

中华人民共和国建筑工程部

钢筋混凝土薄壳顶盖及 楼盖结构设计计算规程

BJG 16-65

(試 行)

中国工业出版社

关于批准“钢筋混凝土薄壳顶盖及楼盖结构设计 计算规程”为部试行标准的通知

(65) 建许科字 15 号

現批准“钢筋混凝土薄壳顶盖及楼盖结构设计计算规程”为部頒标准，自 1966 年 3 月 1 日起在部系統內試行。在試行时，如发现有需要修改的地方，可随时函告建筑科学研究院结构研究所，并抄我部科学技术局规范处，以便再行修訂时統一考虑。并希在生产实践中注意总结經驗，积累資料，使之日臻完善。

中华人民共和国建筑工程部

編 制 說 明

国际上，薄壳结构在建筑工程上的应用，已有近四十余年的历史。我国解放前很少采用薄壳结构；解放后，特别是1958年以来，才获得很大发展。据不完全统计，仅在1958~1960年期间就兴建了约52万平方米建筑面积的钢筋混凝土薄壳结构屋盖。与此同时，还进行了许多计算理论与简化计算的试验研究工作，积累了不少设计和构造经验。因此，目前有必要也有可能在总结以往设计施工与应用上的经验以及科研成果的基础上，编制一本“钢筋混凝土薄壳顶盖及楼盖结构设计计算规程”，供设计应用。

本规程由建筑工程部建筑科学研究院结构研究所主编。参加编制的单位还有：西北工业建筑设计院、中南工业建筑设计院、华南工学院、江苏省勘察设计院。

本规程是在总结国内几年来实践经验和科研成果的基础上进行编制的，较国外的薄壳规程有很大的改进和补充，充分反映了我国在这方面的成就。在内容上，选择了在我国均已实际建造过的且较常用的五种薄壳类型，即：旋转壳、双曲扁壳、圆柱面壳及折板、双曲抛物面扭壳和膜型扁壳，同时在有关章节内还包括带肋薄壳的内容。在计算方法上，除参考了国外（如苏联、美国、德意志民主共和国等国）的计算方法外，主要采用了国内的一些简化计算方法，并列出了详细的计算步骤及成套的系数表。在构造措施上，既参考了国外经验，也根据了国内的实践经验与施工条件等实际情况予以适当地规定或建议。

本规程共分六章：

第一章“总则”包括：适用范围、计算原则、壳体的构造与配筋、装配整体式壳体、预应力壳体、孔洞开设、温度影响等；

第二章“圆形底旋转壳”；

第三章“双曲扁壳”；

第四章“圆柱面壳及折板”；

第五章“双曲抛物面扭壳”；

第六章“膜型扁壳”。

在每一章内均给有计算方法及构造措施。

本规程虽经多次讨论与修订，但仍然须从实践中不断地补充修订和完善。有关本规程的意见请寄本规程的主编单位。

建筑工程部建筑科学研究院结构研究所

目 录

編制說明

第一章 总則	1
第一节 适用范围	1
第二节 計算原則	1
第三节 壳体的构造与配筋	3
第四节 装配整体式壳体	5
第五节 預应力薄壳结构	7
第六节 孔洞	7
第七节 溫度影响	8
第二章 圓形底旋轉薄壳	12
第一节 計算方法	13
第二节 法向集中荷載和环形荷載作用下的計算 圓孔的应力集中	20
第三节 雪載、风載及穩定	24
第四节 帶肋壳的計算	24
第五节 邊緣构件	25
第六节 构造要求	29
第三章 双曲扁壳	31
第一节 曲面与曲率	32
第二节 在均布荷載作用下的內力計算公式	32
第三节 在法向集中荷載作用下的內力及位移計算公式	36
第四节 在半边荷載、填充荷載及水平荷載作用下的內力及位移的計算	39
第五节 穩定驗算	40
第六节 邊緣构件	41
第七节 构造要求	41
第四章 圓柱面壳及折板	45
第一节 圓柱面壳的几何尺寸和計算	45
第二节 邊緣构件	47
第三节 构造要求	48
第四节 折板結構	51
第五章 双曲拋物面扁扭壳	53
第一节 几何尺寸	53
第二节 单块扭壳及組合型扭壳的計算	55
第三节 邊緣构件	55
第四节 构造要求	56
第六章 膜型扁壳	58
第一节 适用范围及几何尺寸	58

VI

第二节 计算方法	58
第三节 构造要求	62
附录 I 双曲扁壳的内力及位移系数表	66
表 I.1 双曲扁壳在均布荷载作用下薄膜内力系数表	66
表 I.2 方形底球面微弯扁壳(微弯板)在均布荷载作用下内力及位移系数表	69
表 I.3 双曲扁壳在填充荷载作用下的内力系数表	71
附录 II 圆柱面壳的计算方法及表格	88
一、圆柱面长壳的计算步骤	89
二、圆柱面短壳的计算步骤	94
表 II.1; II.2; II.3	
表 II.4 圆柱面壳薄膜内力及位移系数表	97
表 II.5a 圆柱面长壳在对称边缘扰力作用下内力系数表	99
表 II.5b 圆柱面长壳在对称边缘扰力作用下位移系数表	134
表 II.6a 圆柱面短壳在单边边缘扰力作用下内力系数表	142
表 II.6b 圆柱面短壳在单边边缘扰力作用下位移系数表	149
附录 III 两端铰支长折板顶盖的计算方法	151
一、折板顶盖的计算公式及步骤	151
二、带环肋的折板	163
三、预应力配筋的折板	164
附录 IV 双曲抛物面扁扭壳的内力及位移系数表	166
表 IV.1 四边简支单块双曲抛物面扁扭壳在均布荷载 q 作用下的内力及位移系数表	166
表 IV.2 四边简支组合型双曲抛物面扁扭壳在均布荷载 q 作用下的内力及位移系数表	185
参考文献	206

第一章 总 则

第一节 适用范围

1.1 本规程适用于整体式或装配式普通钢筋混凝土及预应力混凝土薄壳顶盖及楼盖结构（以下简称薄壳结构）。

1.2 本规程内容包括圆形底旋转壳（球面壳、椭球面壳及旋转抛物面壳三种）、常曲率双曲扁壳、圆柱面壳（包括折板）、双曲抛物面扭壳及膜型扁壳^①等五种薄壳结构在设计 and 计算方面的有关规定。

薄壳结构的型式应根据建筑设计要求（如功能、工艺、造型与音响等）、施工条件及经济合理性来确定。

1.3 本规程适用于壳体厚度与其中曲面最小曲率半径之比不大于 $1/20$ 的薄壳结构（折板结构例外）、对于矩形底双曲扁壳及双曲抛物面扭壳要求长边与短边之比不大于 2 （边长采用中曲面与通过边缘构件中心面相交的曲线在底平面上的投影长度）。

壳体的计算曲率采用中曲面的曲率，边长采用边缘构件在底平面上的投影长度。

第二节 计算原则

1.4 壳体及其边缘构件可按弹性理论分析其内力与位移。除有专门规定者外，其截面设计应按现行“混凝土和钢筋混凝土结构设计规范”进行。当采用预应力配筋时，截面设计尚应同时遵守现行“预应力混凝土结构设计规范”的有关规定。

当壳体的最大矢高 f 与最小边长之比不大于 $1/5$ 时，可按扁壳理论进行计算，混凝土的泊松比可以略而不计。

1.5 当验算壳体截面承载能力时，其工作条件系数为：

(1) 对于壳板..... $m=0.9$

(2) 对于边缘构件..... $m=0.9\sim 1.0$

壳体最大主拉应力一般不应超过 $4R_t$ ，对于圆柱面壳边梁底的最大拉应力不超过 $8R_t$ 。 R_t 为混凝土受拉计算强度。

当按标准荷载验算边缘构件的变形与位移时，在短期荷载作用下的挠度极限值除有特殊要求者外，在跨度 $l>7$ 米时不应超过 $l/1000$ ，在 $l\leq 7$ 米时不应超过 $l/500$ ；长期荷载作用下的挠度，在 $l>7$ 米时不应超过 $l/500$ ，在 $l\leq 7$ 米时不应超过 $l/250$ 。

对于在正常使用情况下不宜出现裂缝的壳体，按标准荷载算得的最大主拉应力（包

^① 膜型扁壳亦有称为无筋扁壳或等压力壳。

括弯矩的影响)应按现行“混凝土和钢筋混凝土结构设计规范”和“预应力钢筋混凝土结构设计规范”进行验算。

1.6 壳板的自重可近似地按壳板的实际总重(包括肋及加厚的重量),折算成平均厚度进行计算。壳板折算厚度在5厘米或5厘米以下时,壳板自重的荷载系数采用1.25;在5厘米以上时采用1.20。其他荷载系数按现行“荷载规范”确定。

1.7 对于扁球壳、双曲扁壳、圆柱面壳(倾角 $\alpha > 30^\circ$ 的锯齿形圆柱面壳除外)、双曲抛物面扭壳及膜型扁壳一般可不考虑风荷载对壳面的影响,但对边缘构件,则需考虑风载的影响。对于旋转壳、折板及倾角 $\alpha > 30^\circ$ 的锯齿形壳体顶盖,垂直于壳面的风载按下列公式计算:

$$P_q = K \cdot q$$

q 为与风速及地区(纬度、海拔高度等)有关的基本风压值,根据现行“荷载规范”确定。

K 为与壳面形式有关的风载体型系数,按表 1.1 采用。

旋转壳、折板及锯齿形圆柱面壳风载体型系数

表 1.1

	顶盖图形	系数 K 值
球面壳		$\frac{f}{l} > \frac{1}{4}$ 时, $K = 0.5 \sin^2 \phi \sin \theta - \cos^2 \phi$ $\frac{f}{l} \leq \frac{1}{4}$ 时, $K = -\cos^2 \phi$ ϕ —— 壳面法线与旋转轴间的夹角
扁球面壳及旋转抛物面壳		风载体型系数应由试验确定。无试验数据时,可近似地按球面壳的系数采用
锯齿形圆柱面壳		当 $0 < \alpha < 15^\circ$ 时, $K = -0.8$ 当 $\alpha = 30^\circ$ 时, $K = 0$ 当 $\alpha > 60^\circ$ 时, $K = 0.8$ 介于上列数值之间的 α 值,其风载体型系数 K 可按插入法确定
折板		按现行荷载规范确定

1.8 壳体的雪载可按壳体水平投影面上每平方米的雪载用下列公式来计算:

$$P_s = C \cdot q_s$$

q_s 为单位水平面积上的雪载,根据不同地区按现行荷载规范采用。

C 为与壳面形式有关的积雪分布系数。对旋转壳(包括扁球壳)及圆柱面壳, C 值按表 1.2 采用;对于双曲扁壳、双曲抛物面扭壳及膜型扁壳,采用 $C=1$ 。

1.9 壳体结构当须考虑地震荷载、冲击荷载及其他动力荷载的作用时,应对其内力与变形进行专门验算。

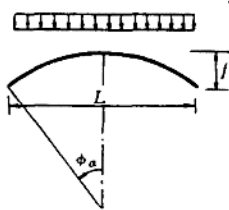
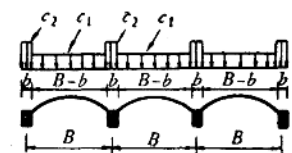
1.10 设计薄壳结构时应应对下列主要部件进行验算:

(1) 壳板;

(2) 边缘构件(可为边拱、桁架、空腹梁、刚架、边梁和支座环等。圆柱面壳横向各类边缘构件亦可简称横隔)。

旋轉壳及圆柱面壳的积雪分布系数

表 1.2

旋轉壳 (包括扁球壳)	圆 柱 面 壳
	
$C = \frac{L}{8f}$ 但不得大于 1 和小于 0.4。 当 $\phi_a > 30^\circ$ 时, 参照第 2.9 条进行计算	$C_1 = 1 \quad C_2 = 2$ b —— 边梁宽度

边缘构件在其本身平面内应具有足够的刚度以保证结构可靠地工作。当边缘构件为钢筋混凝土桁架时, 可按荷载集中在上弦杆节点作内力分析, 但对上弦杆尚应考虑节间荷载与剪力的偏心作用所引起的弯矩。

装配整体式薄壳结构的预制构件必须对其在安装过程中和成为整体前的内力和抗裂度进行验算(验算荷载包括自重、施工荷载、起吊荷载等; 对于曲板构件宜按微弯板^①进行计算)。

第三节 壳体的构造与配筋

1.11 薄壳结构中壳板截面可根据薄膜内力(法向内力与剪力)及弯矩分别计算配筋, 并予迭加。对于圆柱面壳的跨中部分, 由于横向弯矩较大, 应按偏心受压构件配筋。屈折系数均等于 1。

为了施工方便, 壳板可以分区分段配筋。一般可在整个壳板内配置正交钢筋网, 而在主拉应力较大的区域增设斜向钢筋以便与钢筋网共同承受壳板中的内力。

边缘构件除配置主要受力钢筋外, 还需设置横向抗扭封闭箍筋。

1.12 在壳板受压区域及主拉应力小于 R_t 的受拉区域内, 可按不低于 0.20% 的最小含钢率配置构造钢筋, 其直径不得小于 4 毫米。对于单层配筋, 网格最大间距不得超过 25 厘米(如钢筋直径为 4 毫米时, 则不得超过 20 厘米); 对于双层配筋, 上下两层钢筋网格应错开安置, 每层最大间距不得超过 30 厘米。

当主拉应力大于 R_t 时, 主拉应力全部由钢筋承担, 按计算配筋, 其间距不宜大于 15 厘米。

① 可参阅附录 I 表 I.2

壳体边缘构件的最小含钢率须遵守现行“混凝土和钢筋混凝土结构设计规范”中有关规定。

1.13 对于厚度不大的壳板(圆柱面壳厚度小于或等于6厘米,其他类型壳体小于或等于8厘米),在弯矩较小的区域内,可采用单层配筋,钢筋一般布置在板的中间。超过上述厚度或当壳体受有冲击及振动荷载作用时应采用双层配筋。

对于带肋薄壳结构,肋内除应上下配置受力钢筋外,同时还应配置间距不大于25厘米的箍筋。

1.14 在整体式壳体(膜型壳除外)的壳板和边缘构件连接处,应满足下列构造要求:

(1) 靠近边缘构件的壳板应根据该区域的内力大小予以均匀地逐渐增厚,增厚范围一般不小于壳体直径或壳体短边边长的 $1/12 \sim 1/10$, 增加的厚度不小于壳体中间部分的厚度(对于四块组合型双曲抛物面扭壳的加厚,详见5.7条)。

(2) 在壳板增厚区域内,必须至少配置直径为4~10毫米,间距不大于20厘米的双层钢筋,上下二层钢筋均须锚入边缘构件内,其中上层钢筋的锚固长度不得小于30倍钢筋直径,下层钢筋的锚固长度不得小于15倍钢筋直径。

1.15 在装配整体式壳体的壳板和边缘构件连接处,应满足下列构造要求:

(1) 当壳板上具有与边缘构件正交的加劲肋时,除计算要求加厚者外,壳板可不加厚。如无加劲肋,则仍须按整体式壳体的规定加厚。

(2) 在预制构件的连接边必须设置齿形槽口,其中壳板的槽口沿水平方向设置,边缘构件的槽口沿垂直面方向设置,每个槽口的长度不得大于1.2米(图1.1)。

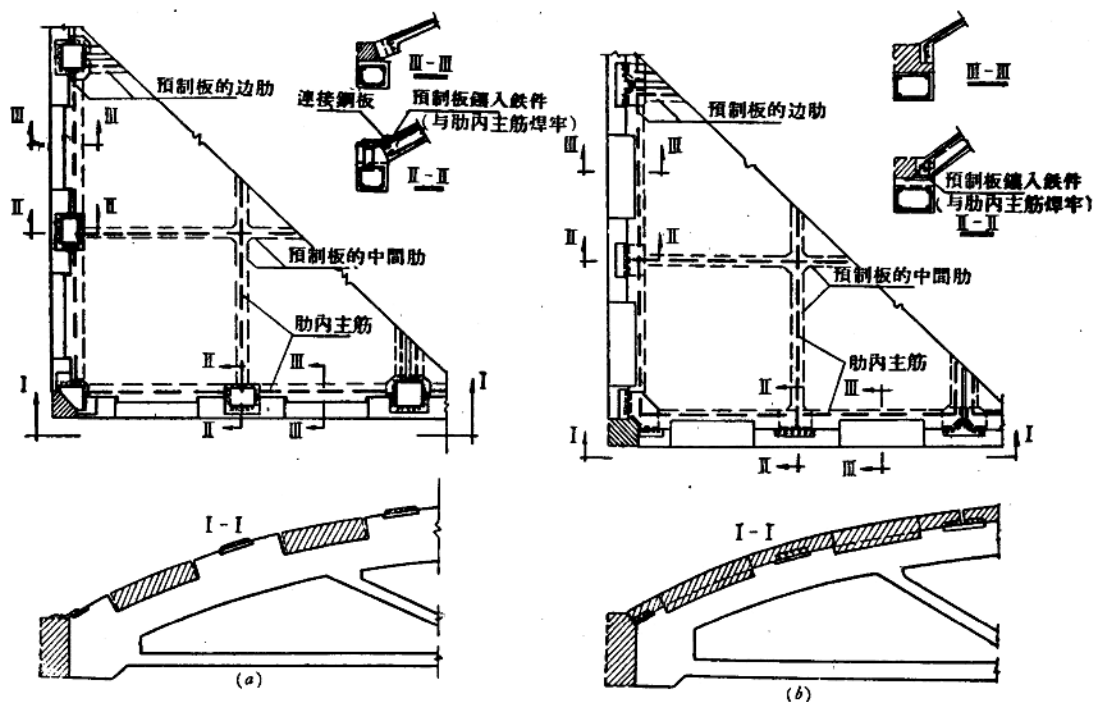


图 1.1 装配整体式壳体的壳板和边缘构件连接图

(3) 当壳板上具有与边缘构件正交且间距不大于3米的加劲肋时,壳板中允许配置单层钢筋(直径不小于6~10毫米),但在肋的上部与下部应配置直径不小于10毫米的钢筋,同时应将肋的上层钢筋及壳板的钢筋伸出并与边缘构件中伸出的钢筋焊牢(焊接长度在单面焊时不小于10倍钢筋直径;在双面焊时,不小于5倍钢筋直径),然后在拼缝中灌筑细石混凝土。为了便于施工,也可将肋中钢筋焊接在肋的预埋件上,再用钢板将其与边缘构件的预埋件焊牢。焊接接头强度不得小于肋中钢筋的强度。此时预制板的加劲肋及预埋件的间距均不应大于1.5米。当壳体跨度等于或大于24米时,肋的预埋件必须设置在它的上表面(图1.1_a,截面II-II);当壳体跨度小于24米时,为了施工方便也可将预埋件设置在肋的下表面(图1.1_b,截面II-II)。

1.16 整体式薄壳的厚度不应小于4厘米,装配整体式薄壳则不应小于3厘米。保护层厚度不应小于1厘米。当壳体经常处于有侵蚀性的介质中及高湿度时,宜根据具体情况采取特殊措施或增大保护层厚度。

第四节 装配整体式壳体

1.17 装配整体式壳体的壳板预制构件根据下列原则划分:

- (1) 尽可能减少拼缝与构件类型;
- (2) 要便于预制板的施工、堆放、运输及安装;
- (3) 尽量减少模板和支撑,节约钢材与木材;
- (4) 尽量使拼缝处于受压区或剪力与拉力较小的区域,这样可使接头处理简化。

预制壳板最好采用曲板。

为了施工方便起见,对圆柱面壳及曲率不大的扁壳,也允许采用平板。此时,板的边长不得大于3米,分块数目应满足下列要求:

- (1) 扁球壳,沿环向分块不少于8块,沿经线不少于4环;
- (2) 双曲扁壳及双曲抛物面扭壳,每边分块均不少于9块;
- (3) 圆柱面壳,沿环向不少于7块,沿纵向可不受限制。

预制板的周边应设置加劲肋,肋高由壳体稳定及预制构件在运输、安装过程中的刚度要求来确定,一般为块体边长的 $1/20 \sim 1/15$,对于大型构件,在运输和安装时应设置临时支撑。

1.18 装配整体式壳体可以全部采用预制构件,也可以部分预制、部分现制。

预制壳板的接头可根据接缝处的受力情况按下列形式选用:

(1) 混凝土接缝 这种接缝适用于受压或受压又受剪的接缝,其做法是在接缝中灌筑细石混凝土,它的标号不得低于预制构件的混凝土标号。当预制壳板加劲肋的高度小于10厘米时,接缝上口宽度应不小于3厘米;当肋高大于10厘米时,上口宽度不小于5厘米。当剪应力值大于 $1/4R_t$ 且超过压应力的 $1/3$ 时,则预制构件的侧边加劲肋须做有槽形齿口,以传递剪力。为了使接缝能承受一些意外的拉力,可将预制构件的板内钢筋伸出一部分,并和相邻板的伸出钢筋连接起来,其绑扎长度为 $20 \sim 30$ 倍钢筋直径,在伸出钢筋的垂直方向另加二根分布钢筋(图1.2)。

(2) 钢筋混凝土接缝 这种接缝适用于受拉或受剪又受拉的接缝，其做法是将预制构件的板内钢筋伸出，并在接缝中绑扎或焊接（绑扎长度为30倍钢筋直径，焊接长度当采用单面焊时为10倍钢筋直径，采用双面焊时为5倍钢筋直径）；肋内钢筋可不必伸出，但须另外放置一个双层的十字形骨架，骨架的钢筋直径与预制构件肋内钢筋的直径相同，其长度应满足图1.3及1.4的规定，再将其与预制构件的板内伸出钢筋绑扎在一起，然后用细石混凝土填缝，其标号不得低于预制构件的混凝土标号。当剪应力与拉应力的矢量和大于 $R_t/4$ 时，侧边加劲肋还须做有槽形齿口（图1.4）。

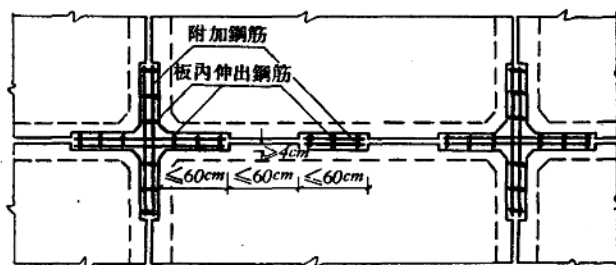


图 1.2 有槽口的混凝土接缝

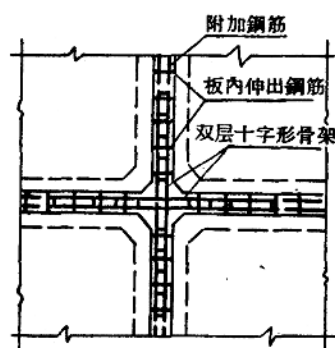


图 1.3 无槽口的钢筋混凝土接缝

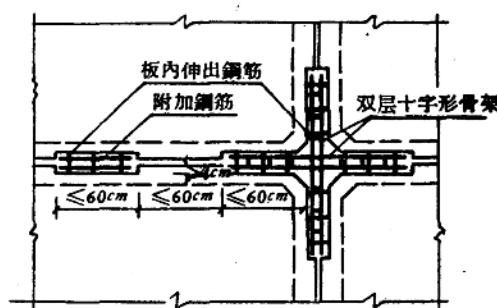


图 1.4 有槽口的钢筋混凝土接缝

如不采用钢筋绑扎或焊接连接的办法，则可在预制构件的壳板上埋入间距不大于1.5米的铁件，其内表面应与加劲肋中的主钢筋焊接，在各预制构件就位后，再用连接板将其焊牢，焊缝强度及铁件强度应均不小于切断钢筋的强度。

(3) 预应力混凝土接缝 对于在正常使用情况下，不宜出现裂缝的壳体，当接缝中的主拉应力大于 R_t 时，宜采用预应力混凝土接缝。预应力筋穿入间距不大于1.5米的预留孔或槽内，填缝细石混凝土的标号不应低于预制构件的标号，而填充预应力孔道的水泥砂浆不应低于300号。预制壳板与预制边缘构件之连接方法见1.15条。

预制构件与现浇部分之连接，可以采用在预制构件内伸出必要数量的钢筋与现浇部分的钢筋绑扎或焊接，再浇筑混凝土。

第五节 預应力薄壳結構

1.19 預加应力能够提高薄壳结构的刚度和抗裂度，并可以作为連接預制构件的手段。

在边拱拉杆、横隔、旋轉壳的支座环、圆柱面壳的边梁以及壳板的受拉区域和剪力較大的区域，均可采用預应力筋（图 1.5）；在受压区域也可采用預应力筋来連接預制构件。

当边缘构件支承点的距离等于及大于 24 米时，宜采用預应力配筋。

装配整体式薄壳结构的預制构件（如边缘构件、壳板等）的預加应力值应根据装配整体后结构的工作情况及安装应力来确定。預应力預制构件均須驗算在安装前由于施加預应力后所产生的内力影响。

此外，装配整体式薄壳结构的块体划分要便于安置預应力筋及灌浆。

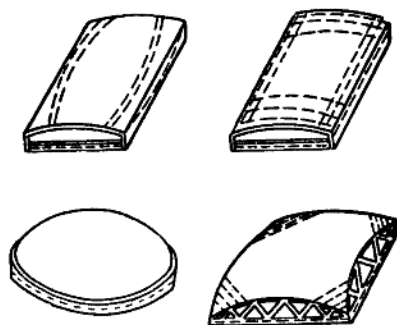


图 1.5 壳体預加应力

1.20 薄壳结构預加应力的方法，可根据具体结构的装配方案采用先张法或后张法。在施加預应力的端部区域，构件的尺寸构造应根据一般預应力构件的设计与計算确定。

薄壳结构的預应力筋应采用直綫型或曲率不大的曲綫型鋼筋。在未經特殊处理时，一般应避免把預应力鋼筋或鋼絲束布置在壳体结构的弯折处。

1.21 设计和計算預应力薄壳结构时，应作下列驗算：

- (1) 預加应力过程中结构的强度（在采用后张法时不扣除預应力損失值）；
- (2) 在标准荷载下结构的抗裂度（在采用后张法时应扣除預应力損失值）；
- (3) 在計算荷载下结构的强度（在采用后张法时应扣除預应力損失值）。

預加应力的作用可以近似地视为外荷载。对于直綫配筋可将其视为作用在錨固处的外力。对于曲綫配筋除将其视为作用在錨固处的外力外，还应加上由于預应力鋼筋的拉力对壳体所产生的径向压力。

第六节 孔 洞

1.22 壳頂开有圓孔的旋轉壳及壳頂具有通常矩形孔的圆柱面壳，其内力分析参照第二章及第四章的有关条文，其他类型的薄壳壳面原則上应尽量不开孔，必要时也可开设尺寸較小的孔洞，孔洞的形式以圓形为宜。当孔洞直径（或矩形孔的长边）不大于壳体短边的 $1/5$ ，且不超过下列要求时，允許不考虑开口影响，但須在孔洞附近分别采取适当的构造措施。

(1) 当孔洞位于受压区，直径或边长不大于 2 米时，須在孔洞周边設置加劲肋，但在任意法向剖面上加劲肋的混凝土与鋼筋截面面积均不得少于被割去壳板的截面面

积, 同时在孔洞附近的壳板須設置双层鋼筋网, 其上层鋼筋网的鋼筋直径不小于 $\phi 6$, 間距不大于 15 厘米 (图 1.6)。

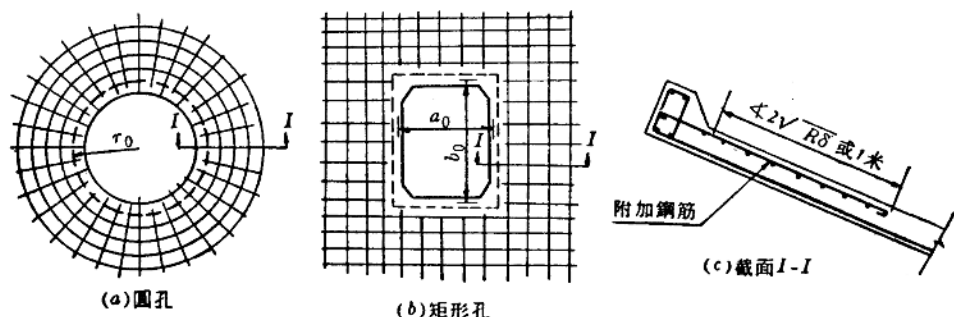


图 1.6

(2) 当孔洞位于受压区, 但直径及边长为 2~3 米时, 則除在孔洞周边設置加劲肋外, 尚須在孔洞中加十字形 (或井字形) 梁, 但在任意法向剖面上加劲肋和十字形 (或井字形) 梁的混凝土与鋼筋截面面积不得少于被割去壳板的截面面积, 孔洞附近的壳板須配置同样要求的双层鋼筋网。

(3) 当孔洞位于拉力区, 且其直径或边长不大于 1 米时, 仍可按第 (1) 点构造要求处理。

(4) 当壳面必須設置較多的孔洞时, 則孔洞的分布力求匀称, 并尽量采用圆孔。在必須采用矩形孔时, 其长边与短边之比不得超过 2。相邻孔洞之間的淨距应小于較大孔洞直径 (或矩形孔长边) 的 3 倍。

(5) 孔洞离边缘构造的淨距不小于該孔洞直径 (或矩形孔长边) 的 2 倍。

(6) 孔洞周边的綫荷载 p 最好控制在接近于被割去壳板上均布荷载在孔洞周边上的折算值, 即 $p = p^* = \frac{qr_0}{2}$ (圆形),

$$\text{或 } p = p^* = \frac{qa_0b_0}{2(a_0+b_0)} \quad (\text{矩形孔})$$

(其中 r_0 为圆孔半径, a_0 及 b_0 为矩形孔的边长, q 为壳面的均布荷载, p^* 为由均布荷载换算成的折算綫荷载); 最大不得超过折算值的一倍,

$$\text{即 } p \leq qr_0 \quad (\text{圆孔}) \quad \text{或 } p \leq q \frac{a_0b_0}{a_0+b_0} \quad (\text{矩形孔})。$$

当 $p > 1.5p^*$ 时, 則孔洞周边設置的加劲肋內至少应配置 $4\phi 10$ 的主鋼筋及間距不大于 20 厘米的 $\phi 6$ 封閉箍筋。

不符合上述規定的孔洞, 应作專門計算和設計。

第七节 温度影响

1.23 伸縮縫的布置:

(1) 建筑物中伸缩缝的间距可按照现行“混凝土与钢筋混凝土结构设计规范”确定。当伸缩缝未超过规范规定时，可以不考虑温度变形对支柱的附加应力，否则须进行验算。

(2) 壳体结构在伸缩缝处一般采用两个边缘构件及双支柱（如图 1.7），并将此缝贯通至基础顶面。缝的宽度应根据温度变形计算来确定。但不得小于 2 厘米。

对于锯齿形薄壳顶盖结构，在锯齿方向伸缩缝的间距不应大于 5~6 倍这个方向的跨度（或称波宽）。

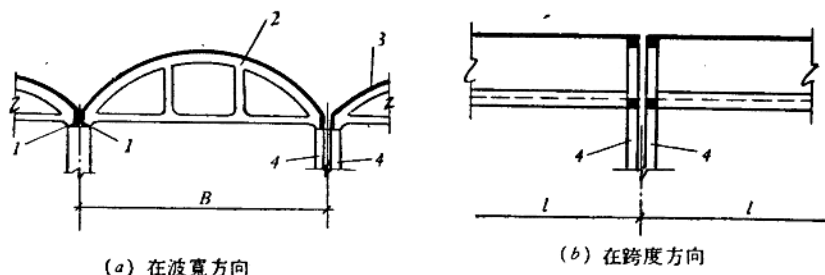


图 1.7 伸缩缝的处理示例

1. 边梁；2. 拱—横隔；3. 壳；4. 柱子

1.24 在考虑温度变化对壳体的影响时（膜型壳可不考虑温度影响），可分别计算以下两种温度作用：

(1) 壳体内外表面温度差 $t_2(^{\circ}\text{C})$ ；

$$t_2 = t' - t''$$

其中 t' ——壳体外表面的计算温度；

t'' ——壳体内表面及带肋壳中肋的计算温度；

t_2 值需根据当地气候及壳体保温情况由热工计算确定。

(2) 壳体中面温度变化 $t_1(^{\circ}\text{C})$ （以升温为正，降温为负）。

当能确定施工时的温度时，则 t_1 即为施工时的温度与夏季平均最高温度或冬季平均最低温度之差。

当不能确定施工时的温度时， t_1 可按式确定：

$$t_1 = \pm 0.6(t_{\text{夏}} - t_{\text{冬}})$$

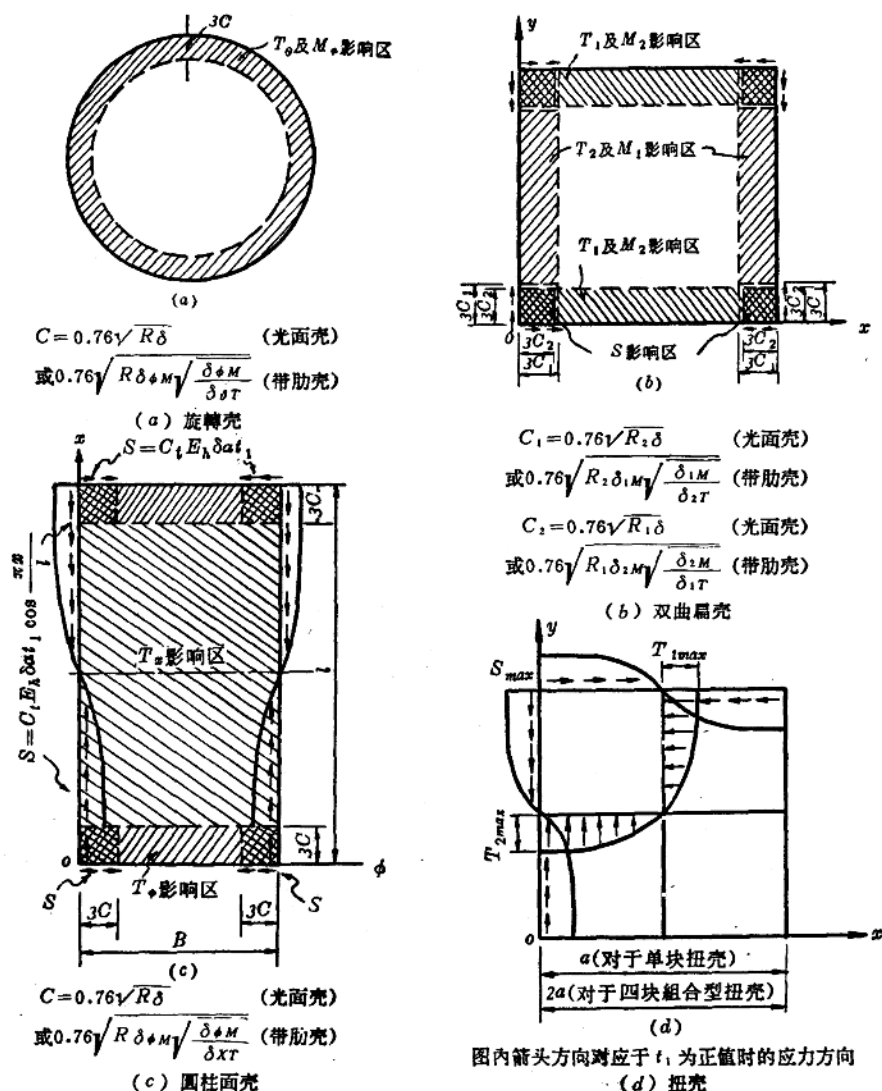
其中 $t_{\text{夏}}$ 、 $t_{\text{冬}}$ 分别为夏季平均最高温度和冬季平均最低温度。

1.25 当 t_2 在整个壳体上的分布为常数或接近常数时，整个壳体只需考虑由 t_2 产生的弯矩，其值为：

$$M = D \frac{\alpha t_2}{\delta}$$

上式中 α 为混凝土的线胀系数。对带肋壳而言，式中的刚度 D 应改用壳体与肋共同作用的刚度。

当 t_1 在整个壳体上的分布为常数或接近常数时，壳体在图 (1.8) 所示的影响区内产生以下三种主要温度应力：

图 1.8 由 t_1 产生的壳体温度应力影响区示意图

(1) 平行于边缘构件方向的法向力

$$T = -C_t E_k \delta \alpha t_1$$

在图示影响区内,可近似地按常数考虑,但对圆柱面壳中平行于边梁方向的法向力须按正弦图分布,对扭壳则按半波余弦图分布。对带肋壳而言,上式中的 δ 应改用按截面面积折算的厚度 δ_r (见式 2.23 或 3.6)。

(2) 垂直于边缘构件方向的弯矩

(i) 当边界为简支时

$$M = -C_t \frac{\sqrt{3}}{18} E_k \delta^2 \alpha t_1$$

(ii) 当边界轉角为零时

$$M = C_t \frac{\sqrt{3}}{6} E_h \delta^2 \alpha t_1,$$

在图示影响区内, 均按常数考虑, 但对圆柱面壳及扭壳, 弯矩可近似地略去不计, 对带肋壳而言, 上式中的 δ 应采用按刚度折算的厚度 δ_M (見式 2.23 或 3.6)。

(3) 对于矩形底筒支边壳体, 在壳板与边缘构件交接处产生剪力:

$$S = C_t E_h \delta \alpha t_1,$$

在图示区内, 均按常数考虑, 但在圆柱面壳的壳板与边梁交接处以及扭壳的壳板与边缘构件交接处, 剪应力均按余弦图分布;

在升温 (即 t_1 为正值) 时, S 的符号与外荷载产生的剪力符号相同。

上列各式中的 C_t 值应根据边缘构件的支承情况, 按下列规定采用:

(1) 当边缘构件支承在 $\frac{L}{h} \geq 10$ 的柔性柱上或其支点可自由滑动时, $C_t = 0$ (其中 L 为柱高, h 为柱的截面高度)。

(2) 当边缘构件支承在柱上, 且其支点不能自由滑动时, 应根据壳体的形式按下列公式计算 C_t 值:

$$(a) \text{ 对矩形底壳体, } C_t = 0.7 / \left(1 + \frac{2L^3 A}{3I I} \right),$$

其中 I 及 A 为边缘构件的长度及其平均截面 (如为桁架, 则为其上下弦之总截面); I 为柱子的截面惯性矩 (当每边的边缘构件支承在 n 根柱上时, I 应等于 $\frac{n}{4}$ 根柱惯性矩之和);

$$(b) \text{ 对圆形底壳体, } C_t = 0.7 / \left(1 + \frac{2\pi L^3 A}{3n I r_a} \right),$$

其中 r_a 及 A 为支座环的半径及截面面积, n 为支承柱的数量;

(3) 当边缘构件底边完全支承在砖墙上时, $C_t = 0.35$;

(4) 当边缘构件支承在地下基础上时, $C_t = 0.7$ 。

对于受有特殊温度场 (包括特殊热源等) 作用的壳体, 则应作专门计算^①。

① 可参阅参考文献 [1.3]、[1.4]

第二章 圓形底旋轉薄壳

符 号 說 明

符号及正向可參照图 2.1。凡符号右上角带“0”者，表示按薄膜理論算得的值。凡符号右下角带“a”和“0”者，分别表示相应于外环和内环边缘处之值。

几 何 特 征

- ϕ, θ, z : 旋轉壳的座标系統;
 r, θ, z : 按扁球壳計算的座标系統;
 δ : 壳体厚度;
 r : 由旋轉軸至壳体中曲面的水平距离 (半径);
 R_1 : 沿壳面經綫方向的主曲率半径;
 R_2 : 沿壳面緯綫方向的主曲率半径;
 R : 球面壳的半径, $R_1 = R_2 = R$;
 $C = 0.76 \sqrt{\delta R}$, $C_a = 0.76 \sqrt{\delta R_2 a}$, $C_0 = 0.76 \sqrt{\delta R_{20}}$;
 I : 环梁截面繞水平中軸的慣性矩;
 A : 环梁截面面积;
 S_1 : 壳体沿經綫方向由旋轉軸至外环边缘的弧长;
 S_2 : 壳体沿經綫方向由内环边缘至外环边缘的弧长;
 $S (\bar{S})$: 由壳体外 (内) 环边缘量起的經綫弧长。

內 力 及 位 移

- T_ϕ : 单位长度上的經向內力;
 T_θ : 单位长度上的环向內力;
 S : 单位长度上的剪力;
 Q_ϕ : 单位长度上的切力;
 M_ϕ : 单位长度上的經向弯矩;
 M_θ : 单位长度上的环向弯矩;
 H : 壳体边缘处单位长度上水平推力
$$H_a^0 = -T_\phi^0 \cos \phi_a,$$
$$H_0^0 = -T_\phi^0 \cos \phi_0;$$
 $N_{ka} (N_{k0})$: 外 (内) 环梁的軸向內力 (拉力为正);
 R_l : 混凝土受拉計算强度;
 w : 壳体法向位移;
 v : 壳体經向位移;
 ψ : 經向轉角;
 $\Delta H_a (\Delta H_0)$: 壳体外 (内) 边缘处水平方向的位移。