

钢结构入门

钱冬生 编著

高等学校试用教材

中国铁道出版社

高等学校试用教材

钢结构入门

钱冬生 编著

中国铁道出版社

1982年·北京

内 容 简 介

本书共分八章：总说、钢材、连接、拉杆、梁、压杆、屋架、疲劳和脆断。重点是阐述基本构件在荷载作用之下的工作表现，以及由此而引出的构件计算方法。取材较新，反映了国内外当前的主要水平。

本书可供铁道土建各专业作教材，也可供其他土建专业作教学参考书，还可供生产单位工程技术人员自修使用。

高等学校试用教材

钢 结 构 入 门

钱冬生 编著

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：9.5 字数：235 千

1982年7月第1版 1982年7月第1次印刷

印数：0001—5,000 册 定价：1.05 元

前 言

1980年修订的铁路桥梁专业教学计划正在试行。在这教学计划中，钢结构和钢桥基本理论和专业知识的教学主要是通过下列五门课程进行：

（1）桥梁概论 列在第四学期，现用教材是铁路勘测设计基础丛书《桥梁工程基础知识》，中国铁道出版社，1981年版。

（2）钢结构 列在第五学期，以前是用讲义，今当使用本书。

（3）钢桁架桥设计 列在第六学期，现用讲义。

（4）钢桥专题 列在第七学期，现用讲义。

（5）钢结构专题 列在第八学期，现用讲义。

本书内容以讲述钢结构基本构件及连接在荷载下的工作表现，以及由此而引出的计算方法为主，同时也讲述设计的一般原则和过程，钢材基本知识，以及轻型桁架。对于《铁路工程技术规范》和《钢结构设计规范》现行版本的重要规定，同时引用；对于国外对我们有益的经验也择要介绍。

本书在发排前承原铁道部专业设计院高级工程师郭可谔审阅全稿，谨此致谢。

西南交通大学教授 钱冬生

1981年11月于峨眉

目 录

第一章 总说	1
1. 工程结构的共性	1
2. 结构工程的内容	1
3. 进行工程结构评价时所用的指标	2
4. 关于荷载	3
5. 钢结构基本构件的极限状态	4
6. 进行结构验算所用的方法	6
7. 安全度问题简介	8
8. 设计规范概说	9
第二章 钢材	10
1. 钢材制造概说	10
2. 钢结构常用钢种的牌号	12
3. 钢的晶体结构和其性能	13
4. 结构钢的技术条件和基本容许应力	20
第三章 连接	25
1. 钉栓连接总说	25
2. 钉栓接头制造工艺	26
3. 单个钉栓在静载下的强度	28
4. 长列钉栓接头受剪时的工作表现	29
5. 钉栓连接按受力情况分类的简介	31
6. 钉栓容许应力	31
7. 钉栓排列	33
8. 钉栓受剪的连接	34
9. 钉栓受拉的连接	39
10. 焊接接头总说	42
11. 焊接接头及焊缝分类	45
12. 残余应力和残余变形	46
13. 对焊接质量的控制	49
14. 焊接接头的工作表现, 有关焊缝尺寸的规定, 以及焊接的强度验算	51
第四章 拉杆	55
1. 钢拉杆在结构中的使用	55
2. 钢拉杆在荷载下的工作表现	56
3. 关于拉杆验算的准则	58
4. 拉杆计算	59

第五章 梁	63
1. 结构中常用的钢梁和它们在荷载下的工作表现	63
2. 弹性工作的基本计算	64
3. 钢板梁截面尺寸的选择	69
4. 关于塑性铰弯矩的计算	70
5. 关于受压翼缘的宽厚比	72
6. 梁的弯曲剪应力和剪切中心	78
7. 工形梁的总体稳定问题	81
8. 关于腹板的抗剪	84
9. 关于腹板的抗弯	86
10. 腹板的颤曲和支承加劲肋	87
11. 板梁的拼接	89
第六章 压杆	92
1. 钢压杆在结构中的使用	92
2. 钢压杆在荷载下的工作表现	92
3. 钢压杆容许应力的制定	97
4. 实腹中心受压杆	100
5. 空腹中心受压杆	106
6. 为梁的总体稳定验算决定其容许应力	110
7. 压弯杆验算	111
8. 变截面压杆	117
第七章 单层房屋的桁架式结构	119
1. 单层房屋桁架式结构总说	119
2. 檩条设计	122
3. 简支式屋桁架结构设计	123
4. 柱桁式刚架的内力计算	129
第八章 疲劳和脆断	132
1. 疲劳和脆断总说	132
2. 从常幅疲劳试验所得到的经验规律	134
3. 铁路钢桥的疲劳验算	136
4. 从焊接梁疲劳试验所取得的一些新成果	137
5. 关于高强度螺栓接头的疲劳试验	139
6. 将变幅应力换算为常幅应力的途径	140
7. 对于钢结构脆断的一些基本知识	141
8. 用断裂力学的参数来表达疲劳裂纹的扩展速度	145
9. 提高结构疲劳安全度和防止脆断的综合措施	145

第一章 总 说

1. 工程结构的共性

任何组合体，不论性质如何，都可以叫做结构。选定某些材料，进行制造或施工，使它变成适合于我们为某种目的而使用的事物，那叫工程。用“工程”为“结构”的定语，这可以将工程结构这一类以具体实用材料（例如混凝土和钢之类）为加工对象的事物同其他类型的结构区别开来。

常见的工程结构有：桥梁和房屋建筑，水工结构（坝，闸等），容器，管道、起重和运输设施，航空和航天设施，地下建筑物等类。它们的共性是：能在承受外力或外在影响而不受损害的情况下，提供某些功能来满足我们对它们的要求。

就功能讲，区别是很大的。例如：房屋有供办公用的，有供开会用的，有供住宿和生活用的，有供生产用的；桥梁有供行驶汽车的，有供行驶铁路列车的，有供行人的；容器有用以储存煤气的，有用以储水的，有充当锅炉的，等等。对于许多情况，搞工程结构的人都应当同有关的建筑师或工程师充分协作；在充分了解结构功能的基础上来处理问题，事情才能办好。

承受外力或外在影响而不受损害，这是工程结构一个非常重要的共性。外在影响，诸如温度的不均匀变化之类，一般还是可以用力来表示的。因此，搞工程结构的人必须精通工程力学。一方面，要会运用传统的和新近发展起来的力学知识，按弹性工作或按塑性工作的前提来计算结构及其构件在外力作用下的内力、应力、变位、以及应变；另一方面，要了解结构及其构件在外力作用下的工作表现。当外力不大时，结构一般是处在弹性工作阶段，其变位（包括挠度和转角等项）每每同外力成正比；但当外力增到很大时，结构对外力的反应往往就会有很大不同。例如：或因材料发生延性变形（屈服）而使结构变位过大，或因平衡不能保持而丧失稳定，或因多次重复受力而发生疲劳开裂，或因环境条件的影响而发生重大事故，例如，低温使钢材发生脆断，高温使钢材蠕变，腐蚀性介质使钢材裂纹迅速扩大之类。如果外力是动荷载，结构在其作用之下将发生振动；在一般情况下，振动将影响到结构的使用质量；在特殊条件下，振动还会导致灾难性的破坏。结构的所有这些反应，都叫工作表现。显而易见，如果我们不懂得结构在不同情况下的工作表现，将难于评价一具体结构的使用质量或安全保证，而在修订结构设计规范时，我们也难于做到心中有数。因此，注意工程结构的各种工作表现，是一个严肃的结构工作者所时刻不忘的。

2. 结构工程的内容

用“工程结构”一词做“工程”的定语，得“工程结构工程”；一般都将它简称为“结构工程”。这就是指一项工程结构从开始到完成所应做的各项工作。而在稍加发展之后，结构的试验，研究和推广工作也将包括在内。

现在只就完成一项工程结构所需要做的工作，按顺序简介如下：

(1) 规划 首先要从全局观点认真地明确对这一结构的具体要求，除特殊用途的工程结构外，一般应从经济效果上论证修建这一结构的迫切性；相应地，明确它的设计条件，调查并核实它的施工条件；并提出设想。这是做好以下各项工作的前提。如若草率从事，那就会犯错误而带来难以弥补的损失。

(2) 方案的编制 要针对当地条件，将所有各种能满足设计要求的结构方案一一提出。要用近似的力学分析来决定各结构的主要尺寸（例如，梁的高度及截面其他尺寸，柱的截面尺寸，基础的尺寸等），将不同方案的工程数量和造价估算出来，以利选比。对于明显不合理的方案，可以及时舍弃。

(3) 方案的比选 对上项工作所决定的有采用价值的方案，逐个地进行全面分析研究。对造价、材料供应和劳动力的组织、施工方法、施工中可能发生的困难或意外，结构完成后的使用质量和维修费等一一加以考虑和研究。再对它们进行综合对比，从而推荐出一个最优的方案，这就是这一工作的内容。

(4) 技术设计 在所推荐的方案业经批准之后，就要对它进行较精确的力学分析，并据以决定它的各主要设计尺寸，进而绘制其设计图；接着，应该将主要及次要细节的设计逐步做出。为了便利施工，设计人可以在同施工单位协商的基础上来绘制某些细节图，也可以委托施工单位在陆续征得设计人同意的条件下来绘制所需的详图。

(5) 施工 施工场地如何布置，施工进度如何安排，施工临时结构和机具如何办理，这主要是施工单位的事。但对于一些复杂结构，例如斜拉桥，拱桥、预应力混凝土超静定结构之类，它们的部件在施工过程中所受到的应力或是在数值上很大，或是在方向上和设计应力相反。对于这类情况，设计人就应该对施工单位所提的施工设计进行细致的研究，并在必要时提出修改意见，以策安全。

3. 进行工程结构评价时所用的指标

适用、安全、经济、美观、这便是进行工程结构的评价时所常用的指标。

适用，主要是指结构在寻常的荷载（即外力）作用下，能够不发生什么使人不满意的地方。所说的不满意，包括：挠度大，振动明显，混凝土开裂之类。推广开来，结构如果在提供它的特定功能方面有什么使人不满足之处，那也属于在适用上有所不足之列。对于那些问题（例如，住房的通风和照明不够完善之类），搞结构的人一般地不负主要责任；但是，他既然参与了所说结构的工作，也就不应该认为那些问题和自己完全无关。

安全，主要是指结构在承受工作荷载（设计中所采用的各种外力及其组合）方面，对于各种破坏状态都具有必要的安全系数；而在罕见的荷载（例如，活荷载异乎寻常的超重，罕见的巨风，罕见的地震等）之下，结构的破坏过程不要进行得太快、或者缺乏预兆，以便人们能够有时间从结构中撤出；同时还要满足这样的要求：即遭逢这样破坏的结构可以不用花费过于高昂的代价就能修复。

经济，就是指其造价（工资、材料、机具使用，运杂及管理费用等）和维修费的综合指标要尽可能地低。

美观，主要是指结构应该和周围环境协调，结构的体型要匀称，其线条要流畅，而其传力途径则要合理。要注意：许多结构是常年地和我们生活在一起，对观感很有影响；设计人

若不在美观方面给予适当照顾，那就会给我们的社会带来不少无形的损失。

4. 关于荷载

结构所受到的外力和外在影响，总名是叫荷载。

从荷载的成因讲，一类是重力荷载，它包括结构及它所承担的静止物体的自重，还有使用活荷载（例如，公路桥上的汽车重量，房屋楼板上由室内陈设和人的重量所形成的活载等），雪荷载等；另一类则是非重力荷载，例如风荷载等便是。

在很多情况下，我们需要结构来承担的使用活荷载并不大；可是，若要结构能存在，就得保证结构在承担使用活荷载的同时，还能承担在其存在期间所作用于它的其他荷载的各种可能组合。

荷载总是随机性的，也就是说，它们的数值是变异的，其常遇情况的值较小，不常遇情况的值较大。以剧院观众席的楼面活荷载为例，其较常遇到的情况有可能是每一座位都有人，而有可能遇到的超载情况则会是不仅座位有人，而且在楼面上到处都拥挤得水泄不通。就出现机会讲，前者总是较多的，后者将很少；而就荷载的数值讲，前者就比后者小不少。再以风荷载为例，强烈台风对房屋建筑的摧毁力显然要比我们常见的大风猛烈得多，但前者的机遇率总很小，后者则比较频繁。

如果为了保证结构的安全，就在设计时采用它所可能遇到的最大荷载的最不利组合，那就会使结构的截面尺寸很大，结构的造价很高，在经济上使我们担负不起。所以，在历来的结构设计实践中，所采用的荷载值并不是按罕见者选取，而采用的荷载组合也是以能够同时出现的那些情况为限。

对于一般的结构设计实践讲，荷载值的确定常常照着设计规范办理。但应知道：荷载问题实际上是很复杂的；其中有许多情况至今还未弄清楚（风荷载、地震等都是例子）。本书的任务是讲述钢结构设计，对于荷载也只能稍稍提一下。在第七章，在讲钢屋架时要简单地讲述屋面荷载。在本节，将对结构设计中遇到的各种荷载稍作说明。

（1）恒载 这主要是指结构和它所担负的物体（包括土壤）的重量，以及土壤因自重所生的侧压力。它们的数值也会发生某种变异（例如，因物体尺寸及比重等的变异而引起者），但基本上是一些恒值。在设计中，由恒载所形成的工作荷载可以照规范按正常情况所订的数值来采用。

（2）使用活载 桥上的行车和行人荷载（包括它们的重量和冲击作用），楼面和屋面的均布活荷载，都属于这一类。规范为它们所制订的工作荷载（有时也叫标准荷载）值一般是比其日常数值偏高，但应该将这些工作荷载值的出现视为正常，而结构抵抗它们（包括其他同时作用的荷载在内）的能力（承载力）总是应该高于它们，并且具有规定的安全系数。

（3）雪荷载 在设计屋面时往往要考虑它；其数值当和房屋所在地区、屋面坡度及轮廓形状、屋面所受的荫蔽情况等有密切关系。桥梁则一般地不用考虑这一荷载。

（4）风荷载 在历史上，结构被风吹毁的记载是不少的。不仅高层建筑和长跨桥梁，也有一般房屋建筑和一般桥梁，不仅在有名的台风区，而且还在并不以大风见称的区域，都曾出现过这样的事故。这一研究还在进行之中。设计规范按照已有的经验，现在还常将风荷载当作静力，制订计算其数值的算式，要求在设计中采用。相应地，永久性结构应该设置抗风支撑，临时性结构应该设置缆风（高度不大者可设置斜支撑）。而一般的结构在这样办理

之后，一般就可以不致因风而损坏。

(5) 地震 这也是一个正在研究中的问题。现在是将各地区按地震烈度分成等级，对各种结构按其所在地区制定其设计所应采用的烈度。不少规范还是将地震力当作静力来计算。

(6) 水压力、土压力、冰力和波浪力 储水池和水下建筑要受到水压力，地下建筑以及和土壤直接接触的建筑要受到土压力。在寒冷地区的塔桅结构和电缆上会结冰，这些冰不但使结构承受其重量，也要增大它们的阻风面积，使承受更大的风力；水体中的桥墩会受到流冰的冲击和冰封的侧压力。港湾内的建筑和海上建筑则会从波浪那里受到很大的摧毁力。

(7) 温度变化、混凝土收缩、基础不均匀沉降和装配误差所引起的力

在上述现象发生时，结构内部各个点将发生相对位移，如果所有这些相对位移能够不受阻碍地自由发生，在结构内部就不会发生什么力。但若结构是超静定的，相对位移受阻，结构内部就会出现应变，相应地，就有应力，而截面应力的合力就形成了这儿所说的力。

5. 钢结构基本构件的极限状态

任何一种钢结构通常均是由许多基本构件组合而成的。

所讲的基本构件，是指拉杆，压杆和梁，以及这些杆件所用的连接。所讲的极限状态包括两类：破坏性的和不良性的。前者指不能继续使用的状态，后者指使人感到不放心、不满意的状态。前者是一个安全问题，而后者则主要是一个适用问题。本书所讲的钢，以一般的结构钢为限，其特点就是具有明显的屈服点 σ_s ，而其拉力强度 σ_b （用标准试件接受拉前的截面面积计算者）一般是 σ_s 的1.35至1.8倍。本书既然是钢结构入门，所讲内容也就以基本构件为主。

轴向受拉的杆件，叫拉杆。拉杆的极限状态，其破坏性的是：屈服，拉断，脆断；其不良性的是疲劳和振动过大。在设计中，最需要注意的是钢材屈服和杆件振动过大。屈服现象出现时，结构钢的应变可从1%到3%。如果桁架的一根主要拉杆（沿杆的全长）出现这样大的应变，则桁架的挠度将大到无法使用。因此，取屈服为拉杆的破坏性极限状态，是有理由的。当拉杆有钉栓孔眼等削弱时，也有可能整根杆屈服之前，截面有削弱处因应力超过 σ_s 而被拉断，这还是需要考虑的。脆断和疲劳，各在特定条件下会出现，本书将在第八章再讲。防止拉杆振动过大，现在是用限制其长细比的方法，这将在第七章讲屋架时讲授。

轴向受压的杆件，叫压杆。压杆的主要特点是其承受轴向压力的承载力很受杆件初始弯曲的影响。由弯曲所形成的挠度和轴向压力的乘积就是沿杆各点所受到的弯矩；这弯矩将随着挠度和压力继续增加而增长得更快。其结果就是压杆在压和弯的共同作用下发生破坏。这现象叫压溃，是一种破坏性极限状态。对于用结构钢制成的压杆来讲，当其压溃时，沿杆总有相当大的区段在截面上出现屈服。在制订压杆容许应力时，一般是考虑到这一现象的。只因规范往往对于这一现象不予强调，致使不少的设计者误以为只要用钢结构的弹性计算就能解决他所遇到的各种问题。现在将这一点澄清一下。此外，钢压杆也具有振动过大那一种不良性极限状态，防止的措施也是限制其长细比（在第六章再讲）。

在横向力作用下受弯的杆件，叫梁。在材料力学课程内所讲的计算，一般是按截面模量弹性值 W 和所承受的弯矩 M 来推算截面最大应力 σ ，并要求 σ 不大于基本容许应力 $[\sigma]$ ，其中 $[\sigma]$ 等于屈服点 σ_s 除以一安全系数 n 所得的商。用式表示，这就是：

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} \quad (1-1)$$

在此同时，材料力学也讲梁的截面达到塑性铰状态时的应力分布情况；按照那一情况，可以推出截面模量的塑性值 W_s ，而 $\sigma_s W_s$ 就是该截面所能承受的最大弯矩。若用 M 代表工作荷载所生弯矩， n 代表安全系数，则设计所用算式将可这样推导：

$$nM \leq \sigma_s W_s$$

即：

$$\frac{M}{W_s} \leq \frac{\sigma_s}{n} = [\sigma] \quad (1-2)$$

由于静定结构出现塑性铰是一个鲜明的破坏性极限状态，设计中采用式1—2似乎更合理；但是，在塑性铰发生之前，在钢梁最大压应力已达 σ_s 情况下，它还会发生其他极限状态（第五章再讲），而规范为钢梁所规定的构造措施一般只能保证其最大应力能达 σ_s ，所以，若不采取特殊构造措施来保证到达塑性铰，在设计中还只能仍用式1—1。

在本节，还打算将静定结构和超静定结构在这方面的区别说一下。当静定结构出现一个塑性铰时，它就变成一个可运动的机构而破坏；而在超静定结构出现塑性铰时，它只是逐步地降低超静定的次数，并使结构内的弯矩值重新分配，随后才变成可运动的机构而破坏。由于这一原因，超静定结构潜在的承载力就比按弹性分析所推出的结果大得多。

现在用一矩形截面梁为例，以阐明上述区别。假定图1—1 a、b、c、d四例使用同样的安全系数 n （对 σ_s 而言），矩形截面的宽度及高度分别是 b 及 d 。图1—1 a和b表示静定结构（简支梁），其中的a表示按弹性工作设计，b表示按塑性工作设计。在图1—1 a内，跨中截面弯矩 $P_1 l/4$ 等于 $[\sigma]W$ 时， P_1 就达到容许值，由此可以写出：

$$P_1 \leq \frac{4[\sigma]W}{l} = \frac{2}{3} \cdot \frac{[\sigma]bd^2}{l} \quad (1-3a)$$

在图1—1 b内，其破坏状态是 $nP_2 l/4$ 达到 $\sigma_s W_s$ ；而式中的 n 表示安全系数， P_2 表示容许荷载。由此可以写出：

$$P_2 \leq \frac{4\sigma_s W_s}{nl} = \frac{[\sigma]bd^2}{l} \quad (1-3b)$$

P_2 对 P_1 的比，就等于 W_s 对 W 的比。若梁的截面是矩形，这比值是1.5。若是工字形，这比值大致是比1.1强〔看第五章之4〕。

图1—1 c和d表示超静定结构（一端简支，另一端固定的梁），其中的c表示按弹性工作设计，d表示按塑性工作设计。在图1—1 c所示情况，右端的固端弯矩等于 $3P_3 l/16$ ，它比跨中弯矩为大；当它等于 $[\sigma]W$ 时， P_3 达容许值，由此可写出：

$$P_3 \leq \frac{16[\sigma]W}{3l} = \frac{8}{9} \cdot \frac{[\sigma]bd^2}{l} \quad (1-3c)$$

在图1—1 d内，当右端出现塑性铰时，跨中还没有出现塑性铰，因此，荷载 P 可继续增加，并在右端弯矩值保持于 $\sigma_s W_s$ 的情况下，跨中弯矩上升，直至也达到 $\sigma_s W_s$ 。用弯矩图的叠加来分析其情况：当这梁发生塑性破坏时，右端负弯矩值是 $\sigma_s W_s$ ，它使跨中的“简支梁”正弯矩 $nP_4 l/4$ 减少 $\sigma_s W_s/2$ ，且在这样减少之后，跨中正弯矩的值不大于 $\sigma_s W_s$ ，这就是说：

$$\frac{nP_4 l}{4} - \frac{\sigma_s W_s}{2} \leq \sigma_s W_s$$

即：

$$P_4 l/6 \leq \sigma_s W_s/n,$$

亦即:

$$P_4 \leq \frac{6\sigma_s W_s}{nl} = \frac{3}{2} \cdot \frac{[\sigma] b d^2}{l} \quad (1-3d)$$

P_4 对 P_3 的比, 等于 $9W_s$ 对 $8W$ 的比, 它大于前面为静定结构所推出的 W_s 对 W 之比, 其原因就在于超静定结构的弯矩因塑性工作而引起的重分配。

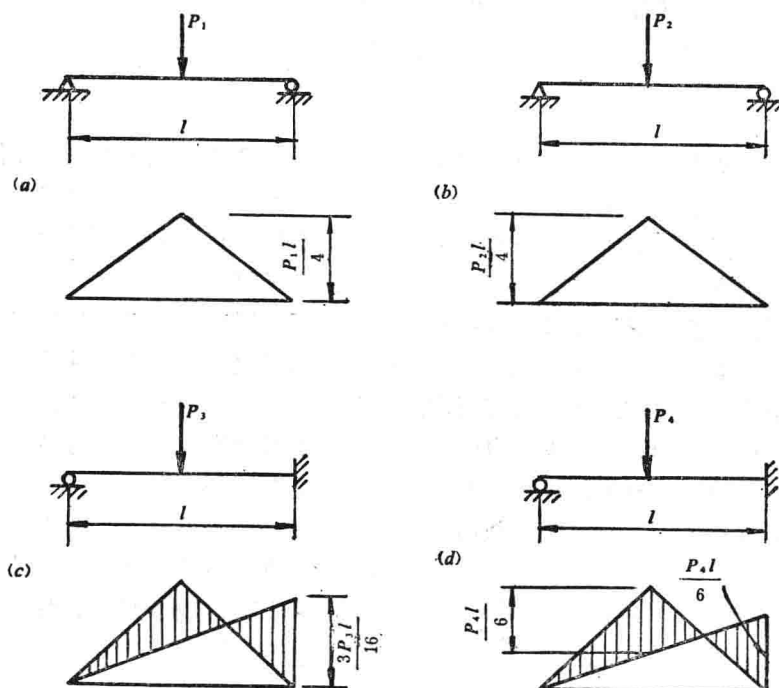


图 1-1 弹性设计和塑性设计的对比

此外, 对于梁的另两个不良性极限状态, 也就是挠度和振动的过大, 现在则是用限制梁在活荷载下的挠度的方法来防止。

钢结构所用的连接, 例如铆钉, 承压型螺栓和焊接, 一般都是取其破坏状态为极限状态, 并据以制定容许应力 (抗剪、承压、抗拉等)。摩擦型高强度螺栓是一特殊情况, 它是以板件间发生滑动为“极限状态”。事实上, 由于滑动而引起的结构变形是可以计算的, 其值一般不大, 不能视作极限状态; 而在滑动完成之后, 螺栓变为承压型, 其承载力将有相当大的提高。所以, 对于主要承受静力的结构讲, 将滑动作为其极限状态是并不怎样确切的。

又: 疲劳和脆断这两类极限状态, 对于拉杆、梁和各类连接都存在。这将在第八章再讲。

6. 进行结构验算所用的方法

进行结构验算的目的, 在于防止其各种极限状态的出现。历史上, 破坏性极限状态早就为人们所注意。进行构件的破坏试验, 得其承载力的极限值 P_u , 随即提出构件所承担的工作荷载 P 乘以安全系数 n 后不应大于其 P_u 的要求, 即:

$$nP \leq P_u \quad (1-4)$$

这就是一个具有根本意义的设计原则。它以 P 和 P_u 为计算对象, 这就体现了安全系数本来

的意义。不用了解截面上的应力分布就可以凭试验决定 P_u ，这就是这一方法在历史上较早出现的原因。

进入二十世纪后，弹性的材料力学和结构力学在结构设计中推广得很迅速，人们很快又认识到结构钢的特性是有鲜明的 σ_s 。当 $\sigma = \sigma_s$ 时，拉杆伸长量过大，可以视作“破坏”；而在 $\sigma \leq \sigma_s$ 时，钢结构就在弹性范围内工作。将 σ_s 除以一安全系数 n ，得一基本容许应力 $[\sigma]$ ，要求钢结构的最大应力 σ 不大于 $[\sigma]$ ，即：

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} \quad (1-5)$$

这就形成了另一个重要的设计原则。这原则的特点是按弹性分析将工作荷载所生的最大应力 σ 算出，并用作验算对象。它将安全系数的定义从荷载 P_u/P 的比改为应力 σ_s/σ 的比。这样，当后者不能代表前者时，人们对于所设计的结构到底在承载能力方面具有多大的安全系数也就难于回答了。

现在先讲一下 σ_s/σ 能代表 P_u/P 的情况。这主要是拉杆。若以 A 代表拉杆截面积， P 代表工作荷载（轴向拉力）， P_u 代表破坏性极限荷载，则因应力达 σ_s 可以视作“破坏”， P_u 当等于 $\sigma_s A$ 。而在 P 作用下，拉杆应力 $\sigma = P/A$ 。于是， $P_u/P = \sigma_s/\sigma$ 。这也就是说，式1-4和式1-5在用于拉杆时将得到同样的结果。

对于梁讲，情况就不同了，试回顾图1-1。图1-1 a和b表示对同一根简支梁采用两种不同验算方法的结果。图1-1 a是用式1-5所示的容许应力法来算的。当荷载是 P_1 时，最大应力 σ 刚好是 $[\sigma]$ ；当荷载是 nP_1 时，最大应力将是 σ_s ；这就是说，它的 σ_s/σ 比值是 n ；然而，最大应力达 σ_s 并不形成这儿所取的极限状态（指塑性铰状态）。所以， n 在这里并不能确切地表示安全系数。图1-1 b是用式1-4为基准来算的。当荷载是 P_2 时，跨中弯矩是 $[\sigma]W_s$ ；当荷载是 nP_2 时，跨中弯矩是 $\sigma_s W_s$ ，也就是出现了塑性铰，这梁进入了破坏状态。因此， nP_2 就是 P_u ，而 P_u/P_2 值是 n ，这 n 就体现了安全系数本来的意义。图1-1 c和d表示对同一根超静定梁采用两种不同验算方法的结果。按同样的推理可以说明：图1-1 c是按式1-5进行的，其 n 代表 σ_s/σ ，不能确切地表示安全系数；而图1-1 d是按式1-4进行的，其 n 能代表 P_u/P_4 ，也就体现了安全系数的本意。

本世纪以来，一方面是容许应力法得到广泛的使用，另一方面是对于极限荷载的研究取得很大的进展。以往，破坏性极限荷载主要靠试验来决定，其局限性是很大的。现在，极限荷载可以根据材性、杆件几何特征及缺陷等因素来推算，它们的数值可以比较准确地推算出来。利用这些知识，设计规范的制订者就可以在不改变习惯的容许应力法的形式之下，采用调整安全系数以给出不同容许应力值的方法，吸收式1-4的支持者的试验研究成果，用之于式1-5，借以取得经济效果。这是一种隐晦的手法。随着事物的发展，这是难于坚持到底的。为了探索更能反映客观规律的验算方法，有一些规范将式1-4加以发展，写成下列的形式：

$$\sum n_i P_i \leq \gamma \bar{R} = R^0 \quad (1-4a)$$

式中 $\sum n_i P_i$ ——可以称之为“加成荷载”所生的总计杆力；其中 P_i 表示按各个工作荷载所求出的杆力， n_i 则表示各个 P_i 所应乘的系数；而 $\sum n_i P_i$ 就是各 $n_i P_i$ 的总值；

$R^0 = \gamma \bar{R}$ —— R^0 是在认识杆件承载力的随机性的基础上，按某个保证率所得的杆件承载力； $\bar{R}$ 表示杆件平均承载力， γ 表示随保证率而定的一个系数。和习用的容许应力法相

比,这是将安全系数 n_i 在规范中明确给出。在 n_i 被称为“荷载系数”的情况下,这法每被叫作荷载系数法。而就实质上讲,取名为加成荷载法,使与容许应力法并列,似属更为合适。在这一改进之中,式1—4内原列的 n 被分解成若干个 n_i 和 γ ,其中的 γ 是用以考虑杆件承载力的随机性的。通过这一分解,验算就容易更好地反映实际情况。现在,规范所给的各 n_i 是按荷载性质及组合而订的。例如,恒载的变异性小,其 n_i 就小;使用活载的变异性大,其 n_i 就大;当荷载组合内所包括的荷载数目较少时,其 n_i 较大;反之则较小。对于超静定结构,国外的一些钢结构设计规范对于以承受静力为主的结构每允许其考虑塑性工作时的弯矩重分配,并在截面验算中使用 W_p ;而桥梁设计规范对于内力计算一般还是只许用弹性分析,但在截面的强度验算中也可使用 W_p 。(在疲劳等的验算中当仍用 W)。

现在再用5内所讲的两类极限状态的观点来考察式1—4 a和式1—5。由于它们之中都包括安全系数 n ,可以认为它们只适用于验算因超载而破坏的那一些极限状态。至于疲劳和挠度过大之类的不良性极限状态,其不良的表现并不是在超载条件下发生,而是在常遇荷载下呈现;这时,其内力、应力和变位的计算就应当以工作荷载为准(因为工作荷载和常遇的荷载相近);在按式1—4 a的原则进行验算时,其各 n_i 当按1.0计;而在这样的荷载作用下,结构总当是在弹性工作范围;因此,即使今后的设计规范明确要求用塑性工作分析来防止某些因超载而致的破坏,在进行疲劳和挠度验算时仍应使用弹性工作分析。而就实践的需要讲,设计人的知识也不能仅限于了解结构对于超载破坏有多大的安全系数,同时也应知道结构在常遇荷载下的使用质量到底如何。对于结构工程师熟悉传统的弹性分析的重要性,我们仍然不应低估。

7. 安全度问题简介

从以上的阐述可知,式1—4及1—4 a内的各安全系数能够比式1—5更好地反映结构对于超载破坏的安全性。可是,由于荷载和结构承载力都是随机性的,在某些场合,结构的承载力有可能比规范所预期的值更小,而荷载有可能比规范的预期的值更大,在那时,结构还是要遇险。如前所述,若要结构不遇险,在经济上将使我们负担不起。于是,实际所使用的解决方案就是:按结构的重要性,考虑它出事所肇致的损失,为结构遇险的那些罕见情况各订一个能够为人们所接受的频率,并据以制订设计所需的各种数据(指式1—4 a中的 n_i 和 γ 等)。所说的频率,一般是 10^{-4} 至 10^{-6} (它们也叫风险率)。于是,我们就可以讲:采用按这样的原则所制订的数据来进行结构设计,结构诚然不会绝对安全,但其风险率将不大于某值。如若人们感到所订的风险率还太大,那也可以重订一个,再据以修订设计所需的数据,如果人们愿意在经济上付出代价的话。

这样一来,对于以往那一个含意不怎样明确的安全系数,现在也可以用这一理论(一般称之为安全度理论)来阐述其意义了。为此,特作图1—2。这图的纵坐标表示频率的密度,横坐标表示荷载所生杆力 P 及杆的承载力 R 。表示 P 和 R 的频率密度的曲线都按正态分布绘出。如果我们将杆的截面加大, R 的频率密度曲线向右移,安全性就显然加大。但在经济合理的条件下, R 不当比 P 高的太多。于是, R 小于 P 的区域就明显地出现,那就是结构遇险的情况。在图中,今用 P° 表示由规定的工作荷载值所生的杆力,这样, nP° 将表示加成荷载所生杆力; $\bar{R}$ 表示杆的平均承载力, $R^\circ = \gamma \bar{R}$ 表示折减后的承载力。按照式1—4 a(现假定只考虑一项荷载),所要满足的是:

$$nP^{\circ} \leq \gamma \bar{R} = R^{\circ}$$

以往所定义的安全系数（看式 1—4，且注意那儿的 P_u 是这儿的 $\bar{R}$ ），时常是取 $\bar{R}/P^{\circ}$ ，由上式可知：它等于 n/γ ，而 $\bar{R}$ 和 P° 都可在图 1—2 中明显地看到。有时也取 R°/P° 为安全系数的定义，那么，由上式可知它等于 n ，且 R° 和 P° 关系也可在这图看到。且不论安全系数如何定义，只要图 1—2 中的 P 和 R 两条曲线业已通过调查分析而制订（若为正态分布，其均值和标准差将是已知值），则由 $nP^{\circ} > \gamma \bar{R}$ 所决定的风险率是不难求得的。这样，安全系数和现今安全度理论之间的关系也就可以知道了。

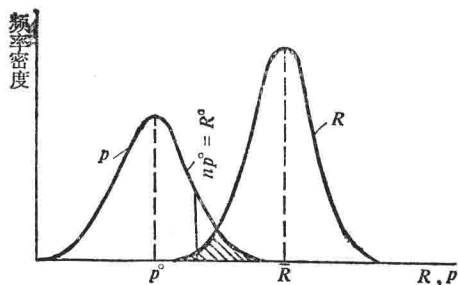


图 1—2 安全度问题示意

8. 设计规范概说

为使结构设计工作能在满足适用、安全、经济等要求的条件下顺利地进行，一般要先将所采用的设计规范修订好。设计规范的内容，不仅要包括对结构设计总的原则要求，还要包括荷载数值及所要考虑的组合，计算所用方法（容许应力法，或加成荷载法），表示构件承载力的基本数据（或是各种容许应力，或是各种保证强度），对构造的某些具体要求等项。修订设计规范，一般是以过去的经验（包括试验及研究成果）为基础。对于新型结构的特殊规定，在修订规范时一般是很难制定的；一种较好的办法也许是在规范的若干条文中写明：在有恰当的科学技术根据的条件下，设计人可以提出合适的措施，不受本条文的限制。

可以认为：在指导设计人进行一般的结构设计方面，规范时常是很有效，很有用的。但是，规范的条文也不可能规定得很严密和很全面。对于规范条文的那些不足之处，设计人如果不加思索地照套，致使结构设计发生缺点或错误，严格地说，这还是设计人没有尽到责任，没有将工作做好的表现。客观条件是变化的和发展的；面对客观现实进行分析研究，用所能得到的当代最先进的科技知识来武装自己，实事求是地对待规范和一切其他问题，尽心尽力将工作做好，这才是一个有觉悟的，负责任的人所应有的工作态度。

在这里，也需要对规范是否“技术性法令”一事做一些分析。就本书的情况讲，所引用的我国现行规范主要是两种：

1. 《钢结构设计规范》，TJ17-74，建委及冶金工业部批准试行；
2. 《铁路工程技术规范》第二篇《桥涵》——1975，铁道部批准试行（在本书内，有时简称之为《桥规》）。

翻阅这两本规范，可以认为：其涉及荷载、材料性能及容许应力、设计要求等方面者，如若任意更动，势必要降低结构的质量和安全性，对国家建设极为不利。将规范的这些条文视作：“技术性法令”，不允许改变，洵属有理。但规范内也有不少内容明明是来自试验或推算结果（例如，板梁腹板宽厚比，压弯杆计算，桥门架斜腿的弯矩零点，联结系斜杆内力等）。随着试验和推算结果的发展，及时地提出更为合理的数据，显然是正常的。在这些规范再次修改之前，在确有必要之处，用某些确有依据（一般应经鉴定通过并记录在案）的数据来取代旧数据，那也是合理的。至于通过什么样的手续可以使之合法也是要办的，但那已是本书范围之外的事，这里也就不去讲了。

第二章 钢 材

1. 钢材制造概说

(1) 钢的冶炼

钢一般用生铁冶炼,但也可掺用、甚至全用废钢。从高炉炼出来的生铁,最好是不等它冷却,在高温熔融状态就送往炼钢炉,借能节省燃料。生铁的含碳量往往高达4~6%,同时还含有硅、锰、硫、磷,以及随矿石和焦炭而带到生铁之内的其它元素和非金属夹杂物。

在高温状态,氧化硅和氧化磷等呈酸性,氧化钙、氧化镁、氧化亚铁和氧化亚锰等呈碱性。酸性物和碱性物相遇,就要中和,也就是起化学作用。因此,当炼钢所生的渣是酸性时,炼钢炉的衬砌(耐火砖)就必须是酸性的;当渣是碱性时,衬砌就必须是碱性的;那才不致使衬砌遭受腐蚀。如若生铁中含硫含磷量都很低,采用酸性衬砌是可以的;如若含硫含磷不低,那就必须采用碱性衬砌,并在炼钢时加碱性熔剂(石灰石、白云石、生石灰等),使它同铁中的硫、磷等化合,被带入碱性渣,借使所炼成的钢中的硫、磷含量能符合规定。

常用的炼钢炉是下列三类:

1) 转炉 特点在不另给热源,将熔融的铁水注入炉中后,就用空气或氧气进行吹炼,凭氧化所生的热保持铁水处于液体状态;在吹炼好了之后,就转动炼钢炉,将钢水倾倒出来。这法是在十九世纪五十年代,由英国柏塞麦所提出的。当时是用酸性炉衬,将高压空气由炉底的许多管咀向上吹。在吹炼中,由于各元素和氧的化学亲和力不一样,先是硅锰被氧化,形成渣;次是碳被氧化,在炉内形成一氧化碳,在炉口外再烧成二氧化碳,其火舌很长,很光亮;而在碳快要烧完时,火舌顿时回缩,这时,硫磷含量还基本未动,而酸性炉就应该出钢了。这样炼成的钢,其碳锰硅的含量大致是:0.03%C, 0.05%Mn, 0.01%Si。在上世纪的七十年代,为了冶炼硫磷含量高的原料,就发展了碱性炉;它需要在铁中的碳大部烧完之后继续吹炼,凭石灰等去除硫磷。为了提高热效率,不少转炉还将底吹改为侧吹。到本世纪五十年代,奥地利的L—D两地开始使用氧气顶吹炼钢法(这法因此也叫L—D法)。其所用氧气纯度宜于提高到99.5%左右。将这样的高压纯氧通过喷咀冲射熔融铁水的表面,产生FeO,但这FeO将迅速地被铁水中的C所还原,在铁水内部大量地产生气泡CO,使铁水沸腾,强化冶炼作用。对于高磷铁,在将石灰粉投入后,磷酸钙就以泡沫形式涌出。同使用空气吹炼者相比,氧气顶吹法的炉温高,有时还须加废钢等冷料来冷却,其钢的化学成分容易控制,可用以冶炼许多钢种,并能保证其质量。每炉冶炼时间大致是20至40分钟(从进料到出钢)。视炉的容量大小,每炉出钢量可以是30至150吨。为达到同样的年产钢量,这法所需的基建投资要比下面所介绍的平炉法节省不少。

2) 平炉 特点在于要用煤气、重油等在炉内燃烧,借以保持炉温(1800°~2200°C),使适合冶炼需要。炉内所进原料,可以是熔融铁水,也可以是冷料(废钢、生铁块等)。所投入的各种熔剂熔化后,在铁水面上将形成一层熔化的渣,再凭渣和铁水间的扩散作用进行冶炼。这法是在十九世纪六十年代由西门子和马丁在英法两国所共同创造出来的。

起初是用酸性衬砌，后来为了适应硫磷高的原料而比较普遍地改用碱性炉衬。每炉冶炼时间，现在大致是6~8小时。视炉的大小，每炉出钢量可以是50至400吨。所生产的钢的质量和品种，一般要比用空气吹炼的转炉钢好而多。本世纪五十年代之以前，有不少主要产钢国的炼钢炉都是以它为主；我国也曾这样。但在氧气顶吹转炉的优越性得到人们的公认之后，这法的使用已不如从前那样广泛。而为了缩短冶炼时间，现今也时常将氧气顶吹的措施用于平炉。

3) 电弧炉 可以采用冷料，用电热将它熔化（在工业上常用的是电弧法，而在理论上讲，还可用电阻及电感应），在还原性气体和渣的保护下进行冶炼（因为热源不靠燃烧，其气体就可以保持为还原性），其合金成分可以控制得比较准确。这就是它突出的优点。但由于成本高，现今只用于熔炼特种钢。

（2）钢的脱氧（或浇注）方法

冶炼快结束时，钢水内的含氧量较高（含氧量在0.02~0.07%之间）。按脱氧方法的不同，可以得到下列四类钢：

1) 沸腾钢 这就是直接用含氧量较高的钢水去浇注钢锭，使氧在钢锭凝固期间以CO气泡形式沸腾而出。有许多气泡将因锭的头顶部已凝固而被留在锭身之中。这样锭的外形尺寸就没有多大损失，使钢锭可以轧制成材的部分所占比率很高。在轧制过程中，锭内的气泡将因其壁面并未氧化而容易闭合，并不引起多大问题。再就其钢锭的凝固过程讲，先凝固的是其外层和模壁接触处，其成分相当地纯净，钢水内所含的硫磷等有害成分则将较多地残留在尚未凝固的钢水之中，这就使最后凝固的部分所含有害成分增多。这一现象叫做偏析。它使钢材的成分不够均匀，质量受害。

2) 镇静钢 这是在冶炼后期向炉内投入较多的锰铁、高炉硅铁、硅锰合金和铝等还原剂，使与氧化合成渣，将钢内的氧比较彻底地除去而炼成的一种钢。这样，在钢水铸锭时，钢水表面就很宁静。在凝固过程中，已凝固的部分当因冷却而收缩，将锭心上部最后凝固的液态钢向下吸，在那里形成缩孔。缩孔处的材质很差，将钢锭送去轧制之前应该将它切除。由于这一切除每占20%左右，钢的成材率降低，成本也就高了。就成材讲，这种钢所含的硅、锰量每比沸腾钢为多，且材质更匀。又：为了使缩孔尽可能较短，在其锭模上部时常需要加一保温帽。

3) 半镇静钢 其向炉内所投的还原剂较前者为少，使在铸锭时还保持一些沸腾；同时，还时常在其钢锭凝固过程中在锭的顶部盖一冷铁板，使其下部和空气隔绝，不致氧化。这样，成材率就可提高，而钢材成品在使用方面每每可用以代替镇静钢。

4) 真空处理钢 若将钢水置于真空之中，不仅其所含氧气将迅速以CO形式跑出来，氢、氮等也很快逸出。和采用锰铁、硅铁等还原剂脱氧者相比，那儿有渣形成，而这儿没有。所以，当对钢材的夹杂限制很严时，需要采用这一处理方法。

（3）钢材成品

钢结构所使用的钢材，一般是用热轧法制成的。这就是将钢锭加热到1300℃左右，在开坯之中剪割成一定的大小；再让它反复地在热轧机辊轴的孔型内轧过去，直到其形状和尺寸符合规格。停轧时的温度则宜于保持在900~1000℃范围。热轧而成的板钢，厚度为4~20mm的，叫中厚板；厚度为20~60mm的，叫厚板。如果板钢在轧制时还用竖向的轧辊将它的边缘轧齐，那叫齐边板钢（也叫通用板钢）。如果不这样，边缘就不整齐，那叫毛边板钢；它们的边缘将由轧钢厂在供货前剪切整齐。又因钢材性能往往表现为顺轧制方向较