



高等职业教育土建类专业课程改革规划教材

# 钢结构制造与安装

唐丽萍 乔志远 主编



 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS



配电子课件

登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载

高等职业教育土建类专业课程改革规划教材

# 钢结构制造与安装

|     |     |     |     |  |
|-----|-----|-----|-----|--|
| 主 编 | 唐丽萍 | 乔志远 |     |  |
| 副主编 | 秦纪平 | 付丽文 |     |  |
| 参 编 | 赵金龙 | 张 园 | 李 昊 |  |
|     | 于建民 | 杨晓敏 | 齐玉清 |  |
|     | 申 钢 | 武志华 | 高雅琨 |  |
| 主 审 | 宋 群 |     |     |  |



机械工业出版社

全书共 3 个模块, 12 个单元, 内容包括绪论、建筑钢材、钢结构的连接、钢结构构件、钢结构构造、钢结构识图、钢结构加工制作、钢结构焊接工艺、钢结构涂装工程、钢结构安装常用机具设备、钢结构安装准备、钢结构安装方案、钢结构安装施工。

本书可作为高职高专建筑工程相关专业的教材, 也可作为函授、自学、岗位培训教材及现场施工人员指导书。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢结构制造与安装/唐丽萍, 乔志远主编. —北京: 机械工业出版社, 2008. 3

高等职业教育土建类专业课程改革规划教材

ISBN 978-7-111-23435-7

I. 钢… II. ①唐…②乔… III. 钢结构—高等学校: 技术学校—教材 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 017990 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李俊玲 覃密道 责任编辑: 王靖辉

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 张 静

责任印制: 洪汉军

北京铭成印刷有限公司印刷

2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14 印张 · 345 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-23435-7

定价: 23.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010)88379760

封面防伪标均为盗版

# 前 言

本书以提高读者的职业实践能力和职业素质为宗旨,以钢结构加工、制造及安装为主线编写,简要讲述了建筑钢材、钢结构的连接、钢结构构件及钢结构构造,意在使读者掌握钢结构的基本知识点;着重讲述的钢结构的制作和安装,其中包括钢结构施工图识读、钢结构加工制作、钢结构焊接工艺、钢结构的涂装工程、钢结构安装设备、钢结构安装工艺等,使读者系统地掌握钢结构制作工艺、钢结构安装方法及基本要领。

我国,钢结构工程在21世纪进入了一个崭新的发展时期,钢材产量逐年提高,以此为基础,钢结构已成为建筑业发展的重要支柱之一,为了满足相应的生产需要,适应技能型紧缺人才培养目标,迫切需要出版与之相符的教材,本书正是在这样的背景下编写的。

本书在编写过程中,针对高等职业学校施工方向学生今后主要从事建筑施工的特点,以学过的建筑基础理论课为基础,在基本理论部分重点讲述概念,公式推导力求简明扼要。本书联系工程实际,突出钢结构加工制造及安装方法,在钢结构施工图识读课程中,将不同的结构形式分别讲述,以培养学生读懂图样、理解设计意图、提高处理施工问题的能力。

本书由内蒙古建筑职业技术学院唐丽萍、乔志远主编。参加编写工作的人员分工为:绪论、单元6由唐丽萍、乔志远编写;单元1由内蒙古建筑职业技术学院张园编写;单元2由内蒙古建筑职业技术学院赵金龙编写;单元3由内蒙古建筑职业技术学院杨晓敏编写;单元4由内蒙古建筑职业技术学院张园、申钢编写;单元5由长治职业技术学院秦纪平、内蒙古农业大学李昊、内蒙古建筑职业技术学院于建民编写;单元7由沈阳建筑职业技术学院付丽文编写;单元8由内蒙古建筑职业技术学院于建民编写;单元9、单元10由内蒙古建筑职业技术学院齐玉清、武志华编写;单元11、单元12由内蒙古建筑职业技术学院唐丽萍、高雅琨编写,实训练习题由长治职业技术学院秦纪平编写。本书由山西大同大学宋群老师主审。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者和同行专家批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

|          |   |
|----------|---|
| 绪论 ..... | 1 |
|----------|---|

|                         |   |
|-------------------------|---|
| 模块 1 钢结构材料及基本计算理论 ..... | 6 |
|-------------------------|---|

|                 |   |
|-----------------|---|
| 单元 1 建筑钢材 ..... | 6 |
|-----------------|---|

|                        |   |
|------------------------|---|
| 课题 1 建筑钢材的主要力学性能 ..... | 6 |
|------------------------|---|

|                           |   |
|---------------------------|---|
| 课题 2 各种因素对钢材主要性能的影响 ..... | 9 |
|---------------------------|---|

|                        |    |
|------------------------|----|
| 课题 3 钢材的种类、规格及选择 ..... | 12 |
|------------------------|----|

|             |    |
|-------------|----|
| 复习思考题 ..... | 15 |
|-------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 单元 2 钢结构的连接 ..... | 16 |
|-------------------|----|

|                        |    |
|------------------------|----|
| 课题 1 钢结构连接的种类、特点 ..... | 16 |
|------------------------|----|

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 课题 2 焊接方法、焊缝形式及标注 ..... | 17 |
|-------------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 课题 3 对接焊缝连接 ..... | 18 |
|-------------------|----|

|                  |    |
|------------------|----|
| 课题 4 角焊缝连接 ..... | 23 |
|------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| 课题 5 螺栓连接 ..... | 31 |
|-----------------|----|

|             |    |
|-------------|----|
| 复习思考题 ..... | 42 |
|-------------|----|

|             |    |
|-------------|----|
| 实训练习题 ..... | 43 |
|-------------|----|

|                  |    |
|------------------|----|
| 单元 3 钢结构构件 ..... | 45 |
|------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 课题 1 轴心受力构件 ..... | 45 |
|-------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| 课题 2 受弯构件 ..... | 58 |
|-----------------|----|

|                    |    |
|--------------------|----|
| 课题 3 拉弯和压弯构件 ..... | 71 |
|--------------------|----|

|             |    |
|-------------|----|
| 复习思考题 ..... | 75 |
|-------------|----|

|             |    |
|-------------|----|
| 实训练习题 ..... | 75 |
|-------------|----|

|                  |    |
|------------------|----|
| 单元 4 钢结构构造 ..... | 77 |
|------------------|----|

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 课题 1 钢结构构造要求的重要性及一般要求 ..... | 77 |
|-----------------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| 课题 2 连接构造 ..... | 78 |
|-----------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 课题 3 结构构件构造 ..... | 79 |
|-------------------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| 课题 4 刚架主要节点构造 ..... | 87 |
|---------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 课题 5 桁架节点构造 ..... | 89 |
|-------------------|----|

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 复习思考题 .....                  | 89         |
| <b>模块2 钢结构识图与加工制作 .....</b>  | <b>90</b>  |
| <b>单元5 钢结构识图 .....</b>       | <b>90</b>  |
| 课题1 钢结构施工详图 .....            | 90         |
| 课题2 钢结构施工详图制图规定 .....        | 92         |
| 课题3 钢屋盖施工图识读 .....           | 99         |
| 课题4 单层门式刚架施工图识读 .....        | 111        |
| 课题5 网架施工图识图 .....            | 118        |
| 复习思考题 .....                  | 126        |
| 实训练习题 .....                  | 126        |
| <b>单元6 钢结构加工制作 .....</b>     | <b>128</b> |
| 课题1 钢材的储存、堆放及检验 .....        | 128        |
| 课题2 钢结构加工前的准备工作 .....        | 130        |
| 课题3 加工工序 .....               | 134        |
| 课题4 钢结构的验收资料 .....           | 139        |
| 复习思考题 .....                  | 140        |
| 实训练习题 .....                  | 140        |
| <b>单元7 钢结构焊接工艺 .....</b>     | <b>141</b> |
| 课题1 焊接工艺一般要求 .....           | 141        |
| 课题2 钢结构常用的焊接方法及应用范围 .....    | 143        |
| 课题3 焊缝缺陷、焊接应力和焊接变形 .....     | 145        |
| 课题4 焊接质量检验 .....             | 148        |
| 复习思考题 .....                  | 150        |
| <b>单元8 钢结构涂装工程 .....</b>     | <b>151</b> |
| 课题1 防腐涂装工程 .....             | 151        |
| 课题2 防火涂装工程 .....             | 156        |
| 复习思考题 .....                  | 162        |
| <b>模块3 钢结构的安装 .....</b>      | <b>163</b> |
| <b>单元9 钢结构安装常用机具设备 .....</b> | <b>163</b> |
| 课题1 塔式起重机 .....              | 163        |
| 课题2 履带式起重机 .....             | 164        |
| 课题3 汽车式起重机 .....             | 165        |

|                  |     |
|------------------|-----|
| 课题4 其他起重设备 ..... | 166 |
| 课题5 索具设备 .....   | 166 |
| 复习思考题 .....      | 168 |

## 单元10 钢结构安装准备 .....

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 课题1 文件资料与技术准备 ..... | 169 |
| 课题2 作业条件准备 .....    | 170 |
| 课题3 其他安装准备 .....    | 172 |
| 复习思考题 .....         | 173 |

## 单元11 钢结构安装方案 .....

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 课题1 钢结构安装方法选择 .....    | 174 |
| 课题2 安装工艺顺序及流水段划分 ..... | 175 |
| 课题3 安装机械的选择 .....      | 177 |
| 课题4 钢构件的运输和摆放 .....    | 178 |
| 复习思考题 .....            | 178 |

## 单元12 钢结构安装施工 .....

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 课题1 钢柱安装 .....         | 179 |
| 课题2 钢吊车梁与钢屋架的安装 .....  | 182 |
| 课题3 钢结构构件连接施工 .....    | 185 |
| 课题4 多层及高层钢结构安装要点 ..... | 186 |
| 课题5 钢结构安装工程安全技术 .....  | 187 |
| 复习思考题 .....            | 191 |

## 附录 .....

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 附录一 钢材和连接的强度设计值 ..... | 192 |
| 附录二 轴心受压构件的稳定系数 ..... | 194 |
| 附录三 热轧型钢表 .....       | 197 |

## 参考文献 .....

|            |     |
|------------|-----|
| 参考文献 ..... | 211 |
|------------|-----|

# 绪 论

## 1. 钢结构的类型及组成

在土木工程中,钢结构有着广泛的应用。由于使用功能及结构组成方式的不同,钢结构种类繁多,形式各异。在房屋建筑中,有大量钢结构厂房、高层钢结构建筑、大跨度钢网架建筑、悬索结构建筑等;在公路及铁路上,有各种形式的钢桥,如板梁桥、桁架桥、拱桥、悬索桥、斜张桥等;钢塔及钢桅杆则广泛用作输电线塔、电视广播发射塔;此外,还有海上采油平台钢结构、卫星发射钢塔架等。

这些钢结构尽管用途、形式各不相同,但它们都是由钢板和型钢经过加工制成各种基本构件,如拉杆(有时还包括钢索)、压杆、梁、柱及桁架等,然后将这些基本构件按一定方式通过焊接和螺栓连接而组成的。

图 1 对如何按一定方式将基本构件组成能满足各种使用功能要求的钢结构作简要说明。

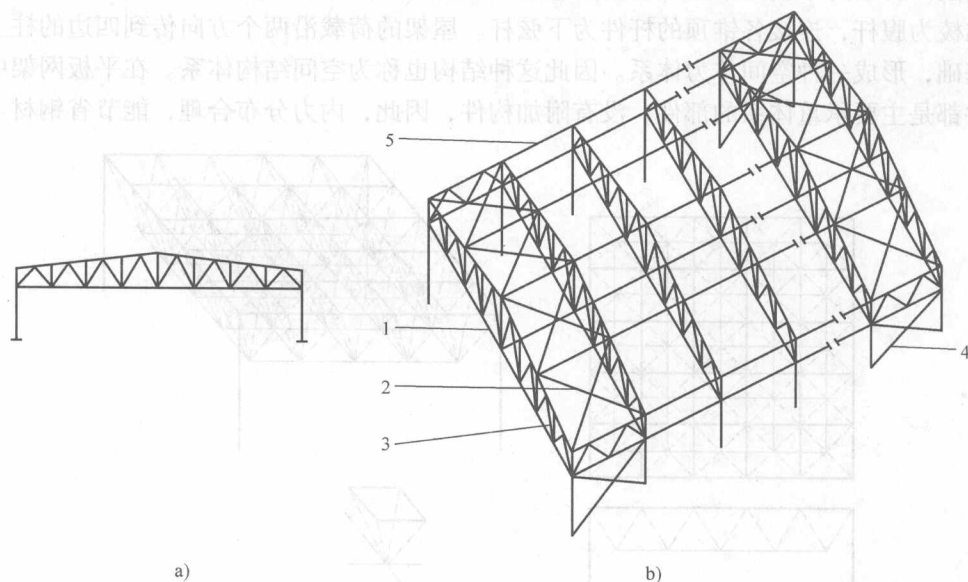


图 1 单层房屋钢结构组成示例

1—屋架 2—上弦横向支撑 3—垂直支撑 4—柱间支撑 5—纵向构件

如图 1 所示为一个单层房屋钢结构组成的示意图。单层房屋承受重力荷载、水平荷载(风力及吊车制动力等)。图中屋盖桁架和柱组成一系列的平面承重结构(图 1a),主要承受重力荷载和横向水平荷载。这些平面承重结构又用纵向构件和各种支撑(如图中所示的上弦横向支撑、垂直支撑及柱间支撑等)联成一个空间整体(图 1b),保证整个结构在空间各个方向都成为一个几何不变体系。

单层房屋的平面承重结构除由图 1 所示的桁架和柱组成之外,还可以由实腹的梁和柱组成框架或拱。框架和拱可以做成三铰、二铰或无铰的结构。跨度大的还可以用桁架拱,如图 2

所示。

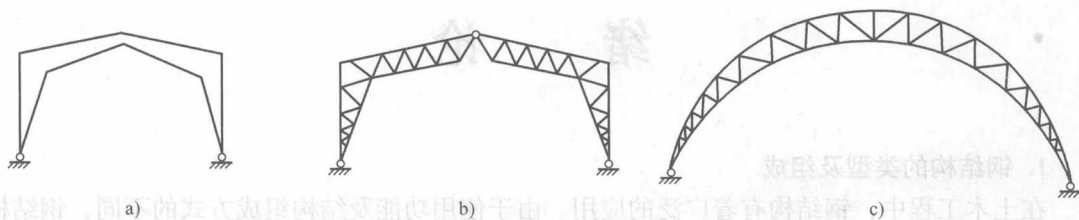


图2 平面承重结构的形式

a) 两铰刚架 b) 三铰刚架 c) 两铰桁架拱

上述结构均属于平面结构体系，其特点是结构由承重体系及附加构件两部分组成。承重体系是一系列相互平行的平面结构，承担垂直和横向水平荷载，并传递到基础。附加构件（纵向构件及支撑）的作用是将各个平面结构连成整体，同时也承受结构平面外的纵向水平力。当建筑物的长度和宽度尺寸接近或平面呈圆形时，如果将各个承重构件自身组成空间几何不变体系，而省去附加构件，受力就更为合理。

如图3所示为平板网架屋盖结构。它由倒置的四角锥体组成，锥底的四边为网架的上弦杆，锥棱为腹杆，连接各锥顶的杆件为下弦杆。屋架的荷载沿两个方向传到四边的柱上，再传至基础，形成一种空间传力体系。因此这种结构也称为空间结构体系。在平板网架中，所有构件都是主要承重体系的部件，没有附加构件，因此，内力分布合理，能节省钢材。

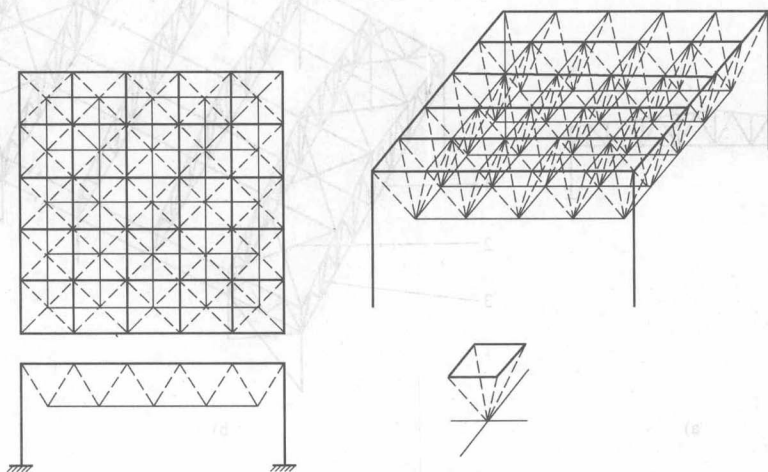


图3 平板网架屋盖

如图4所示为另一种空间结构体系——空间网壳圆屋顶，其特点是重量轻、覆盖面积大。多层房屋结构的特点是随着房屋高度的增加，水平风荷载（以及地震荷载）的作用越来越重要。提高结构抵抗水平荷载的能力以及控制水平位移不要过大是这类房屋组成的主要问题。多层钢结构房屋组成的体系主要包括框架体系、带支撑的框架体系和筒式结构体系。框架体系是由梁和柱组成的多层多跨框架，如图5所示；带支撑的框架体系在两列柱之间设置斜撑，形成竖向悬臂桁架，以便承受更大的水平荷载，如图6所示。筒式结构体系沿框架四周用密排列的柱形成空间刚架式，它能更有效地抵抗水平荷载。

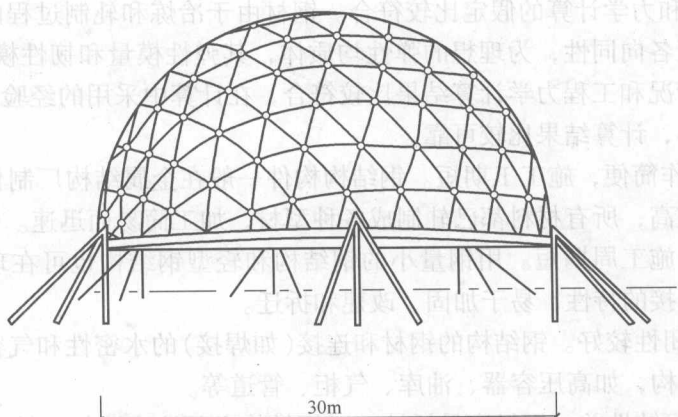


图4 空间网壳圆屋顶

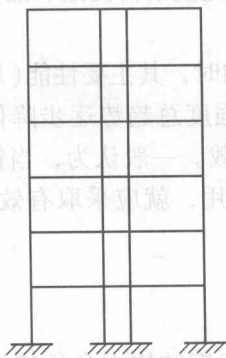


图5 框架结构

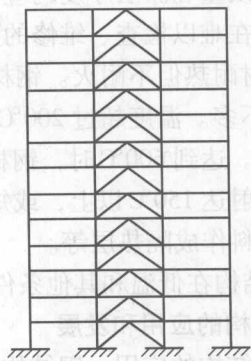


图6 带支撑的框架结构

综上所述,钢结构的组成应满足结构使用功能的要求,结构应形成空间整体(几何不变体系),才能有效而经济地承受荷载,同时还要考虑材料供应条件及施工方便等因素。我们还应看到,随着工程技术的不断发展,以及对结构组成规律的深入研究,将会创造和开发出更多的新型结构体系。

## 2. 钢结构的特点

1) 建筑钢材强度高,塑性好。建筑钢材强度高,适用于建造跨度大、高度高、承载重的结构。但一般构件截面小而壁薄,在受压时容易被稳定和刚度问题所影响,强度难以得到充分的利用。

建筑钢材塑性好,结构在一般条件下不会因超载而突然断裂,只会增大变形,故易于被发现。此外,能将局部高峰应力重分配,使应力变化趋于平缓。

建筑钢材韧性好,适宜在动力荷载下工作,因此在地震区采用钢结构较为有利。

2) 钢结构的重量轻。钢材强度高,做成的结构比较轻。结构的轻质性可以用材料的重量密度 $\rho$ 和强度 $f$ 的比值 $\alpha$ 来衡量, $\alpha$ 值越小,结构相对越轻。建筑钢材的 $\alpha$ 值为 $1.7 \sim 3.7 \times 10^{-4}/\text{m}$ ,木材为 $5.4 \times 10^{-4}/\text{m}$ ,钢筋混凝土约为 $18 \times 10^{-4}/\text{m}$ 。以同样跨度承受同样的荷载,钢屋架的重量最多为钢筋混凝土屋架的 $1/3 \sim 1/4$ ,冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$ 。重量轻,可减轻基础的负荷,降低地基、基础部分的造价,同时还方便运输和吊装。

3) 材质均匀和力学计算的假定比较符合。钢材由于冶炼和轧制过程的科学控制,其组织比较均匀,接近各向同性,为理想的弹性均质体,其弹性模量和韧性模量皆较大,因此,钢结构实际受力情况和工程力学计算结果比较符合,在计算中采用的经验公式不多,从而计算上的不定性较小,计算结果比较可靠。

4) 钢结构制作简便,施工工期短。钢结构构件一般在金属结构厂制作,施工机械化准确度和精密度都较高,所有材料都已轧制成各种型材,加工简易而迅速。钢构件较轻,连接简单,安装方便,施工周期短。用钢量小的钢结构和轻型钢结构也可在现场制作,简易吊装。钢结构由于连接的特性,易于加固、改建和拆迁。

5) 钢结构密闭性较好。钢结构的钢材和连接(如焊接)的水密性和气密性较好,适于做要求密闭的板壳结构,如高压容器、油库、气柜、管道等。

6) 钢结构耐腐蚀性差。钢材容易锈蚀,对钢结构必须注意防护,特别是薄壁构件更要注意,因此,处于较强腐蚀性介质内的建筑物不宜采用钢结构。钢结构在涂油漆以前应彻底除锈,油漆质量和涂层厚度均应符合要求。在设计中,应避免使结构受潮、漏雨,构造上应尽量避免存在难以检查、维修的死角。

7) 钢材耐热但不耐火。钢材受热,当温度在 $200^{\circ}\text{C}$ 以内时,其主要性能(屈服点和弹性模量)下降不多。温度超过 $200^{\circ}\text{C}$ 后,材质变化较大,不仅强度总趋势逐步降低,还有蓝脆和徐变现象。达到 $600^{\circ}\text{C}$ 时,钢材进入塑性状态,已不能承载。一般认为,当钢结构表面长期受高温辐射达 $150^{\circ}\text{C}$ 以上,或短时间内可能受到火焰作用,就应采取有效的防护措施,如用耐火材料作成隔热层等。

8) 钢结构在低温和其他条件下,可能发生脆性断裂。

### 3. 钢结构的应用和发展

(1) 钢结构的应用 钢结构的合理应用范围不仅取决于钢结构本身的特性,还取决于国民经济发展的具体情况。过去,由于我国钢产量不能满足国民经济各部门的需要,钢结构的应用受到一定的限制。近几年来,我国钢产量有了很大发展,加上钢结构结构形式的改进,钢结构的应用得到了很大的发展。

根据我国的实践经验,工业与民用建筑钢结构的应用范围大致如下:

1) 工业厂房。起重机起重量较大或其工作较繁重的车间多采用钢骨架。如冶金厂房的平炉车间、转炉车间、混铁炉车间、初轧车间;重型机械厂的铸钢车间、水压车间、锻压车间等。近年随着网架结构的大量应用,一般的工业车间也采用了钢结构。

2) 大跨结构。如飞机装配车间、飞机库、大煤库、大会堂、体育馆、展览馆等都需要大跨结构。其结构体系可为网架、悬索、拱架以及框架等。

3) 高耸结构。高耸结构包括塔架和桅杆结构,如电视塔、微波塔、输电线塔、钻井塔、环境大气监测塔、无线电天线桅杆、广播发射桅杆等。

4) 多层和高层建筑。多层和高层建筑的骨架可采用钢结构。我国过去钢材比较短缺,仍多采用钢筋混凝土结构,近年来钢结构在此领域已逐步得到发展。

5) 承受振动荷载影响及地震作用的结构。设有较大锻锤的车间,其骨架直接承受的动力尽管不大,但间接的振动却极为强烈,可采用钢结构。对于抗震作用要求高的结构也宜采用钢结构。

6) 板壳结构。如油库、油罐、煤气库、高炉、热风炉、漏斗、烟囱、水塔以及各种管

道等。

7) 其他特种结构。如栈桥、管道支架、井架和海上采油平台等。

8) 可拆卸或移动的结构。建筑工地的生产、生活附属用房, 临时展览馆等, 这些结构是可拆迁的。移动结构如塔式起重机、履带式起重机的吊臂、龙门起重机等。

9) 轻型钢结构。轻型钢结构包括轻型门式刚架房屋钢结构、冷弯薄壁型钢结构以及钢管结构。这些结构可用于荷载较轻或跨度较小的建筑。近年来, 轻型钢结构已广泛应用于仓库、办公室、工业厂房及体育设施, 并向住宅楼和别墅发展。

10) 与混凝土组合成的组合结构。如组合梁和钢管混凝土柱等。

(2) 钢结构的发展 钢结构的发展, 从所用材料的发展看, 先是铸铁、锻铁, 然后是钢, 采用较多的是铝合金。从钢结构连接方式的发展看, 在生铁和熟铁时代是销钉连接, 19 世纪初采用铆钉连接, 20 世纪初有了焊接连接, 20 世纪中叶则发展了高强度螺栓连接。从结构的形式看, 先是桥梁、塔, 后是工业及民用房屋和水工结构, 以及板结构如高炉、储液库、储气库等。在房屋建筑中, 建成的有首都体育馆和上海体育馆等大跨度网架结构, 有北京环境气象塔等塔式结构, 还有 1958 年建成的上海大型湿式贮气柜。20 世纪 80 年代和 90 年代, 北京、上海、深圳等地陆续兴建了一些高层钢结构, 如北京的中国国贸中心、京城大厦、京广中心大厦, 上海的国贸中心大厦, 深圳的发展中心大厦、地王商业大厦。这些高层钢结构的建成表明了我国高层建筑发展的新趋势。

从材质方面, 逐步发展了高强度低合金钢材, 除 Q235 钢、Q345 钢、Q390 钢外, 又增加了 Q420 钢, 但后者的应用尚有待进一步研究。钢的品种也有所增加, H 型钢在国内已开始生产, 正方形和矩形管的应用也逐步进行推广。

结构的革新是今后研究的主要课题, 如悬索结构、网架结构、超高层结构近年来得到很大的发展和应用。钢和混凝土组合构件的应用也日益推广。

# 模块1 钢结构材料及基本计算理论

## 单元1 建筑钢材

### 【单元概述】

本单元讲述了钢结构所用材料、品种、规格及基本性能。

### 【学习目标】

通过理论教学和技能实训，学生能够了解钢结构所用材料、品种、规格；熟悉钢材材料的力学性能。

钢材的品种繁多，各自的性能、产品规格及用途都不相同，适用于建筑的钢材，只是其中的一小部分。为了保证结构的安全，钢结构所采用的钢材在性能方面必须具有较高的强度，较好的塑性及韧性，以及良好的加工性能。对于焊接结构还要求可焊性良好。在低温下工作的结构，要求钢材保持较好的韧性。在易受大气侵蚀的露天环境下工作的结构，或在有害介质侵蚀的环境下工作的结构，要求钢材具有较好的抗锈能力。

根据上述要求，我国现行的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)推荐承重结构的钢材宜采用碳素结构钢中的 Q235 钢，及低合金高强度结构钢中的 Q345、Q390 及 Q420 钢。

各类钢种供应的钢材规格分为型材、板材、管材及金属制品四大类，其中建筑钢结构中使用最多的是型材和板材。

本单元根据对建筑钢材的基本要求，讲述建筑钢材的主要力学性能及其影响因素，并介绍我国目前生产的建筑钢材常用的品种及规格，目的使建造者在设计时能合理的选择和使用钢材，在施工中能按设计要求严格进行钢材的验收和管理，并按正确的方法进行加工和制造。

### 课题1 建筑钢材的主要力学性能

#### 1. 强度

材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力称为强度。强度可以通过比例极限、弹性极限、屈服极限、抗拉强度等指标来反映，碳素结构钢材的应力-应变曲线如图 1-1 所示。从图中可以看到，在比例极限之前，应力、应变之间呈线性关系，弹性极限不会出现残余塑性

变形时的最大应力,弹性极限与比例极限相当接近。当应力超过弹性极限后,应力与应变不再呈线性关系,产生塑性变形,曲线出现波动,这种现象称为屈服。波动最高点称上屈服点,最低点为下屈服点,下屈服点数值较为稳定,因此以它作为材料抗力指标,称为屈服点。有些钢材无明显的屈服现象,以材料产生0.2%塑性变形时的应力作为屈服强度。当钢材屈服到一定程度后,由于内部晶粒重新排列,强度提高,进入应变强化阶段,应力达到最大值,此时称为抗拉强度。此后试件截面迅速缩小,出现颈缩现象,直至断裂破坏。

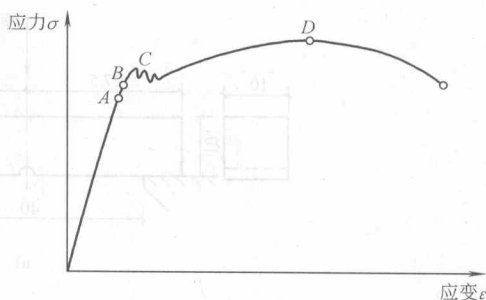


图 1-1 碳素结构钢材的应力-应变曲线

在以上指标中,屈服强度和抗拉强度是工程设计和选材的重要依据,也是材料购销和检验工作中的重要指标。其中,屈服强度是衡量结构承载能力的指标,是设计时钢材可以达到的最大应力。屈服强度高则可减轻结构自重,节约钢材和降低造价。抗拉强度是衡量钢材经过较大变形后的抗拉能力,是钢材破坏前能够承受的最大应力。它直接反映钢材内部组织的优劣,同时抗拉强度高可以增加结构的安全保障。此外,工程上对屈强比还有要求。屈强比(屈服强度与抗拉强度的比值)是衡量钢材强度储备的一个系数,屈强比越低,钢材的强度安全储备越大。屈强比过小时,钢材强度的利用率太低,不够经济;屈强比过大时,安全储备太小而不够安全。

## 2. 塑性

塑性是指钢材在应力超过屈服点后,能产生显著的残余变形(塑性变形)而不立即断裂的性质。它是钢材的一个重要性能指标,用伸长率表示。伸长率指试件被拉断时的绝对变形值与试件原标距之比的百分数,代表材料在单位拉伸时的塑性应变能力,用下式计算:

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $l_0$ ——试件原始标距长度(mm);

$l$ ——试件拉断后的标距长度(mm)。

$l_0 = 5d_0$ ,  $l_0 = 10d_0$  对应的伸长率记为  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$ , 同一种钢材  $\delta_5$  大于  $\delta_{10}$ , 现常用  $\delta_5$  表示塑性指标。

## 3. 韧性

韧性是指钢材在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力,是衡量钢材抵抗动力荷载能力的指标,它是强度和塑性的综合表现,是判断钢材在动力荷载作用下是否出现脆性破坏的重要指标之一。冲击韧性即用带V形缺口的夏比标准试件,在冲击试验机上通过动摆施加冲击荷载,使之断裂,如图1-2所示。由此测出试件受冲击荷载发生断裂所吸收的冲击功,即为材料的冲击韧性值,用  $C_v$  表示,单位为J。 $C_v$  越高,表明材料破坏时吸收的能量越多,因此抵抗脆性破坏的能力越强,韧性越好。

温度对冲击韧性有重大影响,材料转变温度越低,说明钢的低温冲击韧性越好。实际工程中,由于低温对钢材的脆性破坏有显著影响,为了避免钢结构的低温脆断,在寒冷地区建造的结构不但要求钢材具有常温(20℃)冲击韧性指标,还要求具有负温(0℃、-20℃或

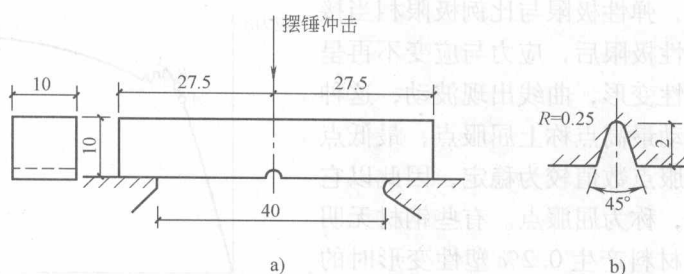


图 1-2 冲击韧性试验

a) 试验示意图 b) V 形口

-40℃) 冲击韧性指标, 以保证结构具有足够的抵抗脆性破坏的能力。

总之, 塑性和韧性好的钢材可以使结构在静载和动载作用下有足够的应变能力, 既可减轻结构脆性破坏的倾向, 又能通过较大的塑性变形调整局部应力, 同时具有较好的抵抗重复荷载作用的能力。

#### 4. 冷弯性能

冷弯性能是指钢材在常温下加工发生塑性变形时, 对产生裂纹的抵抗能力, 由冷弯试验来确定, 如图 1-3 所示。试验时按照规定的弯心直径在试验机上用冲头加压, 使试件弯成  $180^\circ$ , 如试件外表面不出现裂纹和分层, 即为合格。弯曲程度一般用弯曲角度或弯心直径对材料厚度的比值来表示, 弯曲角度越大或弯心直径对材料厚度的比值越小, 则表示材料的冷弯性能就越好。

冷弯试验不仅能直接检验钢材的弯曲变形能力和塑性性能, 还能暴露钢材内部的冶金缺陷, 如硫、磷偏析和硫化物与氧化物的掺杂情况。因此, 冷弯性能是鉴定钢材在弯曲状态下塑性应变能力和钢材质量的综合指标。

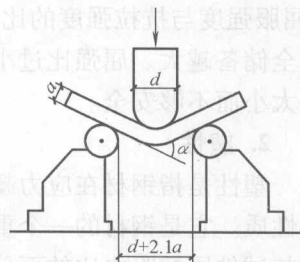


图 1-3 冷弯试验示意图

#### 5. 良好的工艺性能(冷加工、热加工和可焊性)

良好的工艺性能不但要易于加工成各种形式的结构, 而且不致因加工而对结构的强度、塑性、韧性等造成较大的不利影响。其中, 可焊性是一项重要指标, 可分为施工上的可焊性和使用上的可焊性。

施工上的可焊性好是指在一定的焊接工艺下, 焊缝金属及其附近金属均不产生裂纹; 使用上的可焊性好是指焊接构件在施焊后的力学性能不低于母材的力学性能。

此外, 根据结构的具体工作条件, 有时还要求钢材具有适应低温、高温和腐蚀性环境的能力。

按以上要求, 钢结构设计规范具体规定: 承重结构的钢材应具有抗拉强度、伸长率、屈服点和碳、硫、磷含量的合格保证; 焊接结构的钢材应具有冷弯试验的合格保证; 对某些承受动力荷载的结构以及重要的受拉或受弯的焊接结构的钢材应具有常温或负温冲击韧性的合格保证。

## 课题2 各种因素对钢材主要性能的影响

### 1. 化学成分的影响

钢是由各种化学成分组成的,化学成分及其含量对钢的性能,特别是力学性能有着重要的影响。铁(Fe)是钢材的基本元素,纯铁质软,在碳素结构钢中约占99%,碳和其他元素仅占1%,但对钢材的力学性能却有着决定性的影响。其他元素包括硅(Si)、锰(Mn)、硫(S)、磷(P)、氮(N)、氧(O)等。低合金钢中还含有少量(低于5%)合金元素,如铜(Cu)、钒(V)、钛(Ti)、铌(Nb)、铬(Cr)等。

在碳素结构钢中,碳是仅次于纯铁的主要元素,它直接影响钢材的强度、塑性、韧性和可焊性等。碳含量增加,钢的强度提高,而塑性、韧性(尤其是冲击韧性)和疲劳强度下降,同时降低钢的可焊性、抗腐蚀性及冷弯性能。因此,结构用钢对含碳量要加以限制,一般不应超过0.22%,在焊接结构中还应低于0.20%。

硫和磷(其中特别是硫)是钢中的有害成分,它们降低钢材的塑性、韧性、可焊性和疲劳强度。在高温时,硫使钢变脆,即热脆,一般硫的含量不应超过0.045%。在低温时,磷使钢变脆,即冷脆,磷的含量不应超过0.045%。但是,磷可提高钢材的强度和抗锈性。高磷钢中磷的含量可达0.12%,这时应减少钢材中的含碳量,以保持一定的塑性和韧性。

氧和氮都是钢中的有害杂质。氧的作用和硫类似,使钢热脆;氮的作用和磷类似,使钢冷脆。由于氮、氧容易在熔炼过程中逸出,一般不会超过极限含量,故通常不要求做含量分析。

硅和锰是钢中的有益元素,它们都是炼钢的脱氧剂,可提高钢材的强度,含量适当时,对塑性和韧性无显著的不良影响。在碳素结构钢中,硅的含量应不大于0.3%,锰的含量为0.3%~0.8%。对于低合金高强度结构钢,锰的含量可达1.0%~1.6%,硅的含量可达0.55%。

为改善钢材的性能,可掺入一定数量的其他元素,如钒和钛是钢中的合金元素,能提高钢的强度和抗腐蚀性能,又不显著降低钢的塑性。

铜在碳素结构钢中属于杂质成分。它可以显著提高钢的抗腐蚀性能,也可以提高钢的强度,但对可焊性有不利影响。

### 2. 轧制与冶金缺陷的影响

钢的轧制是在高温(1200~1300℃)和压力作用下将钢锭热轧成钢板或型钢。轧制使钢锭中的小气孔、裂纹等焊合,金属组织致密,消除了显微组织缺陷,从而改善了钢材的力学性能。一般轧制的钢材越小(越薄),其强度越高,塑性和冲击韧性也越好。因此,《钢结构设计规范》对钢材按厚度进行分组,详见附表1-1。

热轧的钢材由于不均匀冷却产生残余应力,一般在冷却较慢处产生拉应力,冷却较快处产生压应力。

常见的冶金缺陷有偏析、非金属夹杂、气孔、裂纹及分层等。偏析是钢材中化学成分不一致和不均匀性,特别是硫、磷偏析严重恶化钢材的性能;非金属夹杂是钢中含有硫化物与氧化物等杂质,在轧制后会造成钢材的分层,使钢材沿厚度方向受拉的性能大大降低;气孔是浇注钢锭时,由氧化铁与碳作用所生成的一氧化碳气体不能充分逸出而形成的。这些缺陷都将影响钢材的力学性能。

冶金缺陷对钢材性能的影响,不仅在结构或构件受力工作时表现出来,有时在加工制作过程中也可表现出来。

### 3. 钢材硬化的影响

硬化有冷作硬化和时效硬化两种。冷作硬化是指当钢材冷加工(冷拉、冷弯、冲孔、机械剪切等)超过其弹性极限卸载后产生残余塑性变形,再次加载时屈服点提高,同时塑性和韧性降低的现象,又称为应变硬化。

在高温时熔入于铁中的少量氮和碳,随着时间的增长逐渐从纯铁中析出,形成自由碳化物和氮化物,对纯铁体的塑性变形起遏制作用,从而使钢材的强度提高,塑性、韧性下降,这种现象称为时效硬化,俗称老化。

时效硬化的过程一般很长,为测定钢材时效后的冲击韧性,常采用人工快速时效方法,加速时效硬化的发展。即先使钢材产生 10% 左右的塑性变形,再加热至 250℃ 左右并保温 1h 后在空气中冷却。

此外还有应变时效,它是应变硬化(冷作硬化)后又加时效硬化。

在一般钢结构中,不利用硬化所提高的强度,有些重要结构要求对钢材进行人工时效后检验其冲击韧性,以保证结构具有足够的抗脆性破坏能力。另外,应将局部硬化部分用刨边或钻孔予以消除。

### 4. 温度的影响

钢材性能随温度变化而变化。0℃ 以上,总的趋势是:温度升高,钢材强度降低,应变增大;反之,温度降低,钢材强度会略有增加,塑性和韧性却会降低而变脆。温度升高,约在 200℃ 以内钢材性能没有明显变化,430 ~ 540℃ 之间强度急剧下降,600℃ 时强度很低,不能承担荷载。但在 250℃ 左右,钢材的强度反而略有提高,同时塑性和韧性均下降,材料有转脆的倾向,钢材表面氧化膜呈现蓝色,称为蓝脆现象。钢材应避免在蓝脆温度范围内进行热加工。

温度在 260 ~ 320℃ 时,在应力持续不变的情况下,钢材以很缓慢的速度继续变形,此种现象称为徐变现象。

当温度从常温开始下降,特别是在负温度范围内时,钢材强度虽有提高,但其塑性和韧性降低,材料逐渐变脆,这种性质称为低温冷脆。钢材由韧性状态向脆性状态转变的温度叫冷脆转变温度(又称冷脆临界温度)。它是由大量使用经验和实验资料统计分析确定。

### 5. 应力集中的影响

钢材的工作性能和力学性能指标都是以轴心受拉杆件中应力沿截面均匀分布的情况作为基础的。实际上,在钢结构构件中不可避免的存在着孔洞、槽口、凹角、截面突然改变以及钢材内部缺陷等。此时,构件中的应力分布将不再保持均匀,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,形成应力集中现象,使钢材变脆。如图 1-4 所示,高峰区的最大应力与净截面的平均应力之比称为应

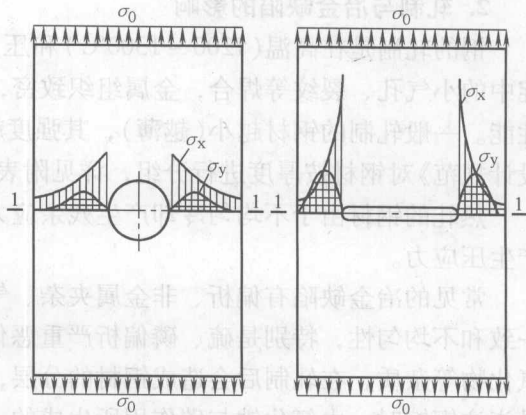


图 1-4 孔洞及槽孔处的应力集中