

高等学校試用教科書

鋼筋混凝土及磚石結構

第三分冊 鋼筋混凝土結構補充部分

建筑学专业适用

“工程結構”教材选編小組选編



中国工业出版社

高等学校试用教科书



钢筋混凝土及磚石結構

第三分册 钢筋混凝土結構补充部分

建筑学专业适用

“工程結構”教材选編小組选編

中国工业出版社

本书是根据教育部拟定的“建筑学”、“给水排水”及“供热、供煤气与通风”专业1959年教学计划（草案），以五年计划的学制来编写的。

全书共分五个分册，第一分册为适用于以上各专业的钢筋混凝土结构基本部分，适用于以上各专业；第二分册为适用于以上各专业的砖石结构，第三分册为建筑学专业适用的钢筋混凝土结构补充部分；第四分册为适用于给水排水专业的钢筋混凝土结构补充部分；第五分册为适用于供热、供煤气与通风专业的钢筋混凝土结构补充部分。

本书系建筑学专业适用的钢筋混凝土结构补充部分，内容包括：薄壁空间屋盖，单层工业厂房结构，多层房屋结构，大跨房屋结构。可作为建筑专业试用教科书，亦可供一般土建工程技术人員参考。

钢筋混凝土及砖石结构

第三分册 钢筋混凝土结构补充部分

建筑学专业适用

“工程结构”教材选编小组选编

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本787×1092 1/16·印张15·字数327,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数·0001-2,133 定价（10-6）1.80元

统一书号：15165·882(41-96)

目 录

第十章 薄壁空间屋盖

第一节 概述	7
第二节 圆柱形薄壳	8
§ 10-1 长薄壳	8
(一) 型式及结构特点	8
(二) 壳体内力状态	12
(三) 实用算法	13
(四) 截面选择及构造要求	16
§ 10-2 短薄壳	19
(一) 型式及结构特点	19
(二) 壳体内力状态	19
(三) 实用算法	20
(四) 截面选择及构造要求	22
§ 10-3 折板结构	23
(一) 型式及结构特点	23
(二) 折板结构计算方法	24
(三) 截面选择及构造要求	30
第三节 双曲薄壳	30
§ 10-4 圆顶结构	30
(一) 型式及结构特点	30
(二) 平滑圆顶的实用算法	31
(三) 平滑圆顶的截面选择及构造要求	34
§ 10-5 双曲扁壳	34
(一) 型式及结构特点	34
(二) 实用算法	36
(三) 截面选择及构造要求	39
§ 10-6 双曲抛物面薄壳	39
(一) 型式及结构特点	39
(二) 实用算法	40
(三) 截面选择及构造要求	41
§ 10-7 无拉力扁壳	42
(一) 型式及结构特点	42
(二) 实用算法	42
(三) 截面选择及构造要求	44
第四节 幕结构及波浪形薄壳	44
§ 10-8 幕结构	44
(一) 型式及结构特点	44

(二) 试验和理论研究	45
(三) 实用算法	45
(四) 截面选择及构造要求	46
§ 10-9 波浪形薄壳	48
第五节 预应力钢筋混凝土薄壳	48
第六节 装配式钢筋混凝土薄壳	51
(一) 装配式圆柱形薄壳	51
(二) 装配式双曲薄壳	54
参考文献	57

第十一章 单层工业房屋结构

第一节 概述	60
§ 11-1 设计原则	60
§ 11-2 厂房主要结构	61
第二节 单层工业房屋结构布置	63
§ 11-3 平面布置	63
(一) 柱网布置	63
(二) 墙、柱及屋架的定位轴线及其 接合	64
(三) 温度缝的设置与构造	66
§ 11-4 剖面布置	68
(一) 厂房跨间高度的确定	68
(二) 厂房跨间横向尺寸的确定	70
§ 11-5 支撑布置	71
(一) 一般说明	71
(二) 屋盖支撑	72
(三) 端墙(山墙)抗风支撑	77
(四) 柱间支撑	78
第三节 单层工业房屋排架计算	78
§ 11-6 排架的计算图形	78
§ 11-7 排架承受的荷载	80
(一) 一般说明	80
(二) 吊车的垂直荷载	80
(三) 吊车的水平制动力	81
(四) 雪载	81
(五) 风载	82
§ 11-8 排架内力分析	82
(一) 一般说明	82

(二) 在屋盖及吊车荷载作用下的排

架内力分析.....83

(三) 在风载作用下的排架内力分析.....83

第四节 单层工业房屋的空间工作.....85

§ 11-9 在局部荷载下的空间工作.....85

§ 11-10 在风荷载下的空间工作.....86

第五节 屋盖结构.....87

§ 11-11 屋面板.....87

(一) 一般说明.....87

(二) 肋形屋面板.....87

(三) 薄壳式屋面板.....90

§ 11-12 天窗架.....91

§ 11-13 屋盖主要承重结构.....95

(一) 一般说明.....95

(二) 屋面大梁.....95

(三) 桁架.....101

(四) 拱.....109

第六节 吊车梁.....112

§ 11-14 设计要点.....112

§ 11-15 实腹式吊车梁的构造.....114

§ 11-16 实腹式吊车梁的计算.....117

(一) 荷载.....117

(二) 静力强度计算.....119

(三) 疲劳强度计算.....120

(四) 按变形、抗裂性及裂缝开展
计算.....125

§ 11-17 桁架式吊车梁.....126

§ 11-18 计算例题.....126

第七节 柱.....134

§ 11-19 无桥式吊车厂房的柱.....134

§ 11-20 有桥式吊车厂房的柱.....136

§ 11-21 牛腿的构造与计算.....140

§ 11-22 柱的内力组合.....141

第八节 柱下单独基础.....145

§ 11-23 基础的构造.....145

§ 11-24 基础的计算.....147

第九节 厂房其它结构构件.....153

§ 11-25 托架.....153

§ 11-26 山墙柱.....155

§ 11-27 连系梁及基础梁.....155

参考文献.....158

第十二章 多层房屋结构

第一节 概述.....160

§ 12-1 一般说明.....160

§ 12-2 发展情况.....160

第二节 结构方案及构造特点.....161

§ 12-3 概述.....162

§ 12-4 框架式结构.....162

(一) 轮廓尺寸(柱网尺寸、层高及
层数).....162

(二) 主要承重框架的布置.....163

(三) 主要承重框架的形式及铰链的
地位.....164

(四) 楼面结构的型式及其布置.....168

(五) 节点的构造.....170

(六) 变形缝(温度伸缩缝和沉降缝)
的构造.....176

§ 12-5 墙板式结构.....177

(一) 概述.....177

(二) 主要承重墙板的布置.....178

(三) 墙板尺寸的划分.....178

(四) 墙板的型式.....179

(五) 楼面结构的型式.....185

(六) 盒子式结构.....185

§ 12-6 半框架式结构.....186

(一) 概述.....186

(二) 墙板的布置.....187

§ 12-7 技术经济比较及结构方案的选择.....188

(一) 多层工业房屋.....188

(二) 多层民用房屋.....189

第三节 计算要点.....191

§ 12-8 框架式结构(主要承重框架沿
房屋的横向布置).....191

(一) 荷载计算.....191

(二) 计算简图.....192

(三) 静力计算.....194

(四) 强度计算.....195

(五) 刚度计算.....195

(六) 裂缝计算.....196

(七) 节点的计算.....196

§ 12-9 框架式结构(主要承重框架沿

房屋的纵向布置)	198
§ 12-10 框架式结构(主要承重框架沿、 房屋的纵向及横向混合布置)	200
§ 12-11 墙板式结构(主要承重墙板沿 房屋的横向布置)	200
(一) 荷载计算	200
(二) 静力计算	201
(三) 强度计算	201
(四) 刚度计算	211
(五) 裂缝计算	212
§ 12-12 墙板式结构(主要承重墙板沿 房屋的纵向布置)	212
§ 12-13 墙板式结构(主要承重墙板沿 房屋的纵向及横向混合布置)	213
§ 12-14 半框架式结构	213
(一) 墙板沿房屋的纵向布置	213
(二) 墙板沿房屋的横向布置	214
(三) 墙板按集中布置的方案	214
第四节 带形基础及整片基础	215
§ 12-15 概述	215
§ 12-16 带形基础及整片基础的型式及 构造	216
(一) 带形基础	216
(二) 整片基础	219
§ 12-17 带形基础及整片基础的计算	221

第五节 楼梯	224
§ 12-18 概述	224
§ 12-19 整体式楼梯	224
(一) 无边梁的板式楼梯	224
(二) 有边梁的楼梯	225
(三) 混合支承楼梯	227
§ 12-20 装配式楼梯	227
(一) 采用大型构件的装配式楼梯	228
(二) 采用小型构件的装配式楼梯	228
(三) 楼梯	228
§ 12-21 螺旋形楼梯	230
参考文献	230

第十三章 大跨度房屋结构

第一节 概述	235
§ 13-1 一般说明	235
第二节 各种大跨结构型式的介绍	235
§ 13-2 桁架式结构	235
§ 13-3 箱形大梁结构	237
§ 13-4 拱式结构	238
(一) 整体式拱	238
(二) 装配式拱	238
§ 13-5 刚架式结构	240

第十章 薄壁空間屋蓋

第一节 概 述

薄壳结构是一种曲板结构，它的厚度比其他尺寸小得多。在荷载作用下，结构是处在空间受力状态，外荷载主要是通过直接内力从两个方向传给支承结构。因壳体内力主要是直接内力，弯矩和扭矩都很小，这就使薄壳截面内的材料效能得到充分利用；加以壳体的曲面形状赋予结构以强大的刚度，故壳体厚度可以很薄。由于薄壳的自重轻，用它作为屋盖结构时，相应地减轻了下部承重结构所受的荷载，从而使下部结构的材料及结构面积，都可得以减少。因此采用薄壳结构屋盖，可以降低整个建筑物的造价。

钢筋混凝土薄壳与梁板结构比较，一般可节约钢材30%，混凝土20%左右。

薄壳结构特别适合于跨度较大的建筑物。因此，近代大跨度建筑物如展览馆、俱乐部、飞机库、工业厂房和仓库等要求内部空旷的建筑物很多采用薄壳结构。近年来，在一般民用房屋中也开始采用薄壳结构做屋盖。

依薄壳壳面形状的不同，它基本上可分为下列两大类：

1. 圆柱形薄壳：这种薄壳是单向弯曲的，其中又可分为长薄壳、短薄壳及折板结构等。

2. 双曲薄壳：这种薄壳是双向弯曲的，属于这类薄壳的有圆顶、双曲扁壳及双曲抛物面薄壳等。

除上述两种基本形式的薄壳外，还有幕结构及波浪形薄壳等一些另具特点的薄壳结构。

薄壳结构的形式在古代即已在实际工程中出现，如罗马建筑中的穹隆结构。但是，它的结构理论是在十九世纪初期才被提出。1925年苏联和德国相继建成了圆柱形薄壳和圆顶薄壳。从此以后，薄壳结构的应用，日益广泛。尤其是在第二次世界大战以后，世界各国都广泛地采用薄壳结构，同时结构型式也日益繁多而跨度逐渐增大。在已建成的工程中，已有跨度达260m者。

我国在解放前修建的薄壳结构很少，只有江苏省戚墅堰大丰面粉厂及台湾某纱厂等几个。解放后，随着社会主义建设的巨大发展，薄壳结构的应用也逐渐增多。例如1950年，在太原钢铁厂即已建造了二跨的长薄壳屋盖结构，跨度20m波宽8m；1952年上海市公共交通公司汽车保养场建造了 $21 \times 7.5\text{m}$ 的长薄壳；1957年西安市搪瓷厂也采用了30m跨度的长薄壳；建筑工程部建筑科学研究院建成了32m跨度的预应力圆柱形长薄壳。尤其是1958年大跃进以来，壳体结构的应用范围更加扩大而且型式也日益增多。例如北京火车站中央大厅（ $35 \times 35\text{m}$ ）的双曲扁壳，广东番顺县大良人民公社会堂则为跨度55.5m的球形扁壳，又如在北京农业展览馆中采用了各种圆顶结构。这些结构，不论在施工技术上及跨度上都足以表征我国薄壳结构的技术水平。

薄壳结构计算理论方面，自从1826—1831年拉梅和克拉比荣提出了薄膜计算理论后，

经过生产实践和许多学者的研究而日益完善。我国解放以来，随着薄壳结构的推广应用，对其计算理论及施工方法进行了广泛的研究，编制了圆柱形薄壳、双曲扁壳、无拉力扁壳等的计算图表，提出了某些壳体的简化计算方法，这些都使我国薄壳结构理论水平提高了一步。

应当指出，目前在薄壳结构的应用中，尚存在着一定的问题。这主要是制作施工比较复杂，另外计算一般仍是比较麻烦，且往往与实际情况并不符合。所有这些，均有待于进一步加以解决。

第二节 圆柱形薄壳

圆柱形薄壳是由直母线在两根形状相同而且平行的曲线上滑动而形成，其几何形状简单，成型容易。薄壳的组成部件有壳板、边梁和横隔构件。边梁的长度 l_1 称为跨长，边梁的水平距离 l_2 称为波长。根据平面尺寸 l_1 与 l_2 比例的不同，壳体受力情况也不同。当 l_1/l_2 很大时，壳体就很象弧形截面的梁一样工作。随 $\frac{l_1}{l_2}$ 比值的减小，薄壳的空间工作性能愈显著。因此，根据比例 $\frac{l_1}{l_2}$ 之不同，通常将圆柱形薄壳分为：长薄壳及短薄壳二类。当

$\frac{l_1}{l_2} > 1$ 时则为长薄壳，当 $\frac{l_1}{l_2} < 1$ 时则为短薄壳。

折板结构亦是属于圆柱形长薄壳的一类。它是由一些宽度不大的平板所组成，亦即其母线仍为直线，而准线则为折线。

长薄壳与短薄壳在柱网为 $12 \times 18m$ 时，其材料用量实际上是相同的。但短薄壳在施工建造方面及使用方面较之长薄壳具有更多的优点，例如因曲率较小而较易浇灌混凝土，各种管道、电线及悬挂吊车的安装也方便等。因此短薄壳在有些国家中应用很多，尤其在苏联采用得更多。上述柱网时，短薄壳的经济指标如下：混凝土折算厚度 $15.6cm$ ，钢材 $16kg/m^2$ 。

折板结构施工较方便，经济效果则不及上述两者。

§ 10-1 长 薄 壳

(一) 型式及结构特点

圆柱形长薄壳(图10-1)的平面尺寸 $\frac{l_1}{l_2} > 1$ ，一般 $\frac{l_1}{l_2} = 1.5-2.5$ ，甚至可达3—

4。跨长 l_1 可达 $30m$ 或更大。超过 $30m$ 时，如用普通钢筋混凝土，将会因壳板厚度和边梁尺寸增加太多而降低其经济效益，并且挠度亦颇为显著。所以对于较大跨度的长薄壳，建议采用预应力钢筋混凝土结构。

壳体截面的总高度 F (包括边梁高度及壳体矢高)，根据受力情况及刚度的要求决定。

一般 $F \geq \frac{l_1}{10}$ ，且不小于 $\frac{l_2}{6}$ 。在采用预应力配筋边梁的情况下， F 值可适当减小。

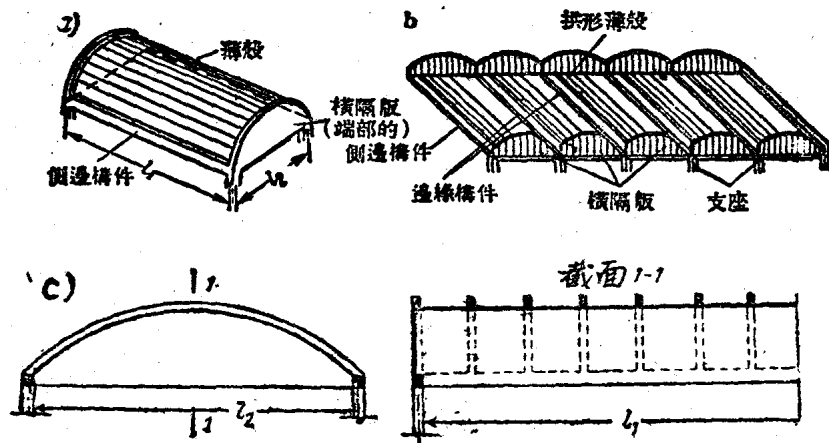


图 10-1 长薄壳

a—单波；b—多波；c—肋形长薄壳

当波长 l_2 已被规定时，壳体矢高 f 随截面的曲线形状而不同。壳体边缘坡度如果太大，因浇筑混凝土时需用双层模板，而给施工带来许多不便，且在夏季气温较高的地区，防水层会融化而流淌。因此壳体所含圆心角的一半应在 $30^\circ-45^\circ$ 之间，以 40° 为合适。

边梁的作用除与壳体共同工作以减少薄壳的侧向水平位移外，还可集中放置部分纵向的受拉钢筋。另外边梁截面对薄壳的内力分布有很大影响。根据建筑物不同的要求，常用的外缘边梁有下列几种形式（图10-2）。

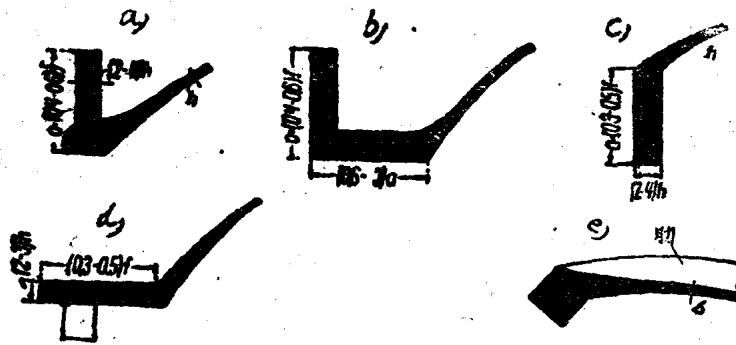


图 10-2 外缘边梁的类型

1. 边梁向上式（图10-2a）：采用这种形式时，外缘边缘可兼作排水沟与女儿墙之用，模板比较复杂，用料亦较多。

2. 宽沟边梁式（图10-2b）：与上述形式相似，唯因其有较宽的水平板部分，因而横向刚度较大。

3. 边梁向下式（图10-2c）：此式应用最广，由于增大了薄壳的高度，对受力情况有利，材料可得以节省。如在边梁中采用预应力配筋，则可以增加壳体刚度及减小壳体内力。

4. 水平板式（图10-2d）：当沿边缘有中间支承时，宜将边梁做成水平板式，其水平刚度大，可以减小壳体中的横向弯矩和水平位移。

5. 小肋式（图11-2e）：此式适用于带有横向加劲肋的薄壳，亦可用在小型薄壳上，当

为装配式薄壳而用母模制作时,采用这式便于脱模。由于整个壳体横截面高度较小,故不宜用于大型薄壳,只当建筑上有特殊要求者例外(例如对薄壳总高度有限制时)。

6. 桁架式和空心梁式:此种边梁适用于跨度很大的薄壳结构,边梁设置在壳板的下面。

至于中间边梁的型式,有些和外缘边梁是相同的,在图10-3中示有中间边梁的几种形式。

对某些建筑物,如要求室内不能设置边梁时,可将多波薄壳两波相邻处局部加厚,以便放置纵向受拉钢筋而不另设边梁,这种处理方法一般较费钢材。

壳板截面的几何形状主要取决于施工条件。常用的壳板形状是圆弧形曲线。个别亦有采用椭圆曲线等形式,但由这些曲线而形成的曲面在稳定性方面较圆弧曲面为差,而且模板制造亦较麻烦,所以没有得到广泛应用。壳板厚度通常取决于施工条件和钢筋规格,但当壳体很大时由于稳定性要求,也不能做得过薄,一般约为3—8cm。其两边与边梁连接处,因有较大的局部弯矩和切力,应在此处将板局部加厚。壳板是做成等厚的,加厚部分应做成圆滑曲线的过渡区段,借以减小局部集中应力。

为了采光的需要,壳板中可以开设天窗。天窗宽度不宜超过 $l_2/4$ 。其纵向长度超过1.5—2.0m时,除了沿天窗边缘设置边梁外,还应加设横肋,以保证两边壳板的空间工作。

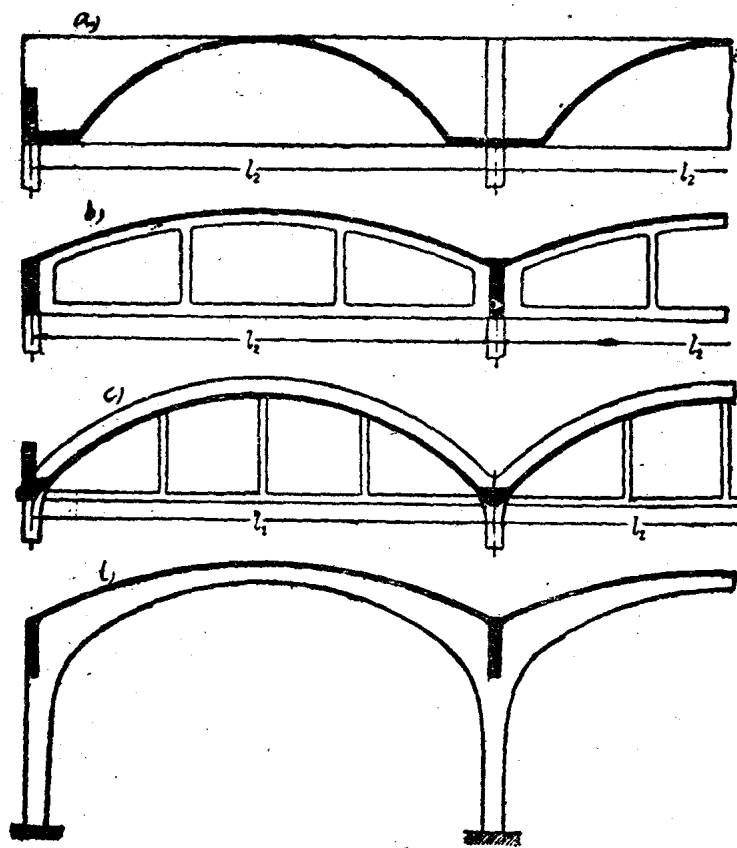


图 10-3 中间边梁及中间横隔构件的型式

橫隔构件是承受壳板及边梁傳來切力的构件，这种构件应具有較大的平面剛度。常用的橫隔构件有下列几种形式：

1. 矩形薄板式梁（图10-3a）：适用于外緣边梁向上时的薄壳。其缺点为橫隔板施工困难、容易积雪、自重大、材料較費，同时室内采光及敷設管道等都不方便，所以較少采用。

2. 变高度薄板（图10-3b）：橫隔板放在薄壳下面，可以具有加勁肋和不具有加勁肋。这式較上式用料少，施工亦方便，唯室内采光及敷設管道仍然不便。板厚一般約8—15cm，板底往往与边梁底齐平。

3. 拉杆拱式（图10-3c）：前两种橫隔构件自重太大，因此当波长較大时，可做成拉杆拱式橫隔。这时室内具有良好的建筑形象，采光、通风和敷設管道等也都方便，所以应用很广。在材料方面，混凝土用量虽省，但鋼材耗費較多。

4. 曲梁剛架式（图10-3d）：这式适用于中等波长的薄壳。其优点为室内有較大之淨高，通风及采光都方便，并且美观，但平面内剛度較差。

薄壳端部的橫隔构件可以設計成垂直的或傾斜的（图10-4）。斜橫隔与垂直面所成夹角不大于 45° ，此时端橫隔可为平板式曲面，它与壳板相交处要用肋加强，并用边梁将端部橫隔圍住。

为防止薄壳因混凝土干縮及溫度变化而产生裂縫，沿纵向应設置溫度縫，在溫度縫处設置双橫隔构件。在沿薄壳的橫向，如果橫隔构件是曲线形，是否需要設置溫度縫，可視具体情况决定；如果是实体直綫形橫隔或空腹桁架等橫隔，則应按纵向一样考虑。

当圓柱形薄壳的波长較大时，壳面可能产生翹曲現象，这就要求加强壳板的剛度。加强壳板剛度的办法有两种，一是加厚壳板，一是設置附加小肋（图10-1c）。增加壳板厚度的結果会引起自重的大大增加，既不符合節約材料及減輕自重的原則，而且效果也不如后一种好。

圓柱形长薄壳的兩側边梁通常是位于同一水平，但也有时不位于同一水平，这后一种形式的薄壳即称为鋸齒形薄壳（图10-5）。这种薄壳解决了大面积建筑的自然采光問題。因而在工业車間中得到了推广，尤其是在要求采光良好而不受阳光直接照射的紡織厂和仪器厂等車間中，应用更为合适。但鋸齒形薄壳截面有效高度較小，因而多用鋼材，經濟指标不及一般长薄壳。

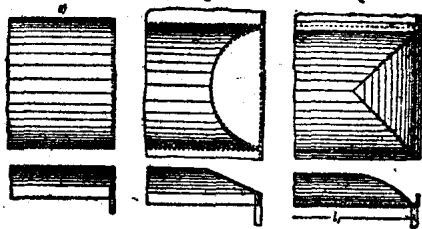


图 10-4 端部橫隔构件的类型

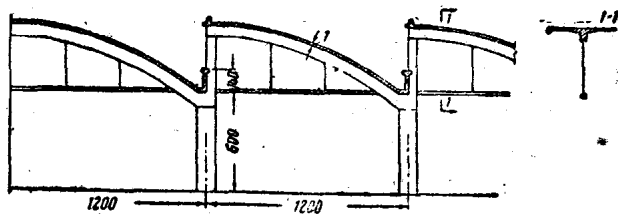


图 10-5 鋸齒形薄壳

由于經濟上的考虑以及同时为了避免边梁太高而影响天窗的設置，对于鋸齒形薄壳，其 l_1/l_2 一般以3:2較為适宜。

锯齿形薄壳的下边梁，可设计成V型或U型，它一方面可充作排水天沟，一方面可构成天窗框的下弦杆。上边梁位于天窗的上部。相邻两个壳体的上、下边梁间用拉杆联系之，构成闭合的窗框，中间充填玻璃窗。

锯齿形薄壳的横隔构件一般采用曲杆刚架。

(二) 壳体内力状态

薄壳受载后，在薄板中将产生内力。设从薄壳的壳板中切取一单元体，其内力将如图10-6所示。图中所示各力的方向均为正号，其符号意义为：

T_x ——纵向法向力； T_ϕ ——横向法向力； S ——剪力； M_x ——纵向弯矩； M_ϕ ——横向弯矩； M_T ——扭矩； N_x ——纵向切力； N_ϕ ——横向切力。

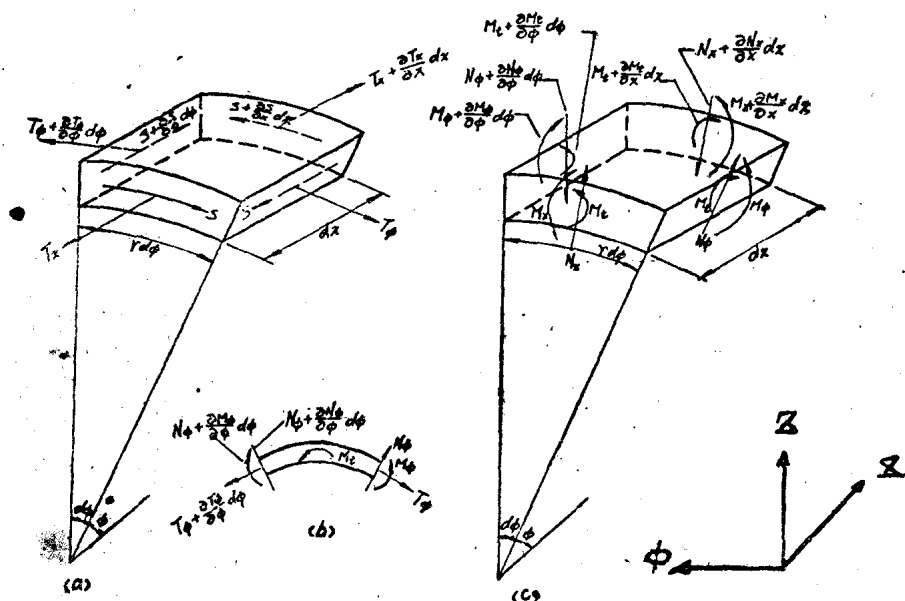


图 10-6 单元体上的作用力

根据苏联对长薄壳所做试验的结果，当荷载增加到计算荷重的 $3/4$ 时，毛细裂缝开始出现，这些裂缝引起某些内力重分配，这与受拉区混凝土退出工作有关。由此，内力偶臂也得到某些增长。当加荷到达计算荷重的 $2.16-2.42$ 倍时，钢筋才达流限。破坏时的情况可参见图10-7。同时从试验中还可得出下列结论：

- (1) 在长薄壳中纵向弯矩 M_x 和扭矩 M_T (图10-6) 很小，可以不计；
- (2) 当跨度与波长比 $\frac{l_1}{l_2}$ 较大时，不论边梁有无水平位移，都可近似地用梁的理论计算；
- (3) 壳中剪切变形很小；
- (4) 横隔板受有剪力 S 的作用，可作为独立平面结构进行计算；
- (5) 当边梁没有水平位移时，预加应力使壳体产生的内力和作为梁计算的结果近似。

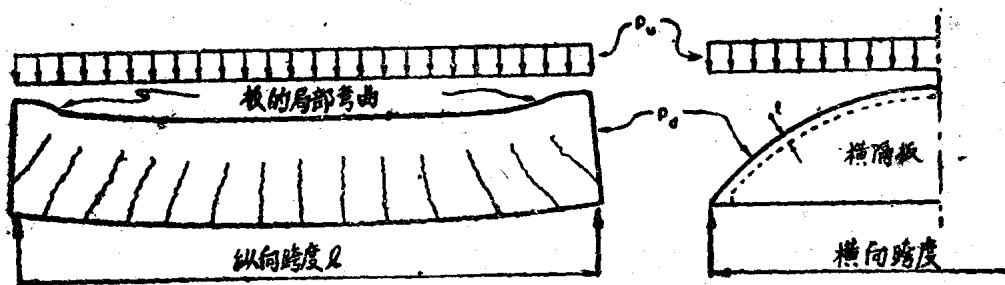


图 10-7 简支圆柱形壳体破坏情况

为了能对壳体中内力的分布情况有一比较明确的认识, 以下将讨论一个简支圆柱形具有边梁的长薄壳 (图10-8) 在受到均布荷载及自重时 (图10-9) 的内力情况。

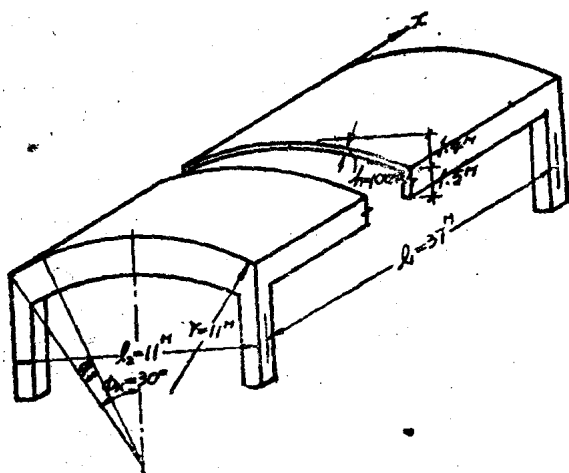


图 10-8

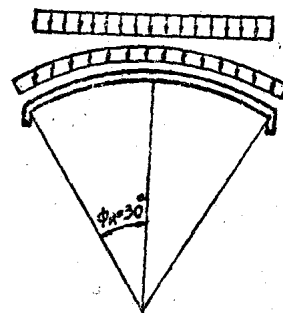


图 10-9

图10-10示出在壳体横截面中 T_x , T_ϕ , S , M_ϕ 的分布情况, 其中略去内力 M_T , N_ϕ , N_x , M_x , 因后者在一般情况下数值较小。

图10-10中内力的正负号可参见图10-6, 在图10-6中内力所示方向均为正号。图10-10中关于 S 的曲线是代表 $x=0$ 处 (图10-8) 横截面中的分布情况; T_x 曲线是代表在 $x=\frac{l_1}{2}$ 处 (图10-8) 横截面中的分布情况; T_ϕ 曲线是代表 $x=\frac{l_1}{2}$ 处横截面的分布情况; M_ϕ 曲线是代表 $x=\frac{l_1}{2}$ 处横截面中的分布情况。

图10-11示出各内力沿纵向长度的分布情况。其中 T_x , T_ϕ , 及 M_ϕ 均按正弦曲线变化, 跨中最大, 而在二端处为零; S 则按余弦曲线变化, 跨中为零, 而在二端处为最大。

(三) 实用算法

圆柱形薄壳的计算方法基本上可分为二类: 无弯矩理论及有弯矩理论^①。

① (10-2)、(10-3)、(10-4)、(10-5)、(10-6)、(10-8)、(10-9)、(10-10)、(10-11)。

按照无弯矩理论则在壳体中只考虑三个内力，如图10-6a所示。

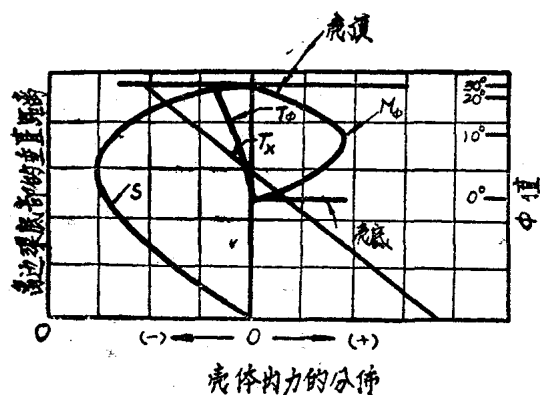


图 10-10

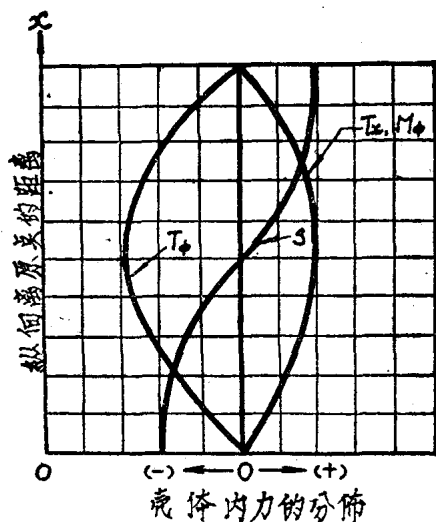


图 10-11

$T_x = \sigma_x h$ ——作用在横截面单位长度上的法向力；

$T_\phi = \sigma_\phi h$ ——作用在纵截面单位长度上的法向力；

$S = \tau h$ ——剪力。

对图10-6a所示的单元体，根据力的平衡条件可以列出三个平衡微分方程如下：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial s} + X &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10-1a)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_\phi}{\partial s} + \frac{\partial S}{\partial x} + Y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10-1b)$$

$$T_\phi = rZ \quad (10-1c)$$

式中 r ——壳体曲率半径；

X, Y, Z ——作用在壳体单位面积上的投影于 x, y, z 轴向的荷载。

根据公式 (10-1c) 代入公式 (10-1b) 并用积分得出 S 值，将 S 代入公式 (10-1a) 即可得出 T_x 。但求出的内力值和在壳体中的分布状况，在很多情况下显得不够正确，而不得不将壳体中的弯矩考虑在内。

基于上述用无弯矩理论计算的缺点，故在计算中不仅须考虑 T_x 、 T_ϕ 及 S ，而还须将其其他内力一并引入，如图10-6a、c所示。这就是有弯矩理论。这样可以得出较为精确的结果，但是计算工作异常繁重，在实际工作中一般均采用近似算法。

多波长薄壳的中波，按其本身工作实际上是接近于梁的工作。因为在这种波中，由于邻波的影响，各边仅可能沿垂直线移动。边缘波或单波壳的边缘（即外缘边梁），它们的边缘不仅能沿垂直线移动，而且能沿水平线位移，因此横向力矩 (M_ϕ) 较大，对它们采用作为梁来计算的简化方法是不正确的，应该按考虑横向力矩的计算方法进行。

对于边梁无水平位移（如多波薄壳的中波）以及跨度与波长比例在 3—4 以上的薄壳，把它视作梁计算在实用上是足够精确的；而对于多波薄壳的边波以及单跨（跨度与波

长比例小于3—4)薄壳,应在计算时考虑横向力矩 M_x 的影响。

作为梁计算的这种简化方法,是将薄壳作为曲线形截面的梁来分析,这时主要是求其纵向垂直应力 σ_x 及切应力 τ 。

根据材料力学公式,纵向垂直应力为:

$$\sigma_x = -\frac{My}{J} \quad (10-2)$$

式中 M ——将薄壳当作简支梁计算的弯矩,如果是多跨连续薄壳则按多跨梁计算;

y ——截面上任意一点的高度;

J ——截面绕 x 轴的惯性矩,为了便于计算圆弧部分的重心和惯性矩,可参照图10-12及10-13。

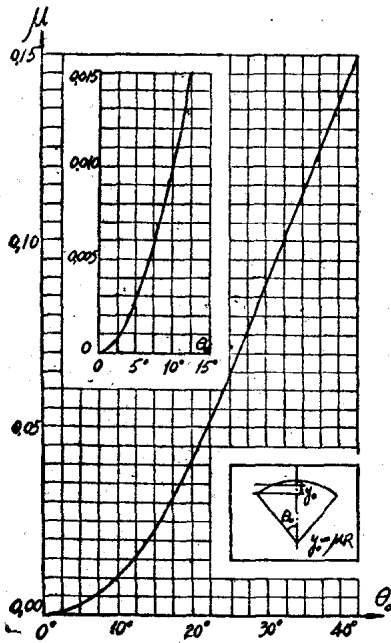


图 10-12

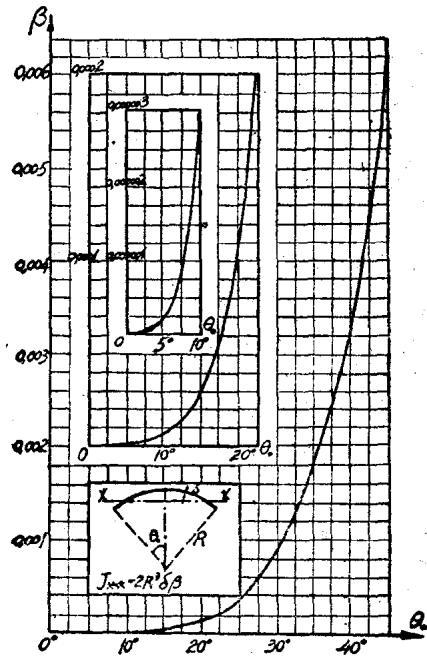


图 10-13

在薄壳截面的重心以上部分,产生着纵向压应力;在重心以下部分则产生着拉应力。作为梁计算薄壳的纵向垂直应力时,拉力的总和 Z_{max} (包括作用在边梁及壳体中二部分)应等于压力的总和 D_{max} 。故总拉力可用计算壳体压应力图形的体积(图10-14)的方法,按公式(10-3)求出。

$$Z_{max} = -D_{max} = \frac{2rh\sigma_0}{y_0} [r \sin \alpha_0 - \alpha_0(r - y_0)] \quad (10-3)$$

式中 r ——薄壳的半径;

h ——薄壳的厚度;

σ_0 ——薄壳顶点的纵向垂直应力;

y_0 ——薄壳顶点至中和轴的距离;

α_0 ——薄壳受压区中心角的一半。

切应力按公式(10-4)计算:

$$\tau = \frac{QS}{2hJ} \quad (10-4)$$

式中 Q ——纵向任一截面处当作为梁计算时的横向力;

$2h$ ——在所考虑截面的中和轴上薄壳的厚度, 由于壳体的对称性, 故乘以系数 2 (相应于梁中的宽度 b)。

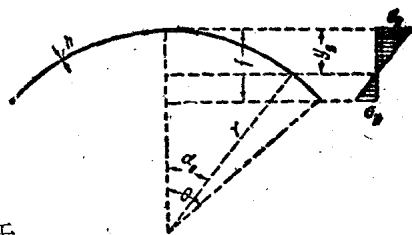


图 10-14

近年来由于壳体在建筑工程中的大量应用, 为了计算方便, 对于长薄壳也编制了很多计算图表。

(四) 截面选择及构造要求

长薄壳各部分尺寸以及配筋主要是根据纵向垂直应力 σ_x 和切应力 τ 来决定。在混凝土中出现的拉应力不应大于 $4R_b$, 对于产生侵蚀性气体的建筑则不应大于 $2R_b$ 。如不允许出现裂缝或裂缝开展过大, 则宜施加预应力。

拉应力全部由受拉钢筋承受, 其面积可由公式(10-5)决定。

$$F_a = \frac{Z_{max}}{1.1mR_{ay}} \quad (10-5)$$

式中 Z_{max} ——按计算荷载求得的拉力总和, 按公式(10-3)求得;

1.1——考虑由于大部分钢筋放在应力最大区域所增加的内力偶臂的系数。

按公式(10-5)求得的钢筋面积的60%可依照拉应力图来放置, 其余的40%可集中在边梁的下部(图10-15a)。

在边梁的跨长方向, 应将不小于30%的钢筋面积引到支座; 其余钢筋可根据纵向垂直应力图而变化。减小钢筋截面面积不是用截断钢筋的办法, 而是以小直径的钢筋来代换大直径的钢筋, 接头处则应对头焊接。

壳板的受压区应配以钢筋网, 除非厚度太小, 一般都用双网, 上下层网眼可以错开。钢筋用4—6mm, 间隔20—25cm。在壳板的受压区配置钢筋一方面是由构造考虑而出发, 另外钢筋网的横向钢筋同时可以承担横向弯矩和剪力。

在壳体中和轴处, 主拉应力和切应力相等, 方向为 45° 。剪力可以由跨度及波长方向平行的钢筋所组成的网承担。钢筋直径5—10mm, 间隔15—20cm。钢筋网所能承担的切应力可由公式(10-6)求得。

$$\text{由图10-16a } \tau_x \cdot h ds = m \frac{f_{x1}}{a} R_{ay} dx \cos 45^\circ$$

$$\therefore \tau_x \cdot h = m \frac{f_{x1}}{a} R_{ay} \frac{dx}{ds} \cos 45^\circ = m \frac{f_{x1}}{a} R_{ay} \cos^2 45^\circ$$

同样, 则由图10-16b可得

$$\begin{aligned} \tau_x \cdot h &= m \frac{f_{x1}}{a} R_{ay} \cos^2 45^\circ + m \frac{f_{x2}}{a} R_{ay} \sin^2 45^\circ \\ &= m R_{ay} \left(0.5 \frac{f_{x1}}{a} + 0.5 \frac{f_{x2}}{a} \right) \end{aligned}$$