

GANG  
JIEGOU  
HANJIE ZHIZAO

张元彬 罗辉 张青

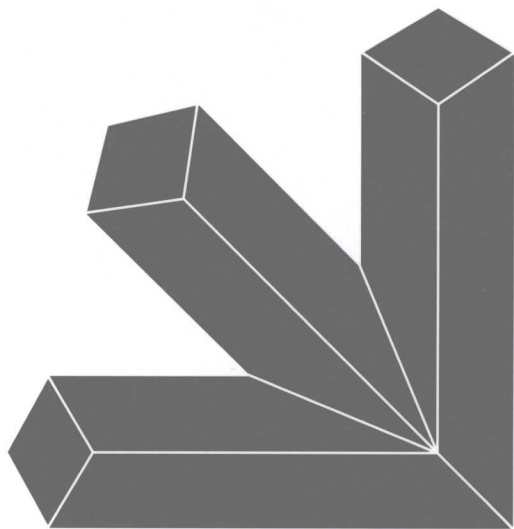
王国凡 主 编  
霍玉双 副主编  
宋世军 主 审

# 钢结构 焊接制造

第二版



化学工业出版社



GANG  
JIEGOU  
HANJIE ZHIZAO

张元彬 罗辉 张青

王国凡 主编  
霍玉双 副主编  
宋世军 主审

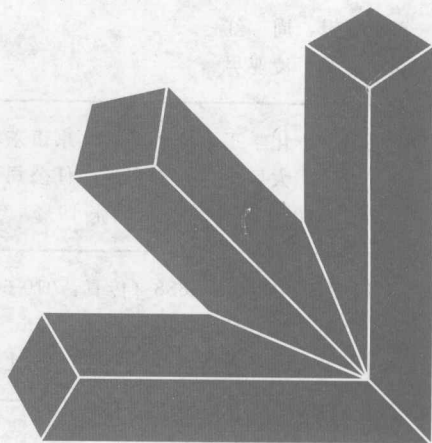
# 钢结构 焊接制造

第二版



化学工业出版社

·北京·



主 编 王国凡  
副主编 刘洪雷 曹 浩 孙 昊 洪永荣  
审 定 李 世 荣

# 附 录

## 附录

附录二

### 图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构焊接制造/王国凡主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2009. 3

ISBN 978-7-122-04780-9

I. 钢… II. 王… III. 钢结构-焊接工艺 IV. TG457.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 017446 号

责任编辑: 周 红

责任校对: 凌亚男

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 19 $\frac{3}{4}$  字数 512 千字 2009 年 4 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

化学工业出版社



定 价: 48.00 元

京 北

版权所有 违者必究

# 前 言

钢结构焊接制造是一门理论和实践性较强的综合性技术。由于钢结构具有综合力学性能高、焊接密封性能好、便于拆装、重量轻、生产周期短等优点，因此在造船、航空、机械、运输、水电、石油等行业得到广泛的应用。特别是钢结构应用于高层建筑已有百年的历史，新中国成立后的前四十年，由于钢产量一直不高，建筑钢结构长期处于停滞和缓慢发展状态。近几年我国钢产量年年超亿吨，建筑钢结构进入有史以来最好的发展时期。目前钢结构正向轻型化、高层化、大跨度预应力三个方向发展。高 325m 的深圳帝王大厦、201m 的大连远洋大厦、北京国家体育场“鸟巢”等都系钢结构建筑。随着新材料、新工艺、新方法的不断涌现，钢结构的应用会越来越广泛。

钢结构焊接制造是钢结构设计和生产的重要内容，它包括钢结构概述、焊接应力与钢结构变形、焊接接头的形式及静载强度的计算、钢结构焊接生产工艺、钢结构的焊接生产安全等内容。为了提高钢结构的生产质量，防止失效，就要全面、系统地掌握钢结构焊接生产知识。本书对钢结构焊接生产进行了系统、全面的介绍，并结合具体实例，介绍了生产工艺。同第一版相比本书对钢结构的发展与应用、国家标准、仿形切割等内容进行了修订，增加了国家鸟巢工程的介绍，以及超声冲击焊接接头提高疲劳强度、钢结构箱形柱焊接生产、船体生产工艺过程等内容。

本书对钢结构焊接生产进行了理论分析，并与实践密切结合，重点突出，逻辑性强，图文并茂，对生产中易出现的变形问题进行了准确的分析，提出防止的措施。编写中力求通俗易懂，深入浅出，避免繁杂的计算。本书可作为相关设计人员和企业技术人员指导设计、生产的工具书，同时也可作为本科院校相关专业的教科书。

本书的第 1 章、第 8 章 8.2, 8.3, 8.4 节由张青编写，第 2 章和第 3 章由王国凡编写，第 5 章、第 6 章和第 8 章 8.1, 8.2 节由罗辉编写，第 4 章、第 7 章、第 8 章 8.5 节由张元彬编写，第 9 章和第 7 章 7.4 节由霍玉双编写，第 1 章 1.2 节、第 3 章 3.3 节和第 8 章 8.6 节由王清编写，全书由王国凡统定稿，由宋世军教授审稿。

参加编写的还有陈明九、王胜辉、严雪松、马海龙、汤爱君、王吉岱、王庆军、王新民、郜建中、李建刚、周英勤、杨兴华、刘 杰、李长龙、冯立明、刘喜俊等。

由于编者水平有限，书中不当之处，敬请各界读者批评指正提出宝贵意见。

编 者

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 钢结构概述 .....           | 1  |
| 1.1 钢结构的特点和类型 .....         | 1  |
| 1.1.1 钢结构的特点 .....          | 1  |
| 1.1.2 钢结构的类型 .....          | 2  |
| 1.2 钢结构的发展与应用 .....         | 5  |
| 1.2.1 钢结构的发展 .....          | 5  |
| 1.2.2 钢结构的应用 .....          | 7  |
| 1.3 钢结构的材料 .....            | 7  |
| 1.3.1 钢结构对材料的要求 .....       | 7  |
| 1.3.2 钢结构的破坏形式 .....        | 8  |
| 1.3.3 钢结构材料的力学性能 .....      | 13 |
| 1.3.4 影响钢材主要性能的因素 .....     | 15 |
| 1.3.5 钢结构用钢材的分类 .....       | 18 |
| 1.3.6 选择钢材的原则 .....         | 20 |
| 第 2 章 焊接应力与钢结构的变形 .....     | 22 |
| 2.1 焊接应力与变形 .....           | 22 |
| 2.1.1 应力与变形的概念 .....        | 22 |
| 2.1.2 变形 .....              | 23 |
| 2.1.3 研究焊接应力与变形的基本假定 .....  | 23 |
| 2.2 焊接应力与变形产生的原因 .....      | 24 |
| 2.2.1 简单杆件受热的应力和变形 .....    | 24 |
| 2.2.2 长板条不均匀受热时的应力和变形 ..... | 25 |
| 2.3 焊接残余应力及分布 .....         | 27 |
| 2.3.1 焊接残余应力 .....          | 27 |
| 2.3.2 残余应力对结构的影响 .....      | 31 |
| 2.3.3 焊接变形及其对钢结构的影响 .....   | 33 |
| 2.4 消除焊接残余应力的方法 .....       | 33 |
| 2.4.1 热处理 .....             | 33 |
| 2.4.2 锤击法 .....             | 34 |
| 2.4.3 振动消除法 .....           | 34 |
| 2.5 常见的变形及产生原因 .....        | 35 |
| 2.5.1 焊接变形 .....            | 35 |
| 2.5.2 原材料的变形 .....          | 41 |
| 2.5.3 其他加工过程产生的变形 .....     | 42 |
| 2.6 防止和减少变形的措施 .....        | 42 |
| 2.6.1 从设计方面考虑防止变形 .....     | 42 |



|            |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------|
| 2.6.2      | 制定合理的工艺措施             | 44        |
| 2.6.3      | 加工中防止变形               | 48        |
| 2.7        | 钢桥对变形的要求              | 50        |
| 2.8        | 焊接变形的矫正               | 51        |
| 2.8.1      | 冷加工矫正                 | 52        |
| 2.8.2      | 火焰矫正法                 | 52        |
| 2.8.3      | 火焰矫正对钢结构承载能力的影响       | 54        |
| <b>第3章</b> | <b>焊接接头形式及静载强度的计算</b> | <b>55</b> |
| 3.1        | 焊接接头的基本类型             | 55        |
| 3.1.1      | 常用接头类型                | 56        |
| 3.1.2      | 电弧焊接头与焊缝              | 57        |
| 3.1.3      | 焊接接头的力学性能检验           | 58        |
| 3.2        | 常用手弧焊接头应力分布           | 61        |
| 3.2.1      | 焊接接头的应力集中概念           | 61        |
| 3.2.2      | 电弧焊对接接头的应力分布          | 61        |
| 3.2.3      | 搭接接头的应力分布             | 62        |
| 3.2.4      | T形(十字形)接头的应力分布        | 64        |
| 3.3        | 点焊接头的应力分布             | 65        |
| 3.4        | 焊接接头的选择与静载强度计算        | 66        |
| 3.4.1      | 工作焊缝和联系焊缝             | 66        |
| 3.4.2      | 焊接接头的设计与选择            | 67        |
| 3.4.3      | 焊缝的符号                 | 69        |
| 3.4.4      | 焊接接头的静载强度计算           | 73        |
| 3.5        | 焊接接头的疲劳断裂             | 77        |
| 3.5.1      | 疲劳断裂特征                | 78        |
| 3.5.2      | 疲劳断口的宏观和微观形貌          | 78        |
| 3.5.3      | 疲劳裂纹的萌生和扩展机理          | 80        |
| 3.5.4      | 影响焊接接头疲劳强度的因素         | 83        |
| 3.5.5      | 提高疲劳强度的措施             | 85        |
| 3.6        | 脆性断裂                  | 86        |
| 3.6.1      | 脆性断口宏观形貌特征            | 86        |
| 3.6.2      | 脆性断口微观形貌特征            | 87        |
| 3.6.3      | 影响脆性断裂的原因             | 88        |
| 3.6.4      | 防止脆性断裂的措施             | 90        |
| <b>第4章</b> | <b>钢结构焊接生产工艺</b>      | <b>92</b> |
| 4.1        | 钢结构加工工艺基本知识           | 92        |
| 4.2        | 钢结构焊接工艺审查             | 94        |
| 4.2.1      | 产品结构工艺性审查的一般要求和任务     | 94        |
| 4.2.2      | 工艺性审查的内容              | 94        |
| 4.2.3      | 工艺性审查的方式和程序           | 99        |
| 4.3        | 焊接生产工艺方案设计            | 99        |
| 4.3.1      | 工艺分析和编制工艺方案的原则        | 99        |
| 4.3.2      | 工艺分析的依据和内容            | 99        |

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 4.3.3      | 工艺方案设计的程序          | 100        |
| 4.4        | 钢结构焊接加工工艺流程        | 100        |
| 4.4.1      | 焊接工艺规程的内容          | 100        |
| 4.4.2      | 工艺规程的类型和工艺规程文件     | 101        |
| 4.4.3      | 设计工艺规程的基本要求        | 101        |
| 4.4.4      | 设计工艺规程的主要依据和审批程序   | 104        |
| 4.5        | 钢结构的焊接工艺评定         | 104        |
| 4.5.1      | 焊接工艺评定的程序          | 104        |
| 4.5.2      | 焊接工艺评定的规则          | 105        |
| 4.5.3      | 焊接工艺评定试验           | 107        |
| 4.5.4      | 焊接工艺评定报告           | 107        |
| <b>第5章</b> | <b>钢结构零件备料加工工艺</b> | <b>109</b> |
| 5.1        | 型材的矫正              | 109        |
| 5.1.1      | 型材变形的原因            | 109        |
| 5.1.2      | 矫正原理               | 109        |
| 5.1.3      | 型材的矫正方法            | 110        |
| 5.2        | 材料的预处理             | 112        |
| 5.2.1      | 机械除锈法              | 112        |
| 5.2.2      | 化学除锈法              | 113        |
| 5.3        | 加工前的准备             | 113        |
| 5.3.1      | 钢结构施工图             | 113        |
| 5.3.2      | 划线                 | 114        |
| 5.3.3      | 放样                 | 115        |
| 5.3.4      | 样板与样杆              | 120        |
| 5.4        | 号料                 | 121        |
| 5.4.1      | 号料的方法              | 121        |
| 5.4.2      | 材料的合理利用            | 122        |
| 5.5        | 下料                 | 123        |
| 5.5.1      | 剪切                 | 123        |
| 5.5.2      | 冲裁                 | 125        |
| 5.5.3      | 热切割                | 128        |
| 5.5.4      | 等离子弧切割             | 131        |
| 5.5.5      | 激光切割               | 132        |
| 5.6        | 坯料的边缘加工            | 133        |
| 5.7        | 弯曲                 | 134        |
| 5.7.1      | 弯曲的基本原理及弯曲过程       | 134        |
| 5.7.2      | 折弯设备及弯模            | 136        |
| 5.7.3      | 卷弯                 | 138        |
| 5.8        | 压制成形               | 146        |
| 5.8.1      | 拉延                 | 146        |
| 5.8.2      | 旋压                 | 149        |
| 5.8.3      | 爆炸成形               | 150        |
| 5.8.4      | 缩口、缩颈、扩口成形         | 150        |

|                          |                  |            |
|--------------------------|------------------|------------|
| 5.9                      | 储气罐封头、筒体备料举例     | 152        |
| 5.9.1                    | 封头备料             | 152        |
| 5.9.2                    | 筒体备料             | 153        |
| <b>第6章 钢结构的装配</b>        |                  | <b>155</b> |
| 6.1                      | 钢结构的装配           | 155        |
| 6.1.1                    | 装配的基本条件          | 155        |
| 6.1.2                    | 装配基准的选择          | 155        |
| 6.1.3                    | 零件的定位原理及定位焊      | 156        |
| 6.1.4                    | 装配中的测量           | 158        |
| 6.2                      | 装配用工具与设备         | 160        |
| 6.2.1                    | 装配中常用的工具         | 160        |
| 6.2.2                    | 装配中常用的设备         | 160        |
| 6.2.3                    | 钢结构的装配           | 162        |
| 6.2.4                    | 装配方法的选择          | 164        |
| 6.3                      | 典型焊接结构的装配        | 166        |
| 6.3.1                    | 钢板的拼接            | 166        |
| 6.3.2                    | 框架柱的装配           | 166        |
| 6.3.3                    | 梁的拼接             | 168        |
| 6.3.4                    | 屋架结构的装配          | 169        |
| 6.3.5                    | 容器的装配            | 170        |
| 6.3.6                    | 机架结构的装配          | 171        |
| 6.4                      | 钢结构的焊接工艺参数选择     | 172        |
| 6.4.1                    | 焊接工艺参数的内容和制定原则   | 172        |
| 6.4.2                    | 焊接方法的选择          | 172        |
| 6.4.3                    | 焊接工艺参数的选定        | 173        |
| 6.4.4                    | 确定合理的焊接热参数       | 173        |
| <b>第7章 钢结构装配—焊接用机械装备</b> |                  | <b>176</b> |
| 7.1                      | 概述               | 176        |
| 7.1.1                    | 装配—焊接机械装备在焊接中的作用 | 176        |
| 7.1.2                    | 装配—焊接机械装备的分类     | 177        |
| 7.1.3                    | 装配—焊接机械装备的设计     | 177        |
| 7.1.4                    | 装配—焊接机械的选用       | 178        |
| 7.2                      | 装配—焊接夹具          | 179        |
| 7.2.1                    | 概述               | 179        |
| 7.2.2                    | 加工定位             | 181        |
| 7.2.3                    | 装配—焊接夹紧机构        | 184        |
| 7.3                      | 装配—焊接中的变位机械      | 202        |
| 7.3.1                    | 焊件变位机械           | 202        |
| 7.3.2                    | 焊接滚轮架            | 205        |
| 7.3.3                    | 焊接翻转机            | 208        |
| 7.3.4                    | 焊接回转台            | 210        |
| 7.3.5                    | 焊机变位机械           | 211        |
| 7.3.6                    | 焊工升降台            | 217        |



|             |                       |            |
|-------------|-----------------------|------------|
| 7.4         | 焊接机器人                 | 219        |
| 7.4.1       | 焊接机器人的发展概论            | 219        |
| 7.4.2       | 焊接机器人的分类              | 220        |
| 7.4.3       | 焊接机器人的系统组成            | 222        |
| <b>第8章</b>  | <b>典型钢结构生产工艺</b>      | <b>223</b> |
| 8.1         | 压力容器的生产工艺             | 223        |
| 8.1.1       | 压力容器基础知识              | 223        |
| 8.1.2       | 压力容器焊缝规定              | 225        |
| 8.1.3       | 压力容器焊接接头的设计要求         | 226        |
| 8.1.4       | HG410/100 锅炉汽包容器工艺    | 229        |
| 8.2         | 起重机械                  | 239        |
| 8.2.1       | 桥式起重机的生产工艺            | 239        |
| 8.2.2       | 桁架起重机的生产工艺            | 245        |
| 8.2.3       | 塔式起重机的生产工艺            | 246        |
| 8.3         | 混凝土搅拌机的生产工艺           | 251        |
| 8.3.1       | JS1000 双卧轴强制式搅拌机的基本构造 | 251        |
| 8.3.2       | JS1000 双卧轴强制式搅拌机的生产工艺 | 251        |
| 8.4         | 建筑用钢结构生产工艺            | 256        |
| 8.4.1       | 建筑用钢结构生产工艺            | 256        |
| 8.4.2       | 金属网架生产工艺              | 263        |
| 8.4.3       | 轻型钢结构生产工艺             | 273        |
| 8.4.4       | 钢结构箱形柱焊接生产            | 277        |
| 8.5         | 船体生产工艺过程              | 280        |
| 8.5.1       | 船舶分类与组成               | 280        |
| 8.5.2       | 船体焊接生产                | 281        |
| 8.6         | 国家体育场“鸟巢”简介           | 283        |
| <b>第9章</b>  | <b>钢结构的焊接生产安全</b>     | <b>285</b> |
| 9.1         | 备料及成形加工过程中的安全技术       | 285        |
| 9.1.1       | 备料的安全技术               | 285        |
| 9.1.2       | 成形加工中的安全技术            | 285        |
| 9.2         | 装配中的安全技术              | 286        |
| 9.3         | 钢结构焊接生产中的安全用电         | 286        |
| 9.3.1       | 焊接用电特点                | 286        |
| 9.3.2       | 电流对人体的危害              | 287        |
| 9.3.3       | 发生触电事故的原因             | 287        |
| 9.3.4       | 防护措施                  | 288        |
| 9.3.5       | 触电急救                  | 291        |
| 9.4         | 焊接生产中的卫生与防护           | 291        |
| 9.4.1       | 焊接生产中有害因素来源和危害        | 292        |
| 9.4.2       | 焊接卫生防护措施              | 298        |
| <b>参考文献</b> |                       | <b>304</b> |

# 第1章 钢结构概述

## 1.1 钢结构的特点和类型

### 1.1.1 钢结构的特点

钢结构是指由金属材料轧制的各种型钢(角钢、工字钢、槽钢、钢管等)、钢板、冷加工成形的薄壁型钢以及钢索,锻造、铸造制造的坯料为基本元件,按照结构的形状备料,下料,装配,焊接、铆接或螺栓连接起来,其结构使用安全可靠,并具有一定承受载荷能力的结构。

目前钢结构已在国民经济各部门获得非常广泛的应用,不仅在传统的工业部门,如工业与民用建筑业中的建筑结构,交通运输业中的船舶、车辆、飞机、桥梁,电力部门中的高架塔桅,水工建筑中的闸门、大型管道以及机械工业中的工程机械、重型机械等方面,而且在新兴的宇航工业、海洋工程中都大规模应用了钢结构。钢结构如此广泛的应用,原因在于钢结构与其他材料制成的结构相比,具有下列特点。

① 强度高、重量轻 钢材比木材、砖石、混凝土等建筑材料的强度要高出很多倍,因此,当承受的载荷和条件相同时,用钢材制成的结构自重较轻,所需截面较小,运输和架设亦较方便。

② 塑性和韧性好 钢材具有良好的塑性,在一般情况下,不会因偶然超载或局部超载造成突然断裂破坏,而是事先出现较大的变形预兆,以便采取补救措施。钢材还具有良好的韧性,对作用在结构上的动载荷适应性强,为钢结构的安全使用提供了可靠保证。

③ 材质均匀 经轧制的钢材内部组织均匀,各方向的力学性能基本相同,基本达到各向同性,在一定的应力范围内,钢材处于理想弹性状态,与工程力学所采用的基本假定较符合,故计算结果准确可靠。

④ 制造简单 钢结构是由各种加工制成的型钢和钢板组成,采用焊接、螺栓或铆接等手段制造成基本构件,运至现场装配拼接。故制造简单、施工周期短、效率高,且修配、更换也方便。这种工厂制造、工地安装的施工方法,具备了成批大件生产和成品精度高等优点,同时为降低造价、发挥投资的经济效益创造了条件。

⑤ 密封性和气密性好 钢结构采用焊接方法连接易做到紧密不渗漏,密封性好,适用于制作容器、油罐、油箱、储罐等密封结构。

⑥ 耐腐蚀性差 黑色金属制造的钢结构处于空气中容易生锈,特别是在湿度大或有侵蚀性介质中腐蚀加速,因而需经常维修和保养,如除锈、涂漆等,维护费用较高。

⑦ 耐高温性差 钢材不耐高温,随着温度的升高,钢材强度会降低。在火灾中,未加防护的钢结构一般只能维持20min左右,因此对重要的结构必须注意采取防火措施,如在钢结构外面包混凝土或防火材料,或在构件表面喷涂防火涂料等。

⑧ 钢材的低温脆性 当钢材在其临界温度以下服役时会发生脆性断裂等。

### 1.1.2 钢结构的类型

钢结构应用在各种建筑物和工程构筑物上, 类型很多, 通常可以根据钢结构基本元件的几何特征、结构外形、连接方式及建立的力学计算模型、外载荷与结构构件在空间的相互位置以及计算方法等几种情况来区分。

钢结构根据其基本元件的几何特征, 可分为杆系结构和板壳结构。

若干杆件按照一定的规律组成几何不变结构, 称为杆系结构。其特征是每根杆件的长度远大于宽度和厚度, 即截面尺寸较小。常见的塔式起重机的臂架和塔身是杆系结构 (见图 1-1); 高压输电线路塔架、变电构架、广播电视发射塔架也是杆系结构 (见图 1-2)。

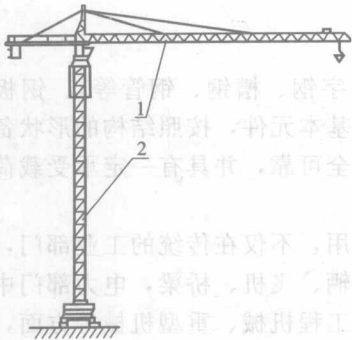


图 1-1 塔式起重机  
1—臂架; 2—塔身

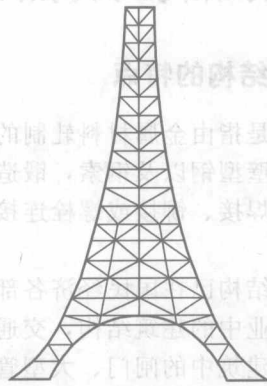


图 1-2 广播电视发射塔架

网架结构是一种高次超静定的空间杆系结构, 也称为网格结构。网架结构空间刚度大、整体性强、稳定性好、安全度高, 具有良好的抗震性能和较好的建筑造型效果, 同时兼有重量轻、材料省、制作安装方便等优点, 因此是适用于大、中跨度屋盖体系的一种良好的结构形式。近 30 年来, 网架结构在国内外得到了普遍的推广应用。

网架结构按外形可分为平板网架 (简称网架, 见图 1-3) 和曲面网架 (简称网壳, 见图 1-4)。平板网架在设计、计算、构造和施工制作等方面都比曲面网架简便, 应用范围较广。网架可布置成双层或三层, 双层网架是最常用的一种网架。网壳的分类可按层数划分和按曲

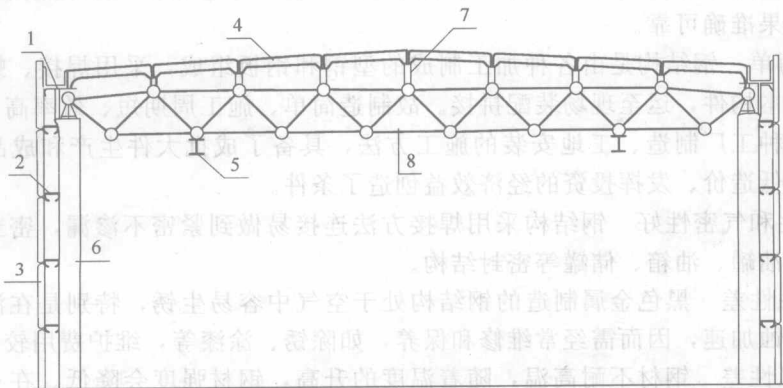


图 1-3 网架

1—内天沟; 2—墙架; 3—太空轻质条形墙板; 4—太空网架板;  
5—悬挂吊车; 6—混凝土柱; 7—找坡小立柱; 8—网架

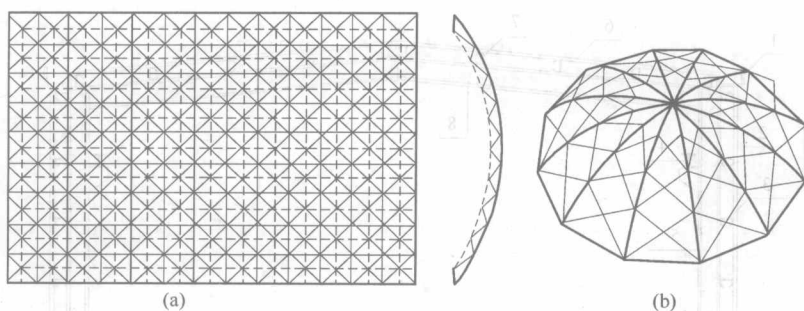


图 1-4 网壳

面外形划分,按层数划分网壳有单层和双层两种,按曲面外形分网壳有球面网壳、柱面网壳、圆锥面网壳、双曲扁网壳、双曲抛物面网壳、单块扭网壳。以上各种网壳可根据需要采用切割、组合等方法,组成新颖、美观的其他网壳结构。

板壳结构是由钢板焊接而成,钢板的厚度远小于其他两个尺寸。按照中面的几何形状,板又分为薄板和薄壳。薄板是中面为平面的板;薄壳是中面为曲面的板。因为板壳结构是由薄板和薄壳组成的,所以板壳结构又称薄壁结构。板壳结构如储气罐、储液罐等要求密闭的容器,大直径高压输油管、输气管等,以及高炉的炉壳、轮船的船体等。另外还有汽车起重机箱形伸缩臂架、转台、车架、支腿(见图 1-5)等。挖掘机的动臂、斗杆、铲斗,门式起重机的主梁、刚性支腿、挠性支腿等也都属于板壳结构。

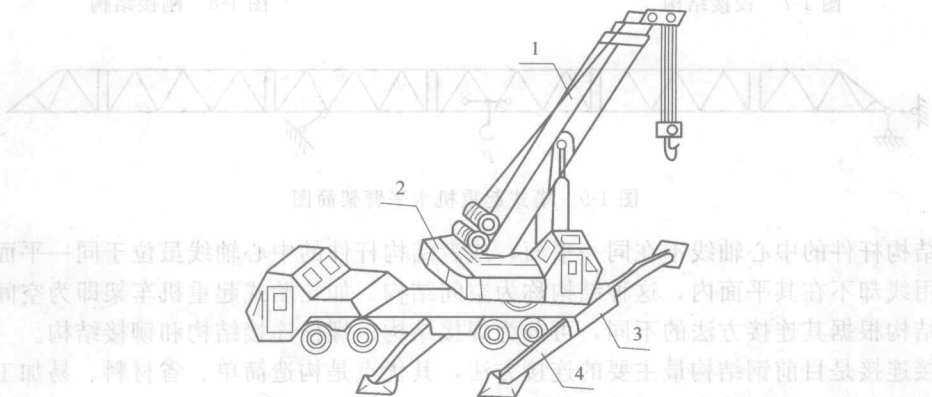


图 1-5 汽车起重机

1—臂架; 2—转台; 3—车架; 4—支腿

钢结构按其外形的不同,可分为臂架结构、车架结构、塔架结构、人字架转台、桅杆、门架结构(见图 1-6)、网架等。

钢结构按其构件的连接方式及建立的力学计算模型的不同,可分为铰接结构(见图 1-7)、刚接结构(见图 1-8)和混合结构。

钢结构根据外载荷与结构杆件在空间的相互位置不同,可分为平面结构和空间结构。外载荷的作用线和全部杆件的中心轴线都处在同一平面内,则结构称为平面结构。在实际结构中,直接应用平面结构的情况较少,但许多实际结构通常由平面结构组合而成,故可简化为平面结构来计算,如塔式起重机水平臂架(见图 1-9),小车轮压、结构自重与桁架式臂架平面共面,因此该臂架可简化为平面结构计算。

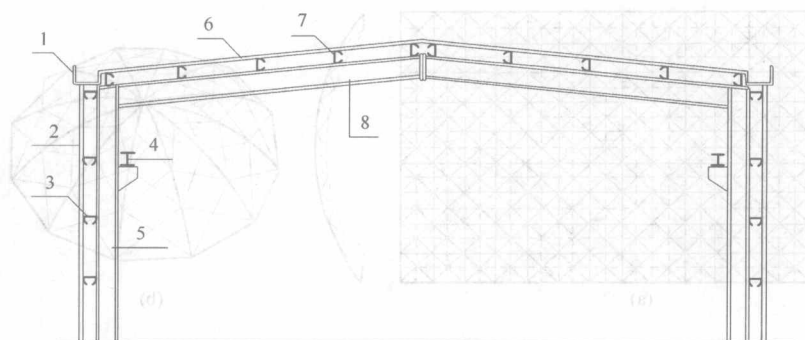


图 1-6 门架结构

1—外天沟；2—压型钢板；3—墙架；4—吊车梁；5—钢架柱；6—压型钢板；7—檩条；8—钢架横梁

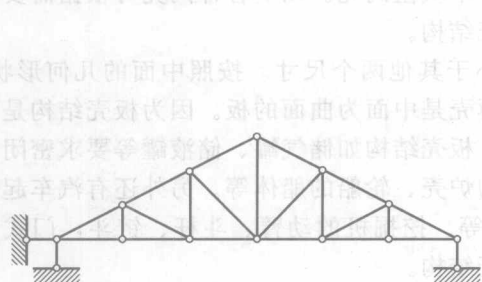


图 1-7 铰接结构

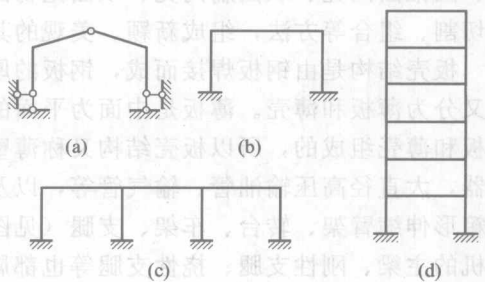


图 1-8 刚接结构

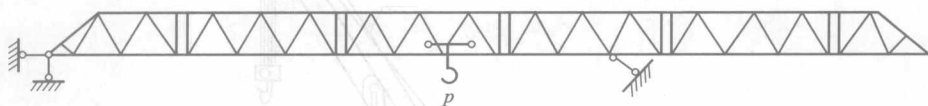


图 1-9 塔式起重机水平臂架简图

当结构杆件的中心轴线不在同一平面，或者结构杆件的中心轴线虽位于同一平面，但外载荷作用线却不在其平面内，这种结构称为空间结构。如轮胎式起重机车架即为空间结构。

钢结构根据其连接方法的不同，可分为焊接结构、螺栓连接结构和铆接结构。

焊接连接是目前钢结构最主要的连接方法，其优点是构造简单、省材料、易加工，并可采用自动化作业，但焊接会引起结构的变形以及产生残余应力。

螺栓连接也是一种较常用的连接方法，有装配便利、迅速的优点，可用于结构安装连接或可拆卸式结构中。缺点是构件截面削弱、易松动。螺栓连接分为普通螺栓连接和高强度螺栓连接两种，普通螺栓又分粗制螺栓和精制螺栓。高强度螺栓的接头承载能力比普通螺栓要高，同时高强度螺栓连接能减轻钉孔对构件的削弱作用，因此，得到广泛的应用。

铆钉连接是一种较古老的连接方法，由于它的塑性和韧性较好，便于质量检查，故经常用于承受动力载荷的结构中。但制造费工、用料多，钉孔削弱构件截面，因此目前在制造业中已逐步由焊接所取代。

钢结构根据其构造的不同，可分为实腹式结构和格构式结构。

实腹式构件的截面组成部分是连续的，一般由轧制型钢制成，常采用角钢、工字钢、T 字型钢、圆钢管、方形钢管等。构件受力较大时，可用轧制型钢或钢板焊接成工字形、圆管形、箱形等组合截面，如汽车起重机箱形伸缩臂架。



格构式构件的截面组成部分是分离的,常以角钢、槽钢、工字钢作为肢件,肢件间由缀材相连。根据肢件数目,又可分为双肢件、三肢件和四肢件。其中双肢式外观平整,易连接,多用于大型桁架的拉、压杆和受压柱;四肢式由于两个主轴方向能达到等强度、等刚度和等稳定性,广泛用于塔机的塔身(见图1-1)、轮胎起重机的臂架等,以减轻重量。根据缀材形式不同,分为缀板式和缀条式。缀条采用角钢或钢管,在大型构件上则用槽钢;缀板采用钢板。

## 1.2 钢结构的发展与应用

### 1.2.1 钢结构的发展

#### (1) 从我国钢铁发展的情况看

钢铁的产量是钢结构发展的基础,是衡量一个国家综合经济实力的重要指标之一,也是中国工业化进程中的支柱产业。1890~1949年的半个多世纪,我国产钢总量仅为760万吨,到1949年,全国产钢量为15.8万吨。1986年以前,我国年产钢量不到5000万吨。到2003年为2.2亿吨,2004年,我国产钢量达到2.7280亿吨,2005年超过3亿吨。我国产钢量从1亿吨到2亿吨,花了7年时间,而从2亿吨到3亿吨钢,仅仅用了2年时间。2005年,我国产钢量年增量高达5046万吨,为历史最高。按增长率算,1996年至今,我国产钢量年年超过亿吨,产钢量平均年增长率在20世纪80年代为5.82%,90年代为6.99%,而2000~2004年的4年间平均年增长率高达20.71%。从6000万吨增长到1亿吨,美国经过13年,日本经过6年,中国为7年。同时我国又是一个钢的消费大国,以钢材和焊接材料表现消费,见图1-10和图1-11。

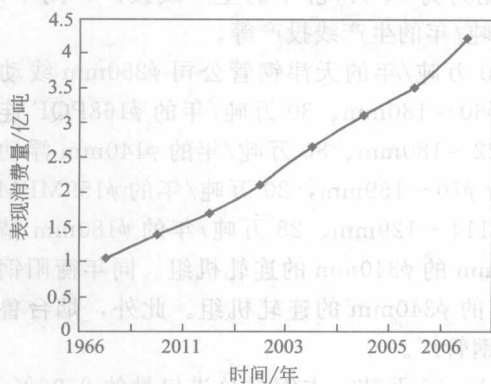


图 1-10 中国钢材表现消费量态势

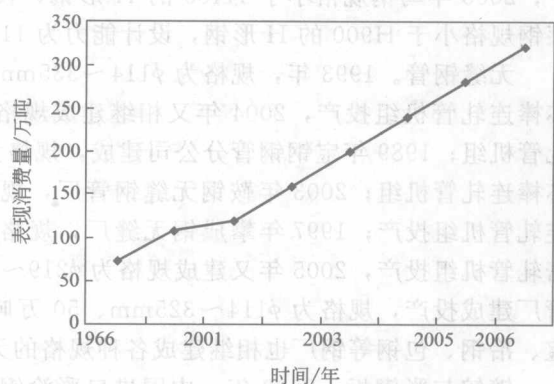


图 1-11 中国焊材表现消费量态势

1996年我国产钢量突破1亿吨,焊接材料总产量达77万吨;尤其是自2001年以来,中国的钢产量出现了跳跃发展,每年钢产量均增加4000万~6000万吨,焊材产量每年增加30万~40万吨。到2006年,中国钢材表现消费量达到4.2亿吨,焊接材料总产量达到320万吨。与1996年相比,同比增长了4倍多。其增长速度之快堪称世界奇迹。2006年,按国际钢铁协会统计,全世界钢的产量12.39亿吨,按有关资料综合测算,全世界焊接材料产量约为600多万吨。为此,2006年中国产钢量占全世界产钢量的34%,中国焊接材料产量占全世界焊接材料总产量的50%左右。预计2008年中国钢材消费量将达到4.5亿~4.8亿吨。据有关专家预测,10年后中国钢材消费量可能达到6亿~7亿吨,相应的焊接材料需求量可能达到400万~450万吨。

#### (2) 从钢结构连接方式看

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,最近则发展了高强度螺栓连接。

### (3) 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。我国在公元前200多年秦始皇时代就曾用铁造桥墩。公元60年左右汉明帝时代建造了铁链悬桥(兰津桥)。山东济宁市铁塔和江苏镇江甘露寺铁塔也是很古老的建筑,1927年建成沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房,1931年建成广州中山纪念堂钢结构圆屋顶,1937年建成钱塘江大铁桥。新中国成立后,钢结构应用日益扩大,如1957年建成武汉长江大桥,1968年建成南京长江大桥。在房屋建筑中,有首都体育馆和上海体育馆等大跨度网架结构,有210m高的上海电视塔和325m高的北京环境气象塔等,还有1958年建成的上海大型湿式储气柜。80年代和90年代在北京、上海、深圳等地陆续兴建了一些高层钢结构大厦,如北京的中国国贸中心(高155.2m)、京城大厦(高182m)、京广中心大厦(高208m),上海的国贸中心大厦(高139m),深圳发展中心大厦(高165m)、地王商业大厦(楼顶面高325m,塔尖处高384m)、上海环球金融中心(高492m)。这些高层钢结构大厦的建成表明了我国高层建筑发展的新趋势。

### (4) 从建筑钢结构用钢看

中厚钢板2004年生产为2300万吨,2005年新增约1200万吨,2006年产量约达到4200万吨。

轧制H形钢。1998年马钢规格为H200~800的H形钢,设计能力为100万吨/年的生产线投产;同年莱钢规格为H50~150的H形钢,设计能力为80万吨/年的生产线投产;2004年日照规格为H100×50~H350×100的H形钢,设计能力为15万吨/年的生产线投产;2005年马钢规格小于H400的H形钢,设计能力为50万吨/年的生产线投产,同年,莱钢规格小于H900的H形钢,设计能力为110万吨/年的生产线投产等。

无缝钢管。1993年,规格为 $\phi 114\sim 335\text{mm}$ 、80万吨/年的天津钢管公司 $\phi 250\text{mm}$ 线芯棒连轧管机组投产,2004年又相继建成规格为 $\phi 60\sim 180\text{mm}$ 、30万吨/年的 $\phi 168\text{PQF}$ 连轧管机组;1989年宝钢钢管分公司建成,规格为 $\phi 22\sim 180\text{mm}$ 、80万吨/年的 $\phi 140\text{mm}$ 浮动芯棒连轧管机组;2003年鞍钢无缝钢管厂,规格为 $\phi 70\sim 159\text{mm}$ 、20万吨/年的 $\phi 159\text{MPM}$ 连轧管机组投产;1997年攀成钢无缝厂,规格为 $\phi 114\sim 129\text{mm}$ 、25万吨/年的 $\phi 180\text{mm}$ 精密轧管机组投产,2005年又建成规格为 $\phi 219\sim 426\text{mm}$ 的 $\phi 340\text{mm}$ 的连轧机组。同年衡阳钢管厂建成投产,规格为 $\phi 114\sim 325\text{mm}$ 、50万吨/年的 $\phi 340\text{mm}$ 的连轧机组。此外,烟台鲁宝、冶钢、包钢等钢厂也相继建成各种规格的无缝钢管厂。

镀锌与彩钢板。2003年,中国进口彩涂钢板110.16万吨,占钢材总进口量的2.96%,2004年,进口彩涂钢板49.36万吨占钢材总进口量的1.68%。2004年,中国彩涂板生产能力1575万吨。至2004年底,全国共有彩涂机组生产线188条。年生产能力在8万吨以上的生产线有70条,生产能力993万吨,8万吨以下的线有118条,生产能力616万吨,占38%。全国共有镀锌机组生产线116条。年生产能力在15万吨以上的线有53条,生产能力1630万吨;15万吨以下的线有63条,生产能力659万吨等。

### (5) 从设计规范看

钢结构设计规范(GBJ17—1988)与1974年规范(TJ17—1974)比较,除对一些问题的处理有合理改进外,还增加了新的内容,这些改进和新增内容也表明了钢结构今后的发展方向。现行的钢结构设计规范与原钢结构设计规范(GBJ17—1988)相比,在设计方法上又有所改进和提高。一方面强调逐步发展高强度低合金钢材,除Q235MPa、Q345MPa、Q390MPa钢外,又增加了Q420MPa和460MPa的钢。其中建筑面积30000m<sup>2</sup>的国家大剧

院所用的钢全部为 Q345MPa, 北京新保利大厦和“水立方”国家游泳馆用的钢为 420MPa。特别强调的是世界上独一无二的北京奥运钢结构场馆“鸟巢”(国家体育场), 采用我国自行设计制造的板厚为 110mm 的 Q460 钢。“鸟巢”建造的成功, 在当今世界上不仅在厚度和使用范围上都前所未有, 而且具有良好的抗震性、抗低温性、可焊性等特点。

钢结构的革新也是今后值得研究的课题, 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。结构设计上考虑优化理论的应用与计算机辅助设计及绘图都得到很大发展, 今后还应继续研究改进。

## 1.2.2 钢结构的应用

钢结构合理的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。随着科学技术不断的发展, 钢结构改进形式不断发展, 钢结构在各行业中得到广泛的应用。

根据我国的实际经验, 钢结构的应用范围大致如下。

① 工业厂房 吊车起重量较大或工作较繁重的车间多采用钢结构。如冶金厂房的平炉、转炉车间, 混铁炉车间, 初轧车间; 重型机械厂的铸钢车间, 水压机车间, 锻压车间等。近年来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、展览馆等皆需大跨结构, 其结构体系可为网架、悬索、拱架以及框架等。

③ 高耸结构 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 多层与高层建筑 多层和高层建筑的骨架常采用钢结构。我国过去钢材比较短缺, 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 承受振动载荷及地震作用的结构 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。对于抗地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 包括轻型门式钢架房屋钢结构, 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, 并在住宅楼和别墅方面也得到广泛应用。

⑩ 和混凝土组合成的组合结构 如组合梁和钢筋混凝土柱等, 另外还有化工设备、船只、桥梁、交通运输等。

## 1.3 钢结构的材料

### 1.3.1 钢结构对材料的要求

钢结构所用的钢必须符合下列要求。

① 较高的抗拉强度  $f_u$  和屈服点  $f_y$   $f_y$  是衡量结构承载能力的指标,  $f_y$  高则可减轻结

构自重、节约钢材和降低造价。 $f_u$ 是衡量钢材经过较大变形后的抗拉能力,它直接反映钢材内部组织的优劣,同时 $f_u$ 高可以增加结构的安全保障。

② 较高的塑性和韧性 塑性和韧性好,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,同时又具有较好的抵抗交变荷载作用的能力。

③ 良好的工艺性能 良好的工艺性能不但能保证通过冷加工、热加工和焊接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良影响。

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;焊接结构尚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还应具有常温或低温冲击韧性的合格保证。

### 1.3.2 钢结构的破坏形式

钢材可能发生的破坏形式有塑性破坏、脆性断裂破坏、疲劳破坏和损伤累积破坏。对于钢结构而言,除上述破坏外,还有由体系本身所引起的稳定破坏。因此,钢结构的可能破坏形式有:

- ① 结构的整体失稳;
- ② 结构和构件的局部失稳;
- ③ 结构的塑性破坏;
- ④ 结构的脆性断裂;
- ⑤ 结构的疲劳破坏;
- ⑥ 结构的损伤累积破坏等。

#### 1.3.2.1 结构的整体失稳破坏

##### (1) 稳定的概念

结构整体失稳破坏是指结构所承受的外荷载尚未达到按强度计算得到的结构强度破坏荷载时,结构已不能承担荷载并产生较大的变形,整个结构偏离原来的平衡位置而倒塌。

结构在荷载作用下处于平衡位置,微小外界扰动使其偏离平衡位置,若外界扰动除去后仍能回复到初始平衡位置,则是稳定的;若外界扰动除去后不能回复到初始平衡位置,且偏离初始平衡位置愈来愈远,则是不稳定的;若外界扰动除去后不能回复到初始平衡位置,但仍能停留在新的平衡位置,则是临界状态,也称随遇平衡。由此可见,钢结构在失稳过程中,变形是迅速持续增长的,结构将在很短时间内破坏甚至倒塌。例如,1907年8月29日在建的加拿大圣劳伦斯河上的魁北克大桥(钢桁架三跨悬式桥,中跨长549m,两边跨各长152m),因悬伸部分的受压下弦杆失稳,导致已安装好的19000吨钢材件垮了下来,造成75名桥上施工人员遇难。整个事故过程仅15s。因此应特别重视受压构件的整体失稳破坏。

##### (2) 失稳的类别

失稳破坏是钢结构的主要破坏形式,必须予以充分重视。最常见的有以下五类。

① 欧拉屈曲 这类失稳的特点是在达到临界状态前,结构保持初始平衡位置,在达到临界状态时,结构从初始的平衡位置过渡到无限临近新的平衡位置,此后变形进一步增大,要求荷载增加。结构在临界状态出现这类现象称为结构屈曲。由于结构在该时刻发生了平衡形式的转移,平衡状态出现分岔,因此也称平衡分枝。这类稳定问题最早由欧拉提出并加以研究,也有称为第一类失稳或欧拉屈曲的,相应的荷载值称为屈曲荷载、平衡分枝荷载或欧