

886465

高等学校试用教材

钢 结 构

(第 二 版)

宣国梅 谢瑞健 编



54.2

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

561
— —
3064·2

511
3064

高等学校试用教材

钢 结 构

(建筑机械类专业用)

(第二版)

宣国梅 谢瑞健 编

中国建筑工业出版社

30

18

2.50

2.55

2.60

2.80

2.90

3.10

3.08

3.20

3.22

3.40

3.30

3.50

3.54

3.74

3.62

3.72

3.64

3.78

3.80

3.72

3.65

4.02

3.95

3.85

4.32

4.2

4.20

4.10

4.3

4.3

2.55

2.90

3.75

3.85

3.95

本教材主要叙述建筑机械钢结构基本构件的设计和计算理论。内容包括钢结构的材料和计算方法、钢结构的连接、受弯构件、轴心受力构件、拉弯和压弯构件。为了便于学习和掌握课程内容,还编入一定数量的例题和习题。

本教材适用于高等院校建筑机械类专业,也可作为其它专业的教学参考书;同时也可供有关生产、科研单位的技术人员参考。

高等学校试用教材
钢 结 构
(建筑机械类专业用)
(第二版)

宣国梅 谢瑞健 编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13^{3/4} 字数: 335 千字

1989年7月第二版 1989年7月第三次印刷

印数: 52,801—60,670 册 定价: 2.80元

ISBN7-112-00605-8/TU·432

(5761)

第 二 版 前 言

建筑机械类专业《钢结构》教材第一版，主要是按房屋建筑方面的钢结构设计规范（TJ17-74），并参考起重机设计手册和国外起重机钢结构设计规范，采用了容许应力的设计方法编写的。这次修订，主要是按新的钢结构设计规范和起重机设计规范（GB3811-83）进行编写的。

本教材正文是按钢结构设计规范采用了以概率理论为基础的一次二阶矩极限状态的设计方法，将起重机设计规范（GB3811—83）中按容许应力设计方法及其有关的公式、表格等列入各章附注中，故本教材中包括两种不同的设计方法，供读者学习、参考和选用。

本教材主要叙述建筑机械钢结构基本构件的设计和计算理论，学生有了这方面的基础并学了专业机械的知识后，就能够比较顺利地进行专业机械的钢结构设计。

本教材共有六章，包括：绪论、钢结构的材料和计算方法、钢结构的连接、受弯构件、轴心受力构件、拉弯和压弯构件。为了便于学习和掌握课程内容，还编入一定数量的例题和习题。

本教材第一、二、三、四章由同济大学宣国梅负责修订，第五、六章由西安冶金建筑学院谢瑞健负责修订，全书由宣国梅主编并由哈尔滨建筑工程学院陈雨波、顾迪民负责审查定稿。最后由同济大学宣国梅、虞澄心，西安冶金建筑学院谢瑞健及建工出版社黎钟、戚大庆根据最新资料修改完成。

编 者

1985.8.

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 钢结构的发展概况	1
§ 1-2 钢结构在建筑机械中的应用及设计的基本要求	3
§ 1-3 建筑机械钢结构的发展方向	3
第二章 钢结构的材料和计算原理	5
§ 2-1 钢结构对材料性能的要求	5
§ 2-2 钢结构材料的主要受力性能	5
§ 2-3 钢材的脆性破坏	9
§ 2-4 钢结构材料的标号及其选择	11
§ 2-5 作用在建筑机械结构上的载荷及其组合	15
§ 2-6 钢结构设计的计算方法	16
第三章 钢结构的连接	24
§ 3-1 钢结构的连接类型	24
§ 3-2 焊缝连接	24
§ 3-3 螺栓连接和铆钉连接	46
第四章 受弯构件	66
§ 4-1 受弯构件的截面型式	66
§ 4-2 受弯构件的强度	67
§ 4-3 梁的整体稳定性	70
§ 4-4 受弯构件的截面选择和验算	74
§ 4-5 焊接梁的局部稳定性	79
§ 4-6 梁的构造设计	90
第五章 轴心受力构件	106
§ 5-1 轴心受力构件的截面型式	106
§ 5-2 轴心受拉构件的截面设计	108
§ 5-3 实腹式轴心受压构件的计算和构造	109
§ 5-4 格构式轴心受压构件的计算和构造	120
§ 5-5 构件计算长度的计算	132
§ 5-6 支脚的构造和计算	138
第六章 拉弯和压弯构件	112
§ 6-1 拉弯和压弯构件的截面型式	142
§ 6-2 拉弯和压弯构件的强度计算	142
§ 6-3 实腹式压弯构件的稳定计算	144
§ 6-4 格构式压弯构件的稳定计算	155
§ 6-5 格构式压弯吊臂(小车式)的设计计算	163

§ 6-6 起重吊臂的节点构造.....	180
附录一 疲劳计算的构件和连接分 类.....	186
附录二 梁的整体稳定系数.....	188
附录三 轴心受压构件的稳定系 数.....	192
附录四 常用钢材及型钢截面特性 表.....	197

第一章 绪 论

本章主要叙述钢结构的发展概况、钢结构在建筑机械中的应用、设计钢结构的基本要求以及建筑机械钢结构的发展方向和重点。学习时应从钢结构的发展和应用中了解钢结构在建筑机械中的重要地位，从而明确学习的目的，弄清合理进行钢结构设计和科研工作的重要意义。

§ 1-1 钢结构的发展概况

钢结构的用途很广，除用于各种建筑机械外，还广泛用于厂房、大跨度房屋建筑、高层建筑、桥梁、贮液（气）库、电视塔、输电塔、水工建筑中的闸门、大型管道以及船舶结构等。

在建筑机械中，支承载荷而起骨架作用的部分叫做结构部分。如塔式起重机的臂架和塔身、汽车起重机的吊臂和车架、挖掘机的动臂和斗杆等。目前，建筑机械结构部分主要是用钢材来制造的，故亦称钢结构。

钢结构的发展是与生产发展的要求和国民经济各部门的发展（特别是冶金工业、机械制造工业和交通运输业的发展）密切相关的。

我国是应用起重机械最早的国家之一。我国古代劳动人民就已采用了杠杆起重设备及手摇辘轳来取水。这些简单起重设备的骨架是用木材制作的，只有接头处用铸铁件制作。到了十九世纪后期，由于钢铁工业的发展和机器制造业的进一步完善，钢结构才广泛地应用于工业各部门。1880年德国制成了第一台电动的钢制桥式起重机。以后，欧美资本主义国家先后都生产了用金属材料制成的桥式起重机和其他类型的起重机，其中包括铝合金结构的起重机。而我国由于长期的封建统治，致使技术经济落后，工业生产发展缓慢。1907年我国建造了第一个钢铁厂（汉阳钢铁厂）；1915年建成了第一个金属结构制造厂（山海关桥梁厂）。我国工人和技术人员也曾奋发图强，自己设计和建造了一些钢结构工程。例如：1927年建成的皇姑屯电机厂钢结构厂房；1931年建成的广州中山纪念堂圆屋顶；1934年建成的柳江钢轨桥；1937年建成的钱塘江桥，以及建造在西南地区的一些悬索桥等。但在解放前，钢结构的数量毕竟很少，在建筑机械方面则主要依靠外国进口。

解放后，我国工业以前所未有的速度发展。尤其是冶金工业的发展，钢的产量和质量大大提高，许多新钢种（其中包括高强度合金钢）试制成功，使钢结构的高速度发展成为可能。我国完成了大量的钢结构工程，其中有不少在规模上是很大的，在技术上亦是很先进的。例如：跨度94米的北京工人体育馆悬索结构；南京和武汉的长江大桥；上海和广州等地的电视塔；160t-m和120t-m（1600kN-m和1200kN-m）100t（1000kN）的自升式塔式起重机；桁架臂式汽车起重机；各种箱形臂式汽车起重机（图1-1）以及液压挖掘机（图1-2）等等。

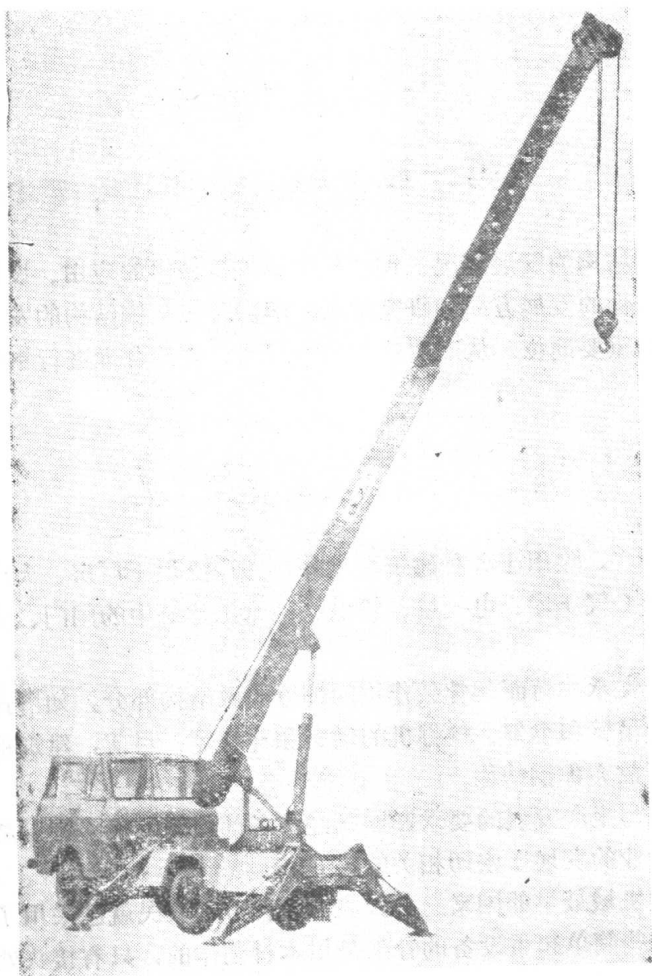


图 1-1 Q2-3汽车起重机

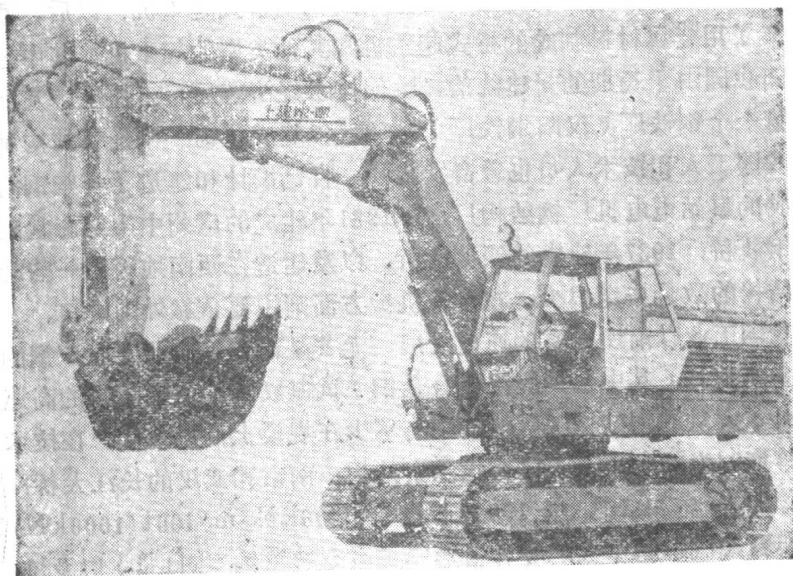


图 1-2 液压挖掘机

但我国建筑机械的数量和质量，都还远远不能满足社会主义建设发展的需要，建筑机械的设计和水平，也急待迅速提高。

§ 1-2 钢结构在建筑机械中的应用及设计的基本要求

目前，建筑机械结构主要是钢结构，原因是钢材具有下列优点：

- 一、强度较高，所以构件的截面较小，自重较轻，便于运输和装拆；
- 二、力学性能接近于匀质、各向同性，是理想的弹塑性材料，有较大的弹性模量；用一般工程力学方法计算，可以接近结构的实际工作情况，较安全可靠；
- 三、韧性较好，较适应在冲击载荷和动力载荷下工作；
- 四、制造的机械化程度较高，又较精确，建造迅速、质量容易保证；
- 五、比铝合金等冶炼方便，成本较低。

由于钢材容易锈蚀，尤其在潮湿和高温的条件下，要注意对结构经常维护。另外，钢材虽能在较高温度条件下工作（因温度在 200°C 以内钢的性质变化很小），但钢的耐火性并不好（当温度达到 300°C 以上时，强度将迅速下降）。

钢结构是建筑机械中的重要组成部分。在重量上，目前钢结构的自重占建筑机械总重的 $50\sim 70\%$ 。所以，合理地设计钢结构是降低用量、减轻机械自重、改善机械工作性能的重要途径。

在一般情况下，建筑机械的工作很繁重，工作环境又差，载荷情况也复杂。为了保证机械的正常工作，建筑机械钢结构设计应满足以下几点基本要求：

- 一、安全可靠。钢结构必须有足够的强度、刚度和稳定性；
- 二、符合使用上的要求并有良好的耐久性；
- 三、自重轻；
- 四、制造方便，成本低，装拆迅速，运输和维修简便；
- 五、造型美观。

总之，建筑机械钢结构设计，首先应当保证安全耐用和满足使用要求，同时要有先进的技术经济指标。设计者必须全面地、综合地、辩证地考虑到以上各项基本要求，以作出符合高速度发展社会主义经济的先进合理的设计。

本教材主要叙述钢结构的基本设计理论和基本构件的设计计算方法，作为今后进行建筑机械钢结构设计的基础。

§ 1-3 建筑机械钢结构的发展方向

建筑机械钢结构的发展方向主要有以下几个方面：

- 一、设计和计算理论的研究和改进。建国以来在建筑机械钢结构的设计和计算方面已经做了不少研究工作，从根据国外机械和国内已有机械用估算的方法进行设计（所谓“类比法”进行设计）发展到目前能够比较精确地进行设计和计算。我国曾参考国外起重机钢结构设计规范和借用房屋建筑方面的《钢结构设计规范》（TJ17—74）以及《薄壁型钢结构技术规范》（TJ18—75）进行过建筑机械钢结构的设计和计算，但由于建筑机械主要在

室外工作，工作条件比较恶劣，承受的主要是动力载荷及连续反复载荷，这些和房屋建筑的结构有很大差别。同时，在钢材性能、制造工艺和工作条件等方面，我国和国外也有所不同。因此在总结经验的基础上，于1983年制订了我国的《起重机设计规范》(GB3811—83)。在房屋建筑方面，我国亦根据多年来的工程实践和科研成果，将原有的《钢结构设计规范》(TJ17—74)进行了修订，于1988年制订了新的、较先进的《钢结构设计规范》(GBJ17—88)，仍然可以借鉴。但用在建筑机械钢结构设计中，尚缺乏一些必要的数据、参数、系数和公式。因此研究和改进目前的建筑机械钢结构的设计和计算理论，是一项很迫切的任务。应当使计算结果更符合建筑机械钢结构的实际工作情况，使建筑机械钢结构做到最优化的设计，使设计水平有进一步的提高。

二、结构形式的改进和创新。改进和创造新的结构形式，不仅能节省大量材料，降低造价，而且还能进一步改善建筑机械的工作性能，延长使用寿命。例如：把厚壁结构改成薄壁结构；把热轧型钢（普通工字钢、角钢等）结构改成弯曲型钢或钢管结构；把平面结构改成空间结构等，在实践中都能收到良好的效果。所以，在建筑机械钢结构设计中，如何结合具体机械创造新的结构形式，即合理选型问题，是一个十分关键的问题。

三、提高现有材料的机械性能、研究采用新材料。实践证明，用高强度低合金钢制造的结构比用普通碳素钢制造的结构自重轻而且坚固耐用。因此，进一步提高现有材料的机械性能，试制更加符合建筑机械要求的高强度低合金钢和其他优质钢材，是减轻结构自重的有效途径之一。此外，国外已有铝合金的起重机，自重要比钢结构的轻30~70%（硬铝的质量密度为 $27\sim 28\text{kN/m}^3$ ，约为钢的三分之一，而强度与钢接近）。日本和联邦德国曾研究设计用硬质工程塑料来制造小型起重机结构和一些零件，这不但减轻结构自重，而且可以节省大量金属材料，简化制造工艺，缩短加工工期。我国资源丰富，研究试制新材料有广阔前途，应当结合实际情况，研究采用新材料。

四、改进焊接工艺，提高焊接结构的质量；研究和采用新型的连接方式，如高强度螺栓连接和胶合连接等。

五、总结、创造和推广先进技术。如用有限元法并借用电子计算机来解决复杂的计算问题，以提高计算的精度和加快设计进度；用预应力方法提高钢结构的承载能力；采用标准化的冲压构件和装配式结构以及选择更先进的制造工艺等。

六、研究采用疲劳设计，提高建筑机械的寿命。由于建筑机械主要承受的是不断变化的动力载荷，因此应当调查研究各种建筑机械的载荷谱和应力谱，并运用比较先进的理论（如累积损伤理论等）进行疲劳设计，以期提高建筑机械的使用寿命。

七、研究采用结构的定型设计和系列设计，使结构设计有统一规划，以符合标准化、系列化和通用化的原则。这是简化设计和制造过程，缩短工期，降低产品成本，提高劳动生产率的十分有效的措施。

第二章 钢结构的材料和计算原理

本章主要叙述钢结构材料的主要受力性能、使钢材变脆的主要因素、如何正确选择钢材以及按极限状态计算钢结构的基本原理。在选择钢材方面,需要考虑的因素很多。学习的重点应是钢材的主要受力性能和钢材的脆性破坏,从而在选用钢材时,能全面地和合理地考虑结构的具体情况和特点,以利于正确处理结构和构件的设计问题。在计算原理方面,应了解结构计算的目的是为了保证建筑机械钢结构在使用载荷作用下能安全可靠地工作,为了掌握和改进结构的可靠性,结构的设计计算方法经历了几个阶段,目前应用的以概率为基础的极限状态设计计算方法是较为科学的方法。

§ 2-1 钢结构对材料性能的要求

钢结构所采用的材料应该要求:强度高,塑性、韧性和耐久性好,焊接性能优良(即可焊性好),易于加工制造,抗锈性好,成本低廉。强度高可以减轻结构的自重,降低成本,节约钢材。塑性和韧性好,一方面可以使结构在破坏前出现较大的变形,能够事先发觉,及时防止造成事故;另一方面更重要的是可以依靠材料的塑性变形,使内力在超过弹性极限之后能重行分布,提高结构承载能力或避免由于局部高峰应力而引起破坏,增加了结构的可靠性。韧性好还能够有效地抵抗冲击载荷以及动力载荷的作用。耐久性好能很好地抵抗载荷的反复作用,延长结构的使用寿命。韧性和耐久性对于承受反复振动载荷的建筑机械钢结构十分重要。焊接性能是指焊接后的结构是否会出现裂缝,并且在长期使用过程中能否保持应有强度、塑性、韧性以及耐久性等。

§ 2-2 钢结构材料的主要受力性能

一、钢材的受拉、受压以及受剪性能

钢材在单向均匀受拉时的应力应变关系可以用拉伸试验来确定。图2-1表示3号钢在单向均匀受拉时应力应变曲线。从图上可以看出:从0到 f_p ,应力与应变成正比,其图形呈线性关系。过了 f_p 以后,应力与应变的线性关系不再存在。因此 f_p 处的应力称为比例极限。在比例极限 f_p 以前,钢材出现的是弹性变形,也即卸荷后能消失的变形,因而钢材的工作是弹性的。比例极限以后,出现了少量卸荷后不能消失的塑性变形,即残余变形,此时钢材的工作是弹塑性的。当应力达到 f_s 以后,应力没有明显增加,却出现了相当大的应变,这种现象称为材料的屈服。 f_s 处的应力称为屈服点(亦称流限或屈服极限)。钢材达到屈服点 f_s 以后,出现一段纯塑性变形,称为流幅,亦即钢材的塑性工作阶段。此后,钢材强度又有些提高,出现所谓自强阶段(亦称强化阶段),然后发生破坏。破坏时的残余应变称为伸长率 δ ,它表示钢材的塑性性能。钢材伸长期间,杆件的横截面有所减少。这种现象在自强阶段之前对应力应变图影响不大,但在这以后对应力的计算值却有显著的影响。

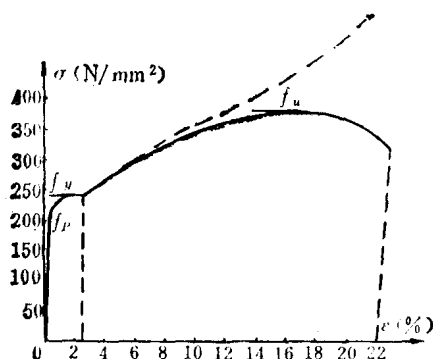


图 2-1 3号钢的应力应变曲线

响。因为此时杆件发生显著的颈缩(图 2-2)。如果用颈缩处狭窄部位的实际横截面计算应力,那么得出的是准确的应力应变曲线——一条始终上升的曲线,如图 2-1 中的虚线所示。但是在工程实际中应用的是根据原来横截面计算应力,所得的是常规的应力应变曲线,如图 2-1 中的实线所示。由图可见,在极限应力 f_u (称抗拉强度或极限强度) 之后,曲线下降,杆件所承受的总载荷减少。这种减少是由于横截面的缩小,而不是材料自身强度的降低。实际上,直到破坏之前,材料一直经得起应力的增加。

钢材在受力过程中所以会出现性质截然不同的各个阶段,是由于钢的组织构造不完全均匀的缘故。在常温下,普通碳素钢主要由占重量99%以上的铁素体结晶群以及填充在铁素体周围空隙中的珠光体网状间层和积点(由渗碳体 Fe_3C 与铁素体组成不定形混合物)所组成。另外还有少量的锰、硅、磷、硫及其他化合物溶解于铁素体和珠光体中(图 2-3a)。铁素体是一种具有体心立方晶格的结晶。理论与实践证明,使铁素体晶格延伸而发生拉断所需要的力,比使铁素体晶格剪移而发生滑动破坏所需要的力要大很多倍。钢的塑性变形主要是铁素体沿滑动面产生塑性剪移的表现(图 2-3c)。所以剪应力的大小对钢材的塑



图 2-2 杆件受拉时的颈缩

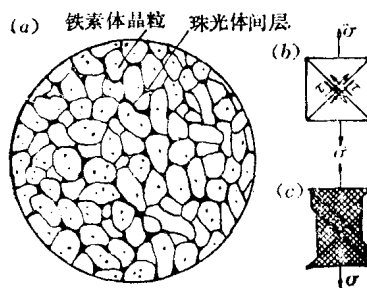


图 2-3 钢的组织构造

性变形起着重要作用。铁素体性质柔软而富有塑性及韧性,其弹性范围及强度实际上都远低于曲线中所表现的数值。受拉曲线中表现出较高的强度和弹性,是由于珠光体性质坚硬,强度高且富有弹性的缘故。当外力的作用达到足以使铁素体的晶粒产生滑移而发生塑性变形时,珠光体的间层就起着阻遏作用,限制了铁素体塑性变形的发展。当应力增加到一定数值,珠光体间层失去了约束铁素体滑移的能力,铁素体中先前被限制的塑性变形也就充分表现出来,在曲线上形成了流幅。经过了流幅阶段较大的变形之后,铁素体晶粒和珠光体间层的位置自行作了调整,又恢复了一些抵抗能力,形成了自强阶段。随着塑性变形的不断增加,钢材的横截面逐步减小,并在材料质量较差处出现局部的横向收缩,最后终于不能抵抗外力作用而被拉断。因此,含碳量愈大的钢材,珠光体的比例亦愈大,因而钢材的强度(屈服点和抗拉强度)就愈高,而塑性(伸长率)就相应下降。为了保证结构有较好的塑性,结构用钢材的含碳量一般不宜超过 0.22%。如果钢材的含碳量超过 0.3%,铁素体的塑性变形将始终受到比较强大的珠光体间层的遏制。反之,如果含碳量低于 0.1%,薄弱的珠光体将一开始就无力对铁素体的塑性变形起阻遏作用,因而不会出现流幅现象。对于没有流幅的钢材,常取相当于塑性变形为 0.2% 时的应力作为屈服点。

钢材在单向均匀受压下的工作性能几乎与受拉时完全一样。受剪时的情况也相似,只

不过屈服点和抗拉强度低一点而已。

从钢材的这些受力性能中，可以得出几点结论：

(一) 钢材达到屈服点后将产生很大的塑性变形，这不符合使用要求，在结构中是不允许的。因此，屈服点处的应力是计算钢结构强度时允许达到的最大应力。

(二) 钢材的比例极限与屈服点十分接近，屈服点以前的应变又很小 ($\varepsilon = 0.15\%$)，所以在计算钢结构强度时可以近似地将钢的比例极限提高到屈服点。同时，屈服点以后的流幅范围相当长 ($\varepsilon = 0.15 \sim 2.5\%$)。因此，可以认为钢材是一种符合理想的弹性—塑性材料，即在屈服点 f_y 以前是弹性的， f_y 以后是塑性的 (图 2-4)，这就为进一步发展钢结构的计算理论提供了基础。

(三) 钢材的自强阶段在计算中是不利用的，这就增加了结构的安全保障。且钢材达到强度破坏时的塑性变形要比弹性变形大得多 (约 200 倍)。因此，钢结构在发生塑性破坏前就会由于变形过大而丧失使用性能，也就是说钢结构实际上几乎不可能发生纯塑性破坏。

二、钢材在复杂应力下的性能

在实际结构中，钢材常常同时受到各种方向的正应力和剪应力作用如图 2-5 所示。钢材在这种复杂应力作用下的性能究竟如何，对于结构设计十分重要。根据能量强度理论，认为钢材在复杂应力作用下，各方向应力所产生的应变能的总和与单向均匀受拉达到塑性状态时的应变能相等时，材料就进入塑性状态。若用公式表示，则可用折算应力 σ_{zs} 和钢材在单向应力时的屈服点 f_y 相比较来判断：

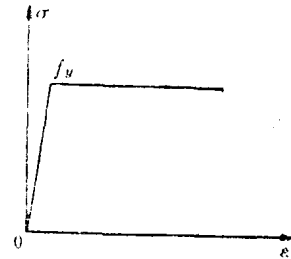


图 2-4 理想的弹性—塑性材料

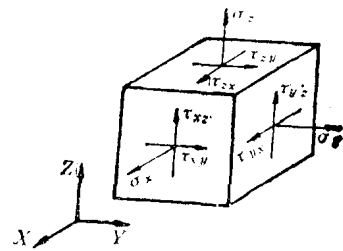


图 2-5 复杂应力状态

$$\sigma_{zs} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为单元体的三个主应力。

上式亦可写成：

$$\sigma_{zs} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) - 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2-1)$$

当 $\sigma_{zs} \geq f_y$ 时 塑性状态

当 $\sigma_{zs} < f_y$ 时 弹性状态

在梁中离载荷作用点较远的截面处 (即当 $\sigma_x = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{zx} = 0$ 时)

$$\sigma_{zs} = \sqrt{\sigma_y^2 + 3\tau^2} \quad (2-2)$$

从公式 (2-2) 中可以得到钢材受纯剪时的极限条件为 $\sigma_{zs} = \sqrt{3}\tau = f_y$ 。因此，屈服剪应力 $f_{vy} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 0.58f_y$ 。这个理论数值与实验所得的结果相当接近。

由于钢材的塑性变形主要是铁素体沿剪移面滑动的结果，只是在外表上看来表现为钢材的伸长或缩短 (图 2-3b、c)。因此，钢材在复杂应力作用下除了强度会发生变化外，塑性及韧性也会发生变化。在同号平面应力状况下，钢的弹性工作范围及极限强度均有提高，塑性变形有所降低。在异号平面应力状况下，情形则相反，钢材的弹性工作范围及极

限强度均有下降,塑性变形却有增加^①。在同号立体应力和异号立体应力下的情形与平面应力时的情形相仿。钢材受同号立体拉应力作用时,如三个主应力相等,塑性变形几乎不能出现,而有发生脆性断裂的危险。因此,在结构设计中,必须尽量避免同号的平面或立体拉应力状态的出现。钢材在同号立体压应力作用下,如三个主应力相等,由于几乎不可能出现塑性变形而又无脆断的危险,因此不易破坏。这种应力状态常存在于受局部挤压的区域,这时可以适当提高其设计强度。

三、钢材在连续反复载荷下的性能—疲劳

钢材在连续反复载荷(循环载荷)作用下,应力低于极限强度,甚至还低于屈服点时就发生破坏的现象,称为钢材的疲劳。疲劳破坏与塑性破坏不同,它在破坏前不出现显著的变形和局部收缩,而是一种突然性的断裂(脆性破坏)。

影响钢材疲劳强度的因素比较复杂,它与钢材标号、连接和构造情况、应力变化幅度以及载荷重复次数等均有关系。钢材破坏时所能达到的最大应力,将随载荷重复次数的增加而降低。疲劳强度还与应力循环形式有关。应力循环形式有异号应力循环(图2-6a、b、d)和同号应力循环(图2-6c、e)两种类型,常以循环的下应力 $\sigma_{\min}$ 与上应力 $\sigma_{\max}$ 之比 $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ (拉应力取正号,压应力取负号)来表示。当 $r < 0$ 时,为异号应力循环, $r = -1$ 时(图2-6a)疲劳强度最低; $r > 0$ 时为同号应力循环,疲劳强度较高, $r = 1$ 时表示静力载荷(图2-6f)。图2-6d表示压应力 $\sigma_{\min}$ 为绝对值最大的应力(负号),而拉应力 $\sigma_{\max}$ 则为绝对值最小的应力(正号)。

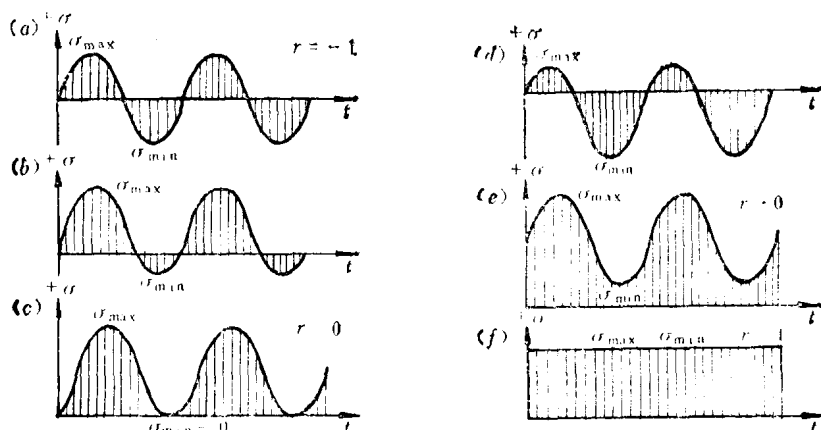


图 2-6 应力循环形式

钢材发生疲劳破坏的原因是钢材中总存在着一些局部缺陷,如不均匀的杂质,轧制时形成的微裂纹,或加工时造成的刻槽、孔洞和裂痕等。当循环载荷作用时,在这些缺陷处的截面上应力分布不均匀,产生应力集中现象。在循环应力的重复作用下,首先在应力高峰处出现微观裂纹,然后逐渐开展形成宏观裂缝,使有效截面相应减小,应力集中现象就更严重,裂缝就不断扩展。当载荷循环到一定次数时,不断被削弱的截面就发生脆性断裂,即出现疲劳破坏。如果钢材中存在由于轧制和加工而形成分布不均匀的残余应力时,

① 从理论上说,平面应力不会产生这种现象。实际上,这个结论只适用于厚板;当为薄板时,因钢材可以在厚度方向流动,一般不会降低或增加塑性。

会加速钢材的疲劳破坏。

无缺损孔洞的钢板，一般说来截面上没有应力集中现象，但经过加工后常产生残余应力。例如钢板二侧用自动或半自动割边比轧制边或刨边的残余应力大，因此前者的疲劳强度要比后者的低；对于铆钉和螺栓连接处的主体金属，由于孔洞处存在应力集中而疲劳强度更低；对于一些焊缝附近的主体金属，应力集中特别严重，残余应力也大，因此疲劳强度还要低。目前我国按现有实验资料，按照应力集中和残余应力分布的不同程度，将构件和连接类型分为八个类别（见附录一），分别规定它们的容许应力幅 $[\Delta\sigma]$ 作为疲劳计算的标准。

§ 2-3 钢材的脆性破坏

从图 2-1 中可以看出钢材在破坏之前要产生很大的塑性变形。象这样钢材由于发生了很大的塑性变形而引起的断裂，称为塑性破坏。钢材在简单受拉、受压、受弯、受剪及受扭等情况下，一般均能充分发展塑性变形产生破坏。但在某些情况下，也有可能破坏之前并不出现显著的变形而突然断裂。这种破坏称为脆性破坏。脆性破坏由于不能事先发觉，容易造成事故，危险性大，因此钢结构应尽量避免发生脆性破坏。

钢结构发生脆性破坏的原因甚为复杂。就影响钢材变脆的主要因素而言，有以下几种：某些有害的化学成分、时效、应力集中、加工硬化、低温及焊接区域结晶组织构造的改变等。

一、化学成分及组织构造的影响

在普通碳素钢中，碳可以使钢强度提高，但使塑性和韧性降低，并降低钢的可焊性（即使钢的焊接性能变差）。因此，前面已提到，结构用的钢材含碳量不宜太高，一般不应超过 0.22%。在焊接结构中则应限制在 0.2% 以内。锰的含量不太多时可以使钢的强度提高而不降低塑性。但如含量过高（达 1~1.5% 以上时），也可使钢材变脆而硬，并降低钢的抗锈性和可焊性。锰在普通碳素钢中的含量一般约 0.30~0.65%。硅的含量适当时也可使钢的强度大为提高而不降低塑性。但含量多时（1% 左右），将降低钢材的塑性、韧性、抗锈性和可焊性。在普通碳素钢中硅的含量一般为 0.07~0.3%。

在普通碳素钢中，硫和磷是极为有害的化学成分，对其含量应有严格的限制，一般应使硫的含量小于 0.050%，磷的含量小于 0.045%。硫和铁化合而成的硫化铁熔点较低，在高温下，例如焊、铆及热加工时，即刻熔化而使钢变脆（称为热脆）。磷的存在可以使钢变得很脆，特别在低温下尤为严重（称为冷脆），且随含碳量的增加而加剧。氧和氮对钢材变脆的危害性极其严重，好在它们极易在铸锭过程中自钢液中逸出，故含量极微。含杂质较多的钢材还容易发生一种时效现象，即溶解在铁素体中的一些碳、氮等元素，经过一定时间，特别在高温和塑性变形过程中，开始析出而形成碳化物和氮化物，这些物质当铁素体发生滑移时要起阻碍作用，因而会降低钢材的塑性和韧性，使钢材变脆。

二、应力集中的影响

如果构件的截面有急剧变化，例如存在孔洞、槽口、凹角、裂缝、厚度突然改变以及其他形状的改变等，构件中的主应力线将发生转折，在截面突变附近处比较密集。因而，应力的分布不再保持均匀，出现局部高峰应力，形成所谓应力集中现象，如图 2-7 所示。

从图上可以看出, 在应力集中区域, 由于力线转折, 有二个方向的分力。因此, 在这区域处将处于同号平面应力状态, 而在较厚的构件中, 就将产生同号立体应力。这时, 钢材就有转变为脆性状态的可能。图 2-8 的试验, 明显地反映出应力集中对钢材性能的影响。截面变化愈急剧, 应力集中愈严重, 钢材变脆的程度也愈厉害。截面突然改变且槽口又尖锐的厚试件, 其破坏形式已经完全呈现脆性了。

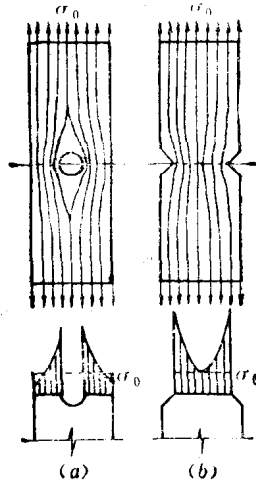


图 2-7 应力集中现象

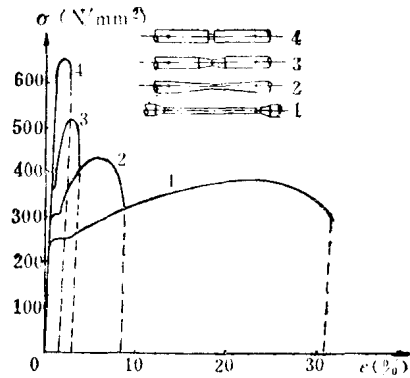


图 2-8 应力集中对钢材性能的影响

应力集中现象在实际结构中是不能完全避免的。对于承受静力载荷作用且处于常温下工作的结构, 由于钢材的流幅可以使高峰应力的增长减缓, 应力集中不会十分严重。因此, 只要在构造上尽可能做到截面变化比较平缓, 应力集中所引起的危害性就不十分严重, 设计时通常就无需特别考虑。但对于承受动力载荷和连续反复载荷作用的结构以及处于低温下工作的结构, 由于钢材的脆性增加, 应力集中的存在常常会产生严重的后果, 因此需要特别注意。除在构造上使截面变化平缓外, 有时还需要对钢材受应力集中影响而变脆的倾向进行鉴定。鉴定的方法是用带槽口的试件(图 2-9)在冲击机上做冲击试验。试件在槽口处有应力集中, 冲击破坏时单位面积所需的功表示了钢材在应力集中下变脆的程度, 称为冲击韧性。钢材的冲击韧性 a_k 值见 § 2-4 中表 2-3。

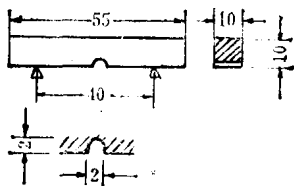


图 2-9 作冲击韧性试验的试件

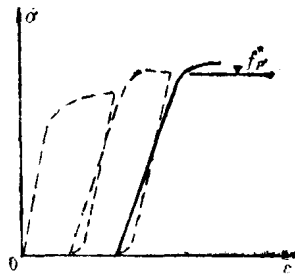


图 2-10 间断性重复载荷下的拉伸试验曲线

三、加工硬化的影响

在弹性阶段, 载荷的间断性重复, 并不影响钢材的工作性能。可是在塑性阶段, 当卸去载荷后, 经过一定的间断时间, 将载荷重新加上, 则第二次载荷下的比例极限将提高到

接近前次载荷下的应力(图2-10)。在重复载荷下钢材的比例极限有所提高的现象称为硬化。钢材经过冲孔、剪切、冷压、冷弯等加工后,会产生局部或整体硬化,降低塑性和韧性。这种现象称为加工硬化或冷作硬化。加工硬化还会加速钢材的时效硬化,在加工硬化的区域,钢材或多或少会存在一些裂缝或损伤,受力后出现应力集中现象,进一步加剧钢材的变脆。因此,较严重的加工硬化现象会对承受动力载荷和反复振动载荷的结构产生十分不利的后果。在这类结构中,需要用退火、切削等方法来消除硬化现象。

四、低温的影响

钢材在低温下工作,强度会提高,但塑性和韧性要降低,且温度降到一定程度时,会完全处于脆性状态。应力集中的存在将大大加速钢材的低温变脆。试验结果表明。随着温度的下降,冲击韧性将显著下降,当达到某一低温时,钢材几乎完全处于脆性状态。这时的温度称为冷脆温度。建筑机械由于在室外工作,经常处于低温的情况下,因此应特别注意低温变脆的倾向。

五、焊接的影响

焊接引起钢材变脆的原因主要是由于焊接过程中焊缝及其附近高温区域的金属(通常宽约5~6mm,称为热影响区),经过高温和冷却的过程,结晶的组织构造和机械性能起了变化。因此,焊接引起钢材变脆是一个比较复杂的综合性问题。

焊缝冷却时,由于熔敷金属的体积较小,热量很快被周围的钢材所吸收,温度迅速下降,贴近焊缝的金属受到了淬火作用,使金属的硬度和脆性提高,韧性和塑性显著降低。如果碳、硫、磷等成分太多,这种淬火硬化更为严重。因此,用于重要的焊接结构的钢材,除了机械性能以外,对化学成分特别是碳、硫、磷的含量必须严格控制。

在焊接过程中,金属凝固时晶粒之间会产生不均匀的应力和变形,有可能在焊缝及热影响区出现裂缝。焊缝中如存在缺陷,在冷却过程中将产生很高的应力集中。在低温下进行焊接,因冷却迅速促进焊接裂缝的形成和发展。焊接裂缝的存在,对结构的工作是不利的,对于在低温下工作的结构更为不利,因为如在外力作用的垂直方向以及同号的平面或主体拉应力区域存在裂缝,在其周围已经造成高度的应力集中,再加上低温时金属脆性的提高和出现较大的温度收缩应力,裂缝会很快扩展而使结构发生脆性破坏。对于承受冲击载荷的结构,焊接裂缝的存在会使结构发生脆性破坏。对于承受反复振动载荷的结构,焊接裂缝的存在将加速钢材的疲劳破坏。

因此,对焊接结构的材料选择需要特别注意,必要时还应通过焊接性能的试验,对钢材加以鉴定。

实际上,钢结构的脆性破坏常常是在上述各种因素的综合影响下发生的。例如,处于低温或承受连续反复载荷作用的焊接结构中的应力集中或材料硬化的区域,就常会出现脆性破坏。为了防止钢结构发生脆性破坏,必须在设计和制造中采取必要的措施来消除或减少上述不利因素的影响,并且根据受力和使用条件正确地选择钢材。

§ 2-4 钢结构材料的标号及其选择

用于钢结构的钢材通常为普通碳素钢和低合金钢等。

普通碳素钢 按国家标准分甲、乙、特三类供应。甲类钢(符号A)主要按机械性能