海洋工程结构(如海上平台)及高层建筑等焊接结构中常采用焊接管节点。

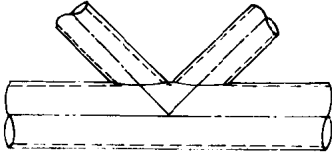


图 1.7 K 型管节点

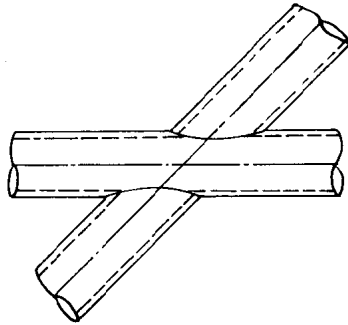


图 1.8 X 型管节点

1.3 疲劳断裂的基本特征

焊接结构受交变载荷作用,在结构几何变化处产生应力集中,尤其是在焊缝附近存在气孔、咬边、微裂纹等几何缺陷,这些地方的应力集中程度更高。由于应力集中使得焊接结构局部范围内的应力达到较高的水平,从而使得这些部位首先出现裂纹并扩展直至结构破坏。结构的疲劳断裂过程可用图 1.9 所示疲劳裂纹萌生和扩展图表示。它们分为如下三个阶段:

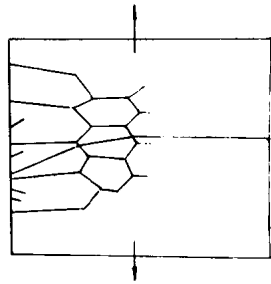


图 1.9 疲劳裂纹萌生和扩展示意图

第一阶段:裂纹的萌生阶段。

疲劳裂纹的萌生是由局部塑性应变集中而引起而产生的。在交变应力作用下,由于焊缝附近材料组织的不均匀性,疲劳裂纹在金属表面滑移带或缺陷区形成,尔后疲劳裂纹立即开始向金属内部扩展,其扩展方向通常与主应力轴成 45° 。这一阶段的疲

劳裂纹由最大剪应力控制。

第二阶段：裂纹的扩展阶段。

疲劳裂纹按第一阶段扩展一定距离后，裂纹扩展方向发生变化，它沿与主应力垂直方向扩展，这时裂纹扩展主要受主应力控制。

第三阶段：裂纹失稳扩展阶段。

疲劳裂纹的失稳扩展阶段与前面两个阶段不同，它是在一瞬间突然发生的，主要是由超载所引起的。其本质是因疲劳损伤累积，达到损伤临界值的结果。

因疲劳而断裂的构件，通过电子显微镜观察可以发现，其断口表面存在一系列基本相互平行、呈波浪形的条纹。形成这种条纹的机制可以采用 Laird 和 Smith 的塑性钝化模型来说明，其形成示意图如图1.10所示。

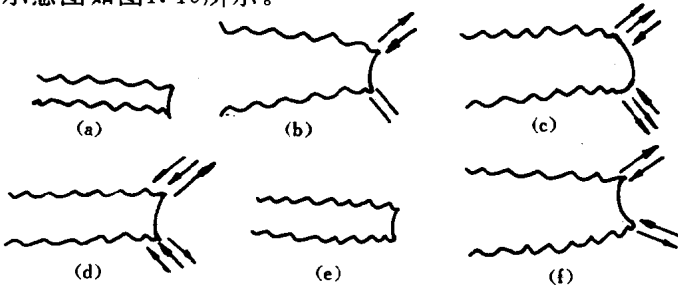


图 1.10 疲劳裂纹扩展的塑性钝化

这种模型的思想是：当卸载时裂纹闭合，裂纹尖端处于尖锐状态，如图 1.10(a)所示。当受拉伸载荷后，由于应力集中使裂纹尖端产生塑性变形，且塑性变形集中于与裂纹平面成 45° 角的滑移平面上，两个滑移带相互垂直，如图 1.10(b)所示。当拉应力达到最大值时，裂纹尖端加宽并钝化，形成半圆形状，如图 1.10(c)所示。继续卸载时，裂纹面闭合，其中一部分发生折迭形成新的切口，从而使裂纹增长一个长度，并形成新的裂纹尖端，

新旧两裂纹尖之间的距离也就等于断口两条纹的间距。根据该模型,经过每一次循环加载,裂纹尖端就经历一次锐化——钝化——再锐化的过程。

1.4 疲劳寿命曲线

当施加于结构的交变载荷经过一定的循环次数 N 以后,构件发生疲劳断裂。我们把循环次数 N 称为疲劳寿命。结构的疲劳寿命与材料的机械性质、结构几何形状、应力水平等多种因素有关。通常,对于同种材料制成的同一类型的结构,所施加的应力水平越高,其疲劳寿命越短。反之,疲劳寿命越长。

对试件用不同载荷进行多次反复加载试验,可测得在不同载荷下试件的疲劳寿命,得到应力与寿命的一系列关系,将这种应力-寿命关系的曲线描绘出来,也就是构件的疲劳寿命曲线,通常称为 S-N 曲线,如图 1.11 所示。



图 1.11 疲劳寿命曲线

构件 S-N 曲线的纵坐标通常用最大循环应力 σ_{\max} 或应力幅 σ_a 来表示,应力幅由 (1.1) 式给出

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1.1)$$

式中 σ_{\max} , σ_{\min} 分别是循环最大应力和循环最小应力。

循环时的平均应力 σ_m 和应力比 R 分别用 (1.2) 和 (1.3) 式表示:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.2)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.3)$$

S-N 曲线的横坐标通常用疲劳寿命 N 来表示。

在许多情况下, S-N 曲线可用双对数坐标表示, 如图 1.12 所示。

在双对数坐标系下, 构件的 S-N 曲线可以分为三条折线, 当 $N < N_1$ (N_1 可取 10^4) 时, 我们称它为低周疲劳阶段; 当 $N_1 < N < N_2$ (N_2 可取 2×10^6) 时, 我们称它为中周疲劳阶段; 当 $N > N_2$ 时, 称为高周疲劳阶段。高周疲劳寿命曲线可认为是一条平行于水平轴的直线, 其对应的应力水平称为疲劳强度极限。

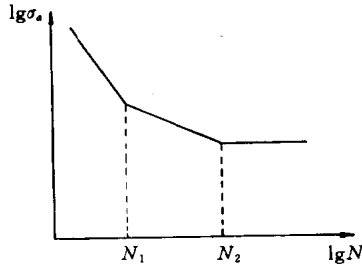


图 1.12 双对数坐标下的
疲劳寿命曲线

通常所说的 S-N 曲线是存活率为 50% 的疲劳寿命曲线, 也称为中值 S-N 曲线。但在疲劳强度设计中往往需要使用带存活率的 S-N 曲线, 即 P-S-N 曲线。图 1.13 是三条具有不同存活率的 P-S-N 曲线。

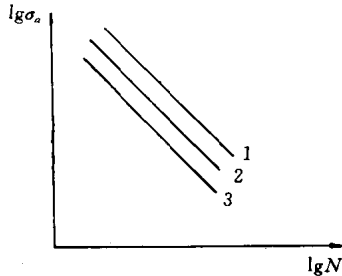


图 1.13 P-S-N 曲线

线。曲线 1 为中值 S-N 曲线。曲线 2 是存活率为 90% 的 S-N 曲线,它表示构件在特定的使用条件下不发生疲劳破坏的概率是 90%。曲线 3 是存活率为 99.9% 的 S-N 曲线。

要得到构件的 S-N 曲线,需要在不同应力水平下进行一系列疲劳断裂试验;要给出构件的 P-S-N 曲线,所需要的试验数据更多。因此,通过试验获得构件的疲劳寿命曲线,要花费大量的人力、物力和时间。

1.5 预测构件疲劳寿命的基本方法^[1~10]

由于影响构件疲劳性能的因素很多,因而使得预测疲劳寿命变得十分复杂,目前,预测构件的疲劳寿命主要有以下几种方法:

1.5.1 名义应力法

名义应力法是一种传统的疲劳寿命设计方法,其主要思想就是以名义应力为控制参数。通过疲劳实验获得名义应力-寿命曲线,即 S-N 曲线,通过载荷谱分析及损伤法则,即可计算构件的疲劳寿命。由于这种方法以实验为基础,具有较高的可靠度,因而在工程上得到广泛应用。但完全由疲劳试验获得 S-N 曲线,费时费力,很不经济,因而用名义应力法计算构件的疲劳寿命受到了较大地限制。

1.5.2 局部应力应变法

由于构件的几何变化处存在应力集中现象,通常,构件在这些局部产生塑性变形,因而使得疲劳裂纹萌生。所以,决定构件疲劳强度和寿命的主导因素是应力应变集中区的局部应力和应变。局部应力应变法正是基于这种思想,并假定只要局部应力应变相同,其疲劳寿命就完全一致。因而,只要知道构件的局部应力应变,就可以通过光滑材料试件的 S-N 曲线来预测构件的疲