

高等学校教材

水工钢结构

(第二版)

武汉水利电力学院 大连工学院 河海大学 合编

水利电力出版社

高等学校教材

水工钢结构

(第二版)

武汉水利电力学院 大连工学院 河海大学 合编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是高等学校水利类专业教材。全书共分六章及十二个附录。第一章至第五章主要介绍钢结构的材料、连接,讲述钢梁、钢柱、钢压杆以及钢桁架的设计,第六章讲述平面钢闸门的设计,并附有设计例题。

本书除作为教材外,尚可供水利工程技术人员参考。

高等学校教材 水 工 钢 结 构 (第二版)

武汉水利电力学院 大连工学院 河海大学 合编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 15.5印张 349千字

• 1980年6月第一版

1988年6月第二版 1988年6月北京第四次印刷

印数36601—52791册 定价2.60元

ISBN 7-120-00308-9/TV·82

前 言

本教材是根据水利电力部水利类教材编审委员会的决定对原出版的《水工钢结构》教材的修订本。本书主要适用于高等院校水利水电工程建筑专业、农田水利工程专业以及水利水电工程施工专业等水利类其他专业的使用。尚可供有关的工程技术人员参考使用。

本书共分六章和绪言以及十二个附录，内容分两大部分：基本部分为钢结构设计的基本知识和基本理论，基本构件和连接的计算与构造设计；专业结构物设计部分为平面钢闸门。为了加深对设计原理、计算方法和构造处理的理解和应用，书中编写了设计例题，可供作课程设计时参考。

本教材主要根据原书几年来教学实践经验，从教学实际需要出发，着重反映了国内外近年来有关的研究成果。全书中采用的基本符号、基本术语、计量单位、计算的基本规定、各种构件和连接的计算与构造等，主要根据国家标准《钢结构设计规范GBJ—86》送审稿以及水电部的《水利水电工程钢闸门设计规范SDJ13—78》（试行）。

本书由武汉水利电力学院、大连工学院和河海大学三校合编。参加编写的有：武汉水利电力学院范崇仁（绪论、第六章）、周世植（第四章）；大连工学院陈继祖（第二章、第五章）；河海大学俞良正（第三章）、陶碧霞（第一章）。本书由范崇仁担任主编、由天津大学王象箴、清华大学赵文蔚担任主审。

原书从1980年出版以来，曾经3次印刷，得到各兄弟院校和有关工程单位的大力支持，提出不少宝贵意见，对修订本教材，提高教材质量起到了积极作用，在此一并致谢。对于本书中存在的错误和缺点，希望继续提出指正。

编 者

1986年12月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 钢结构的材料	8
第一节 钢材的主要性能	8
第二节 影响钢材力学性能的主要因素	11
第三节 钢材的疲劳	16
第四节 钢材的钢号及选用	20
第五节 轧成钢材的规格及用途	23
第六节 钢结构的计算方法	24
第二章 钢结构的连接	32
第一节 连接的类型	32
第二节 焊接方法	33
第三节 焊接连接型式、焊缝类型和焊接强度	36
第四节 对接焊缝连接的构造和计算	38
第五节 角焊缝连接的构造和计算	42
第六节 焊接应力和焊接变形	54
第七节 螺栓连接	57
第三章 钢梁	71
第一节 钢梁与梁格的型式及应用	71
第二节 钢梁的弯曲强度及其计算	72
第三节 钢梁的整体稳定性	76
第四节 轧成梁的设计	80
第五节 焊接组合梁的截面选择和截面改变	82
第六节 焊接组合梁的翼缘焊缝和梁的拼接	88
第七节 薄板的稳定性和组合梁腹板的加劲	91
第八节 梁的支承	102
第四章 钢柱与钢压杆	113
第一节 钢柱与钢压杆的应用和构造型式	113
第二节 轴心受压实腹式构件的整体稳定性	113
第三节 轴心受压实腹式构件的局部稳定性	120
第四节 轴心受压实腹柱设计	121
第五节 轴心受压格构式构件的稳定性	124
第六节 轴心受压格构柱设计	126
第七节 实腹式压弯构件的承载能力	132
第八节 偏心受压实腹柱设计	137

第九节 偏心受压格构柱设计	140
第十节 梁和柱的连接	141
第十一节 柱脚的设计	142
第五章 钢桁架	145
第一节 概述	145
第二节 桁架的外形、尺寸和腹杆布置	145
第三节 桁架间的联结系和压杆的计算长度	148
第四节 桁架的杆件设计	152
第五节 普通桁架节点设计和桁架施工图绘制	157
设计例题 焊接钢屋架设计	160
第六章 平面钢闸门	173
第一节 概述	173
第二节 平面钢闸门的组成和结构布置	174
第三节 面板和次梁的设计	180
第四节 主梁设计	186
第五节 横向联结系和纵向联结系	188
第六节 边梁设计	190
第七节 行走支承	190
第八节 轨道及其它埋件	196
第九节 止水、启闭力和吊耳	199
设计例题 露顶式平面钢闸门设计	202
附录一 钢材的性能	213
附录二 疲劳计算的构件和连接分类	215
附录三 型钢规格和截面特性	218
附录四 型钢的螺栓(铆钉)准线表	225
附录五 普通螺栓的标准直径及螺纹处的有效截面积	226
附录六 梁的整体稳定系数	226
附录七 轴心受压构件的稳定系数	230
附录八 组合截面回转半径近似值	235
附录九 矩形弹性薄板弯矩系数	235
附录十 轴套材料及混凝土承压容许应力	238
附录十一 钢闸门自重(G)估算公式	238
附录十二 材料的摩擦系数	240
主要参考书目	241

绪 论

一、水工钢结构课程的性质和任务

用型钢或钢板作为基本构件, 根据使用要求, 通过焊接或螺栓连接等方法, 按照一定规律组成的承载结构叫做钢结构。钢结构在各项工程建设中的应用极为广泛, 如钢桥、钢厂房、钢闸门、各种大型管道容器、钢塔桅结构等等。这些结构都是用型钢或钢板做成, 其中梁、板、柱和桁架多为这些结构的基本构件。由此可见, 钢结构是工程结构中按材料划分出来的一门学科。这门学科主要是建立在建筑材料、材料力学、结构力学和其他有关的工程力学以及工程实践知识的基础上, 进一步按照结构物的使用目的, 在预计的各种荷载作用下, 不致使结构失效, 就必须考虑其具体的材料性能, 综合运用上述的力学知识, 研究结构在使用环境和荷载作用下的工作状况, 才能设计出既安全适用, 又经济合理的结构。由于本课程有时要直接引用上述课程中有关的计算方法和计算公式, 有时还要通过适当的假定, 把某些复杂公式转化成实用方便的简化公式, 所以对于设计工作者, 必须熟悉上述的有关力学课程的内容。然而, 必须指出, 钢结构这门学科的特点, 决不仅仅是力学的分析和运算, 因为要获得一个优秀的结构设计, 还必须熟悉结构物的使用要求、掌握材料特点、熟悉材料在各种外界因素影响下的工作性能, 方能善于使用材料。另外, 工程中的许多问题不是全部都能借助现有的公式就能解决的, 往往还需要有丰富的工程实践知识, 如进行全面规划, 作出合理的总体布置和结构选型等, 然后才能设计构件, 进行构造处理, 并确定必要的制造工艺要求和安装方法等。

本课程的主要任务是阐述常用的结构钢在各种外界因素影响下的工作性能、钢结构的基本设计理论以及结合水利工程专业的要求讲述平面钢闸门的设计原理和方法。通过对本课程的学习, 具备钢结构的基本知识, 掌握正确的设计原理和设计方法, 能够对钢梁、钢柱、钢桁架等基本构件以及钢闸门进行设计。并为设计其他类型的钢结构打下基础。

二、钢结构的特点及其在水利工程中的应用

(一) 钢结构的特点

钢结构与其他材料的结构(钢筋混凝土结构、木结构和砖石结构)相比, 具有下列特点:

1. 钢结构自重较轻

虽然钢的容重很大($\gamma = 76.93 \text{ kN/m}^3$ 或 $\gamma = 7.85 \text{ t/m}^3$), 但由于钢的强度很高, 故构件所需要的截面很小。所以自重较轻, 便于运输和安装。更适宜用作活动结构, 以减少驱动力。

2. 钢结构工作的可靠性较高

由于钢的组织均匀, 其性能最接近于各向同性体, 而且弹性模量很大($E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$), 具有较大的抵抗变形的能力, 又是一种理想的弹塑性材料, 最符合一般变形

固体力学对材料性能所作的基本假定，因此理论计算的结果与实际材料的工作状况比较符合，结构的安全度比较明确。

3. 钢材的抗振性比混凝土和砖石要好

因为前者是组织均匀且机械性能高的弹塑性材料，而后者是组织不均匀且机械性能低的脆性材料。还有前者自重小而后者自重大的特点，所以引起的振动惯性力为前者小而后者大。

4. 钢结构制造的工业化程度较高

由于钢结构的制造必须采用机械，从而具备成批生产和高精度的特点，提高了工业化的程度。

5. 钢结构可以准确快速地装配

由于钢构件自重较轻，并可以在安装现场直接用焊接或螺栓将其连接起来，安装迅速，施工周期短，部件便于更换。

6. 钢板容易做成密封的结构

钢板容易做成密封的结构，如管道和各种容器。

7. 钢结构容易腐蚀

钢结构尤其对水工钢结构，容易腐蚀的缺点比较突出。为了防止腐蚀，可采用涂油漆或利用电化学效应如阴极保护法等措施。

8. 钢结构耐火性差

虽然钢材在 200°C 以内其性质变化很小，但是当温度高于 300°C 时，钢的强度和弹性模量会显著下降，当温度高于 $500^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 时，钢材即失去工作能力。因而接近高温的结构，需要采取隔热措施。

(二) 钢结构在水工中的应用

根据以上所述钢结构的特点，并考虑建筑物的使用要求，钢结构在水利、水电、水运、海洋采油等工程中的合理应用范围大致如下：

1. 活动式结构

例如水工中大量采用的钢闸门、阀门、拦污栅、船闸闸门、升船机和钢引桥等。对于这一类需要移动或转动的结构来说，可以充分发挥钢结构自重较轻的特点，从而能降低启闭设备的造价和运转所耗费的动力。图 0-1 是正在拼装中的葛洲坝水利工程用的弧形钢闸门，其跨度为 12m ，高度为 12m ，水头达 27m ，每扇闸门承受的总水压力达 42000kN （约 4200t ）。图 0-2 是葛洲坝水利工程中 2 号船闸安装时的人字钢闸门。该船闸为单级，闸室宽 34m ，水头 27m ，门高 32.6m ，每扇门宽为 20.34m ，重量达 5000kN （约 500t ）左右，是我国目前最大的人字钢闸门，也是当今世界上大型船闸闸门之一。图 0-3 是葛洲坝船闸建成后正在通航的情况。

2. 装配式结构

在水利工程中经常会遇到需要搬迁和周转使用的结构。例如施工用的钢栈桥、钢模板、装配式的混凝土搅拌楼、砂、石骨料的输送架等。这类结构充分发挥了自重较轻、便于运输和安装的特点。

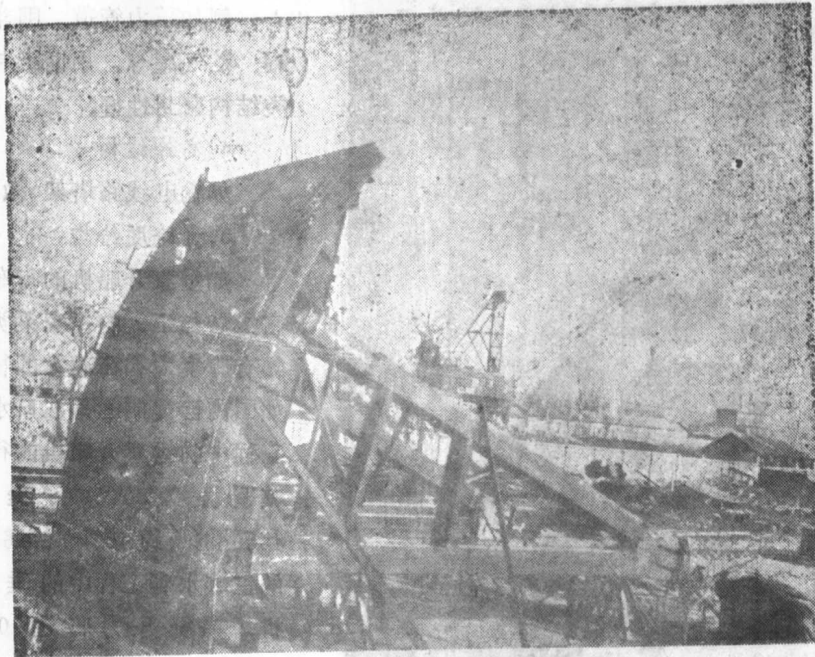


图 0-1 葛洲坝二江泄水闸弧形钢闸门

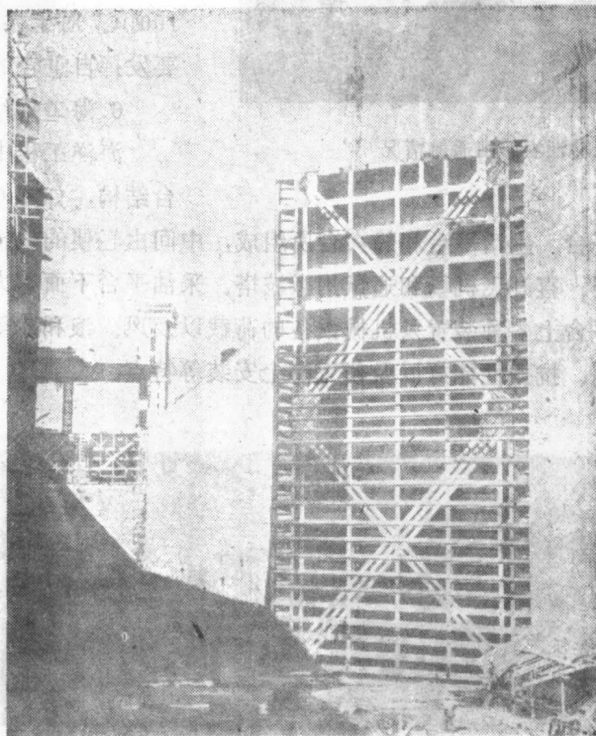


图 0-2 葛洲坝 2 号船闸安装时的人字钢闸门

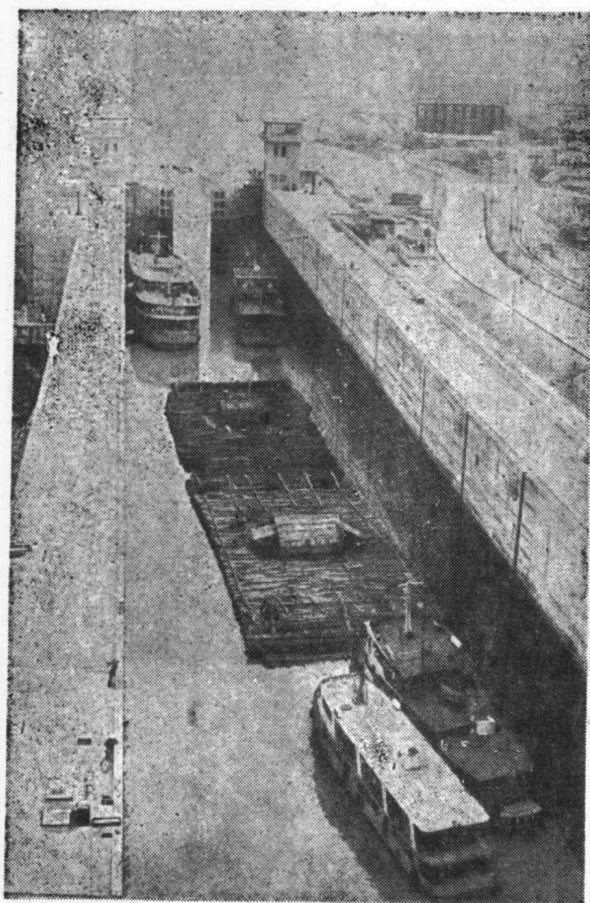


图 0-3 葛洲坝船闸通航情况

3. 板结构

例如压力管道、囤斗、贮液罐、贮气罐等。用钢板制造的这类结构密封性好。

4. 高耸结构

如输电线路塔架、微波塔等。

5. 大跨度结构

如垂直升船机的行车大梁，它虽然与工厂的吊车梁类似，但具有跨度大和荷载大的特点，例如国内已建成的丹江口水利枢纽工程中的垂直升船机的行车大梁其跨度为 30.5m，提升力达 4500kN（约 450t）。将要兴建的三峡水利工程中的垂直升船机，其提升力将达 100000kN（约近 1 万 t）左右。图 0-4 是我国已建的大连新港油码头用的空腹桁架式钢栈桥，共九跨，每跨 100m。对于大跨度结构，更需要发挥自重轻的特点。

6. 海工钢结构

海洋工程中的钻井、采油平台结构，如图 0-5 为我国渤海湾

某平台，它是由采油平台、生活平台和烽火台所组成，中间由轻便的栈桥相连接。生活平台上设有多层的生活楼、直升飞机场和通讯用微波塔。采油平台下面有大容量的原油贮罐等。这类结构要承受平台上各种装置及机械设备的荷载以及风、浪和冰等动力荷载作用，这就发挥了钢材强度高、抗振性能好以及便于海上安装等特点。

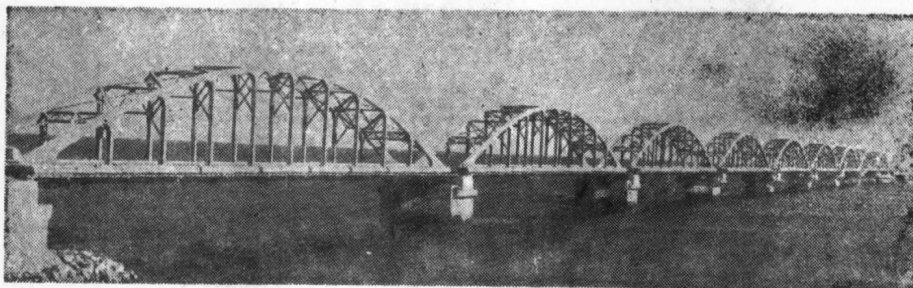


图 0-4 大连新港油码头钢栈桥

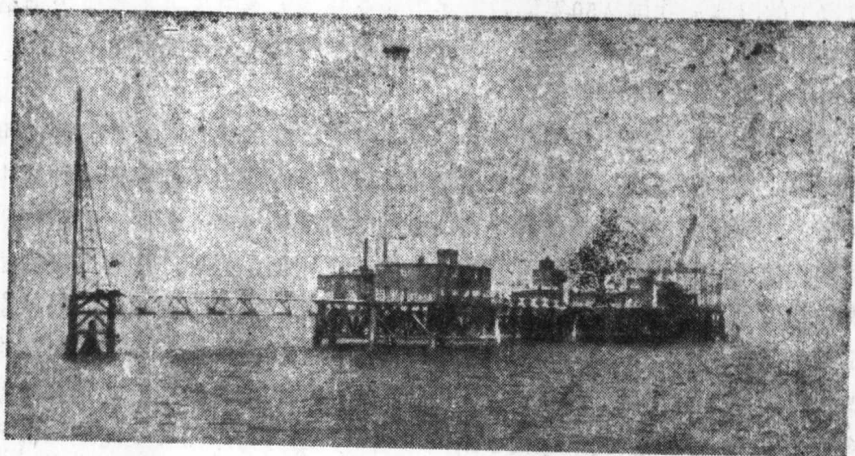


图 0-5 我国渤海湾海上采油固定式钢平台

诸如上述可知，钢结构在水工中的应用是相当广泛的。

三、对钢结构设计的要求

由于钢是国民经济建设和国防建设中的重要材料，所以仅当不适合采用其他材料的结构时才采用钢结构。对钢结构的设计，必须贯彻执行国家的技术经济政策，要求做到技术先进、经济合理，安全适用，确保质量。为此，设计工作者应该从工程实际出发，合理选用材料，合理结构选型和结构布置，采用先进的设计理论和计算方法以及构造措施，优先采用定型的和标准化的结构构件和节点，以减少制作和安装工作量，达到降低造价的目的。

在研究和创立较完善的结构型式时，应该尽量做到结构型式简化和材料集中使用（即扩大构件），这样可以减少构件的数量，因为数量多而尺寸小的构件，特别是受压构件，一般不能充分发挥材料的强度，且增加制造和安装的工时，对防止腐蚀也不利。

四、水工钢结构的发展方向

有效地使用钢材和千方百计节约钢材是加速实现我国四个现代化对我们提出的一项要求。因此，水工钢结构的发展方向主要有以下几个方面：

1. 不断创新合理的结构型式

这是节约钢材的有效途径，例如采用钢管混凝土作受压构件（即在承受压力的钢管内填入密实的混凝土），不仅混凝土受到钢管的约束而提高了抗压强度，而且由于管内混凝土的填充也提高了钢管的抗压稳定性。又如预应力钢结构的应用，可以较大幅度的节约钢材（一般可节约钢材20~40%）。因为在结构中采用了预应力，既可以调整结构的内力，又可采用高强度的钢索，从而可以充分发挥钢材应有的强度，并能增加结构的刚度，例如在葛洲坝工程中的船闸人字钢闸门上采用了预应力的门背斜拉杆，可以有效地防止当门扇在水中旋转时产生过度的挠曲和扭转变形。美国曾于1942年在闸室宽度为24.4m的某船闸闸门上开始应用这种方法，使每扇高度为17m、宽度为13.7m的人字钢闸门的门厚只有1m。这样薄的闸门在任何情况下旋转而没有显著的变形，甚至在冬季，还用它的旋转

来扫除航道中的浮冰。我国从50年代以来,已经在某些工程中采用了预应力钢结构,并收到节约钢材和降低造价的效果。所以发展预应力钢结构具有一定的前途。

2. 更新设计理论和计算方法

水工钢结构一直沿用容许应力的设计方法。这种方法的优点是计算简便,可以满足正常的使用要求。但必须指出,此法的缺点是所给定的容许应力不能保证各种结构具有比较一致的可靠度。我们知道恒载的估算要比活载的估算准确得多,若同一个结构所承受的恒载对活载的比值很高,则其计算的可靠度就高,反之则低。另外,按容许应力法设计没有适当考虑结构的重要性影响。因此,水工钢结构应研究以概率为基础的极限状态设计法。

水工钢闸门的结构计算,通常是将这样一个空间结构简化成若干个平面结构(如梁、柱、桁架、刚架等)来计算。这种计算方法没有考虑结构的整体性,其结果有些构件在实际上常有强度富裕。我国从五十年代以来,对钢闸门已开始采用按空间结构的计算方法,它是将整个闸门当作一个薄壁梁来考虑,这样不但可以计入面板和水平次梁在闸门整体弯曲中所起的抗弯作用,较真实地反映闸门的工作情况,而且还可以节约钢材。根据实践经验,对于大跨度的露顶钢闸门,按空间结构计算可省钢10~15%,然而,对于跨度较小的闸门,节约的效果没有大跨度的闸门显著,且计算过程比较繁琐,所以采用并不普遍。但是随着电子计算机的发展已为钢闸门按空间结构计算提供了条件。同时还可以对结构进行优化设计。

3. 合理的使用材料

长期以来,钢结构传统地使用普通碳素结构钢,随着冶金工业的发展,在碳素结构钢里加入少量的合金元素(合金元素总含量一般为1~2%,不超过5%),就可以得到强度高、综合机械性能好的普通低合金钢。这类钢还具有某些特殊的性能,如抗蚀性、耐磨性及耐低温性等。如屈服强度为 345N/mm^2 的16锰钢和屈服强度为 390N/mm^2 的15锰钒钢均已列入钢结构设计规范(GBJ-86)推广使用。15锰钒钢是最新列入使用的,它是在冶炼16锰钢的基础上增添少量的钒铁合金而成,在工程实践中使用已有20多年的经验,是我国低合金结构钢中综合性能比较好的钢号,其经济效益可较3号钢节约15~25%。1983年3月,党中央和国务院作出决定:把低合金钢和合金钢放在优先发展地位。这是关系我国实现经济建设战略目标的一件大事。

采用高强度低合金钢可以大大节约钢材,提高结构使用寿命,同时由构件断面尺寸减薄,还可以简化制造工艺,节约工时,有利于运输和安装。如著名的南京长江大桥、丹江口水利枢纽中的钢闸门和升船机(图0-6)以及葛洲坝水利工程中的钢闸门均系采用16锰钢或16锰桥钢所建造。

为了合理使用材料,对于由稳定控制的构件宜采用价格较低的普通碳素钢,对于由强度控制的构件则宜采用高强度的低合金钢。同样,对于受弯构件,翼缘可以采用强度高的低合金钢而腹板宜采用普通碳素钢,这种构件称为异种钢构件。

对于不直接承受动力荷载的梁,可以采用钢与混凝土的复合梁,该复合梁由钢筋混凝土作受压的翼缘板,再由联结件与下部的钢梁联结成整体而共同工作。

4. 研究和推广钢结构的新型连接方法

如改进焊接工艺,提高焊接的质量,如二氧化碳气体保护焊、电渣焊等,继续推广使用高强度螺栓的连接方法,这种连接是由于螺栓拧紧后有很大的预拉力,使被联结的板件之间产生很大的摩擦力来传递外力。由于这种连接的性能克服了焊接结构存在的焊接应力和焊接变形等缺点。因此,它不仅安装迅速,同时还可避免不易保证质量的现场高空焊接。而且承受动力荷载的性能也比较好。

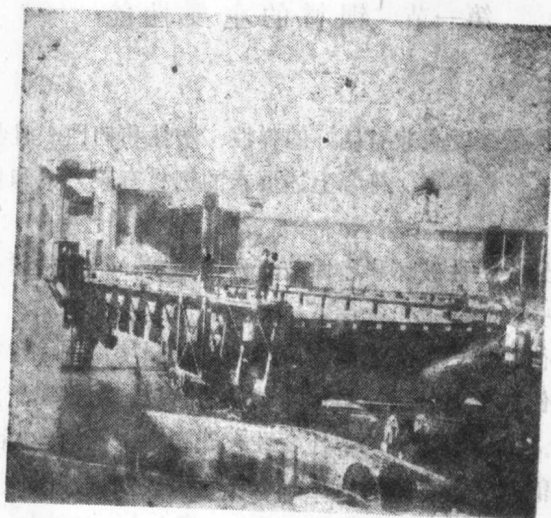


图 0-6 丹江口船闸第一级斜面式升船机

5. 研究和推行水工钢结构的标准化和系列化

这是降低造价、缩短工期、提高劳动生产率的有效措施。

第一章 钢结构的材料

第一节 钢材的主要性能

一、钢材的破坏形式

钢结构对钢材的要求是强度高兼有良好的弹性、塑性和韧性，且易于冷、热加工和焊接。同时，易于生产，价格便宜。符合上述要求的钢材有碳素钢和低合金钢中的少数几种。

钢材的断裂破坏可分为塑性破坏和脆性破坏两种形式。钢结构采用的钢材虽然有较好的塑性和韧性，但在一些不利的工作条件下，有可能产生脆性破坏。

钢材在常温 and 静力荷载作用下，当其应力达到抗拉强度 f_u 后，产生很大的塑性变形而断裂，称为塑性破坏。例如单向一次静力拉伸试件的断裂，就是属于这一种。它的破坏断口呈纤维状，色泽灰暗。由于破坏前的塑性变异性大于弹性变形约200倍以上，有十分明显的预兆，极易发现，故能及时采取必要措施，以防止事故发生。因此，钢结构极少发生塑性破坏。

当钢材承受动力荷载（包括冲击荷载和振动荷载）或处于复杂应力、低温等情况下，常会发生低应力脆性破坏。这种脆性断裂的应力常低于钢材的屈服点 f_y ，破坏前的变形甚微，没有明显塑性变形，同时裂缝开展速度极快，可达1800m/s。脆性破坏的断口平直，呈有光泽的晶粒状。实践证明，这种破坏发生突然，没有任何先兆，无法采取补救措施，往往是导致钢结构毁坏的主要原因之一。它在钢结构的使用中显得特别危险，必须引起设计者的高度重视。

二、钢材的主要机械性能

钢材在常温、静载、单向一次均匀受拉时的机械性能可由单向拉伸试验测得的应力应变曲线（图1-1）来表示。随着荷载与应力的增加，钢的工作大致可划分为：弹性、弹塑性、塑性（屈服）、自强和破坏等几个阶段。其中的屈服点 f_y 、抗拉极限强度 f_u 和伸长率 ϵ_s 或 ϵ_5 （国标以 δ_5 表示）以及由带缺口试件进行冲击试验所测定的冲击韧性的冲击值 α_K 是用来衡量建筑钢的强度、塑性和韧性等机械性能的主要指标（见附录一表1和表2）。

从钢材的拉伸试验曲线，可得以下几点重要结论：

（1）屈服点 f_y 是钢材的强度重要指标。普通低碳钢和低合金钢，在应力达到屈服点之后，应力不再增加，而应变却急剧增长，出现了屈服台阶，或称流幅（自 $\epsilon_y=0.15\%$ 起至 $\epsilon_f=2.5\%$ 止）。钢的承载能力暂时耗尽。这时，结构将因残余（塑性）变形过大而不能继续使用。故规范取屈服点 f_y 为衡量结构的承载能力和确定容许应力的重要指标。

热处理低合金高强度钢没有明显的屈服点和屈服台阶。一般取卸荷后试件中残余应变为0.2%所对应的应力为名义屈服点（图1-2），有时亦可近似地取 $0.6f_u$ 作为名义屈服点。

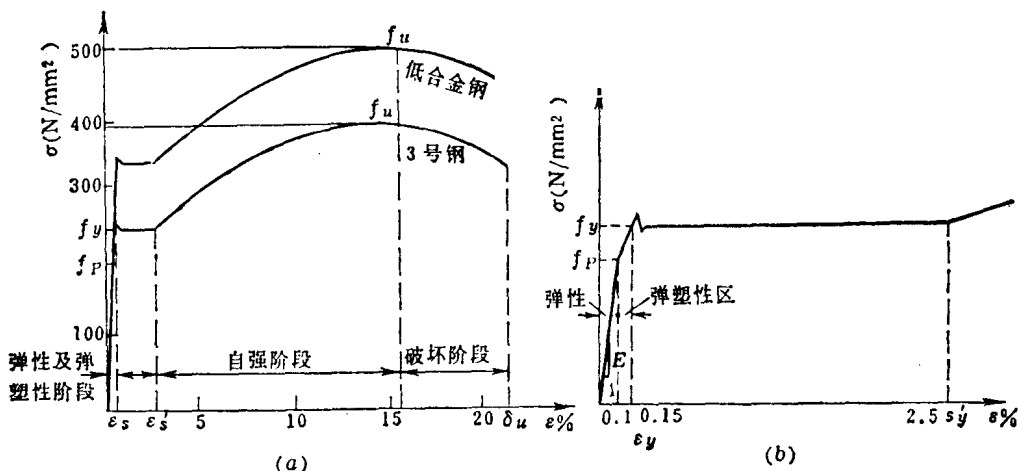


图 1-1

(a) 钢材一次单向拉伸时的应力应变曲线; (b) 3 号钢应力应变曲线局部放大图

钢材屈服点的高低还与钢材晶粒粗细有关, 材质好、厚度薄的钢材, 因轧制次数多, 晶粒细, 屈服点就高。因此, 国标按厚度大小分为三组, 规定不同的屈服点 (见附录一表 1)。

(2) 抗拉强度 f_u 也是衡量钢材强度的一个指标 当应变超过屈服台阶, 进入自强阶段, 最终达到 f_u 后, 试件才发生局部颈缩, 经过巨量变形后被拉断, 它是材料抗拉的最大承载能力, 但由于这时塑性变形太大 ($\epsilon_u \approx 16\%$), 故不能取抗拉强度作为计算的依据, 只能作为钢材的强度储备。同时, 抗拉强度不只是一般强度的指标, 而且还直接反映钢材内部组织的优劣, 它与钢材的疲劳强度也有较密切的关系。

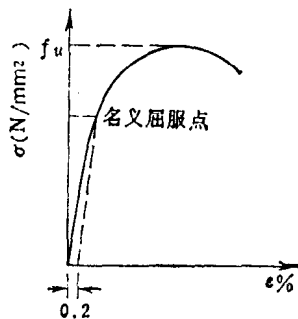


图 1-2 热处理低合金钢 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线图

(3) 伸长率 δ_u 是衡量钢材的塑性指标 钢材的塑性是指在外力作用下产生巨量残余塑性变形后尚不致破坏的能力。塑性指标常用应力应变曲线中最大应变值即伸长率来表示。良好的塑性有助于缓和钢构件的局部应力集中, 避免钢结构在使用中突然毁坏, 是提高钢结构安全度的极其重要的依据。

(4) 建筑钢兼有良好的弹性与塑性 钢的应力在比例极限 f_p 之内, 应力与应变呈直线关系, 符合虎克定律。应力超过比例极限后, $\sigma \sim \epsilon$ 线逐渐弯曲, 应变逐渐增大, 各点应力应变之比值变为变量, 不再保持为常量 E (弹性模量), 从而由弹性阶段进入弹塑性阶段。由于比例极限和屈服点比较接近 ($f_p \approx 0.8f_y$), 并且屈服点前的应变很小 ($\epsilon_y \approx 0.15\%$), 故在计算钢结构的强度时, 可近似地将钢的弹性工作阶段提高到屈服点。同时, 由于低碳钢和低合金钢的流幅相当长, 当应力达到屈服点而出现塑性流动时, 钢即由理想的弹性体

转变为近乎理想的塑性体。因此，这类钢可视为理想的弹性塑性体（图 1-3）。这就是钢结构正在发展中的塑性设计理论的依据。对于没有明显屈服台阶的热处理低合金钢，设计中不利用它的塑性。然而，计算钢构件稳定性时，仍应由比例极限来划分弹性阶段和弹塑性阶段。

钢材受均匀压缩或受弯也有类似上述受拉时的工作特性。它的弹性模量 $E=206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 和泊桑比 $\nu=0.25 \sim 0.3$ 。钢材抗剪要比抗拉强度低很多，且相应的弹性、塑性变形都比受拉大。一般取受剪屈服点 $\tau_s=0.58f_y$ ，剪切弹性模量 $G=79 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。

钢材的冷弯性能可由冷弯试验来检验。试验时按照规定的弯心直径（附录一表 1），以钢试件冷弯 180° 不出现裂纹或分层为合格。冷弯试验不仅是钢材塑性和冷加工性能的指标，又可检验钢材内部颗粒组织情况和非金属夹渣夹层的缺陷。因此，对于重要结构（例如钢闸门、钢桥、吊车梁和大跨度重型桁架等）采用新的钢号和新型结构以及需要弯曲成型的构件如压力钢管、钢桩等所用钢材还须保证冷弯试验合格。

钢材的脆断与韧性有着密切关系。钢材韧性是材料在断裂前单位体积所吸收的能量和开展塑性变形的能力，其值等于静力拉伸试验钢材断裂时应力~应变曲线下与横坐标轴所围成的面积。韧性是强度和塑性的综合表现，但它用于承受动力荷载的结构有局限性。因此，必须相应地用冲击荷载进行试验而获得冲击韧性，其值用 a_k 或 c_k 表示。

实际结构的脆性断裂常是从应力集中处开始的，冶金和制造中产生的缺陷，特别是缺口和裂纹常是脆性断裂的起始点。为此，冲击试验的试件做成带有缺口的。根据缺口的形状和试验机的种类不同冲击韧性测量有两种方法：我国目前规定采用图 1-4b 所示的梅氏 U 型缺口试件，冲击折断后，断口处单位面积上所消耗的功即为 a_k 值，单位为 J/cm^2 ；国外多半采用恰贝 V 型缺口试件（图 1-4c），由于缺口比较尖锐，应力集中更接近实际情况。恰贝冲击韧性 c_k 为试件冲断所需的功，不除以缺口处截面，所以单位为焦耳（J）。

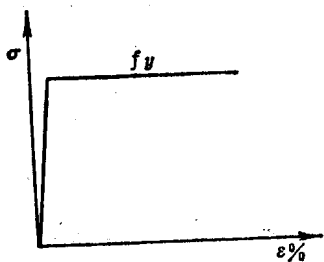


图 1-3 理想弹性塑性体的应力应变图

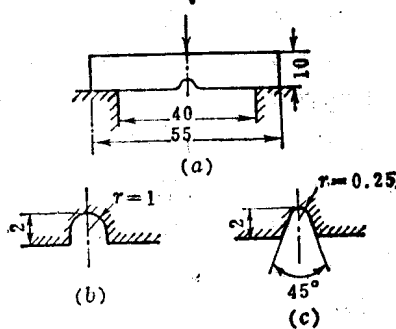


图 1-4 冲击试验

钢材的冲击韧性与温度有关，低温时冲击韧性将显著下降，处于寒冷地区承受动载的结构不但要求钢材具有常温冲击韧性指标，而且还要求具有负温 -20°C 或 -40°C 冲击韧性指标（附录一表 2），以保证结构的安全。

三、钢材的焊接性能、抗蚀性和防腐措施

钢材的焊接性能（又称可焊性）是指在给定的构造型式和焊接工艺条件下获得符合质

量要求的焊缝连接的性能。焊接性能差的钢材在焊接的热影响区容易发生脆性裂缝（热裂缝或冷裂缝），不易保证焊接质量，除非采用特定的复杂焊接工艺，才能保证其质量。

焊接结构的失事，往往是由于钢材的焊接性能不良，在低温或受动载时发生脆性断裂，故对于重要的承受动力荷载的焊接结构，应对所用钢材进行焊接性能的鉴定。一般可用带试验焊缝的试件进行试验，以测定焊缝及其热影响区钢材的抗裂性^①、塑性和冲击韧性等。钢的焊接性能除了与钢的含碳量等化学成分密切相关外（详见下节），还与钢的塑性及冲击韧性有密切关系。因此，钢的焊接性能还可间接地用钢材的冲击韧性 α_k 来鉴定。冲击韧性合格的钢材，其焊接质量也容易保证。

钢结构如长期暴露于空气中或处于水下而未加有效的防护时，表面就要锈蚀，特别是空气或水中有各种化学介质，产生电化学反应时，锈蚀更为严重，这称为腐蚀现象。腐蚀对钢结构的危害，不仅限于有效截面的均匀削弱，而且产生局部锈坑，引起应力集中，降低结构承载能力，促使结构的脆断。例如某水闸的钢闸门建成使用15年后，构件腐蚀严重，承载能力降低了1/3~2/3；又如某挡潮闸的钢闸门受海边盐雾大气的腐蚀，构件截面削弱，有一孔闸门的门叶发生失稳而破坏。因此，钢材的腐蚀问题和防腐蚀措施在水工钢结构设计中必须特别引起注意。

钢材腐蚀速度是研究钢材腐蚀和抗腐蚀的重要指标，一般可按钢材每年腐蚀厚度的毫米数（mm/年）或单位时间内单位面积腐蚀减损的重量（g/m²·年）来表示。我国冶金部门曾在各地作五年大气曝晒试验，结果表明，16锰钢比3号钢的腐蚀速度慢20~38%。

影响钢材腐蚀速度的因素是与结构所处具体环境的湿度、所接触空气或水含有侵蚀性介质的数量和活力、构件所处的部位以及钢材的材质等有关。

为了提高钢结构的耐久性，在设计和施工上必须十分注意钢的防腐蚀措施。一般常用油漆或喷镀锌层，对于重要零件如闸门轮轴等可采用镀铬，将钢材表面同周围介质相隔绝。近年来正在试验水下部分结构推广外接直流电源或挂锌片的阴极保护法。此外，在选材时应尽量优先采用抗蚀性较好的钢种如16Mn钢。日本和美国的某些钢闸门的面板采用普通的钢板，在其迎水面外贴2~3mm厚的不锈钢薄板防腐，称之为复合钢板。我国在某些水闸和船闸钢闸门上正在试用玻璃钢等工程塑料贴面的防腐措施。

第二节 影响钢材力学性能的主要因素

钢结构常用的钢材在一般情况下，具有较高的强度，又有很好的塑性和韧性。但是，有许多因素将影响钢材的力学性能，主要的因素有钢材的化学成分、钢的冶炼和轧制、复杂应力和应力集中、时效硬化、冷作硬化和低温等。研究和分析这些影响因素的目的是了解钢材在什么条件下可能发生脆性断裂，从而采取措施，予以防止。

一、化学成分的影响

钢的化学成分直接影响钢的组织构造，故与钢材的力学性能有密切关系。普通碳素钢

^① 抗裂性试验是指试件上的焊缝及其热影响区钢材在焊接后，经剖开检查是否有裂纹产生，用裂纹的长度和深度来衡量裂纹扩展的倾向。