

# 第一章 钢结构设计概论

## 第一节 钢结构的特点和应用

钢结构具有强度高、自重轻、抗震性能好、施工速度快、地基费用省、占用面积小、工业化程度高、外形美观等一系列优点，发达国家在房屋建筑中广泛采用钢结构。我国自钢产量突破亿吨及实行合理利用钢材和积极采用钢结构的政策以来，建筑钢结构得到迅速发展，《中国建筑技术政策》（1996—2010）的公布，对钢结构的发展是一个有力的推动，开创了钢结构在建筑中应用的新时期。

建筑钢结构以房屋钢结构为主要对象。按传统的耗钢量大小来区分，大致可分为普通钢结构、重型钢结构和轻型钢结构。其中重型钢结构指采用大截面和厚板的结构，如高层钢结构、重型厂房和某些公共建筑等；轻型钢结构指采用轻型屋面和墙面的门式刚架房屋、某些多层建筑、压型钢板薄壁拱壳屋盖等，网架、网壳等空间结构也属于轻型钢结构范畴。以上是钢结构主要类型 另外还有索结构、幕墙的支承结构、组合和复合 (hybrid) 结构等。

我国在“十五”期间，建筑钢结构将继续取得巨大发展。建筑用钢材将全面满足我国钢结构发展的需要 高层建筑钢结构是 20 世纪 80 年代出现的新事物，将在技术上进一步提高，沿国产化方向取得新成就 门式刚架、拱顶等轻钢结构的大量应用是从 1995 年开始的 目前低层轻型钢结构房屋的造价已低于混凝土结构，在技术上将进一步完善 在市场管理上可望逐渐改变现在的无序状态 多层钢结构住宅以及办公、商业、旅游等建筑将得到迅速发展 钢结构在空间结构中也会有一个较大的发展 行业管理在信息交流、资质管理等方面将出现新局面。随着《国家建筑钢结构产业“十五”计划和 2015 年发展规划纲要》的颁布和实施 建筑钢结构必将在我国出现一次飞速发展。

### 一、钢结构的特点

钢结构在工程中得到广泛应用和发展 是由于钢结构与其他结构比较有下列特点。

#### 1. 材料强度高

钢的容重虽然较大 但强度却高得更多 与其他建筑材料相比 钢材的容重与屈服点的比值最小。在相同的荷载和约束条件下，采用钢结构时，结构的自重通常较小。当跨度和荷载相同时，钢屋架的重量只有钢筋混凝土屋架重量的  $1/4 \sim 1/3$ ，若用薄壁型钢屋架或空间结构则更轻。由于重量较轻，便于运输和安装，因此钢结构特别适用于跨度大、高度高、荷载大的结构 也最适用于可移动、有装拆要求的结构。

#### 2. 钢材的塑性和韧性好

钢材质地均匀，有良好的塑性和韧性。由于钢材的塑性好 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，则使钢结构对动荷载的适应性较强。钢材的这些性能对钢结构的安全可靠提供了充分的保证。

### 3. 钢材更接近于匀质等向体 计算可靠

钢材的内部组织比较均匀,非常接近匀质体,其各个方向的物理力学性能基本相同,接近各向同性体。在使用应力阶段,钢材属于理想弹性工作,弹性模量高达 206 GPa,因而变形很小。这些性能和力学计算中的假定符合程度很好,所以钢结构的实际受力情况和力学计算结果最相符合。

因此 钢结构计算准确、可靠性较高 适用于有特殊重要意义的建筑物。

### 4. 建筑用钢材焊接性良好

由于建筑用钢材的焊接性好,使钢结构的连接大为简化,可满足制造各种复杂结构形状的需要但焊接时产生很高的温度,温度分布很不均匀,结构各部位的冷却速度也不同。因此,不但在高温区 焊缝附近 材料性质有变坏的可能 而且还产生较高的焊接残余应力 使结构中的应力状态复杂化。

### 5. 钢结构制造简便 施工方便 具有良好的装配性

钢结构由各种型材组成,都采用机械加工,在专业化的金属结构厂制造。制作简便,成品的精确度高。制成的构件可运到现场拼装,采用螺栓连接。因结构较轻,故施工方便,建成的钢结构也易于拆卸、加固或改建。

钢结构的制造虽需较复杂的机械设备和严格的工艺要求,但与其他建筑结构比较,钢结构工业化生产程度最高 能成批大量生产 制造精确度高。采用工厂制造、工地安装的施工方法,可缩短周期、降低造价、提高经济效益。

### 6. 钢材的不渗透性适用于密闭结构

钢材本身因组织非常致密,当采用焊接连接,甚至铆钉或螺栓连接时,都易做到紧密不渗漏。因此钢材是制造容器 特别是高压容器、大型油库、气柜、输油管道的良好材料。

### 7. 钢材易于锈蚀 应采取防护措施

钢材在潮湿环境中,特别是处于有腐蚀性介质的环境中容易锈蚀,必须用油漆或镀锌加以保护,而且在使用期间还应定期维护。这就使钢结构的维护费用比钢筋混凝土结构高。

我国已研制出一些高效能的防护漆 其防锈效能和镀锌相同 但费用却低得多。同时 国内已研制成功喷涂锌铝涂层及氟碳涂层新技术,为钢结构的防锈提供了新途径。

### 8. 钢结构的耐热性好 但防火性差

众所周知 钢材耐热而不防火 随着温度的升高 强度就降低。温度在 250 以内时 钢的性质变化很小 温度达到 300 以后 强度逐渐下降 达到 450~650 时 强度为零。因此 钢结构的防火性较钢筋混凝土差。当周围环境存在辐射热,温度在 150 以上时 就须采取遮挡措施。一旦发生火灾,因钢结构的耐火时间不长,当温度达到 150 以上时,结构可能瞬时全部崩溃。为了提高钢结构的耐火等级,通常采用包裹的方法。但这样处理既提高了造价,又增加了结构所占的空间。我国研制成功了多种防火涂料,当涂层厚达 15 mm 时 可使钢结构耐火极限达 1.5 小时 增减涂层厚度 可满足钢结构不同耐火极限的要求。

## 二、钢结构的应用

在工程结构中 钢结构是应用比较广泛的一种建筑结构。一些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、要求能活动或经常装拆的结构等,可考虑采用钢结构。采用其他建筑材料,目前尚有困难或不很经

济。按其应用钢结构形式可分为以下 11 类。

### 1. 单层厂房结构

对于单层厂房钢结构一般用于重型车间的承重骨架，例如冶金工厂的平炉车间、初轧车间、混铁炉车间 重型机械厂的铸钢车间、水压机车间、锻压车间 造船厂的船体车间 电厂的锅炉框架，飞机制造厂的装配车间 以及其他工厂跨度较大车间的屋架、吊车梁等等。我国鞍钢、武钢、包钢和上海宝钢等几个著名的冶金联合企业的许多车间都采用了各种规模的钢结构厂房 上海重型机器厂、上海江南造船厂中都有高大的钢结构厂房。

以上提到的冶金工业、重型机器制造业以及大型动力设备制造工业等的很多厂房都属于重型厂房。厂房中备有 100 t 以上的重级或中级工作制吊车 厂房高度达 20~30 m 其主要承重结构(屋架、托架、吊车梁、柱等)常全部或部分采用钢结构。对于有强烈辐射热的车间也经常采用钢结构。

### 2. 大跨结构

大跨结构在民用建筑中主要用于汽车库、火车库、火车站、大会堂、体育馆、展览馆、影剧院等。其结构体系主要采用框架结构、拱架结构、网架结构、悬索结构、悬挂结构、预应力钢结构等。我国最早建成的广州中山纪念堂 1928—1931 年 圆屋顶就是钢结构 规模宏大的北京人民大会堂为钢屋架 首都体育馆、上海体育馆、上海文化广场等采用了大跨度网架结构 西安秦始皇陵兵马俑陈列馆采用了跨度为 70 m 的三铰拱钢结构 北京工人体育馆、浙江杭州体育馆采用圆形和马鞍形的悬索结构。1990 年在北京召开的第十一届亚洲运动会运动场馆，80% 以上采用了钢网架结构，建成了几座采用大跨度悬挂式结构的大型体育馆。

结构的跨度越大时，减轻结构自重越具有明显的经济效果。由于钢材轻质高强，可跨越最大的跨度，因此大跨度结构应采用钢结构。如近年来修建的大跨度公共建筑，大都采用了钢网架结构等空间结构。

在工业建筑中，飞机装配车间、飞机库 各种汽车、电力、水利、水处理工业厂房等 跨度常在 60 m 以上 还有一些大跨度的工业产品散装仓库 这些都常采用钢网架结构。可以预见 随着我国工业化建设的发展，将出现更多种类大跨度工业与民用钢结构建筑物。

### 3. 多层、高层结构

对于高层建筑来说 当层数多且高度大时 也都采用钢结构 如旅馆、饭店、公寓等多层及高层楼房等 如北京京伦饭店、上海锦江宾馆等)目前高层钢结构的应用还在蓬勃地发展着。

### 4. 塔桅结构

钢结构还用于高度较大的无线电桅杆、微波塔、广播和电视发射塔架、高压输电线路塔架、化工排气塔、石油钻井架、大气监测塔、旅游瞭望塔、火箭发射塔等。我国在 20 世纪 60~70 年代建成的大型塔桅结构有：200 m 高的广州电视塔、210 m 高的上海电视塔、194 m 高的南京跨越长江输电线路塔、325 m 高的北京环境气象桅杆、1990 年落成的高 212 m 汕头电视塔、高 260 m 大庆电视塔等都是钢结构。

这些结构除了自重轻、便于组装外 还因构件截面小 从而大大减小了风荷载 取得了更大的经济效益。

### 5. 属于板壳结构的密闭压力容器

用于要求密闭的容器，如大型储液库、煤气库等炉壳要求能承受很大内力，另外温度急剧变化的高炉结构、大直径高压输油管 and 煤气管道等均采用钢结构。上海在 1958 年就建成了容

积为  $54\,000\text{ m}^3$  的湿式贮气柜。上海金山及吴泾等石油、化工基地有众多的容器结构。一些容器、管道、锅炉、油罐等的支架也都采用钢结构。

#### 6. 桥梁结构

由于钢桥建造简便、迅速、易于修复，因此钢结构广泛用于中等跨度和大跨度桥梁。我国著名的杭州钱塘江大桥（1934—1937年）是最早自己设计的钢桥，此后，武汉长江大桥（1957年）、南京长江大桥（1968年）均为钢结构桥梁，其规模和难度都举世闻名，标志着我国桥梁事业已步入世界先进行列。上海市政建设重大工程之一的黄浦江大桥也是采用钢结构。

#### 7. 移动结构

钢结构可用于装配式活动房屋、水工闸门、升船机、桥式吊车和各种塔式起重机、龙门起重机、缆索起重机等。这类结构随处可见，这几年高层建筑的发展，也促使塔式起重机像雨后春笋般地矗立在街头。我国已制定了各种起重机系列标准，促进了建筑机械的大发展。

需要搬迁或拆卸的结构，如流动式展览馆和活动房屋等，采用钢结构最适宜。不但重量轻，便于搬迁，而且由于采用螺栓连接，还便于装配和拆卸。

#### 8. 轻钢结构

在中小型房屋建筑中，弯曲薄壁型钢结构、圆钢结构及钢管结构多用在轻型屋盖中。此外还有用薄钢板做成折板结构，把屋面结构和屋盖主要承重结构结合起来，成为一体的轻钢屋盖结构体系。拱型波纹屋顶是近年来有较大发展的一种轻型屋盖结构。

荷载特别小的小跨度结构及高度不大的轻型支架结构等也常采用钢结构，因为对于这类结构，结构自重起重要作用。例如，采用轻屋面的轻钢屋盖结构，耗钢量比普通钢结构省 25%~50%，自重减小 20%~50%。与钢筋混凝土结构相比，用钢指标接近，但结构自重却减轻了 70%~80%。

#### 9. 受动力荷载作用的结构

直接承受起重量较大或跨度较大的桥式吊车的吊车梁，由于钢材具有良好的韧性，故采用钢结构。此外，对于具有较大锻锤或动力设备的厂房，以及对于抗震性能要求高的结构，都常采用钢结构。

#### 10. 其他构筑物

运输通廊、栈桥，各种管道支架以及高炉和锅炉构架等也采用钢结构。如宁夏大武口电厂采用了长度为 60 m 的预应力输煤钢栈桥，已于 1986 年建成使用。近年来，某些电厂的桥架也都采用了钢网架结构等。

#### 11. 住宅钢结构

随着我国钢产量的快速增长，用钢政策由限制用钢、合理用钢发展到鼓励积极用钢。1999 年我国钢产量达到 1.3 亿吨，居世界第一位，普通钢材供大于求，钢材价格下降到与发达国家持平，2000 年虽限产 0.2 亿吨，但仍不能改变钢材市场供过于求的局面，到 2001 年我国钢产量达到 1.53 亿吨。

据建设部统计，我国 1998 年兴建住宅 4.76 亿  $\text{m}^2$ ，1999 年增至 5.0 亿  $\text{m}^2$ ，其中绝大部分为黏土砖砌体结构，部分为细混凝土结构。面对黏土砖生产破坏耕地、水泥生产破坏植被且造成严重的大气污染，而我国的人均耕地面积和人均耕地植被面积均位居世界榜尾、钢材生产过剩的现实，国务院于 1999 年颁发了 72 号文件，提出要发展钢结构住宅产业，在沿海大城市限

期停止使用粘土砖。这无疑是一项十分必要和适时的重大决策，对促进我国国民经济的持续发展，推动住宅产业的技术进步，改善居住质量和环境保护将产生积极影响。

2001年 建设部颁布了《钢结构住宅产业化技术守则》 天津市的钢结构住宅设计规程已于 2003年 12月 出台 钢结构住宅建设必将面临一个飞速发展时期 这对我国钢结构的发展将会产生十分深远的影响。

## 第二节 钢结构设计的思想和技术措施

### 一、设计思想

钢结构设计应在以下设计思想的基础上进行：

钢结构在运输、安装和使用过程中必须有足够的强度、刚度和稳定性，整个结构必须安全可靠；

应从工程实际情况出发，合理选用材料、结构方案和构造措施，应符合建筑物的使用要求，具有良好的耐久性；

尽可能节约钢材，减轻钢结构重量；

尽可能缩短制造、安装时间，节约劳动工日；

结构要便于运输、便于维护；

可能条件下，尽量注意美观，特别是外露结构，有一定建筑美学要求。

根据以上各项要求，钢结构设计应该重视、贯彻和研究充分发挥钢结构特点的设计思想和降低造价的各种措施 做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。

### 二、技术措施

为了体现钢结构的设计思想，可以采取以下的技术措施：

尽量在规划结构时采用尺寸模数化、构件标准化、构造简洁化 以便于钢结构制造、运输和安装；

尽量采用新的结构体系，例如用空间结构体系代替平面结构体系，结构形式要简化、明确、合理；

尽量采用新的计算理论和设计方法，推广适当的线性和非线性有限元方法，研究薄壁结构理论和结构稳定理论；

尽量采用焊缝和高强螺栓连接，研究和推广新型钢结构连接方式；

尽量采用具有较好经济指标的优质钢材、合金钢或其他轻金属，使用薄壁型钢；

尽量采用组合结构或复合结构，例如钢与钢筋混凝土组合梁、钢管混凝土构件及由索组成的复合结构等。

钢结构设计应因地制宜、量材使用，切忌生搬硬套。上述措施不是在任何场合都行得通的 应结合具体条件进行方案比较 采用技术经济指标都好的方案。此外 还要总结、创造和推广先进的制造工艺和安装技术，任何脱离施工的设计都不是成功的设计。

### 第三节 钢结构设计的计算方法和规定

设计钢结构时，必须满足一般的设计准则，即在充分满足功能要求的基础上，做到安全可靠、技术先进、确保质量和经济合理。结构计算的目的是保证结构构件在使用荷载作用下能安全可靠地工作，既要满足使用要求，又要符合经济要求。结构计算是根据拟定的结构方案和构造按所承受的荷载进行内力计算，确定出各杆件的内力，再根据所用材料的特性对整个结构和构件及其连接进行核算，看其是否符合经济、安全、适用等方面的要求。但从一些现场记录、调查数据和试验资料看来，计算中所采用的标准荷载和结构实际承受的荷载之间、钢材力学性能的取值和材料实际数值之间、计算截面和钢材实际尺寸之间、计算所得的应力值和实际应力数值之间，以及估计的施工质量与实际质量之间，都存在着一一定的差异，所以计算的结果不一定很安全可靠。为了保证安全，结构设计时的计算结果必须留有余地，使之具有一定的安全度。建筑结构的的安全度是保证房屋或构筑物在一定使用条件下，连续正常工作的安全储备。有了这个储备，才能保证结构在各种不利条件下的正常使用。

#### 1. 钢结构计算方法

我国钢结构计算方法在建国以来的50年中曾经有过4次变化，即：建国初期到1957年，采用总安全系数的容许应力计算法；1957年到1974年，采用3个系数的极限状态计算方法；1974年到1988年，采用以结构的极限状态为依据，进行多系数分析，用单一安全系数的容许应力计算法；目前新的钢结构设计规范，采用以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法。

1957年前，钢结构采用容许应力的安全系数法进行设计。安全系数为定值且都凭经验选定，因而设计的结构和不同构件的安全度不可能相等，这种设计方法显然是不合理的。

20世纪50年代出现一种新的设计方法——按照极限状态的设计法，即根据结构或构件能否满足功能要求来确定它们的极限状态。一般地规定有两种极限状态。第一种是结构或构件的承载力极限，包括静力强度、动力强度和稳定等计算。达此极限状态时，结构或构件达到了最大承载能力而发生破坏，或达到了不适于继续承受荷载的巨大变形。第二种是结构或构件的变形极限状态，或称为正常使用极限状态。达此极限状态时，结构或构件虽仍保持承载能力，但在正常荷载作用下产生的变形使结构或构件已不能满足正常使用的要求（静力作用产生的过大变形和动力作用产生的剧烈振动等），或不能满足耐久性的要求。各种承重结构都应按照上述两种极限状态进行设计。

极限状态设计法比安全系数设计法要合理些，也先进些。它把有变异性的设计参数采用概率分析引入了结构设计中。根据应用概率分析的程度可分3种水准，即半概率极限状态设计法、近似概率极限状态设计法和全概率极限状态设计法。

我国采用的极限状态设计法属于水准一，即半概率极限状态设计法。只有少量设计参数，如钢材的设计强度、风雪荷载等，采用了概率分析确定其设计采用值，大多数荷载及其他不定性参数由于缺乏统计资料而仍采用经验值；同时结构构件的抗力（承载力）和作用效应之间并未进行综合的概率分析，因而仍然不能使所设计的各种构件得到相同的安全度。

20世纪60年代末，国外提出了近似概率设计法，即水准二。主要是引入了可靠性设计理论。可靠性包括安全性、适用性和耐久性。把影响结构或构件可靠性的各种因素都视为独立的随机变量，根据统计分析确定失效概率来度量结构或构件的可靠性。

## 2. 承载力极限状态

### (1) 近似概率极限状态设计法

结构或构件的承载力极限状态方程可表达为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-1)$$

式中  $x_i$  是影响结构或构件可靠性的各物理量，都是相互独立的随机变量，例如材料抗力、几何参数和各种作用产生的效应（内力），各种作用包括恒载、各种可变荷载、地震、温度变化和支座沉陷等。

将各因素概括为两个综合随机变量，即结构或构件的抗力  $R$  和各种作用对结构或构件产生的效应  $S$ ，公式 (1-1) 可写成

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \quad (1-2)$$

结构或构件的失效概率可表示为

$$p_f = g(R - S) < 0 \quad (1-3)$$

设  $R$  和  $S$  的概率统计值均服从正态分布（设计基准期取 50 年）可分别算出它们的平均值  $\mu_R, \mu_S$  和标准差  $\sigma_R, \sigma_S$ ，则极限状态函数  $Z = R - S$  也服从正态分布，它的平均值和标准差分别为

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S; \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1-4)$$

图 1-1 表示极限状态函数  $Z = R - S$  的正态分布。

图中由  $-\infty$  到 0 的阴影面积表示  $g(R - S) < 0$  的概率，即失效概率  $p_f$ ，需采用积分法求得。由图可见，平均值  $\mu_Z$  等于  $\beta\sigma_Z$ ，显然  $\mu$  值和失效概率  $p_f$  存在着如下对应关系：

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (1-5)$$

这样，只要计算出  $\beta$  值就能获得对应的失效概率  $p_f$ ，见表 1-1。 $\beta$  称为可靠指标，由下式计算：

$$\beta = \mu_Z / \sigma_Z = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1-6)$$

当  $R$  和  $S$  的统计值不按正态分布时，结构构件的可靠指标应以它们的当量正态分布的平均值和标准差代入公式 (1-6) 来计算。

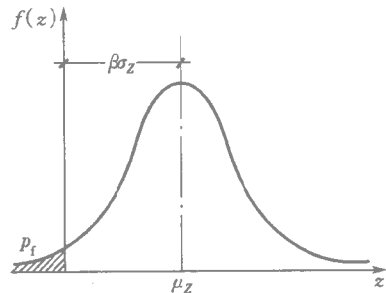


图 1-1  $Z = R - S$  的正态分布

表 1-1 失效概率与可靠指标的对应值

$\beta$	2.5	2.7	3.2	3.7	4.2
$p_f$	$5 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-3}$	$6.9 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-5}$

由于  $R$  和  $S$  的实际分布规律相当复杂，我们采用了典型的正态分布，因而算得的  $\beta$  和  $p_f$  值是近似的，故称为近似概率极限状态设计法。在推导  $\beta$  公式时，只采用了  $R$  和  $S$  的二阶中心矩，同时还做了线性化的近似处理，故又称“一次二阶矩法”。

这种设计方法只需知道  $R$  和  $S$  的平均值和标准差或变异系数，就可计算构件的安全指标  $\beta$  值，使  $\beta$  值满足规定值即可。我国采用的安全指标为：Q235 钢  $\beta = 3 \sim 3.1$ ，对应的失效概率

$p_i \approx 0.001$ ; Q345 钢  $\beta = 3.2 \sim 3.3$  对应的  $p_i \approx 0.0005$ 。

由上列公式可见,此法把构件的抗力(承载力)和作用效应的概率分析联系在一起,以安全指标作为度量结构构件安全度的尺度,可以较合理地确定具有不同安全度的设计目的。但是这种设计方法比较复杂,较难掌握,也不习惯,因此仍宜采用广大设计人员所熟悉的分项系数设计公式。

## (2) 分项系数表达式

因为

$$S = G + Q_1 + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} Q_i$$

取

$$G = \gamma_G C_G G_K$$

$$Q_1 = \gamma_{Q1} C_Q Q_{1K}$$

$$Q_i = \gamma_{Qi} C_Q Q_{iK}$$

引入结构重要性系数,则

$$S = \gamma_0 (\gamma_G C_G G_K + \gamma_Q C_Q Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \gamma_{Qi} C_Q Q_{iK}) \quad (1-7)$$

式中

$\gamma_0$ ——结构重要性系数。把结构分成一、二、三 3 个安全等级,分别采用 1.1、1.0 和 0.9;

$C$ ——荷载效应系数,即单位荷载引起的结构构件截面或连接中的内力,按一般力学方法确定,其角标  $G$  指永久荷载, $Q_i$  指各可变荷载;

$G_K$  和  $Q_{iK}$ ——永久荷载和各可变荷载标准值,见荷载规范;

$\psi_{ci}$ ——第  $i$  个可变荷载的组合系数,取 0.6,只有一个可变荷载时取 1.0;

$\gamma_G$ ——永久荷载分项系数,一般采用 1.2,当永久荷载效应对结构构件的承载力有利时,宜采用 1.0;

$\gamma_{Q1}$  和  $\gamma_{Qi}$ ——第 1 个和其他第  $i$  个可变荷载分项系数,一般情况可采用 1.4。

式中

$Q$  是引起构件或连接最大荷载效应的可变荷载效应。对于一般排架和框架结构,由于很难区分产生最大效应的可变荷载,可采用以下简化式计算

$$S = \gamma_0 (\gamma_G C_G G_K + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{iK}) \quad (1-8)$$

式中,荷载组合系数  $\psi$  取 0.85。

构件本身的承载能力(抗力)  $R$  是材料性能和构件几何因素等的函数,即

$$R = f_K \cdot A / \gamma_R = f_d A \quad (1-9)$$

式中  $\gamma_R$ ——抗力分项系数, Q235 钢和 Q345 钢取 1.087, Q390 钢取 1.111;

$f_K$ ——材料强度的标准值, Q235 钢第一组为 235 MPa, Q345 钢第一组为 345 MPa, Q390 钢第一组为 390 MPa;

$f_d$ ——结构所用材料和连接的设计强度;

$A$ ——构件或连接的几何因素(如截面面积和截面抵抗矩等)。

考虑到一些结构构件和连接工作的特殊条件,有时还应乘以调整系数。例如施工条件较差的高空安装焊缝和铆钉连接,应乘 0.9;单面连接的单个角钢按轴心受力计算强度和连接时,应乘 0.85 等。

将式(1-7)、式(1-8)和式(1-9)代入式(1-2),可得

$$\gamma_0(\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{iK}) \leq f_d A \quad (1-10)$$

及

$$\gamma_0(\gamma_G C_G G_K + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{iK}) \leq f_d A \quad (1-11)$$

为了照顾到设计工作者的习惯,将上列公式再改写成应力表达式

$$\gamma_0(\sigma_{Gd} + \sigma_{Q1d} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \sigma_{Qid}) \leq f_d \quad (1-12)$$

及

$$\gamma_0(\sigma_{Gd} + \psi \sum_{i=1}^n \sigma_{Qid}) \leq f_d \quad (1-13)$$

这就是现行钢结构设计规范中采用的计算公式。

式中  $\sigma_{Gd}$ ——永久荷载设计值  $G_d$  在结构构件的截面或连接中产生的应力,  $G_d = \gamma_G G_K$ ;

$\sigma_{Q1d}$ ——第 1 个可变荷载的估计值  $Q_{1d} = \gamma_{Q1} \cdot Q_{1K}$  在结构构件的截面或连接中产生的应力(该应力大于其他任意第  $i$  个可变荷载设计值产生的应力);

$\sigma_{Qid}$ ——第  $i$  个可变荷载设计值  $Q_{id} = \gamma_{Qi} Q_{iK}$  在结构构件的截面或连接中产生的应力。

其余符号同前。

各分项系数是经过校准法确定的。所谓校准法是使按式(1-10)计算的结果基本符合按式(1-6)要求的可靠指标  $\beta$ 。不过当荷载组合不同时,应采用不同的各分项系数,才能符合  $\beta$  值的要求,这给设计带来困难。因此用优选法对各分项系数采用定值,而使各不同荷载组合计算结果的  $\beta$  值相差为最小。

当考虑地震荷载的偶然荷载组合时,应按抗震设计规范的规定进行。

对于结构构件或连接的疲劳强度计算,由于疲劳极限状态的概念还不够确切,只能暂时沿用容许应力设计法,还不能采用上述的极限状态设计法。

式(1-12)和式(1-13)虽然是用应力计算式表达,但和过去的容许应力设计方法根本不同,是比较先进的一种设计方法。不过由于有些因素尚缺乏统计数据,暂时只能根据以往设计经验来确定。还有待于继续研究和积累有关的统计资料,才能进而采用更为科学的全概率极限状态设计法(水准三)。

### 3. 正常使用极限状态

结构构件的第二种极限状态是正常使用极限状态。钢结构设计主要控制变形和挠度,仅考虑短期效应组合,不考虑荷载分项系数。

$$v = v_{GK} + v_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{QiK} \leq [v] \quad (1-14)$$

式中  $v_{GK}$ ——永久荷载标准值在结构或构件中产生的变形值;

$v_{Q1K}$ ——第 1 个可变荷载的标准值在结构或构件中产生的变形值(该值大于其他任意第  $i$  个可变荷载标准值产生的变形值);

$v_{QiK}$ ——第  $i$  个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值;

$[\nu]$ ——结构或构件的容许变形值，按规范规定采用。

有时只需要保证结构和构件在可变荷载作用下产生的变形能够满足正常使用的要求，这时式 1-14) 中的  $\nu_{CK}$  可不计入。

## 第四节 钢结构设计的发展方向

我国钢产量已跃居世界第一，且还在不断增加，钢结构的应用也会有更大的发展。为了适应这一新的形势，钢结构的设计水平应该迅速提高。通过对国内外的现状分析可知，钢结构设计的方向有以下几点。

### 1. 高效能钢材的研究和应用

高效能钢材的含义是：采用各种可能的技术措施，提高钢材的承载力，使钢材发挥更高的效能。

H 型钢的应用也具有了长足的发展，现正在赶超世界水平。压型钢板在我国的应用也趋于成熟。

冷弯薄壁型钢的经济性是大家熟知的，但目前产量不多，有待进一步提高产量供生产设计中采用。

由于 Q345 钢强度高（屈服强度为 345 MPa）可节约大量钢材，我国目前已较普遍采用 Q345 钢。北京首都体育馆的网架、上海电视塔的塔柱钢管就采用了这种材料。现在更高强度的 Q390 钢材（屈服强度为 390 MPa）已开始应用。其他高强度钢如 30 硅钛钢（屈服强度  $\geq 400$  MPa）、15 锰钒氮钢（屈服强度为 450 MPa）也有应用，但未列入钢结构设计规范。国外高强度钢发展很快，1969 年美国规范列入屈服强度为 685 MPa 的钢材，1975 年苏联规范列入屈服强度为 735 MPa 的钢材。今后，随着冶金工业的发展，研究强度更高的钢材及其合理的使用将是重要的课题。

用于连接材料的高强度钢已有 45 号钢和 40 硼钢，这两种材料制成的高强度螺栓广泛用于各种工程。40 硼钢屈服强度为 635 MPa，抗拉强度为 785 MPa，经热处理后屈服强度不低于 970 MPa，抗拉强度 1 080 MPa。现推荐采用 20 锰钛硼钢作为高强度螺栓专用钢材，其强度级别与 40 硼钢相同。

### 2. 结构和构件计算的研究和改进

现在已广泛应用新的计算技术和测试技术，对结构和构件进行深入计算和测试，为了解结构和构件的实际性能提供了有利条件。计算和测试手段愈先进，就愈能反映结构和构件实际工作情况，从而合理使用材料，发挥其经济效益，并保证结构的安全。例如钢材塑性的充分利用问题经过多年研究，已将成果反映于现行的钢结构设计规范中；其他如动力荷载作用下的结构反应问题、残余应力对压杆稳定的影响问题、板件屈曲后的承载能力问题等，都已用新计算技术和测试手段取得了新的进展。

最近，在应用概率理论来考虑结构安全度方面也得到新的进展。新规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，用可靠指标度量结构的可靠度，以分项系数的设计表达式进行计算，也是改进计算方法的一个重要方面。

自从欧拉提出轴心受压柱的弹性稳定理论的临界力计算公式以来，迄今已有 200 多年。在此期间，很多学者对各类构件的稳定问题做了不少理论分析和实验研究工作，有了很多贡

献。但是在结构的稳定理论计算方面还存在着不少问题。例如：各种压弯构件的弯扭屈曲、薄板屈曲后强度的利用，各种刚架体系的稳定以及空间结构的稳定等。所有这些问题都有待深入研究。

### 3. 结构形式的革新和应用

新的结构形式有薄壁型钢结构、悬索结构、悬挂结构、网架结构和预应力钢结构等。这些结构适用于轻型、大跨屋盖结构、高层建筑和高耸结构等，对减少耗钢量有重要意义。我国应用新结构逐年有所增长，特别是网架结构发展更快，平板网架结构经济效果很好。新近出现了网架与悬索的复合结构，并已用在 1990 年北京第十一届亚洲运动会的体育馆及其他大型公共建筑中。

新的结构形式还有薄壁型钢结构、网壳结构、悬挂结构和预应力钢结构等。这些结构适用于轻型屋盖结构、大跨度屋盖结构或其他钢结构。采用新结构对减少耗钢量具有重要意义。

### 4. 预应力钢结构的研究

在一般钢结构中增加一些高强度钢构件，并对结构施加预应力，这是预应力钢结构中采用的最普遍的形式之一。它的实质是以高强度钢材代替部分普通钢材，从而达到节约钢材的目的。但是，两种强度不相同的钢材用于同一构件中共同受力，必须采取施加预应力的方法才能使高强度钢材充分发挥作用。我国从 20 世纪 50 年代开始对预应力钢结构进行了理论和试验研究，并在一些工程中采用。20 世纪 90 年代预应力结构又有一个飞跃，现在仍应继续进行研究和进一步予以推广应用。

### 5. 空间结构的研究

以空间体系的空间网格结构代替平面结构可以节约钢材，尤其是跨度较大时，经济效果尤为显著。空间网格结构对各种平面形式的建筑物的适应性很强，近年来在我国发展很快，特别是采用了市场化的空间结构分析程序后。如首都体育馆、上海体育馆、上海文化广场以及全国各地的体育馆和展览馆等已不下数千座工程。近年来还开始将网格结构应用于各种厂房屋盖中。

悬索结构也属于空间结构体系，它最大限度地利用了高强度钢材，因而用钢量很省。它对各种平面形式建筑物的适应性很强，极易满足各种建筑平面和立面的要求。但由于材料来源比较困难，施工也较复杂，因而应用受到一定的限制。今后应进一步研究各种形式的悬索结构的计算和推广应用问题。

### 6. 钢和混凝土组合结构的应用

钢材受压时常受稳定条件的控制，往往不能发挥它的强度承载力，而混凝土则最宜于承受压力。钢的强度高宜受拉，混凝土则宜受压，将二者组合在一起，可以发挥各自的长处，取得较大的经济效果，是一种合理的结构形式。图 1-2(a) 示出钢梁和钢筋混凝土板组成的组合梁，混凝土位于受压区，钢梁则位于受拉区。但梁板之间必须设置抗剪连接件，以保证二者的共同工作。由钢筋混凝土板作为受压翼缘与钢梁组合可节约钢材。这种结构已经较多地用于桥梁结构中，也可推广于荷载较大的平台和楼层结构中去，专用规范也已出台。

图 1-2(b) 是在钢管中填充素混凝土的钢管混凝土结构。这种结构最宜用作轴心受压构件，对于大偏心受压构件则可采用格构式组合柱。这种构件的特点是：在压力作用下，钢管和混凝土之间产生相互作用的紧箍力，使混凝土处于三向受压的应力状态下工作，大大提高了它的抗压强度，还改善了它的塑性，提高抗震性能。对于薄钢管，因得到了混凝土的支持，提高了稳定

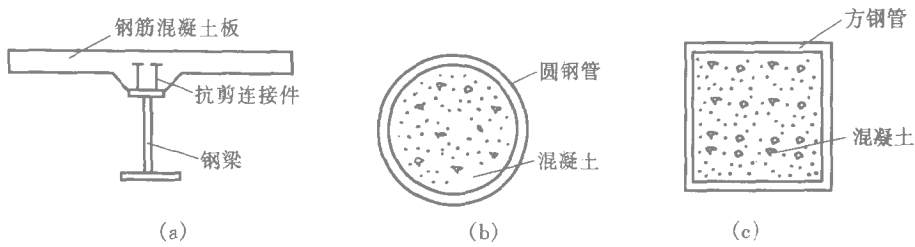


图 1-2 组合梁和柱

(a)组合梁;(b)圆钢管混凝土柱;(c)方钢管混凝土柱

性，使钢材强度得以充分发挥。这一结构已在国内推广应用，用作厂房柱和构架柱等已建成的工程不下七八十个，是一种很有发展前途的新结构。应进一步深入研究它的工作性能、合理的计算理论及构造和施工等问题。与图 1-2(b)类似的方钢管的全结构(图 1-2(c))也开始应用。

### 7. 高层钢结构的研究和应用

随着我国对外开放政策的实施，工业建设得到了迅速的发展。随着城市人口的不断增多，大城市的不断扩大，城市用地的矛盾也就不断上升。为了节约用地，减少城市公共设施的投资，近年来在北京、广州、深圳和上海等地相继修建了一些高层和超高层建筑。例如：上海希尔顿饭店(43层，高 143.6 m)、上海锦江饭店分馆(43层，高 153.09 m)、北京长城饭店、深圳科技发展中心大厦(高 165 m)、北京香格里拉饭店、北京长富宫大厦、北京京城大厦(52层，高达 180 m)等。这些高层建筑都采用了钢结构框架体系，楼层结构很多采用了钢梁、压型钢板上浇混凝土的组合楼层，施工简便迅速。

我国在高层和超高层建筑方面过去没有经验，上述建筑物大都是引进外资兴建的。有的从材料、设计到加工制作全由国外引进，国内只担负安装建造；有的设计和材料由国外引进，国内担负加工制作、安装建造，以及施工图设计的任务。显然，在这一领域内我们和发达国家相比还存在着差距。目前，随着深圳地王商业大厦(81层，高 384 m)和上海金贸大厦(88层，高 365 m)等超高层钢结构的建成，我国高层钢结构的技术水平已有了长足的进步。

### 8. 优化原理的应用

结构优化设计包括确定优化的结构形式和确定优化的截面尺寸。由于电子计算机的逐步普及，促使结构优化设计得到相应的发展。我国编制的钢吊车梁标准图集，就是根据耗钢量最小的条件写出目标函数，把强度、稳定度、刚度等一系列设计要求作为约束条件，用计算机解得优化的截面尺寸，比过去的标准设计节省钢材 5%~10%。优化设计已逐步推广到塔桅结构、网架结构设计等各个方面。

## 第二章 单层厂房钢结构设计

### 第一节 单层厂房钢结构体系

#### 一、单层厂房钢结构的组成和设计程序

##### 1. 单层厂房钢结构的组成

单层厂房结构必须具有足够的强度、刚度和稳定性以抵抗来自屋面、墙面、吊车设备等各种竖向及水平荷载的作用。

单层厂房钢结构一般是由天窗架、屋架、托架、柱、吊车梁、制动梁(或桁架)各种支撑以及墙架等构件组成的空间骨架(图 2-1)。

图 2-1 中这些构件按其作用可归并成下列体系。

横向平面框架是厂房的基本承重结构,由框架柱和横梁或屋架构成。承受作用在厂房的横向水平荷载和竖向荷载并传递到基础。

纵向平面框架由柱、托架、吊车梁及柱间支撑等构成。其作用是保证厂房骨架的纵向不可变性和刚度,承受纵向水平荷载(吊车的纵向制动力、纵向风力等)并传递到基础。

屋盖结构由天窗架、屋架、托架、屋盖支撑及檩条等构成。

吊车梁及制动梁,主要承受吊车的竖向荷载及水平荷载,并传到横向框架和纵向框架。

支撑,包括屋盖支撑、柱间支撑及其他附加支撑。其作用是将单独的平面框架连成空间体系,以保证结构具有必要的刚度和稳定性,同时也有承受风力及吊车制动力的作用。

墙架,承受墙体的重量和风力。

此外,还有一些次要的构件如梯子、门窗等。在某些厂房中,由于工艺操作上的要求,还设有工作平台。

各种构件的用钢量占整个厂房结构的总用钢量的比值大致如表 2-1 所示。

厂房按单位面积计算的用钢量,是评定设计的经济合理的一项重要指标。各类厂房单位面积用钢量的统计数值见表 2-2。

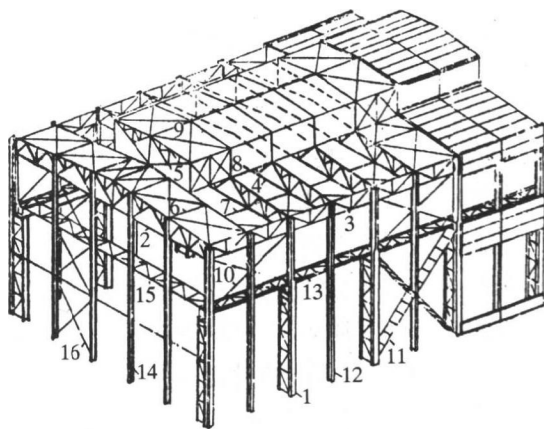


图 2-1 单层钢结构厂房

1—框架柱;2—屋架;3—托架;4—中间屋架;5—天窗架;6—横向水平支撑;7—纵向水平支撑;8、9—天窗支撑;10、11—柱间支撑;12—抗风柱;13—吊车梁系统;14—山墙柱;15—山墙抗风桁架;16—山墙柱间支撑

表 2-1 厂房主要构件用钢量百分比参考值

%

构件名称	厂 房 类 型		
	中型厂房	重型厂房	特重型厂房
柱 子	30~45	35~50	40~50
吊 车 梁	15~25	25~35	25~35
屋 盖	30~40	20~35	10~20
墙架构件	5	5~10	5~10

表 2-2 厂房结构的用钢量指标

车间类型	吊车起重量 (t)	吊车轨顶标高 (m)	用钢量 (kg/m <sup>2</sup> )
轻 型	0~5	0~6	35~50
	10~20	8~16	50~80
中 型	30~50	10~16	75~120
	70~100	16~20	90~170
重 型	125~175	10~20	200~300
	175~350	16~26	300~400

## 2. 单层厂房钢结构的设计程序

厂房结构设计一般分为 3 个阶段。

### ( 1 结构选型及整体布置

主要包括 柱网布置 确定横向框架形式及主要尺寸 布置屋盖结构、吊车梁系统及墙架、支撑体系；选择各部分结构采用的钢材标号。这时应充分了解生产工艺和使用要求，建厂地区的自然地质资料、交通运输、材料供应等情况 密切与建筑、工艺设计人员配合 进行多方案的分析比较，以确定出合理的结构方案。

### ( 2 技术设计

根据已确定的结构方案进行荷载计算、结构内力分析；计算各构件所需要的截面尺寸（或验算）及设计各构件间的连接。

### ( 3 绘制结构施工图

根据技术设计确定的构件尺寸和连接，绘制施工图纸。但应了解钢材供应情况和钢结构制造厂的生产技术条件和安装设备等条件。

## 二、单层厂房钢结构的布置

### 1. 柱网

横向框架和纵向框架的柱形成一个柱网，柱网的布置不仅要考虑上部结构，还应考虑下部结构，诸如基础和设备（地下管道、烟道、地坑等设施）要与柱网相配合。柱网布置主要是根据工艺、结构与经济的要求。

从工艺要求方面考虑，柱的位置应和车间的地上设备、机械及起重运输设备等取得协调。柱下基础应和地下设备（如设备基础、地坑、地下管道、烟道等）相配合。此外 柱网布置还要适当考虑生产过程的可能变动。

从结构要求方面考虑 以所有柱列的柱间距均为相等的布置方式最为合理 见图 2-2(a)。

这种布置方式的优点为厂房横向刚度最大，屋盖和支撑系统布置最为简单合理，全部吊车梁的跨度均相同。因此，在这种情况下，厂房构件的重复性较大，从而可使结构构件达到最大限度的定型化和标准化。

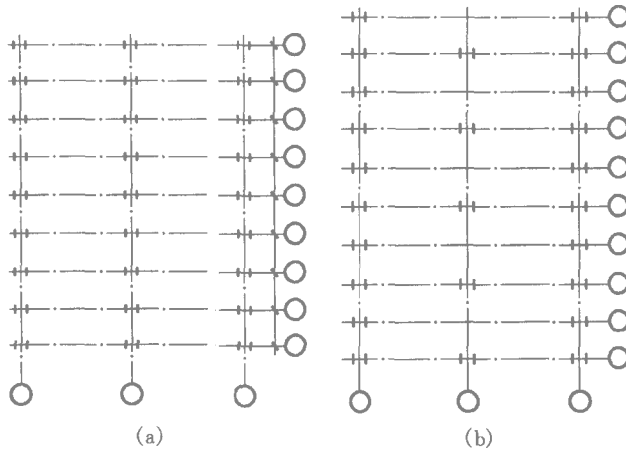


图 2-2 柱网布置  
(a)柱距相等 ;(b)柱距不等

结构的理想状态有时得不到满足。例如，一个双跨钢结构制造车间，其生产流程是零件加工—中间仓库—拼焊连接顺着厂房纵向进行，但横向需要联系，在中部要有横向通道，因此中列柱中部柱距较大(图 2-2(b))部分中列纵向框架有托架，柱距变为边柱距的 2 倍。

从经济观点来看，柱的纵向间距的大小对结构重量影响较大。柱距越大，柱及基础所用的材料越少，但屋盖结构和吊车梁的重量将随之增加。在柱子较高、吊车起重量较小的车间中，放大柱距可能会收到经济效果。最经济柱距虽然可通过理论分析，但最好还是通过具体方案比较来决定。

在一般车间中，边列柱的间距采用  $6n$  较经济。各列柱距相等，且又接近于最经济柱距的柱网布置亦最为合理。但是，在某些场合下，由于工艺条件的限制或为了增加厂房的有效面积或考虑到将来工艺过程可能改变等情况，往往需要采用不相等的柱距。

增大柱距时，沿厂房纵向布置的构件如吊车梁、托架等由于跨度增大而用钢量增加，但柱子和柱基础由于数量减少而用钢量降低。经济的柱距应使总用钢量最少。表 2-3 给出设有 50/10 吨吊车，柱距为  $6n$  的厂房，不同跨度对吊车梁、屋盖结构用钢量的影响。

表 2-3 厂房跨度对用钢量的影响

跨 度 (m)		18	24	30
耗 钢 量 (kg/m <sup>2</sup> )	屋盖结构	270	282	310
	吊 车 梁	118	93	83
	合 计	388	375	393

由表可见，吊车梁与屋盖结构两项的总用钢量随跨度的加大而略有变化，但柱子用钢量则随跨度的增大而减小，因此在厂房面积一定时采用较大跨度比较有利。

国内外厂房的跨度和柱距都有逐渐增大的趋势，如日本、德国新建厂房的柱距一般为 12

m 15m, 甚至更大，而且把 15m 作为冷、热轧车间的经济柱距。

**边列柱与中列柱的柱距**

以 6m 为模数。当吊车起重量  $Q \leq 100$  t、结构高度  $H \leq 14$  m 时，边列柱采用 6m 中列柱采用 12 m 柱距；当吊车起重量  $Q = 150$  t、轨顶标高  $H \leq 16$  m 时，或当地基条件较差、处理较困难时，边列柱与中列柱均宜采用 12m 柱距。

当生产工艺有特殊要求时，也可局部或全部采用更大的柱距。

近来有扩大柱网尺寸的趋向（特别是轻型和中型车间），设计成能适用于多种生产条件的灵活车间，以适应工艺过程的可能改变，同时可节约车间面积和降低安装劳动量。

**2. 温度缝**

温度变化时厂房结构将产生温度变形及温度应力。温度变形的大小与柱子的刚度、吊车梁轨顶标高和温度变形等有关，即温度变形量

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta t \cdot L \tag{2-1}$$

式中  $\alpha$ ——钢材的线膨胀系数；

$\Delta t$ ——温度差；

$L$ ——构件的长度。

所以当厂房平面尺寸很大时，为避免产生过大的温度应力，应在厂房的横向或纵向设置温度缝，如图 2-3 所示。

根据使用经验和理论分析，规范中规定钢结构厂房温度区段的长度如表 2-4 所示。当厂房长度不超过表列数值时，可不计温度应力。横向框架中，在相同温度变形的情况下，横梁与柱铰接比横梁与柱刚接时柱中的温度应力要低得多，所以根据分析结果，可将铰接时的横向温度区段长度，比表中数值加大 25%。柱间支撑的刚度比单柱大得多，厂房的纵向温度变形的不动点必然接近于柱间支撑的中点；当两道柱间支撑时为两支撑距离的中央。表 2-4 中规定的数值是根据温度区段长度等于不动点到温度区段端部距离的 2 倍确定的。因此当柱间支撑不对称布置时，柱间支撑的中点至温度区段端部的距离不得大于表 2-4 规定数值的 60%。

表 2-4 温度区段长度值

结 构 性 质	纵向温度区段 (垂直于跨度方向)	横向温度区段(沿跨度方向)	
		屋架和柱刚接	屋架和柱铰接
采暖房屋和非采暖地区的房屋	220	120	150
热车间和采暖地区的非采暖房屋	180	100	120
露天结构	120	—	—

注：厂房柱为其他材料时，应按相应规范的规定设置温度缝。围护结构可根据具体情况参照有关规范单独设置温度缝。

横向温度缝最普遍的做法是在缝的两旁各设置一个框架，其间不用纵向构件相互联系。温度缝处的布置一般采用图 2-4(a) 的方案，就是温度缝的中线与厂房的定位轴线相重合；也可采用温度缝处的柱距保持原有模数的方案（图 2-4(b)）。后一种方案将加大厂房的长度，增加建筑面积，增加屋面板类型，因此只有在设备布置条件不允许用前一种方案时才采用。缝旁两

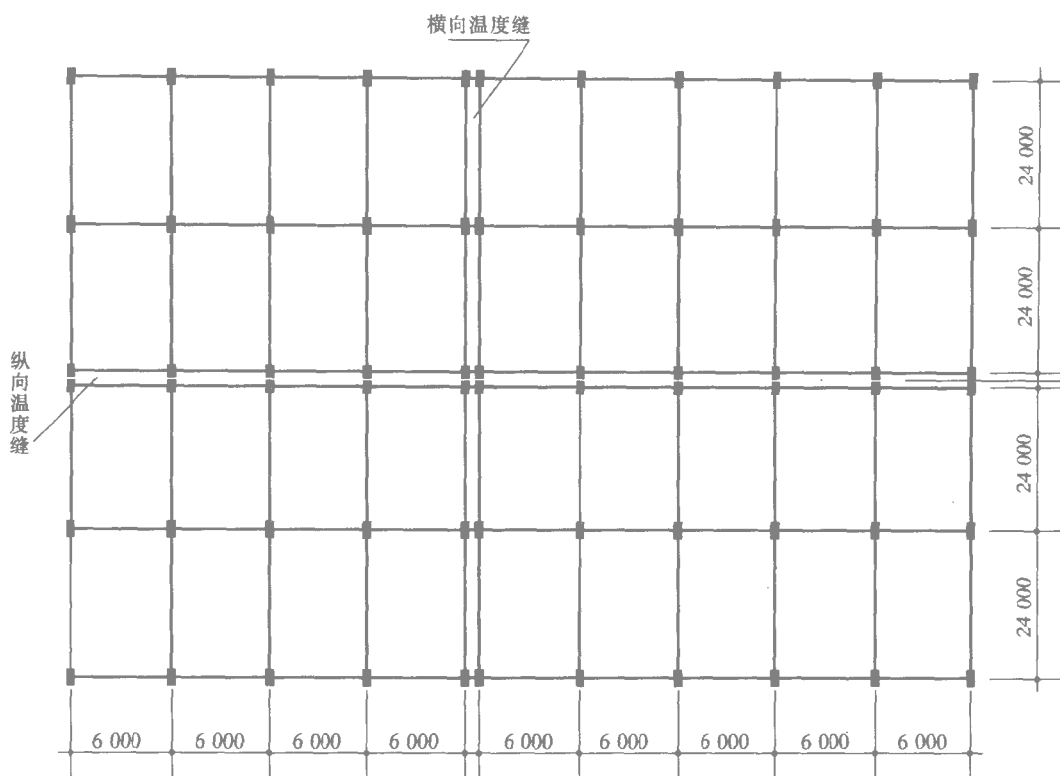


图2-3 横向与纵向温度缝的设置

柱可放在同一基础上 其轴线间距一般可采用 1.0 m 但在重型厂房中 有时需要 1.5~2.0 m。

当厂房宽度较大时 其横向刚度可能比纵向刚度大 此时理应在车间设置纵向温度缝。但若纵向温度缝附近也设置双柱，不仅柱数增多，且在纵向和横向温度缝相交处有 4 个柱子 使构造复杂。因此，一般仅在车间宽度大于 100 m 热车间和采暖地区的非采暖厂房 或 120 m（采暖厂房和非采暖地区的厂房）时才考虑设置纵向温度缝，否则可根据计算适当加强结构构件。

为了节约材料 简化构造 纵向温度缝有时也采用板铰（图 2-5）或活动支座的办法。但这种做法只适宜于对横向刚度要求不大的车间。

### 3. 横向框架

厂房的基本承重结构通常采用框架体系。这种体系能够保证必要的横向刚度，同时其净空又能满足使用上的要求。

横向框架按其静力图式来分，主要有横梁与柱铰接和横梁与柱刚接两种。如按跨数来分，则有单跨的、双跨的和多跨的。

凡框架横梁与柱的连接构造不能抵抗弯矩者称为铰接框架（见图 2-6）能抵抗弯矩者称为刚接框架（图 2-7）。在某些情况下，在刚接框架中又可派生出一种上刚接下悬臂式的框架，即将框架柱的上段柱在吊车梁顶面标高处设计成铰接，而下段柱则像露天栈桥柱那样按悬臂柱考虑（图 2-8）。

框架柱的柱脚一般均刚性固定于基础；在柱顶与横梁为刚接时，依附于主框架的边列柱可