

开孔双层球面网壳结构的优化设计分析

刘娟¹, 杨宁^{1, 2}, 孙韬^{1, 3}

(1. 江苏建筑职业技术学院 建筑建造学院, 江苏 徐州 221116; 2. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心, 江苏 徐州 221116)

摘要: 以某火力发电厂干煤棚双层球面网壳结构为工程背景, 以结构用钢指标为目标函数, 利用有限元软件 ANSYS 对该开孔双层网壳结构进行弹性阶段的整体优化计算, 优化后节省钢材约 28.4%; 进一步应用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 进行编程, 分析了网壳矢高、网壳厚度和杆件截面面积三个因素对用钢指标的影响规律: 本网壳结构用钢指标对网壳厚度变化最为敏感, 杆件截面面积变化的影响次之, 矢高变化对结构用钢指标影响最小。

关键词: 双层球面网壳; 孔洞; ANSYS; 结构优化设计

中图分类号: TU399

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)01-008-07

Structural Optimal Design of Double-Layer Reticulated Spherical Latticed Shell with Openings

LIU Juan¹, YANG Ning^{1, 2}, SUN Tao^{1, 3}

(1.School of Architectural Construction, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China;
2.Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China;
3.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Building Energy Saving and Construct Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Taking a double-layer reticulated spherical shell structure of dry coal shed of a thermal power plant as the object, the finite element software ANSYS was used to calculate the overall optimization of the structure in the elastic phase with the structural steel index as the objective function, and the steel saving was about 28.4% after the optimization. ANSYS parametric design language (APDL) programming is applied to analyze the effects of three factors, namely, shell vector height, shell thickness and rod cross-sectional area, on the steel index. It is concluded that the index is most influenced by the shell thickness, then by the rod cross-sectional area, and the shell vector height has the least influence. The calculation results will provide a reference for the optimal design of such shell structure.

Keywords: double-layer reticulated spherical shell; holes; ANSYS; structural optimal design

网壳结构因为受力合理、结构稳定性好,造型既轻巧灵活又能适应堆煤取料机(斗轮机)的工艺界面,被广泛应用于储煤仓等工程中。通常情况下,球面网壳结构受力较均匀,传力路径简单明确,便

于设计和施工。但是,当网壳结构开有孔洞时,原有的传力路径被破坏,开设的不对称孔洞将对结构各方面性能产生不利影响。国内已有较多的开门洞网壳实例,其构造措施也较完善,研究成果不少,

收稿日期: 2021-06-10

基金项目: 江苏建筑职业技术学院科技资助项目 (JYJPZX20-02); 江苏省住房和城乡建设厅科技计划资助项目 (2018ZD262)

作者简介: 刘娟 (1987-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 钢结构建筑技术、装配式钢结构技术。

但是针对在网壳其他位置开设孔洞的研究尚少,且对落地开孔网壳的优化研究较匮乏。因此,应用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 进行编程,保持网壳跨度不变,以结构用钢指标为目标函数,以网壳矢高、网壳厚度和杆件截面为设计变量进行优化设计,并分析各因素对用钢指标的影响规律和影响程度,便于此类网壳施工时采取安全合理的构造措施。

1 工程概况及有限元模型建立

1.1 工程概况

某火力发电厂干煤棚结构形式为双层正放四角锥球面网壳,根据生产工艺要求,网壳侧部开有孔洞,见图 1。工程基本信息如下:跨度 87.00 m,厚度 2.71 m,矢高 29.21 m,上弦设置 17 环,下弦设置 18 环,上弦网格节点在第 2、4、7 环进行加密,加密形式为“1 分 2”,最外环节点数为 72。网格划分情况见图 1~图 5 及表 1。采用固定铰支座隔点布置方式,共计 36 个。网壳支承结构采用钢筋混凝土独立柱,柱截面尺寸为 400 μm×600 μm,柱

高 10 m,混凝土强度等级 C30。杆件选用 GB700^[1] 中的 Q235B 钢,Ø48×3.5、Ø60×3.5、Ø75.5×3.75、Ø88.5×4、Ø114×4、Ø140×4、Ø159×6 和 Ø168×6 八种截面。结构安全等级为二级,重要性系数取 1.0。

表 1 网格划分列表

环编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
上弦节点数	9	18	18	36	36	36	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	—
下弦节点数	3	9	18	18	36	36	36	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72

1.2 孔洞开设位置

孔洞开设在第 10 环和 11 环,径向和环向各跨越两排杆件,在上弦占据九个网格,在下弦占据 12 个网格,见图 3、图 4。其水平投影面积(网壳上弦)为 58.71 m²,洞口切平面投影面积(网壳上弦)为 75.28 m²,孔洞投影尺寸见图 5。

1.3 结构仿真计算假定

(1) 按照《空间网格结构技术规程》第 4.1.4 条“分析网架结构和双层网壳结构时,假定节点为铰接,杆件只承受轴向力”^[2],故本网壳工程在建模时

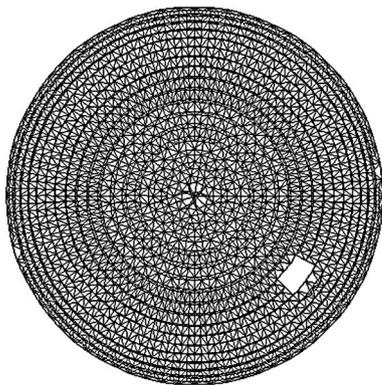


图 1 模型俯视图

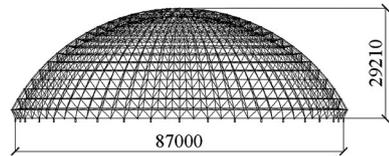


图 2 模型侧视图

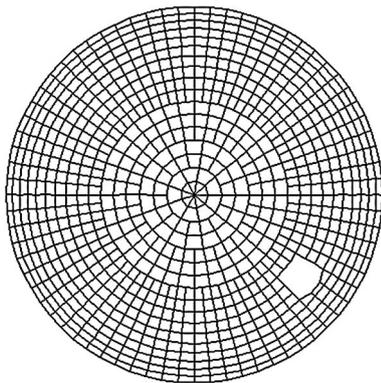


图 3 上弦俯视图

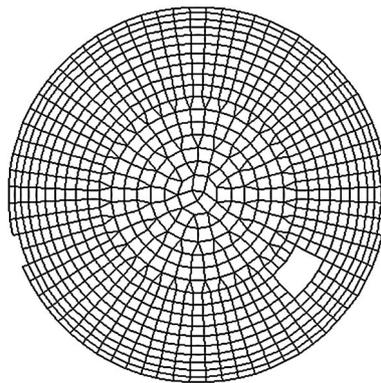


图 4 下弦俯视图

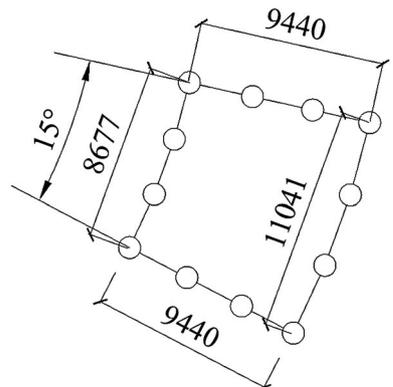


图 5 孔洞切面投影 (mm)

假定所有杆件均为纯铰接杆,所有节点均为空间铰接节点,由此杆件只承受轴力,并按弹性阶段进行分析。

(2) 网壳结构的荷载均按静力等效原则化为作用于节点上的集中荷载。

(3) 采用 LINK8 单元模拟^[3],该单元只承受轴力,不承受弯矩,每个杆端三个自由度。

1.4 结构仿真建模主要参数

网壳结构分析用阻尼比取 0.03。本网壳杆件均采用 Q235B 圆形钢管,控制钢管壁厚 ≤ 16 mm,钢材的机械性能参数均按《钢结构设计标准》GB50017-2017^[4]取值。模型计算时按照控制应力比 0.9 控制杆件截面,最小截面取 $\varnothing 48 \times 3$,杆件截面由程序自动优选。网壳的支座竖向采用固定约束,即竖向刚度取无限大,水平两方向均采用弹性约束,其中弹簧刚度取值参考文献 [5] 的分析结果,取为 $2k$ N/mm^[5]。根据本网壳实际及《空间网格结构技术规程》的相关规定,建模时考虑自重、活荷载、风荷载、雪荷载、温度荷载、地震荷载等荷载,并按《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012^[6]进行规范取值与荷载组合。

2 结构优化设计过程

2.1 优化思路

空间网格结构的优化设计通常以结构自重(即用钢量)最小作为目标函数,而网壳结构的稳定性是结构设计中的重要问题,故对网壳优化设计的同时须对其稳定性加以校验^[7]。在结构优化计算过程中,不改变网壳的跨度、网格布置和荷载情况,取钢管外直径 D 和壁厚 t 、网壳矢高 F 和网壳厚度 h 为设计变量,利用 ANSYS 优化模块,编写优化程序,进行 100 次计算循环,得到以用钢指标最小为目标函数的最优解。

2.2 结构优化设计的一般数学表达式为^[8]:

设计变量

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (1)$$

满足约束条件

$$\begin{cases} gi(x) \leq 0 & i = 1, 2, \dots, p \\ h_j = 0 & j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (2)$$

使目标函数

$$F(x) \rightarrow \min (\text{最小}) \quad (3)$$

式(2)中由 p 个不等式约束和 q 个等式约束规定了问题的可行域。

用最优化方法求得一组设计变量

$$X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T \quad (4)$$

上式即为一个最优设计方案,称为最优设计点,对应一个最优目标函数值

$$F^* = F(X^*) = F(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \quad (5)$$

最优点和最优目标函数值两者构成了一个优化问题的最优解。

2.3 结构优化三要素

2.3.1 设计变量

有限元软件 ANSYS 优化模块最多可设定 20 个设计变量^[9],结合本工程实际情况,在进行结构的优化过程中,共设置 18 个设计变量,即:

(1) 球面网壳的矢高 $F_1, 12.5 \text{ m} \leq F_1 \leq 29.2 \text{ m}$ 。

(2) 杆件外直径 $D_2, D_3, \dots, D_9, 50 \text{ mm} \leq D_i \leq 168 \text{ mm}, i=2, \dots, 9$ 。

(3) 杆件壁厚 $t_{10}, t_{11}, \dots, t_{17}, 3 \text{ mm} \leq t_j \leq 10 \text{ mm}, j=10, \dots, 17$ 。

(4) 网壳厚度 $h_{18}, 1.45 \text{ m} \leq h_{18} \leq 2.9 \text{ m}$ 。

2.3.2 目标函数

实际工程中往往将重量最轻或成本最低作为“最优设计”的标准^[10-11],故本工程将以杆件用钢指标最小为目标函数。

2.3.3 约束条件

约束条件又称为“状态变量”,是在结构优化设计过程中,对结构的设计变量所加的各种限制。本网壳在结构优化设计时设置了以下约束条件:

(1) 网壳最大挠度

$$f_{\max} \leq [f] = \frac{L}{400} = \frac{87\,000 \text{ mm}}{400} = 217.5 \text{ mm} \quad (6)$$

(2) 杆件强度约束条件

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} \leq [\sigma] = 215 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (i=1, 2, \dots, z) \quad (7)$$

(3) 杆件最小截面和壁厚限制

双层网壳结构杆件最小截面,参照现行的网壳结构技术规程 JGJ61-2003 规定,取 $\varnothing 50 \times 3$,即:

$$A_{\min} \leq 4.43 \times 10^2 \text{ mm}^2 \quad (8)$$

$$t_{\min} \leq 3 \text{ mm} \quad (9)$$

3 优化结果的分析与讨论

在优化计算中的两点说明如下:

(1) 计算时考虑满跨均布荷载作用,且采用以活荷载控制下的荷载组合工况。

(2) 网壳结构除杆件外的其他构件总质量为 71 898 kg,包括螺栓球、螺栓、封板、锥头的质量。

图 6 为本网壳结构各杆件截面的数量,优化过程仅改变了各杆件的截面面积,而并未改变各杆件截面所占有的比例。

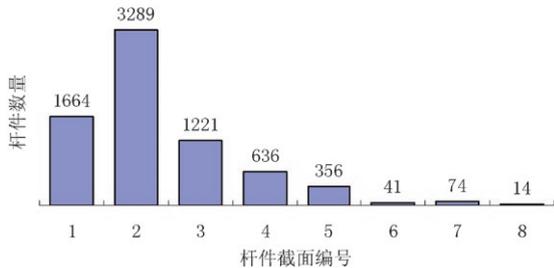


图 6 各杆件截面的杆件数量

表 2 为优化前后杆件截面变化情况。由表可以看出,杆件外径有明显增加,5~8 号杆件壁厚明显增大。在表 3 中列出了优化前后截面面积的变化情况及目标函数值,优化后 1~4 号杆件截面面积明显减小,而 5~8 号杆件截面呈现增大的情况,但是由于本网壳结构中有 90% 以上杆件采用的是 1~4 号杆件截面,因此,即使 5~8 号杆件截面面积有所增大,结构的总用钢指标仍有明显下降。与原网壳结构相比较,网壳厚度减小 0.9 m,网壳矢高减小 3.3 m。优化后网壳杆件用钢指标为 38.3 kg/m²,约为原网壳结构的 71.6%,节省钢材 28.4%。由此可见,通过优化循环计算本网壳结构杆件用钢指标有明显减小,达到了优化的目的。

应力比既能反映杆件强度的利用程度,同时也

反映了结构的安全储备。图 7 为优化前后杆件应力比变化直方图。可以看出,应力比为 0.1 和 0.2 的杆件数量有明显减小,应力比在 0.3~0.7 之间的杆件数量有明显增加,这表明优化后网壳杆件强度得到了更加充分地发挥,有利于节省用钢量。

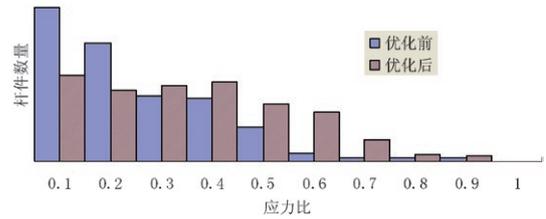


图 7 优化前后杆件应力分布比较

表 4 为优化后各设计变量与约束变量值。为验证 ANSYS 优化程序的杆件稳定分析结果,将优化后的杆件截面定义到原模型,然后按照原工程荷载条件进行静力计算,得到各代号杆件截面类型中最大压应力绝对值 σ (见表 4),根据表 4 中各杆件截面尺寸计算出 λ 值,再计算出稳定系数值 φ ,最后计算轴心压杆稳定允许应力 σ_j 。计算结果列于表 4 中,各截面压杆最大应力均在允许稳定强度范围之内,同时杆件的局部稳定条件 β 最大值为 18.6,小于限值 100;网壳最大挠度为 62.4 mm,未超过允许挠度限值 217 mm。由此可以证实,ANSYS 优化结果能够满足网壳结构的压杆稳定要求、长细比要求和杆件局部稳定要求,是一种能够得到满意结果的优化工具,优化结果有效可信。

4 开孔双层球面网壳优化设计的影响因素分析

利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 进行编程,保持网壳跨度不变,以结构用钢指标为目标函数,分别以网壳矢高、厚度和杆件截面为设计变量,

表 2 设计变量优化前后对照

项目	D1/mm	D2/mm	D3/mm	D4/mm	D5/mm	D6/mm	D7/mm	D8/mm	t1/mm	t2/mm	t3/mm	t4/mm	t5/mm	t6/mm	t7/mm	t8/mm
前	48.0	60.0	75.5	88.5	114.0	140.0	159.0	168.0	3.5	3.5	3.75	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0
后	51.1	51.2	50.9	64.0	94.6	156.6	145.8	147.3	3.0	3.0	3.0	3.7	5.4	8.4	8.6	8.3

注:表中 D1, ..., D8 为 8 种杆件外径, t1, ..., t8 为 8 种杆件壁厚。

表 3 设计变量、目标函数优化前后对照

项目	A1/mm ²	A2/mm ²	A3/mm ²	A4/mm ²	A5/mm ²	A6/mm ²	A7/mm ²	A8/mm ²	h/m	F/m	用钢指标 kg/m ²
优化前	489.1	620.9	844.9	1 061.3	1 381.6	1 708.2	2 882.5	3 052.1	2.7	29.2	53.5
优化后	457.6	453.7	451.5	704.3	1 507.4	3 923.6	3 709.4	3 602.7	1.8	25.9	38.3

注:表中 A1, ..., A8 为 8 种杆件截面面积, h 为网壳厚度, F 为网壳矢高。

表 4 与优化结果相应的设计变量和约束变量

截面编号	D (mm)	t (mm)	λ	σ	σ_j	β	f_{\max} (mm)
1	51.1	3.0	109.7	89.3	213.9	16.9	62.4
2	51.2	3.0	110.3	88.0	214.1	17.1	
3	50.9	3.0	108.8	90.8	212.6	17.0	
4	64.0	3.7	106.7	95.9	213.6	17.2	
5	94.6	5.4	98.7	113.3	214.4	17.6	
6	156.6	8.4	72.7	159.8	214.8	18.6	
7	145.8	8.6	88.0	134.2	214.7	16.9	
8	147.3	8.3	82.9	143.2	214.7	17.8	

注: D 为杆件外径; t 为杆件壁厚; λ 为长细比; σ 为杆件最大压应力; σ_j 杆件稳定压应力; β 杆件局部稳定条件。

优化过程中约束条件和作用荷载同前,进行优化设计并分析各因素对用钢指标的影响。

4.1 杆件截面对目标函数的影响

表 5 和表 6 是优化前后杆件截面面积和用钢指标情况。与原网壳结构相比较,杆件外径有明显减小,杆件壁厚有明显增大。在表 6 中可以看到,与整体优化结果相类似,优化后 1 ~ 4 号和 8 号杆件截面面积明显减小,5 ~ 7 号杆件截面呈现增大的情况。优化后网壳用钢指标为 43.3 kg/m²,约为原网壳工程的 80.9%,节省钢材 19.1%。优化后网壳挠度为 61.3 mm,满足最大挠度要求。

表 7 为优化后各设计变量与约束变量值。表中列出了优化后各杆件编号对应的杆件截面尺寸,

将优化后的杆件截面定义到原模型进行静力计算,得到各代号杆件截面类型中最大压应力绝对值 σ (见表 7),根据表 7 中各杆件截面尺寸依次计算出 λ 值、稳定系数 φ 和轴心压杆稳定允许应力 σ_j 。计算结果见表 7,各截面压杆最大应力均在允许强度范围之内,再次说明 ANSYS 优化结构能够满足杆件稳定性要求。

4.2 网壳矢高对目标函数的影响

保持网壳跨度 L 、厚度 h 、荷载组合不变,设置一组网壳矢高(见表 8),取网壳杆件截面参数为设计变量,对不同矢高的网壳结构分别进行优化计算出目标函数值(见表 8),并根据表 8 的优化计算结果绘制矢高对用钢量的关系曲线图,见图 8 所示。

表 5 设计变量优化前后对照

项目	$D1$ /mm	$D2$ /mm	$D3$ /mm	$D4$ /mm	$D5$ /mm	$D6$ /mm	$D7$ /mm	$D8$ /mm	$t1$ /mm	$t2$ /mm	$t3$ /mm	$t4$ /mm	$t5$ /mm	$t6$ /mm	$t7$ /mm	$t8$ /mm
前	48.0	60.0	75.5	88.5	114.0	140.0	159.0	168.0	3.5	3.5	3.8	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0
后	50.0	50.0	50.7	65.0	100.1	154.8	142.3	130.6	3.1	3.0	3.0	3.8	5.1	8.3	8.4	7.3

注:表中 $D1, \dots, D8$ 为 8 种杆件外径, $t1, \dots, t8$ 为 8 种杆件壁厚。

表 6 设计变量、目标函数优化前后对照

项目	$A1$ /mm ²	$A2$ /mm ²	$A3$ /mm ²	$A4$ /mm ²	$A5$ /mm ²	$A6$ /mm ²	$A7$ /mm ²	$A8$ /mm ²	用钢指标 kg/m ²
优化前	489.1	620.9	844.9	1 061.3	1 381.6	1 708.2	2 882.5	3 052.1	53.5
优化后	451.2	443.3	454.4	721.5	1 531.1	3 825.9	3 544.8	2 838.7	43.3

注:表中 $A1, \dots, A8$ 为 8 种杆件截面面积。

表 7 与优化结果相应的设计变量和约束变量

截面编号	D (mm)	t (mm)	λ	σ	σ_j	β	f_{\max} (mm)
1	50.0	3.1	111.1	85.45	212.4	16.9	61.3
2	50.0	3.0	110.6	87.16	214.1	17.1	
3	50.7	3.0	109.7	88.78	212.6	17.0	
4	65.0	3.8	103.8	102.06	213.6	17.2	
5	100.1	5.1	92.7	125.22	214.4	17.6	
6	154.8	8.3	77.5	152.34	214.8	18.6	
7	142.3	8.4	80.6	147.18	214.7	16.9	
8	130.6	7.3	86.8	136.43	214.7	17.8	

注: D 为杆件外径; t 为杆件壁厚; λ 为长细比; σ 为杆件最大压应力; σ_j 杆件稳定压应力; β 杆件局部稳定条件。

表 8 不同矢高下网壳各约束变量值及用钢指标

F (m)	13	14	16	18	20	22	24	26	28	30
f_{\max} (mm)	67.8	58.7	63.1	62.6	63.4	65.5	59.9	60.1	60.3	59.5
σ_j (N/mm ²)	212.1	198.6	212.1	214.9	210.7	211.3	211.7	211.4	210.2	208.9
用钢指标 (kg/m ²)	75.1	74.3	59.1	52.5	47.7	43.5	44.3	43.1	42.9	43.7

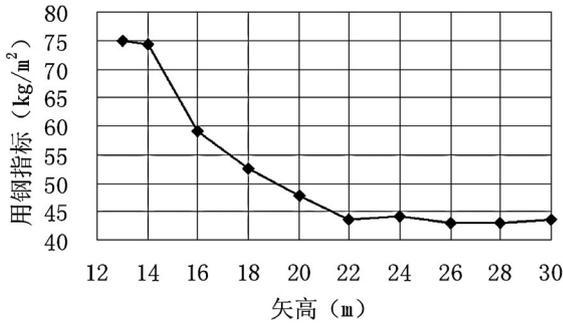


图 8 不同矢高与对应用钢指标关系曲线

由表 8 可知,当网壳矢高为 28 m 时,得到的目标函数值最小,此时用钢指标为 42.9 kg/m²,约为原网壳工程的 80.2%,节省钢材 19.8%。由图 8 可以看出,当 13 m < F ≤ 22 m 时,随着网壳矢高增大,用钢指标呈现出明显减小;当 22 m < F ≤ 30 m 时,网壳用钢指标基本保持不变,在 43.5 kg/m² 左右波动。由此可以得出结论:在网壳网格划分形式、跨度、荷载保持不变的情况下,矢高 22 m 为临界值,即当矢高小于 22 m 时,网壳杆件用钢指标随着矢高增加而减小;当 22 m < F ≤ 30 m 矢高时,网壳杆件用钢指标基本不变。

4.3 网壳厚度对目标函数的影响

保持网壳跨度 L 、矢高 F 、荷载不变,设置一组网壳厚度(见表 9),取杆件截面参数为设计变量,分别对不同厚度网壳模型进行优化计算出目标函数值,并根据表 9 的优化计算结果绘制网壳厚度对用钢量的关系曲线图,见图 9 所示。

由表 9 可知,当网壳厚度为 1.5 m 时,即规范要求的最小厚度,该网壳结构优化目标函数最

小,为 38.9 kg/m²,约为原网壳工程的 72.7%,节省钢材 27.3%。由图 9 可以看出,当网壳厚度 1.5 m < h ≤ 2.1 m 时,随着网壳厚度的增大,结构用钢指标有一定程度增加,但是增加速度比较缓慢,增长范围在 38.9~39.9 kg/m² 之间。当网壳厚度 2.1 m < h ≤ 2.9 m 时,杆件用钢指标有较明显增加,增长范围在 39.9~41.1 kg/m² 之间。由此可以得出结论:在网壳网格划分形式、跨度、矢高、荷载保持不变的情况下,随着网壳厚度的增大,网壳杆件用钢指标呈递增趋势,当网壳厚度大于 2.1 m 时,用钢指标增加迅速。

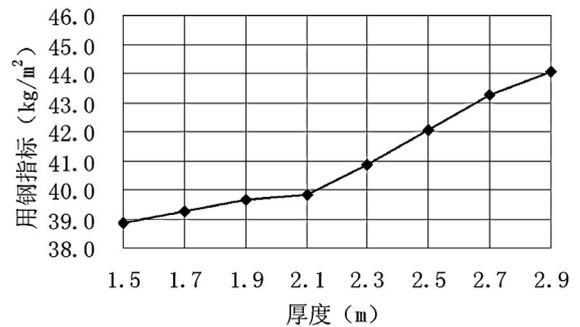


图 9 网壳厚度对网壳用钢指标的影响

4.4 荷载对双层球面网壳用钢指标的影响

保持网壳网格划分形式、跨度 L 、矢高 F 、厚度 h 不变,设置一组荷载值(见表 10),均满跨布置,取杆件截面尺寸为设计变量,分别对不同荷载大小作用下网壳模型进行优化计算出目标函数值(见表 10),并根据表 10 的优化计算结果绘制荷载对网壳用钢量的关系曲线图,见图 10 所示。

表 9 不同厚度下网壳各约束变量值及用钢指标

h (m)	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
f_{\max} (mm)	63.1	61.6	60.1	64.6	63.6	61.0	59.7	59.6
σ_j (N/mm ²)	208.0	209.4	210.5	209.1	210.9	209.0	210.5	210.6
V (m ³)	12.4	12.6	12.7	12.8	13.2	13.7	14.1	14.4
用钢指标 (kg/m ²)	38.9	39.3	39.7	39.9	40.9	42.1	43.3	44.1

表 10 不同荷载作用下网壳各约束变量值及用钢指标

荷载 (kN)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
f_{\max} (mm)	52.8	52.0	53.8	57.0	58.1	44.6	56.1	52.3	40.4	53.4	53.2
σ_j (N/mm ²)	206.3	207.9	205.5	207.5	207.2	193.8	211.0	207.3	202.4	211.9	208.7
用钢指标 (kg/m ²)	36.5	40.1	41.1	41.3	42.3	44.9	46.1	50.3	52.1	54.9	57.7

表 11 公式拟合值及误差

荷载 (kN)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
用钢指标优化结果 (kg/m ²)	36.5	40.1	41.1	41.3	42.3	44.9	46.1	50.3	52.1	54.9	57.7
用钢指标拟合值 (kg/m ²)	36.1	38.1	40.1	42.1	44.1	46.1	48.1	50.1	52.1	54.1	56.1
误差 (%)	-1.1	-4.9	-2.4	2.0	4.3	2.7	4.4	-0.4	0.0	-1.4	-2.8

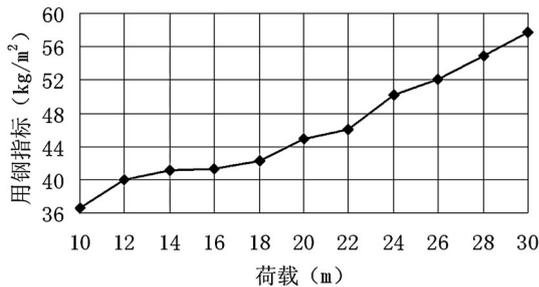


图 10 外荷载对网壳用钢指标的影响

由图 10 可以看出,随着网壳作用荷载增大,杆件用钢指标逐渐递增,且增长速度均匀,采用直线公式拟合,得下式:

$$C=0.998 9x+26.095 \quad (10)$$

式中 C 为用钢指标, x 为荷载大小,在表 10 中各荷载作用下,拟合值及误差值见表 11。

由表 11 可知,对于本网壳结构,在网壳网格划分形式、跨度、矢高、荷载保持不变的情况下,随着荷载值增加,其用钢指标基本呈线性递增变化。

5 结语

通过对开孔洞双层球面网壳进行结构优化并深入分析网壳矢高、厚度和杆件截面对用钢指标的影响,得出以下结论:

(1) 进行结构优化后,网壳用钢指标明显降低,约为原网壳结构的 71.6%,节省钢材 28.4%,并对优化结果进行稳定承载验算,优化后的网壳整体稳定性及局部稳定性均满足要求。

(2) 当网壳矢高 $13 \text{ m} < F \leq 22 \text{ m}$ 时,随着网壳矢高增大,用钢指标明显减小;网壳矢高 $22 \text{ m} < F \leq 30 \text{ m}$ 时,网壳用钢指标基本保持不变。

(3) 当网壳厚度 $1.5 \text{ m} < h \leq 2.1 \text{ m}$ 时,随着网壳厚度增大,用钢指标增加速度比较缓慢;当网壳

厚度 $2.1 \text{ m} < h \leq 2.9 \text{ m}$ 时,杆件用钢指标有较明显增加。

(4) 在满跨均布荷载作用下,随着荷载的增大,本网壳结构用钢指标明显增加,二者基本呈线性关系变化,采用线性公式进行拟合,结果比较理想。

(5) 比较目标函数的各影响因素,本网壳结构用钢指标对网壳厚度变化最为敏感,杆件截面面积变化的影响次之,矢高变化对结构用钢指标影响最小。

参考文献:

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家质量监督检验检疫总局. 碳素结构钢:GB/T 700—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程:JGJ 7—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 高荣誉,华志冬. 椭球形网壳结构静动力分析[J]. 安徽建筑大学学报,2015,23(1):1-5.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [5] 刘莉,王聚超,张世翔. 双层曲面球形网壳结构支座刚度研究[J]. 钢结构,2016,31(11):52-54,94.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [7] 王燕. 凯威特型带肋局部双层网壳形状优化及稳定性分析[D]. 济南:山东建筑大学,2010.
- [8] 王光远,董明耀. 结构优化设计[M]. 北京:高等教育出版社,1987.
- [9] 尚晓江,邱峰,等. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [10] 刘子傲. 大跨度钢屋架施工与结构优化研究[D]. 天津:天津大学,2018.
- [11] 张智博,李方慧,唐浩. 复杂大跨度体育场馆结构优化分析[J]. 黑龙江大学学报,2020,11(3):14-22.