

高等学校教材

水工钢结构

第 三 版

武汉水利电力大学 大连理工大学 河海大学
合 编

8324
2 D3



56.832x
W92.03

高等学校教材

附论

水 工 钢 结 构

第 三 版

武汉水利电力大学 大连理工大学 河海大学

合 编

水利部教材编审委员会

编审组编

第三版

武汉水利电力大学 大连理工大学 河海大学

合 编

水利部教材编审委员会

编审组编

水利部教材编审委员会 水利部教材编审组

水利部教材编审组 水利部教材编审组

水利部教材编审组

水利部教材编审组

水利部教材编审组

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书为高等学校水利水电类专业教材。全书共分六章及附录。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。本次修订主要根据国家标准《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)。

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 三 版

武汉水利电力大学 大连理工大学 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·各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16.75印张 380千字

1980年6月第一版 1988年6月第二版

1995年6月第三版 1995年6月北京第六次印刷

印数 67351—73220册

ISBN 7-120-02071-4/T V·782

定价 9.50 元

前 言

本教材是根据水利部1990~1995年高等学校水利水电类专业教材编审出版规划对原出版的第二版《水工钢结构》教材修订的第三版本。本书主要作为高等院校水利水电工程专业、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教材。还可供有关工程技术人员参考。

本书共分六章和绪言及十二个附录。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、思考题和习题，可供在学习时及课程设计时参考。

本版主要根据原版本十余年来教学实践，从教学实际需要出发，增加了反映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，主要依据是国家标准《钢结构设计规范》(GBJ17—88)以及原水利电力部的《水利水电工程钢闸门设计规范》(SDJ13—78)。

本书由武汉水利电力大学、大连理工大学和河海大学三校合编。参加编写的有：武汉水利电力大学范崇仁（绪论、第二章、第五章、第六章）、周世植（第四章）；大连理工大学陈继祖（第二章、第五章）；河海大学俞良正（第三章）、陶碧霞（第一章）。本书由范崇仁教授主编，由天津大学王象箴教授主审。

原书从1980年出版以来，曾经修订一次，共5次印刷，均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

1993年1月

目 录

前 言	
绪 论	1
思考题	7
第一章 钢结构的材料和计算方法	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	12
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	24
第六节 钢结构的计算方法	26
思考题	33
第二章 钢结构的连接	34
第一节 连接的类型	34
第二节 焊接方法和焊缝强度	35
第三节 对接焊缝连接的构造和计算	39
第四节 角焊缝连接的构造和计算	44
第五节 焊接应力和焊接变形	55
第六节 螺栓连接	58
思考题	73
习题	74
第三章 钢梁	76
第一节 钢梁的形式及应用	76
第二节 钢梁的弯曲强度及其计算	77
第三节 钢梁的整体稳定性	80
第四节 轧成梁的设计	84
第五节 焊接组合梁的截面选择和截面改变	87
第六节 焊接组合梁的翼缘焊缝和梁的拼接	93
第七节 薄板的稳定性和组合梁腹板的加劲	96
第八节 梁的支承	107
思考题	114
习题	115
第四章 钢柱与钢压杆	117
第一节 钢柱与钢压杆的应用和构造形式	117
第二节 轴心受压实腹式构件的整体稳定性	117

第三节	轴心受压实腹式构件的局部稳定性	124
第四节	轴心受压实腹柱设计	125
第五节	轴心受压格构式构件的稳定性	128
第六节	轴心受压格构柱设计	130
第七节	实腹式压弯构件的承载能力	136
第八节	偏心受压实腹柱设计	141
第九节	偏心受压格构柱设计	144
第十节	梁和柱的连接	145
第十一节	柱脚的设计	146
	思考题	151
	习题	152
第五章	钢桁架	153
第一节	概述	153
第二节	桁架的外形、尺寸和腹杆布置	154
第三节	桁架间的支撑和压杆的计算长度	156
第四节	桁架的杆件设计	161
第五节	普通桁架节点设计和桁架施工图绘制	166
第六节	设计例题——焊接钢屋架设计	171
	思考题	183
	习题	184
第六章	平面钢闸门	185
第一节	概述	185
第二节	平面钢闸门的组成和结构布置	186
第三节	面板和次梁的设计	192
第四节	主梁设计	198
第五节	横向联结系(横向支撑)和纵向联结系(纵向支撑)	200
第六节	边梁设计	201
第七节	行走支承	202
第八节	轨道及其它埋件	208
第九节	止水、启闭力和吊耳	210
第十节	设计例题——露顶式平面钢闸门设计	214
	思考题	228
附录一	钢材的性能	230
附录二	疲劳计算的构件和连接分类	232
附录三	型钢规格和截面特性	236
附录四	型钢的螺栓(铆钉)准线表	246
附录五	普通螺栓的标准直径及螺纹处的有效截面积	247
附录六	梁的整体稳定系数	247

附录七 轴心受压构件的稳定系数.....	251
附录八 组合截面回转半径近似值.....	256
附录九 矩形弹性薄板弯矩系数.....	256
附录十 轴套材料及混凝土承压容许应力.....	259
附录十一 钢闸门自重 (G) 估算公式.....	259
附录十二 材料的摩擦系数.....	261
主要参考书目.....	262

绪 论

一、水工钢结构课程的性质和任务

用型钢或钢板制成基本构件,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、高层建筑和塔桅结构等。由此可见,钢结构是结构工程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工程力学及工程实践知识的基础上,按照结构物使用的目的,在预计的各种荷载作用下,在预定的使用期间,不致使结构失效。因此,在进行钢结构设计时必须考虑具体的材料性能,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。由于本课程有时需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,因为要获得一个质优的结构,还必须熟悉结构的使用要求,了解结构的工作状况,需要掌握钢材在各种因素影响下的工作性能以及构造方面的要求。由于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,作出合理的总体结构布置和进行合理的结构选型等,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。

本课程的要求任务是阐述常用的结构钢的工作性能、钢结构的连接设计、钢结构各类基本构件的基本设计原理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方法,能够对钢梁、钢柱、钢桁架等基本构件以及平面钢闸门进行设计。并为设计其他类型的钢结构打下基础。

二、钢结构的特点

钢结构与钢筋混凝土结构、木结构和砖石结构等相比,具有以下特点:

1. 钢结构自重较轻

虽然钢的容重 γ 很大($\gamma = 76.93 \text{ kN/m}^3$ 或 $\gamma = 7.85 \text{ t/m}^3$),但由于强度更高,故构件所需要的截面积较小。因钢材容重与其设计强度的比值相对也较小,所以自重较轻,便于运输和安装。特别适用于大跨度和高耸结构,也更适用于活动结构,以减少驱动力,如水工中的各类钢闸门。

2. 钢结构工作的可靠性较高

由于钢的组织均匀,其物理力学特性各向接近同性,而且弹性模量大($E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$),具有较大的抵抗变形的能力。它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、抗冲击性好

钢材不仅强度高, 而且一般具有良好的塑性和韧性, 故钢材本身的抗振性和抗冲击性较高, 同时还由于钢结构自重轻, 所以引起的振动惯性力也较小。

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和严格的工艺, 从而具备成批生产和高精度的特点, 是目前工业化程度最高的一种结构, 具有生产效率高, 速度快, 质量高。

5. 钢结构可以准确快速地装配

由于钢结构自重较轻, 加工精度高, 并可以在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. 容易做成密封结构

易于用钢板做成密封结构, 如管道和各种容器。

7. 钢结构易腐蚀

尤其是水工钢结构, 容易腐蚀的缺点比较突出, 为了防止锈蚀, 除了在初建时需要除锈, 油漆或镀锌等防锈措施, 而且建成后需要定期维护。在水工钢闸门上也可以采用电化学效应的阴极保护法。

8. 钢结构耐火性差

虽然钢材在 200°C 以内的强度和弹性模量变化很小, 但当温度高于 300°C 时, 钢的强度和弹性模量会显著下降, 达到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 以上时, 钢材即失去承载能力。因而接近高温的结构, 需要采取隔热措施, 例如在结构或其构件外面包以石棉、混凝土或含有蛭石的水泥浆层。

三、钢结构在水工中的应用

根据上述钢结构的特点, 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 , 水头为 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, 是我国目前已建成的最大的人字钢闸门, 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。我国即将兴建的三峡水利枢纽通航船闸, 其规模将大大超过目前世界最大的船闸, 如美国的新威尔逊船闸, 罗马尼亚的铁门船闸等, 预计船闸人字钢闸门的高度为 40m , 每扇宽度为 20.2m 。闸门最大水位差约 37m , 总水压力约 136000kN (约 13600t)。

2. 装拆式结构

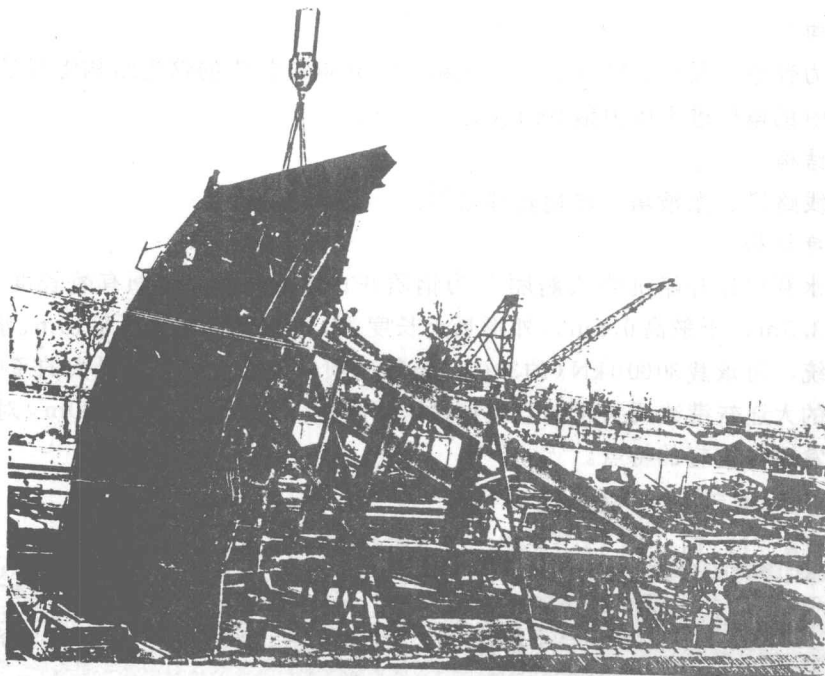


图 0-1 葛洲坝二江泄水闸弧形钢闸门

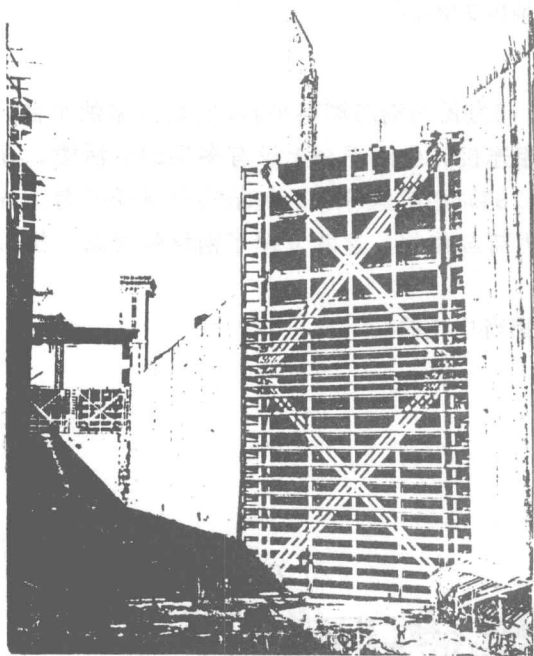


图 0-2 葛洲坝 2 号船闸安装时的人字钢闸门

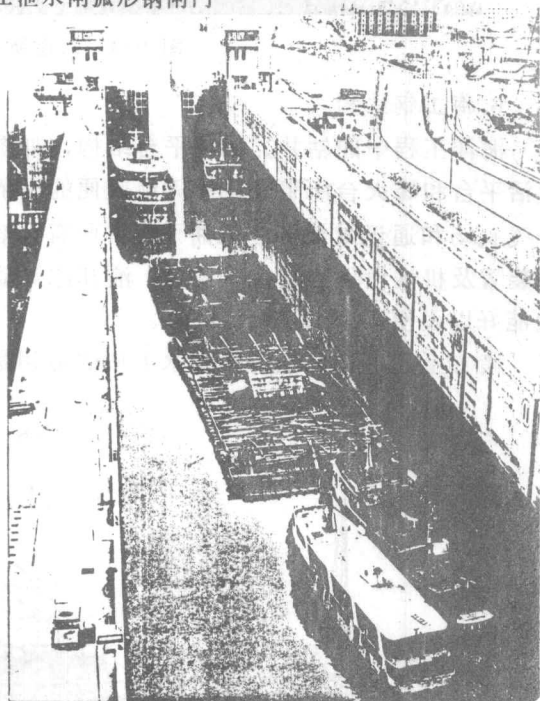


图 0-3 葛洲坝船闸通航情况

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。

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。三峡水利枢纽工程中的电厂进水压力钢管内径达12.4m。

4. 高耸结构

如输电线路塔、微波塔、电视转播塔等。

5. 大跨度结构

如三峡水利枢纽升船机的承船厢，为钢质开口槽形结构。船厢有效长度为120m，宽18m，水深3.5m，干舷高0.8m，外形最大长度为132m，宽23m，高10m。承船厢主体结构为梁格系统，可承载30000kN(约3000t)船舶过坝，为当今世界上最大的承船厢。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。

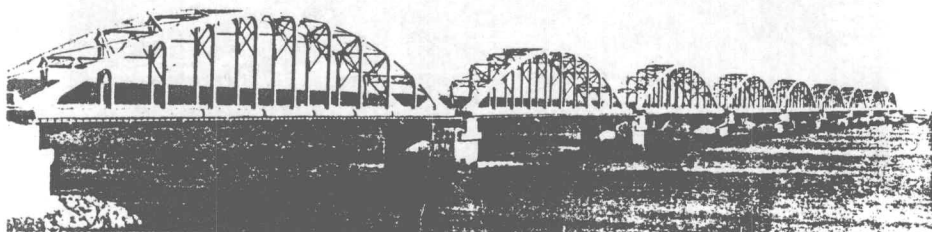


图 0-4 大连新港油码头钢栈桥

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。

诸如上述可知，钢结构在水工中的应用是相当广泛的。

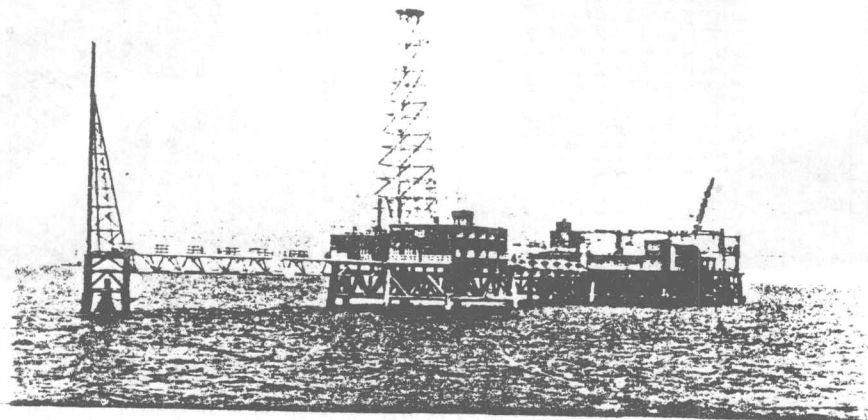


图 0-5 我国渤海湾海上采油固定钢平台

四、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,同其他结构设计一样,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,合理地进行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,以减少设计和制作的工作量,缩短建设周期,提高经济效益。

在研究和创立完善的结构型式时,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。

五、水工钢结构的发展

随着我国经济建设的迅速发展和钢产量的不断提高,钢结构的应用也会更加发展。为了更有效地使用钢材和节约钢材,水工钢结构的发展主要有以下几个方面:

1. 合理地使用材料

长期以来,钢结构传统地采用普通碳素结构钢,随着冶金工业的发展,冶炼时在碳素钢里加入少量的合金元素(合金元素总含量一般为 $1\% \sim 2\%$,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。如屈服点为 345N/mm^2 的16锰钢和屈服点为 390N/mm^2 的15锰钒钢均已列入钢结构设计规范(GBJ17—88)推荐使用。15锰钒是最新列入规范推荐使用的钢种。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,其经济效果可较 A_3 钢(即Q235钢)节约 $15\% \sim 25\%$ 。

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,同时由于构件截面尺寸减薄,还可以简化制造工艺,节约工时,有利于运输和安装,对于大跨度结构更显得有利。如南京长江大桥、葛洲坝水利枢纽中的各类钢闸门均采用16锰钢或16锰桥钢所建造。1992年建成的九江长江大桥采用的是15锰钒氮钢。它的屈服点为 440N/mm^2 。当今国外高强度钢发展很快,如美国的A514,其屈服点达到 690N/mm^2 。我国把发展高强度低合金钢放在优先地位,这是关系我国实现经济建设战略目标的一件大事。

为了合理利用材料,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,宜采用高强度低合金钢。同样,对受弯构件,翼缘可以采用高强度的低合金钢,而腹板可采用普通碳素钢,这种构件称为异种钢构件。

对于不直接承受动力荷载的简支梁或连续梁,还可以采用钢与混凝土联合工作的组合梁。这种梁由钢筋混凝土作上翼缘,再由联结件与下部的钢梁联结成整体而共同工作。

2. 不断创新合理的结构型式

不断创新合理的结构型式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,同时由于管内混凝土的填充也提高了钢管抗压的稳定性。因而构件的承载能力大为提高,且具

有良好的塑性和韧性，经济效益显著，它与钢柱相比，可节约钢材30%~50%。造价也相应降低。

预应力钢结构，也可以较大幅度的节约钢材（一般可节约钢材20%~40%）。如图0-6所示的预应力钢桁架，由于在结构中采用预应力，既可以调整结构的内力，又可采用高强度

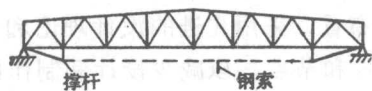


图 0-6 预应力钢桁架

度钢索（图0-6中虚线所示），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年在麦克阿瑟船闸中在闸室宽度24.4m的人字钢闸门上开始采用这种办法，使每扇高度为17m，宽度为13.7m的人字钢闸门的厚度只有1m。这样薄的闸门在任何情况下旋转而没有显著变形，甚至在冬季，还用它的旋转来扫除航道中的浮冰。我国从50年代开始对预应力钢结构进行研究，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。所以预应力钢结构具有一定的发展前途。

3. 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。例如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的比值很高，则其计算的可靠度就高，反之则低。因此，水工钢结构应研究以一次二阶矩概率论为基础的极限状态设计法。这一方法是我国《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84试行)颁布实施的方法。现行《钢结构设计规范》(GBJ17—88)采用的就是这一方法。

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，其结果不能准确反映结构实际的工作性能。因此，也就不能充分合理地使用材料。我国从50年代以来，对钢闸门已经有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，这样可以计入面板和水平次梁在闸门整体弯曲中所起的弯曲作用，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，所以按空间结构计算并不普遍。但随着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。

4. 研究和推广钢结构的新型连接方法

如改进焊接工艺，提高焊接质量，采用二氧化碳气体保护焊、电渣焊，研究与高强度结构钢相匹配的高质量焊接材料等。继续推广使用高强度螺栓的连接方法，这种连接是由于螺帽拧紧后使螺栓产生很大的预拉力，使被连接的板件之间产生很大的摩阻力来传递外力。由于这种连接具有较好的塑性和韧性，避免了焊接结构中存在的焊接应力和焊接变形等缺点。因此，它不仅安装迅速，而且承受动力荷载的性能也较好。

5. 研究和推行水工钢结构的标准化和系列化

推行水工钢结构的标准化和系列化是缩短工期，降低成本，提高劳动生产率的有效措

施。

思 考 题

0-1 钢结构与其他结构相比具有哪些优点？

0-2 钢材容重大，为什么钢结构与钢筋混凝土结构、砖石结构或木结构相比还较轻？为什么钢结构这一优点比较适合应用于大跨度结构和高耸结构？

0-3 钢管混凝土柱的优越性是什么？预应力钢结构的优越性是什么？

第一章 钢结构的材料和计算方法

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、热加工和具有良好的可焊性。同时，易于生产，价格便宜。多年实践证明，符合上述要求的钢材有碳素钢和低合金钢中的 3 号钢和 16 锰钢。

钢材的强度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，亦有可能产生脆性破坏。

钢材在常温和静力荷载作用下，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形大于弹性变形约 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 1800 m/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，采取适当措施以防止钢材发生脆性破坏。

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_5 或 ε_{10} （国标以 δ_u 表示）以及冷弯试验和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）。

从应力-应变曲线示出各项机械性能指标为：

比例极限 f_p 当钢材应力在 f_p 以内时，应力与应变呈直线比例关系，直线斜率 $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ 称为钢材的弹性模量， $E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ，完全符合虎克定律，故迭加原理得以在钢结构计算中应用。钢材的弹性极限与比例极限很接近，在弹性极限以内为弹性阶段，卸载后变形可完全恢复。

屈服点 f_y 应力超过比例极限后， σ - ε 线逐渐弯曲，应变加快，各点的应力与应变的比值为变量，从而由弹性阶段进入弹塑性阶段。普通低碳钢和低合金钢，在应力达到 f_y 之

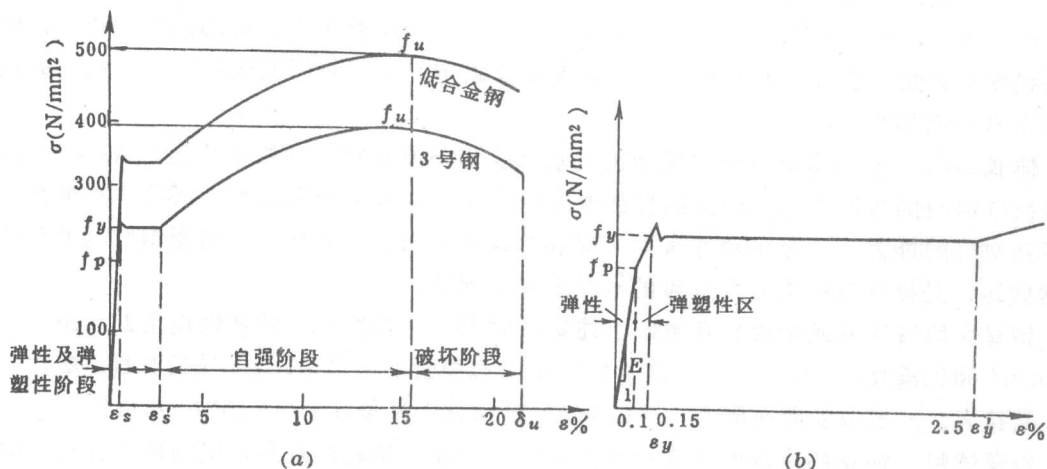


图 1-1

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

后, 应力不再增加, 而应变却急剧增长, 形成水平线段即屈服台阶 (流幅), 称为塑性流动阶段。应力超过弹性极限以后, 试件除弹性变形外还有塑性变形, 后者在卸载后留存, 故称为残余变形或永久变形。

屈服点 f_y 是建筑钢材的一个重要机械性能指标。这是因为:

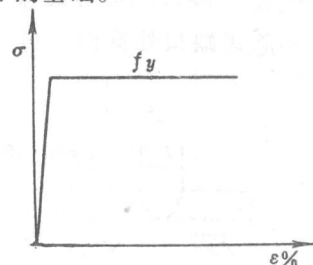
1) 在钢结构计算中, 通常将 f_y 作为钢材强度的标准值。应力达到 f_y 时的应变很小, $\varepsilon_y = 0.15\%$, 与 f_p 时的应变 $\varepsilon_p = 0.1\%$ 相差不多, 而且比例极限和屈服点比较接近 ($f_p \approx 0.8 f_y$), 故在计算钢结构的强度时, 可近似地将钢的弹性工作阶段提高到屈服点。同时, 屈服点之后, 应变大幅度增长, $\varepsilon = 0.15\% \sim 2.5\%$, 而应力不再增加。钢的承载能力暂时耗尽, 结构将因过大的残余变形而不能继续使用。故规范取 f_y 为弹性计算时材料强度的标准值。

2) 建筑钢为理想的弹性塑性体。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1-2)。这就是钢结构按塑性设计的基础。

热处理低合金钢没有明显的屈服点和屈服台阶。一般取卸载后试件中残余应变为 0.2% 所对应的应力为名义屈服点, 有时亦可近似地取 $0.6 f_u$ (抗拉强度) 作为名义屈服点。对于没有明显屈服台阶的钢材, 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, 国标中对同一钢种按其厚度大小分为三组, 规定不同的屈服点 (见附录一表1)。

抗拉强度 f_u 当应变超过屈服台阶, 即进入自强阶段, 最终达到 f_u 后, 试件才发生局



2 理想弹性塑性体的应力应变图

部颈缩，经过大量变形后被拉断。它是钢材抗拉的最大承载能力，但由于这时塑性变形太大， $\varepsilon_u \approx 16\%$ ，故不能取抗拉强度 f_u 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。

伸长率 δ_u 伸长率是以试件断裂前的永久变形与原标定长度的百分比 ε_5 或 ε_{10} 来表示。它是衡量钢材的塑性指标，即指钢材在外力作用下产生大量残余变形（或称永久变形）后尚不致破坏的能力。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，是提高钢结构安全可靠的极其重要的保证。

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 $\tau_y = 0.58 f_y$ ，剪切弹性模量 $G = 79 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。

冷弯试验 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冷弯试验合格（图1-3）。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。

冲击韧性 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_v 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：①梅氏试验法（Mesnager test）采用U形缺口试件在规定的试验机上进行（图1-4，a、b）。试件在摆锤冲击下折断后，断口处单位面积上所消耗的功即为冲击韧性，用 a_k 表示，单位为 J/cm^2 。我国目前多数规范采用这样的方法；②恰贝试验法（Charpy V-notch test）试件缺口采用V型（图1-4，c），由于缺口比较尖锐，缺口根部应力集中更接近实际结构的缺陷。恰贝冲击韧性 C_v 为试件冲断所需的功，不除以缺口处截面，可以使测量工作简化，所以单位为焦耳（J）。世界上许多国家和

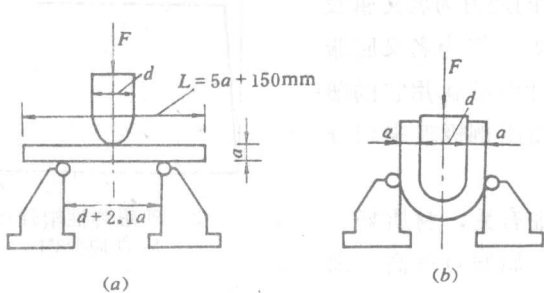


图 1-3 冷弯试验
(a) 试验前；(b) 试验后

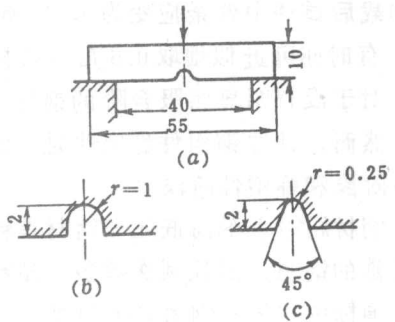


图 1-4 冲击试验