

# 双层球形网壳结构节点连接形式优化与力学性能研究

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】**：针对双层球形网壳结构节点受力合理性、经济性等方面的矛盾，提高双层球形网壳结构节点力学性能和安全储备，针对焊接空心球节点、螺栓球节点和铸钢节点，对不同节点连接形式力学特性进行研究。通过比较各节点的应力分布、位移特征和稳定性能，并对双层球形网壳结构节点连接形式优化设计进行探讨，优化方案力学性能验证。结果显示，优化后的复合型节点可以有效降低节点区最大应力，提高总体稳定度，并在保证强度和经济性的前提下，节省钢材消耗量。

**【关键词】**：双层球形网壳；节点连接形式；优化设计；力学性能

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.038

随着技术的发展和科技的进步，大跨度空间网壳结构应用越来越广泛，大跨度的双层球形网壳结构主要用于条形储煤场、圆形储煤场、体育馆、大型剧院等大跨度工业建筑，空间网壳结构的优点为受力均匀、强度大、质量相对较轻以及结构形式多样等。在空间网壳结构中，节点是结构的主要受力中心，在杆件内力传递和结构变形协调中起着重要作用，其节点连接形式对结构的受力性能、施工质量和经济运行具有重要意义。目前，在实际应用中，通常采用焊接空心球节点、螺栓球节点和铸钢节点，这三种节点在受力特点和成本控制等方面各有优势和不足。通过对三种主流节点形式受力性能进行深入研究，并根据具体要求进行优化设计，通过数值模拟和算例验证，揭示其合理性和优势，从而为双层球形网壳结构的节点设计奠定基础。

## 1 双层球形网壳结构节点连接形式和力学特性

### 1.1 主流节点连接形式构造特点

(1) 焊接空心球节点：焊接空心球节点采用两个半球经焊缝进行焊缝成形，按其受力强度可分成不加劲和加劲两种结构，适合用于钢管杆的连接。该结构的设计参数应符合有关设计标准，即双层球面网壳的直径/壁厚之比为25-45，外径和主钢管外径之比取值取2.4-3.0，壁厚和主钢管壁厚之比取值取1.5-2.0，球壁厚度不小于4mm。为了提高构件的受力性能与承载能力，需要在球体内部加劲肋板，将截面大的构件焊接在球体上，而另一杆件坡口焊在相交腹杆的3/4部分，以保证构件的受力性能。节点构造简单、整体性能好，能使杆件受力均匀分布，适用于中小跨度双层球形网

壳结构<sup>[1]</sup>。

(2) 螺栓球节点：螺栓球节点的零件组成包括高强度螺栓、紧固螺钉、锥头或封板等，主要用于双层网壳等空间网格结构。其选材要按照行业标准进行选择，钢球、封板和锥头等部件的材质要与之相匹配，而高强度的螺钉则按螺纹尺寸选择，M12~M36螺栓为10.9级，M39~M64螺栓为8.8级。受压杆件的连接螺栓直径比计算值减少1-3个级差，但是需要对套筒抗压强度和端部局部承压力进行校核，杆端用锥形或密封片与螺钉相连，焊接要达到与钢管等强度的连接。该节点不需要在现场进行焊接，具有较高的安装效率和可拆卸、再使用等优点，适用于大跨度网壳的施工。

(3) 铸钢节点：铸钢节点采用铸造工艺成型，可以将其设计为实心、半空心或空心，适合于杆件受力复杂、交错密集、可靠性高的重要构件。该结构的优点是可以针对节点的受力特性进行合理的设计，使得结构的受力过程更为平稳，从而消除结构的应力集中。铸钢节点材质强度高、韧性好，铸造后要进行检验，以排除铸件的缺陷，保证节点的质量。但因制造工艺复杂，制造成本高，目前主要应用在大跨度网壳结构中，如支座附近等重要节点上。

### 1.2 不同节点连接形式力学特性比较

为确定不同节点连接形式力学特性，双层球形网架平面尺寸为70\*150m，以跨度80m、矢高40m的双层球形网壳为研究对象，钢材用于Q355C钢，新疆冬季温度低，需采用C、D级钢，采用3D3S、MST或迈达斯等软件进行建模计算，在同等荷载作用下（轴

向压力 100kN、水平荷载 30kN) 进行数值模拟(如表 1)。优化铸钢节点的力学性能,采用最小应力值和最高承载能力的铸钢连接结构,使其具有应力集中系数,这主要是由于采用优化外形构造和较为平滑的受力途径;其次是焊接空心球节点,其整体性能好且位移变形小,在大部分情况下都能适应;螺栓球节点因其与套筒的接触受力特性,产生了明显的应力集中现象,其极限承载力和位移变形较大,但其方便快捷的优点显而易见。三种节点形式在受力状态下的力学特征的差异,为进一步的优化设计奠定基础,可以针对不同区域的应力水平,选取相匹配的节点连接形式,达到力学和经济的均衡<sup>[2]</sup>。

表 1 分析节点应力分布、位移特性和承载能力分析比较

节点类型	最大应力值 (MPa)	节点最大位移(mm)	极限承载力(kN)	应力集中系数
焊接空心球节点	215.6	1.82	586	1.32
螺栓球节点	248.9	2.56	512	1.58
铸钢节点	198.3	1.54	628	1.21

## 2 双层球形网壳结构节点连接形式优化设计

### 2.1 优化设计原则

考虑到双层球面网壳的受力特征和实际应用要求,基于机械适应性的设计方法。依据各部位的受力等级(核心区、一般受力区和次要受力区),选取相应的节点形式,即核心区要保证高强度和低应力集中,次要受力区满足经济性和施工高效的要求;还要采取协同受力,通过对连接节点结构进行合理设计,使结构内部的内力转移途径变得更为平滑,从而减少结构内部的应力集中度,提高节点与构件的协同受力性能;实施施工经济性原则,即在保证结构受力条件下,减少加工和施工的难度,简化节点构造,并在保证材料消耗和成本的基础上,达到节约材料的目的;采取安全性和可靠性原则,即优化设计应避开连接失效风险,以保证其在载荷下的稳定和耐久。

### 2.2 根据受力等级进行节点选型优化

按照双层球形网壳结构受力特点,基于其应力分配原则,将其分为受力区、次要受力区,并进行相应区域内的节点选择与优选。在核心受力区中,该区域杆件交错密集,承受轴力与弯矩较大,受力复杂,需要选择具有优良力学特性的节点连接形式。以铸钢连接为主要节点连接形式,以解决现有铸钢连接造价高

的缺点,将其改进为半中空铸钢,使其在受力中心处形成实体,而不是在受力区域形成中空,从而降低钢材消耗。对节点形状进行了优化,将节点采用梯度转换的形式,减少节点的应力集中,保证节点的极限承载力符合中心区域的受力要求。在一般受力区中,该区域的应力分布比较均衡,不存在极限加载的情况,需要考虑结构的力学特性和建筑的高效性。通过对加劲焊接空心球节点进行优化设计,将单个加劲替换成十字形加劲,提高连接的抗扭转和抗弯性能,最大受力减小 12.4%。通过对节点构建工艺进行调控,实现中空球外径与主管外径之比 2.6、壁厚与主管壁厚之比为 1.8,提高连接整体强度,达到设计指标。在次要受力区,该区域的受力比较小,对节点的承载力需求不大,应以高效和经济为宜。在该区域用螺栓球节点,以解决传统螺栓球节点应力过于集中的问题,通过对套筒和锥头的连接构造的优化,在套筒端部加缓冲垫板,并通过选择高强度套筒材料,提高节点刚度,使节点最大变位移减少 18.7%,并能在较小受力范围内实现承载能力的提高<sup>[3]</sup>。

### 2.3 复合式节点的结构

以大跨度双层球形网壳核心受力区和一般受力区交接部位的节点为研究对象,提出“铸钢-焊接空心球”复合节点连接形式,以实现两者的优势互补。该节点主要部位用半空心铸钢结构,使其具有较高的力学性能和较小的应力分布;周边的连接部分为中空球体,减少加工难度和成本。该节点的铸钢件截面为 300 mm,其应力集中部位为固体结构,其厚度 800mm;非受力部位为中空结构,壁厚 20 mm,经铸造成形,保证了其整体结构的整体性。周边采用大口径 120mm、5000mm 的中空球体,采用全熔透焊方式与铸钢芯部进行对接,焊缝不低于 10 mm,以确保二者共同工作。汇交杆件的连接采取分段使用的方法,即将具有大应力的轴杆与铸钢段直接相连,而普通的承载杆则是由钢管与钢管焊接而成。该复合型节点适用于复杂受力的连接形式,兼具铸钢连接结构优良的受力特性和经济优势。

## 3 优化方案力学性能验证

### 3.1 有限元仿真模型建立

验证对象选择双层球形网壳工程,双层球形网架平面尺寸为 100\*200,其大跨度 90m、矢高 45m,以 Q355C 钢作为材料,在原有的设计方案下,均用 C、D 级钢焊接连接。原设计用焊接空心球节点为核心区,根据优化方案构建仿真模型,核心受力区用半空心铸

钢节点，一般受力区采用十字加劲焊接空心球节点，次要受力区用改进型螺栓球节点，交接部位用复合型节点。模型中杆件和节点用实体单元建模，建立基于有限元的有限元分析方法，焊缝用绑定约束，材料属性设为弹性模量 206GPa，泊松比 0.3，密度 7850kg/m<sup>3</sup>。按《空间网格结构技术规程》的规定进行荷载施加，考虑恒载、活载、水平风荷载及温度荷载。以分步加载方式，对实际受力工况进行模拟。分析指标有节点应力分布、整体位移、极限承载力和稳定性能等，通过与原有结构进行比较，以检验其优势<sup>[4]</sup>。

### 3.2 仿真结果分析

#### 3.2.1 节点应力和位移特性

通过分析，得出两种不同结构形式下节点应力特性的变化规律（如表 2）。优化最大应力为 175.2 MPa，其最大应力比原来的结构降低 18.3%，而最大应力的值为 1.15，明显优于原始结构；与初始布置相比，节点最大位移为 1.43 mm，与原设计方案相比，减少 21.4%，总体刚度得到显著提高。复合型节点的应力分布状况最佳，核心铸钢部分和共同受力，不存在显著的应力集中；结果表明，改进后的螺栓球铰连接具有明显的受力特点，其最大受力比传统螺栓球节点减小了 29.6%，达到了结构设计的要求。

表 2 优化方案与原设计方案的节点力学性能对比

方案类型	原设计方案	优化方案	优化幅度
节点最大应力(MPa)	214.5	175.2	-18.3%
节点最大位移(mm)	1.82	1.43	-21.4%

#### 参考文献:

- [1] 张伟,范增,王晓东,等.模块化球形多面体网壳结构风压分布[J].河南科技大学学报(自然科学版),1-11.
- [2] 汪韦韦.大跨度椭圆形网壳结构智能化监测及控制技术[J].铁道建筑技术,2025,(05):215-218.
- [3] 王郑成.某交响音乐厅椭圆形网壳单层网壳研究[J].现代工程科技,2025,4(05):18-21.
- [4] 林子倩,卜宜都,王元清,等.锦屏中微子探测器不锈钢结构设计分析[J].工业建筑,2025,55(03):19-26.
- [5] 赵战国,范景峰,梅二召,等.新型 Q460 材料单层球形网壳结构设计分析与受力分析[J].机电工程技术,2024,53(09):266-270+294.

应力集中系数	1.35	1.15	-14.8%
整体稳定性系数	3.26	3.99	+22.5%
钢材用量(t)	186.3	163.8	-12.1%

#### 3.2.2 结构稳定性和经济性

经稳定性分析表明，优化方案的总体稳定因子达 3.99，比原来的加固效果提高 22.5%，结构抵抗失稳性能明显提高，达到大跨球面网壳的稳定性要求。在经济效益上，采用分段式选择和复合节点连接形式，减少了铸钢件的使用数量，并对某些连接部位进行简单处理，使总钢量比原来的设计减小 12.1%，综合成本下降 10.8%，达到机械和经济的协调优化。基于改进后的新型结构，该结构具有较好的热稳定性和协同性，使结构中的温度应力比原来的结构减小 15.3%，从而解决由于温度变形引起的结构裂缝等问题<sup>[5]</sup>。

### 4 结论

总之，通过分析双层球形网壳结构三种主流节点连接形式构造特点和力学性能分析，并进行节点连接形式优化设计。其中，铸钢节点力学性能最佳，但造价较高，而焊接空心球节点具有整体性和经济性，而螺栓球节点虽然易于装配，但存在较大的应力集中，三者之间的受力特征不同，可以作为划分方案的优选依据。通过受力等级的分区选型，对方案进行优化，达到节点性能和区域受力的匹配，核心区半空心铸钢节点、次要受力区改进型螺栓球节点等的组合应用，可以使其整体承载能力得到大幅提高。