

钢结构体系分类及其对绿色建造的适用性

张涛 耿方彪 费传金 张巍 王嘉杰

中国建筑第八工程局有限公司上海分公司, 上海市浦东区, 200120;

摘要: 钢结构凭借其轻质高强、刚度大、韧性好等性能, 在建筑领域得到了广泛应用。本文系统分析了钢结构体系的分类及其在绿色建造中的重要性, 重点介绍了钢桁架结构、钢框架结构和钢网壳结构等刚性结构的高标准化和工厂化特性, 钢索网结构和索穹顶结构等柔性结构的自重轻、施工便捷优势, 以及弦支穹顶结构等刚柔混合结构的结构效率和稳定性提升。在绿色建造方面, 钢结构通过其环保、节能和高效的特性, 推动了建筑行业的可持续发展。

关键词: 钢结构; 刚性结构; 柔性结构; 刚柔混合结构; 绿色建造

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.012

引言

随着可持续发展理念的推广, 绿色建造已成为建筑行业升级转型的重要方向。钢结构以其高强度、可回收性和装配化等特点, 在节能减排、资源循环利用及环保方面展现出了显著优势。因此, 从结构体系视角研究钢结构在绿色建造中的作用及发展路径, 具有重要的理论意义和实践价值。

相较于混凝土材料, 钢材具有较好的塑性和韧性, 在正常情况下, 钢材不会因结构过载而突然断裂, 并且能够对动态负载进行调节。钢材的优良耗能能力和延性使得钢柱在抗震和抗风条件下表现良好。在大变形时, 钢结构建筑不易坍塌, 提高了安全性。此外, 钢结构适合作为承受振动和冲击载荷较大的结构体系, 可作为防灾基地^[1]。

钢结构建筑体系可根据结构刚度分为三种类型: 刚性结构、柔性结构和刚柔混合结构。本文从结构形态及内力角度对几种常见的钢结构体系开展分析, 同时探讨了钢结构在绿色建造中的作用和重要性。

1 刚性结构

1.1 钢桁架结构

钢桁架的构件可在工厂内进行批量化加工, 标准化程度高、生产效率高, 便于实现工业化建造方式, 因此在工业建筑和民用建筑领域均展现出良好的推广前景。其标准化生产和高装配率不仅提高了施工效率, 也显著减少了现场施工能耗和建筑废料, 体现出良好的绿色建造特性。钢桁架结构在工程中应用广泛, 常见于屋面体系、起重机梁、桥梁以及水工闸门等需要承担主要荷载的位置。

与传统框架体系相比, 桁架的各构件通常以受拉或

受压为主, 弯矩效应较弱, 有利于充分发挥材料截面的受力效率, 减少构件尺寸, 从而降低钢材消耗。此外, 桁架本身具有较高的侧向刚度, 只需按照强度与稳定要求进行设计, 通常即可满足整体侧向刚度的需求, 无需额外增加构件或用钢量^[2]。

从杆件受力特点、截面类型及节点做法来看, 钢桁架大致可分为普通型、重型和轻型三类。普通钢桁架多采用单腹杆构造, 常以由两块角钢组成的 T 形截面为主, 也可能使用十字形、圆管或其他异形截面, 节点一般利用节点板连接, 体系简洁, 适用范围广。重型桁架的杆件通常使用钢板或热轧型钢, 形成工字形或箱形截面, 并通过成对设置的节点板连接, 常用于荷载较大或跨度较宽的工程, 如桥梁或大型屋盖。轻型钢桁架则多由小规格角钢、圆钢或薄壁型钢构成, 节点可以采用节点板, 也可直接连接, 主要服务于小跨度、轻屋面的屋盖结构。

1.2 钢框架结构

钢框架结构在侧向刚度方面相对不足, 仅按照强度和稳定性要求进行设计往往无法满足侧移限值。当单纯依靠增加梁柱截面来提升侧向刚度时, 往往会导致结构不经济, 因此通常需要在框架内引入支撑构件。依据支撑布置方式的不同, 钢框架体系可分为中心支撑框架与偏心支撑框架两类。

中心支撑框架通过在框架的受弯平面内设置轴力支撑, 削弱弯曲对结构受力及变形的不利影响, 使体系的承载力与刚度显著提升。然而, 这类体系在抗震方面存在短板。尽管其整体刚度较大, 但耗能能力有限, 对地震能量的吸收和消散效果不够理想。

偏心支撑框架则在中心支撑体系的基础上进一步优化, 通过将支撑与梁的连接位置避开跨中, 使框架形

成特定的耗能段,从而提高体系的延性与耗能能力。该体系既能保持较高的强度和刚度,又能有效消散地震能量,因此非常适合应用于地震设防烈度较高的区域。

1.3 钢网壳结构

钢网壳结构是一种发展较快且应用广泛的空间杆系体系,其整体形态呈壳体状,由杆件组成网格,形成网状壳体或曲面型网架结构。网壳结构的杆件主要承受轴力,结构内力分布均匀,应力峰值较小,从而充分发挥材料强度^[3]。网壳结构采用壳体结构的曲面形式,外观上具备丰富的造型,设计人员可以利用其灵活的平面和形体设计,实现动静、明暗、虚实对比,将建筑美与结构美有机结合,使建筑更易与环境协调。

网壳结构形式多样,包括单层网壳、预应力网壳、板锥网壳、肋环式索承网壳以及单层叉筒网壳等。单层网壳由大量杆件按照特定几何规律构成单层曲面空间网格,其节点多采用刚性连接方式。由于杆件在空间中依壳体结构布置,体系同时具有壳结构的受力特征,通过壳体内部两个主方向的拉力、压力及剪力逐点传递荷载。此类结构在国内外研究与工程实践中均受到高度关注,发展潜力十分显著。

2 柔性结构

2.1 钢索网结构

建筑索结构是指利用索本身作为主要承重构件,或通过张拉索向刚性体系施加预应力,从而提升整体受力性能的一类结构体系(如图1所示)。索结构依靠轴向拉力来承受外部荷载,能够充分发挥材料的抗拉强度,显著减轻结构自重,并实现超大跨度的空间覆盖。此类结构施工过程相对简便,无需大型吊装设备或大量脚手架,因此施工成本较低。由于索的受力以拉伸为主,截面应力分布均匀,可有效发挥钢索的高强度特性,同时避免了压杆易失稳的缺陷,这是许多传统钢结构难以具备的优势。索结构的整体刚度也可通过调整预应力水平来控制,而无需改变构件的几何尺寸。

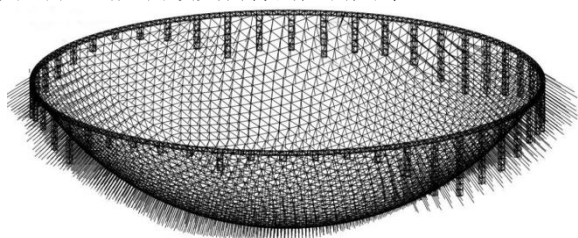


图1 钢索网结构

Fig.1 Steel cable mesh structure

2.2 索穹顶结构

索穹顶结构(见图2)由大量施加预应力的钢拉索及少量短压杆共同构成,其核心受力机制依赖钢索的轴向拉力,从而能够充分利用钢材的抗拉性能,使结构体系具有极高的受力效率。索穹顶出现的时间并不久远,一般认为在20世纪末才逐渐发展成熟。凭借独特的空间形态、精巧的结构理念、合理的受力方式以及良好的经济性,该体系已在大跨度乃至超大跨度建筑的屋盖工程中得到广泛采用。作为一种力的自平衡结构,索穹顶通常由脊索、环索、斜向拉索以及若干压杆共同组成主体受力体系。在重力作用下,压杆底部的节点受到斜索的拉力因而有向外运动的趋势,但每一个压杆底部都会受到环索的约束,使其不能向外运动,只能向上运动。脊索此时的受拉作用限制了向上的运动,荷载通过一系列的脊索和斜索从内拉环传递至外围的受压环,从而保证了结构的稳定平衡^[4]。

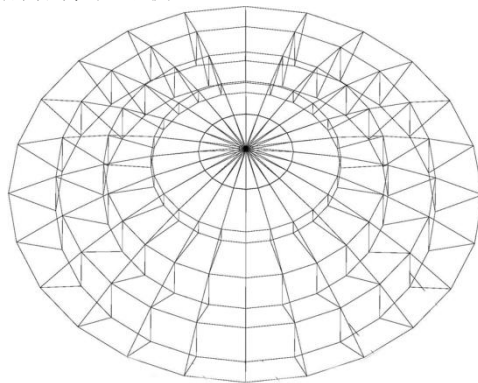


图2 索穹顶结构

Fig.2 Cable dome structure

3 刚柔混合结构

刚柔混合结构的代表之一是由日本学者川口卫于1993年提出的弦支穹顶结构^[5](图3)。它可以被看作是单层网壳结构与索穹顶结构的改进组合,其结构整体受力更加均衡。在单层网壳体系的基础上,引入撑杆、环向索及斜拉杆,使结构的受力路径更加清晰。各环撑杆的上端通过铰接方式与相应层级的网壳节点连接;撑杆下端则由径向拉索与下一环的节点相连,而同一环范围内的撑杆下端通过环向拉索彼此连接,最终构成完整连续的受力体系^[6]。弦支穹顶结构通常具备以下优势:

(1) 结构效率显著提高。在单层网壳下部布设索撑体系,通过引入高强度预应力拉索,可更充分地发挥钢材的受力性能,提高网壳上部结构的整体稳定性,同时有效减小结构挠度。

(2) 体系具有一定的初始刚度。与索穹顶等完全柔性的结构相比,其成型过程与节点构造均大幅简化,降低了施工难度与技术要求,从而减少工程成本,具备

良好的经济性。

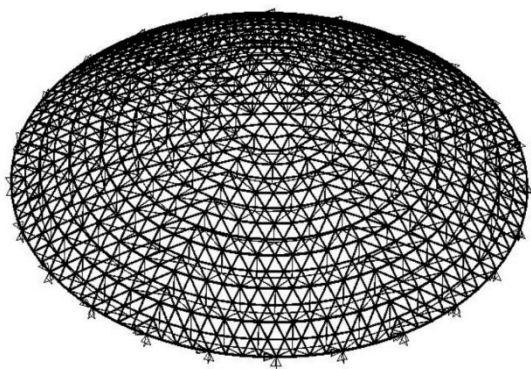


图3 弦支穹顶结构

Fig.3 Suspend-dome structure

4 绿色建造中的钢结构

钢结构在绿色建造中的作用和重要性不容忽视。首先,钢结构材料具有可回收和再利用的特性,这极大地减少了建筑废弃物的产生,符合绿色建造的环保要求。废旧钢材可以通过冶炼重新制成新的钢材,循环利用效率高,减少了资源浪费和对自然环境的破坏。

其次,钢结构建筑在施工过程中产生的噪音、粉尘和其他污染物较少,有助于减少施工对周围环境和居民生活的影响。钢结构的预制化程度高,大部分构件可以在工厂完成加工和组装,现场施工时间短、效率高,进一步降低了施工对环境的扰动。钢结构的高装配率使得施工过程对资源消耗较少,同时减少了施工废料和建筑垃圾的产生。

此外,钢结构建筑在能效方面表现优异。钢材的导热性能较强,结合合适的保温和隔热措施,可显著提升建筑的能源利用效率。钢结构建筑通常设计灵活,可以方便地集成各种节能设备和技术,如太阳能光伏系统、雨水收集系统和智能控制系统,从而进一步提升建筑的绿色性能。

钢结构还具备较高的结构强度和抗震性能,能够有效应对各种自然灾害,减少灾害对建筑物的损害和对资源的消耗。在地震多发地区,钢结构建筑因其韧性好、不易倒塌的特点,成为防灾减灾的重要选择。

总体来看,钢结构在绿色建造中具有重要作用。其环保性、节能性和高效性不仅符合现代建筑可持续发展

的要求,也为实现绿色建筑目标提供了可靠支撑。广泛推广钢结构技术,有助于推动建筑行业向绿色转型发展,同时促进经济与环境的协调共进。

5 结语

钢结构凭借其轻质高强、刚度大、韧性好等性能,已成为现代建筑行业的重要组成部分。钢结构不仅在工业和民用建筑中广泛应用,还在抗震、防风、节能环保等方面表现出色。随着材料科学与施工技术的不断进步,钢结构的整体性能和应用潜力将进一步提升。

本文将钢结构体系按照结构刚度一般性地分为刚性结构、柔性结构及刚柔混合结构,并从结构形态和内力分析的角度,分析了常见钢结构体系的特点及其工程应用优势。在建筑工业化和绿色建造的推动下,钢结构的预制化和高装配率保障了施工效率和环保性。推广钢结构技术不仅能够实现材料循环利用,减少资源消耗与环境污染,也推动建筑行业向可持续发展方向发展。

展望未来,钢结构发展将趋向智能化、轻量化和高性能化。新型钢材及智能建造技术的应用,将进一步提升建筑效率与安全性。通过不断创新,钢结构将在绿色建造和建筑工业化进程中发挥核心作用,为构建更加可持续的生活环境提供保障。

参考文献

- [1]郁银泉,朱峰岐,王喆. 钢结构建筑的推广与应用综述(英文)[J]. 钢结构(中英文),2020,35(1):11.
- [2]肖潇. 钢结构桁架建筑的分析研究[D]. 西南交通大学,2007.
- [3]沈祖炎,陈以一,陈扬骥. 房屋钢结构设计[M]. 房屋钢结构设计,2008.
- [4]钱若军,董明,夏绍华. 索穹顶(CableDome)结构的特性及分析[J]. 建筑结构学报,1998(2):23-29.
- [5]KAWAGUCHI Mamoru, ABE Masaru, TATEMICH Iku o. Design, tests and realization of "suspend-dome" system[J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1999,40(3):179-192.
- [6]陈建亮. 大跨度弦支穹顶结构预应力优化设计[D]. 广州大学,2019.