

第1章

概述

1.1 钢结构的特点

钢结构是钢材制成的工程结构,通常是由钢板、热轧型钢或冷弯型钢等组成的承重构件,和其他材料的结构相比,有如下特点:

(1) 强度高,质量轻。钢材和其他建筑材料诸如混凝土、砌体和木材相比,强度要高很多,在相同承载力下,钢构件截面面积小、质量轻。例如,在跨度和荷载相同的情况下,钢屋架的质量为钢筋混凝土屋架质量的 $1/4 \sim 1/3$ 。因此,钢结构相较钢筋混凝土结构更适合于跨度很大或者荷载很大的情况。

(2) 塑性和韧性好。钢材塑性好,结构在破坏之前有明显的变形;延性好,有良好的抗震性能;还具有良好的韧性,对动力荷载的适应性强。

(3) 材质均匀,接近各向同性。钢材内部组织比较接近于匀质和各向同性,同力学计算的假定比较符合。而且在一定的应力幅度内几乎是完全弹性的。因此,钢材的实际受力情况和工程力学计算结果比较符合。

(4) 制作简单,施工工期短。钢结构一般都是在专业工厂进行机械化生产制造,后运至工地现场通过焊接或螺栓安装,工业化生产程度高,质量容易保证,也便于改建、加固和拆迁。

(5) 密闭性好。钢结构采用焊接连接后可以做到安全密封,能够满足高压容器、油罐、管道等对气密性和水密性的要求。

(6) 绿色环保。钢结构工程施工现场占地面积小,现场湿作业少,环境污染少,材料可回收利用。

(7) 耐热但不耐火。钢结构耐热性能好,但耐火性能差。钢材表面温度在 200°C 以内时,钢材性质变化很小;当表面温度达到 400°C 以上时,钢材强度下降较为明显;当表面温度达到 600°C 左右时,钢材几乎完全丧失承载能力。

(8) 耐腐蚀性差。普通钢材容易锈蚀,必须采用防腐涂料等表面防护措施,在使用期间需定期保养。近年来出现的高性能涂料和耐候钢具有较好的抗腐蚀性,已逐步得到推广和应用。

(9) 稳定问题较为突出。由于钢材强度大,钢构件截面小、厚度薄,所以在压力和弯矩等作用下会引发构件甚至整个结构的稳定问题。如何防止结构或构件失稳,在钢结构设计和施工中必须给予足够重视。

1.2 钢结构的组成和类型

钢结构类型多样,主要包括单层厂房钢结构、高层民用建筑钢结构、大跨空间结构等。下面对不同类型钢结构的组成进行简要介绍。

1. 单层厂房钢结构

为了满足工艺及设备设施要求,需要厂房具备跨度大、柱距大、空间高,车间内设置有起重重量大的生产设备以及起重运输设备等特点。因而往往必须采用由钢屋架、钢柱和钢吊车梁等组成的全钢设备。例如火力发电厂、大型冶金企业和重型机械制造厂等车间。下面对钢结构厂房的构造进行简要介绍。

单层厂房钢结构(图 1-1)是由屋盖结构、框架柱、吊车梁、各种支撑等构件组成的空间体系。这些构件按其作用可分为下面几类:

(1) 横向框架

横向框架由柱和它所支承的屋架或屋盖横梁组成,是单层厂房钢结构的主要承重体系,承受结构的自重、风、雪荷载和吊车的竖向与横向荷载,并把这些荷载传递到基础。

(2) 屋盖结构

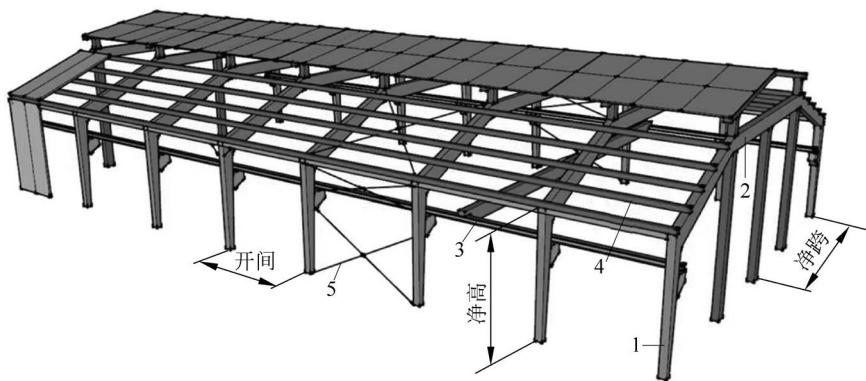
屋盖结构是承担屋盖荷载的结构体系,包括横向框架的横梁、托架、中间屋架、天窗架、檩条等。

(3) 支撑体系

支撑体系包括屋盖部分的支撑和柱间支撑等,它一方面与柱、吊车梁等组成单层厂房钢结构的纵向框架,承担纵向水平荷载;另一方面又把主要承重体系由个别的平面结构连成空间的整体结构,从而保证了单层厂房钢结构所必需的刚度和稳定。

(4) 吊车梁

吊车梁主要承受吊车竖向及水平荷载,并将这些荷载传到横向框架和纵向框架上。



1—框架柱; 2—横梁; 3—吊车梁系统; 4—屋架支撑; 5—柱间支撑。

图 1-1 单层厂房钢结构

2. 高层民用建筑钢结构

《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)规定,高层钢结构一般指 10 层及 10

层以上或房屋高度大于 28 m 的住宅建筑,以及房屋高度大于 24 m 的其他高层民用建筑。高层民用建筑钢结构类型主要包括框架结构体系(图 1-2(a))、框架-支撑结构体系(包括框架-中心支撑、框架-偏心支撑和框架-屈曲约束支撑结构)、框架-延性墙板结构体系、筒体结构体系(包括框筒、筒中筒、桁架筒和束筒结构)以及巨型框架结构。

钢框架结构体系(图 1-2(a))是指沿房屋的纵向和横向均采用钢框架作为承重和抗侧力的主要构件所形成的结构体系。钢框架是由水平杆件(钢梁)和竖向杆件(钢柱)正交连接形成,框架的纵、横梁与柱的连接一般采用刚性连接。

钢框架-支撑体系属于双重抗侧力结构体系,它是在框架结构的基础上沿纵、横两个方向或其他主轴方向设置一定数量的竖向支撑构件所组成的结构体系。其中框架和支撑共同抵抗侧向力的作用。钢框架-支撑体系的支撑分为中心支撑(图 1-2(b))和偏心支撑(图 1-2(c))两种类型。

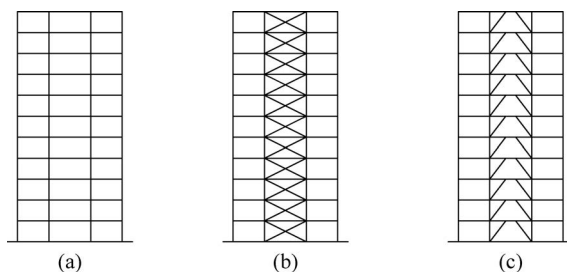


图 1-2 框架结构体系及框架支撑结构体系

(a) 框架结构体系; (b) 框架-中心支撑结构体系; (c) 框架-偏心支撑结构体系

钢框架-延性墙板体系由钢梁、钢柱、延性墙板等构件组成,是一种能共同承受竖向、水平作用的钢结构体系,延性墙板有带加劲肋的钢板剪力墙,无黏接内藏钢板支撑墙板、屈曲约束钢板剪力墙等。

筒体结构体系是由一个或多个筒体作为主要受力构件的高层建筑体系,可分为框筒、筒中筒、桁架筒、束筒等。框筒结构体系的水平荷载主要由外筒体承受,而竖向荷载主要由内部的梁格和承重柱来承受。最简单的外筒体是由一圈密排的柱和各层楼盖处的横梁刚接而成的密间距矩形网络(图 1-3(a))。为达到更大的刚度,可以进一步将框筒结构体系改为桁架筒结构体系(图 1-3(b))。另一种提高刚度的方法为筒中筒结构(图 1-3(c)),即在内部设置剪力墙式的内筒,通过楼盖结构将内筒和外筒连为一个整体,共同承担水平荷载和竖向荷载。随着筒式结构的发展,束筒结构体系(图 1-3(d))应运而生,如采用桁架式束筒结构体系,又可以继续提高整体建筑物刚度。

此外,高层钢结构还包括高层钢-混凝土混合结构体系,主要包括钢框架-钢筋混凝土核心筒结构体系(图 1-3(e))和钢筋混凝土外框筒-钢内框架结构体系。这两种混合结构体系的侧向荷载主要由钢筋混凝土核心筒承担,竖向荷载主要由钢框架承担。

高层钢结构应根据房屋高度和高宽比、抗震设防类别、抗震设防烈度、场地类别和施工技术条件等因素考虑其适宜的钢结构体系。房屋高度不超过 50 m 的高层钢结构建筑可采用框架、框架-中心支撑或其他体系的结构,超过 50 m 的高层钢结构建筑,8、9 度烈度时宜采用框架-偏心支撑、框架-延性墙板或屈曲约束支撑等结构。所有的结构体系选用时应满足结构安全可靠、经济合理、施工高效等原则。

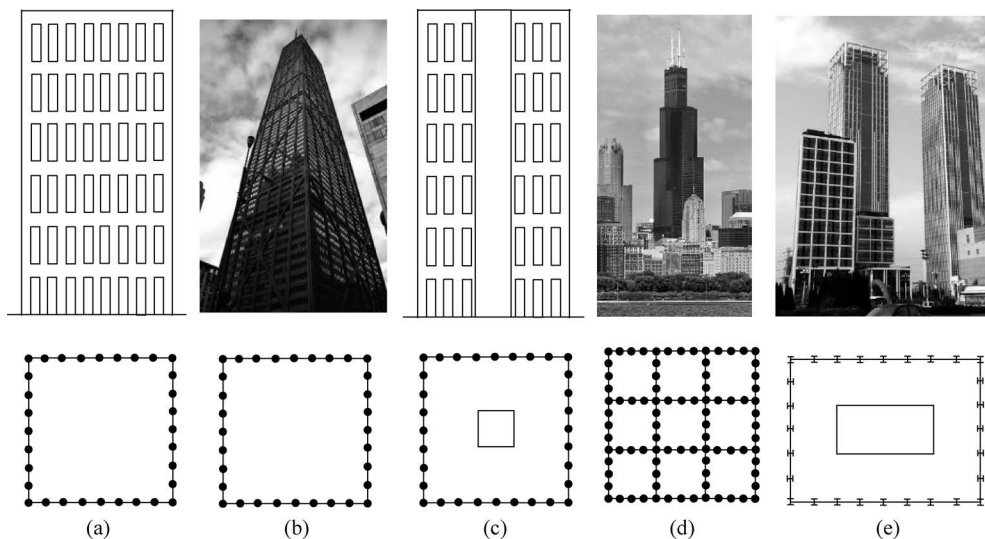


图 1-3 筒体结构

(a) 框筒结构体系; (b) 桁架式框筒结构体系; (c) 筒中筒结构体系;
(d) 束筒结构体系; (e) 钢框架-钢筋混凝土核心筒结构体系

3. 大跨空间结构

大跨空间结构是指不易分解为平面结构体系的三维形体的大跨度结构,具有空间传力特征。通常其基本组成单元就是空间形体,每个节点的受力也是三维的。

早期的空间结构一般为钢筋混凝土实体结构,如薄壳结构、折板结构,目前已应用不多。钢结构范畴的大跨空间结构主要包括网格结构体系、张力结构体系和混合结构体系。

网格结构体系包括网架结构和网壳结构,一般是由杆件和节点按一定规律组成的空间网格状高次超静定结构。外观呈平板状的一般称为网架结构体系(图 1-4(a)),呈曲面状的称为网壳结构体系(图 1-4(b))。网格结构空间刚度大、整体性强,杆件主要受轴力。

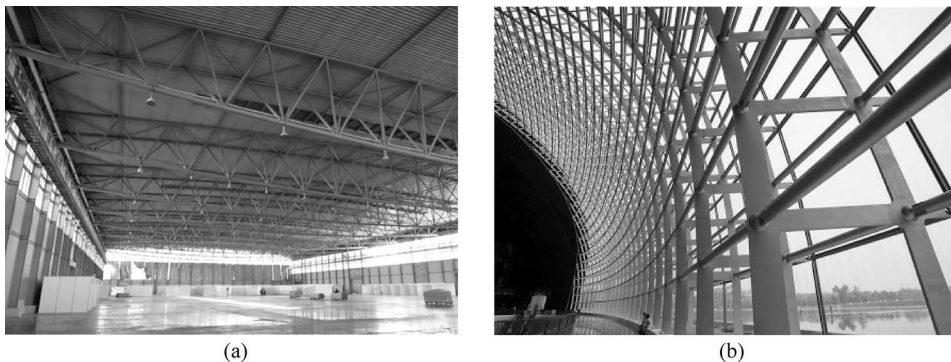


图 1-4 网格结构体系

(a) 网架结构体系; (b) 网壳结构体系

张力结构体系主要有索网结构和索穹顶结构。通过对索施加预张力形成结构体,如图 1-5 所示。其主要受力构件是单向受拉的索。索网结构主要包括单层悬索体系(图 1-5(a))、双层

悬索体系(图 1-5(b))和组合悬索体系(图 1-5(c))。单层悬索体系通常索端需要强大的抗拉支承体系;双层悬索体系由下凹的承重索和曲率相反的稳定索组成,两索之间用拉索或撑杆相连形成索网结构;将多个索网与中间支承结构相结合,也可形成形式各异的组合悬索体系。索穹顶结构是基于 Fuller 张拉整体结构思想而形成的一种新型大跨结构。它采用高强钢索作为主要的受力构件,配合使用轴心受压构件,通过给钢索施加预应力,使结构具备刚度和承载能力。该结构由径向拉索、环索、压杆、内拉环和外压环组成。经典索穹顶结构主要包括 Geiger 型索穹顶结构和 Levy 型索穹顶结构,如图 1-6 所示。

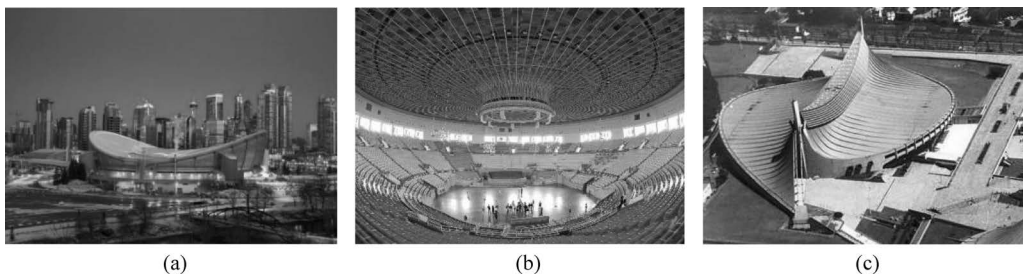


图 1-5 张力结构体系

(a) 单层悬索体系; (b) 双层悬索体系; (c) 组合悬索体系

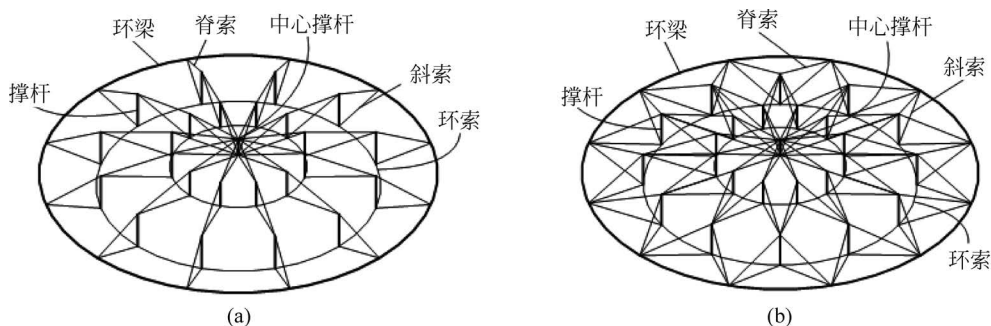


图 1-6 索穹顶结构

(a) Geiger 型索穹顶结构; (b) Levy 型索穹顶结构

结合网格结构和张力结构两种结构体系的优点组合而成的称为混合结构体系或杂交结构体系,包括弦支结构体系、索拱结构体系、斜拉结构体系等,如图 1-7 所示。弦支结构体系利用拉索和撑杆组成索撑体系来支承传统结构,是一种预应力复合结构体系。被支承的传统结构包括梁、桁架、穹顶、混凝土楼板、筒壳和拱壳等,索撑体系和这些传统结构相结合,构成了弦支梁、弦支桁架、弦支穹顶、弦支混凝土板、弦支筒壳和弦支拱壳等结构形式。通过在抗拉构件上施加预应力,使结构产生反向挠度,降低结构在荷载作用下的最终挠度,减小结构对支座产生的水平推力;通过调整受拉构件的预应力,可以使结构成为自平衡体系。同时,撑杆对上层结构也起到了弹性支撑的作用,减小了上层结构的弯矩。

索拱结构体系的传力机理为当对索施加预应力时,拱受到向上的拉力,从而抵消一部分荷载作用导致的拱所承担的压力。

斜拉结构体系是指由塔柱顶部挂下斜拉索直接与刚性屋盖(多为网格结构)相连而形成的结构体系。斜拉索为网格结构提供一系列中间弹性支座,从而达到增大刚性屋盖跨度的效果。

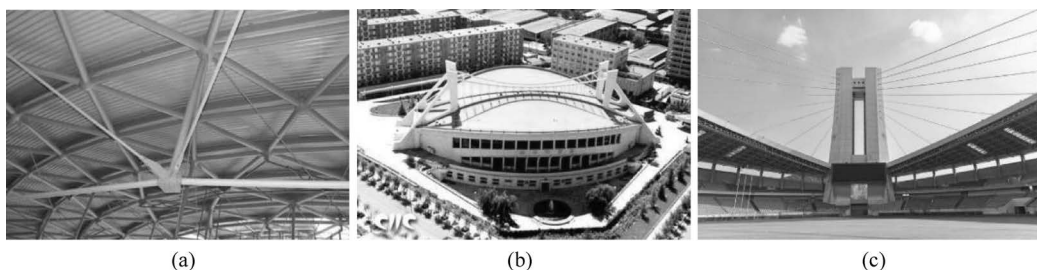


图 1-7 混合结构体系

(a) 弦支结构体系; (b) 索拱结构体系; (c) 斜拉结构体系

组成以上各种类型钢结构建筑物的基本构件有轴心受拉构件、轴心受压构件、受弯构件、拉弯构件、压弯构件、拉索等。将这些构件通过焊缝和螺栓等连接起来就组成了整体钢结构体系。而对于各种受力状态下的构件及连接的计算分析,即为本书讲解的重点。

1.3 钢结构的应用范围

1. 重型工业厂房

吊车起重量较大的工业厂房或者有工作较繁重车间的工业厂房的主要承重骨架多采用钢结构。其结构形式多为由钢屋架和阶形柱组成的门式刚架或排架,也有采用网架做屋盖的结构形式。在工业建筑方面,大部分重型机械厂、大型电机厂以及锅炉厂等主要车间的主体结构都是采用钢结构。图 1-8 为 1977 年建成的上海锅炉厂的重型容器车间,图 1-9 为北京多维国际钢结构 C 型钢加工厂。



图 1-8 重型容器车间



图 1-9 C 型钢加工厂

2. 大跨度结构

大跨度结构跨度越大,其自重荷载所占的比例就越大,因此减轻结构的自重会带来明显的经济效益。钢材强度高和结构重量小的优势适用于大跨度结构,因此钢结构在大跨空间结构和大跨桥梁结构中得到了广泛应用。大跨度结构所采用的结构形式有空间桁架、网架、网壳、悬索(包括斜拉体系)、张弦梁、实腹或格构式拱架和框架等。2008 年北京奥运会羽毛球馆采用净跨度为 93 m 的弦支联方型球面网壳,是当时世界上跨度最大的弦支网壳

结构,如图 1-10 所示。鄂尔多斯伊旗体育中心跨度为 71.2 m,矢高 5.5 m,设 20 道径向索、2 道环索,用钢量低至 20 kg/m^2 ,是国内第一个大跨度新型索穹顶结构体系,如图 1-11 所示。北京大兴国际机场航站楼屋盖由中央大厅和 5 个指廊组成,屋盖结构是由网架、桁架等结构组成不规则自由曲面,共计 18.2 万 m^2 的复杂曲面空间网格钢屋盖,如图 1-12 所示。2022 年冬奥会国家速滑馆马鞍形单层双向正交索网结构,是世界上跨度最大的室内单层索网屋面结构,屋盖正交索网南北向最大跨度 198 m,东西向最大跨度 124 m,如图 1-13 所示。



图 1-10 北京奥运会羽毛球比赛馆



图 1-11 鄂尔多斯伊旗体育中心



图 1-12 北京大兴国际机场

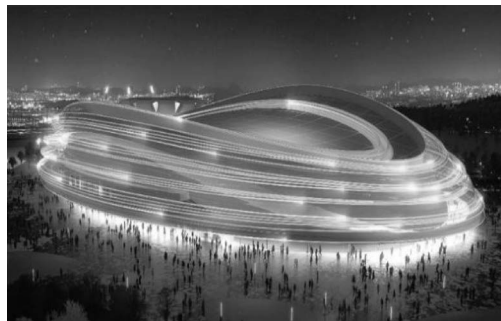


图 1-13 冬奥会国家速滑馆

3. 高层及超高层结构的骨架

钢结构或其组合结构作为高层或超高层结构的骨架,近年来得到了越来越广泛的应用。其结构形式主要有框架结构、框架-支撑结构、筒体结构和巨型框架等。例如首都师范大学附属中学通州校区学生宿舍楼建筑面积为 1.2 万 m^2 ,结构总高度 33.3 m,结构长 61 m,宽 18.6 m,结构体系为钢框架结构,如图 1-14 所示。北京 CBD-Z13 办公楼高 190 m,共 42 层,平面尺寸 $63 \text{ m} \times 38.6 \text{ m}$,采用混凝土核心筒-钢梁钢管混凝土柱外框架-单向伸臂和腰桁架-端部支撑框架组成的混合结构体系,如图 1-15 所示。上海金茂大厦主体结构高度为 372.1 m,总高度为 421 m,为钢-混凝土混合结构,结构体系采用巨型柱框架-核心筒-伸臂桁架结构体系,如图 1-16 所示。北京中信大厦,又名中国尊,是中国中信集团总部大楼,占地面积 11478 m^2 ,总高 528 m,地上 108 层、地下 7 层,总建筑面积 43.7 万 m^2 ,可容纳 1.2 万人办公,在结构上采用了含有巨型柱、巨型斜撑及转换桁架的外框筒以及含有组合钢板剪力墙的核心筒,形成了巨型钢-混凝土筒中筒结构体系,如图 1-17 所示。

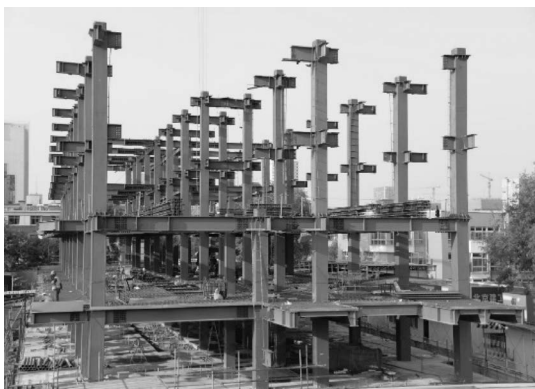


图 1-14 首都师范大学附属中学通州校区学生宿舍楼



图 1-15 北京 CBD-Z13 办公楼



图 1-16 上海金茂大厦



图 1-17 北京中信大厦

4. 受动力荷载影响的结构

由于钢材具有良好的韧性,因而受动力荷载影响的结构(如设有较大锻锤或产生动力作用设备的厂房)往往采用钢结构体系。对于抗震能力要求高的结构,采用钢结构也是比较适宜的。

5. 高耸结构

高耸结构包括塔架和桅杆结构,如高压输电线路的塔架,广播、通信和电视发射用的塔架和桅杆,火箭(卫星)发射塔架等,也是钢结构的应用范围。东方明珠广播电视塔于 1994 年建成,主体为多筒结构,由 3 根斜撑、3 根立柱及广场、塔座、下球体、5 个小球体、上球体、太空舱、发射天线桅杆等构成,总高 468 m,总建筑面积达 10 万 m^2 ,如图 1-18 所示。广州市新电视塔(图 1-19)高 610 m,由 454 m 高的主塔和 156 m 的天线桅杆组成,主塔结构由混凝土核心筒和钢结构外框筒组成。核心筒为 $14\text{ m}\times 17\text{ m}$ 的椭圆,外框筒由 24 根倾斜的钢管混凝土直柱、46 道钢环杆和 45 道钢斜撑组成。

6. 密闭结构和其他构筑物

冶金、石油、化工企业中大量采用钢板做成的容器结构,包括油罐(图 1-20)、煤气罐、高炉和热风炉等。此外,经常使用的还有皮带通廊栈桥、管道支架和锅炉支架等其他钢构筑物,海上采油平台(图 1-21)也大都采用钢结构。



图 1-18 东方明珠广播电视塔



图 1-19 广州电视塔



图 1-20 油罐



图 1-21 海上采油平台

7. 可拆卸结构

钢结构不仅重量轻,还可以用螺栓或其他便于拆装的方法来连接,因此非常适用于需要搬迁的结构,如建筑工地、油田和需野外作业的生产和生活用房的框架等。钢筋混凝土结构施工用的模板和支架,以及建筑施工用的脚手架等也趋向于用工具式的钢桁架。在武汉火神山、雷神山医院建设过程中,使用了大量的临时箱式房,大大加快了施工进度,如图 1-22 所示。在 2022 年北京冬奥会的赛场上可以见到大量临时设施支撑架体(图 1-23),作为观众看台、大屏幕架体和摄像机平台等,赛后可以进行拆除和重复利用。



图 1-22 武汉雷神山医院临时箱式房



图 1-23 北京冬奥会临时设施支撑架体

1.4 钢结构的设计方法

钢结构的设计采用以概率论为基础的极限状态设计法,并采用分项系数设计表达式进行计算。结构设计的目的是要使设计的结构能够满足各种预定功能要求、建筑结构设计统一标准规定,建筑结构必须满足下列功能要求:

(1) 安全性要求。结构应能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种荷载及引起结构外加变形或约束变形的其他作用(如支座沉陷、温度变化),在偶然事件(如地震)发生时及发生后仍能保持必要的整体稳定,不致倒塌。

(2) 适用性要求。结构在正常使用荷载作用下应具有良好的工作性能,满足预定的使用要求。例如,不产生影响正常使用的过大变形等。

(3) 耐久性要求。结构在正常维护下,应随时间的变化仍能满足预定功能要求。例如,不发生严重锈蚀而影响结构的使用寿命等。

结构上的作用是指使结构产生效应(即内力、变形、应力、应变等)的各种原因的总称。作用可分为直接作用和间接作用两类。直接作用是指直接施加于结构上的集中或分布的力,如结构自重、楼面活荷载、吊车荷载等,统称为荷载。间接作用是指引起结构外加变形或约束变形的其他作用,以变形形式作用于结构,如温度变化、基础沉降、焊接、地震等。

作用效应(S)是指结构上的作用引起的结构或其构件的内力和变形,如轴力和弯矩、剪力和扭矩、应力和挠度、转角和应变等,也可以说效应就是作用的结果。当作用为荷载时,其效应也可称为荷载效应。

结构抗力(R)是指结构或构件抵抗内力和变形的能力,如构件的承载能力、刚度等。结构(构件)的抗力是结构(构件)材料性能(强度、弹性模量等)、几何参数和计算模式的函数,由于材料性能的变异性、构件几何特征的不定性等因素,结构(构件)抗力也是随机变量。

1.4.1 结构可靠度

结构在规定的设计使用年限内应具有足够可靠性。按照概率极限状态设计法,结构的可靠性是指结构在规定的时间(设计基准期,一般取 50 年)内,在规定的条件(正常设计、正常施工、正常使用和正常维护)下,完成预定的安全性、适用性、耐久性等功能的能力。显然,结构具有安全性、适用性和耐久性,即可认为结构具有可靠性;因而也可以说,结构可靠性是关于结构安全性、适用性和耐久性的统称。

可靠度 p_s 是可靠性的量化表述,是结构在规定的时间内与规定的条件下完成预定功能的概率。结构的可靠指标 β 是度量结构可靠度 p_s 的指标。结构的设计应设置并依据相应的可靠度,其设置水平应根据结构构件的安全等级、失效模式和经济因素等确定。对结构的安全性和适用性可采取不同的可靠度水平。

当有充分的统计数据时,结构构件的可靠度宜采用可靠指标 β 来度量。 β 既是度量结构构件可靠性大小的尺度,亦是各分项系数取值的基本依据。 β 的理论计算公式可见式 (1-1)。

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-1)$$