

学习目标

1. 掌握建筑结构的基本概念、优缺点。
2. 了解建筑结构在国内外的应用和发展情况。
3. 了解本课程的学习目标和方法。

1.1 建筑结构的组成与分类

结构是指能承受作用并具有适当刚度的由各连接部件有机组合而成的系统。建筑结构是指房屋中承受和传递荷载的系统,如梁、板、柱、基础等构件,是房屋的承重骨架,如图 1-1 所示。建造建筑结构可以采用混凝土结构、砌体结构、钢结构和木结构,本书主要介绍混凝土结构和砌体结构。

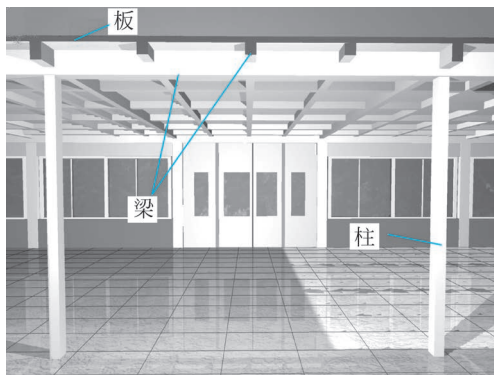


图 1-1 建筑结构

1.1.1 混凝土结构

混凝土结构分为素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构三类。

1. 素混凝土结构

素混凝土结构: 由水泥、砂、石、水组成,属脆性结构,抗压强度较高,抗拉强度较低。例如素混凝土梁(图 1-2),梁受力后中性轴以上受压、中性轴以下受拉,一裂即坏,承载能力较低,破坏突然,没有预告,属脆性破坏。

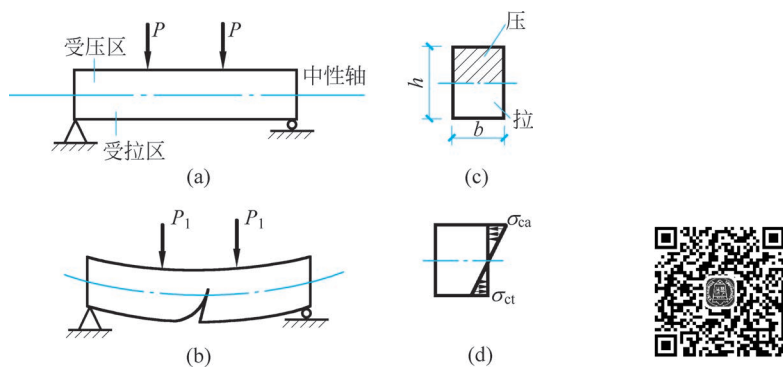


图 1-2 素混凝土结构

2. 钢筋混凝土结构

在素混凝土梁的受拉区配置受拉钢筋(图 1-3),梁受拉区混凝土开裂后,混凝土承担的拉力会全部转嫁给钢筋来承担,而钢筋的抗拉、抗压强度都很高,这就形成了钢筋在受拉区承担拉力为主,而混凝土在受压区承担压力为主的格局。这样就可充分发挥钢筋和混凝土两种材料的性能,当受拉钢筋受拉屈服,受压混凝土被压碎时,梁才会发生破坏,承载能力较高。破坏有明显预告,属塑性破坏。

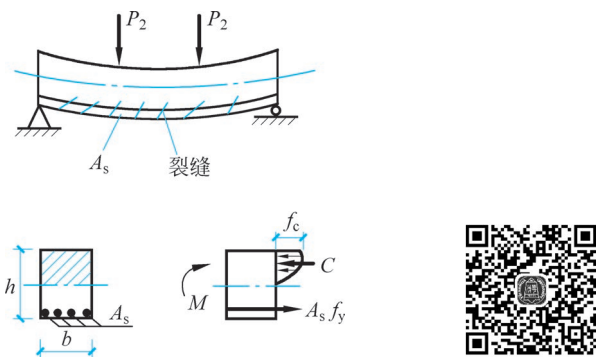


图 1-3 钢筋混凝土结构

钢筋与混凝土协同工作的原理:钢筋和混凝土是两种不同的材料,二者之所以能结合在一起协同工作,共同变形,主要原因如下。

(1) 黏结力。混凝土结硬后,与钢筋紧紧地结合在一起,二者之间形成黏结力,相互传力,共同工作。

(2) 二者的温度线膨胀系数接近。钢筋的温度线膨胀系数是 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,混凝土的温度线膨胀系数是 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,二者数值接近,在温度变化时,它们将共同变形,即同时热胀冷缩。

钢筋混凝土结构比素混凝土结构具有较高的承载力和较好的受力性能,同时还具有以下优点。

(1) 就地取材。混凝土材料中,砂、石是主要材料,易于就地取材。此外还可采用工业

废料,保护环境。

(2) 耐久性好。混凝土的化学稳定性好,同时钢材埋在混凝土中,受混凝土保护,不易锈蚀。

(3) 耐火性好。混凝土属难燃烧材料,传热性能差,同时钢筋埋在混凝土中,受混凝土保护,不易升温软化。

(4) 整体性好。现浇钢筋混凝土结构整体性较好,抗震能力较好。

(5) 可模性好。钢筋混凝土结构可以根据需要的形状和尺寸进行浇筑,以满足工程结构的需要。

(6) 与钢结构相比,可节约钢材。

钢筋混凝土结构也存在以下缺点。

(1) 自重大。钢筋混凝土结构的容重达到 25kN/m^3 。在高层建筑和大跨度结构中呈肥梁胖柱,占用过多房屋的使用面积和净空间,影响房屋的使用。

(2) 抗裂性差。混凝土抗拉强度较低,易裂,影响结构的耐久性和美观。钢筋混凝土结构是带裂缝工作的结构,但裂缝较多、较宽时容易给人造成不安全感。

(3) 费工、费模板、周期长。钢筋混凝土结构的施工工艺包括绑扎钢筋、支模板、浇筑、养护等工序,生产周期长,施工进度和质量受环境和季节的影响。

(4) 补强修复困难。当出现露筋、蜂窝麻面、混凝土强度不足等质量问题时,补强修复较困难。

3. 预应力混凝土结构

普通钢筋混凝土结构构件的受拉区由于混凝土抗拉强度低,容易开裂,导致构件刚度降低、变形加大,影响结构的正常使用。另外,高强度钢筋得不到充分利用,因为在普通钢筋混凝土结构中,即使采用高强度钢筋,但由于与混凝土受压强度不协调,在遭到破坏时高强度钢筋的强度还没有被充分利用,构件就可能因受压混凝土强度不足而被压碎破坏了。如果在结构构件承受外荷载作用前,预先对构件的受拉区施加预压力,这样当外荷载作用时,就要先抵消掉受拉区的预压力,混凝土才能受拉,从而延缓了裂缝的出现,减小了裂缝宽度,同时高强度钢材也能得到充分利用。这种在构件承受外荷载前预先对受拉区混凝土施加预压应力的结构称为预应力混凝土结构。

1.1.2 砌体结构

砌体结构是块材(砖、石、砌块)和砂浆砌筑而成的结构,在多层建筑中主要应用于房屋的墙、柱等主要承重构件,在高层建筑中则主要应用于填充墙等非承重构件。砌体结构具有以下优点。

(1) 材料来源广。天然的石材、砂浆、混凝土和工业废料制作的机制砖具有地方性特点,材料来源广,取材方便,可就地取材。

(2) 耐久性好。砖石等材料具有良好的化学稳定性和大气稳定性,抗腐蚀、抗风化、抗冻融能力强。

(3) 耐火性好。砌体结构材料同样属难燃烧材料,传热性能差,结构稳定性好,可用作防火墙,阻止或延缓火灾的蔓延。

(4) 节约材料,造价低。与混凝土结构相比,其水泥、钢材、木材用量大大减少,可降低

成本,节约材料。

(5) 施工简单,可连续施工。砌体结构施工主要是手工砌筑,技术容易掌握和普及,不需要特殊的设备。同时,新砌体能承受一定的施工荷载,可连续施工。

砌体结构也存在以下缺点。

(1) 自重大、强度低。砌体结构自重大,抗拉、抗剪强度低,承载力差,一般应用于不超过 10 层的建筑中。

(2) 整体性差。由于砂浆与砖石等块体间的黏结力较弱,造成结构的整体性较差,抗震能力较差。

(3) 砌筑工作量大。由于砖、石、砌块的体积较小,需人工砌筑,因此砌筑工作量大、劳动强度高。

1.1.3 钢结构

以钢板、热轧型钢或冷加工成型的薄壁型钢以及钢索为主要材料建造的工程结构,称为钢结构。其基本构件是拉杆、压杆、梁、柱、桁架等,各构件或部件间采用焊接、铆接或螺栓连接等方式连接。

1. 钢结构的优点

1) 轻质高强、质地均匀

钢材与混凝土相比,虽然质量密度较大,但其屈服点较混凝土的抗压强度要高得多,其质量密度与屈服点的比值相对较低。在承载力相同的条件下,钢结构与钢筋混凝土结构相比,构件较小,重量较轻,便于运输和安装。钢材质地均匀,各向同性,弹性模量大,有良好的塑性和韧性,为理想的弹塑性体,完全符合目前所采用的计算方法和基本理论。

2) 生产、安装工业化程度高,施工周期短

钢结构生产具备成批大件生产和高度准确性的特点,可以采用工厂制作、工地安装的施工方法,所以其生产作业面多,可缩短施工周期,进而为降低造价、提高效益创造条件。

3) 密闭性能好

钢材本身组织非常致密,当采用焊接连接,甚至螺栓连接时都可以做到完全密封不渗漏。因此一些要求气密性和水密性较高的压力容器、油罐、气柜、管道等板壳结构都采用钢结构。

4) 抗震及抗动力荷载性能好

钢结构因自重轻、质地均匀,具有较好的延性,因此抗震及抗动力荷载性能好。

2. 钢结构的缺点

1) 耐热性好,但防火性差

温度在 200°C 以内,钢的性质变化很小,温度超过 200°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。当温度达 600°C 时,钢材进入塑性状态已不能承载。因此,设计规定钢材表面温度超过 150°C 后即需加隔热防护,对有防火要求者,更需按相应规定采取隔热保护措施。在防火设计不当或者防火层处于破坏的状况下,有可能产生灾难性的后果。

2) 抗腐蚀性较差

钢结构的最大缺点是易于锈蚀。新建造的钢结构一般都需仔细除锈、镀锌或刷涂料。以后隔一段时间需重新刷涂料,这就使钢结构维护费用比钢筋混凝土结构高。目前国内外正在发展不易锈蚀的耐候钢,可大量节省维护费用,但还未能广泛采用。随着高科技的发展,钢结构易锈蚀、防火性能比混凝土差的问题将逐渐得到解决。一方面从钢材本身解决,如采用耐候钢和耐火高强度钢;另一方面是通过采用高效防腐涂料,特别是防腐、防火合一的涂料解决。

1.2 建筑结构的应用和发展情况

1.2.1 混凝土结构的应用和发展情况

混凝土结构是19世纪随着水泥的发明和现代钢铁工业的发展而发展起来的。1824年,英国人J. Aspdin发明了波特兰水泥,为混凝土的诞生奠定了基础。1850年,法国人Joseph Louis Lambt用水泥砂浆涂在钢丝网的两面做成了小船,形成了最早的钢筋混凝土结构。1868年,法国花匠J. Monier用钢丝做骨架,然后在钢丝骨架外面抹上水泥,制成了美观坚固的花盆,并获得了专利。后来他又申请了钢筋混凝土板、管道、拱桥等专利,尽管他不懂钢筋混凝土结构的受力原理,甚至将钢筋配置在板的中部,但却被公认为钢筋混凝土结构的发明者。1884年,德国人Wayss Bauschinger和Koenn等提出了钢筋应配置在构件中受拉力的部位和钢筋混凝土板的计算理论。1872年,世界第一座钢筋混凝土建筑在纽约落成,人类历史上一个崭新的纪元从此开始,从此混凝土结构被广泛应用于梁、板、柱、基础等结构构件中。近年来混凝土结构应用和发展较迅速,主要体现在以下几方面。

材料方面 目前我国混凝土结构采用C15~C80级混凝土。高性能混凝土的研究也取得了较大进展,我国已制成C100级混凝土。为了减轻结构自重,充分利用工业废料,我国大力发展轻集料混凝土如浮石混凝土、陶粒混凝土等,其重为 $14\sim 18\text{kg/m}^3$,与普通混凝土相比可减少自重 $10\%\sim 30\%$ 。此外,各种纤维混凝土的应用,大大改善了混凝土抗拉性和延伸性差的缺点。钢材方面,我国2022年钢材产量为13.4亿吨,居世界首位,为中国式现代化奠定了重要的物质基础。高强度钢材HRB500和强度达到 1960N/m^2 的预应力钢绞线得到广泛应用,为混凝土结构在高层建筑、高耸建筑和大跨度桥梁等方面的应用创造了条件。

结构方面 钢—混凝土组合结构是近年来的发展方向之一。如压型钢板—混凝土组合而成的组合楼盖,型钢—混凝土组合而成的组合梁及钢管混凝土柱等。另外,预应力混凝土结构近年来发展也比较迅速,特别是无黏结部分预应力混凝土结构。无黏结筋由单根或多根高强钢丝、钢绞线或钢筋沿全长涂抹防腐油脂并用聚乙烯热塑管包裹而成,像普通钢筋一样敷设,然后浇筑混凝土,待混凝土达到规定的强度后进行张拉和锚固。这样做省去了传统预应力混凝土的复杂施工工序,缩短了工期,降低了造价。

设计理论方面 从1955年我国有了第一批建筑结构设计规范至今,混凝土结构设计规范已经修订了五次。现行《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)(2024年版)就是在

总结 50 多年的丰富工程实践经验、设计理论和最新科学研究成果的基础上编制的。它采用以概率理论为基础的极限状态法,从对结构仅进行线性分析发展到对结构进行非线性分析;从对结构侧重安全发展到侧重结构的性能,更加严格地控制了裂缝和变形。随着对混凝土弹塑性性能的深入研究,现代测试技术的发展及计算机的广泛应用,混凝土结构的计算理论和设计方法将向更高阶段发展。

应用方面 工业建筑的单层和多层厂房已广泛采用了钢筋混凝土结构;在民用和公共建筑中,钢筋混凝土结构在住宅、旅馆、剧院、体育馆等建筑中得到广泛应用。此外,钢筋混凝土结构在桥梁工程、水工及港口工程、地下工程、海洋工程、国防工程及特种结构中得到广泛应用,尤其是近年来钢筋混凝土高层建筑发展迅速。



小知识：钢筋混凝土高层建筑

位于阿拉伯联合酋长国迪拜的哈利法塔(又称迪拜塔)(图 1-4)于 2010 年 1 月 4 日建成,共 162 层,建筑总高度 828m,其中混凝土结构高度为 601m,是目前世界上最高的钢筋混凝土建筑。我国上海中心大厦(图 1-5)于 2016 年建成,共 118 层,建筑总高度 632m,其中混凝土结构高度为 580m,目前是我国第一高楼。



图 1-4 哈利法塔(迪拜塔)



图 1-5 上海中心大厦

1.2.2 砌体结构的应用和发展情况

砌体结构在我国的应用历史悠久,我国考古发掘资料表明,在新石器时期已有地面木架建筑和木骨泥墙建筑。公元前 20 世纪时(约夏代),出现了夯土构筑的城墙。商代出现了用黏土砖(土坯砖)砌筑的房屋。西周时期出现了黏土烧制成型的瓦。战国时期,出现了黏土烧制而成的大尺寸空心砖,秦汉时期黏土砖和瓦得到了广泛应用,历史上有著名的万里长城(图 1-6)、河北赵县李春建造的安济桥(图 1-7,建于隋代,距今约 1400 年,净跨径 37.2m,拱圈矢高 7.23m,桥面宽 9.6m,全长 64.4m)等。



图 1-6 万里长城



图 1-7 河北赵县安济桥(又称赵州桥)

国外,采用石材和砖建造各种建筑物也有着悠久的历史。古希腊在发展石结构方面做出了重要的贡献。埃及的金字塔(图 1-8)和我国的万里长城一样,因其气势宏伟而举世闻名。公元前 432 年建成的帕特农神庙,比例匀称,庄严和谐,是古希腊多立克柱式建筑的最高成就。公元前 80 年建成的古罗马庞贝城角斗场(图 1-9),规模宏大,功能完善,结构合理,景观宏伟,其形制对现代的大型体育场仍有着深远的影响。6 世纪在君士坦丁堡(今土耳其伊斯坦布尔)建成的圣索非亚教堂,为砖砌大跨结构,东西长 77.0m,南北长 71.7m,具有很高的水平。古罗马建筑依靠高水平的拱券结构获得宽阔的内部空间,能满足各种复杂的功能要求。始建于 1173 年的著名的意大利比萨斜塔(图 1-10)塔高 58.36m,以其大角度的倾斜(现倾斜约 $5^{\circ}30'$)而闻名。1163 年始建、1250 年建成的巴黎圣母院(图 1-11),宽约 47m,进深约 125m,内部可容纳近万人,它立面雕饰精美,为法国哥特式教堂的典型。1889 年,在美国芝加哥由砖砌体、铁混合材料建成了第一幢高层建筑 Monadnock Building,17 层,高 66m。



图 1-8 埃及金字塔



图 1-9 古罗马庞贝城角斗场

19 世纪水泥发明以后,砌体结构在工业与民用建筑中得到了进一步广泛应用,如住宅、桥梁、公共建筑等房屋的建造。1949 年新中国成立后,我国制成了 $240\text{mm} \times 115\text{mm} \times 53\text{mm}$ 标准砖,随着砌体结构材料的进步和设计理论不断完善,砌体开始应用于特种结构,如水池、烟囱、水坝、水槽、料仓及小型桥涵等,房屋建筑的砌筑高度也得到较大发展,大量应用于单层、多层房屋(图 1-12 和图 1-13),具体应用和发展表现在以下方面。



图 1-10 意大利比萨斜塔



图 1-11 巴黎圣母院



图 1-12 2层砌体结构房屋(别墅)



图 1-13 7层砌体结构房屋

材料和结构方面 具体表现在新材料、新技术和新型结构形式的采用。在新材料方面,包括混凝土空心砌块、硅酸盐和泡沫硅酸盐砌块、各种材料的大型墙板,以及非承重空心砖的采用和不断改进;在新技术方面,包括振动砖墙板、各种配筋砌体(含预应力空心砖楼板)、预应力砖砌圆形水池及钢丝网水泥与砖砌体组合而成的圆水池等;在新型结构方面,包括各种形式的砖薄壳结构。

设计理论方面 根据大量的试验和调查研究资料,1973年我国颁布了第一部《砖石结构设计规范》(GBJ 3—1973),从而结束了我国长期沿用外国规范的历史,该规范提出了一系列适合我国国情的各种强度计算公式、偏心受压构件计算公式和考虑风荷载下砖砌体房屋空间工作的计算方法等。1988年我国颁布了《砌体结构设计规范》(GBJ 3—1988),其特点是采用了以近似概率理论为基础的极限状态设计法,统一了各种砌体的强度计算公式,将偏心受压计算中的三个系数综合为一个系数,对局部受压的计算进行了较为合理的改进,提出了墙梁、挑梁计算的新方法,并将单层房屋的计算推广到多层房屋。2002年我国颁布了《砌体结构设计规范》(GB 50003—2001),它是在1988年规范的基础上经过全面修订而成的,修订后的规范注入了新型砌体材料的内容,并对原有的砌体结构设计方法作了适当的调整和补充。2011年我国颁布了《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011),使现代砌体结构设计规范更为完善和先进。



小知识：砌体结构的发展趋势

- 采用轻质高强砌体材料,如空心砖可大大减轻结构的自重,高强度砖和高强砂浆的研究和采用,比如砖的强度可达 200MPa,大大提高了砌体结构的强度。
- 采用配筋砌体和组合砌体。在砌体水平灰缝中配置钢筋网,可提高砌体结构的整体性,提高房屋的抗震性能。
- 采用工业废料,如粉煤灰、炉渣、煤矸石等,制作硅酸盐砖、加气硅酸盐砌块或煤渣混凝土砌块等,这样既处理了工业废料,又避免了黏土砖与农田争土地的矛盾,我国 2007 年禁止使用实心黏土砖,进一步促进了工业废料的利用与发展。
- 采用大型墙板作为建筑的内外墙,形成装配式建筑,由于其大部分工作在工厂进行,为建筑工业化创造了有利条件。具有施工机械化程度高、工期短、现场用工少、湿作业少、受季节影响小等优点。20 世纪 80 年代以来,各国均从构件定型化、产品系列化和组合多样化方面入手,扩大使用功能。发展大开间,采用多功能一次成型带饰面的外墙板,使用轻质材料,改进连接,缩短工期,为扩大装配式建筑的适用范围创造条件。

1.2.3 钢结构的应用和发展情况

1. 钢结构的应用

钢结构的应用范围与特点和钢材供应情况密切相关。我国 20 世纪 60—70 年代,钢材供应短缺,节约钢材、少用钢材成为当时的首要任务,致使钢结构的应用范围受到很大限制。20 世纪 80 年代以来,钢产量逐年提高,钢材品种不断增加,钢结构应用范围不断扩大。目前,钢结构常用于现代大跨度、超高、过重、振动、密闭、高耸、空间和轻型的现代化工程结构中,其应用范围大致为下列几种。

1) 厂房结构

厂房结构一般用于重型、大型车间的承重骨架。例如冶金工厂的平炉车间,重型机械厂的铸钢车间、锻压车间等,通常由檩条、天窗架、屋架、托架、柱、吊车梁、制动梁(桁架)、各种支撑及墙架等构件组成。

2) 大跨度结构

体育馆、影剧院、大会堂等公共建筑以及飞机装配车间或检修库等工业建筑要求有较大的内部自由空间,故屋盖结构的跨度很大,减轻屋盖结构自重成为结构设计的主要问题,因此采用材料强度高且重量轻的钢结构。其结构体系主要有框架结构、拱架结构、网架结构、悬索结构、预应力钢结构等。如 2008 年北京奥运会主体馆“鸟巢”,钢结构总重 4.2 万 t,最大跨度 343m,外形结构主要由巨大的门式钢架组成,共有 24 根桁架柱,柱距为 37.96m,使用 Q460 规格的钢材,钢板厚度达到 110mm。

3) 多层、高层结构

对于高层建筑来说,当层数多、高度大时,常常采用钢结构,如酒店、公寓等高层建筑。

高层钢结构建筑是一个城市的标志性建筑。如上海中心大厦(高度为 632m);上海环

球金融中心(101层、高度为492m、用钢量6.5万t);北京电视中心(建筑面积18.3万m²,41层,高度为227.05m,用钢量3.8万t);国贸中心三期(建筑面积54万m²、高度为330m);央视新大楼(建筑面积5万m²、高度为234m、用钢量12.8万t)等。

4) 高耸构筑物

高耸结构包括塔架和桅杆结构,如高压输电线路塔架、广播和电视发射用的塔架和桅杆,多采用钢结构,这类结构的特点是高度高,主要承受风荷载,采用钢结构可以减轻自重,方便架设和安装,并因构件截面小而使风荷载大大减小,从而获得更大的经济效益。

如巴黎埃菲尔铁塔,现高330m,塔身为钢架镂空结构,重达9000t,共用了1.8万余个金属部件,以100余万个铆钉铆成一体,全靠四条粗大的用水泥浇灌的塔墩支撑。全塔分为3层:第1层高57m,第2层高115m,第3层高276m。每层都设有带高栏的平台,供游人眺望那独具风采的巴黎市区美景。

5) 密闭压力容器

用于要求密闭的容器,如大型储液库、天然气储气罐、煤气柜库等,要求能承受较大的内力,另外,温度急剧变化的高炉结构、输油输气管道等均采用钢结构。

6) 移动结构

钢结构不仅重量轻,还可以用螺栓或其他便于拆装的手段来连接,需要搬迁或移动的结构,如流动式展览馆和活动房屋,采用钢结构最适宜。另外,钢结构还广泛用于水工闸门、桥式吊车和各种塔式起重机、缆绳起重机等。

7) 桥梁结构

钢结构广泛应用于中等跨度和大跨度的桥梁结构中,如上海卢浦大桥、重庆菜园坝长江大桥(世界第一座公路、轻轨两用城市大桥)、武汉天兴洲长江大桥、矮寨大桥等。

8) 轻钢结构

轻钢结构用于跨度较小,屋面较轻的工业和商业用房,常采用冷弯薄壁型钢、小角钢、圆钢等焊接而成。轻型钢结构因具有用钢量省、造价低、供货迅速、安装方便、外形美观、内部空旷等特点,近年得到迅速的发展。

9) 住宅钢结构

用钢结构建造的住宅重量是钢筋混凝土住宅的1/2左右,可满足住宅大开间的需求,使用面积比钢筋混凝土住宅提高4%左右。钢材可以回收,建造和拆除时对环境污染较少,符合推进住宅产业化、发展节能省地型住宅的国家政策。国务院1999年第72号文件明确提出要发展钢结构住宅,扩大钢结构住宅的市场占有率。目前钢结构住宅已得到广泛应用。

2. 钢结构的发展

钢结构是由生铁结构逐步发展起来的,中国是最早用铁制造承重结构的国家。远在秦始皇时代(公元前200多年),就有了用铁建造的桥墩。

我国工程技术人员在金属结构方面创造了卓越的成就,1927年建成了沈阳黄姑电机车厂钢结构厂房,1928—1931年建成了广州中心纪念堂圆屋顶,1934—1937年建成了杭州钱塘江大桥等。

20世纪50年代后,钢结构的设计、制造、安装水平有了很大提高,建成了大量钢结构工程,有些在规模上和技术上已达到世界先进水平。如采用大跨度网架结构的首都体育馆、上