

XINGGANG GANGGUAN HUNNINGTU GAOLU JISUAN HE GOUZAO

# 型钢 钢管混凝土高楼 计算和构造

刘大海 杨翠如 编著

● 中国建筑工业出版社

# 型钢混凝土高楼 钢管

## 计算和构造

刘大海 杨翠如 编著



中国建筑工业出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

型钢、钢管混凝土高楼计算和构造/刘大海 杨翠如  
编著. —北京:中国建筑工业出版社, 2003

ISBN 7-112-05766-3

I. 型… II. ①刘…②杨… III. ①高层建筑—钢  
结构, 型钢: 混凝土结构—建筑结构—结构计算②高层  
建筑—钢管结构: 混凝土结构—建筑结构—结构计算  
IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 025263 号

**型钢  
钢管混凝土高楼计算和构造**

刘大海 杨翠如 编著

\*

中国建筑工业出版社 出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28½ 字数: 692 千字

2003 年 9 月第一版 2003 年 9 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 36.00 元

ISBN 7-112-05766-3

TU·5065 (11405)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

钢结构、钢筋混凝土结构、型钢混凝土结构和钢管混凝土结构，是当前广泛应用于高层建筑的四大结构类型。后两类是近期发展起来的具有广阔前景的新型结构，它融合了钢结构和钢筋混凝土结构的优点，承载力高、延性好、变形能力强，从而具有较强的抗风和抗震能力。新近落成的上海金茂大厦、深圳地王大厦、赛格广场大厦、香港中环东北大楼、长江中心大厦、台北国际金融中心、高雄国际广场大厦等，就是这两类新型结构的工程实例。

本书根据工程设计的需要，首先给出型钢混凝土结构和钢管混凝土结构各种结构体系的工程实例，剖析其结构受力特点，列出其抗风、抗震计算结果，构件截面尺寸和构造细部。随后，按照各本结构设计规范、技术规程 2002 年新版，针对型钢混凝土构件、钢管混凝土构件、压型钢板组合楼板及钢-混凝土组合梁，给出结构计算原理、构件及其连接的抗震和非抗震计算公式，并进一步绘出各种构件节点的连接详图。

本书供建筑设计、施工、科研人员及土建专业师生阅读。

\* \* \*

责任编辑 戚大庆 王梅

责任设计 孙梅

责任校对 刘玉英

# 前言

近 30 年来,我国经济快速发展,很多大城市都兴建了大量高层建筑,但多数采用钢筋混凝土结构。随着高层建筑层数的增多,构件截面尺寸显得过大,占据了较多的使用面积,已影响到建筑使用功能的充分发挥。随着建筑用途的多样化,多功能综合性大楼的出现,建筑底部多个楼层要求具有较大的使用空间,以及建筑上、下段不同结构体系的转换,单一钢筋混凝土结构已不再适应。近十多年来,北京、上海、广州、福州、深圳等城市兴建的高层建筑,已较多地采用型钢混凝土结构和钢管混凝土结构。从发展趋势看,钢筋混凝土结构、钢结构、型钢混凝土结构和钢管混凝土结构,即将并列为高层建筑的四大主要结构类型。

型钢混凝土结构是由内部型钢骨架和外包钢筋混凝土所形成的组合结构,与钢筋混凝土构件相比较,具有大得多的承载能力,也具有大得多的结构延性和韧性。钢管混凝土结构则是在圆形、矩形钢管内灌填素混凝土所形成的组合结构,在具有较大承载力的同时,结构的延性和韧性得到进一步地提高,抗震性能更优;与钢筋混凝土结构相比较,它的应用范围更加广阔,它适用于层数更多的超高层建筑,以及要求具有较大使用空间、较小构件截面尺寸的框支层结构。上海市近期建成的 88 层、高 383m 的金茂大厦和正在兴建的 95 层、高 460m 的环球金融中心大厦,均采用型钢混凝土结构。深圳市 1996 年建成的 79 层、高 325m 的地王商业大厦,1999 年建成的 72 层、高 292m 的赛格广场大厦,香港的 62 层、高 283 层的长江中心大厦,以及台北正在兴建的 101 层、高 482m 的国际金融中心大厦,都是采用钢管混凝土结构。

本书注重实用。结构材料一章,着重给出行业标准 YB 4104—2000 对高层建筑结构用钢板所作的规定,以及高强度、高性能混凝土的各项要求。在第二、四章中,给出各种结构体系的构件组成,剖析其结构受力特点、侧力变形属性的同时,分别给出采用各种结构体系的多个工程实例,列出其结构平、剖面,构件截面尺寸、抗风、抗震计算结果,以及构件节点的细部构造,供工程设计时借鉴。在第三、五章中,分别给出型钢混凝土构件、钢管混凝土构件的常规和抗震构造要求、计算原则以及构件强度和变形计算公式。钢管混凝土结构的设计难点在于梁与柱的连接构造是否经济、有效和方便施工,本书第五章针对多种情况给出钢梁、钢筋混凝土梁与钢管混凝土柱的刚性连接、半刚性连接及铰接的构造详图。

本书的编写,得到甘锡滢、洪思闽、谢绍松、陈纯森、方鄂华、叶列平、蔡益燕、钟善桐、韩林海、沈祖炎、姜维山教授多篇论文和专著的启示和指导,以及中国建筑西北设计研究院领导的支持,在此一并致以深切谢意。

刘大海 杨翠如

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| <b>第一章 结构材料</b> .....           | 1  |
| <b>第一节 结构钢</b> .....            | 1  |
| 一、钢材性能 .....                    | 1  |
| 二、国产钢材 .....                    | 2  |
| 三、国外钢材 .....                    | 19 |
| <b>第二节 钢材连接件</b> .....          | 24 |
| 一、焊接材料 .....                    | 24 |
| 二、高强度螺栓 .....                   | 26 |
| 三、圆柱头栓钉 .....                   | 31 |
| 四、锚栓 .....                      | 32 |
| <b>第三节 钢筋混凝土材料</b> .....        | 32 |
| 一、钢筋 .....                      | 32 |
| 二、混凝土 .....                     | 33 |
| <b>第二章 型钢混凝土结构体系和工程实例</b> ..... | 35 |
| <b>第一节 结构特征</b> .....           | 35 |
| 一、结构构件 .....                    | 35 |
| 二、框架类型 .....                    | 37 |
| <b>第二节 框架体系</b> .....           | 37 |
| <b>第三节 框-墙体系</b> .....          | 38 |
| 一、结构特征 .....                    | 38 |
| 二、工程实例 .....                    | 38 |
| <b>第四节 芯筒-框架体系</b> .....        | 42 |
| 一、结构特征 .....                    | 42 |
| 二、工程实例 .....                    | 42 |
| <b>第五节 框筒体系</b> .....           | 54 |
| <b>第六节 筒中筒体系</b> .....          | 56 |
| 一、结构特征 .....                    | 56 |
| 二、工程实例 .....                    | 57 |
| <b>第七节 芯筒-翼柱体系</b> .....        | 67 |
| 一、结构特征 .....                    | 67 |
| 二、工程实例 .....                    | 67 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第三章 型钢混凝土构件的计算和构造</b>  | 84  |
| <b>第一节 基本要求</b>           | 84  |
| 一、结构性能                    | 84  |
| 二、高度和侧移                   | 86  |
| 三、一般构造要求                  | 87  |
| 四、计算原则                    | 90  |
| 五、构件刚度                    | 93  |
| 六、施工阶段验算                  | 94  |
| <b>第二节 型钢混凝土梁</b>         | 94  |
| 一、构造要求                    | 94  |
| 二、受弯承载力                   | 97  |
| 三、受剪承载力                   | 103 |
| 四、梁的挠度计算                  | 109 |
| 五、裂缝宽度验算                  | 112 |
| 六、计算例题                    | 114 |
| <b>第三节 型钢混凝土柱</b>         | 117 |
| 一、构造要求                    | 117 |
| 二、压弯承载力                   | 121 |
| 三、拉弯承载力                   | 137 |
| 四、受剪承载力                   | 139 |
| 五、计算例题                    | 144 |
| <b>第四节 型钢混凝土剪力墙</b>       | 153 |
| 一、基本要求                    | 153 |
| 二、构造要求                    | 154 |
| 三、正截面承载力验算                | 156 |
| 四、斜截面承载力计算                | 161 |
| 五、计算例题                    | 167 |
| <b>第五节 构件连接</b>           | 172 |
| 一、钢骨的接头                   | 172 |
| 二、框架的梁-柱节点                | 176 |
| 三、柱与柱的连接                  | 190 |
| 四、梁与墙的连接                  | 194 |
| 五、柱脚                      | 197 |
| <b>第六节 设计例题</b>           | 205 |
| 一、多层框架                    | 205 |
| 二、框架梁                     | 205 |
| 三、框架柱                     | 210 |
| 四、框架梁-柱节点                 | 215 |
| 五、柱脚设计                    | 218 |
| <b>第四章 钢管混凝土结构体系和工程实例</b> | 219 |
| <b>第一节 钢管混凝土杆件和结构</b>     | 219 |
| 一、发展概况                    | 219 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 二、结构性能 .....                   | 221        |
| 三、高层建筑中的应用 .....               | 226        |
| 第二节 部分采用钢管混凝土柱 .....           | 228        |
| 一、结构组成 .....                   | 228        |
| 二、工程实例 .....                   | 228        |
| 第三节 钢管混凝土框架-支撑体系 .....         | 241        |
| 一、结构特征 .....                   | 241        |
| 二、工程实例 .....                   | 241        |
| 第四节 钢管混凝土框架和框-墙体系 .....        | 243        |
| 一、结构特征 .....                   | 243        |
| 二、工程实例 .....                   | 245        |
| 第五节 钢管混凝土框架-芯筒体系 .....         | 250        |
| 一、结构特征 .....                   | 250        |
| 二、工程实例 .....                   | 251        |
| 第六节 钢管混凝土框筒体系 .....            | 275        |
| 一、结构特征 .....                   | 275        |
| 二、工程实例 .....                   | 276        |
| 第七节 钢管混凝土巨型框架体系 .....          | 278        |
| 一、结构特征 .....                   | 278        |
| 二、工程实例 .....                   | 279        |
| 第八节 轻型钢结构住宅 .....              | 283        |
| 一、结构特点 .....                   | 283        |
| 二、工程实例 .....                   | 284        |
| <b>第五章 钢管混凝土构件的计算和构造 .....</b> | <b>292</b> |
| 第一节 基本要求 .....                 | 292        |
| 一、材料 .....                     | 292        |
| 二、圆钢管混凝土杆件 .....               | 293        |
| 三、构件抗震等级 .....                 | 299        |
| 第二节 圆钢管混凝土柱承载力计算 .....         | 299        |
| 一、套箍指标设计法 .....                | 299        |
| 二、强度增值设计法 .....                | 306        |
| 三、组合强度设计法 .....                | 308        |
| 第三节 方钢管混凝土柱承载力计算 .....         | 317        |
| 一、方管柱的特点 .....                 | 317        |
| 二、国外计算方法 .....                 | 319        |
| 三、GJB 4142—2000 规程计算方法 .....   | 321        |
| 四、简单叠加法 .....                  | 324        |
| 第四节 钢管混凝土杆件刚度 .....            | 327        |
| 一、抗压刚度 .....                   | 327        |
| 二、抗剪刚度 .....                   | 328        |
| 三、抗弯刚度 .....                   | 329        |
| 四、抗侧移刚度 .....                  | 329        |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第五节 杆件接头和框架节点 .....  | 341 |
| 一、基本要求 .....         | 341 |
| 二、钢管接头 .....         | 341 |
| 三、钢梁-管柱刚接节点 .....    | 345 |
| 四、混凝土梁-管柱刚接节点 .....  | 362 |
| 五、混凝土梁-管柱半刚性节点 ..... | 373 |
| 六、梁-柱铰接节点 .....      | 376 |
| 七、柱顶、柱脚节点 .....      | 382 |
| 第六节 钢管混凝土构件的施工 ..... | 387 |
| 一、钢管制作 .....         | 387 |
| 二、管内混凝土的浇灌 .....     | 388 |
| 第六章 钢-混凝土组合楼盖 .....  | 390 |
| 第一节 组合板设计 .....      | 390 |
| 一、压型钢板 .....         | 390 |
| 二、构造要求 .....         | 397 |
| 三、施工阶段验算 .....       | 400 |
| 四、使用阶段验算 .....       | 402 |
| 五、试验确定承载力 .....      | 408 |
| 六、计算例题 .....         | 408 |
| 第二节 组合梁设计 .....      | 412 |
| 一、构造要求 .....         | 412 |
| 二、施工阶段验算 .....       | 417 |
| 三、使用阶段验算 .....       | 420 |
| 四、组合梁塑性设计 .....      | 421 |
| 五、组合梁弹性设计 .....      | 423 |
| 六、连续组合梁强度验算 .....    | 427 |
| 七、叠合面连接件的计算 .....    | 430 |
| 八、板与梁纵向界面抗剪验算 .....  | 436 |
| 九、部分抗剪连接组合梁 .....    | 438 |
| 十、组合梁的整体稳定 .....     | 439 |
| 十一、组合梁的变形验算 .....    | 440 |
| 参考文献 .....           | 445 |

# 第一章 结 构 材 料

## 第一节 结 构 钢

### 一、钢材性能

#### (一) 通用要求

为保证承重结构的承载能力及防止在一定条件下出现脆性破坏，高层建筑中的承重构件和承力构件（竖向支撑等），其钢材牌号和材性的选定，应符合行业标准 YB 4104—2000《高层建筑结构用钢板》的规定，并应符合下列要求：

1. 考虑结构的重要性、荷载特征、结构型式、连接方法、钢材厚度、环境温度和构件所处部位等情况的不同要求；

2. 钢材的抗拉强度、伸长率、屈服强度、强屈比、冷弯试验、冲击韧性等各项指标合格；

3. 硫、磷的含量低于限值。

#### (二) 焊接结构附加要求

##### 1. 含碳量

(1) 钢材的含碳量不应超过焊接性能所规定的限值。

(2) Q235-D 级钢，含碳量小于 0.17%，硫、磷含量小于 0.035%，可焊性较好。

##### 2. 断面收缩率

(1) 厚度较大的钢板，在轧制过程中存在着各向异性。由于在杆件的板件连接处常形成较强的约束，焊接时容易引起钢板的层状撕裂，因此，要求钢板的断面收缩率不小于某一规定值。JGJ 81—2002《建筑钢结构焊接技术规程》规定，板件厚度  $t \geq 40\text{mm}$  时应采用厚度方向性能钢板。

(2) 采用焊缝连接的梁-柱节点和支撑节点，节点的约束较强。当钢板厚度等于或大于 40mm，并承受沿板厚方向的拉力作用时（包括强约束节点因焊缝收缩引起的拉应力），为防止钢材的层状撕裂，而采用 Z 向钢时，应附加‘受拉试件板厚方向截面收缩率’不小于 Z15 级规定的要求<sup>[4]</sup>。

(3) 根据国家标准 GB/T 5313《厚度方向性能钢板》的规定，Z 向性能级别为 Z15 级的钢板性能应符合下列要求：①截面收缩率  $\phi_z$ ，单个试样值和三个试样平均值，应分别不小于 10% 和 15%；②硫的含量（熔炼分析）不大于 0.01%。过多的硫化物在钢板热压过程中会形成平行于钢板表面的、可视为微裂缝的非金属薄片夹层，降低板厚方向的抗拉强度。

3. 钢材的冷弯性能必须符合要求。

#### (三) 抗震结构附加要求

1. 钢材的“强屈比”应不小于 1.2，抗震设防烈度为 8 度和 8 度以上时，则不应小于 1.5，以确保结构具有足够的安全储备。强屈比是指钢材的极限抗拉强度实测值  $f_u$  与屈服

强度实测值  $f_{ay}$  的比值。

- 2. 钢材的拉伸试验应具有明显的屈服台阶。
- 3. 钢材的伸长率应大于 20% (标距 50mm), 以保证构件具有足够的塑性变形能力。
- 4. 钢材应具有能保持足够延性的良好可焊性。
- 5. 抗震类别为甲类或乙类的高层建筑钢结构, 钢材的屈服强度平均值不宜超过其规定值 (标准值) 的 10%, 以免构件的塑性铰位置发生不符合“强柱弱梁”等设计要求的转移。
- 6. 钢材的冲击韧性必须得到保证。
- 7. 抗震设防高层建筑中仅承受重力荷载的钢构件, 上述各项要求可适当放宽。
- 8. GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》规定, 板件厚度  $t \geq 40\text{mm}$  时应采用厚度方向性能钢板。

(四) 特殊构件附加要求

- 1. 处于外露环境、且对大气腐蚀有特殊要求的承重和承力钢构件, 宜采用耐候钢 (耐大气腐蚀能力约为碳素钢的 4~8 倍), 其质量要求应符合现行国家标准 GB/T 4172《焊接结构用耐候钢》的规定。
- 2. 处于低温环境下的承重和承力钢构件, 其钢材性能尚应符合“避免低温冷脆”的要求。
- 3. 重要的受拉或受弯的焊接结构以及需要验算疲劳的焊接结构, 其钢材的低温性能应符合表 1-1 的要求。这是因为脆断主要发生在受拉区, 危险性较大。所以, 对受拉或受弯的焊接构件所使用钢材的质量要求, 比对受压 (含压弯) 构件的质量要求更高。

重要焊接结构钢材的低温性能 表 1-1

| 钢材牌号 \ 室外气温    | - 20 ~ - 10℃   | 低于 - 20℃       |
|----------------|----------------|----------------|
| Q235           | 0℃ 冲击韧性合格保证    | - 20℃ 冲击韧性合格保证 |
| Q345、Q390、Q420 | - 20℃ 冲击韧性合格保证 | - 40℃ 冲击韧性合格保证 |

二、国产钢材

(一) 牌号表示法

- 1. 钢的牌号 (例如 Q235-A·F) 由如下四部分按顺序组成: ①代表屈服强度的字母“Q”; ②屈服强度值, 如 235 等; ③质量等级符号, A、B、C、D、E 等; ④脱氧方法符号, 如 F (沸腾钢)、b (半镇静钢)、Z (镇静钢) 和 TZ (特殊镇静钢)。
- 2. 在牌号组成表示方法中, “Z” 和 “TZ” 符号予以省略。
- 3. 行业标准 YB 4104—2000 规定, 高层建筑结构用钢板的牌号表示为 Q345GJC, 它是由以下四部分按顺序组成: ①表示屈服点的汉语拼音字母“Q”; ②屈服点数值; ③代表高层建筑的汉语拼音字母“GJ”; ④质量等级符号“C、D、E”。对于厚度方向性能钢板, 则在质量等级符号之前加上厚度方向性能级别“Z15、Z25、Z35”, 例如 Q345GJZ15C。

(二) 钢材牌号

- 1. 选用原则  
高层建筑钢结构, 应根据其构件的重要性和焊接要求, 选用不同等级的钢材。
- 2. 适用钢材  
(1) YB4104—2000 规定, 高层建筑钢结构的钢材, 宜采用 Q235 (原 3 号钢) C、D、

E 等级的碳素结构钢，或采用 Q345（包括原 16Mn 钢）C、D、E 等级的低合金高强度结构钢。

(2) 重要的焊接构件宜采用碳、硫、磷含量较低的 C、D、E 级碳素结构钢和 D、E 级低合金结构钢。

(3) 屈服强度超过 350N/mm<sup>2</sup> 的高强度钢材，要经过充分研究，证明其性能符合要求后，方可在抗震设防的高层建筑钢结构中应用。若用于型钢混凝土构件中，为使型钢芯柱的屈服应变小于混凝土压碎时的应变，钢材的强度设计值不应超过 350N/mm<sup>2</sup>。

(4) 上海宝钢集团近期开发生产的耐火耐候钢，其耐候性为普通钢的 2~8 倍，其耐火性达到 600℃ 高温时钢材屈服强度降低幅度不超过 30%；而价格仅比普通钢贵 10%。有条件时，工程中应优先采用耐火耐候钢，以提高结构的安全性和耐久性。

3. 不适用钢材

(1) Q235-A 级钢和 Q345-A 级钢，因为不保证冷弯性能、冲击韧性和焊接需要的低含碳量，所以不能用于高层建筑中的主要承重和承力构件。

(2) Q390 钢（原 15MnV）及其桥梁钢，其伸长率小于 20%，不宜用于高层建筑钢结构。

4. 下列情况的承重构件和承力构件（竖向支撑等），不宜采用 Q235 沸腾钢。

(1) 非焊接结构

室外空气温度等于或低于 -20℃ 的直接承受动力荷载且需要验算疲劳的结构。

(2) 焊接结构

1) 直接承受动力荷载或振动荷载且需要验算疲劳的结构。

2) 室外空气温度低于 -20℃ 时的下列结构：① 承受静力荷载的受拉或受弯（拉应力较大）的重要承重结构；② 直接承受动力荷载或振动荷载但可不验算疲劳的结构。

3) 室外空气温度等于或低于 -30℃ 的所有承重结构。

[注]：① 室外空气温度指国家标准《采暖通风和空气调节设计规范》所列出的最低日平均气温。

② 对采暖房屋内的结构，可按该值提高 10℃ 采用。

5. 国家标准

(1) Q235 钢的质量标准，应符合我国现行国家标准 GB/T 700《碳素结构钢》的规定。

(2) Q345 钢、Q390 钢和 Q420 钢的质量标准，应符合我国现行国家标准 GB/T 1591《低合金高强度结构钢》的规定。

(三) 钢材强度

1. 高层建筑钢结构所采用的国产钢材，按照 GB 50017—2003 和 JGJ 99—98 的规定，其强度设计值（材料强度标准值除以抗力分项系数）应根据计算截面的钢材厚度或直径，按表 1-2 规定取值。

国产钢材的设计用强度值 (N/mm<sup>2</sup>)

表 1-2

| 钢 材    |    |               | 极限抗拉强度<br>最小值<br>$f_u$ | 屈服强度<br>(强度标准值)<br>$f_{ay}$ | 强度设计值            |             |                         |
|--------|----|---------------|------------------------|-----------------------------|------------------|-------------|-------------------------|
| 牌号     | 组别 | 厚度或直径<br>(mm) |                        |                             | 抗拉、抗压<br>和抗弯 $f$ | 抗剪<br>$f_v$ | 端面承压<br>(刨平顶紧) $f_{ce}$ |
| Q235 钢 | 一组 | ≤16           | 375                    | 235                         | 215              | 125         | 325                     |
|        | 二组 | >16~40        |                        | 225                         | 205              | 120         |                         |
|        | 三组 | >40~60        |                        | 215                         | 200              | 115         |                         |
|        | 四组 | >60~100       |                        | 205                         | 190              | 110         |                         |

续表

| 钢 材    |    |                 | 极限抗拉强度<br>最小值<br>$f_u$ | 屈服强度<br>(强度标准值)<br>$f_{ay}$ | 强度设计值            |             |                         |
|--------|----|-----------------|------------------------|-----------------------------|------------------|-------------|-------------------------|
| 牌号     | 组别 | 厚度或直径<br>(mm)   |                        |                             | 抗拉、抗压<br>和抗弯 $f$ | 抗剪<br>$f_v$ | 端面承压<br>(刨平顶紧) $f_{ce}$ |
| Q345 钢 | 一组 | $\leq 16$       | 470                    | 345                         | 310              | 180         | 400                     |
|        | 二组 | $> 16 \sim 35$  |                        | 325                         | 295              | 170         |                         |
|        | 三组 | $> 35 \sim 50$  |                        | 295                         | 265              | 155         |                         |
|        | 四组 | $> 50 \sim 100$ |                        | 275                         | 250              | 145         |                         |
| Q390 钢 | 一组 | $\leq 16$       |                        | 390                         | 350              | 205         | 415                     |
|        | 二组 | $> 16 \sim 35$  |                        | 375                         | 335              | 190         |                         |
|        | 三组 | $> 35 \sim 50$  |                        | 350                         | 315              | 180         |                         |
|        | 四组 | $> 50 \sim 100$ |                        | 330                         | 295              | 170         |                         |
| Q420 钢 | 一组 | $\leq 16$       |                        |                             | 380              | 220         | 440                     |
|        | 二组 | $> 16 \sim 35$  |                        |                             | 360              | 210         |                         |
|        | 三组 | $> 35 \sim 50$  |                        |                             | 340              | 195         |                         |
|        | 四组 | $> 50 \sim 100$ |                        |                             | 325              | 185         |                         |

2. 钢铸件的强度设计值应按表 1-3 中的规定采用。

钢铸件的强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>) 表 1-3

| 钢号        | 抗拉、抗压和抗弯<br>$f$ | 抗弯<br>$f_v$ | 端面承压 (刨平顶紧)<br>$f_{ce}$ |
|-----------|-----------------|-------------|-------------------------|
| ZG200-400 | 155             | 90          | 260                     |
| ZG230-450 | 180             | 105         | 290                     |
| ZG270-500 | 210             | 120         | 325                     |
| ZG310-570 | 240             | 140         | 370                     |

(四) 钢材物理性能

钢材和钢铸件的物理性能指标应按表 1-4 所列数值采用。

钢材和钢铸件的物理性能指标 表 1-4

| 弹性模量 $E_s$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 剪变模量 $G_s$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 线膨胀系数 $\alpha$<br>(以每℃计) | 质量密度 $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| $2.06 \times 10^5$                 | $0.79 \times 10^5$                 | $12 \times 10^{-6}$      | 7850                                |

(五) 钢材化学成分

1. 钢材的化学成分及其含量，将直接影响钢材的可焊性，应该得到保证。

2. 碳素结构钢

根据国家标准 GB 700—88《碳素结构钢》的规定，碳素结构钢（低碳钢）的牌号及其对应的化学成分，应符合表 1-5 的要求。

碳素结构钢的牌号和化学成分

表 1-5

| 钢的牌号 | 质量等级 | 化学成分 (%)  |                        |     |       |       | 脱氧方法  |
|------|------|-----------|------------------------|-----|-------|-------|-------|
|      |      | C         | Mn                     | Si  | S     | P     |       |
|      |      |           |                        | 不大于 |       |       |       |
| Q235 | A    | 0.14~0.22 | 0.30~0.65 <sup>①</sup> | 0.3 | 0.050 | 0.045 | F、b、Z |
|      | B    | 0.12~0.20 | 0.30~0.70 <sup>①</sup> |     | 0.045 |       |       |
|      | C    | ≤0.18     | 0.35~0.80              |     | 0.040 | 0.040 | Z     |
|      | D    | ≤0.17     |                        |     | 0.035 | 0.035 | TZ    |

①表示 Q235A、B 级沸腾钢的锰含量上限为 0.60%。

### 3. 低合金高强度结构钢

根据国家标准 GB/T 1591—94《低合金高强度结构钢》的规定，低合金高强度结构钢的牌号和化学成分应符合表 1-6 的要求。

低合金高强度钢的牌号和化学成分

表 1-6

| 牌号    | 质量等级 | 化学成分 (%) |           |         |        |        |           |             |           |         |
|-------|------|----------|-----------|---------|--------|--------|-----------|-------------|-----------|---------|
|       |      | C<br>≤   | Mn        | Si<br>≤ | P<br>≤ | S<br>≤ | V         | Nb          | Ti        | Al<br>≥ |
| ≥Q345 | A    | 0.20     | 1.00~1.60 | 0.55    | 0.045  | 0.045  | 0.02~0.15 | 0.015~0.060 | 0.02~0.20 |         |
|       | B    | 0.20     | 1.00~1.60 | 0.55    | 0.040  | 0.040  | 0.02~0.15 | 0.015~0.060 | 0.02~0.20 |         |
|       | C    | 0.20     | 1.00~1.60 | 0.55    | 0.035  | 0.035  | 0.02~0.15 | 0.015~0.060 | 0.02~0.20 | 0.015   |
|       | D    | 0.18     | 1.00~1.60 | 0.55    | 0.030  | 0.030  | 0.02~0.15 | 0.015~0.060 | 0.02~0.20 | 0.015   |
|       | E    | 0.18     | 1.00~1.60 | 0.55    | 0.025  | 0.025  | 0.02~0.15 | 0.015~0.060 | 0.02~0.20 | 0.015   |

注：表中的 Al 为全铝含量，如化验酸溶铝时，其含量应不小于 0.01%。

### 4. 高层建筑结构用钢板

(1) 根据行业标准 YB 4104—2000 的规定，高层建筑结构用钢板（厚度为 6~100mm）的钢由氧气转炉或电炉冶炼，钢的牌号及化学成分（熔炼分析）应符合表 1-7 的规定。

高层建筑结构用钢板的牌号及化学成分

表 1-7

| 牌号      | 质量等级 | 厚度 (mm) | 化学成分 (%) |       |                   |        |           |      |       |      |        |
|---------|------|---------|----------|-------|-------------------|--------|-----------|------|-------|------|--------|
|         |      |         | C        | Si    | Mn                | P      | S         | V    | Nb    | Ti   | Als    |
| Q235GJ  | C    | 6~100   | ≤0.20    | ≤0.35 | 0.60~1.20         | ≤0.025 | ≤0.015    | —    | —     | —    | ≥0.015 |
|         | D    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           |      |       |      |        |
|         | E    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           |      |       |      |        |
| Q345GJ  | C    | 6~100   | ≤0.20    | ≤0.55 | ≤1.60             | ≤0.025 | ≤0.015    | 0.02 | 0.015 | 0.01 | ≥0.015 |
|         | D    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           | ~    | ~     | ~    |        |
|         | F    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           | 0.15 | 0.060 | 0.10 |        |
| Q235GJZ | C    | >16~100 | ≤0.20    | ≤0.35 | 0.60<br>~<br>1.20 | ≤0.020 | 见表<br>1-9 | —    | —     | —    | ≥0.015 |
|         | D    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           |      |       |      |        |
|         | F    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           |      |       |      |        |
| Q345GJZ | C    | >16~100 | ≤0.20    | ≤0.55 | ≤1.60             | ≤0.020 | 见表<br>1-9 | 0.2  | 0.015 | 0.01 | ≥0.015 |
|         | D    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           | ~    | ~     | ~    |        |
|         | E    |         | ≤0.18    |       |                   |        |           | 0.15 | 0.060 | 0.10 |        |

注：Z 为厚度方向性能级别 Z15、Z25、Z35 的缩写，具体在牌号中注明。

(2) 各牌号所有质量等级钢板的碳当量或焊接裂纹敏感性指数应符合表 1-8 的规定。

高层建筑结构用钢板的碳当量和焊接裂纹敏感性指数 表 1-8

| 牌号                | 交货状态  | 碳当量 $C_{eq}$ (%)   |                          | 焊接裂纹敏感性指数 $P_{cm}$ (%) |                          |
|-------------------|-------|--------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
|                   |       | $\leq 50\text{mm}$ | $> 50 \sim 100\text{mm}$ | $\leq 50\text{mm}$     | $> 50 \sim 100\text{mm}$ |
| Q235GJ<br>Q235GJZ | 热轧或正火 | $\leq 0.36$        | $\leq 0.36$              | $\leq 0.26$            |                          |
| Q345GJ            | 热轧或正火 | $\leq 0.42$        | $\leq 0.44$              | $\leq 0.29$            |                          |
| Q345GJZ           | TMCP  | $\leq 0.38$        | $\leq 0.40$              | $\leq 0.24$            | $\leq 0.26$              |

注：Z 为厚度方向性能级别 Z15、Z25、Z35 的缩写，具体在牌号中注明。

(3) 高层建筑结构用厚度方向性能钢板的硫含量应符合表 1-9 的规定。

厚度方向性能钢板的硫含量限值 表 1-9

| 厚度方向性能级别 | 硫 (S) 含量 (%) |
|----------|--------------|
| Z15      | $\leq 0.010$ |
| Z25      | $\leq 0.007$ |
| Z35      | $\leq 0.005$ |

(六) 钢材力学性能

钢材的力学性能（或称机械性能）是指标准条件下钢材的屈服强度、抗拉强度、伸长率、冷弯性能和冲击韧性，以及厚钢板的 Z 向性能。

1. 应力-应变曲线

低碳钢的应力-应变 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线

如图 1-1 所示。图中， $\hat{OA}$  为弹性阶段，有些钢材在 A 点之前存在一小段弹塑性阶段； $\hat{AB}$  为屈服阶段，荷载不增加，但变形持续加大； $\hat{BC}$  为强化阶段，由于钢材历经屈服阶段后，内部晶粒重新排列，强度有所提高，但变形也随之增大较多，呈现出钢材的塑性特征； $\hat{CD}$  为下降段，强度降低，变形增大，直至断裂。

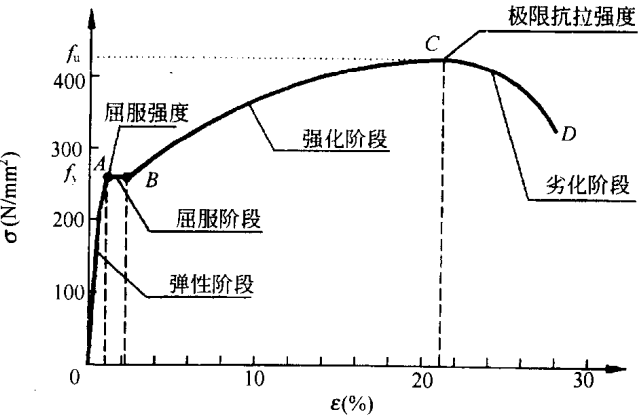


图 1-1 低碳钢的应力-应变曲线

2. 屈服强度

图 1-1 中曲线上的 A 点即为屈服点，常称屈服强度  $f_y$  ( $f_{ay}$ )，它是衡量结构的承载能力和确定强度设计值的重要指标。钢材屈服后将产生较大变形，且暂时失去继续加载的能力。因此，设计规范中将屈服强度  $f_{ay}$  作为承载能力极限状态的标志值，并以国家标准规定的产品标准最低屈服点（废品极限）确定钢材的强度标准值。

3. 抗拉强度

图 1-1 中曲线上的 C 点即为抗拉强度  $f_u$ ，或称极限抗拉强度，它是钢材所能承受的

最大拉应力值，是衡量钢材抵抗拉断的性能指标。因为钢材的应力超过屈服强度后将产生较大的残余变形，超出结构正常使用范围，所以，极限抗拉强度只能作为结构的强度储备。抗拉强度与屈服强度的比值——强屈比（ $f_u/f_{ay}$ ）愈大，则结构的强度储备率愈高。

4. 伸长率

(1) 标准试件受拉断裂时（图 1-1 曲线上的 D 点）的长度  $l_1$  减去原长度  $l_0$  所得增长值  $\Delta l$ ，除以原长度  $l_0$ ，所得比值的百分数就是钢材的伸长率  $\delta$ ，即

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \tag{1-1}$$

(2) 伸长率  $\delta$  是衡量钢材塑性及延性性能的指标。伸长率愈大，表示钢材的塑性和延性性能愈好，钢材在断裂前的塑性变形和吸收能量的能力愈强。

(3) 标准试件的原长度  $l_0$  与横截面直径  $d_0$  的比值取为  $l_0/d_0 = 5$  时，相应的钢材伸长率的代号写为  $\delta_5$ 。

5. 钢材试验要求

(1) 碳素结构钢

根据国家标准 GB 700—88《碳素结构钢》的规定，钢材的拉伸和冲击试验，应符合表 1-10 的要求；钢材的冷弯试验应符合表 1-11 的要求。

| 碳素钢的拉伸和冲击试验要求 |     |                                     |     |     |     |      |      |                                            |                    |     |     |     |      |      | 表 1-10     |                         |
|---------------|-----|-------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|--------------------------------------------|--------------------|-----|-----|-----|------|------|------------|-------------------------|
| 牌 号           | 等 级 | 拉伸试验                                |     |     |     |      |      |                                            |                    |     |     |     |      | 冲击试验 |            |                         |
|               |     | 屈服点 $\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> ) |     |     |     |      |      | 抗拉强度<br>$\sigma_b$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 伸长率 $\delta_5$ (%) |     |     |     |      |      | 温 度<br>(℃) | V 型<br>冲击功<br>(纵向)<br>J |
|               |     | 钢材厚度 (直径) (mm)                      |     |     |     |      |      |                                            | 钢材厚度 (直径) (mm)     |     |     |     |      |      |            |                         |
|               |     | ≤16                                 | >16 | >40 | >60 | >100 | >150 |                                            | ≤16                | >16 | >40 | >60 | >100 | >150 |            |                         |
|               |     | 40                                  | 60  | 100 | 150 |      | 40   |                                            | 60                 | 100 | 150 |     |      |      |            |                         |
|               |     | ≥                                   |     |     |     |      |      |                                            | ≥                  |     |     |     |      |      |            | ≥                       |
| Q235          | A   |                                     |     |     |     |      |      |                                            |                    |     |     |     |      | —    | 27         |                         |
|               | B   | 235                                 | 225 | 215 | 205 | 195  | 185  | 375~500                                    | 26                 | 25  | 24  | 23  | 22   | 21   |            | 20                      |
|               | C   |                                     |     |     |     |      |      |                                            |                    |     |     |     |      |      |            | 0                       |
|               | D   |                                     |     |     |     |      |      |                                            |                    |     |     |     |      |      |            | -20                     |

| 碳素钢的冷弯试验要求 |      |                          |         |          | 表 1-11 |
|------------|------|--------------------------|---------|----------|--------|
| 牌 号        | 试样方向 | 冷弯试验 $B = 2d, 180^\circ$ |         |          |        |
|            |      | 钢材厚度 (直径) (mm)           |         |          |        |
|            |      | 60                       | >60~100 | >100~200 |        |
|            |      | 弯心直径 $d$                 |         |          |        |
| Q235       | 纵    | a                        | 2a      | 2.5a     |        |
|            | 横    | 1.5a                     | 2.5a    | 3a       |        |

注：B 为试样宽度，a 为钢材厚度（直径）。

(2) 低合金结构钢

根据国家标准 GB/T 1591—94《低合金高强度结构钢》的规定，钢材的拉伸、冲击和弯曲试验结果，应符合表 1-12 的要求。

(3) 高层建筑结构用钢板

1) 钢板的拉伸、冲击、弯曲试验结果应符合表 1-13 的规定。

低合金钢的拉伸、冲击和弯曲试验要求 表 1-12

| 牌号   | 质量等级 | 屈服点 $\sigma_s$ (MPa) |        |        |         | 抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa) | 伸 长 率 $\delta_s$ (%) | 冲击功, $A_{kv}$ , (纵向), J |    |      |      | 180°弯曲试验<br>$d$ = 弯心直径;<br>$a$ = 试样厚度 (直径) |          |
|------|------|----------------------|--------|--------|---------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----|------|------|--------------------------------------------|----------|
|      |      | 厚度 (直径, 边长) (mm)     |        |        |         |                       |                      | +20℃                    | 0℃ | -20℃ | -40℃ |                                            |          |
|      |      | ≤16                  | >16~35 | >35~50 | >50~100 |                       |                      | ≥                       |    |      |      | 钢材厚度 (直径) (mm)                             |          |
|      |      | ≥                    |        |        |         |                       |                      |                         |    |      |      | ≤16                                        | >16~100  |
| Q345 | A    | 345                  | 325    | 295    | 275     | 470~630               | 21                   |                         |    |      |      | $d = 2a$                                   | $d = 3a$ |
|      | B    | 345                  | 325    | 295    | 275     | 470~630               | 21                   | 34                      |    |      |      |                                            |          |
|      | C    | 345                  | 325    | 295    | 275     | 470~630               | 22                   |                         | 34 |      |      |                                            |          |
|      | D    | 345                  | 325    | 295    | 275     | 470~630               | 22                   |                         |    | 34   |      |                                            |          |
|      | E    | 345                  | 325    | 295    | 275     | 470~630               | 22                   |                         |    |      | 27   |                                            |          |

注: 厚度大于 35mm 的钢板, 其伸长率值可降低 1% (绝对值)。

高层建筑结构用钢板的拉伸、冲击和弯曲试验要求 表 1-13

| 牌 号     | 质量等级 | 屈服点（下限值和上限值） $\sigma_s$ （MPa） |         |         |         | 抗拉强度<br>$\sigma_b$<br>（MPa） | 伸长率<br>$\delta_5$ （%） | 冲击功 $A_{KV}$ |       | 180°弯曲试验 |     | 屈强比<br>$\sigma_s/\sigma_b$ |
|---------|------|-------------------------------|---------|---------|---------|-----------------------------|-----------------------|--------------|-------|----------|-----|----------------------------|
|         |      | 钢板厚度（mm）                      |         |         |         |                             |                       | 纵向           |       | 钢板厚度（mm） |     |                            |
|         |      | 6~16                          | >16~35  | >35~50  | >50~100 |                             |                       | 不小于          | 温度（℃） | $J \geq$ | ≤16 | >16~100                    |
| Q235GJ  | C    |                               |         |         |         |                             |                       | 0            | 34    | 2a       | 3a  | 0.80                       |
|         | D    | ≥235                          | 235~345 | 225~335 | 215~325 | 400~510                     | 23                    | -20          |       |          |     |                            |
|         | E    |                               |         |         |         |                             |                       | -40          |       |          |     |                            |
| Q345GJ  | C    |                               |         |         |         |                             |                       | 0            | 34    | 2a       | 3a  | 0.80                       |
|         | D    | ≥345                          | 345~455 | 335~445 | 325~435 | 490~610                     | 22                    | -20          |       |          |     |                            |
|         | E    |                               |         |         |         |                             |                       | -40          |       |          |     |                            |
| Q235GJZ | C    |                               |         |         |         |                             |                       | 0            | 34    | 2a       | 3a  | 0.80                       |
|         | D    | —                             | 235~345 | 225~335 | 215~325 | 400~510                     | 23                    | -20          |       |          |     |                            |
|         | E    |                               |         |         |         |                             |                       | -40          |       |          |     |                            |
| Q345GJZ | C    |                               |         |         |         |                             |                       | 0            | 34    | 2a       | 3a  | 0.80                       |
|         | D    | —                             | 345~455 | 335~445 | 325~435 | 490~610                     | 22                    | -20          |       |          |     |                            |
|         | E    |                               |         |         |         |                             |                       | -40          |       |          |     |                            |

注: 1. Z 为厚度方向性能级别 Z15、Z25、Z35 的缩写, 具体在牌号中注明。

2. 夏比 (V 形缺口) 冲击功值按一组 3 个试样算术平均值计算, 允许其中一个试样值低于表 1-13 规定, 但不得低于规定值的 70%。

2) 表 1-13 中各厚度方向 (Z 向) 性能级别钢板的断面收缩率应符合表 1-14 的规定。

厚度方向性能钢板的断面收缩率 表 1-14

| 厚度方向性能级别 | 断面收缩率 $\psi_z$ (%) |       |
|----------|--------------------|-------|
|          | 三个试样平均值            | 单个试样值 |
| Z15      | ≥15                | ≥10   |
| Z25      | ≥25                | ≥15   |
| Z35      | ≥35                | ≥25   |