

大跨度双层球形网壳结构轻量化设计及经济性分析

田雄基

新疆煤炭设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：随着时代发展，现代建筑工程正逐渐向高层化、大跨度化迈进，对结构设计提出了更高的要求。在建筑行业早期，由于规模较小，设计和施工之间的差异并不明显。然而，随着建筑跨度的增加和楼层的增高，施工方法和过程对建筑性能的影响极为重要。大跨度双层球形网壳结构，以其独特的美学和工程技术，正成为现代建筑的新标杆。文章综合探讨该结构的设计路径，结合膜结构对比经济性，进而提出优化设计策略，以期实现更准确且安全的建筑施工。

【关键词】：大跨度；双层球形网壳；结构轻量化；设计路径；经济性分析

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.067

当前社会实现快速发展，对于不同类型的储煤场而言，为满足建筑功能需求往往伴随着大跨结构。大跨度结构的设计需兼顾功能性、安全性与经济性，尤其是双层球形网壳结构具备多种应用优势，如抗震能力良好等，已逐步成为重大工程的首选形式。然而，常规网壳的重量相对较大，导致施工出现多种难点，因此采用轻量化设计是突破技术瓶颈的关键。而膜结构的应用也具有多种优点，因其轻质、易建造，已成为与其相抗衡的新型建筑形式，其经济性能的不同将会影响工程选择。基于此，深度探讨轻量化设计路径，评估不同结构的经济性，以期对相关领域的设计提供实践依据。

1 大跨度双层球形网壳结构轻量化设计核心路径

1.1 材料选型优化

如何选择合适的选材，是实现其轻量化的关键，其关键在于选择强度较高且耐久性能良好的材质，并在保证其受力特性的同时，降低自峰重量和材料用量。选择以性能良好的钢材为重要趋势，其中，以 Q460 等高强低合金钢为代表的钢材料，具有比常规钢更高的屈服和拉伸强度，基于同等的承载力条件下，可以减小构件的断面尺寸和所需的用钢量^[1]。对于 100 米级大跨度球面网壳为例，将 Q690 钢替换 Q355 钢的使用，使构件质量减轻 25%-30%，明显降低焊缝和交通费用。采用耐候钢材可显著降低抗腐蚀维修要求，特别适合室外大型建筑物，且因其表层生成的高密度氧化物膜可有效抗侵蚀，可显著降低涂装维修成本和构件总重量的增加。可以选择多种复合型相关材料，比如碳纤维等，其应用具备多种优点，所表现出的高强度等特点，可更好在连接节点进行应用，也可以作用

于恶劣工作条件下的节点，在保证工程安全的同时，可以实现大幅减重。针对构件各部分受力特征，可以坚持适用原则，即在构件的受力范围内使用高强度的钢材，对于副承重构件可以使用复合材料，从而达到兼顾重量和性能的目的。

1.2 结构参数与形态优化

关键在于对设计进行形状和尺寸的优化，通过对网壳相关参数进行适当的调节，从而达到更加合理的受力效果，降低不必要的用料。参数涉及半径、间距等，均是影响球壳性能的重要因素，需要通过相关的参数模拟以及理论计算来寻找最佳的设计方案。基于 100 米的网壳结构，其各参数的最优值比较如表 1。

表 1 100 米网壳结构优化参考方案

| 参数组合 | 原始方案 | 优化方案 | | |
|-----------|-------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 球壳半径(m) | 80 | 85 | 90 | 88 |
| 网格尺寸(m×m) | 4×4 | 3.5×3.5 | 3.2×3.2 | 3.3×3.3 |
| 矢高(m) | 12 | 15 | 18 | 16 |
| 结构自重(kN) | 18600 | 15200 | 13800 | 13200 |
| 上下弦间距(m) | 3.0 | 2.5 | 2.2 | 2.3 |
| 优化效果(减重率) | - | 18.3% | 25.8% | 29.0% |

选择网络模式非常重要，其中，三角形网格具有应用优势，其整个受力相对均匀，已被大量用于大跨球面网壳结构，再与四或六角网络进行对比发现，三角所需材料可节约 10%-15%。考虑到跨径和载荷情况，对单层和双层板进行分层以及厚度的设计，中小口径网壳可以在一定程度上减少上下弦间距，而对于大跨网壳，需要在满足稳定要求的同时，对腹杆的排

作者简介：田雄基，1990 年 2 月 3 日，男，汉，甘肃，本科，研究方向：结构设计。

布进行合理的设计，以减少不必要的冗余^[2]。

1.3 节点轻量化设计

整个结构中节点是关键部分，其质量在整个结构中所占的比重在 15%到 20%之间，对连接件进行轻量化设计是实现结构优化的关键。其设计在于简化结构形式，选择重量轻的材料，选择最优连接方法，既要满足节点的强度和刚性，降低了结点的重量。针对节点形态进行创新是主要的发展趋势，可以推动模块化节点应用，取代传统的烦琐的连接方式，比如使用铸铝接头或冲裁成型接头，可以控制多余材料应用，降低焊接次数。铸铝连接件具有较高的强度和成形精度，相对于普通的钢节点，整机重量减轻 40%-50%，提高组装的效率^[3]。

合理使用综合型的轻质材料，代替传统的重型钢连接件，使其在副接头或受力不大的节点上，实现结构的轻量化。还可以将连接方式组合，实现连接形式的优化，进而对结构进行简化，降低连接板件的厚度和螺栓的数目。比如，将常规的螺钉改为高强螺钉，可以使节板片的尺寸变得更小；为了提高焊接的效果，降低了接头的体积和质量，使用熔透焊接代替传统焊接方法。促进连接杆与接头的协同设计方法，可以更好地协调受力情况，从而消除因接头因应力集中而造成的体积膨胀，以此达到轻量化设计的目的。

1.4 施工工艺协同优化

通过对工序优化，积极引进前沿工艺，降低施工工序的损耗和结构重量的增加，为实现轻量化的目标提供保证。预制和组装是目前发展的重要发展趋势，在工厂内进行预制可以有效地提升零件的制造质量，降低零件的生产成本，比如，在工厂内精确下料和焊接，减少因场地分割而造成的物料浪费；为降低因施工场地而造成的结构冗余度，采用模块化的制造方法，以提高组装效率^[4]。对预制板进行规范化设计，可以有效地降低制造费用，增强通用性，并方便搬运和提升，从而降低对大型机械的要求。

根据建筑结构轻质构造特点，可以选用效率较高的建设设施，减少支护的使用数量。比如，采取高空吊放方法，利用无人机进行吊装操作，从而减轻建筑的整体质量和造价；大跨球面网壳可采取整体或滑动吊装的方法，从而避免结构变形情况，也可减少使用暂固料的消耗。还需对焊接等多种操作精度进行严格监控，防止由于构件出现质量问题而引发加固处理，从而保证建筑构件的安全和高效。其中，结构与与设计之间的协调非常重要，设计时应该将结构可行性考虑

进去，在施工过程中也要将要求做到极致，以此推动设计和建造的有效互动，才能使建筑的轻量化得到最大限度的发挥。

2 大跨度双层球形网壳结构与膜结构经济性对比体系

2.1 建造成本对比

成本是选择结构需要考虑的最重要的方面，包括材料、安装等多种费用。选择 100 米大跨度建筑，针对不同结构费用进行比较（见表 2）。

表 2 不同结构成本对比

| 成本 | 双层球形网壳 (万元) | 大跨度膜结构 (万元) | 成本差异 | 成本占比 |
|------|----------------|----------------|------|--------|
| 材料 | 860 | 620 | +240 | 138.7% |
| 加工制作 | 320 | 280 | +40 | 114.3% |
| 施工安装 | 480 | 350 | +130 | 137.1% |
| 辅助工程 | 240 | 310 | -70 | 77.4% |
| 运营 | 85 | 130 | -45 | 65.4% |
| 总计 | 1985 | 1690 | +295 | 117.4% |

2.2 经济性影响因素敏感性分析

通过对经济要素灵敏度分析，可以清晰地反映出各因素对两类结构造价的作用大小，从而为结构设计决策提供依据。其中，原材料的价格变动是其主要的影因子，钢铁涨价将会导致球面网壳的原材料成本上升，膜材料的价格变动又会对造价产生明显影响^[5]。如果钢铁涨价 10%，网壳施工造价便会增加 8-10 个百分点；膜材料涨价 10%时，建筑造价增加 12%-15%，表明膜材料的价格变动对材料的变化更加敏感。随着结构尺寸和载荷的改变，网壳造价增加速度较慢，而膜造价增加较多，特别是当膜面跨径大于 150 米时，膜结构的造价会成倍增加。随着负载水平的提升，球面网壳的横断面增大，费用增长较慢；膜结构需要加强钢丝绳的强度和膜的厚度，进而加大支撑点的数目，这就使得费用的增长更加显著。施工工艺的发展可以同时实现这两个方面的最优效果：双层球面网壳的装配可以减少制造和建造费用，而膜材料研制和建造装备的更新可以减少材料替换和安装费用，表明技术发展对球面网壳结构的造价进行更大的优化。

3 工程案例验证与设计建议

(1) 工程案例选取与概况：选择某条形储煤场工程为例，该工程主要结构是无柱式储煤空间，跨度达到 120 米，占地约 15000 平方米，其主要用途是进行煤炭储存或转运，对结构的整体性能提出更高的要求。项目初期主要采用双层球面网壳和薄膜式两种形式，而项目所处地区以湿陷性黄工为主，区域土壤所含盐

分相对较高,温度变化趋势相对剧烈,基准可以依据设计方案的实际要求,可将服役年限设计为50年,所处环境为温带大陆气候。

(2)案例对比结果分析:通过实例进行比较发现,网壳结构进行轻量化设计后,整体建造造价上仍然优于膜结构,但是两者之间的差异却明显减小,而在寿命周期内的造价上却有很大的提升,低于膜结构的总造价。造价方面,由于网壳结构具有服役年限长等多种应用特点,其运行费用却只有膜结构的45.6%左右。根据结构性能综合分析,网壳结构在隔声等多个方面都有膜结构,能够更好地适应会展的多用途应用要求。采用轻量化设计可以显著减少结构重量和造价,在中大跨空间应用中,具有更好的寿命经济效果。同时也要对环境的影响进行充分考虑,结构可充分应对地区气温变化,防止因温度变化过大而造成的结构破坏,更符合条形煤场对结构稳定性的核心要求。对于寒冷气候条件下,网壳结构必须在保温以及节能等方面体现出优越性,进而减少长期运行费用。

4 设计优化建议

(1)轻量化设计与经济性协同优化:进行轻量化设计期间,必须将经济性能有机联系,从而克服单一的重量控制带来的造价增加,以此实现轻量化和经济性能的协调最佳。在选择材料时,要考虑到材料的单价等多种因素,不能一味地选择昂贵的材料,比如在承受能力不强的地方,可以选择普通强度较高的钢材来代替复合材料的应用,从而达到减轻材料重量和控制造价的双重目的^[6]。还可以选择重量等为优化目标,通过多目标寻优方法,选择最佳的工艺设计方案,解决因过分优化而带来的制造困难和成本上升问题。结构件的轻量化设计需要考虑制造费用和建造的可能性,而模块化结构虽然可以减轻结构的重量,但是为

了降低制造成本,必须进行大规模的制造。在对建筑工程进行设计时,要综合考量建造费用,选择性价比比较高的建造方式,以免为了减轻重量而采取太多烦琐的建造方式,造成施工费用的急剧增加。整个设计及成本控制进行协同发展过程中,可以提高建筑的整体效益。

(2)全生命周期成本导向的设计决策:结构进行设计期间,必须建立起基于寿命周期费用的观念,打破单纯以建设成本为目标的限制,全面考虑运营等多项长远成本。项目的前期分析中,采用寿命周期费用的计算方法,对各项目进行长时间的经济性分析,为计划实施和实施奠定基础。比如,选材上,既要考虑到材料的价格,又要考虑到其的耐用性和维修要求,选择可以降低维修费用的材质;在对建筑形式进行设计时,综合考虑结构造价和能源费用,对保温和隔热进行最优设计,减少结构服役期间的能源消耗。要强化设计和运营的协作,在设计过程中要注意方便操作,降低后期维修的困难和费用,比如要对节点进行合理的布局,以方便检查和固定;选择易替换且维修费用低的零件。以全寿命期费用为指导,将结构实际经济性和整体性能充分结合,以期促进行业的健康发展。

5 结语

总之,轻量化设计大幅减少网壳结构的重量和造价,由于跨度和服役环境的不同,层网壳和膜结构在经济上存在着不同差异,对于中大跨度和大跨度的膜结构则具有较强的竞争能力。网壳结构轻量化设计比膜结构整体费用更低,并且具有更好的抗震能力。未来,相关行业可以结合BIM等前沿技术,对结构设计进行持续改进,拓宽不同结构的适用领域,建立全寿命周期造价计算方法,为大跨工程建设的科学化选择奠定基础。

参考文献:

- [1] 李泽彬,李星.站房大跨度混凝土结构体系比选及经济性分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):25-27.
- [2] 胡耀芳.大跨度桩板结构小角度上跨既有结构受力分析[J].交通科技与管理,2025,6(03):134-137.
- [3] 王辉,盛福衡,崔凯,等.大跨度云荷造型会展钢结构施工过程的结构分析方法研究[J].城市建筑空间,2024,31(S2):207-208.
- [4] 韩强,胡珉磊,刘英培,等.大跨度桥梁抗震分析中的整体有限元法及其应用[J].北京工业大学学报,2024,50(12):1448-1457.
- [5] 张永亮,朱光增,刘沛.考虑高阶振型效应的大跨度钢桁拱桥瑞利阻尼参数取值研究[J].桥梁建设,2024,54(04):14-20.
- [6] 王伟慷.基于改进Kriging模型的大跨度斜拉桥结构可靠度分析[J].福建交通科技,2024,(02):36-40.