

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。

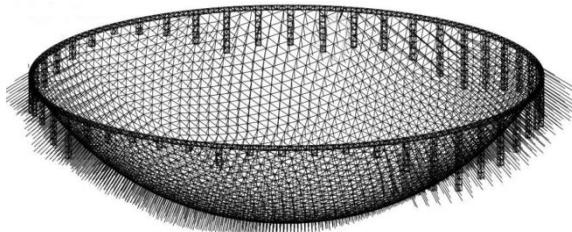


图 1 钢索网结构

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]。

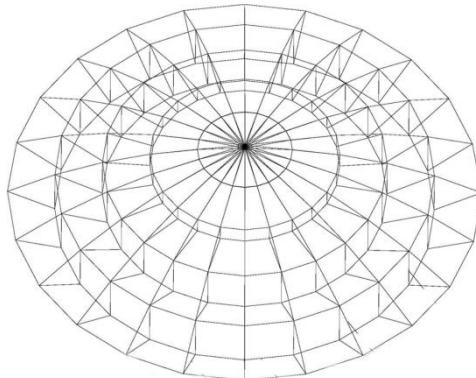


图 2 索穹顶结构

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支撑体系，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。

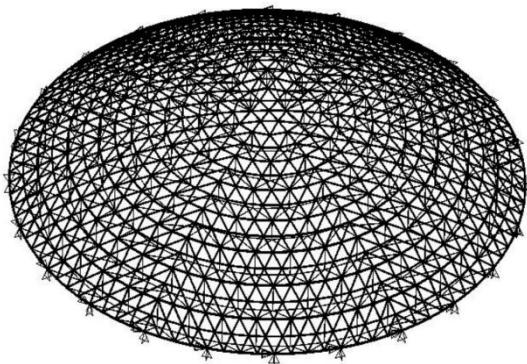


图3 弦支穹顶结构

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, TATEMICHI Ikuo. Design, tests and realization of "suspen-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.