

中华人民共和国行业标准

网壳结构技术规程

Technical specification for latticed shells

JGJ 61—2003

J258—2003

2003 北 京

第 1 页

中华人民共和国行业标准

网壳结构技术规程

Technical specification for latticed shells

JGJ 61—2003

批准部门：中华人民共和国建设部

施行日期：2003年8月1日

筑 龙 网

2003 北 京

第 2 页

中华人民共和国建设部

公 告

第 130 号

建设部关于发布行业标准
《网壳结构技术规程》的公告

现批准《网壳结构技术规程》为行业标准，编号为 JGJ61-2003，自 2003 年 8 月 1 日起实施。其中，第 3.0.5、3.0.14、4.3.1、4.4.1、6.7.1、6.7.2、6.7.3 条为强制性条文，必须严格执行。

中华人民共和国建设部

2003 年 8 月 1 日

前 言

根据建设部建标[1994]314号文的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结国内外实践经验，并在广泛征求意见基础上，制定了本规程。

本规程的主要技术内容是：1. 设计的基本规定；2. 结构计算；3. 杆件和节点的设计与构造；4. 制作与安装。

本规程由建设部负责管理和对强制性条文的解释，由主编单位负责具体技术内容的解释。

本规程主编单位：中国建筑科学研究院（地址：北京市北三环东路30号；邮政编码：100013）

本规程参编单位：浙江大学

煤炭部太原设计研究院

北京工业大学同济大学

哈尔滨建筑大学

上海建筑设计研究院

北京市机械施工公司

本规程主要起草人员：蓝天 董石麟 刘善维 刘景园 沈世钊

陈昕 钱若军 曹资 严慧 董继斌

姚念亮 陆锡军 张伟 赵鹏飞 樊晓红

目 次

前 言	4
1 总 则	6
2 符 号	6
3 设计的基本规定	11
4 结 构 计 算	15
4.1 一般计算原则	15
4.2 静 力 计 算	16
4.3 稳定性计算	20
4.4 地震作用下的内力计算	22
5 杆件和节点的设计与构造	27
5.1 杆 件	27
5.2 焊接空心球节点	28
5.3 螺栓球节点	31
5.4 嵌入式毂节点	37
5.5 支 座 节 点	40
6 制作与安装	43
6.1 一 般 规 定	43
6.2 制作与安装要求	44
6.3 高空散装法	45
6.4 分条或分块安装法	46
6.5 滑 移 法	46
6.6 综合安装法	47
6.7 验 收	47
附录 A 网壳等效刚度计算公式	49
附录 B 橡胶垫板的材料性能及计算构造要求	51
本规程用词说明	54

1 总 则

1.0.1 为了在网壳结构的设计与施工中贯彻执行国家的技术政策，做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于以钢杆件组成的单层或双层网壳结构的设计与施工。

1.0.3 单层网壳结构不宜设置悬挂吊车。双层网壳结构直接承受工作级别为 A3 及以上的悬挂吊车荷载，当应力变化的循环次数等于或大于 10^5 次时，应进行疲劳计算，其容许应力幅度及构造应经过专门的试验确定。

1.0.4 按本规程进行网壳结构设计及施工时，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关强制性标准的规定。

2 符 号

2.0.1 作用和作用效应

F_{Exji} 、 F_{Eyji} 、 F_{Ezji} —— j 振型、 i 质点分别沿 x 、 y 、 z 方向地震作用标准值；

G_i ——第 i 节点重力荷载代表值；

g ——作用在网壳上的恒荷载；

M_1 、 M_2 、 M_3 ——网壳沿 1、2、3 方向的弯矩；

m_x 、 m_y 、 m_{xy} ——拟壳相对于 x 、 y 轴的分布弯矩及扭矩；

N_1 、 N_2 、 N_3 ——网壳沿 1、2、3 方向的轴向力；

n_x 、 n_y 、 n_{xy} ——拟壳相对于 x 、 y 轴的分布轴向力及剪力；

N_{ti} 、 N_{bi} 、 N_{ci} 、 N_{vi} ——双层网壳的上弦、下弦、腹杆及竖杆的轴向力；

N_E ——水平地震作用下网壳杆件轴向力标准值；

N_G ——重力荷载代表值作用下网壳杆件轴向力标准值；

N_R ——空心球的轴向受压或受拉承载力设计值；

N_t^b ——高强度螺栓受拉承载力设计值；

$[n_{ks}]$ ——按网壳稳定性确定的容许荷载标准值；

q ——作用在网壳上的活荷载；

R_{\max} ——网壳上全部荷载标准值引起的最大支座反力；

S_E ——水平或竖向地震作用效应；

S_{Ej} —— j 振型水平或竖向地震作用产生的作用效应；

U_i ——节点 i 的位移分量；

u_s ——支座处水平位移；

V_i ——节点 i 的剪力；

w_m ——橡胶垫板平均压缩变形；

θ_{\max} ——支座最大转角。

2.0.2 材料性能和结构构件抗力

B_e ——等效薄膜刚度；

B_{e11} 、 B_{e22} ——网壳沿 1、2 方向的等效薄膜刚度；

D_e ——等效抗弯刚度；

D_{e11} 、 D_{e22} ——网壳沿 1、2 方向的等效抗弯刚度；

E ——弹性模量；

f ——钢材的强度设计值；

f_t^b ——高强度螺栓抗拉强度设计值；

$[f_c]$ ——橡胶垫板容许抗压强度；

G ——橡胶垫板剪变模量；

$[\lambda]$ ——杆件容许长细比；

ν_e ——等效泊松比。

2.0.3 几何参数

A_a ——三向交叉拱的折算截面面积；

A_e ——橡胶垫板面积；

A_{eff} ——高强度螺栓的有效截面面积；

A_t 、 A_b ——双层网壳上、下弦杆的截面面积；

A_1 、 A_2 、 A_c ——网壳沿 1、2 方向和斜向的杆件截面面积；

a_n ——两相邻钢管间的净距；

B ——圆柱面网壳的宽度；

b_{hp} ——榫节点嵌入件颈部宽度；

D ——空心球外径、螺栓球直径；

d ——圆钢管外径；

d_1 ——两相邻钢管的较大外径；

d_s ——两相邻钢管的较小外径；

d_1^b ——两相邻螺栓的较大直径；

d_s^b ——两相邻螺栓的较小直径；

d_p ——销子直径；

d_{ht} ——榫节点嵌入榫直径；

d_h ——榫体直径；

d_e ——橡胶层总厚度；

d_i ——中间各层橡胶片厚度；

d_t ——上下表层橡胶片厚度；

f ——壳体的矢高；

H_{hp} ——榫节点嵌入件高度；

I_a ——三向交叉拱的折算惯性矩；

I_1 、 I_2 、 I_c ——网壳沿 1、2 方向和斜向的杆件截面惯性矩；

L ——圆柱面网壳的长度；

l ——杆件几何长度；

l_0 ——杆件计算长度；

l_{hp} ——榫节点嵌入件总长度；

l_s ——套筒长度；

r ——球面的曲率半径；

s_1 ——1 方向网格间距，三角形网格的高度；

s_2 ——2 方向网格间距；

s_c ——斜向网格间距，三向交叉拱的间距；

t ——空心球壁厚；

t_c ——圆钢管壁厚；

t_d ——双层网壳的厚度；

t_e ——拟壳的等效厚度；

X_{ji} 、 Y_{ji} 、 Z_{ji} —— j 振型、 i 质点的 x 、 y 、 z 方向的相对位移坐标；

α ——沿 2 方向杆件和斜杆的夹角。

β ——圆柱面网壳相邻两母线所对应的中心角；

θ ——两相邻杆件轴线间的夹角，两相邻螺栓间的夹角；

θ_{\max} ——网壳上全部荷载标准值引起的最大支座转角；

φ ——榫体嵌入榫的中线与相应嵌入件（杆件）轴线的垂线之间的夹角。

2.0.4 计算系数

c ——场地修正系数；

K ——考虑网壳稳定性的系数；

m ——计算地震作用效应所采用的振型数；

n ——节点总数，橡胶垫片层数；

α_j ——相应于 j 振型自振周期的水平地震影响系数；

α_{zj} ——相应于 j 振型自振周期的竖向地震影响系数；

β ——橡胶支座形状系数；

γ_j —— j 振型参与系数；

η_d ——空心球加肋承载力提高系数；

η_m ——考虑空心球受压弯或拉弯作用的影响系数；

λ ——套筒外接圆直径与螺栓直径的比值；

λ_T ——振型的自振周期比；

μ ——摩擦系数，考虑荷载不对称分布影响的折减系数；

ξ ——螺栓拧入球体长度与螺栓直径的比值，地震轴向力系数；

ξ_j —— j 振型的阻尼比；

ρ_{jk} —— j 振型与 k 振型的耦联系数；

ψ_E ——水平地震作用系数。

2.0.5 数学符号

B_e ——等效薄膜刚度矩阵；

C ——阻尼矩阵；

D_e ——等效抗弯刚度矩阵；

F ——网壳结构节点荷载向量；

I ——无量纲刚度矩阵；

K ——网壳结构总弹性刚度矩阵；

K_t —— T 时刻结构的切线刚度矩阵；

M ——网壳结构的质量矩阵；

T ——内力变换矩阵；

U ——网壳结构节点位移向量；

\ddot{U} 、 \dot{U} ——网壳节点在整体坐标系中的加速度和速度；

\dot{U}_g ——地面运动加速度向量。

3 设计的基本规定

3.0.1 网壳结构的设计应根据建筑物的功能与形状，综合考虑材料供应和施工条件以及制作安装方法，选择合理的网壳屋盖形式、边缘构件及支承结构，以取得良好的技术经济效果。

3.0.2 网壳结构可采用单层或双层，可采用以下常用形式：圆柱面网壳、球面网壳、椭圆抛物面网壳（双曲扁壳）及双曲抛物面网壳（鞍形网壳、扭网壳）。

3.0.3 单层网壳的网格可选用下列常用形式。

1 单层圆柱面网壳的网格可采用：

——单向斜杆正交正放网格（图 3.0.3-1a）

——交叉斜杆正交正放网格（图 3.0.3-1b）

——联方网格（图 3.0.3-1c）

——三向网格（图 3.0.3-1d）

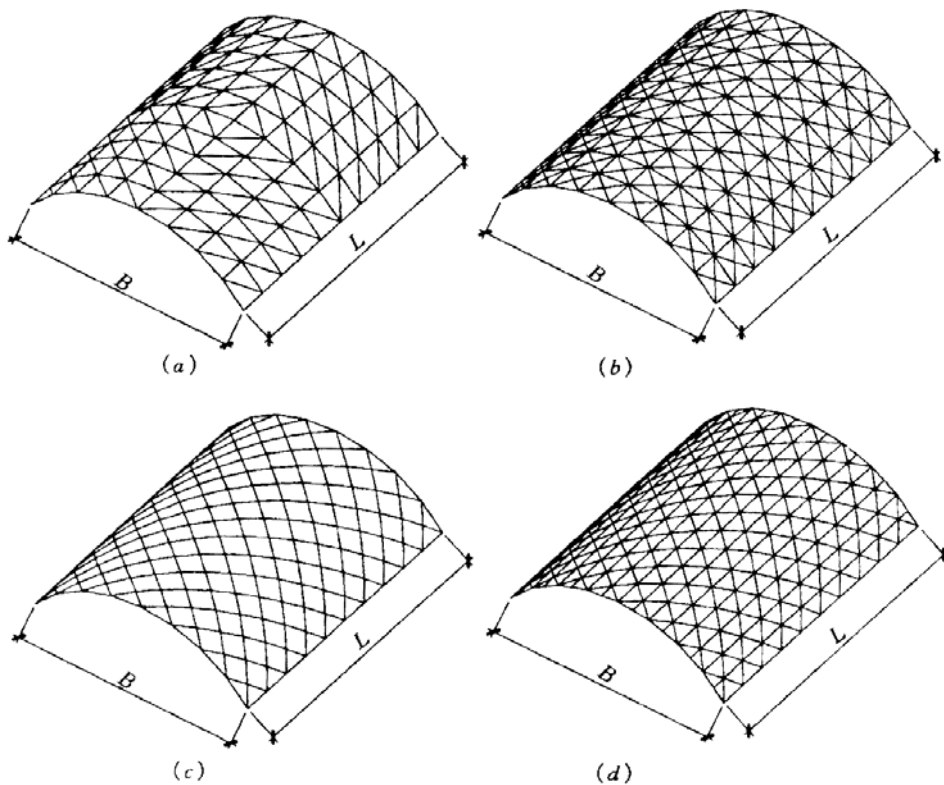


图 3.0.3-1 圆柱面网壳的网格

2 单层球面网壳的网格可采用：

- 肋环型（图 3.0.3-2a）
- 肋环斜杆型（图 3.0.3-2b）
- 三向网格（图 3.0.3-2c）
- 扇形三向网格（图 3.0.3-2d）
- 葵花形三向网格（图 3.0.3-2e）
- 短程线型（图 3.0.3-2f）

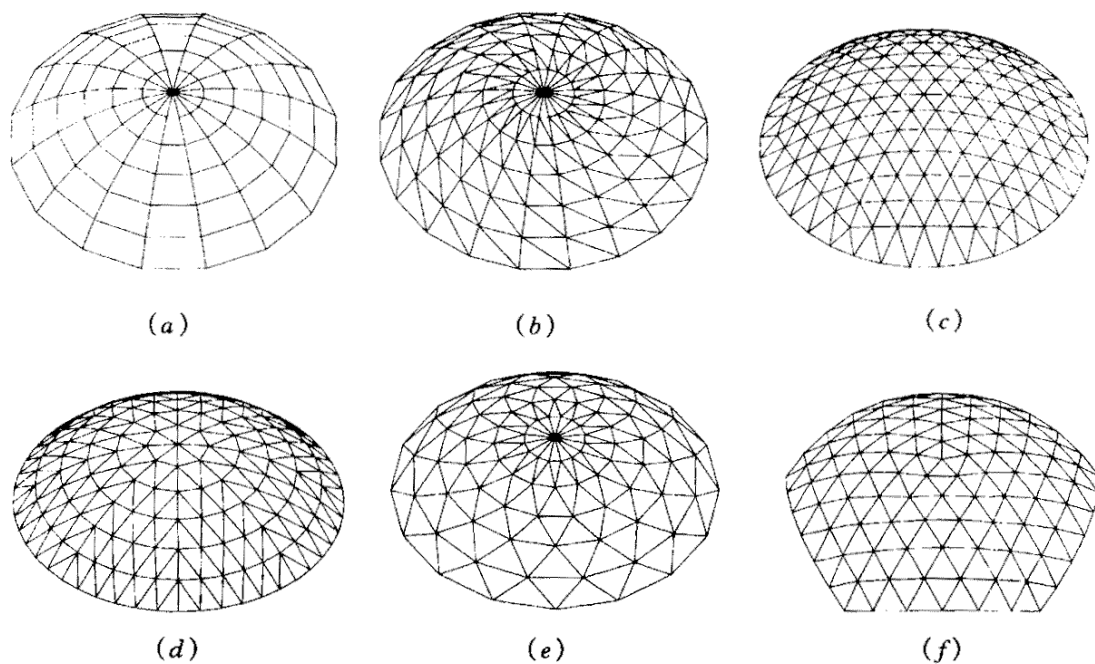


图 3.0.3-2 球面网壳的网格

3 单层椭圆抛物面网壳可采用三向（图 3.0.3-3a）或单向斜杆正交正放的网格（图 3.0.3-3b）。

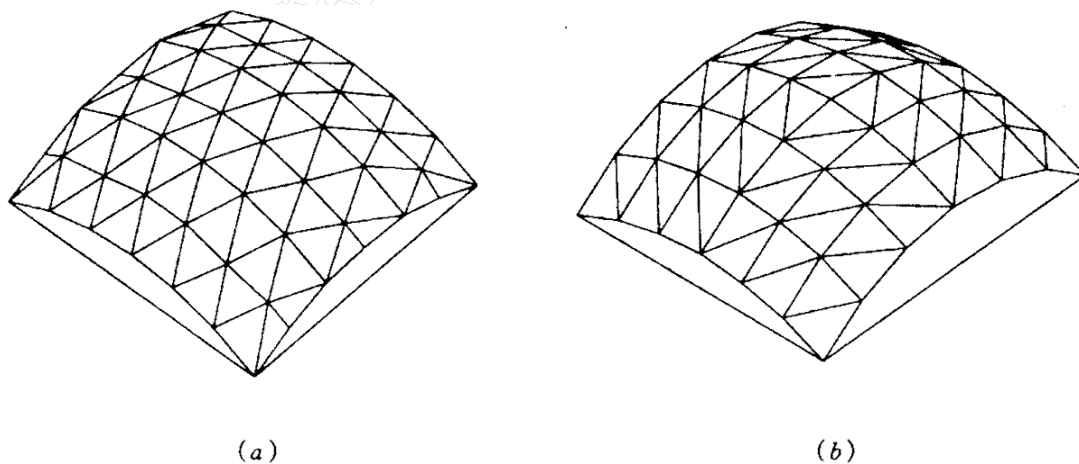


图 3.0.3-3 椭圆抛物面网壳的网格

4 单层双曲抛物面网壳宜采用三向网格（图 3.0.3-4a），其中两个方向沿直纹布置，也可采用两向正交网格（图 3.0.3-4b），沿主曲率方向布置，必要时可加设斜杆。

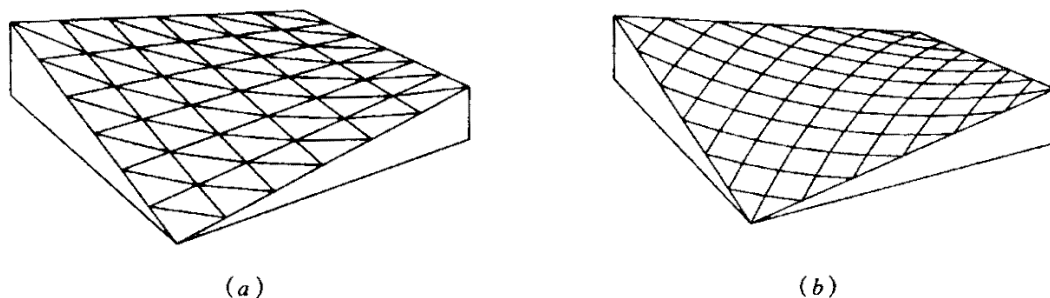


图 3.0.3-4 双曲抛物面网壳的网格

3.0.4 双层网壳的网格以两向或三向交叉的桁架单元组成时，可采用本规程 3.0.3 条的方式布置。双层网壳以四角锥、三角锥的锥体单元组成时，其上弦或下弦也可采用本规程 3.0.3 条的方式布置。

3.0.5 单层网壳应采用刚接节点，双层网壳可采用铰接节点。

3.0.6 网壳的支承构造除保证可靠传递竖向反力外，尚应满足不同网壳结构形式必需的边缘约束条件。

圆柱面网壳可采用以下支承方式：通过端部横隔支承于两端；沿两纵边支承；沿四边支承。端部支承横隔应具有足够的平面内刚度。沿两纵边支承的支承点应保证抵抗侧向水平位移的约束条件。

球面网壳的支承点应保证抵抗水平位移的约束条件。

椭圆抛物面网壳及四块组合双曲抛物面网壳应通过边缘构件沿周边支承，其支承边缘构件应具有足够的平面内刚度。

双曲抛物面网壳应通过边缘构件将荷载传递给支座或下部结构，其边缘构件应具有足够的刚度，并作为网壳整体的组成部分共同计算。

3.0.7 网壳结构可采用下列组合形式：

- 将圆柱面、圆球面和双曲抛物面截出一部分进行组合（图 3.0.7a）；
- 将一段圆柱面两端与半个圆球面组合（图 3.0.7b）；
- 将四块双曲抛物面组合（图 3.0.7c）。

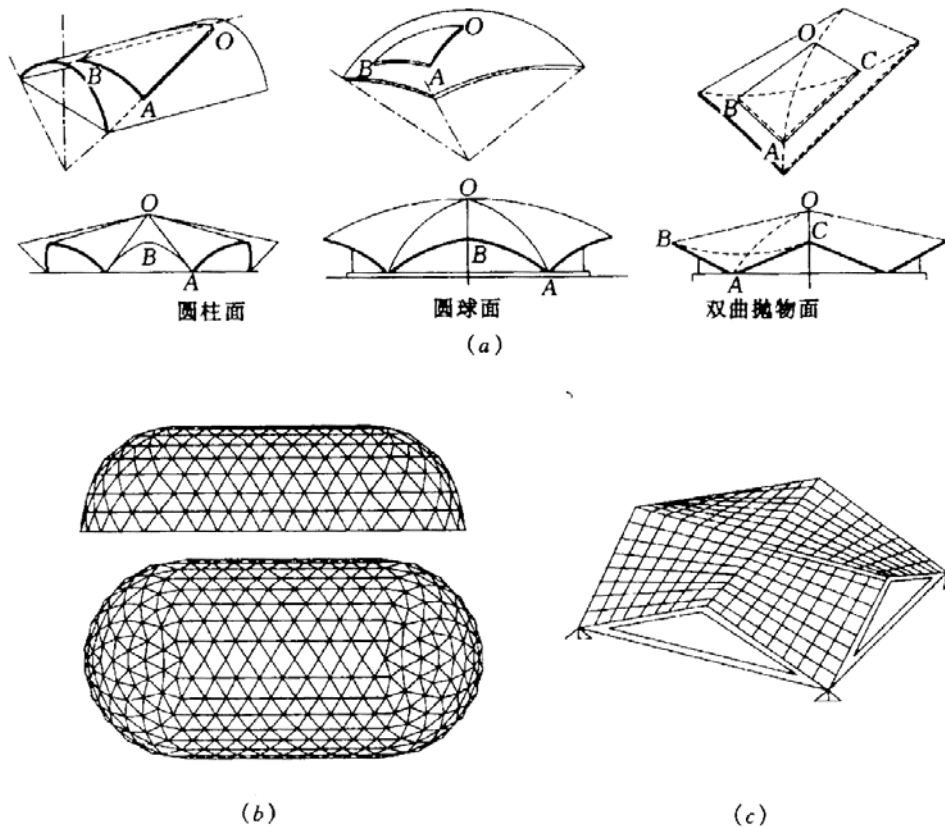


图 3.0.7 网壳的组合方式

3.0.8 球面网壳用于三角形、四边形或多边形平面时可采用图 3.0.8 所示的切割方式。在所切割的部分应设置具有足够刚度的边缘构件。

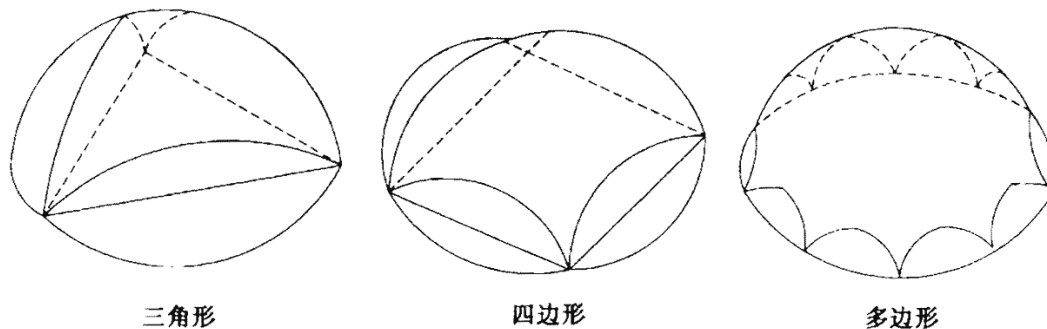


图 3.0.8 球面网壳的切割方式

3.0.9 两端支承的圆柱面网壳，其宽度 B 与跨度 L 之比宜小于 1.0，壳体的矢高可取宽度的 $1/3 \sim 1/6$ ，沿纵向边缘落地支承的圆柱面网壳可取 $1/2 \sim 1/5$ 。双层圆柱面网壳的厚度可取宽度的 $1/20 \sim 1/50$ 。单层圆柱面网壳支承在两端横隔时，其跨度 L 不宜大于 30m，当沿纵向边缘落地支承时，其跨度（此时为宽度 B ）不宜大于 25m。

3.0.10 球面网壳的矢高可取跨度（平面直径）的 $1/3\sim 1/7$ ，沿周边落地支承可放宽至 $3/4$ 。双层球面网壳的厚度可取跨度（平面直径）的 $1/30\sim 1/60$ 。单层球面网壳的跨度（平面直径）不宜大于 60m 。

3.0.11 椭圆抛物面网壳底边边长比不宜大于 1.5 ，壳体每个方向的矢高可取短向跨度的 $1/6\sim 1/9$ 。双层椭圆抛物面网壳的厚度可取短向跨度的 $1/20\sim 1/50$ 。单层椭圆抛物面网壳的跨度不宜大于 40m 。

3.0.12 双曲抛物面网壳底面对角线之比不宜大于 2 ，单块双曲抛物面壳体的矢高可取跨度的 $1/2\sim 1/4$ （跨度为二个对角支承点之间的距离）。四块组合双曲抛物面壳体每个方向的矢高可取相应跨度的 $1/4\sim 1/8$ 。双层双曲抛物面网壳的厚度可取短向跨度的 $1/20\sim 1/50$ 。单层双曲抛物面网壳的跨度不宜大于 50m 。

3.0.13 网壳结构的网格在构造上可采用以下尺寸，当跨度小于 50m 时， $1.5\sim 3.0\text{m}$ ；当跨度为 $50\sim 100\text{m}$ 时， $2.5\sim 3.5\text{m}$ ；当跨度大于 100m 时， $3.0\sim 4.5\text{m}$ ，网壳相邻杆件间的夹角宜大于 30° 。

3.0.14 网壳结构的最大位移计算值不应超过短向跨度的 $1/400$ 。悬挑网壳的最大位移计算值不应超过悬挑长度的 $1/200$ 。

4 结构计算

4.1 一般计算原则

4.1.1 网壳结构应进行在外荷载作用下的内力、位移计算和必要的稳定性计算，并根据具体情况，对地震、温度变化、支座沉降及施工安装荷载等作用下的内力、位移进行计算。

4.1.2 对非抗震设计，荷载及荷载效应组合应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 进行计算，在杆件截面及节点设计中，应按照荷载的基本组合确定内力设计值；在位移计算中应按照短期效应组合确定其挠度。

对抗震设计，荷载及荷载效应组合应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 确定内力设计值。

网壳结构的内力和位移可按弹性阶段进行计算；网壳结构的稳定性计算应考虑结构的几何非线性影响。

4.1.3 对于单个球面网壳、圆柱面网壳和双曲抛物面网壳的风载体型系数，可按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 取值；对于多个连接的球面网壳、圆柱面网壳和双曲抛物面网壳，以及各种复杂形体的网壳结构，应根据模型风洞试验确定风载体型系数。

4.1.4 网壳结构的外荷载可按静力等效原则将节点所辖区域内的荷载集中作用在该节点上。分析双层网壳时可假定节点为铰接，杆件只承受轴向力；分析单层网壳时假定节点为刚接，杆件除承受轴向力外，还承受弯矩、剪力等。当杆件上作用有局部荷载时，必须另行考虑局部弯曲内力的影响。

4.1.5 网壳结构的支承条件，可根据支座节点的位置、数量和构造情况以及支承结构的刚度确定，对于双层网壳分别假定为二向可侧移、一向可侧移、无侧移的铰接支座或弹性支承；对于单层网壳分别假定为二向或一向可侧移、无侧移的铰接支座、刚接支座或弹性支承。

网壳结构的支承必须保证在任意竖向和水平荷载作用下结构的几何不变性和各种网壳计算模型对支承条件的要求。

4.1.6 网壳施工安装阶段与使用阶段支承情况不一致时，应区别不同支承条件来分析计算施工安装阶段和使用阶段在相应荷载作用下的网壳内力和变位。

4.1.7 网壳结构根据网壳类型、节点构造、设计阶段可分别选用不同方法进行内力、位移和稳定性计算：

- 1 双层网壳宜采用空间杆系有限元法进行计算；
- 2 单层网壳宜采用空间梁系有限元法进行计算；
- 3 对单、双层网壳在结构方案选择和初步设计时可采用拟壳分析法进行估算。

4.2 静力计算

4.2.1 单层网壳结构采用空间梁系有限元法分析节点位移和杆件内力时，结构的每个杆件作为一个单元。单层网壳的节点假设为刚节点，即每个节点有三个线位移和三个角位移。双层网壳结构采用空间杆系有限元法分析节点位移和杆件内力时，节点假设为铰接，即每个节点有三个线位移。

4.2.2 按有限元法进行网壳结构静力计算时可采用下列统一的基本方程：

$$KU = F \quad (4.2.2)$$

式中 K ——网壳结构总弹性刚度矩阵；

U ——网壳结构节点位移向量；

F ——网壳结构节点荷载向量。

4.2.3 网壳结构采用拟壳法分析时可根据壳面形式、网格布置和构件截面把网壳等代为一个当量的薄壳结构，在由相应边界条件求得拟壳的位移和内力后，可按几何和平衡条件返回计算网壳杆件的内力。

4.2.4 对于三向交叉拱系组成正三角形或接近正三角形网格布置的网壳，按拟壳分析法计算时可等代为一个各向同性薄壳，其等效薄膜刚度矩阵 B_e 、等效抗弯刚度矩阵 D_e 可按下列下式计算

$$\left. \begin{aligned} B_e &= B_e I \\ D_e &= D_e I \end{aligned} \right\} \quad (4.2.4-1)$$

$$\left. \begin{aligned} I &= \begin{bmatrix} 1 & \nu_e & 0 \\ \nu_e & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu_e}{2} \end{bmatrix} \\ B_e &= \frac{9}{8} E t_e \\ t_e &= \frac{A_a}{s_c} \\ D_e &= \frac{9}{8} \frac{E I_a}{s_c} \\ \nu_e &= \frac{1}{3} \end{aligned} \right\} \quad (4.2.4-2)$$

式中 B_e ——等效薄膜刚度；

t_e ——等效厚度；

D_e ——等效抗弯刚度；

E ——钢材弹性模量；

ν_e ——等效泊松比；

I ——无量纲刚度矩阵；

A_a ——三向交叉拱的折算截面面积；

I_a ——三向交叉拱的折算惯性矩；

s_c ——三向交叉拱的间距。

对于三向交叉桁架拱系组成的双层网壳，拱的折算截面面积 A_a 和折算惯性矩 I 可分别按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} A_a &= A_t + A_b \\ I_a &= \frac{A_t A_b}{A_t + A_b} t_d^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.2.4-3)$$

式中 A_t 、 A_b ——分别为双层网壳上、下弦杆的截面面积；

t_d ——双层网壳的厚度。

以上各式中当网壳杆件截面面积和惯性矩不等时，可分别取其算术平均值。

4.2.5 对于正三角形网格布置的网壳，由拟壳的薄膜分布轴向力 n_x 、 n_y 和剪力 n_{xy} 以及分布弯矩 m_x 、 m_y 和扭矩 m_{xy} ，可由下列公式分别计算单层网壳杆件的轴向力 N_1 、 N_2 、 N_3 和弯矩 M_1 、 M_2 、 M_3 （图 4.2.5-1）。

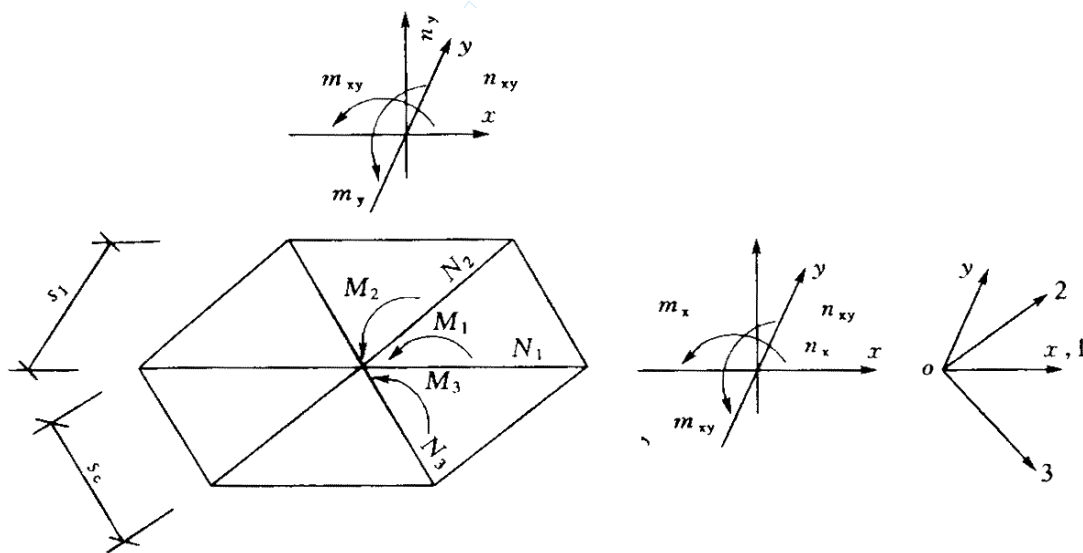


图 4.2.5-1 网壳杆件内力与拟壳内力的关系

$$\left. \begin{aligned} \{N_1 \quad N_2 \quad N_3\}^T &= s_1 T \{n_x \quad n_y \quad n_{xy}\}^T \\ \{M_1 \quad M_2 \quad M_3\}^T &= s_1 T \{m_x \quad m_y \quad m_{xy}\}^T \end{aligned} \right\} \quad (4.2.5-1)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & \frac{2}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{3} & -\frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (4.2.5-2)$$

式中 s_1 ——三角形网格高度；

T ——内力变换矩阵。

剪力 V_i ($i=1, 2, 3$) 由相应弯矩 M_i ($i=1, 2, 3$) 的一阶差分求得。

对于三向交叉桁架拱系组成的双层网壳， i ($i=1, 2, 3$)

组桁架拱系上、下弦杆、腹杆的轴向力可按下列公式计算（图 4.2.5-2）。

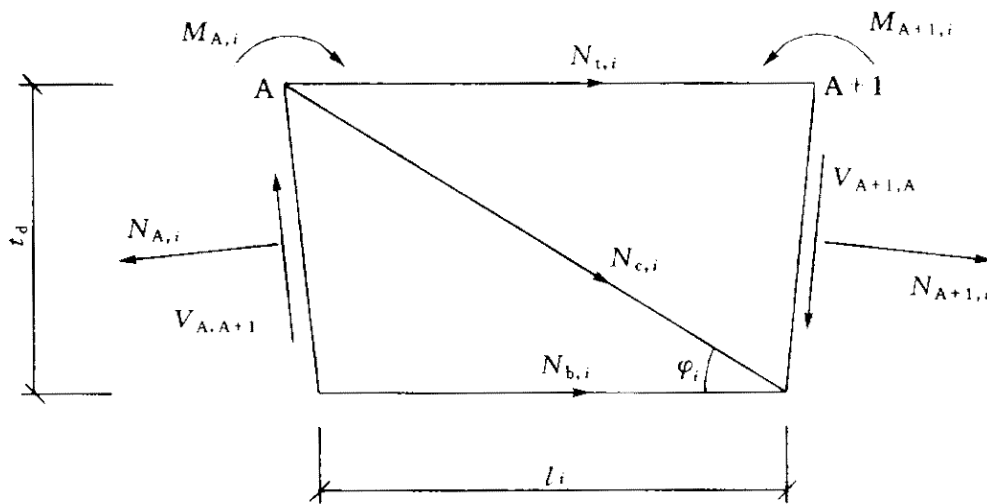


图 4.2.5-2 双层网壳桁架拱系的杆件内力

$$N_{t,i} = -\frac{M_{A+1,i}}{t_d} + \frac{N_{A+1,i} + N_{A,i}}{4}$$

$$N_{b,i} = \frac{M_{A,i}}{t_d} + \frac{N_{A+1,i} + N_{A,i}}{4} \quad (4.2.5-3)$$

$$N_{c,i} = \frac{M_{A+1,i} - M_{A,i}}{l_i \sin \varphi_i}$$

式中 l_i ——上、下弦杆的平均长度；

t_d ——双层网壳的厚度；

φ_i ——斜腹杆与下弦杆的夹角。

竖杆轴向力 $N_{V,i}$ 由上弦节点（或下弦节点）的法向平衡条件确定。式（4.2.5-3）中的 $M_{A+1,i}$ 、 $M_{A,i}$ 、 $N_{A+1,i}$ 、 $N_{A,i}$ 由式（4.2.5-1）求得。

4.3 稳定性计算

4.3.1 单层的球面网壳、圆柱面网壳和椭圆抛物面网壳，以及厚度小于本规程 3.0.9 至 3.0.11 条规定范围的双层网壳均应进行稳定性计算。

4.3.2 网壳的稳定性可按考虑几何非线性的有限元分析方法（荷载-位移全过程分析）进行计算，分析中可假定材料保持为线弹性。

全过程分析采用的迭代方程为：

$$\mathbf{K}_t \Delta \mathbf{U}^{(i)} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} - \mathbf{N}_{t+\Delta t}^{(i-1)} \quad (4.3.2)$$

式中 \mathbf{K}_t ——时刻结构的切线刚度矩阵；

$\Delta \mathbf{U}^{(i)}$ ——当前位移的迭代增量；

$\mathbf{F}_{t+\Delta t}$ —— $t + \Delta t$ 时刻外部所施加的节点荷载向量；

$\mathbf{N}_{t+\Delta t}^{(i-1)}$ —— $t + \Delta t$ 时刻相应的杆件节点内力向量。

4.3.3 球面网壳的全过程分析可按满跨均布荷载进行，圆柱面网壳和椭圆抛物面网壳宜补充考虑半跨活荷载分布。

进行网壳全过程分析时应考虑初始曲面形状的安装偏差的影响；可采用结构的最低阶屈曲模态作为初始缺陷分布模态，其最大计算值可按网壳跨度的 1/300 取值。

4.3.4 按本规程 4.3.2 和 4.3.3 条进行网壳结构全过程分析求得的第一个临界点处的荷载值，可作为该网壳的极限承载力。将极限承载力除以系数 K 后，即为按网壳稳定性确定的容许承载力（标准值）。系数 K 可取为 5。

4.3.5 当单层球面网壳跨度小于 45m，单层圆柱面网壳宽度小于 18m，单层椭圆抛物面网壳跨度小于 30m，或对网壳稳定性进行初步计算时，其容许承载力标准值 $[n_{ks}]$ (kN/m^2) 可按下列公式计算：

1 单层球面网壳

$$[n_{ks}] = 0.21 \frac{\sqrt{B_e D_e}}{r^2} \quad (4.3.5-1)$$

式中 B_e ——网壳的等效薄膜刚度 (kN/m)；

D_e ——网壳的等效抗弯刚度 (kN·m)；

r ——球面的曲率半径 (m)。

扇形三向网壳的等效刚度 B_e 和 D_e 应按主肋处的网格尺寸和杆件截面进行计算；短程线型网壳应按三角形球面上的网格尺寸和杆件截面进行计算；肋环斜杆型和葵花形三向网壳应按自支承圈梁算起第三圈环梁处的网格尺寸和杆件截面进行计算。网壳径向和环向的等效刚度不相同，可采用两个方向的平均值。

2 单层椭圆抛物面网壳，四边铰支在刚性横隔上

$$[n_{ks}] = 0.24 \mu \frac{\sqrt{B_e D_e}}{r_1 r_2} \quad (4.3.5-2)$$

$$\mu = \frac{1}{1 + 0.956 \frac{q}{g} + 0.076 \left(\frac{1}{g}\right)^2} \quad (4.3.5-3)$$

式中 r_1 、 r_2 ——椭圆抛物面网壳两个方向的主曲率半径 (m)；

μ ——考虑荷载不对称分布影响的折减系数。

g 、 q ——作用在网壳上的恒荷载和活荷载 (kN/m²)。

注：公式 (4.3.5-3) 的适用范围为 $q/g = 0 \sim 2$ 。

3 单层圆柱面网壳

1) 当网壳为四边支承，即两纵边固定铰支 (或固结)，而两端铰支在刚性横隔上时：

$$[n_{ks}] = 14.4 \frac{D_{e11}}{r^3 (L/B)^3} + 3.9 \times 10^{-5} \frac{B_{e22}}{r(L/B)} + 15.0 \frac{D_{e22}}{(r+3f)B^2} \quad (4.3.5-4)$$

式中 L 、 B 、 f 、 r ——分别为圆柱面网壳的总长度、宽度、矢高和曲率半径 (m)；

D_{e11} 、 D_{e22} ——分别为圆柱面网壳纵向 (零曲率方向) 和横向 (圆弧方向) 的等效抗弯刚度 (kN·m)；

B_{e22} ——圆柱面网壳横向等效薄膜刚度 (kN/m)。

当圆柱面网壳的长宽比(L/B)不大于 1.2 时, 由式 (4.3.5-4) 算出的容许承载力尚应乘以下列考虑荷载不对称分布影响的折减系数 μ :

$$\mu = 0.6 + \frac{1}{2.5 + 5 \frac{q}{g}} \quad (4.3.5-5)$$

注: 公式 (4.3.5-5) 的适用范围为 $q/g=0 \sim 2$ 。

2) 当网壳仅沿两纵边支承时:

$$[n_{ks}] = 15.0 \frac{D_{e22}}{(r + 3f)B^2} \quad (4.3.5-6)$$

3) 当网壳为两端支承时:

$$[n_{ks}] = \mu \left(0.013 \frac{\sqrt{B_{e11} D_{e11}}}{r^2 \sqrt{L/B}} + 0.028 \frac{\sqrt{B_{e22} D_{e22}}}{r^2 (L/B) \xi} + 0.017 \frac{\sqrt{I_h I_v}}{r^2 \sqrt{Lr}} \right) \quad (4.3.5-7)$$

$$\xi = 0.96 + 0.16(1.8 - L/B)^4$$

式中 B_{e11} ——圆柱面网壳纵向等效薄膜刚度;

I_h 、 I_v ——边梁水平方向和竖向的线刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)。

对于析架式边梁, 其水平方向和竖向的线刚度可按下式计算:

$$I_{h,v} = E(A_1 a_1^2 + A_2 a_2^2) / L \quad (4.3.5-8)$$

式中 A_1 、 A_2 ——分别为两根弦杆的面积;

a_1 、 a_2 ——分别为相应的形心距。

两端支承的单层圆柱面网壳尚应考虑荷载不对称分布的影响, 其折减系数 μ 按下式计算:

$$\mu = 1.0 - 0.2 \frac{L}{B} \quad (4.3.5-9)$$

注: 公式 (4.3.5-9) 的适用范围为 $L/B=1.0 \sim 2.5$

以上各式中网壳等效刚度的计算公式可见本规程附录 A。

4.4 地震作用下的内力计算

4.4.1 在设防烈度为 7 度的地区, 网壳结构可不进行竖向抗震计算, 但必须进行水平抗震计算。在设防烈度为 8 度、9 度地区必须进行网壳结构水平与竖向抗震计算。

4.4.2 按时程分析法分析网壳结构地震效应时，其动力平衡方程应为：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_g \quad (4.4.2)$$

式中 \mathbf{M} 、 \mathbf{K} ——网壳结构的质量矩阵、刚度矩阵；

\mathbf{C} ——阻尼矩阵，对于周边固定铰支承的网壳结构，阻尼比可取 0.002；

$\ddot{\mathbf{U}}$ 、 $\dot{\mathbf{U}}$ 、 \mathbf{U} ——网壳节点在整体坐标系中的加速度、速度和位移向量；

$\ddot{\mathbf{U}}_g$ ——地面运动加速度向量。

4.4.3 采用时程分析法时，应按建筑场地类别和设计地震分组选用不小于二组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线。加速度曲线幅值应根据与抗震设防烈度相应的多遇地震的加速度峰值进行调整，加速度时程的最大值可按表 4.4.3 采用。

表 4.4.3 时程分析所用的地震加速度时程曲线的最大值 (cm/s²)

地震影响	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	18	35 (55)	70 (110)	140

注：括号内的数值分别用于设计基本地震回震度为 0.15g 和 0.30g 的地区

4.4.4 对网壳结构进行地震效应计算时可采用振型分解反应谱法，按此法分析宜取前 20 阶振型进行网壳地震效应计算；对于体型复杂或重要的大跨度网壳结构，应采用时程分析法进行补充计算。

4.4.5 采用振型分解反应谱法时，网壳结构 j 振型、 i 质点的水平或竖向地震作用标准值应按下式确定：

$$\left. \begin{aligned} F_{Exji} &= \alpha_j \gamma_j X_{ji} G_i \\ F_{Eyji} &= \alpha_j \gamma_j Y_{ji} G_i \\ F_{Ezji} &= \alpha_j \gamma_j Z_{ji} G_i \end{aligned} \right\} \quad (4.4.5-1)$$

式中 F_{Exji} 、 F_{Eyji} 、 F_{Ezji} —— j 振型、 i 质点分别沿 x 、 y 、 z 方向地震作用标准值；

α_j ——相应于 j 振型自振周期的水平地震影响系数，按《建筑抗震设计规范》GB

50011 确定。竖向地震影响系数 α_{zj} 取 $0.65\alpha_j$ ；

X_{ji} 、 Y_{ji} 、 Z_{ji} 、——分别为 j 振型、 i 质点的 x 、 y 、 z 方向的相对位移；

γ_j —— j 振型参与系数。

当计算水平抗震时， j 振型参与系数应按下列公式计算：

$$X \text{ 向: } X_{Exj} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n (X_{ji}^2 + Y_{ji}^2 + Z_{ji}^2) G_i} \quad (4.4.5-2)$$

$$Y \text{ 向: } X_{Eyj} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n (X_{ji}^2 + Y_{ji}^2 + Z_{ji}^2) G_i} \quad (4.4.5-3)$$

当计算竖向抗震时， j 振型参与系数应按下式计算：

$$X_{EZj} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n (X_{ji}^2 + Y_{ji}^2 + Z_{ji}^2) G_i} \quad (4.4.5-4)$$

式中 n ——网壳节点数。

4.4.6 按振型分解反应谱法分析时，网壳结构杆件水平或竖向地震作用效应应按下列公式确定：

$$S_E = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \rho_{jk} S_{Ej} S_{EK}} \quad (4.4.6-1)$$

$$\rho_{jk} = \frac{8\xi_j \xi_k (1 + \lambda_T) \lambda_T^{1.5}}{(1 - \lambda_T^2)^2 + 4\xi_j \xi_k (1 + \lambda_T)^2 \lambda_T} \quad (4.4.6-2)$$

式中 S_E ——网壳杆件地震作用标准值的效应；

S_{Ej} 、 S_{EK} ——分别为 j 、 k 振型地震作用标准值的效应，可取前 20 个振型；

ρ_{jk} —— j 振型与 k 振型的耦系数；

ξ_j 、 ξ_k ——分别为 k 、 j 振型的阻尼比；

λ_T —— k 振型与 j 振型的自振周期比；

m ——计算中考虑的振型数。

4.4.7 在抗震分析时，宜考虑支承结构对网壳结构的影响。当网壳结构支承在单排的独立柱、框架柱或承重墙上时，可把支承结构简化为弹性支座。对于网壳的支承结构应按有关标准进行抗震计算。

4.4.8 对于采用轻屋盖的单层球面网壳结构，采用扇形三向网格、肋环斜杆型及短程线型，当周边固定铰支承，按7度或8度设防、III类场地、设计地震第一组进行多遇地震效应计算时，其杆件地震轴向力标准值 N_E 可按以下方法计算：当主肋、环杆、斜杆均分别各自取等截面杆设计时：

$$\text{主肋: } N_E^m = c\xi_m N_{G\max}^m \quad (4.4.8-1)$$

$$\text{环杆: } N_E^c = c\xi_c N_{G\max}^c \quad (4.4.8-2)$$

$$\text{斜杆: } N_E^d = c\xi_d N_{G\max}^d \quad (4.4.8-3)$$

式中 N_E^m 、 N_E^c 、 N_E^d ——地震作用下分别为网壳的主肋、环杆及斜杆的轴向力标准值；

$N_{G\max}^m$ 、 $N_{G\max}^c$ 、 $N_{G\max}^d$ ——重力荷载代表值作用下分别为网壳的主肋、环杆及斜杆的轴向力标准值的绝对最大值；

ξ_m 、 ξ_c 、 ξ_d ——主肋、环杆及斜杆地震轴向力系数；设防烈度为7度时，按表

4.4.8-1 确定，8度时取表中数值的2倍；

c ——场地修正系数，按表4.4.8-2 确定。

表 4.4.8-1 单层球面网壳杆件地震轴向力系数 ξ

f/L	0.167	0.200	0.250	0.300
ξ_m	0.16			
ξ_c	0.30	0.32	0.35	0.38
ξ_d	0.26	0.28	0.30	0.32

表 4.4.8-1 场地修正系数 c

场地类别	I	II	III	IV
c	0.54	0.75	1.00	1.55

4.4.9 对于轻屋盖单层双曲抛物面网壳结构，斜杆为拉杆（沿斜杆方向角点为抬高端）、弦杆为正交正放网格；当四角固定铰支承、周边竖向铰支承，按7度或8度设防、III类场地、设计地震第一组进行多遇地震效应计算时，其杆件地震轴向力标准值 N_E 可按以下方法计算：

除了刚度远远大于内部杆的周边杆及抬高端斜杆外，所有弦杆及斜杆均取等截面杆件设计时：

$$\text{抬高端斜杆：} \quad N_E^r = c\xi N_{G\max}^r \quad (4.4.9-1)$$

$$\text{弦杆及其他斜杆：} \quad N_E^e = c\xi N_{G\max}^e \quad (4.4.9-2)$$

式中 N_E^r 、 N_E^e ——分别为地震作用下网壳抬高端斜杆及其他弦杆与斜杆的轴向力标准值；

$N_{G\max}^r$ ——重力荷载代表值作用下，网壳抬高端 1/5 跨度范围内斜杆轴向力标准值的绝对最大值；

$N_{G\max}^e$ ——重力荷载代表值作用下，网壳全部弦杆与其他斜杆轴向力标准值的绝对最大值；

ξ ——网壳杆件地震轴向力系数；设防烈度为 7 度时，取 $\xi=0.15$ ，8 度时取 $\xi=0.30$ 。

4.4.10 对于轻屋盖正放四角锥双层圆柱面网壳结构，沿两纵边固定铰支在上弦节点、两端竖向铰支在刚性横隔上，当按 7 度及 8 度设防、III 类场地、设计地震第一组进行多遇地震效应计算时，其杆件地震轴向力标准值 N_E ，可按以下方法计算：

$$\text{横向上下弦杆：} \quad N_E^t = c\xi_t N_G^t \quad (4.4.10-1)$$

$$\text{按等截面设计的纵向弦杆} \quad N_E^l = c\xi_l N_{G\max}^l \quad (4.4.10-2)$$

$$\text{按等截面设计的腹杆} \quad N_E^w = c\xi_w N_{G\max}^w \quad (4.4.10-3)$$

式中 N_E^t 、 N_E^l 、 N_E^w ——地震作用下分别为网壳横向弦杆、纵向弦杆与腹杆的轴向力标准值；

$N_{G\max}^l$ 、 $N_{G\max}^w$ ——重力荷载代表值作用下分别为网壳纵向弦杆与腹杆轴向力标准值的绝对最大值；

ξ_t 、 ξ_l 、 ξ_w ——横向弦杆、纵向弦杆、腹杆的地震轴向力系数，设防烈度为 7 度时，按表 4.4.10 确定，8 度时取表中数值的 2 倍。

表 4.4.10 双圆柱面网壳杆件地震轴向力系数 ξ

f/B		0.167	0.200	0.250	0.300		
横向弦杆 ξ_t		图中阴影部分杆件	上弦	0.22	0.28	0.40	0.54
			下弦	0.34	0.40	0.48	0.60
		图中空白部分杆件	上弦	0.18	0.23	0.33	0.44
			下弦	0.27	0.32	0.40	0.48
纵向弦杆 ξ_l		上弦	0.18	0.32	0.56	0.78	
		下弦	0.10	0.16	0.24	0.34	
腹杆 ξ_w		0.50					

5 杆件和节点的设计与构造

5.1 杆 件

5.1.1 网壳的杆件可采用普通型钢和薄壁型钢。管材宜采用高频焊管或无缝钢管，当有条件时应采用薄壁管型截面。杆件的钢材应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定采用。

网壳杆件的截面应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 根据强度和稳定性的计算确定。

5.1.2 确定网壳杆件的长细比时，其计算长度应符合下列规定：

- 1 双层网壳杆件计算长度 l_0 应按表 5.1.2-1 采用。

表 5.1.2-1 双层网壳杆件的计算长度 l_0

杆件	节 点		
	螺栓球	焊接空心球	板节点
弦杆及支座腹杆	l	$0.9l$	l
腹 杆	$l \quad l$	$0.9l$	$0.9l$

注： l 为杆件几何长度（节点中心间距离）。

2 单层网壳杆件的计算长度 l_0 应按表 5.1.2-2 采用。

表 5.1.2-2 单层网壳杆件的计算长度 l_0

弯曲方向	节 点	
	焊接空心球	榫节点
壳体曲面内	0.9 l	l
壳体曲面外	1.6 l	1.6 l

注： l 为杆件几何长度（节点中心间距离）。

5.1.3 网壳杆件的长细比不宜超过表 5.1.3 中规定的数值。

表 5.1.3 网壳杆件的容许长细比 $[\lambda]$

网壳类别	受压杆件和 压弯杆件	受拉杆件和拉弯杆件	
		承载静力荷载	直接承载动力荷载
双层网壳	180	300	250
单层网壳	150	300	—

5.1.4 网壳杆件截面的最小尺寸应根据网壳的跨度及网格大小确定。钢管不宜小于 $\phi 45 \times 3$ ，普通型钢不宜小于 $L50 \times 3$ 。

5.1.5 网壳杆件在构造设计时，应避免有难于检查、清刷、油漆以及积留湿气或灰尘的死角，钢管端部应进行封闭。

5.2 焊接空心球节点

5.2.1 由两个半球焊接而成的空心球，可根据受力大小分别采用不加肋（图 5.2.1-1）或加肋（图 5.2.1-2），适用于连接单层及双层网壳的钢管杆件。

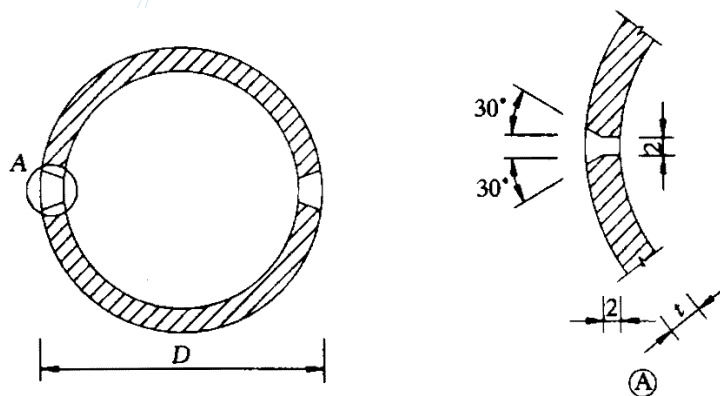


图 5.2.1-1 不加肋的空心球

空心球的钢材宜采用现行国家标准《碳素结构钢》GB 700 规定的 1235B 号钢或《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 规定的 Q345 钢。产品质量应符合现行行业标准《钢网架焊接球节点》JG 11 的规定。

5.2.2 当空心球直径为 120~900mm 时，其受压和受拉承载力设计值 N_R 可按下式计算：

$$N_R = (0.32 + 0.6 \frac{d}{D}) \eta_d \pi d f \quad (5.2.2-1)$$

式中 D ——空心球的外径 (mm)；

d ——与空心球相连的圆钢管杆件的外径 (mm)；

t ——空心球壁厚 (mm)；

f ——钢材的抗拉强度设计值 (N/mm²)；

η_d ——加肋承载力提高系数，受压空心球加肋采用 1.4，受拉空心球加肋采用 1.1。

对于单层网壳结构，空心球承受压弯或拉弯的承载力设计值 N_m 可按下式计算：

$$N_m = \eta_m N_R \quad (5.2.2-2)$$

式中 η_m ——考虑空心球受压弯或拉弯作用的影响系数，可采用 0.8。

5.2.3 为了可靠地传递杆件内力，以及使空心球能有效地布置所连接的圆钢管杆件，焊接空心球应满足以下构造要求：

1 单层网壳空心球外径与壁厚的比值应不大于 35；双层网壳空心球外径与壁厚的比值宜取 25~45；空心球壁厚与钢管最大壁厚的比值宜选用 1.5~2.0；空心球壁厚与连接钢管外径之比宜选用 2.4~3.0；空心球壁厚不宜小于 4mm。

2 无肋空心球和有肋空心球的成型对接焊缝，应分别满足图 5.2.1-1 和图 5.2.1-2 的要求。加肋空心球的肋板可用平台或凸台；采用凸台时，其高度不得大于 1mm。

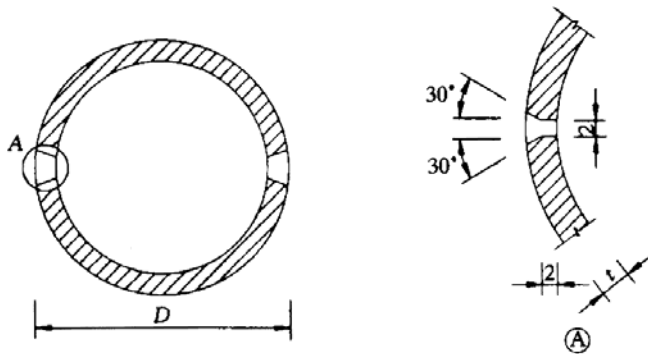


图 5.2.1-1 不加肋的空心球

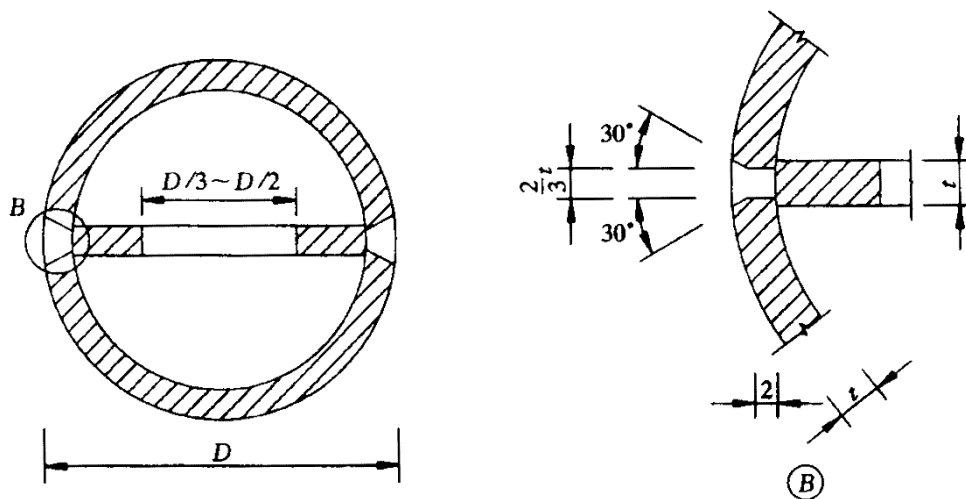


图 5.2.1-2 加肋的空心球

3 钢管杆件与空心球连接，钢管应开坡口。在钢管与空心球之间应留有一定缝隙予以焊透，以实现焊缝与钢管等强，否则应按角焊缝计算。为保证焊缝质量，钢管端头可加套管与空心球焊接（图 5.2.3）。

角焊缝的焊脚尺寸 h_f 应符合以下要求：当钢管壁厚 $t_c \leq 4\text{mm}$ 时， $h_f \leq 1.5t_c$ ；当钢管壁厚 $t_c > 4\text{mm}$ 时， $h_f < 1.2t_c$ 。

5.2.4 在确定空心球的外径时，球面上相邻杆件钢管间的净距不宜小于 10mm（图 5.2.4）。为了保证净距，空心球的最小直径可按下式计算：

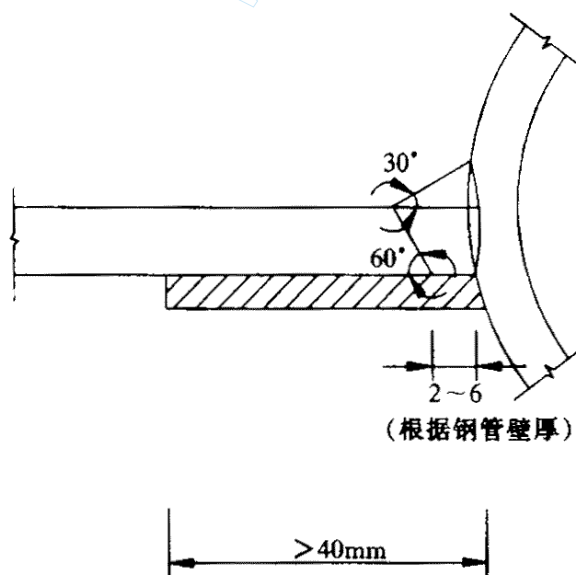


图 5.2.3 钢管加套管的连接

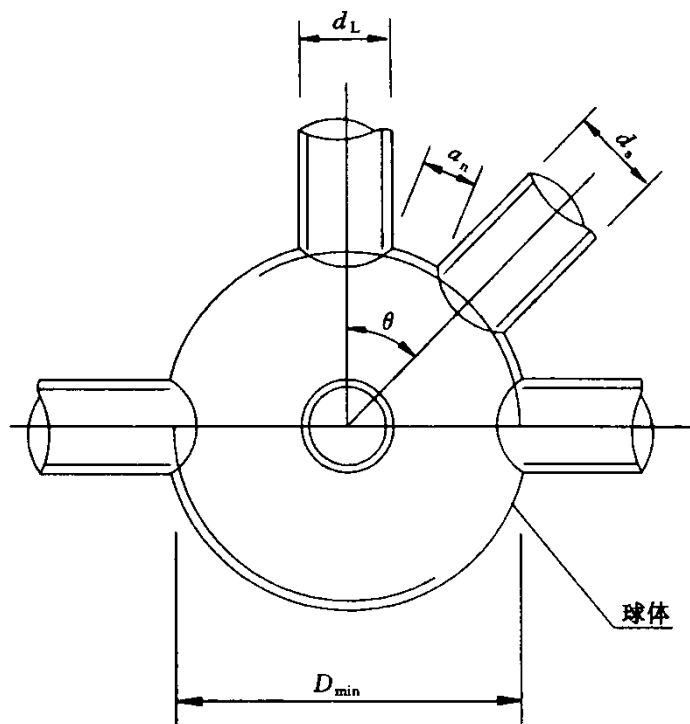


图 5.2.4 空心球相邻杆件钢管

$$D_{\min} = (d_1 + 2a_n + d_s) / \theta \quad (5.2.4)$$

式中 d_1 ——两相邻钢管的较大外径 (mm)；

d_s ——两相邻钢管的较小外径 (mm)；

a_n ——两相邻钢管间的净距，取 $a_n = 10\text{mm}$ ；

θ ——两相邻杆件轴线间的夹角 (弧度)。

5.2.5 当双层网壳节点汇交杆件较多时，容许部分杆件相贯连接，但应满足以下要求：

1) 汇交杆件的轴线必须通过球体中心线。

2) 相贯连接的两杆中，截面积大的主杆件必须全截面焊在球上（当两杆截面相等时，取拉杆为主杆件），另一杆件则坡口焊在主杆上，但必须保证有 3/4 截面焊在球上，并以加劲肋板补足削弱的面积。

5.2.6 当空心球外径 (D) 不小于 3mm 且杆件内力较大时，可在内力较大杆件的轴线平面内设加劲环肋，以提高其承载力，环肋的厚度不应小于球壁的厚度。

5.3 螺栓球节点

5.3.1 螺栓球节点应由高强度螺栓，钢球、螺钉（或销子）、套筒和锥头或封板等零件组成（图 5.3.1），适用于连接双层网壳的钢管杆件。

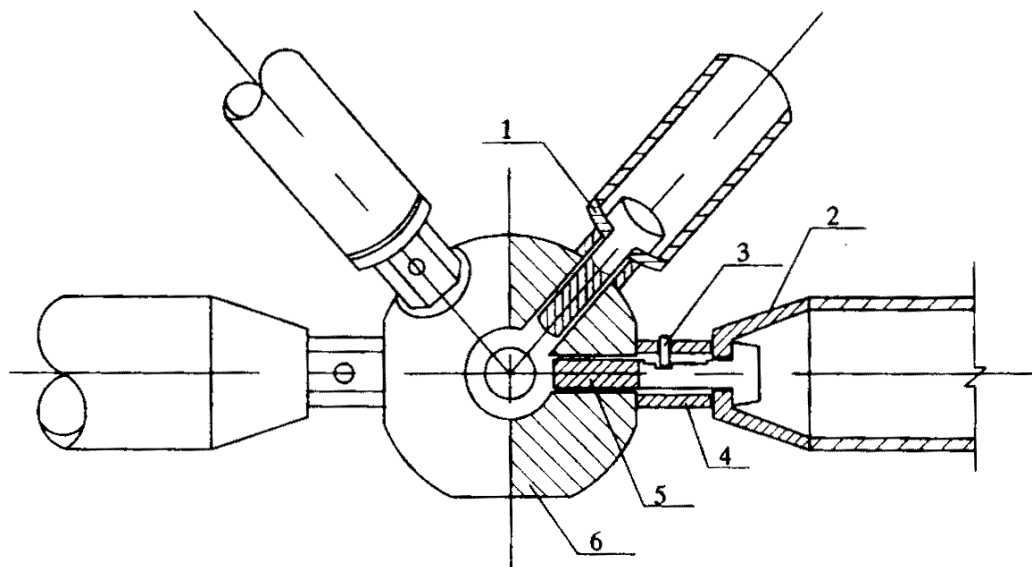


图 5.3.1 螺栓球节点

1—封板；2—锥头；3—销子；4—套筒；5—螺栓；6—钢球

5.3.2 用于制造螺栓球节点钢球、封板、锥头、套筒的材料可按表 5.3.2 的规定，并应符合相应标准的技术条件。产品质量应符合现行行业标准《钢网架螺栓球节点》JG 10 的规定。

表 5.3.2 螺栓球节点零件推荐材料

零件名称	推荐材料	材料标准编号	备注
钢球	45 号钢	优质碳素结构钢技术条件 (GB699)	
锥头或封板	Q235 钢	碳素结构钢 (GB700)	钢号宜与杆件一致
	Q345 钢	低合金高强度结构钢 (GB/T 1591)	
套筒	Q235 钢	GB700	套筒内孔径为 13~34mm
	Q345 钢	GB/T 1591	套筒内孔径为 37~65mm
	45 号钢	GB699	
高强度螺栓	20MnTiB, 40Cr, 35CrMo	合金结构钢技术条件 GB3077	螺纹规格 M12~M24
	35VB, 40Cr, 35CrMo		螺纹规格 M27~M36
	35CrMo, 40Cr		螺纹规格 M39~M64

5.3.3 钢球直径应根据相邻螺栓在球体内不相碰并满足套筒接触面的要求 (图 5.3.3) 分别按式 5.3.3-1、式 5.3.3-2 核算，并按计算结果中的较大者选用。

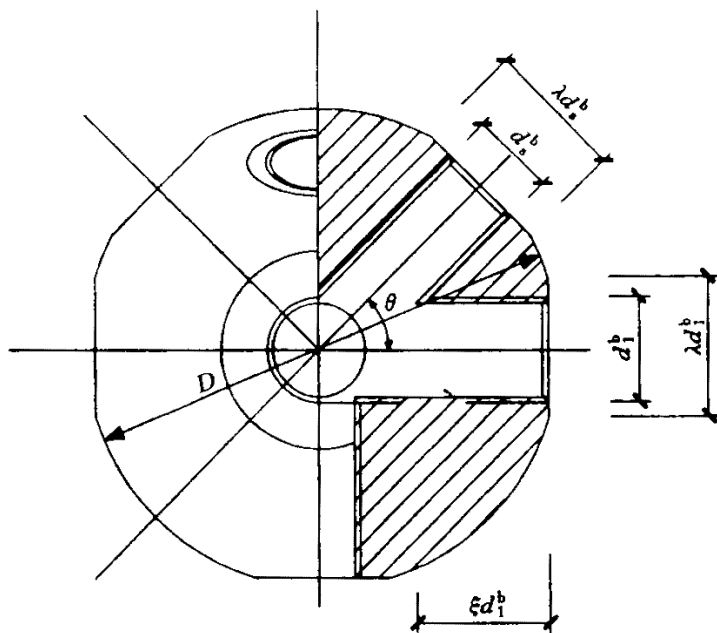


图 5.3.3 螺栓球与直径有关的尺寸

$$D \geq \sqrt{\left(\frac{d_s^b}{\sin \theta} + d_1^b \operatorname{ctg} \theta + 2\xi d_1^b\right)^2 + \lambda^2 d_1^{b^2}} \quad (5.3.3-1)$$

$$D \geq \sqrt{\left(\frac{\lambda d_s^b}{\sin \theta} + \lambda d_1^b \operatorname{ctg} \theta + \lambda^2 d_1^{b^2}\right)} \quad (5.3.3-2)$$

式中 D ——钢球直径 (mm)；

θ ——两相邻螺栓之间的最小夹角 (弧度)；

d_1^b ——两相邻螺栓的较大直径 (mm)；

d_s^b ——两相邻螺栓的较小直径 (mm)；

ξ ——螺栓拧入球体长度与螺栓直径的比值，可取为 1.1；

λ ——套筒外接圆直径与螺栓直径的比值，可取为 1.8。当相邻杆件夹角 θ 较小时，尚应根据相邻杆件及相关封板、锥头、套筒等零部件不相碰的要求核算螺栓球直径。此时可通过检查可能相碰点至球心的连线与相邻杆件轴线间的夹角之和不大于 θ 的条件进行核算。

5.3.4 高强度螺栓的性能等级应按螺纹规格分别选用。对于 M12~M36 的高强度螺栓，其强度等级为 10.9S；对于 M39~M64 的高强度螺栓，其强度等级为 9.8S。螺栓的形式与尺寸应符合现行国家标准《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》GB/T 16939 的要求。

高强度螺栓的直径应由杆件内力控制。每个高强度螺栓的受拉承载力设计值 N_b^t

就按下式计算：

$$N_b^t = A_{eff} f_t^b \quad (5.3.4)$$

式中 f_t^b ——高强度螺栓经热处理后的受拉强度设计值，对 10.9S，取 430N/mm²；对 9.8S，取 385N/mm²；

A_{eff} ——高强度螺栓的有效截面面积，可按表 5.3.4 选取。当螺栓上钻有键槽或钻孔时， A_{eff} 值取螺栓处或键槽、钻孔处二者中的较小值。

表 5.3.4 常用螺栓栓在螺纹处的有效截面面积 A_{eff} 及承载力设计值 N_b^t

性能等级	10.9S										
螺纹规格 d	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36
螺距 p (mm)	1.75	2	2	2.5	2.5	2.5	3	3	3.5	3.5	4
A_{eff} (mm)	84.3	115	157	192	245	303	353	459	561	694	817
N_b^t (kN)	36.2	49.5	67.5	82.7	105	130.5	151.5	197.5	241.0	298	351
性能等级	9.8S										
螺纹规格 d	M39	M42	M45	M48	M52	M56×4	M60×4	M64×4			
螺距 p (mm)	4	4.5	4.5	5	5	4	4	4			
A_{eff} (mm)	967	1121	1306	1473	1758	2144	2485	2851			

N'_b (kN)	375.6	431.5	502.8	567.1	676.7	825.4	956.6	1097.6
----------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

注：螺栓在螺纹处的有效截面面积 $A_{eff} = \pi(d - 0.9382p)^2 / 4$

5.3.5 受压杆件的连接螺栓直径，可按其设计内力绝对值求得螺栓直径计算值后，按表 5.3.4 的螺栓直径系列减少 1~3 个级差，但必须保证套筒任何截面均具有足够的抗压强度。

5.3.6 套筒（六角形无纹螺母）外形尺寸应符合搬手开口系列，端部要求平整，内孔径可比螺栓直径大 1mm。套筒应根据网壳相应杆件的最大轴向承载力按压杆进行计算，并验算其端部有效截面的局部承压力。

对于开设滑槽的套筒尚需验算套筒端部到滑槽端部的距离，应使该处有效截面的抗剪力不低于销钉的抗剪力，且不小于 1.5 倍滑槽宽度。

套筒长度 l_s (mm) 可按下列公式计算（图 5.3.6）：

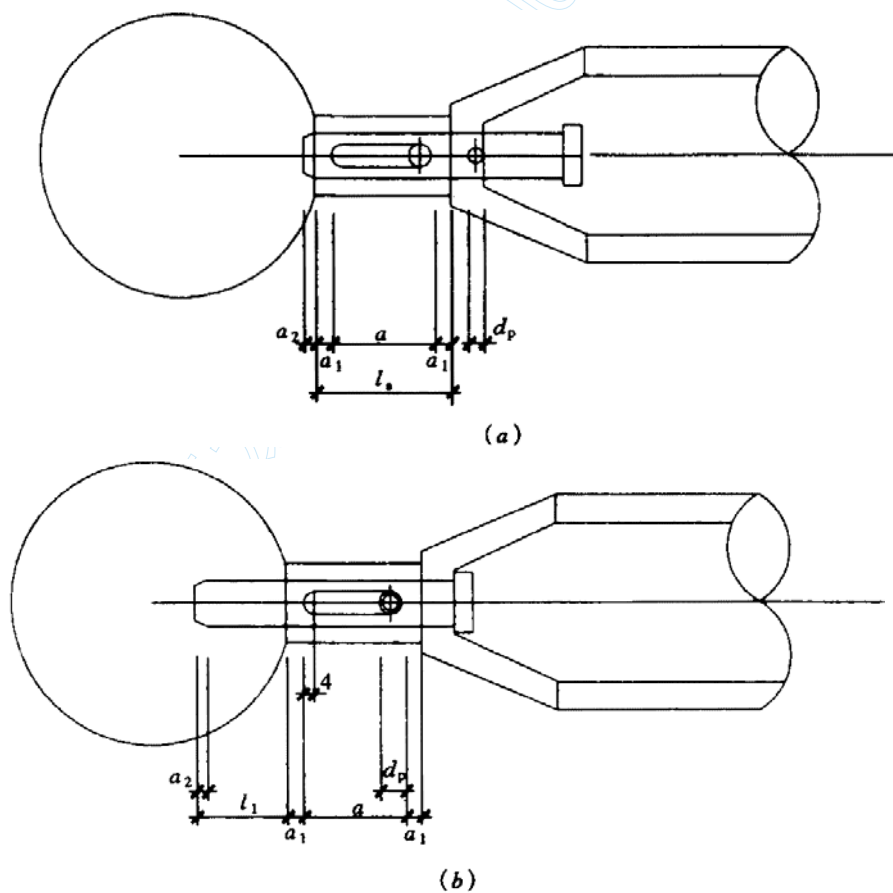


图 5.3.6 计算套筒长度的尺寸
(a) 拧入前；(b) 拧入后

$$l_s = a + 2a_1 \quad (5.3.6-1)$$

$$a = l_1 - a_2 + d_p + 4mm \quad (5.3.6-2)$$

式中 a_1 ——套筒端部到滑槽的距离 (mm) ;

l_1 ——螺栓伸入钢球的长度 (mm) ;

a_2 ——螺栓露出套筒距离, 可预留 4~5mm, 但不应少于 2 个丝扣;

d_p ——销子直径 (mm) 。

5.3.7 网壳杆件端部应采用锥头 (图 5.3.7-a) 或封板连接 (图 5.3.7-b), 其连接焊缝以及锥头的任何截面必须与连接的钢管等强, 焊缝底部宽度 b 可根据连接钢管壁厚取 2~5mm。封板厚度应按实际受力大小计算决定, 且不宜小于钢管外径的 1/5。锥头底板厚度不宜小于锥头底部内径的 1/4。封板及锥头底部厚度可按表 5.3.7 采用。

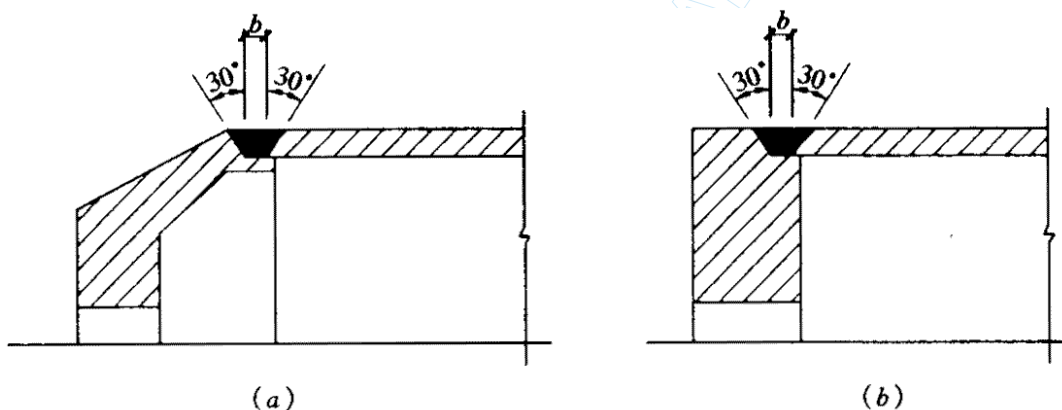


图 5.3.7 杆件端部连接焊缝

锥头底板外径应较套筒外接圆直径或螺栓头直径大 1~2mm, 锥头底板孔径宜大于螺栓直径 1mm。锥头倾角宜取 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。

表 5.3.7 封板及锥头底部厚度

螺纹规格	封板/锥底厚度 (mm)	螺纹规格	锥底厚度 (mm)
M12、M14	14	M36~M42	35
M16	16	M45~M52	38
M20~M24	18	M56~M60	45
M27~M33	23	M64	48

5.3.8 销子或螺钉宜采用高强度钢材, 其直径可取螺栓直径的 0.16~0.18 倍, 且不宜小于 3mm。螺钉直径可采用 M5~M10。

5.4 嵌入式毂节点

5.4.1 嵌入式毂节点应由柱状毂体、杆端嵌入件、盖板、中心螺栓、平垫圈、弹簧垫圈等零件组成（图 5.4.1），适用于跨度不大于 50m 的单层球面网壳以及跨度不大于 25m 的圆柱面网壳。

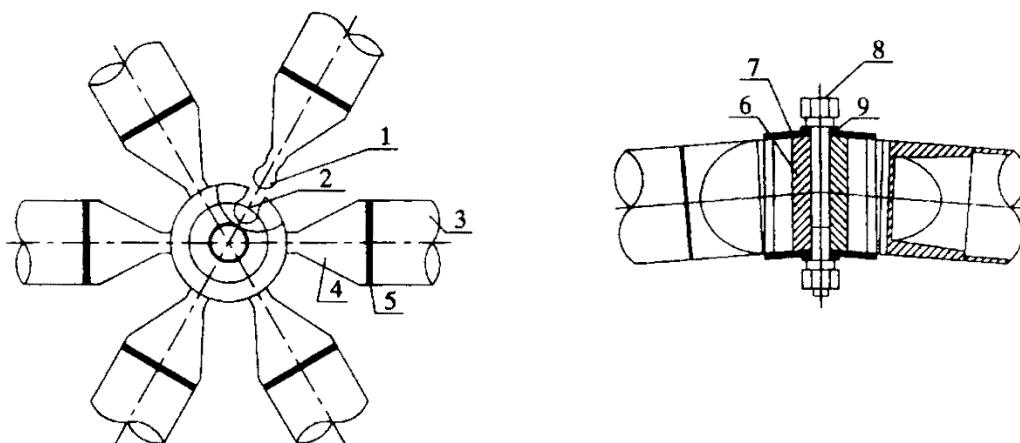


图 5.4.1 嵌入式毂节点

1—嵌入件嵌入槽；2—毂体嵌入槽；3—杆件；4—杆端嵌入件；5—连接焊缝；
6—毂体；7—压盖；8—中心螺栓；9—平垫圈及弹簧垫圈

5.4.2 用于制造嵌入式毂节点的毂体、杆端嵌入件、压盖、中心螺栓的材料可按表 5.4.2 的规定，并应符合相应标准的技术条件。产品质量应符合现行行业标准《单层网壳嵌入式毂节点》JG/T136 的规定。

表 5.4.2 嵌入式毂节点零件推荐材料

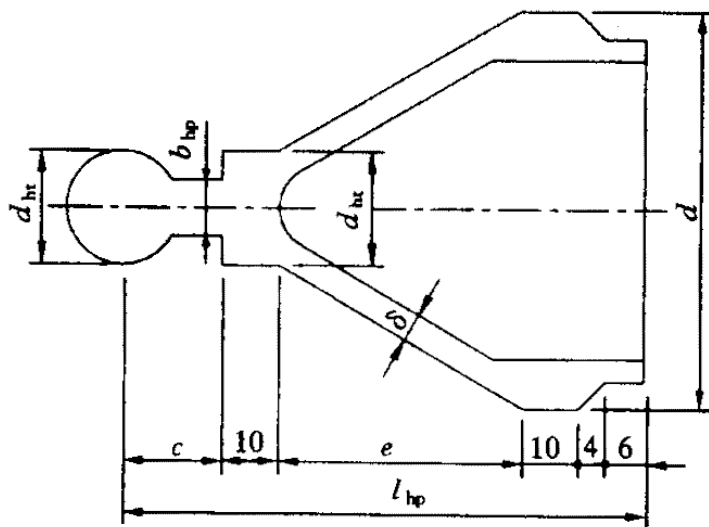
零件名称	推荐材料	材料标准编号	备注
毂体	Q235 钢	炭素结构钢 (GB/T 700)	毂体直径宜采用 100~165mm
压盖			
中心螺栓			
杆端嵌入件	ZG230—450	一般工程用铸造碳钢 (GB/T 7659)	精密铸造

5.4.3 毂体的嵌入槽以及与其配合的嵌入槽可做成小圆柱状（图 5.4.3-1a）、（图 5.4.3-1b）。嵌入槽的中线与相应嵌入件（杆件）轴线的垂线之间的夹角 φ 即杆端嵌入件倾角（图 5.4.3-1b）可分别按公式（5.4.3-1）及（5.4.3-2）求得。

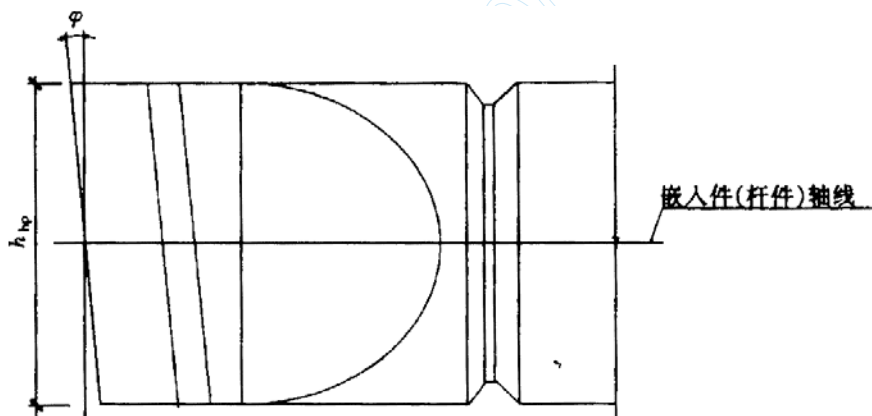
对于球面网壳杆件及单向斜杆和交叉斜杆正交正放网格的圆柱面网壳（图 3.0.3-1a、b）的环向杆件：

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{l}{2r}\right) \quad (5.4.3-1)$$

对于圆柱面网壳的斜杆：



(a)



(b)

图 5.4.3-1 嵌入件的主要尺寸

注：δ—杆端嵌入件平面部分壁厚，不宜小于 5mm。

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{2r \sin^2 \frac{\beta}{2}}{\sqrt{4r^2 \sin^2 \frac{\beta}{2} + \frac{l_b^2}{4}}}\right) \quad (5.4.3-2)$$

式中 r ——球面或圆柱面曲率半径；

l ——球面网壳杆件、圆柱面网壳环向杆件几何长度；

β ——圆柱面网壳相邻两母线所对应的中心角（图 5.4.3-2c）；

l_b ——斜杆所对应的三角形网格底边几何长度；对于单向斜杆及交叉斜杆正交正放网格（图 3.0.3-1a、b）按图 5.4.3-2a 取用；对于联方网格及三向网格（图 3.0.3-1c、d）按图 5.4.3-2b 取用。

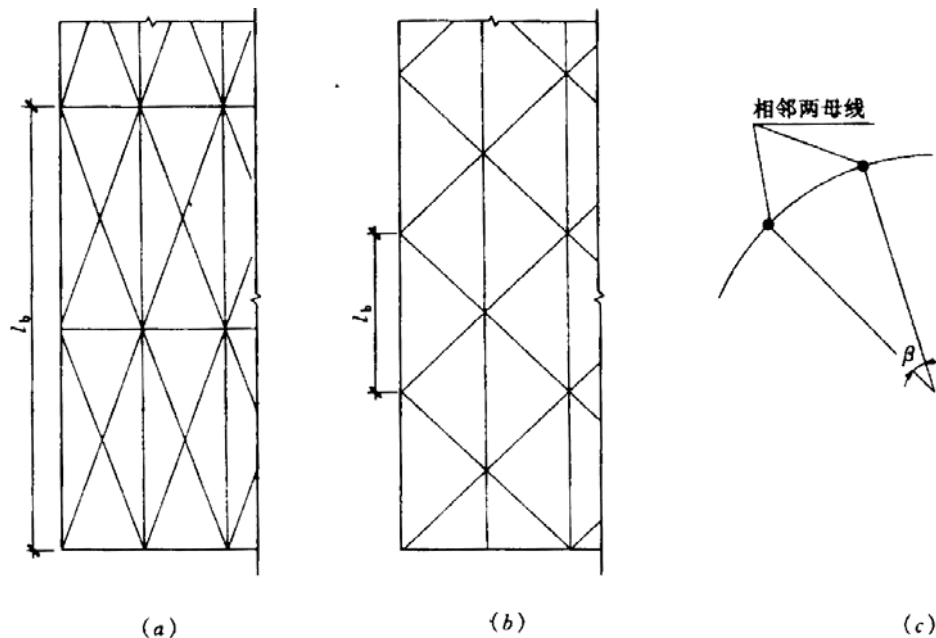


图 5.4.3-2 圆柱面网壳的网格尺寸与角度

5.4.4 嵌入件几何尺寸（图 5.4.3-1b）应按下列计算方法及构造要求进行设计。当杆件为圆管时，颈部宽度 b_{hp} 应按与杆件等强度原则计算，嵌入件高度 h_{hp} 等于圆管外径 d 时， $b_{hp} \geq 3t_c$ (t_c 为圆管壁厚)；嵌入槽直径 d_{ht} 可取 $1.7b_{hp}$ 且不小于 16mm，尺寸可根据嵌入槽直径 d_{ht} 及嵌入槽尺寸计算。 l_{hp} 为嵌入件总长度； e 按公式 (5.4.4) 求得。

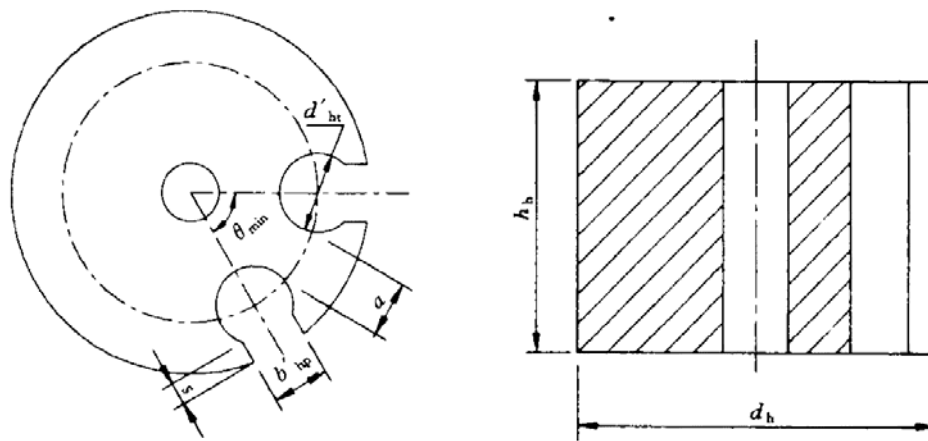
$$e = \frac{1}{2}(d - d_{ht}) \text{ctg} 30^\circ \quad (5.4.4)$$

嵌入件颈部宽度 b_{hp} 及高度 h_{hp} 尚应按拉弯或压弯构件验算其强度。

5.4.5 杆件与杆端嵌入件可采用焊接连接，焊接方式可参照 5.3.7 条钢管与锥头的连接。焊缝强度应与所连接的钢管杆件等强。焊缝宽度可根据所连接的钢管壁厚取 2~5mm（图 5.3.7a）。

5.4.6 壳体各嵌入槽轴线间夹角 θ 应采用汇交于该节点各杆件轴线间的夹角在通过该节点中心切平面上的投影。其他各主要尺寸（图 5.4.6）按如下规定确定。

壳体直径 d_h 分别按式 (5.4.6-1)、(5.4.6-2) 计算，并按计算结果中的较大者选用。



(a) 图 5.4.6 壳体各主要尺寸 (b)

$$d_h = \frac{(2a + d'_{ht})}{\theta_{min}} + d'_{ht} + 2s \quad (5.4.6-1)$$

$$d_h = 2\left(\frac{d + 10}{\theta_{min}} + c - l_{hp}\right) \quad (5.4.6-2)$$

式中 a ——两嵌入槽间最小间隙，可取为第 5.4.4 条中的 b_{hp} ；

d'_{ht} ——按嵌入榫直径 d_{ht} 加上配合间隙；

θ_{min} ——壳体嵌入槽轴线间最小夹角（弧度）；

s ——按截面面积 $2h_{h,s}$ 的抗剪强度与杆件截面抗拉强度等强原则求得。

槽口宽度 b'_{hp} 等于嵌入件颈部宽度 b_{hp} 加上配合间隙；壳体高度 h_h 等于嵌入件高度（管径）加 4mm。

5.4.7 中心螺栓直径宜采用 16~18mm，压盖厚度不宜小于 4mm。

5.5 支座节点

5.5.1 支座节点应采用传力可靠、连接简单的构造形式，并应符合计算假定。

5.5.2 网壳支座节点可根据计算假定选用固定铰支座、弹性支座、刚性支座以及可以沿指定方向产生线位移的滚轴铰支座。

5.5.3 固定铰支座（图 5.5.3）适用于仅要求传递轴向力与剪力的单层或双层网壳的支座节点。对于大跨度或点支承网壳可采用球铰支座（图 5.5.3a）；对于较小跨度的网壳

结构可采用弧形铰支座（图 5.5.3b）；对于较大跨度、落地的网壳结构可采用双向弧形铰支座（图 5.5.3c）或双向板式橡胶支座（图 5.5.3d）。

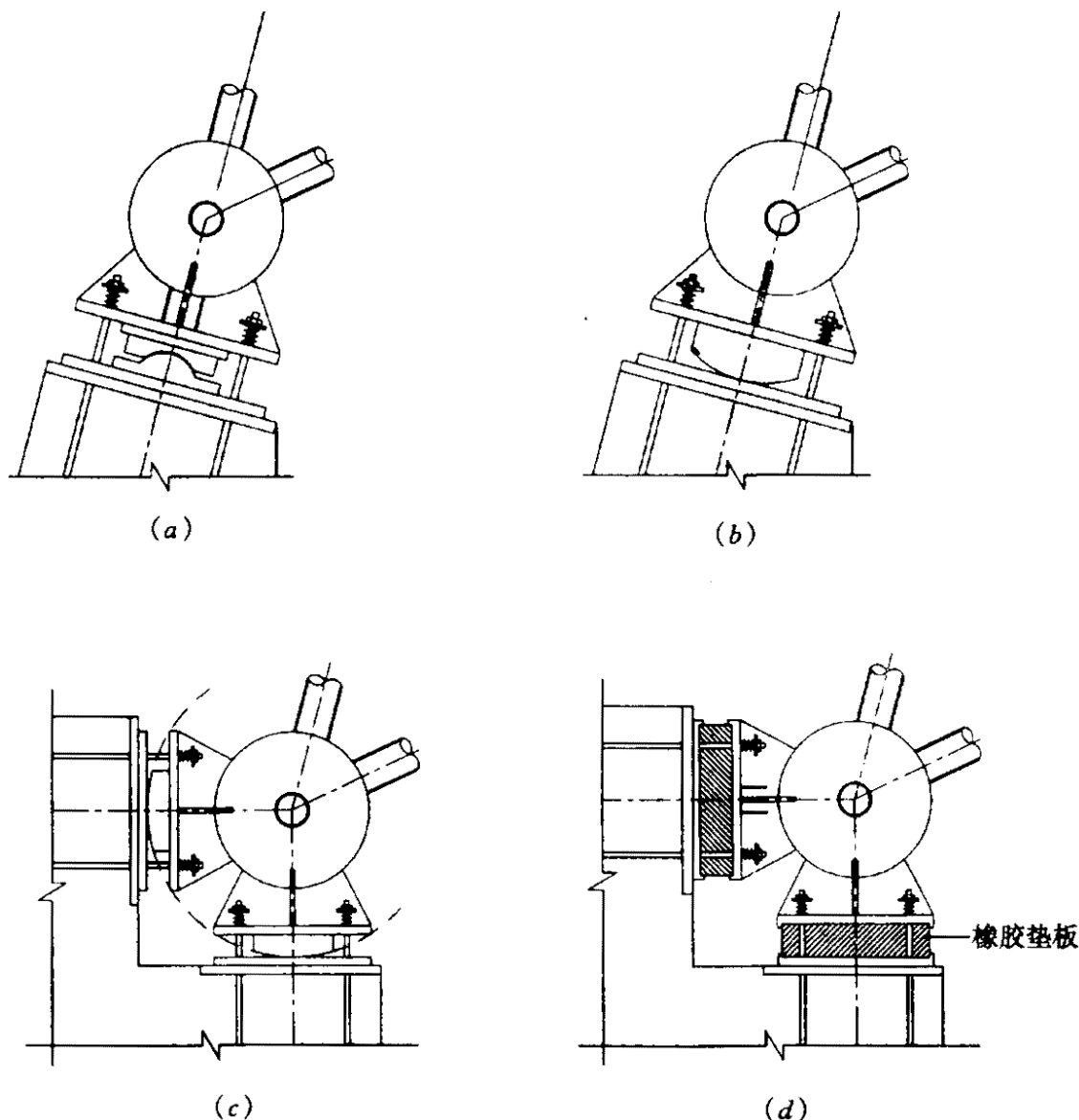


图 5.5.3 固定铰支座

(a)球铰支座；(b)弧形铰支座；(c)双向弧形铰支座；(d)双向板式橡胶支座

5.5.4 弹性支座（图 5.5.4）可用于节点需在水平方向产生一定弹性变位且能转动的网壳支座节点。

5.5.5 刚性支座（图 5.5.5）可用于既能传递轴向力又要求传递弯矩和剪力的网壳支座节点。

5.5.6 滚轴支座（图 5.5.6a、b）可用于能产生一定水平线位移的网壳支座节点。

5.5.7 支座十字节点板竖向中心线应与支座竖向反力作用线一致，并与节点连接杆件中心线汇交于支座球节点中心。

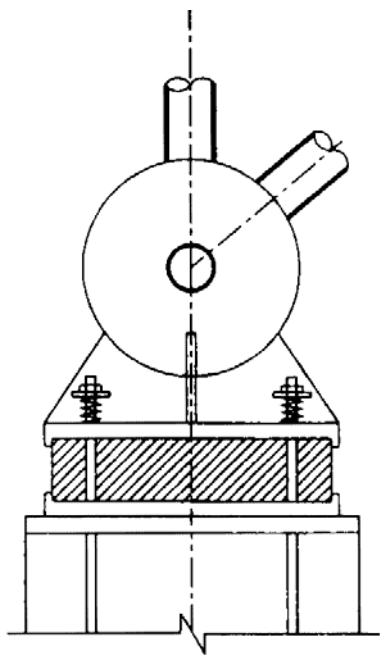


图 5.5.4 弹性支座

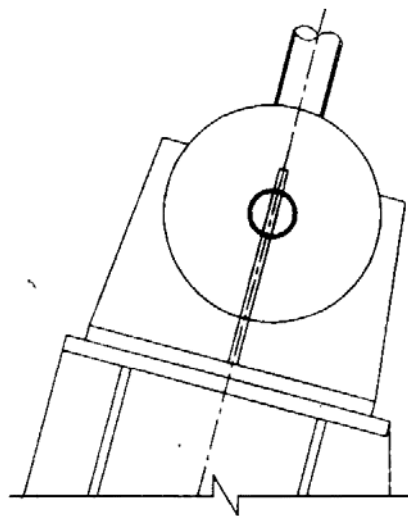


图 5.5.5 刚性支座

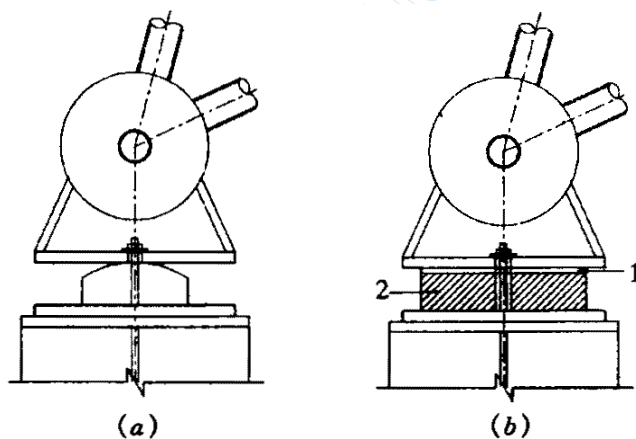


图 5.5.6 滚轴支座

(a) 平板弧形铰支座; (b) 橡胶垫板滑动支座

1—不锈钢板或聚四氟乙烯板; 2—橡胶垫板

支座球节点底部至支座底板间的距离宜尽量减少, 其构造高度视支座节点球径大小可取 100~250mm, 并应考虑网壳边缘杆件与支座节点竖向中心线间的交角, 防止斜杆与支承柱边相碰。支座十字节点板厚度应保证其自由边不发生侧向屈曲, 不宜小于 10mm。对于拉力支座节点, 支座十字节点板的最小截面面积及相关连接焊缝必须满足强度要求。

支座节点底板的净面积应满足支承结构材料的局部受压要求, 其厚度应满足底板在支承竖向反力作用下的抗弯要求, 不宜小于 12mm。

支座节点锚栓按构造设置时其直径可取 20~25mm，数量取 2~4 个。对于拉力锚栓其直径应经计算确定，锚固长度不应小于 35 倍锚栓直径，并应设置双螺母。

6 制作与安装

6.1 一般规定

6.1.1 网壳结构工程所采用的钢材，应具有质量证明书，并应符合设计的要求，在质量有疑义时，应按国家现行有关标准的规定进行抽样检验。

6.1.2 网壳制作安装、验收及土建施工放线使用的钢尺必须统一，且经过计量检验合格。使用时丈量拉力一致，当跨度较大时应按气温情况考虑温度修正。

6.1.3 焊接工作宜在工厂（预制厂）或施工现场地面进行，以减少高空工作量。焊工应经过考试并取得合格证，并经过相应项目的焊接工艺考核合格后方可参加施工。

6.1.4 网壳安装前，应根据定位轴线和标高基准点复核和验收土建施工单位设置的网壳支座预埋件或预埋螺栓的平面位置和标高。支承面的实际施工偏差应满足现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的要求。

6.1.5 网壳的安装方法，应根据网壳的类型、受力和构造特点，在满足质量、安全、进度和经济效益的前提下，结合当地的施工技术条件综合确定。

网壳的安装方法及适用范围应符合下列规定：

1 高空散装法适用于采用全支架拼装的各种类型的网壳，并可根据结构特点选用移动或滑动支架拼装及少支架的悬挑拼装的施工方法。

2 分条或分块安装法适用于分割后刚度和受力状况改变较小的网壳。分条或分块的大小应根据起重能力而定。

3 滑移法适用于两边平行的网壳，在现场狭窄、运输不便的情况下，尤为适用。滑移时滑移单元应保证成为几何不变体系。

4 综合安装法适用于大跨度球面网壳以及中间高外圈低的双曲面网壳。

6.1.6 安装方法选定后，应分别对网壳施工阶段的吊点反力、竖向位移、杆件内力、提升或顶升时支承柱的稳定性和风载下网壳的水平推力等项进行验算，必要时应采取临时加固措施，并应在确保结构体系安全的情况下分阶段撤除。

6.1.7 在安装前宜进行局部或整体试拼装，当确有把握时方可进行正式安装。

6.1.8 网壳结构在进行涂装或喷涂前，必须对构件表面进行处理，清除毛刺、焊渣、铁锈。经处理的表面应达到涂装或喷涂所需要的相应质量标准。

6.1.9 屋面板安装宜在网壳结构整体安装完毕后进行。

6.2 制作与安装要求

6.2.1 网壳结构构件应在专门的胎具上制作，以保证杆件和节点的精度及互换性。

6.2.2 网壳结构制作与安装中的对接焊缝应符合现行行业标准《焊接球节点钢网架焊缝超声波探伤及质量分级法》JG/T 3034.1 以及《螺栓球节点钢网架焊缝超声波探伤及质量分级法》JG/T 3034.2 规定的 B 级质量等级和 A 级检验等级的要求。其他焊缝按 B 级质量等级和 A 级检验等级的要求。

对接焊缝可放在受压杆件及压弯杆件。采用对接时，焊缝均应进行无损探伤检验，且每根杆件只允许有一条对接焊缝。对接杆件总数不应超过杆件总数的 20%，并不得集中布置。

6.2.3 网壳结构节点制作的偏差应符合下列规定：

1 焊接球节点的半圆球，宜用机床坡口。焊接后的成品球表面应光滑平整，不应有局部凸起或折皱。焊接球直径的容许偏差：当球直径小于等于 300mm 时应为 $\pm 1.5\text{mm}$ ；球直径大于 300mm 时应为 $\pm 2.5\text{mm}$ ；圆度的容许偏差：当球直径小于等于 300mm 时应为 $\pm 1.5\text{mm}$ ；球直径大于 300mm 时为 $\pm 2.5\text{mm}$ ；设计壁厚减薄量不应大于 13%，且当球直径小于等于 500mm 时不得超过 1.5mm，当球直径大于 500mm 时不得超过 3mm；对口错边量容许偏差不应大于 1mm。

2 螺栓球节点不得有裂纹。螺纹应按 6H 级精度加工，并符合现行国家标准《普通螺纹公差与配合》GB197 的规定。球中心至螺孔端面距离偏差应为 $\pm 0.20\text{mm}$ ，螺栓球螺孔角度容许偏差应为 $\pm 20^\circ$ 。

3 嵌入式榫节点杆端嵌入件与榫体槽口相配合部分的制造精度应满足 0.1~0.3mm 间隙配合的要求。杆端嵌入件倾角 φ 制造中以 0.5° 分类，与杆件组焊时，在专用胎具上微调，其调整后的偏差应为 $\pm 0.3\text{mm}$ 在榫体加工中，嵌入槽圆孔对分布圆中心线的平行度容许偏差应为 0.3mm。分布圆直径容许偏差应为 $\pm 0.3\text{mm}$ 。直槽部分对圆孔平行度容许偏差应为 0.2mm。榫体嵌入槽间夹角的容许偏差应为 $\pm 0.3^\circ$ 。榫体端面对嵌入槽分布圆中心线的端面跳动容许偏差应为 0.3mm，端面间平行度容许偏差应为 0.5mm。

6.2.4 钢管杆件宜用机床下料。杆件长度应预加焊接收缩量，其值可通过试验确定。杆件制作长度的容许偏差应为 $\pm 1\text{mm}$ 。采用螺栓球节点连接的杆件其长度包括锥头或封板。采用嵌入式榫节点连接的杆件，其长度应包括杆端嵌入件。

6.2.5 网壳应在专门的拼装模架上进行小拼，以保证小拼单元的形状及尺寸的准确性。小拼单元的容许偏差应符合下列规定：

1 小拼单元为网格单元时，节点中心距容许偏移为 2mm ；

2 小拼单元为单锥体时，弦杆长、锥体高为 $\pm 2\text{mm}$ ；上弦对角线长度 $\pm 3\text{mm}$ ；下弦节点中心偏移为 2mm ；

3 小拼单元为平面桁架时，尺寸容许偏差应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205的有关规定。

焊接球节点与钢管中心容许偏移为 1mm 。

6.2.6 分条或分块的网壳单元长度不大于 20m 时，拼接边长度容许偏差应为 $\pm 10\text{mm}$ ；当条或块的长度大于 20m 时，拼接边长度容许偏差应为 $\pm 20\text{mm}$ 。高空总拼可采用预拼装或其他保证精度的措施。

6.2.7 网壳结构在总拼前应精确放线，放线的容许偏差分别为边长及对角线长的 $1/10000$ 。

总拼所用的支承点应防止下沉。

总拼时应选择合理的焊接工艺顺序，以减少焊接变形和焊接应力。拼装与焊接顺序为从中间向两端或四周发展。

总拼完成后应检查网壳曲面形状的安装偏差，其容许偏差不应大于跨度的 $1/1500$ 或 40mm 。

6.2.8 焊接节点网壳所有焊接均须进行外观检查，并作记录。拉杆与球的对接焊缝应作无损探伤检验，其抽样数不少于焊口总数的 20% ，取样部位由设计单位与施工单位协商确定。

6.2.9 网壳用高强度螺栓连接时，按有关规定拧紧螺栓后，应用油腻子将所有接缝处填嵌严密，并按钢结构防腐蚀要求进行处理。

6.3 高空散装法

6.3.1 采用小拼单元或杆件直接在高空拼装时，其顺序应能保证拼装精度，减少积累误差。悬挑法施工时，应先拼成可承受自重的结构体系，然后逐步扩展。

网壳在拼装过程中应随时检查基准轴线位置、标高及垂直偏差，并应及时纠正。

6.3.2 搭设拼装支架时，支架上支撑点的位置应设在节点处。

支架应验算其承载力和稳定性，必要时可进行试压，以确保安全可靠。

支架支座下应采取措施，防止支座下沉。

6.3.3 在拆除支架过程中应防止个别支撑点集中受力，宜根据各支撑点的结构自重挠度值，采用分区分阶段按比例下降或用每步不大于 10mm 的等步下降法拆除支撑点。

6.4 分条或分块安装法

6.4.1 将网壳分成条状单元或块状单元在高空连成整体时，网壳单元应具有足够刚度并保证自身的几何不变性，否则应采取临时加固措施。

6.4.2 为保证网壳顺利拼装，在条与条或块与块合拢处，可采用安装螺栓等措施。设置独立的支撑点或拼装支架时，应符合本规程 6.3.2 的规定。合拢时可用千斤顶将网壳单元顶到设计标高，然后连接。

6.4.3 网壳单元宜减少中间运输。如需运输时，应采取措施防止变形。

6.5 滑移法

6.5.1 滑移可采用下列两种方法：

- 1 单条滑移法分条的网壳单元在事先设置的滑轨上单条滑移到设计位置拼接；
- 2 逐条积累滑移法分条的网壳单元在滑轨上逐条积累拼接后滑移到设计位置。

滑移法可利用已建结构物作为拼装平台。如无建筑物可利用，可在滑移时开始端设置宽度约大于两个节间的拼装平台。

有条件时，可以在地面拼成条状或块状单元吊至拼装平台上进行拼装。

6.5.2 滑轨的构造应能抵抗网壳支座的水平推力。滑轨可固定于钢筋混凝土梁顶面的预埋件上，轨面标高应高于或等于网壳支座设计标高。摩擦表面应涂润滑油。

6.5.3 当网壳跨度较大时，宜在跨中增设滑轨，滑轨下的支撑架应符合本规程 6.3.2 的规定。当网壳滑移单元由于增设中间滑轨引起杆件内力变号时，应采取临时加固措施以防失稳。

6.5.4 当设置水平导向轮时，宜设在滑轨的内侧，导向轮与滑道的间隙应在 10~2mm 之间。

6.5.5 网壳滑移可用卷扬机或手扳葫芦牵引。根据牵引力大小及网壳支座之间的系杆承载力，可采用一点或多点牵引。牵引速度不宜大于 1.0m/min。当网壳滑移时，两端不同步值不应大于 50mm。

6.5.6 在滑移和拼装过程中，应根据滑移方案对网壳的杆件内力、节点变位及支座反力进行验算。

6.6 综合安装法

6.6.1 采用综合安装法应将网壳划分为若干个环带，外围部分以小拼单元或杆件逐圈由外向内在空中拼装，中心部分在地面拼装后可采用整体吊装就位，最后在高空将外围部分与中心部分连接成整体。

6.6.2 网壳中心部分与外围部分安装区段的划分可根据起吊能力和现场条件确定中心部分的大小。网壳中心部分可取跨度的 $1/2 \sim 1/30$ 。

中心部分的尺寸确定后，可将剩余的外围部分根据吊装高度和吊车起吊能力划分为若干个环带，每个环带应为网壳径向网格的倍数。在吊装能力容许的条件下，应采取大尺寸的小拼单元以减少高空拼装工作量。

6.6.3 在中心部分网壳整体吊装时，应保证各吊点起升的同步性。相邻两吊点间相对高差容许值可取吊点间距离的 $1/400$ ，且不宜大于 100mm，或通过验算确定。

中心部分起吊到位后，应采取临时措施加以固定，然后进行与外围部分的拼接。

6.7 验收

6.7.1 网壳结构的制作、拼装和安装的每道工序均应进行检查。

凡未经检查，不得进行下一工序的施工。安装完成后必须进行交工检查验收。

焊接球、螺栓球、杆件、高强度螺栓、柱状壳体、杆端嵌入件等均应有出厂合格证及检验记录。

6.7.2 交工验收时，应检查网壳的若干控制支承点间的距离偏差和高度偏差。控制支承点间的距离偏差容许值应为该两点间距离的 $1/2000$ ，且不应大于 30mm。高度偏差，当跨度小于或等于 60m 时不得超过设计标高 ± 20 mm，当跨度大于 60m 时不得超过设计标高 ± 30 mm。

6.7.3 安装完成后，应测量网壳若干控制点的竖向位移，所测得的竖向位移值应不大于相应荷载作用下设计值的 1.15 倍。

竖向坐标观测点的位置应能反映结构性能与变形规律，由设计与施工单位根据变形计算结果协商确定。

6.7.4 网壳工程验收应具备下列文件：网壳施工图、竣工图、设计变更文件、施工组织设计、所用钢材及其他材料的质量证明书和试验报告，网壳的零部件产品合格证书和试验报告、网壳拼装备工序的验收记录、焊工考核合格证明、焊缝质量检验资料、总拼就位后几何尺寸误差和竖向位移值记录。

筑龙网 WWW.SINOAEC.COM

附录 A 网壳等效刚度计算公式

A. 0. 1 网壳的各种常用网格形式可分为以下三种类型，其等效薄膜刚度 B_e 和等效抗弯刚度 D_e 可按不同类型所提出公式进行计算。

1 扇形三向网格球面网壳主肋处的网格（方向 1 代表径向）或其他各类网壳中的单斜杆正交网格（图 A. 0. 1a）

$$\left. \begin{aligned} B_{e11} &= \frac{EA_1}{s_1} + \frac{EA_c}{s_c} \sin^4 \alpha \\ B_{e22} &= \frac{EA_2}{s_2} + \frac{EA_c}{s_c} \cos^4 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 0. 1-1})$$

$$\left. \begin{aligned} D_{e11} &= \frac{EI_1}{s_1} + \frac{EI_c}{s_c} \sin^4 \alpha \\ D_{e22} &= \frac{EI_2}{s_2} + \frac{EI_c}{s_c} \cos^4 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 0. 1-2})$$

2 各类网壳中的单斜杆或交叉斜杆（带虚线）正交网格（图 A. 0. 1b）

当为单斜杆时，采用公式 A. 0. 1-1 及 A. 0. 1-2；

当为双斜杆时：

$$\left. \begin{aligned} B_{e11} &= \frac{EA_1}{s_1} + 2 \frac{EA_c}{s_c} \sin^4 \alpha \\ B_{e22} &= \frac{EA_2}{s_2} + 2 \frac{EA_c}{s_c} \cos^4 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 0. 1-3})$$

$$\left. \begin{aligned} D_{e11} &= \frac{EI_1}{s_1} + 2 \frac{EI_c}{s_c} \sin^4 \alpha \\ D_{e22} &= \frac{EI_2}{s_2} + 2 \frac{EI_c}{s_c} \cos^4 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 0. 1-4})$$

3 圆柱面网壳的三向网格（方向 1 代表纵向）或椭圆抛物面网壳的三向网格（图 A. 0. 1c）

$$\left. \begin{aligned} B_{e11} &= \frac{EA_1}{s_1} + 2 \frac{EA_c}{s_c} \sin^4 \alpha \\ B_{e22} &= 2 \frac{EA_c}{s_c} \cos^4 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 0. 1-5})$$

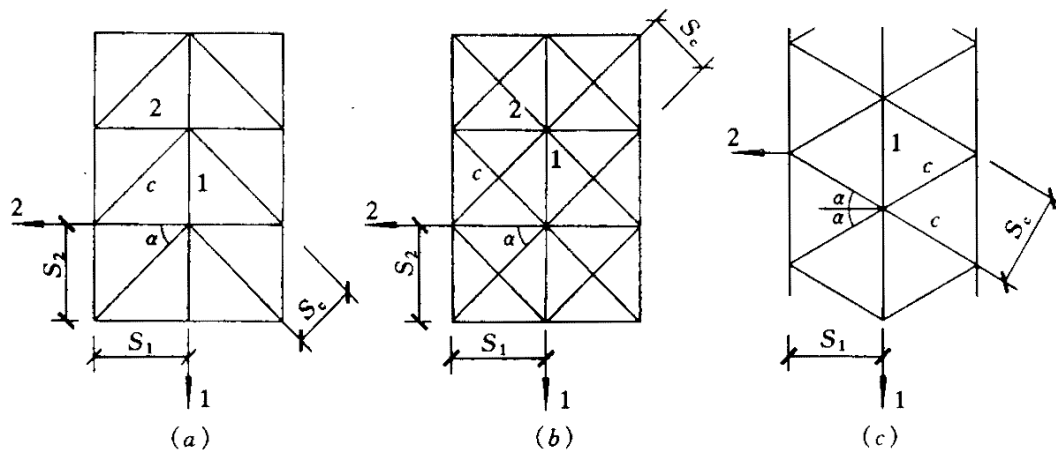


图 A.0.1 网壳常用网格形式

$$\left. \begin{aligned} D_{e11} &= \frac{EI_1}{s_1} + 2 \frac{EI_c}{s_c} \sin^4 \alpha \\ D_{e22} &= 2 \frac{EI_c}{s_c} \cos^4 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 0. 1-6})$$

式中 B_{e11} ——沿 1 方向的等效薄膜刚度，当为圆球面网壳时方向 1 代表径向，当为圆柱面网壳时代表纵向；

B_{e22} ——沿 2 方向的等效薄膜刚度，当为圆球面网壳时方向 2 代表环向，当为圆柱面网壳时代表横向；

D_{e11} ——沿 1 方向的等效抗弯刚度；

D_{e22} ——沿 2 方向的等效抗弯刚度；

A_1 、 A_2 、 A_c ——沿 1、2 方向和斜向的杆件截面面积；

S_1 、 S_2 、 S_3 ——1、2 方向和斜向的网格间距；

I_1 、 I_2 、 I_c ——沿 1、2 方向和斜向的杆件截面惯性矩；

α ——沿 2 方向杆件和斜杆的夹角。

附录 B 橡胶垫板的材料性能及计算构造要求

B.0.1 橡胶垫板的材料性能可按表 B.0.1-1~3 选用。

表 B.0.1-1 胶料的物理机械性能

胶料类型	硬度 (邵氏)	扯断力	伸长率	300%拉伸 强度	扯断永久 变形	适用温度 不低于
氯丁橡胶	60±5	≥18.63	≥450	≥7.84	≤25	-25℃
天然橡胶	60±5	≥18.63	≥500	≥8.82	≤20	-40℃

表 B.0.1-2 橡胶垫板的力学性能

容许抗压强度 [f_c] (MPa)	极限破坏 强度 (MPa)	抗压弹性模量 E (MPa)	剪变模量 G (MPa)	摩擦系数 μ
7.84~9.80	>58.82	由开关系数 β 按 表 B.0.1-3 查得	0.98~1.47	(与钢) 0.2 (与混凝土) 0.3

表 B.0.1-3 “ $E-\beta$ ” 关系

β	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E (MPa)	196	265	333	412	490	579	657	745	843
β	13	14	15	16	17	18	19	20	
E (MPa)	923	1040	1157	1285	1422	1559	1706	1863	

表 B.0.1-3 中的形状系数 β 可由下式求得:

$$\beta = \frac{ab}{2(a+b)d_i} \quad (\text{B.0.1})$$

式中 a, b ——短边及长边长度 (cm);

d_i ——中间橡胶层厚度 (cm)。

B.0.2 橡胶垫板的设计计算可按下列规定进行。

1 橡胶垫板的底面面积 可根据承压条件按下式计算:

$$A_e \geq \frac{R_{\max}}{[f_c]} \quad (\text{B. 0. 2-1})$$

式中 A_e ——支座承压面积，即 $a \cdot b$ ；

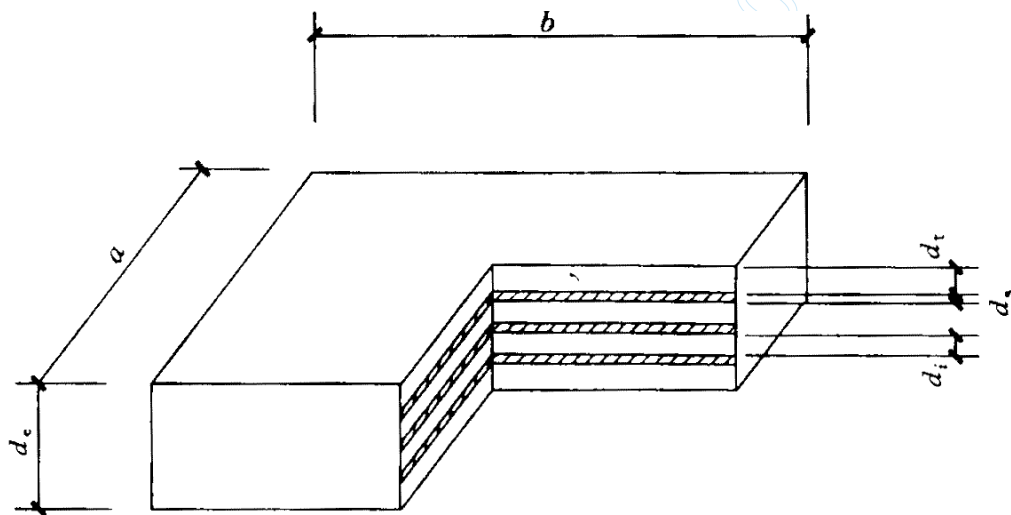
a, b ——支座短边与长边的边长；

R_{\max} ——网壳上全部荷载标准值引起的最大支座反力；

$[f_c]$ ——橡胶垫板的容许抗压强度，按本规程表 B. 0. 1-2 采用。

2 橡胶垫板厚度应根据橡胶层厚度与中间各层钢板厚度确定（图 B. 0. 2）。

橡胶层总厚度可由上、下表层及各钢板间的橡胶片厚度之和确定：



B.0.2 橡胶垫板的构造

$$d_e = 2d_t + nd_i \quad (\text{B. 0. 2-2})$$

式中 d_e ——橡胶层厚度；

d_t, d_i ——分别为上（下）表层及中间各层橡胶片的厚度；

n ——中间橡胶片的层数。

根据橡胶剪切变形条件，橡胶层总厚度应满足下列两式的要求：

$$d_e \geq 1.43u_s \quad (\text{B. 0. 2-3})$$

$$d_e \leq 0.2a \quad (\text{B. 0. 2-4})$$

式中 u_s ——由于温度变化等原因在网壳支座处引起的水平位移。

上、下表层橡胶片厚度 d_i 宜取用 2.5mm，中间橡胶层常用厚 d_i 宜取用 5、8、11mm，钢板厚度 d_s 宜取用 2~3mm。

3 橡胶垫板平均压缩变形 w_m 可按下列式计算：

$$w_m = \frac{R_{\max} d_e}{A_e E} \quad (\text{B. 0. 2-5})$$

橡胶垫板的平均压缩变形应满足下列条件：

$$0.05 d_e \geq w_m \geq \frac{1}{2} \theta_{\max} a \quad (\text{B. 0. 2-6})$$

式中 θ_{\max} ——网壳上全部荷载标准值引起的最大支座转角（弧度）。

4 在水平作用下橡胶垫板应按下列式进行抗滑移验算：

$$\mu R_g \leq G A_e \frac{u_s}{d_e} \quad (\text{B. 0. 2-7})$$

式中 μ ——橡胶垫板与混凝土或钢板间的摩擦系数，按本规程表 B. 0. 1-2 采用；

R_g ——网壳上永久荷载标准值乘以荷载分项系数 0.9 所引起的支座反力；

G ——橡胶垫板的剪变模量，按本规程表 B. 0. 1-2 采用。

B. 0. 3 橡胶垫板应满足以下构造要求：

1 对气温不低于-25℃地区，可采用氯丁橡胶垫板；对气温不低于-30℃地区，可采用耐寒氯丁橡胶垫板；对气温不低于-40℃地区，可采用天然橡胶垫板。

2 橡胶垫板的长边应顺网壳支座切线方向平行放置。与支柱或基座的钢板或混凝土间可用 502 胶等粘结剂粘结固定。

3 橡胶垫板上的螺孔直径应大于螺栓直径 10mm。

4 设计时宜考虑长期使用后因橡胶老化而需要更换的条件。在橡胶垫板四周可涂以防止老化的酚醛树脂，并粘结泡沫塑料。

5 橡胶垫板在安装、使用过程中，应避免与油脂等油类物质以及其他对橡胶有害的物质接触。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；

反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行时，写法为“应符合……的规定（或要求）”“或”应按照……执行”。