

高校土木工程专业规划教材

GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

建筑钢结构设计

崔佳 主编

龙莉萍 副主编

JIANZHU GANGJIEGOU SHEJI

中国建筑工程工业出版社

高校土木工程专业规划教材

建筑钢结构设计

崔 佳 主 编
龙莉萍 副主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑钢结构设计/崔佳主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009
高校土木工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-11604-1

I. 建… II. 崔… III. 建筑结构: 钢结构-结构设计-高等学校-教材 IV. TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 210940 号

本书以高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》为依据, 结合《钢结构设计规范》GB 50017 等新规范, 系统介绍了建筑钢结构设计的基本理论知识、设计方法、结构体系及构造特点。

本书共分 6 章, 主要包括: 第 1 章绪论、第 2 章多层钢框架结构、第 3 章单层工业厂房钢结构、第 4 章轻型门式刚架结构、第 5 章大跨度房屋钢结构、第 6 章高层房屋钢结构。第 5、6 章在学时允许时可作为授课内容, 也可以作为学生毕业设计时的参考。

本书既可作为土木工程专业大学本科的教材, 也可供有关工程技术人员参考。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任设计: 赵明霞

责任校对: 袁艳玲 赵 颖

高校土木工程专业规划教材

建筑钢结构设计

崔 佳 主 编

龙莉萍 副主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 $\frac{3}{4}$ 插页: 2 字数: 451 千字

2010 年 3 月第一版 2010 年 3 月第一次印刷

定价: 33.00 元

ISBN 978-7-112-11604-1

(18863)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

按照高等学校土木工程专业指导委员会的意见,原土木工程专业钢结构课程已被拆分为《钢结构基本原理》和《建筑钢结构设计》两门课,为了适应培养方案的变化,在过去已有钢结构教材的基础上编写了本书。

《建筑钢结构设计》是土木工程专业的主要专业课之一,是研究建筑钢结构基本工作性能的一门工程技术型课程。本课程是建筑工程专业方向的必修课,课程教学的目的,是使学生系统地学习建筑钢结构设计的基本理论知识、设计方法、结构体系及构造特点。

本书主要依据高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》,同时结合作者多年从事钢结构教学工作的经验编写而成。

本书共分6章。第1章绪论,阐述了建筑钢结构的设计方法,着重讲解了用于钢结构设计的概率极限状态设计方法和疲劳强度设计采用的容许应力设计法,本章还介绍了荷载作用效应、材料选用及设计指标。第2章主要讲解多层钢框架的结构体系、受力分析方法及框架柱计算长度的确定,同时讨论了梁柱构件的截面设计、连接节点设计以及柱脚设计等。第3章介绍了单层厂房钢结构的结构体系、屋盖结构、支撑布置,还重点讨论了吊车梁的计算特点及设计方法。第4章是针对目前我国应用较多的门式刚架结构编写的内容,重点是对门式刚架结构体系以及梁柱构件、檩条等基本构件受力特点及计算方法的介绍。第5章介绍了平面及空间承重的大跨度钢结构的结构体系,如大跨度桁架结构、框架结构、拱结构等,重点讨论了平板网架结构的工作性能及计算方法。大跨度结构中的网壳结构、悬索结构和膜结构等也有简单的介绍,目的是开阔学生的眼界。第6章是高层钢结构,重点讨论了高层建筑钢结构的结构体系以及结构和构件的抗震设计思路。第5、6章在学时允许时可作为授课内容,也可以作为学生毕业设计时的参考。

本书既可作为土木工程专业大学本科的教材,也可供有关工程技术人员参考。

参加本书编写的有崔佳(第1、2、5、6章)、龙莉萍(第3章)、郭莹(第4章)。全书由崔佳主编,龙莉萍副主编,负责本书大纲的制定、全书内容的统一、审校、修改和定稿。

对书中的一些疏漏和不当之处,还望读者批评指正。

目 录

1 绪论	1
1.1 建筑钢结构的设计原则	1
1.1.1 概率极限状态设计法	1
1.1.2 容许应力法——疲劳计算	2
1.2 荷载及作用	7
1.2.1 永久荷载	7
1.2.2 楼面及屋面均布活荷载	7
1.2.3 风荷载	7
1.2.4 雪荷载	7
1.2.5 吊车荷载	7
1.2.6 地震作用	7
1.2.7 温度作用	12
1.2.8 其他	12
1.3 荷载作用效应组合	12
1.3.1 承载力极限状态设计表达式	12
1.3.2 正常使用极限状态设计表达式	13
1.4 材料选用	14
1.4.1 钢结构主材的选用	14
1.4.2 钢材选用的基本原则和考虑因素	16
1.4.3 钢结构的连接材料	18
1.5 设计指标	20
1.5.1 钢材的强度设计值	20
1.5.2 连接的强度设计值	21
1.5.3 强度设计值的折减系数	21
2 多层钢框架结构	22
2.1 钢框架的结构体系	22
2.2 框架结构的受力分析	23
2.2.1 钢框架的计算模型	23
2.2.2 框架结构的内力分析	23
2.2.3 框架结构二阶弹性分析的近似计算方法	24
2.3 框架柱的计算长度	26
2.3.1 计算长度的定义	26
2.3.2 单层等截面框架柱在框架平面内的计算长度	27
2.3.3 多层等截面框架柱在框架平面内的计算长度	29
2.3.4 附有摇摆柱的框架柱的计算长度	31
2.3.5 框架柱在框架平面外的计算长度	31

2.4	框架结构的荷载效应组合与截面设计	32
2.4.1	荷载效应组合	32
2.4.2	构件承载力验算	33
2.4.3	框架柱的截面设计	33
2.4.4	梁的截面设计	39
2.5	框架连接节点设计	44
2.5.1	框架中主梁与次梁的连接	44
2.5.2	框架中梁与柱的连接	46
2.5.3	梁的拼接	47
2.6	框架柱的柱脚	49
2.6.1	铰接柱脚	49
2.6.2	刚接柱脚	53
3	单层工业厂房钢结构	59
3.1	厂房结构的形式和布置	59
3.1.1	厂房结构的组成	59
3.1.2	柱网和温度伸缩缝的布置	60
3.1.3	厂房结构的设计步骤	61
3.2	厂房结构的框架形式	61
3.2.1	横向框架主要尺寸和计算简图	62
3.2.2	横向框架的荷载和内力	64
3.2.3	框架柱的类型	65
3.2.4	纵向框架的柱间支撑	66
3.3	屋盖结构	68
3.3.1	屋盖结构的形式	68
3.3.2	屋盖支撑	72
3.3.3	檩条设计	78
3.3.4	简支屋架设计	82
3.3.5	刚接屋架(框架横梁)设计特点	112
3.4	厂房框架柱设计特点	114
3.4.1	柱的计算长度	114
3.4.2	格构式框架柱的设计	115
3.4.3	肩梁的构造和计算	121
3.4.4	托架与柱的连接	123
3.5	吊车梁设计特点	123
3.5.1	吊车梁系统结构的组成	124
3.5.2	吊车梁的荷载	125
3.5.3	吊车梁的内力计算	126
3.5.4	吊车梁的截面验算	126
3.5.5	吊车梁与柱的连接	129
3.5.6	吊车梁设计例题	130
3.6	厂房墙架体系	137
3.6.1	墙体类型	137

3.6.2 墙架结构的布置	138
4 轻型门式刚架结构	141
4.1 门式刚架的结构形式和结构布置	141
4.1.1 门式刚架的结构形式及特点	141
4.1.2 门式刚架的适用范围	142
4.1.3 门式刚架的结构体系与布置	143
4.2 荷载及作用效应计算	145
4.2.1 荷载计算	145
4.2.2 荷载组合效应	147
4.2.3 刚架的内力和侧移计算	148
4.3 构件设计	151
4.3.1 控制截面的内力组合	151
4.3.2 变截面刚架柱和梁的设计	151
4.4 连接和节点设计	158
4.4.1 斜梁与柱的连接和斜梁拼接	158
4.4.2 摇摆柱与斜梁的连接	161
4.4.3 柱脚	161
4.4.4 牛腿	162
4.5 围护构件设计	162
4.5.1 檩条设计	162
4.5.2 墙梁设计	167
第5章 大跨度房屋钢结构	179
5.1 概 述	179
5.2 平面承重的大跨度屋盖结构	181
5.2.1 梁式大跨结构	181
5.2.2 单层大跨度框架结构	185
5.2.3 拱式结构	188
5.3 平板网架结构	191
5.3.1 平板空间网架的形式	191
5.3.2 网架结构的设计特点	196
5.4 网壳结构	201
5.4.1 网壳结构常用的形式	201
5.4.2 网壳结构的选型	203
5.4.3 网壳结构的内力分析	203
5.4.4 网壳结构的设计	204
5.5 悬索结构	204
5.5.1 单层悬索体系	204
5.5.2 双层悬索体系	205
5.5.3 悬索结构的受力特点	205
5.6 膜结构	206
5.6.1 膜结构用膜材及其特性	206
5.6.2 膜结构的分类	207

6 高层房屋钢结构	210
6.1 概述	210
6.1.1 高层钢结构的特点	210
6.1.2 高层建筑钢结构的结构体系	211
6.2 高层钢结构的计算特点	214
6.2.1 荷载与作用	214
6.2.2 结构设计	216
6.3 压型钢板组合楼（屋）盖结构	218
6.3.1 组合楼板的设计要求	218
6.3.2 组合梁的设计要求	221
6.4 构件及连接的设计特点	226
6.4.1 梁的设计	226
6.4.2 柱的设计	228
6.4.3 抗侧力结构的设计	229
6.4.4 连接节点的设计	232
附录	237
附录 1 钢材和连接的强度设计值	237
附录 2 受拉、受压构件的容许长细比	239
附录 3 轴心受压构件的截面分类	240
附录 4 受压构件板件的宽厚比限值	242
附录 5 轴心受压构件的稳定系数	243
附录 6 结构或构件的变形容许值	246
附录 7 截面塑性发展系数	248
附录 8 梁的整体稳定系数	249
附录 9 柱的计算长度系数	252
附录 10 疲劳计算的构件和连接分类	258
附录 11 型钢表	261
附录 12 冷弯薄壁型钢表	283
附录 13 螺栓和锚栓规格	288
参考文献	289

1 绪 论

钢结构在中国的发展已有几十年的历史。最初主要应用于厂房、屋盖、平台等工业结构中，直到 20 世纪 80 年代初期才开始大规模地应用于民用建筑。特别是最近 20 多年，我国建筑钢结构经历了历史上最快速发展的时期，钢结构在建筑工程中得到广泛的应用，各种结构形式如大跨度钢结构、多层钢框架结构、轻型门式刚架结构以及高层钢结构等多种结构体系已越来越多地应用于工业、民用以及公共建筑等各个领域。这些建筑之所以采用钢材作为主要承重结构材料，一是因为钢材具有强度高、塑性韧性好的特点，可以减轻结构自重，因而更适用于大荷载及大空间的结构；另外，钢材的延性好、抗震性能优、便于实现工厂化生产及材料可以回收利用等特点也使建筑钢结构具有更大的后续发展空间。

1.1 建筑钢结构的设计原则

1.1.1 概率极限状态设计法

承载能力极限状态和正常使用极限状态是结构或构件设计及计算的依据，建筑钢结构设计一般采用概率极限状态设计方法。

(1) 承载能力极限状态

承载能力极限状态可理解为结构或构件发挥允许的最大承载功能的状态。结构或构件由于塑性变形而使其几何形状发生显著改变，虽未到达最大承载能力，但已彻底不能使用，也属于达到这种极限状态。

钢结构或构件承载能力的计算一般采用应力表达式。根据《建筑结构荷载规范》，当按承载能力极限状态设计钢结构时，对于基本组合，内力设计值应从由可变荷载效应控制的组合（式 1-28）和由永久荷载效应控制的组合（式 1-29）中取最不利值考虑。钢结构自重较小，一般大跨度结构、门式刚架结构等由可变荷载效应控制设计；采用钢筋混凝土楼面（或屋面）的多层、高层建筑或有积灰的屋盖结构有可能由永久荷载效应控制设计。

(2) 钢结构的安全等级

按照现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》的规定，建筑结构依其破坏可能产生的后果（危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等）的程度分为严重的、一般的和次要的。对破坏后果很严重的重要的房屋，安全等级为一级；对破坏后果严重的一般的房屋，安全等级为二级。根据对我国已建成的建筑物采用概率统计方法分析的结果，一般工业与民用建筑钢结构，按照《建筑结构可靠度设计统一标准》的分级标准，安全等级多为二级，故《钢结构设计规范》规定可取为二级。对于其他特殊的建筑钢结构，如跨度等于或大于 60m 的大跨度结构（大会堂、体育馆、飞机库等的屋盖主要承重结构）则宜取为一级。

当按抗震要求设计时，不再分安全等级，而应按现行国家标准《建筑抗震设防分类标准》GB 50223 的规定来确定建筑物的抗震设防类别。

(3) 正常使用极限状态

正常使用极限状态可理解为结构或构件达到使用功能上允许的某个限值的状态。例如，某些结构必须控制变形和裂缝才能满足使用要求，因为过大的变形会造成房屋内部粉刷层剥落，填充墙和隔断墙开裂，以及屋面积水等后果，过大的裂缝会影响结构的耐久性，同时，过大的变形或裂缝也会使人们在心理上产生不安全感。

《钢结构设计规范》对结构或构件正常使用的计算亦采用应力表达式（式 1-31）。

1.1.2 容许应力法——疲劳计算

在连续反复荷载作用下，应力远低于抗拉强度时构件发生的突然破坏现象称为钢材的疲劳，其特点表现为破坏前没有明显的塑性变形。

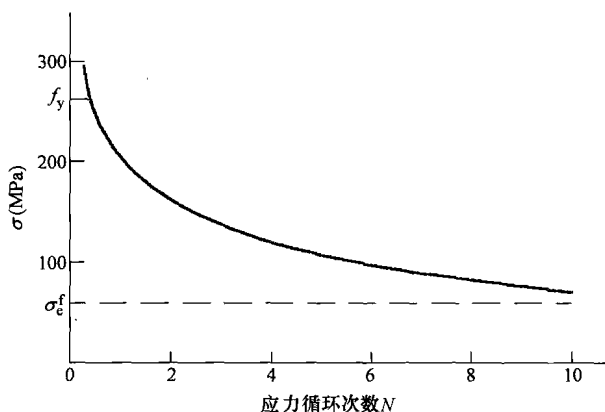


图 1-1 疲劳强度与应力循环次数的关系

疲劳强度的大小与应力循环的次数有关，详见图 1-1。我国规范规定，对直接承受动力荷载重复作用的钢结构构件及其连接，当应力变化的循环次数 N 等于或大于 5×10^4 次（约 50 年）时，应进行疲劳强度计算。

由于现阶段对疲劳计算的可靠度理论问题尚未解决，所以钢结构的疲劳强度计算只能沿用传统的按弹性状态计算的“容许应力幅”的设计方法。应力幅 $\Delta\sigma$ 为应力谱

（如图 1-2 中的实线所示）中最大应力 $\sigma_{\max}$ 与最小应力 $\sigma_{\min}$ 之差，即 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ， $\sigma_{\max}$ 为每次应力循环中的最大拉应力（取正值）， $\sigma_{\min}$ 为每次应力循环中的最小拉应力（取正值）或压应力（取负值）。

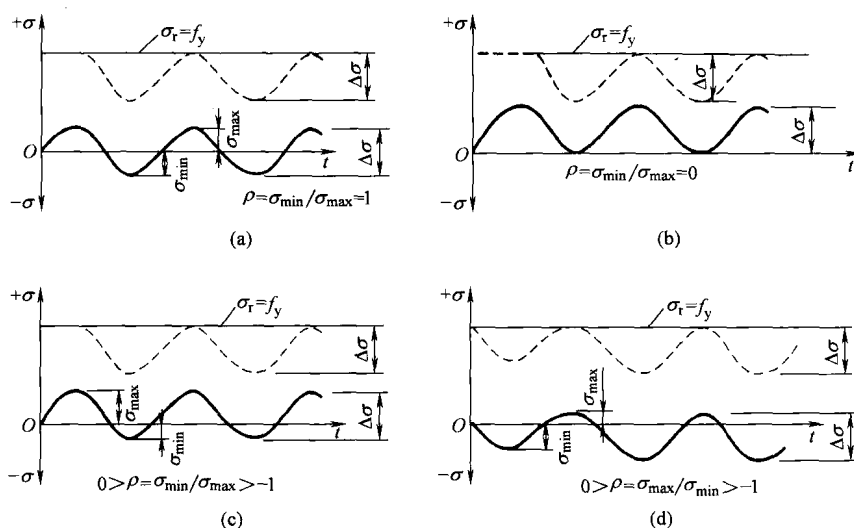


图 1-2 循环应力谱

1 绪 论

钢结构在中国的发展已有几十年的历史。最初主要应用于厂房、屋盖、平台等工业结构中，直到 20 世纪 80 年代初期才开始大规模地应用于民用建筑。特别是最近 20 多年，我国建筑钢结构经历了历史上最快速发展的时期，钢结构在建筑工程中得到广泛的应用，各种结构形式如大跨度钢结构、多层钢框架结构、轻型门式刚架结构以及高层钢结构等多种结构体系已越来越多地应用于工业、民用以及公共建筑等各个领域。这些建筑之所以采用钢材作为主要承重结构材料，一是因为钢材具有强度高、塑性韧性好的特点，可以减轻结构自重，因而更适合于大荷载及大空间的结构；另外，钢材的延性好、抗震性能优、便于实现工厂化生产及材料可以回收利用等特点也使建筑钢结构具有更大的后续发展空间。

1.1 建筑钢结构的设计原则

1.1.1 概率极限状态设计法

承载能力极限状态和正常使用极限状态是结构或构件设计及计算的依据，建筑钢结构设计一般采用概率极限状态设计方法。

(1) 承载能力极限状态

承载能力极限状态可理解为结构或构件发挥允许的最大承载功能的状态。结构或构件由于塑性变形而使其几何形状发生显著改变，虽未到达最大承载能力，但已彻底不能使用，也属于达到这种极限状态。

钢结构或构件承载能力的计算一般采用应力表达式。根据《建筑结构荷载规范》，当按承载能力极限状态设计钢结构时，对于基本组合，内力设计值应从由可变荷载效应控制的组合（式 1-28）和由永久荷载效应控制的组合（式 1-29）中取最不利值考虑。钢结构自重较小，一般大跨度结构、门式刚架结构等由可变荷载效应控制设计；采用钢筋混凝土楼面（或屋面）的多层、高层建筑或有积灰的屋盖结构有可能由永久荷载效应控制设计。

(2) 钢结构的安全等级

按照现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》的规定，建筑结构依其破坏可能产生的后果（危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等）的程度分为严重的、一般的和次要的。对破坏后果很严重的重要的房屋，安全等级为一级；对破坏后果严重的一般的房屋，安全等级为二级。根据对我国已建成的建筑物采用概率统计方法分析的结果，一般工业与民用建筑钢结构，按照《建筑结构可靠度设计统一标准》的分级标准，安全等级多为二级，故《钢结构设计规范》规定可取为二级。对于其他特殊的建筑钢结构，如跨度等于或大于 60m 的大跨度结构（大会堂、体育馆、飞机库等的屋盖主要承重结构）则宜取为一级。

当按抗震要求设计时，不再分安全等级，而应按现行国家标准《建筑抗震设防分类标准》GB 50223 的规定来确定建筑物的抗震设防类别。

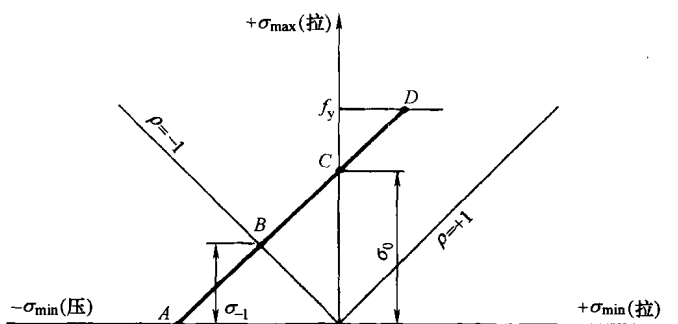


图 1-3 非焊接结构的疲劳图

均形成在拉应力范围内的 $\Delta\sigma = f_y - \sigma_{\min}$ 的循环 (图 1-2 中的虚线所示)。所以疲劳强度与名义最大应力和应力比无关, 而与应力幅 $\Delta\sigma$ 有关。此观点已为国内外的大量疲劳试验所证实。图 1-2 中的实线为名义应力循环应力谱, 虚线为实际应力谱。

根据试验数据可以画出构件或连接的应力幅 $\Delta\sigma$ 与相应的致损循环次数 N 的关系曲线 (图 1-4a), 按试验数据回归的 $\Delta\sigma-N$ 曲线为平均值曲线。目前国内外都常用双对数坐标轴的方法使曲线改为直线以便于简化 (图 1-4b)。在双对数坐标图中, 疲劳直线方程为:

$$\lg N = b_1 - \beta \lg(\Delta\sigma) \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad N(\Delta\sigma)^\beta = 10^{b_1} = C \quad (1-4)$$

式中 β ——疲劳直线对纵坐标的斜率;

b_1 ——疲劳直线在横坐标轴上的截距;

N ——循环次数。

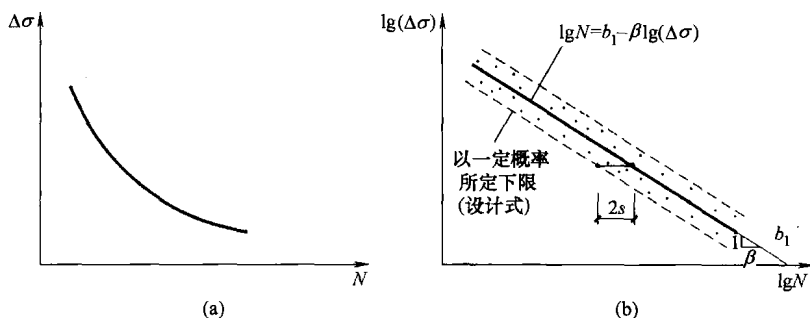


图 1-4 $\Delta\sigma-N$ 曲线

考虑到试验数据的离散性, 取平均值减去 2 倍 $\lg N$ 的标准差 ($2s$) 作为疲劳强度下限值 (图 1-4b 实线下方之虚线), 如果 $\lg(\Delta\sigma)$ 为正态封闭, 从构件或连接抗力方面来讲, 保证率为 97.7%。下限值的直线方程为:

$$\lg N = b_1 - \beta \lg(\Delta\sigma) - 2s = b_2 - \beta \lg(\Delta\sigma) \quad (1-5)$$

或

$$N(\Delta\sigma)^\beta = 10^{b_2} = C$$

取此 $\Delta\sigma$ 作为容许应力幅

$$[\Delta\sigma] = \left(\frac{C}{N} \right)^{1/\beta} \quad (1-6)$$

钢材的疲劳断裂是微观裂纹在连续重复荷载作用下不断扩展直至断裂的脆性破坏。钢材的疲劳强度取决于应力集中（或缺口效应）和应力循环次数。截面几何形状突然改变处的应力集中，对疲劳很为不利。在高峰应力处形成双向或三向同号拉应力场，在反复应力作用下，首先在应力高峰出现微观裂纹，然后逐渐开展形成宏观裂缝。在反复荷载的继续作用下，裂缝不断开展，有效截面面积相应减小，应力集中现象越来越严重，这就促使裂缝的继续开展。同时，由于是双向或三向同号拉应力场，材料的塑性变形受到限制。因此，当反复循环荷载达到一定的循环次数时，裂缝的开展使截面削弱过多经受不住外力作用，就会发生脆性断裂，出现钢材的疲劳破坏。如果钢材中存在着残余应力，在交变荷载作用下将更加剧疲劳破坏的倾向。

观察表明，钢材疲劳破坏后的截面断口，一般具有光滑的和粗糙的两个区域，光滑部分表现出裂缝的扩张和闭合过程是由裂缝逐渐发展引起的，说明疲劳破坏也经历一个缓慢的转变过程，而粗糙部分表明钢材最终断裂一瞬间的脆性破坏性质，与拉伸试验的断口颇为相似，破坏是突然的，几乎以 2000m/s 的速度断裂，因而比较危险。

通常钢结构的疲劳破坏属高周低应变疲劳，即总应变幅小，破坏前荷载循环次数多。

(1) 常幅疲劳

如果重复作用的荷载值不随时间变化，则在所有应力循环内的应力幅将保持常量，这谓之常幅疲劳。

应力循环特征有时用应力比 ρ 来表示，其含义为绝对值最小与最大应力之比（拉应力取正值，压应力取负值）。图 1-2 (a) 的 $\rho = -1$ ，称为完全对称循环；图 1-2 (b) 的 $\rho = 0$ 称为脉冲循环；图 1-2 (c)、(d) 的 ρ 在 0 与 -1 之间，称为不完全对称循环，但图 1-2 (c) 以拉应力为主，而图 1-2 (d) 则以压应力为主。

对轧制钢材或非焊接结构，在循环次数 N 一定的情况下，根据试验资料可绘出 N 次循环的疲劳图，即 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 的关系曲线。由于此曲线的曲率不大，可近似用直线来代替，所以只要求得两个试验点便可决定疲劳图。

图 1-3 为 $N = 2 \times 10^6$ 次的疲劳图。当 $\rho = 0$ 和 $\rho = -1$ 时的疲劳强度分别为 σ_0 和 σ_{-1} ，由此便可决定 $B(-\sigma_{-1}, \sigma_{-1})$ 和 $C(0, \sigma_0)$ 两点，并通过 B 、 C 两点得直线 $ABCD$ 。 D 点的水平线代表钢材的屈服强度，即使 $\sigma_{\max}$ 不超过 f_y 。当坐标为 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 的点落在直线 $ABCD$ 上或其上方，则这组应力循环达到 N 次时，将发生疲劳破坏，线段 BCD 以受拉为主，线段 AB 以受压为主， $ABCD$ 直线的方程为：

$$\sigma_{\max} - k\sigma_{\min} = \sigma_0 \quad (1-1)$$

$$\text{或} \quad \sigma_{\max}(1 - k\rho) = \sigma_0 \quad (1-2)$$

式中， $k = (\sigma_0 - \sigma_{-1}) / \sigma_{-1}$ 为直线 $ABCD$ 的斜率。

从上面的推导可知，对轧制钢材或非焊接结构，疲劳强度与最大应力、应力比、循环次数和缺口效应（构造类型的应力集中情况）有关。

对焊接结构并不是这样，由于焊接加热及随后的冷却，将在截面上产生垂直于截面的残余应力。在焊缝及其附近主体金属残余拉应力通常达到钢材的屈服点 f_y ，而此部位正是形成和发展疲劳裂纹最为敏感的区域。在重复荷载作用下，循环内应力开始处于增大阶段时，焊缝附近的高峰应力将不再增加（只是塑性范围加大），即 $\sigma_{\max} = f_y$ 之后，循环应力下降到 $\sigma_{\min}$ ，再升至 $\sigma_{\max} = f_y$ ，即不论应力比 ρ 值如何，焊缝附近的实际应力循环情况

次循环所引起的损伤为 $1/N_i$ ， n_i 次循环为 n_i/N_i 。按累积损伤法则，将总的损伤按线性叠加计算，则得发生疲劳破坏的条件为：

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots + \frac{n_i}{N_i} + \cdots = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1-9)$$

或写成

$$\sum \frac{n_i}{\sum n_i} \cdot \frac{\sum n_i}{N_i} = 1 \quad (1-10)$$

若认为变幅疲劳与同类常幅疲劳有相同的曲线，则根据式 (1-5)，任一级应力幅水平均有：

$$N_i (\Delta \sigma_i)^\beta = C \quad \text{或} \quad N_i = \frac{C}{(\Delta \sigma_i)^\beta} \quad (1-11)$$

设想有常幅 $\Delta \sigma_e$ 作用 $\sum n_i$ 次使同一结构也产生疲劳破坏，则有：

$$(\Delta \sigma_e)^\beta \cdot \sum n_i = C \quad \text{或} \quad \sum n_i = \frac{C}{(\Delta \sigma_e)^\beta} \quad (1-12)$$

式中 $\Delta \sigma_e$ ——等效应力幅。

将式 (1-11) 和式 (1-12) 的 N_i 和 $\sum n_i$ 值代入式 (1-10)，得：

$$\Delta \sigma_e = \left[\sum \frac{n_i (\Delta \sigma_i)^\beta}{\sum n_i} \right]^{1/\beta} \quad (1-13)$$

令 $\Delta \sigma_e = \alpha_f \Delta \sigma_{\max}$ ，由此：

$$\alpha_f = \frac{\Delta \sigma_e}{\Delta \sigma_{\max}} = \frac{1}{\Delta \sigma_{\max}} \left[\sum \frac{n_i (\Delta \sigma_i)^\beta}{\sum n_i} \right]^{1/\beta} \quad (1-14)$$

式中 $\Delta \sigma_{\max}$ ——变幅疲劳中的最大应力幅；

α_f ——变幅荷载的欠载效应系数。

钢结构设计规范给出了以 $N=2 \times 10^6$ 次为基准的 α_f 值，并规定：重级工作制吊车梁和重级、中级工作制吊车桁架的疲劳，可作为常幅疲劳按下式计算：

$$\alpha_f \Delta \sigma \leq [\Delta \sigma]_{N=2 \times 10^6} \quad (1-15)$$

式中 $[\Delta \sigma]_{N=2 \times 10^6}$ ——循环次数 $N=2 \times 10^6$ 的容许应力幅，应按式 (1-6) 计算；

α_f ——欠载效应系数，对重级工作制硬钩吊车 $\alpha_f=1.0$ ；重级工作制软钩吊车 $\alpha_f=0.8$ ；中级工作制吊车 $\alpha_f=0.5$ 。

进行疲劳强度计算时，有下列问题应予注意：

(1) 目前，按概率极限状态方法进行疲劳强度计算尚处于研究阶段，因此，疲劳强度计算用容许应力幅法，容许应力幅 $[\Delta \sigma]$ 是根据试验结果得到，故应采用荷载标准值进行计算。另外，疲劳计算中采用的计算数据大部分是根据实测应力或疲劳试验所得，已包含了荷载的动力影响，因此，不应再乘动力系数。

(2) 根据应力幅概念，不论应力循环是拉应力还是压应力，只要应力幅超过容许值就会产生疲劳裂纹。但由于裂纹形成的同时，残余应力自行释放，在完全压应力（不出现拉应力）循环中，裂纹不会继续发展，故规范规定此种情况可不予验算。

对于不同焊接构件和连接形式，按试验数据回归的直线方程其斜率不尽相同。为了设计的方便，我国《钢结构设计规范》按连接方式、受力特点和疲劳强度，再适当照顾 $[\Delta\sigma]$ - N 曲线簇的等间距布置、归纳分类，划分为 8 类（图 1-5），它们的 β 和 C 值见表 1-1。构件和连接分类的构造图见附录 10。

所以，对焊接结构的焊接部位的常幅疲劳，应按式计算：

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = [\Delta\sigma] \tag{1-7}$$

对于非焊接部位，最大应力或应力比对疲劳强度有着直接的影响，其疲劳强度应由式（1-2）确定。为了与焊接部位的计算方式一致，将式（1-1）等号左侧定名为“计算应力幅”，而以应力比 $\rho=0$ 的疲劳强度 σ_0 的下限值作为连接分类依据，即取 σ_0 的下限值为 $[\Delta\sigma]$ ，得：

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - k\sigma_{\min} = [\Delta\sigma] \tag{1-8}$$

式（1-8）中的系数 $k=0.7$ ，是由试验数据统计而确定的。

参数 C 、 β 值 表 1-1

构件和连接类别	1	2	3	4	5	6	7	8
C	1940×10^{12}	861×10^{12}	3.26×10^{12}	2.18×10^{12}	1.47×10^{12}	0.96×10^{12}	0.65×10^{12}	0.41×10^{12}
β	4	4	3	3	3	3	3	3

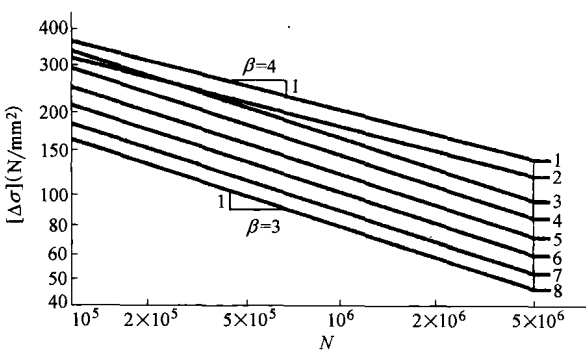


图 1-5 各类结构和连接类别的 $[\Delta\sigma]$ - N 曲线

(2) 变幅疲劳和吊车梁的欠载效应系数

上面的分析皆属于常幅疲劳的情况，实际结构（如厂房吊车梁）所受荷载其值常小于计算荷载，即性质为变幅的，或称随机荷载。变幅疲劳的应力谱如图 1-6 所示。

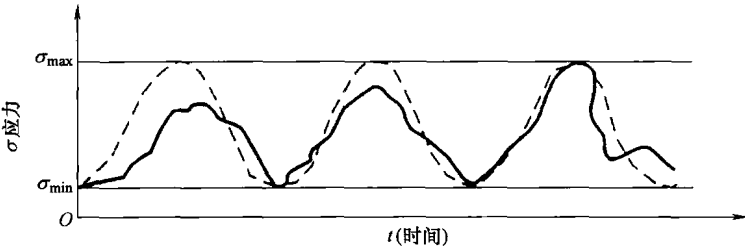


图 1-6 变幅疲劳的应力谱

常幅疲劳的研究结果可推广到变幅疲劳，但须引入累积损伤法则。当前通用的是 Palmgren-Miner 方法，简称 Miner 方法。

从设计应力谱可知应力幅水平 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \dots, \Delta\sigma_i, \dots$ 和对应的循环次数 $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$ ，再假设 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \dots, \Delta\sigma_i, \dots$ 为常幅时相对应的疲劳寿命分别是 $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots$ ， N_i 表示在常幅疲劳中 $\Delta\sigma_i$ 循环作用 N_i 次后，构件或连接即产生破损。则在应力幅 $\Delta\sigma_i$ 作用下的一

(1) 水平地震作用计算

建筑钢结构的设计反应谱，采用图 1-7 的地震影响系数曲线表示。

地震影响系数应根据烈度、场地类别、设计地震分组、结构自振周期以及阻尼比确定。

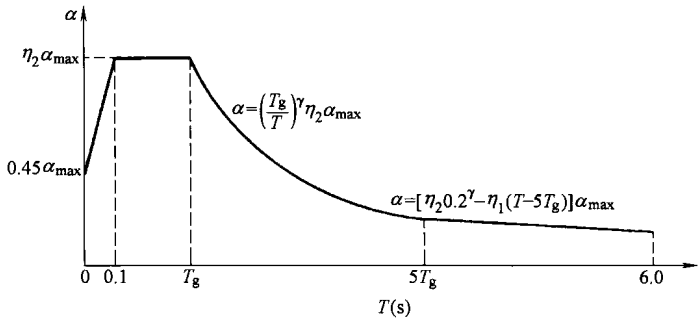


图 1-7 地震影响系数曲线

α —地震影响系数； $\alpha_{\max}$ —地震影响系数最大值； η_1 —直线下降段的下降斜率调整系数；
 γ —衰减指数； T_g —特征周期； η_2 —阻尼调整系数； T —结构自振周期

钢结构在多遇地震下的阻尼比，对不超过 12 层的钢结构可采用 0.035，对超过 12 层的钢结构可采用 0.02；在罕遇地震下的分析，阻尼比可采用 0.05。

计算水平地震作用标准值时，阻尼比为 0.05 的水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max}$ 应按表 1-2 采用；特征周期 T_g 应根据场地类别和设计地震分组按表 1-3 采用，计算 8、9 度罕遇地震作用时，特征周期应增加 0.05s。

水平地震影响系数最大值 表 1-2

地震影响	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	0.04	0.08(0.12)	0.16(0.24)	0.32
罕遇地震	—	0.50(0.72)	0.90(1.20)	1.40

注：括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

特征周期值 (s) 表 1-3

设计地震分组	场 地 类 别			
	I	II	III	IV
第一组	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.30	0.40	0.55	0.75
第三组	0.35	0.45	0.65	0.90

地震作用计算方法有：底部剪力法、振型分解反应谱法和时程分析法。建筑钢结构应根据不同情况，分别采用不同的地震作用计算方法。

① 底部剪力法

底部剪力法适用于高度不大于 40m、以剪切变形为主且平面和竖向较规则的建筑。底部剪力法的基本思路是：结构底部的总剪力等于其总水平地震作用（可根据建筑物的总重力荷载代表值由反应谱得到），而地震作用沿高度的分布则根据近似的结构侧移假定按比例分配到各楼层。得到各楼层的水平地震作用后，即可按静力方法计算结构的内力，使用

(3) 根据试验,不同钢种的不同静力强度对焊接部位的疲劳强度无显著影响。只是轧制钢材(因其残余应力较小)、经焰切的钢材和经过加工的对焊焊缝(因其残余应力因加工而大为改善),疲劳强度有随钢材强度提高而稍有增加的趋势,但这些连接和主体金属一般不在构件疲劳计算中起控制作用,故可认为疲劳容许应力幅与钢种无关。

1.2 荷载及作用

1.2.1 永久荷载

永久荷载包括结构自重、楼面及屋面材料重、墙面材料重以及工业建筑中的悬挂荷载等,按实际情况计算。

1.2.2 楼面及屋面均布活荷载

根据建筑不同的使用功能,楼面均布活荷载标准值可按《建筑结构荷载规范》(以下简称《荷载规范》)查得。

屋面均布活荷载分为上人和不上人的。对不上人的屋面均布活荷载,《荷载规范》不区分屋面材料,统一规定其标准值为 0.5kN/m^2 ,但《钢结构设计规范》规定:对支承轻屋面的构件或结构(檩条、屋架、框架等),当仅有一个可变荷载且受荷投影面积超过 60m^2 时,屋面均布活荷载标准值应取为 0.3kN/m^2 。这个取值仅适用于只有一个可变荷载的情况,当有两个以上可变荷载参与组合时,屋面均布活荷载标准值仍应取 0.5kN/m^2 。

1.2.3 风荷载

作用在钢结构建筑表面的单位面积上的风荷载标准值 w_k 按下式计算:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1-16)$$

式中 w_0 ——基本风压;

μ_z ——风荷载高度变化系数;

μ_s ——风荷载体型系数;

β_z —— z 高度处的风振系数。

以上各项系数的取值均按《荷载规范》采用。

1.2.4 雪荷载

按照《荷载规范》的规定,作用在屋面水平投影面上的雪荷载标准值 s_k 应按下式计算:

$$s_k = \mu_r s_0 \quad (1-17)$$

式中 s_0 ——基本雪压;

μ_r ——屋面积雪分布系数。

1.2.5 吊车荷载

吊车荷载包括吊车竖向力、吊车横向水平力和卡轨力,吊车荷载的计算可参照第3章单层工业厂房钢结构。

1.2.6 地震作用

目前地震作用的计算方法主要采用弹性反应谱理论,即用反应谱法得到结构的等效地震作用后,按静力方法计算内力和位移。