

钢 结 构

丁慎思 主编

西北建筑工程学院建工系
钢结构教研室

1987. 4 · 西安 ·

前 言

为了适应工业和民用建筑专业专科钢结构教学的需要，我们按照新的钢结构设计规范和冷弯薄壁型钢结构设计规范的报批稿编写了这本教材。

全书内容有：绪论，钢结构的材料，钢结构的计算原理，钢结构的连接，轴心受力构件，受弯构件，拉弯和压弯构件，桁架，轻型钢结构和网架结构。本课程的任务是使学生掌握钢材和连接的性能，学会设计一般钢构件和普通角钢屋架。至于轻型钢结构和网架结构可结合毕业设计的内容作为选修的专题教材。本书若和钢结构稳定课程同时讲授，也可作为工民建专业本科教材。

参加本教材编写工作的有：丁慎思（绪论、第一、第二和第八章的部分内容）、颜卫亨（第三和第七章）、袁树基（第四和第六章）、王光成（第五、第九和第八章的部分内容）、郝坚和姚玉茂（第八章的部分内容）、吴乃森（计算机程序）。主编由丁慎思教授担任。由于我们水平所限，一定会有一些缺点和错误，希望使用本教材的同志们给予批评指正，以便今后改进。

编者

1987年4月

目 录

结 论

第一节	钢结构的发展概况	(1)
第二节	钢结构的特点和应用范围	(2)
第三节	钢结构的发展	(3)

第一章 钢结构的材料

第一节	钢结构对材料的要求	(4)
第二节	钢材的力学性能	(4)
第三节	促使钢材转脆的因素及防止措施	(8)
第四节	钢材的选择及规格	(13)

思考题

第二章 钢结构的计算原理

第一节	概述	(17)
第二节	钢结构的计算方法	(18)
第三节	钢结构和构件的疲劳计算	(24)

思考题

第三章 连接

第一节	钢结构的连接方法	(27)
第二节	焊接连接的特性	(28)
第三节	对接焊缝的构造和计算	(32)
第四节	角焊缝的构造和计算	(36)
第五节	焊接应力和焊接变形	(49)
第六节	普通螺栓连接的构造和计算	(53)
第七节	摩擦型高强螺栓的计算	(65)

习题

第四章 轴心受力构件

第一节	概述	(69)
第二节	轴心受力构件的强度计算及刚度要求	(70)
第三节	轴心受压构件的整体稳定计算	(73)
第四节	轴心受压构件的局部稳定计算	(87)
第五节	实腹式轴心受压构件的截面设计	(91)
第六节	格构式轴心受压构件的截面设计	(96)
第七节	柱头构造设计	(103)

第八节	柱脚设计	(105)
习题		

第五章 梁

第一节	梁的类型	(111)
第二节	梁的设计内容	(112)
第三节	梁的截面选择和计算	(113)
第四节	梁的整体稳定	(120)
第五节	梁截面沿长度的改度	(127)
第六节	梁的局部稳定	(130)
第七节	梁翼缘焊缝的计算	(139)
第八节	梁的拼接	(142)
第九节	主次梁的相互连接	(146)
习题		

第六章 拉弯和压弯构件

第一节	概述	(151)
第二节	拉弯及压弯构件的强度计算	(152)
第三节	压弯构件的整体稳定计算	(154)
第四节	压弯构件的计算长度	(159)
第五节	压弯构件的局部稳定计算	(164)
第六节	实腹式压弯构件的截面设计	(167)
第七节	格构式压弯构件的截面设计	(171)
第八节	梁与柱的连接	(175)
第九节	柱脚设计	(176)
习题		

第七章 桁架设计

第一节	桁架的应用和型式	(183)
第二节	屋盖的组成和布置	(185)
第三节	屋盖支撑	(186)
第四节	桁架的杆件设计	(195)
第五节	桁架节点设计	(207)
第六节	桁架施工图	(219)

第八章 轻型钢结构

第一节	概述	(223)
第二节	钢檩条	(223)
第三节	圆钢、小角钢屋架	(234)

第九章 平板网架设计

第一节	网架结构的特点	(257)
第二节	网架结构的类型	(257)

第三节	网架的几何尺寸·····	(262)
第四节	平板网架近似计算方法·····	(263)
第五节	用精确法计算网架结构的原则·····	(277)
第六节	网架在地震、温度及安装荷载作用下的计算原则·····	(287)
第七节	杆件和节点设计与构造·····	(289)
附录 I	材料的性能·····	(附 1)
附录 II	型钢表·····	(附 6)
附录 III	钢材的设计强度·····	(附 19)
附录 IV	疲劳计算的构件和连接分类表·····	(附 21)
附录 V	受压构件的稳定系数·····	(附 23)
附录 VI	各种截面回转半径的近似值, 截面塑性发展系数·····	(附 28)
附录 VII	梁的整体稳定系数·····	(附 30)
附录 VIII	薄壁型钢结构钢材的设计强度·····	(附 34)
附录 IX	薄壁型钢结构轴心受压构件的稳定系数·····	(附 35)

绪 论

第一节 钢结构的发展概况

在钢结构发展方面,我国是最早用铁建造承重结构的国家。早在公元前二百多年(秦始皇时代)就已经用铁建造桥墩。为了同其它国家通商和进行宗教、文化交往,在公元58年至75年期间在云南建造了世界上最早的一座铁链桥——兰津桥。铁链桥是由锻造的铁环,相扣成链,以链作为悬挂式结构。其后建造的云南的沉江桥、贵州的盘江桥、四川的大渡河桥等等,其建设规模、建造技术在当时都处于世界领先地位。红军长征途中经过的大渡河铁链桥建于1696年,桥长100m,桥宽2.8m,桥面由9根铁链及其上的木板组成,栏杆扶手由四根铁链构成。大渡河铁链桥比英国建造的第一座跨度31m的铸铁拱桥早83年,比美洲建造的第一座跨度21.3m的铁桥索早105年。

在全国各地还建造了许多纪念性建筑,如1061年在湖北荆州建造的13层玉泉寺铁塔。又如江苏镇江甘露寺铁塔等等。这些至今保存完好的建筑物表明了我国古代建筑和冶金技术方面的高度水平。

但我国长期受封建制度的束缚,生产力停滞不前,钢结构的发展比较缓慢。

18世纪欧洲工业革命以后,由于钢铁冶炼技术的发展,欧美各国在钢结构的应用范围上和数量上都得到很大的发展。而我国在1840年鸦片战争以后,受到帝国主义、封建主义和官僚资本主义的压迫和剥削,虽然也相继出现了一些钢结构,但它是帝国主义掠夺我国资源的产物。既使在这样的情况下,我国的工程技术人员和工人也做了很多贡献,如1937年建成的杭州钱塘江大桥等。

解放后,在中国共产党领导下,钢结构和其它科学技术、工程建设一样有了空前的发展。钢结构的设计、制造和安装有了很大的提高。大量的钢结构工程中,有些在规模上和技术上已达到或超过世界先进水平。在桥梁方面如武汉和南京的长江大桥。在工业建筑中如冶金厂、机械制造厂、造船厂的规模巨大的钢结构厂房。在公用和民用建筑中,如首都体育馆、上海体育馆采用的大跨度空间网架结构。北京工人体育馆、浙江体育馆、成都体育馆采用的辐射式和交叉索网的悬索结构。在塔桅结构中,如高度为210m的上海电视塔、325m的北京环境气象桅杆。在板结构中如贮气柜、油罐。予应力钢结构、薄壁钢结构、钢和混凝土的组合结构以及高强螺栓连接等都得到了不同程度的应用和发展。上述方面的钢结构工程,标志着我国钢结构的科学研究、设计、制造和安装达到了高超的水平。

世界上不少国家由于钢材生产的迅速发展,钢结构也在不断地增多。如美国、日本在80年代建造的工业建筑,采用钢结构的占70%左右。苏联过去对采用钢结构限制较严,70年代后也逐渐放宽,近年来每年用于工业建筑的钢结构达七、八百万吨。钢产量高的国家,钢结构能有这样大的发展,一方面由于钢结构具有轻质高强、性能好、施工方便迅速;另一方面由于工业生产技术更新周期缩短,要求厂房的跨度、柱距较大,易于扩建、拆建。从而促进了钢结构的大量应用。

随着我国经济建设的迅速发展,我国的钢产量也在迅速的增长。因此钢结构在我国的应用已日渐广泛,它将在我国四化建设中发挥应有的作用,并将在应用过程中进入新的更高的发展阶段。

第二节 钢结构的特点和应用范围

一、钢结构的特点

1. 钢材强度高、塑性和韧性好

钢与混凝土、木材相比,虽然容重较大,但其强度要高得多,其容重与强度的比值相对较低。在荷载相同的条件下,钢结构与钢筋混凝土结构、木结构相比,构件截面尺寸较小,重量较轻,便于运输和安装。因此特别适用于跨度大、荷载大、安装高度高的结构。

钢材的塑性好,可使钢结构在一般情况下不会因偶然超载或局部超载而突然断裂破坏。钢材的韧性好,使钢结构对动力荷载的适应性较强。这些性能为钢结构的安全可靠性提供了充分的保证。

2. 材质均匀和力学计算的假定比较符合

钢材内部组织比较接近于匀质和各向同性体。在使用应力阶段,钢材属于理想弹性工作,弹性模量较高,变形很小。这些性能和力学计算的假定比较符合。钢材在冶炼、轧制过程中质量可严格控制,材质波动幅度小。

3. 钢结构制造工业化程度高,施工周期短

钢结构由各种型材组成,又在专业化工厂制造,产品精确度高,便于工地安装,缩短了施工周期,为提早收益创造了条件。

4. 钢材耐腐蚀性差

钢材在温度高、有侵蚀性介质的环境中,易于锈蚀,影响结构使用寿命。因而钢结构需经常维护,维护费用比其它结构贵很多。

5. 钢材耐热不耐火

钢材长期经受辐射热达 150°C 以上时,就需用隔热层加以保护,因此重要的钢结构必须采取防火措施。

二、钢结构的应用范围

钢结构的合理应用范围不仅取决于钢结构的特点,也受到国民经济发展情况的制约。为了早日现实四化建设,一方面要根据钢结构的特点,充分利用它为四化建设服务,另一方也要注意节约钢材。凡是能采用其它建筑材料合理进行建设的工程,就不要用钢结构。对建筑高度或跨度较大的结构,荷载或吊车起重量很大的结构,有较大振动的结构,高温车间的结构,密封要求很高的结构,需要经常移动或拆装的结构,目前采用其它建筑材料尚有困难或不很经济,可考虑采用钢结构,属于这类性质的结构大致有:

1. 厂房结构 在跨度和柱距都比较大,或设有重级工作制吊车或大吨位吊车,或具有多层(2~3层)吊车的厂房或设有较大锻锤的厂房,或产生动力作用的其它设备厂房以及某些高温车间,可采用钢吊车梁、钢屋架及钢柱等部分钢构件或全部采用钢结构。

2. 大跨结构 结构跨度越大,自重在全荷载中所占比重也就越大,减轻自重可以获

得明显的经济效果。钢材轻质高强,可跨越较大的跨度。因此,大跨结构应采用钢结构,如飞机库、汽车库、火车站、大会堂、体育馆、展览馆、影剧院等。其结构体系有框架结构、拱结构、网架结构、悬索结构及预应力钢结构等。

3. 高层结构 三、四十层高以上的高层建筑采用钢结构将比钢筋混凝土结构更能承受风力和地震力,而且钢结构的楼层结构厚度比钢筋混凝土结构的一般少8cm,层数多时就可观了,同时地基基础的成本会比钢筋混凝土结构便宜。

4. 塔桅结构 高耸的塔架、桅杆主要承受风荷载,采用钢结构除了自重轻、便于组装外,还因构件截面小,减少了风荷载,从而能取得更大的经济效果。

5. 板壳结构 冶金、石油、化工企业中大量采用钢板做成的容器结构,如油罐、煤气罐、高炉、热风炉等。

6. 可拆装的结构 活动房屋宜采用钢结构,其重量轻,便于搬迁;采用螺栓连接,以便装配、拆卸。

7. 轻型钢结构 荷载较小的小跨结构,其自重较轻,常采用轻型钢结构。

8. 其它构筑物 运输通廊、栈桥、各种管道支架以及高炉和锅炉构架等通常都采用钢结构。

第三节 钢结构的发展

随着四化建设的进展,钢结构的应用也会有很大发展。为了适应这一形势,钢结构的科学技术水平应迅速提高。当前需要做好以下工作。

一、高强度钢材的应用

利用高强度钢材对跨度大、荷载重的结构极为有利。结构用的高强度钢材一般是低合金钢,以保证必要的塑性和韧性。目前我国采用屈服点为 345N/mm^2 的16锰钢已较普遍。屈服点 390N/mm^2 的15锰钒钢和屈服点 440N/mm^2 的15锰钒氮钢也在开始采用。今后随着冶金工业的发展,将提供强度更高的钢材。如何应用这些新的高强度钢材将是重要的课题。

二、构件和结构计算的研究

现行钢结构设计规范是以概率理论为基础的极限状态设计法,但在分析过程中进行了简化,所以只能算是一种近似概率法,那么全概率设计法则有待今后继续深入研究和完善。

在计算技术和测试技术发展的情况下,可对钢材塑性充分利用、动力荷载作用下结构的反应、残余应力对结构的强度和稳定影响、板件屈曲后的承载能力、高强钢材应用的极限状态等问题进行研究。

三、结构的革新

减少结构的用钢量和应用新材料是促进结构革新的重要因素,如薄壁型钢结构、悬索结构、网架结构、预应力钢结构、钢和混凝土的组合构件、把压型钢板作为梁的腹板使围护结构与承重结构共同受力等等,都有待进一步研究和推广。

四、优化原理的应用

由于电子计算机的普及,促使结构优化设计得到相应的发展。结构的优化设计包括确定最优的结构方案、形式和确定最优的截面尺寸,以达到重量最轻或造价最低。

第一章 钢结构的材料

提 要

根据钢结构对材料的要求，在钢结构中采用3号钢、16锰钢和15锰钒钢。选用不是规范推荐的钢材时，需要有可靠依据。

在钢材的力学性能中，根据钢材在结构中的破坏情况提出了结构用钢材应具有力学性能，以及形成钢材性能的原因。

在使用钢材时，要特别注意促使钢材转脆因素的影响，如双向或三向应力状态、应力集中、时效和加工硬化、温度、焊接、重复荷载作用等因素的影响。最后又指出了如何在设计、制造、使用期间防止钢结构脆性破坏的措施。

钢材的选择既关系到结构的可靠度，又关系到合理使用国家物资，故必须根据使用条件和要求慎重的确定钢材的保证项目，以便选择合适的钢材。给出了构成钢结构的元件——热轧型钢、冷成型型钢和钢板的规格。

第一节 钢结构对材料的要求

国民经济各个部门所需要的钢材，由于各自的用途不同，因而所需要的钢材性能也各不相同。钢结构采用的钢材应具有的性能为：

1. 抗拉强度和屈服点较高：钢材的屈服点 f_y 高，可以减小杆件的截面尺寸，从而减轻结构自重，节约钢材，降低造价。钢材的抗拉强度 f_u 高，可以增加结构的安全保障。

2. 塑性和韧性好：钢材的塑性好，可使结构在破坏前具有比较明显的变形，从而减少脆性破坏的危险性，并且塑性变形还能调整局部高峰应力，使之趋于平缓。韧性好表示结构在动力荷载作用下破坏时要吸收比较多的能量，从而降低脆性破坏的危险程度。

3. 良好的加工性能：钢材应具有便于冷加工、热加工和良好的可焊性性能，不因这些加工而对强度、塑性和韧性带来较大的有害影响。

此外，根据钢结构的具体工作条件，钢材在必要时还应具有适应低温、有害介质侵蚀、重复荷载引起的疲劳断裂等性能。

多年实践经验证明，3号钢、16锰钢符合上述要求。结合我国资源特点，规范还推荐采用15锰钒钢。选用不是规范所推荐的钢材时，需有可靠依据，以确保钢结构的质量。

第二节 钢材的力学性能

一、塑性破坏与脆性破坏

钢结构需要用具有较大塑性变形的钢材，规范推荐的几种钢材都是塑性好、含碳量低的

钢材。不能用没有明显变形而突然断裂的钢材，它们在结构中曾造成过严重后果。

塑性变形较大是指由于材料原始性能以及在常温、静载（一次加荷）条件下能在破坏前产生较大塑性变形的钢材。然而一种钢材具有塑性变形能力的大小，不仅取决于钢材原始的化学成份和冶炼条件，也取决于结构所处的环境条件和工作条件。既使原来塑性能很好的钢材，当结构的环境条件和工作条件改变时，结构有可能呈现脆性破坏，如结构处于很低的温度和承受冲击荷载作用时，就可能会发生脆性破坏。

钢材强度超过屈服点 f_y ，就有明显的塑性变形产生，超过抗拉强度 f_u ，构件将在很大变形的情况下断裂，即塑性破坏。塑性破坏的断口呈纤维状，色泽发暗。塑性破坏前，有很明显的变形，并有较长的变形持续时间，以便于发现和补救。

结构在没有塑性变形或只有很小塑性变形就破坏的是钢材的脆性破坏。构件脆性破坏的断口平直，并因各晶粒往往在一个面断裂而呈光泽的晶粒状。由于结构变形极小而突然破坏，所以脆性破坏的危害性大。

设计钢结构除选用塑性好的钢材，还必须注意避免或减少导致材料转脆的条件。

二、钢材的拉伸性能

为了确定钢材的机械力学性能，应按GB228—63的规定把钢材加工成标准试件，在 $+20^{\circ}\text{C}$ 的条件下作一次拉伸试验，其应力—应变关系曲线如图1—1a所示。将图1—1a的低碳钢应力—应变曲线局部放大为图1—1b的形式，其工作可分为四个阶段：

1.弹性阶段：应力由零到比例极限 f_p ，钢材表现出弹性性能，应力和应变成直线关系 $\sigma/\epsilon = E = 20.6 \times 10^4 \text{ MPa}$ ， E 为弹性模量。

2.弹塑性阶段：由比例极限 f_p 到屈服点 f_y ，应力和应变呈曲线关系。弹性模量 E 由 $20.6 \times 10^4 \text{ MPa}$ 逐渐降到零。 f_p 与 f_y 之间简化为光滑曲线，这样便于应用。实际上由于加荷速度和试件形状等试验条件不同，屈服开始时总形成曲线的上下波动，波动的最高点称上屈服点，最低点称下屈服点。下屈服点的数值对试验条件不敏感，所以计算时以下屈服点作为材料抗力的标准。

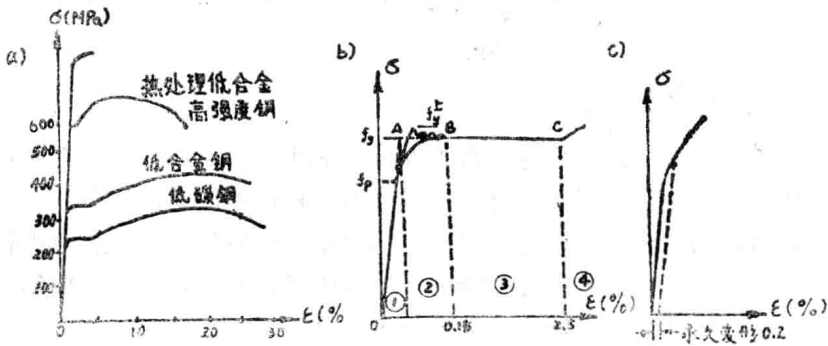


图 1—1 钢材应力—应变图

应力超过比例极限 f_p 以后，任一点的变形中都将包括有弹性变形和塑性变形两部分，其

中塑性变形在卸荷后不再恢复，故称为残余变形或永久变形。

3. 塑性阶段：应力保持为屈服点 f_y ，而应变不断增大，应变 ϵ 由开始屈服时约0.15%到屈服终止时约2.50%，这表示结构此时不能继续承受更大的荷载，故以屈服点 f_y 作为弹性计算时的强度标准。

屈服点 f_y 之前，钢材近于理想弹性体， f_y 之后，塑性应变范围很大而应力保持不增长，接近理想塑性体。因此，可以用两根直线（图1—1b的OA和AC）作为理想弹塑性体的应力—应变图。钢结构设计规范GBJ—86对塑性设计的规定，就以材料是理想弹塑性体的假设为依据。

有屈服平台并且屈服平台末端的应变较大，这就有足够的塑性变形来保证截面上的应力最终都达到 f_y 。因此，一般的强度计算不考虑应力集中和残余应力。拉杆中截面的应力按均匀分布计算，就是以此为基础的。

4. 应变硬化阶段：屈服平台之后，钢材内部组织重新建立了平衡，又恢复了抵抗外荷载的能力。应变增长比应力增长快，呈曲线关系直到最高点，这是应变硬化阶段（图1—1a）。最高点应力为抗拉强度 f_u 。当应力达到 f_u 时，试件出现局部横向收缩变形，即“颈缩”现象而断裂破坏。

由于有明显的屈服，故取屈服点 f_y 为计算构件的强度标准。当应力达到抗拉强度 f_u 时构件始断裂破坏，所以 f_u 是表示钢材强度储备的程度。钢结构的塑性设计是允许塑性变形发展

以发挥钢材效能的方法，这种强度储备就至为重要，这时规定钢材的强屈比 $\frac{f_u}{f_y} \geq 1.2$ 。

低碳钢和普通低合金钢有明显的屈服点和屈服平台（图1—1a），热处理低合金高强度钢，它有较好的塑性性质，但没有明显的屈服点和屈服平台。对于没有明显屈服点的钢材，规定永久变形（图1—1c）为0.2%时的应力作为名义屈服点，来进行强度计算。

三、塑性

钢材的塑性是指应力超过屈服点后，能产生显著的残余变形（即塑性变形）而不立即断裂的性质。衡量钢材塑性好坏的主要指标是伸长率 δ 。它是试件断裂前的变形与原标定长度的百分比。圆形试件的标定长度分有5倍和10倍试件直径，其相应的伸长率用 δ_5 和 δ_{10} 表示。

四、钢材的冷弯性能

冷弯试验是根据试件厚度，按规定的弯心直径将试件弯曲成180°，其表面和侧面无裂纹或分层则为“冷弯试验合格”。冷弯试验合格一方面表示材料塑性变形能力符合要求，另一方面表示材质冶金质量（颗粒结晶及非金属夹杂分布，甚至在一定程度上包括可焊性）符合要求。因此，冷弯试验是判别钢材塑性变形能力及冶金质量的综合指标。重要结构中需要有良好的冷热加工的工艺性能时，应有冷弯试验合格的保证。

五、钢材抵抗冲击的性能

钢材抵抗冲击的性能就是钢材的韧性。韧性是钢材断裂时吸收机械能力的量度，钢材吸

收较多能量才裂缝，表示韧性好。钢材在一次静力拉断时所吸收的能量，用单位体积吸收的能量表示，其值等于应力—应变曲线下的面积。塑性好的钢材，其应力—应变曲线下的面积大，所以韧性值大，但塑性并不是韧性。

实际工作中用冲击韧性来衡量钢材抗脆断的性能。因为实际结构中脆性断裂并不发生在单向受拉的地方，而总是发生在缺口高峰应力的地方，缺口高峰应力的地方常呈三向受拉的应力状态。因此最有代表性的是钢材缺口的冲击韧性。

冲击韧性的测量，可用不同方法进行。我国用梅氏方法。它规定用跨中带U型缺口的方截面试件（图1—2 a）进行冲击试验。冲击折断后，断口处单位面积上的功 a_k ，即冲击韧性值（单位为 J/cm^2 ）。

有的国家采用夏比试验法，试件带V型缺口（图1—2 b）。由于缺口比较尖锐，所以缺口根部的高峰应力及其附近的应力状态能更好地描绘实际结构的缺陷。夏比缺口韧性用 c 表示，其值为试件折断时所需的功（单位为 J ）。

缺口韧性值受温度影响，温度低于某值时将急剧降低。对于低温环境的重要结构，尤其受动力荷载作用的结构，不但要求保证常温（ $20^\circ \pm 5^\circ C$ ）冲击韧性，还要求保证负温（ $-20^\circ C$ 或 $-40^\circ C$ ）冲击韧性。

提高钢材强度的合金元素会使缺口韧性降低，所以普通低合金钢的冲击韧性比低碳钢稍低。如需改善这种状况，可用热处理的方法。

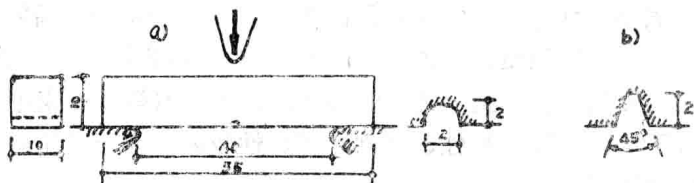


图1—2 冲击韧性试件

六、钢材性能的成因

形成上述钢材性能的因素有，化学成分，冶炼、浇注和轧制，热处理等。

1 化学成分

在普通碳素钢中，碳是除铁以外最主要的元素，它直接影响着钢材的强度、塑性、韧性和可焊性等。随着含碳量的增加，钢材的屈服点和抗拉强度提高，但塑性和韧性，特别是负温冲击韧性下降。同时，钢材的耐腐蚀性能、疲劳强度和冷弯性能也都明显下降，并将恶化钢材的可焊性和增加低温脆断的危险性。因此，钢结构用钢的含碳量不宜太高，一般不超过0.22%，在焊接结构中则应限制在0.20%以下。

在普通碳素钢中，硫和磷是极有害的成份。硫与铁化合为硫化铁（ FeS ），散布在纯铁体晶粒的层间中。含硫量增大会降低钢材的塑性、冲击韧性、疲劳强度和抗锈性等。在铆焊及热加工（温度为 $800^\circ C \sim 1200^\circ C$ ）时， FeS 将熔化而使钢材变脆（热脆）和发生裂缝。因此应严格控制钢材中的含硫量，一般应不超过0.055%，在焊接结构中则应不超过0.050%。

磷与纯铁体结成不稳定的固溶体，有增大纯铁体晶粒的害处。磷的存在虽可提高钢材的

强度和抗锈性，但严重降低钢材的塑性、冲击韧性、冷弯性能和可焊性等。特别是在低温时能使钢材变得很脆（冷脆）。所以磷的含量也应严格控制，一般不超过0.05%，在焊接结构中不超过0.045%。

氧和氮易于从钢液中逸出，故含量很少。这两种元素对钢材具有极严重的危害性，能使钢材变得极脆。氧的作用与硫类似，是引起热脆的因素之一。一般要求含氧量小于0.05%。氮能使钢材强化，和磷的作用相似，它的存在将显著降低钢材的塑性、韧性、可焊性和冷弯性能，增加时效倾向和冷脆性。因此，钢中含氮量一般应小于0.008%。

锰是一种弱脱氧剂，可提高钢材的强度，对塑性的影响不明显。同时还能消除硫引起钢材的热脆，并能改善钢的冷脆倾向。

硅是较强的脱氧剂，含量不超过0.2%时，可提高钢材的强度，对塑性、韧性、可焊性的不良影响不太明显。

为了改善钢材的力学性能，可掺入含量较少的铬、镍、铜、钒、钛、铌等合金元素，称为普通低合金钢。

2. 冶炼、浇注和轧制

冶炼和浇注的冶金过程形成钢的化学成分和含量，钢的金相组织及冶金缺陷。

建筑用钢由平炉或氧气顶吹转炉冶炼。

注锭过程中因脱氮程度不同，各炉种钢材都有镇静钢、半镇静钢和沸腾钢之分。如向盛钢液罐内投入强脱氧剂如硅等，保温时间得以加长，氧气杂质少且晶粒较细，偏析不严重，所以镇静钢的屈服点、抗拉强度、冲击韧性比沸腾钢高，冷脆性和时效敏感性较小，可焊性和抗锈性能较好，但成本较高。沸腾钢铸锭时冷却快，氧、氮等气体来不及全部逸出，致使钢的构造和晶粒粗细不匀。因而其塑性、韧性和可焊性较差，易于发生时效和变脆，轧成钢板和型钢常有夹渣和偏析现象。

冶金缺陷有偏析、非金属夹渣、气孔及裂纹等。偏析是金属结晶后化学成分分布不匀。非金属夹渣是钢中有硫化物、氧化物等杂质。气泡是浇注时钢中残存CO气体而形成。

钢材在轧制时使金属晶粒变细，也能使气泡、裂纹压合。薄板辊轧次数多其强度比厚板略高。非金属夹杂在轧制后造成钢材分层。

3. 热处理

钢材经过适当的热处理，如调质（淬火后高温回火）可以显著提高强度并有良好的塑性和韧性。如高强度螺栓用的调质45号钢和调质低合金钢（40硼钢、20锰钛硼钢等）。

第三节 促使钢材转脆的因素及防止措施

一、促使钢材转脆的因素

钢结构用的钢材一般塑性较好，但在一定条件下，结构用钢材的塑性变坏，而出现脆性断裂。促使钢材发生脆性断裂的因素很多，主要因素有钢材的应力状态、应力集中、加工硬化、温度、重复荷载作用、焊接等等。

1. 钢材在双向或三向应力作用下的性能

钢材在双向拉应力作用下屈服点和抗拉强度比单向受拉时提高，伸长率降低（图1—3a、

b)。异号双向应力作用时，屈服点和抗拉强度降低而伸长率增大（图1—3C）。

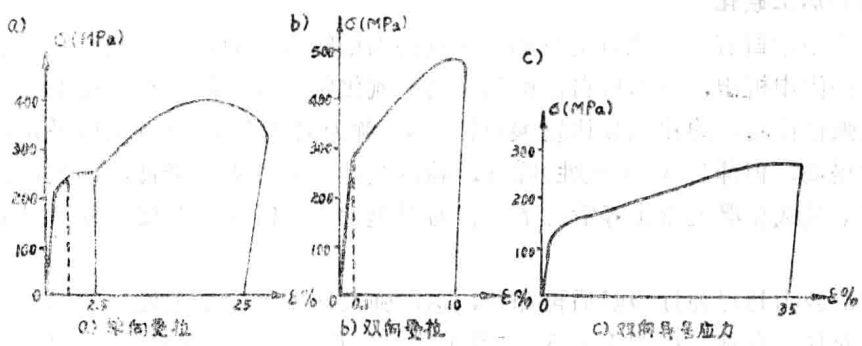


图1—3 钢材的应力状态

三向同号应力且各应力数值接近时，钢材不易屈服。当为数值相等的三向拉应力时，直到钢材断裂也不屈服，使钢材沿力的作用方向塑性变形的发展受到很大约束，钢材易于脆性破坏。

2. 应力集中

如果构件截面有急剧变化，例如存在孔洞、槽口、凹角、裂缝、厚度变形、形状变化、内部缺陷等，此时构件中的应力不再保持均匀分布，而是在某些区域产生局部高峰应力，在另外一些区域则应力降低，形成所谓应力集中现象（图 1—4）。更严重的是，靠近高峰应力的区域总是存在着同号双向或三向应力状态，因而促使钢材转变为脆性状态的可能。图 1—4a、b为薄板和厚板在同样拉应力作用下的双向和三向应力状态的分布。板的某一点在 X 方向伸长的同时，在y方向（横向）将要收缩，而 σ_x 的分布很不均匀，最大应力附近的 横 向 收 缩 将 受 到 阻 碍，从而引起 σ_y （图 1 - 4 a），当板厚较大时还将引起 σ_z （图 1—4 b）。

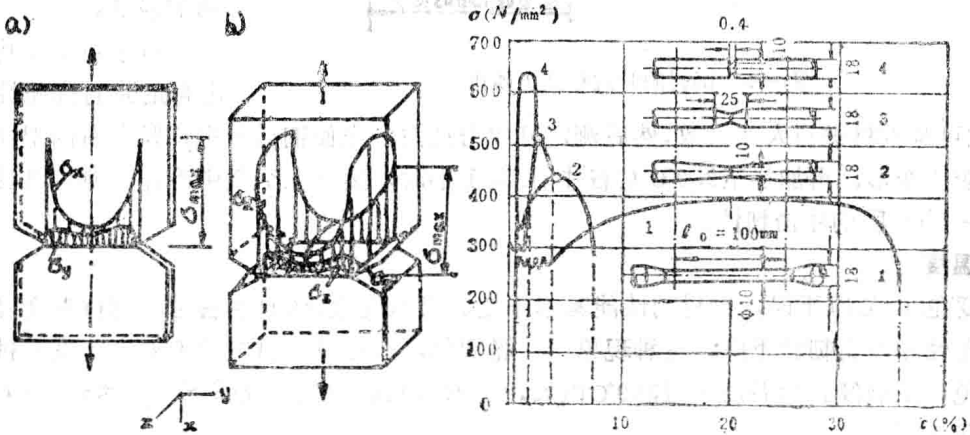


图1—4 钢材的应力集中

应力集中现象严重与否，决定于构件形状改变的程度，构件形状改变愈是急剧，高峰应力就愈大，钢材变脆程度也愈厉害。截面突然改变且槽口又尖锐的试件，其破坏形式呈脆性

现象（图 1—4 C 的试件 4）。

3. 时效和加工硬化

在纯铁体中常留有一定数量极少的碳和氮的固溶物质。随着时间的增长，这些固溶物质逐渐从纯铁体中析出，并形成自由的碳化物和氮化物微粒，散布在晶粒的滑移面上，起着阻碍滑移的强化作用，约束纯铁体发展塑性变形，称为时效现象。时效的后果是钢材的屈服点和抗拉强度提高，但伸长率（即塑性）降低，特别是冲击韧性大大降低，而使钢材变脆。在振动荷载、重复荷载和温度变化等情况下，容易引起时效。时效的发展过程可以从几天到几十年。

当钢材的应力超过弹性极限后再卸荷，这时弹性应变消除而塑性应变保留。经过一定时间后，再重新加上荷载，由图 1—5 a 可看出第二次荷载作用下钢材的比例极限将会接近第一次卸荷时的应力。在重复荷载作用下，钢材比例极限有所提高的现象称为硬化。钢结构制造时在常温加工过程中引起的钢材硬化现象，称为冷作硬化。

钢结构常温下进行剪、冲、辊、压、折、钻、刨、铲、撑、敲等等冷加工，使钢材产生冷作硬化现象。提高了屈服点，同时降低塑性和韧性。因此，普通钢结构中不利用硬化现象所提高的强度。

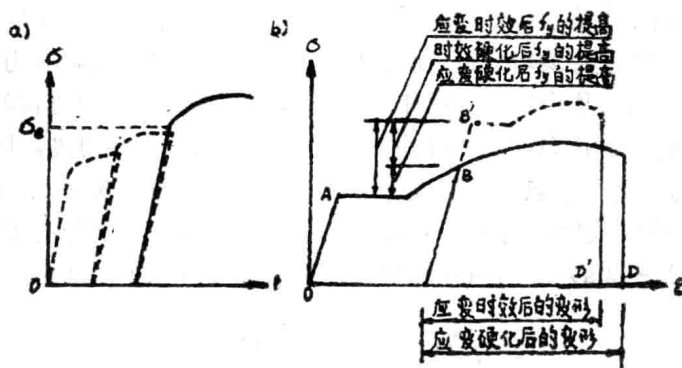


图1—5 钢材的时效和加工硬化

冷弯薄壁型钢结构的冷弯型钢，是冷成形操作，杆件截面上各点屈服点和抗拉强度几乎都有不同程度的提高，其性能与原钢板已基本不同。因此，薄壁型钢结构设计中允许局部地利用因冷加工而提高的强度。

对于重要结构钢材应具有足够的抗脆性破坏能力，为此可对钢材进行人工时效，然后测定其冲击韧性。先使钢材产生10%左右的塑性变形，即发生应变变形，再加热至250℃左右并保温1小时，然后在空气中冷却，测定其应变时效（图 1—5b）后的冲击韧性。

4. 温度

温度在200℃以下时，钢材的性能基本不变。当温度达250℃左右时，钢材强度有所提高，但塑性和冲击韧性下降，这种现象叫兰脆现象。应避免钢材在兰脆温度范围内进行热加工，以免产生裂纹。当温度超过300℃以后，屈服点和抗拉强度显著下降，达到600℃时则强度几乎等于零。

当钢材的温度从常温下降时，钢材的强度增长，塑性和韧性下降，因而钢材转脆。特别是当温度下降到某一数值时，钢材的冲击韧性突然下降（图 1—6），试件发生脆性破坏。这种现象称为低温冷脆现象。钢材由韧性状态向脆性状态转变的温度区段或冷脆临界温度值，随钢号和受力情况通过试验确定。

5. 焊接

前面谈了钢材中的化学成分经过焊接后对钢材的影响。现在再来看对钢材焊接后的后果：

1) 焊缝金属具有铸造组织，不同于轧制钢材。焊缝金属含碳量比轧制钢材稍低，而氮、氧、氢含量稍高。熔焊的金属冷却很快，氧不易逸出，气泡和夹杂较多。如冷却过程得到延缓，可以降低氧的含量。如采用短弧焊、埋弧焊和气体保护焊，使熔焊金属与空气更好地隔离，可以不同程度地降低氮和氧的含量。焊缝金属含氢量高，是由于大气和焊条药皮的有机物成分吸收的水分。当冷却快时，氢能使焊缝金属内部出现微观裂纹。因此，焊条必须烘干后才能使用，重要的结构还要求用低氢型焊条（T426、T427、T503、T507），以避免出现裂纹。

2) 焊弧的高温，使邻近焊缝的钢材发生组织变化。焊弧的热量使钢材有一小部分熔化，邻近熔化区的钢材叫热影响区。热影响区宽度并不大，一般手工焊约为6 mm，自动焊时只有2.5~3 mm。但热影响区却因温度不同而分为过热区、正火区和部分重结晶区（图1—7）。过热区的晶粒粗大，强度和硬度提高，塑性和韧性降低，有时还会出现韧性很低的针状组织。正火区的强度、塑性、韧性都较高。部分重结晶区内晶粒粗细不均，力学性能不太好。

3) 焊缝及其附近钢材的局部性高温使钢材发生塑性变形，冷却后存在残余应力。

焊接结构出现脆性破坏事故比铆接结构多，是由于：焊缝经常会或多或少存在一些缺陷，如裂纹、欠焊、夹渣和气孔等，这些缺陷能成为断裂的起源；焊接后结构内部存在残余应力。残余应力未必是破坏主因，但和其它因素结合在一起，可能导致开裂；焊接结构的连接往往有较大刚性。当出现三条相互垂直的焊缝时，钢材的塑性变形很难发展；焊接结构形成连续的整体，一旦裂缝开展，就有可能一断到底。

6. 重复荷载

钢材在连续重复荷载作用下，即使应力还低于抗拉强度，甚至还低于屈服点，也会发生破坏，这种现象称为钢材的疲劳破坏。钢材在疲劳破坏之前，并不出现明显的变形和局部收缩，它和脆性破坏一样，是一种突然发生的断裂。钢材的疲劳破坏是经过一个长期的发展过程才出现的。在重复荷载作用下，钢材内部某些个别晶粒出现塑性变形，并硬化而逐渐形成一些微观裂痕，以后裂痕的数量增多并互相连接，逐渐形成钢材内部的裂缝。这时截面削弱，应力集中现象急速加剧，终于抵抗不住高峰应力而断裂。

由此可见，钢材的疲劳破坏首先是钢材内部构造不均匀和应力分布不均匀所引起的。而所有应力集中的情况，将加速疲劳破坏。

上述的前五个情况促使钢材发生脆性断裂，后一个情况促使钢材发生疲劳破坏。脆性断裂和疲劳破坏都表现为开裂，它们裂源点都是在“缺口”处。缺口可以由机械加工形成的内部孔洞，边缘缺口，截面宽度或厚度的突然改变；也可以是由焊接所形成的缺陷（未焊透、

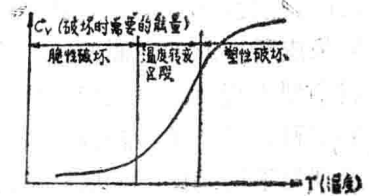


图1—6 温度变化对钢材的影响

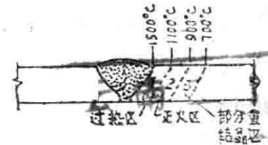


图1—7 焊缝区的钢材组织变化

咬肉、裂纹、夹渣、气孔)；又可以是冶金工艺所形成的缺陷(夹层、夹杂、折叠、轧痕、氧化皮所形成的表面凹陷)等等。有缺口就会有应力集中，就会在结构受力时使该处从没有裂纹到出现裂纹，最后扩展成裂缝。脆性断裂和疲劳破坏的不同点，在于疲劳破坏的裂纹扩展过程是稳定的，需要在构件上重复加力很多次之后，裂纹才大为扩展；而脆性断裂的裂纹扩展则是不稳定的，扩展极其迅速，只是一次加力，就会造成灾难。以构件断裂的断口进行比较，在疲劳破坏的断口内，环绕裂源点总有一较为光滑的扇形区域，其外则晶粒结构较粗，再外面就是因所余净面积不多，而被静力拉断的灰暗色的纤维区域。扇形区域所以光滑，是因裂纹很小时，构件在每次加力循环中都要张开和闭合，使裂纹两边发生撞击和摩擦，以致成为光滑面。以后由于裂纹加深，扩展速度加大，那里的断口就来不及变成光滑的。在脆性断裂的断口内，只在构件边缘有一点灰暗色的塑性变形，断口的大部分则呈现闪光的晶粒状。

二、防止脆性断裂的措施

根据上述分析，影响钢结构脆性断裂的直接因素，概括起来有三：裂纹尺寸、应力状态和钢材的韧性。那么在设计、制造和使用期间就要力求避免裂纹出现、应力状态的恶化和钢材转脆倾向的发生。

1. 设计

在低温、动荷载的条件下，要注意选择合适的钢材，满足负温冲击韧性值的要求。目的是使结构所处温度高于钢材冷脆临界温度值。尽量选用较薄钢板少用较厚钢板。因较厚钢板存在的冶金缺陷(如偏析、非金属夹渣、裂纹、分层)的可能性较大，厚钢板轧制次数少，晶粒较薄钢板粗糙。注意保持构件截面的完整性和连续性。避免截面尺寸突然改变或形成凹角，焊缝形式和尺寸符合要求，以求减小应力集中，避免高峰应力处出现三向应力。

2. 制造

遵守设计对制造所提出的技术要求。避免使钢材出现应变硬化，因冲孔、剪边而造成的局部硬化区，要用扩钻和饱边来除掉。要正确地选择焊接工艺，与设计相配合以减小焊接残余应力。保证焊接质量并严格执行焊接质量检查制度，不得在构件上任意起弧和锤击，以避免结构表面的损伤。

制造时应防止造成缺口或裂纹(包括焊缝内部的气孔、夹渣、裂纹)。如图1—8a当两钢板未留缝隙，焊缝因收缩受到约束而产生拉应力，有可能使它开裂。如在两钢板间垫上软钢丝，焊缝收缩时不受约束(1—8b)，裂纹出现的机会就减少。又如把角焊缝的表面做成凹形，有利于缓和应力集中，但凹形缝的表面有较大的收缩拉应力，而容易开裂(图1—8c)，而凸形缝表面的收缩拉应力较小，并且焊缝45°截面的焊缝计算厚度又大，在减小开裂的条件下，凸形缝就较好。焊缝的收缩还可能引起钢板的层间撕裂，当将图1—8e、g两块钢板角形连接改为图1—8f、h的做法，就会改善钢板层间撕裂的状况。

3. 使用期间

钢结构在使用期间，不要在主要构件上加焊零件，不得任意悬挂重物，以免造成构件表面损伤和结构超载。对承受动荷载的吊车梁，不得对其上运行的吊车任意加速，并按规定对轨道进行维修，以降低冲击作用。原设计在室温工作的结构，在冬季停产检修时注意保温。