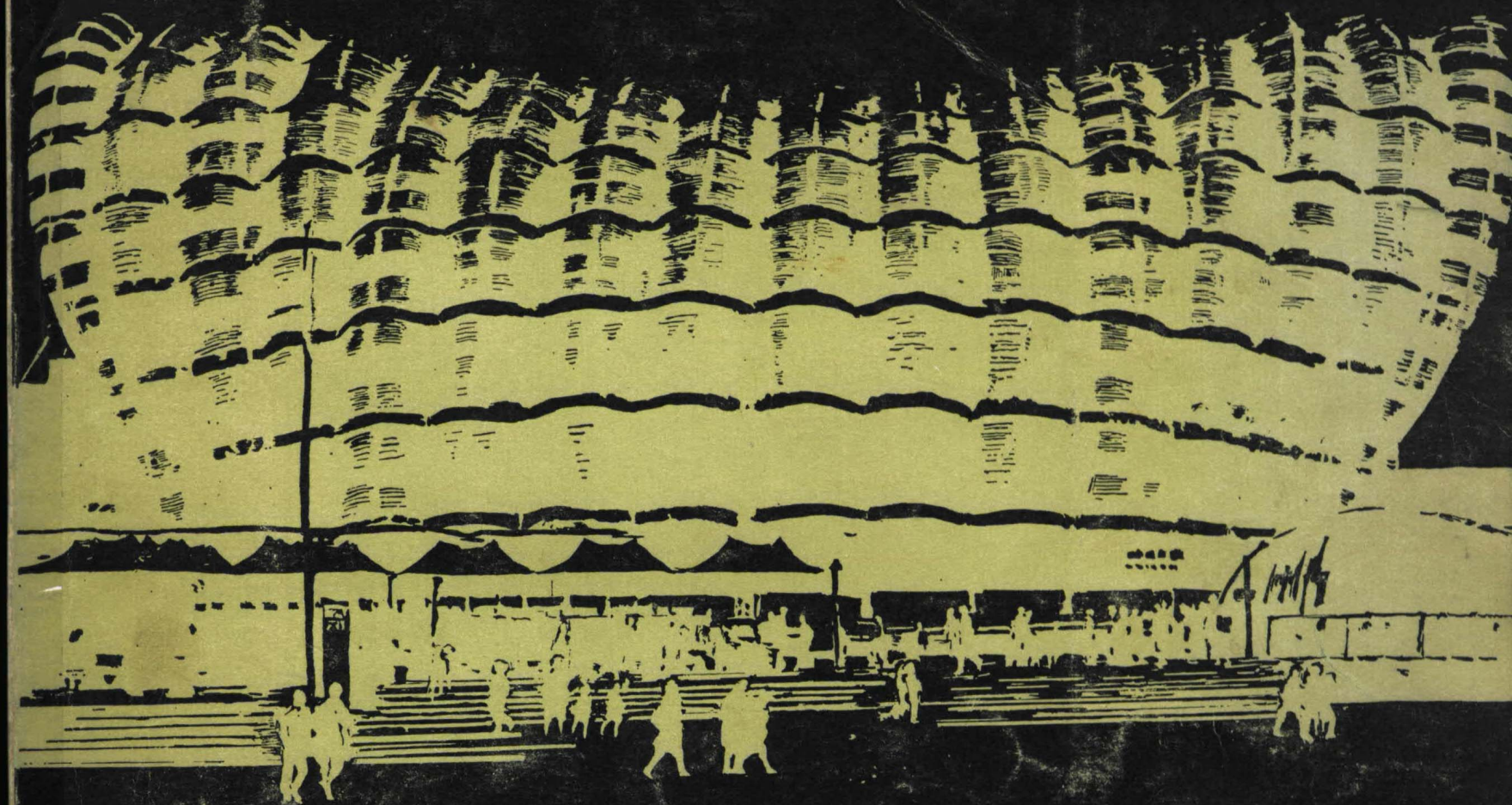


建筑工程师参考图册



充气结构

上海科学技术出版社

CHONGQI JIEBOU

科技新书目: 39 · 256

统一书号: 15119 · 2099

定 价: 7.80 元

充气结构

建筑工程师参考图册

T. 黑尔措格(Thomas Herzog)著

赵汉光译

丁浩
1985.10.

上海科学技术出版社

Thomas Herzog
Pneumatic Structures
A Handbook for the Architect and Engineer

With contributions by
Gernot Minke and Hans Eggers

Crosby Lockwood Staples
London 1977

充 气 结 构
建筑工程师参考图册

T. 黑尔措格著

赵 汉 光 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷十厂印刷

开本787×1092 1/12 印张16 字数160,000

1983年3月第1版 1983年3月第1次印刷

印数1-4,000

书号: 15119 · 2099 定价: 7.80 元

译者序

薄膜充气结构在人类生活中出现已有很久的历史,但作为一种结构体系加以研究,并在实践中显示出独特的潜力,还是近半个世纪的事。虽然西德、美国、英国、法国、日本、瑞典等国家都已经用薄膜充气结构建成大跨度的体育建筑、大型展览馆或仓库,但是如何从结构理论及计算方面进一步认识充气结构在各种条件下的现象、掌握材料的结构规律,提高设计水平,还需要进行大量的实践和持续的研究。近二十年来,我国薄膜充气结构在各个领域乃至在建筑中的应用也曾有不少的设想与尝试。实践证明这种特殊结构对我国的工业、农业、国防、文化体育等方面也有很大的现实意义。要推广这种特殊结构,目前在结构、力学、材料、设备等方面

还需要进行系统的综合研究。以期对这种结构体系的特性有较为全面的正确的理解。从而进一步发挥它的潜力,使其在发展国民经济中起到更大的作用。

《充气结构》一书原为德文。本书系按1977年英译本翻译。原著相当系统地、全面地阐述了充气建筑的发展,介绍了材料设备的技术细节,并附有防火试验的情况与气承结构的力学计算实例,可供我国从事充气结构的设计、研究与建筑施工工作者参考。

本书的翻译工作曾得到王秉铨、蒋大骅、葛兴海、张兆贵、叶克武等同志的热诚帮助和支持,谨在此表示深切的谢意。

赵汉光于同济大学

1980年2月

SAC 44/02
01

序

F. 奥托(Frei Otto)所著的《拉力结构》第一册于1962年出版。其中有很长一章论述了充气结构,但迄今仍未受到应有的重视。这类结构是以自然界的有机体和无机体中常见的物理原理为基础的,并且已经在技术领域中应用了几个世纪。

由F. 奥托创始的对充气结构的发展状况进行详细论述的工作,自六十年代末以来,特别在1967年斯图特加特第一届国际充气结构会议以后,已有更多人在继续研究。在英国、荷兰、奥地利和美国西部,人们进行了无数次试验,但其动机与其说是出于对科学发生兴趣,不如说是出于能在很短的时间内以最少的材料自我创造“环境”的乐趣。大阪1970年国际博览会中的许多充气建筑物反映了充气建筑史上的阶段成就,它们可与以前一些博览会中的先驱建筑物,诸如水晶宫、埃菲尔铁塔、巴塞隆那展览馆和蒙特利尔的德国展览馆等并列。

与工业革命以来经常遇到的情况一样,在充气结构的一般应用方面,建筑再次落后于其它技术领域。例如在气球构造以及稍后发展的气艇构造方面,自从十八世纪末以来,所用的薄膜材料及其裁剪和表面防护等方面都有了重要的进展。然而,这些进展只是在最近才影响到建筑。更确切地说,除了少数例外,充气结构直至最近几年才被看作是纯粹的“工程结构”,而大多数建筑师仍旧习惯于十九世纪以来的一些传统,对充气结构的发展不感兴趣。但充气建筑却以一股新的巨大的动力,在造型和色彩方面为设计提供了广泛的可能性。

几十年来,由于施工机械化程度的

不断提高,建筑物由“面”所支配,多数呈直角相交的形状,外貌显得坚硬、冷酷,反映了机械加工的特点。人们曾企图使建筑造型显得柔和些,但那些尝试又往往忽视了建筑的技术结构因素。充气结构的房屋提供了一种综合的可能性。它们所采用的形状在技术上是高度发展的、而又具有柔软的、可以变形的、活动的、呈圆形张开的“有机”造型。这些形状只要运用得巧,就会给人以独特的美感。

为了获得一个不同于室外气候的稳定的室内气候,建筑物需有能源供应。大建筑物的室内气候主要取决于外墙的调节效能,利用能源采暖只是起着有限的辅助作用。但如果外墙的墙体较少,例如在框架结构中,那么室内气候就主要依靠全空调装置来解决。

充气结构的另一个特征是其形状的稳定性和可变性直接与能源的供应有关。因此充气结构的原理在实现正引起广泛讨论的“能动建筑”(Kinetic Architecture)时无疑将起着重要的作用。

本书是一份充气结构发展情况的报告。开始是一个概括的前言,然后详细地介绍已经建成的结构和规划中的方案,其中不仅介绍与建筑有关的充气结构,也介绍了其他方面,以便人们对充气结构能有一个比较全面的认识,同时对基本上可适用于房屋建筑的各种形式也加以肯定。图片部分所附的技术说明详细地介绍了充气结构到目前为止是如何建造的。通过对细节的分析归纳,就能对一个专门问题找到各种解决办法。最后两章是有关结构问题以及充气结构用

作薄壳施工模具的补充章节,第六章附有计算气承结构的表格。

本书初稿完成于1972年夏,然后进行了补充和修改,直至1974年初为止。我在斯图特加特大学建筑学院以及罗马马西摩别墅的德国学院进行了一段时间的研究,使我有时间和机会从事我的工作。

我感谢G. 明克和G. 莫拉皮托(Giuseppe Morabito),为本书提出了宝贵的意见;感谢为本书做编辑工作的A. 门杰斯(Axel Menges);感谢U. 普雷恩(Ursel Prehn),他为收集资料付出了辛勤的劳动。

同时我要特别感谢R. 哈歇尔(Reiner Hascher), C. 黑菲尔(Claudia Hafele), E. 黑尔措格(Erna Herzog), 尤其是我的妻子V. 黑尔措格-洛阿勃尔(Verena Herzog-Loibl),没有他们的合作,这本书将永远不会完成。

T. 黑尔措格

第一章

充气结构的现象

(一) 引言

一片只能承受拉力的柔性薄膜,如果受到一种有差压的气体(通常为空气)压力时,呈现出充气(充气“pneumatic”来自希腊字“pneuma”,表示吸空气)的形状。它朝着气体密度低的方向变形,直到它的外形无论是位置还是形状都稳定为止。

每一个充气受压的薄膜都能承受外力。利用这种能力可使加压介质变成支承介质,即成为一个结构物件。这样所形成的结构就是充气承重结构。这种结构可以是单层、也可以是双层薄膜承重结构。所谓单层还是双层薄膜结构,是根据使用空间和外界之间的薄膜层数决定的。图1和图2清楚地表明了它们之间的主要差别。图3~6是进一步的图例,图3和图4是单层薄膜结构,图5和图6是双层薄膜结构。

图1、3、4的支承介质必须是空气,其密度必须对生理无害,图2、5、6的支承介质可以用其他气体或高压空气。这两种情况都必须使加压区尽可能不漏气。这些结构称为封闭式充气结构(它包括迄今已知的所有充气房屋或房屋的某些部件)。然而,就薄膜本身而言,它可以是密闭的——除了为调节压力而开些小孔;也可以是构成外形封闭的空间体的一部分。后者的薄膜是敞开的,而充气房屋是封闭的(图1~4)。

如果充气受压的薄膜不构成一封闭的空间体,或者也不是封闭空间体的一部分,那就称为敞开式充气结构。这种薄膜的形成,是为了更有效地利用气压作为部分能源(如帆,降落伞,风筝)。

(二) 充气结构的设计规则

迄今为止,几乎所有的充气结构都是采用只有轻度弹性的薄膜,它们必须依靠精确的裁剪以形成最后的形状。为了确定这种形状,可以用 $0.1\sim 1\mu$ 厚的肥皂膜模型。它们有内外液表面,而不像水滴只有外液表面。

就其表面而言,用肥皂膜形成的各种体形都可以认为是“理想”的充气形状,因为,由于肥皂膜的流动性,总是在薄膜表面每一点的薄膜应力相等时形成这些形状。在规定的边界条件下,总是可以获得最大的体积和最小的表面积。归结起来就是最小表面积问题,这样就可以得出一个关于材料使用的最佳形状。在跨度小于10cm的肥皂膜模型中,自重及其产生的变形是如此之小,因此一般可以略而不计。

下面将对边界面的最重要的设计规则作简要叙述(详细说明见文献22、119、167)。任何情况下由外力引起的变形都略而不计。

如果一肥皂膜自由悬浮于空中,那就不受任何边界条件的限制,它只受肥皂膜分子间的凝聚力和内部有关压力的影响。薄膜形成了球面,球面是曲率不变即曲率无奇点的唯一表面(图7),它适用于任何稳定液表面关系的一般公式^[167p.16]。也适用于所有肥皂膜的试验,公式如下:

$$p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

对于球体这一特定形状,由于 $r_1 = r_2$,所以

$$p = \frac{2\sigma}{r} = \text{常数} \quad (2)$$

或
$$\sigma = \frac{p \cdot r}{2} \quad (2)$$

其中: p —泡膜内的压力

σ —表面拉力

r_1 —最大表面曲率半径

r_2 —最小表面曲率半径

由于球体中两个曲率半径是相等的,所以其外形为同向双曲或各向同曲。

从公式(2)所显示的相互关系中我们可以看到,由于不同大小的泡泡曲率半径不同,比较小的泡泡的内压必然比较大。无数事实证明,当两个肥皂泡接在一起时,小的一个会向大的一个充气(图8^[167p.117])。

圆筒体表面也符合公式(1)的平衡条件,但圆筒体不能做成无限制的表面,因此必须把两端封住。如果用线圈框住圆筒体薄膜,并用球缺面将两端封住,那么这个球缺面的半径,即公式(2)的球体半径应是圆筒体半径的一倍(图9)。这样的圆筒体表面称为单曲。

如果用球缺面封住圆筒体的两端,而所选用的半径和圆筒体相同,那么“圆筒体的母线”与球缺面正切相交(图10)。

这时,球体表面的薄膜拉力 σ_1 不变地延续为圆筒体表面的纵向拉力,因此,所得的横向或环向拉力 σ_2 就为 σ_1 的一倍,即圆筒体的横向或环向拉力

$$\sigma = p \cdot r \quad (3)$$

这在很大的风荷载下会使建筑物倒坍。

如果肥皂泡浮于介质较密的液面上,薄膜表面的拉力就会引入这种较密集的介质边缘(图11)。较高的内压迫使肥皂泡的底面略微下沉。肥皂泡形成一个同曲率的薄膜半球体,它的横截面则与流体的上表面形成一个圆环。如果引进更多的边界条件,那就会有不同于这个圆环的各种横截面。

例如,使用一个三角形或四边形的金属线框,那么在角的区域就可以形成反向双曲面或各向异曲面,也称为马鞍形曲面(图12、13)。

同样,根据肥皂泡的大小,采用加以“限制”的金属线圈,就能在限制部位获

得受到强制程度不同的各向异曲面(图14、15),人们可以发现无数充气受压的肥皂膜体形与所用的剖面形状是一致的(图16)。

几个泡泡总是趋向聚合在一起,而聚合在一起的泡泡其外层总是趋向构成圆形,也就是说,其体积总是趋向于占据最小的表面积。

若有四个泡泡粘聚在一起,它们的大小相同,内压相等,那么就会形成完全相等的球形截面,而其中所有内膜都是平的。

如果泡泡的大小不一,那么内膜向大的泡泡方向拱出。这个弧形的半径与泡泡的半径有直接的关系,即:

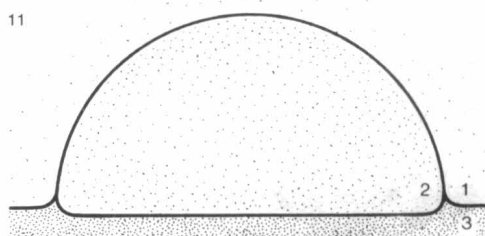
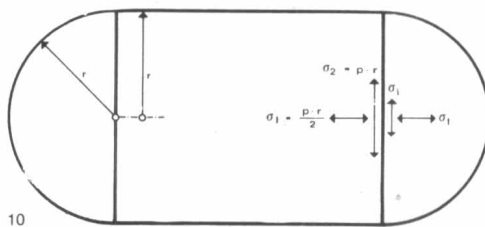
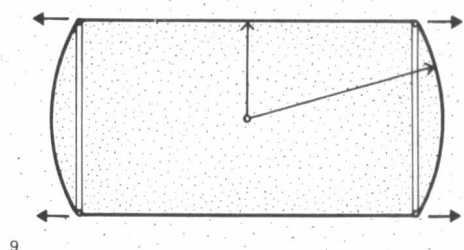
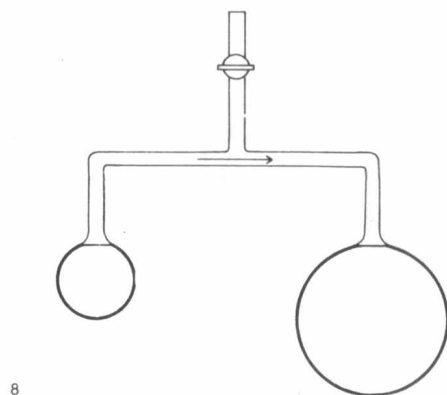
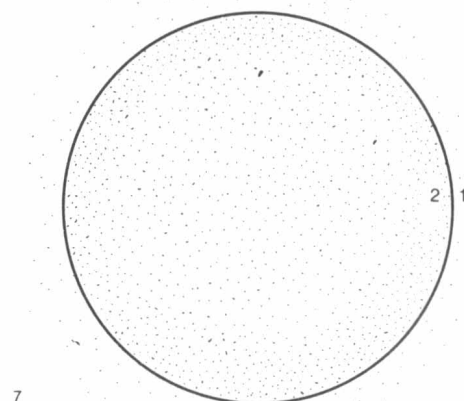
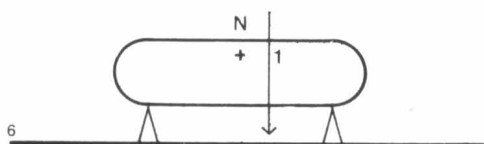
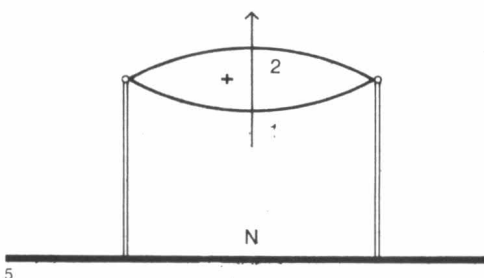
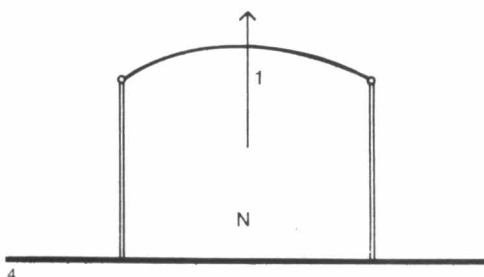
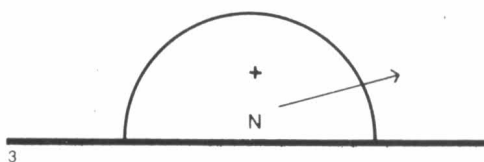
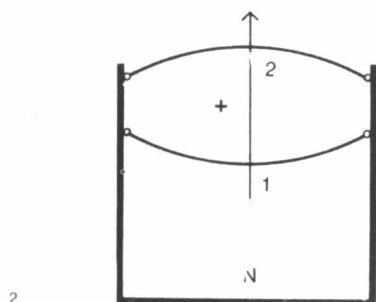
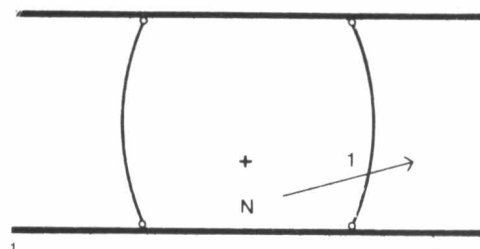
$$r_3 = r_1 \cdot r_2 (r_1 - r_2) \quad (4)$$

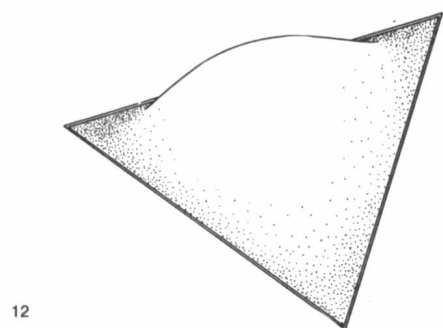
三个薄膜只能相交于一条边,而四条边或四个泡泡只能相交于一点。薄膜的交角永远是 120° , 而四条边形成的角永远是 $109^\circ 28'$ (莫朗弟角 Morandi Angle)。

图17是简单的泡泡结合体,较多的三向聚积称为泡沫。如果这些泡泡的大小相等,那么里面所有泡泡的接触面都是平的,并且形成多面体空间(图18、19),只有外层薄膜是曲线形的。如果这些泡泡的体积大小不一,那么按其大小里面的薄膜就由许多凹凸程度不同的单层薄膜组成。这就意味着只要外形接近球形截面,各种充气结构都能建成。而且,只要增加内应力,结构的总尺寸从理论上讲可以无限扩展(模拟泡沫),问题只是薄膜的强度限制了它的尺寸大小。

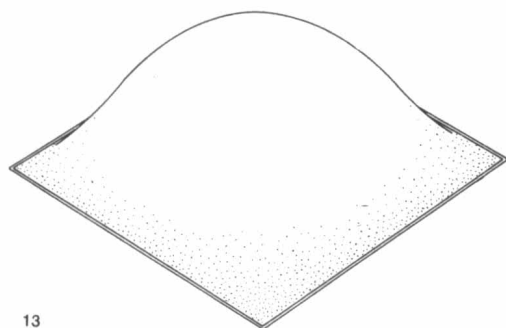
当所研究的充形状,其表面每一点的薄膜拉力不相同,从而不能用肥皂膜模型时,则可利用厚度 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$ 的有弹性的橡皮薄膜模型,但要在它的弹性极限内。

利用这类薄膜可以塑造出任何形状,使排成一条直线或曲线的许多球状体内接起来时不留下多余的体积^[119]

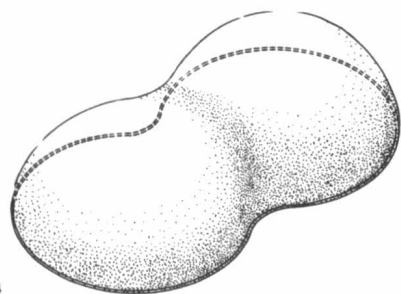




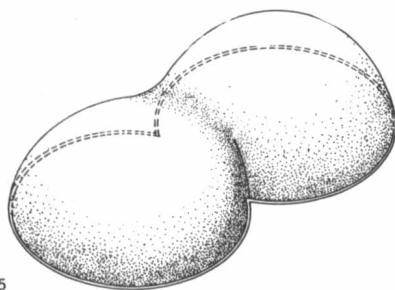
12



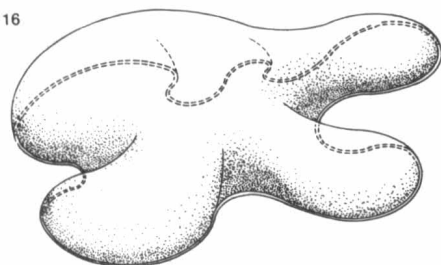
13



14



15



16

10

(图 20、21)。它可以形成单向弯曲的, 各向同曲的和各向异曲的表面积。

在曲率半径小的地方, 由于薄膜拉力相应减弱而产生不稳定区。

如果给薄膜以负压力, 那么就像有假想的球体作用其外部上表面, 因为这种情况下薄膜受到的是周围大气的相对正压力。然而, 总是要有附加稳定物件, 不可能只有薄膜而没有边界条件的“自由”的负压结构(图 24~27)。同时, 在估算表面拉力时, 曲率半径始终起着决定性的作用。

用肥皂泡造型时必须有金属边框, 在用非弹性或轻度弹性的材料做充气结构时, 也必须有一定的边界条件。否则会因薄膜上各点拉力的悬殊而造成皱摺。例如会使一个以方形垫子为其基本造型的结构有形成球状的趋势(图 28)。这时皱摺的反方向没有拉力, 为了产生必要的拉力以抵抗外力, 就必须另外增加支承构件(图 29)。

在出入口、窗洞和鼓风机的连接点等处, 薄膜是开孔的, 也应遵循专门的设计规则。

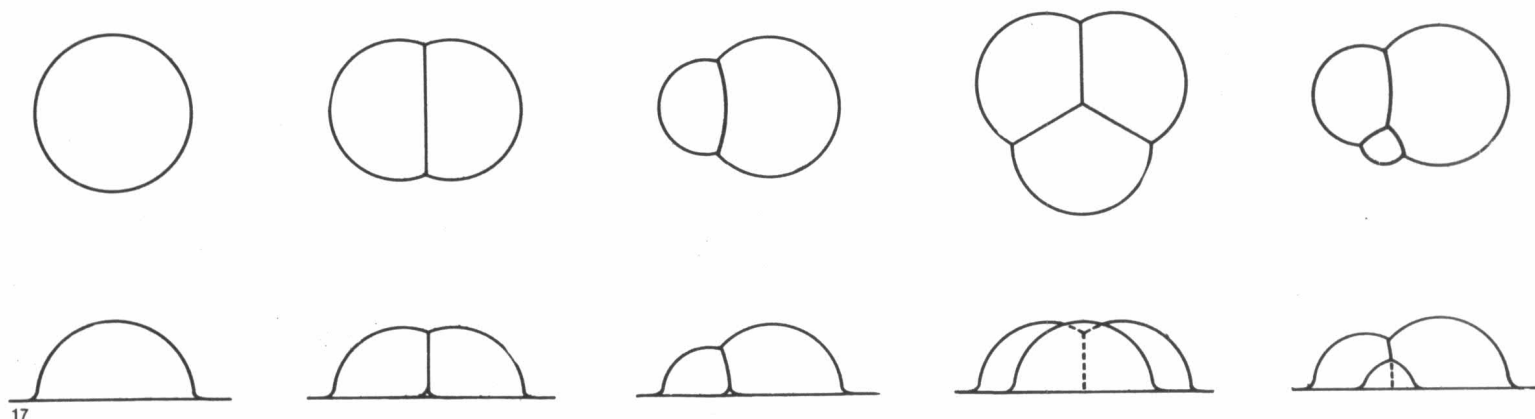
如果在一平铺于金属环上的肥皂膜中放置一个线圈, 并把线圈中的肥皂膜戳破, 那么这线圈就会由于所有的拉应力相等而形成一个圆(图 30、31)。

如果把一根松懈的线扎于金属环的两处, 并戳破薄膜, 那么这根线就会形成一段圆弧, 如图 32 和图 33 所示^[167]。

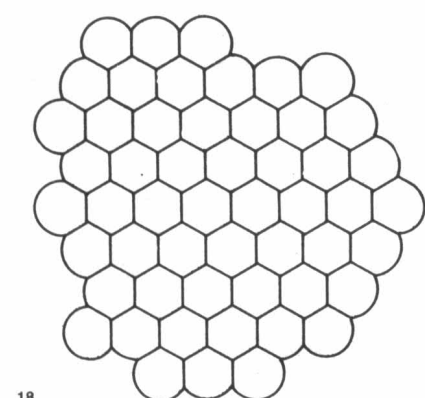
当用受拉钢索传递力时, 薄膜的边缘构造必须考虑上述因素。

如果薄膜中不同方向的拉力是不等的(如在端部为半球形的圆筒体中), 为了防止皱摺, 孔口的形状必须和这些力相适应。

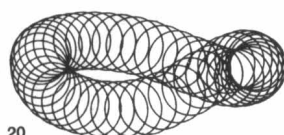
由于充气结构的薄膜除了特殊形式外, 不构成平面。因此, 孔口曲线会相应产生三个方向的扭曲。



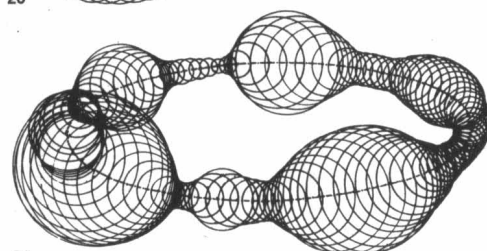
17



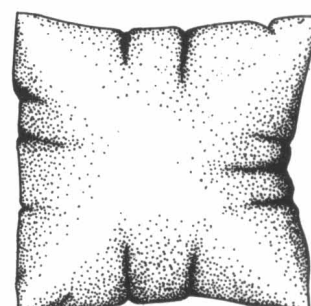
18



20



21



28

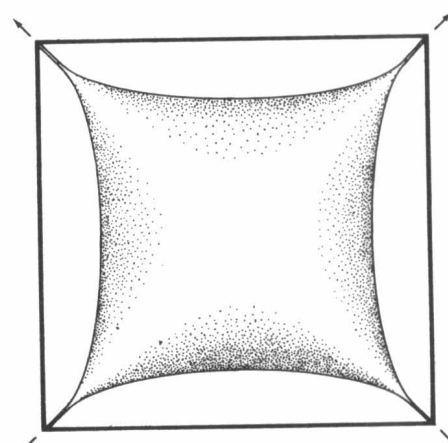


19

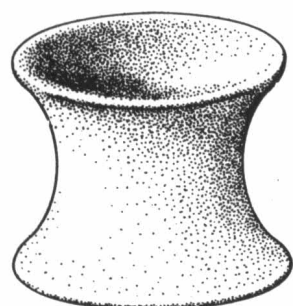


22

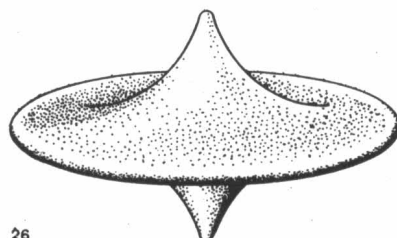
23



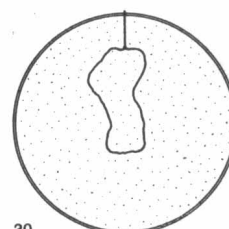
29



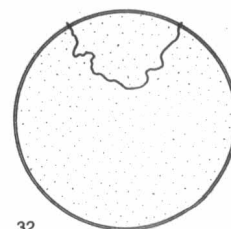
24



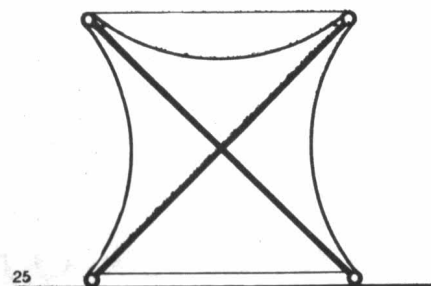
26



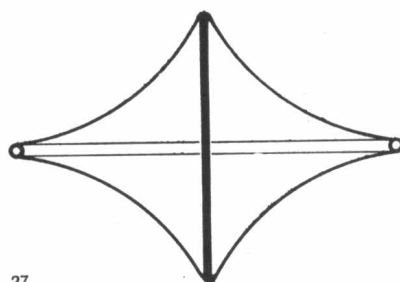
30



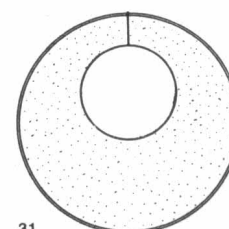
32



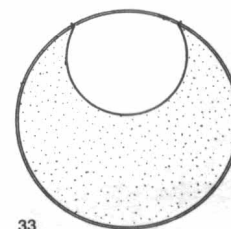
25



27

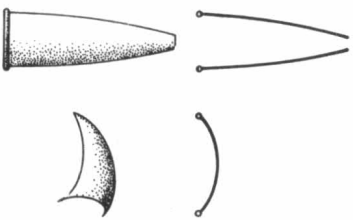
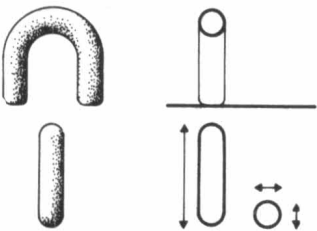
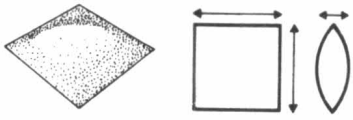
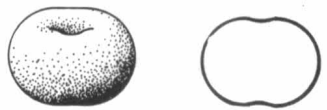
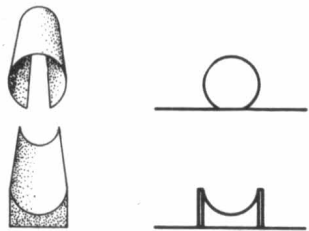
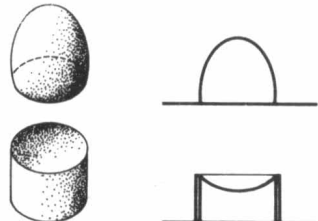
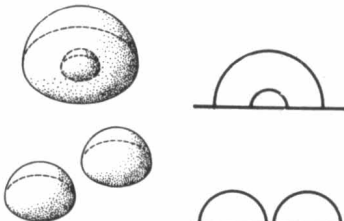


31



33

表 1 充气物体的形态分类

特征	选型方案			
薄膜类型 结构类型 6 种选型方案	薄膜敞开 结构敞开 	薄膜封闭 结构封闭 	薄膜敞开 结构封闭 	
结构比例 7 种选型方案	一个主要尺度 	两个主要尺度 	三向尺度大小相似 	
曲线类型 7 种选型方案	单曲 	同向双曲 	反向双曲 	
连接类型 7 种选型方案	不连接 	叠加体		
		相同结构 	不同结构 	

结合形式

薄膜敞开和薄膜封闭 结构封闭



薄膜敞开 结构敞开和结构封闭



薄膜敞开和薄膜封闭
结构敞开和结构封闭



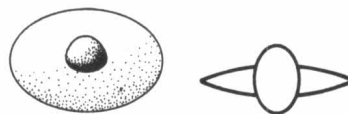
一个主要尺度和
两个主要尺度



一个主要尺度和
三向尺度大小相似



两个主要尺度和
三向尺度大小相似



一个主要尺度 两个主要尺度
和三向尺度大小相似



单曲和同向双曲



单曲和反向双曲



同向双曲和反向双曲



单曲同向双曲和反向双曲



组合体

叠加体和组合体

相同结构



不同结构



相同结构



不同结构



(三) 充气结构的形态分类

表1的充气结构分类是按形状特征来叙述和比较的。当然有比这种分类更多的现象变化,但作者仅局限于已使用过的类别,因为这样能更好地以常用的术语,而不用另外的标准和公式提出分类方法。

如前所述,充气结构可以是敞开的或封闭的。同样薄膜也可以是敞开的或封闭的。

在“设计规则”一节中已说明,球体及其截面是最佳的充气结构形式,因为它的表面应力相等。既然认识到球体是一种三个方向比例相同的结构,那就可以按各向比例的差异来区分与此不同的各种结构形状。

因此可以得出结构之间的区别如下:

——两个方向尺寸相同,而一个方向尺寸较大,如“管”、“杆”、“柱”、“塔”等。

——两个方向尺寸相同,而一个方向尺寸较小,如“坐垫”、“透镜”、“铁饼”、“床垫”等。

——三个方向尺寸相同,如“气球”、“球”、“球体”、“泡泡”等。

当然有介于这些变化之间的情况。所以确定结构形态要以主要伸展方向作相互比较,如一结构的宽度是长度的一倍,而其高度仅是宽度的三分之一,那么宽度和高度之间的关系是其分类的决定因素,而绝对尺寸在区分时不起作用。

至于形状,可以根据外表面的曲线类型作进一步的分类。

如前所述,它可以是:

——单曲的,

——同向双曲的或各向同曲的,

——反向双曲的或各向异曲的。

在有内表面的充气结构中也有平的薄膜,其边缘和外表面的薄膜是连接的(如同许多大小相等的肥皂泡之间的内膜)。然而这些薄膜并不稳定在平面

上,因为没有压差。它们是通过作用于边缘的拉力而拉紧的。

再进一步,可按一个物体是单个的充气结构还是几个充气结构组合成的,以及这些组合结构是相同的还是不同的情况来分类。

如果这些结构是互相连接而不可分的,那它就是一个组合体。这种情况下,相邻的构件共同占有薄膜,因此只有破坏一个构件才能使在它前后的部分分离(图22、23)。

如果它们是可分的结构,那么通过解开连接装置(同样可用于装配)就能使之互相分离。由这些单个结构连接成的物体称为叠加体(叠加和组合这两个术语也用来说明支承结构的连接特征)。

单个结构间的连接方式是重要的,因为这涉及到生产、安装、拆卸、运输体积、预制、结构细部的发展以及损坏部件的调换等方面。

表1的前三行表示各种充气结构形态上的区别。每一横行列出它们之间不同的特点,并表明可以采取什么样的混合形式。

第四行描述了单个充气结构连接到一个构件上的几种可能类型。

在第一行中,对“薄膜类型”和“结构类型”已经加以归纳,因此它们只可能有图中所示的情况(封闭的薄膜和敞开的结构连在一起是不可能的)。

这个表示方式采用的原则是以形态学箱为依据的^[168],每一选型方案都可以和其他选型方案联系起来。

图例应该说明构件的实际特征。代表简单构件的简图也包含其他各行选型的特征,但那些特征是分行的依据,因而在其他各行中专门列出。

按照形态学的观点进行上述分类,对一个充气物体大约可有2000种不同的选择。其中有些结合初看起来似乎是毫无意义的,但是表格中任何一种方案都不应该被排除。因为到目前为止,只

实现了或设计了其中的一小部分,而且这个表也必然有助于通过其他新的结合形式来找出新的方案。

按照造型规则用图解列出所有的形状是不可能的。尽管大家都会采取象几何图形(圆筒体、球体、圆锥体等)这样的判别标准,而且在参考书中也有这种做法,但这种方法应该抛弃,因为它所提供的形状范围有明显的局限性。大家乐于采用简单几何图形结构是由于能更好地利用薄膜材料,简化制作过程与计算程序,并实现标准化。但标准型式只能代表许多可供选择的形状中的一部分,而不是全部。

第二章

充气房屋——充气稳定薄膜结构的结构设计选型

G. 明克

(一) 引言

1. 调查研究的作用和目的

用空气支承的房屋已列入已知的最轻建筑物行列中。例如重量仅 $1\sim 2\text{ kp/m}^2$ 的大面积覆盖物,覆盖跨度可达 100 m 。

人类利用正压稳定薄膜的原理已有几千年,然而它被运用到建筑技术中大约只有 25 年的历史,因此一些有关问题仍待探索。

为了对所采用的充气稳定结构或承重构件作出正确的判断,就必须对结构选型进行基本研究。通过对下列不同体系和类型的充气稳定薄膜结构的系统阐述,就可以对这些轻型结构的各种形式作一全面考察。

在这个考察过程中,对不同体系都要进行充分地讨论,而代表各个体系特点的各种类型只举部分实例论述。

2. 术语的定义

一个承重结构具有在指定边界条件下传递某些力的作用。它可以依靠特定的支承体系和特定的支承形式。

所谓结构体系指的是静力学的体系,而不是指形式上或实体上的体系。如果在一承重体系中有附加的(辅助的)稳定构件,那么根据附加构件的类型和构成方式,可把这个体系合理地分成几个次体系,这些次体系称为结构类型。当知道一个结构的纵向和横向比例时,就可归属为一种结构形式。因此,这种结构形式肯定是一种形式上而不是实体上的房屋。如果除了体系和形式外,还知道房屋的材料和尺寸,即当它是一所实体房屋时,那就可以归属为一种承重结构。如果这种结构最终还够不上承重

结构条件,或是指一定数量的结构时,那就采用结构种类这个术语。

如果充气结构的功能只作为一种承重结构来考虑,那么充气结构是利用差压稳定的承重结构。这种差压对结构的承重功能来说是必需的,因此差压就成为结构的一部分。根据这个定义,帆、热空气气球和降落伞就不是充气稳定结构而是充气加压结构。如果“充气”这个术语是指直接稳定,那么它只能指用柔性的表面材料制作的承重结构,即薄膜承重结构。而用弯曲的但坚硬的表面材料构成的承重结构,即使它们也受到充气的压力(如高压容器)或加以充气稳定但也只是“壳”。所以,采用“充气稳定薄膜结构”这个专门化的术语来取代“充气结构”这个通用术语。

一个平面稳定的薄膜结构,如果用液体或颗粒物代替气体作为稳定的介质,一般说来其形状和承重作用不会发生显著变化。所以在这三种平面稳定的薄膜结构中都采用“充气结构”这个术语往往是错误的(表 1)。

下面讨论的只是“房屋”,即可以进得去的、人工制造并固定在基础上的结构。至于家具、容器、各种气控结构(气垫车辆、气流计数器)和风动结构(帆、风车帆)等不包括在内。

3. 鉴别标准和选型

充气稳定薄膜结构可按一系列不同的特征作进一步的分类:

- 差压类型,
- 差压程度,
- 支承介质的类型,
- 薄膜的构成,

- 薄膜的层数,
- 附加稳定构件的尺寸,
- 附加稳定构件的构成,
- 附加稳定构件的布置,
- 表面曲率的类型,
- 主要扩展方向的尺寸,
- 大小,
- 常用类型,
- 薄膜材料的类型,
- 可变量。

上述各个特征都有其不同的“特点”。例如,区分差压类型的两个“特点”是:正压和负压。也就是正压体系和负压体系的区别。

表 2 中充气稳定薄膜的十一个特征(鉴别标准)是以“形态学箱”的形式用 $2\sim 9$ 种不同的特点表示的。^{*} 由茨维基(Zwicky)^[108]所作的这个著名的分类法不同于其他方法,能对繁多的特征和特点作一简单而清晰的表达,因而有助于掌握各种各样的变化。但是,采用这个方法时必须把问题范围内(这里指充气稳定薄膜结构)的主要特征详细地确定下来。表 2 中每个特征的各自特点都列在每一行中。把每一行中的每个特点组合起来可以得到 $1,492,992$ 个不同的变化。然而,由于有些组合是相互排斥的(不相容的),所以只有 $250,560$ 个真正的(相容的)选择方案。在这一分类法中,前三个特征的特点决定了结构体系。对低压体系的分类来讲,还应有附加支承种类中点式(b)和线式(c)支承相结合的情况。^{*} 这样就有 16 种不同的结构体系。这些已在表 3 中列出,并将在第(二)节中阐述。在这些形态学箱中没有表示出同一特征中不同特点的各种组合情况;虽然这些组合基本上是可行的,但不利于清晰地表达精选的分类方式。如

^{*} 这些特征只局限于低压体系,因为高压体系(在本章第(三)节中有更详细的阐述)具有不同的结构功能,因而有很多不同的特点。

表 1 薄膜结构的分类

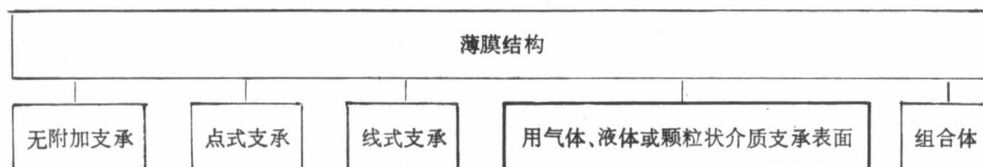


表 2 用“形态学箱”方式作的充气稳定薄膜结构的分类

编号	特 征	分 组	特 点	变 化
1	薄膜构成	结构体系	a)单层 b)双层	2
2	压力种类		a)正压 b)负压	4
3	附加支承种类		a)没有 b)点式 c)线式	12
4	附加稳定构件的构成	结构类型	3b: a)花瓣状 b)环状 c)圆凸面 3c: d)缆索 e)桁架 f)拱	28
5	附加稳定构件的布置		3b: a)单个 b)成排 c)交叉 d)径向 e)不规则 3c: f)单个 g)单路 h)径向 i)相切 k)双路 l)三路或三路以上 m)不规则	148
6	第三种支承的构成		3b)c: a)没有 b)受拉 c)受压 d)受弯	580
7	主要扩展方向的尺寸	结构形式	a)单向 b)双向 c)三向	1740
8	曲率的种类		a)单曲 b)同向双曲 c)反向双曲	5220
9	薄膜材料种类	结构种类	a)弹性 b)热塑性 c)无弹性/可调整 d)无弹性/刚性	20880
10	跨度		a)<20m b)20~100m c)>100m	62640
11	附件种类		a)没有 b)单向 c)双向 d)三向或多向	250560

* 关于所建议的这个分类法的分析和综合作用,曾对已建成的承重结构和已设计但还没实现的承重结构进行过试验。由作者指导下列研究班进行:汉诺威工业大学,1970年1月;德尔夫特工学院,1971年2月和1971年9月;乌尔姆环境规划学院,1971年12月。后面的各体系图均引自这些研究班的报告,或是以他们进行的研究为基础的^{[83][64][123]}。

果把不同特点的所有可能组合的情况都考虑进去,那么可能组合的数量将大为增加。

特征4~6的各种特点决定了结构类型。但应该指出这种区分只在有附加辅助支承的结构体系中才会遇到。所以这些结构类型只能看作是它们的次体系。这将在第(二)节的4中作较详细的说明。

特征7和8的各特点描述了结构形式。而特征9~11的各特点述及了作为一个实体建筑物的承重结构,即结构种类。

按照这十一个特征和它们的特点能够区别和描述出250,560个不同种类的承重结构。

用所介绍的形态学箱的方式,有条不紊地按程序进行分类,有助于发现新的支承结构或编出一览表,或列出判别各种承重结构的标准的表格。

尽管这种表示方式能清楚地表明大量不同种类的结构,但要形象地看出充气稳定薄膜结构的各个体系和类型还是不太方便的。而模型则是最符合上述要求的。下面几节将介绍充气稳定薄膜结构在结构构成方面的各种可能性。但只考虑确定不同结构体系和类型的特征1~6(表2)。用于确定结构形式的特征7和8已经在论述充气结构现象的第一章第(三)节中介绍过。

用于确定承重结构种类的特征将不在这里作更详细的探讨。

(二) 低压体系

1. 一般特征

综观充气稳定薄膜结构的各种体系,可以把它们分为两个基本体系:低压体系和高压体系。

低压体系中(表3),被薄膜分隔的介质的差压一般在10~100mm水柱。薄膜受到的是10~100kp/m²的正常压力。高压体系中,一般是2,000~70,000mm水柱。即薄膜处于2,000~70,000kp/m²的差压下。这两组体系的静力作用变化将在本章第(三)节中叙述高压体系时加以说明。

2. 单层薄膜体系 双层薄膜体系

按照薄膜的构成,低压体系可分为单层和双层薄膜结构。在单层薄膜结构中,处于正压或负压下可以进去的空间是用一层薄膜形成或围成的。而在双层薄膜结构中,由薄膜结构形成或封闭起来的可以进去的空间是不处于正压或负压下的,此时包围着支承介质的薄膜总是向相反方向弯曲。根据它们的外貌,双层薄膜也称为“气垫结构”。由于有些作者也以此称呼高压管状结构(见本章第(三)节),所以这里不用此名。

3. 负压体系 正压体系

低压体系的第二种区分是按内压的类别分为负压体系和正压体系。这种区分初看似没什么意义,因为只有被薄膜分隔的介质的差压对结构稳定才是重要的。但正如表3的图中所示,不同类的差压对结构形式有巨大影响,因而也给结构的边界构成方式、薄膜的静荷载和动荷载以及空间形状以巨大影响。

正压体系的薄膜永远是凸曲的,而负压体系的薄膜除了在辅助支承区域外,永远是凹曲的,因此负压体系的屋面上就常会有积雪和积水,并因风荷引起形状不稳。这些缺陷通常不会在正压体系中出现。不仅如此,负压体系往往还要求边缘或中心处有高的支承,即还要

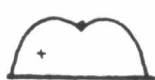
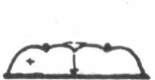
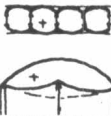
低压体系				
I 单层薄膜结构				
	0 无附加支承	P 附加点式支承	L 附加线式支承	P+L 附加点式和线式支承
I n 负压	I n 0 	I n P 	I n L 	I n P+L 
I p 正压	I p 0 	I p P 	I p L 	I p P+L 
II 双层薄膜结构(内部充气)				
	0 无附加支承	P 附加点式支承	L 附加线式支承	P+L 附加点式和线式支承
II n 负压	II n 0 	II n P 	II n L 	II n P+L 
II p 正压	II p 0 	II p P 	II p L 	II p P+L 

表3 低压体系分类

有昂贵的辅助结构。这些缺点使得负压体系迄今几乎未被采用。但应该指出,这些体系与各种正压体系以及高压管状结构结合时,在某些场合却是非常合适的。

4. 有附加支承的体系

(1) 类型和应用原理

低压体系的第三个特征是稳定薄膜所采用的附加构件,即辅助构件的种类。

从迄今已建成的各种大跨度气承房屋来看,附加支承原理的重要意义还没有很好地被理解,因此这个原理的特点及其应用将在本节和以后各节中作详细的研究。

薄膜表面的附加支承(例如缆索)一般适用于大跨度结构,以减小曲率半径,从而可减小薄膜中的拉力。这样,即使

跨度很大,也能采用制作和加工简便的普通柔性薄膜材料。下面将阐明这个原理(图1):假定气压相等,那么气承房屋为一半圆形的截面(A);当跨度加倍时,薄膜中的应力也加倍(B)。但因为总高度也加倍,所以由风力引起的应力就增大。为了达到与图1A同样的稳定,图1B必须增加内压,但这样就使得薄膜应力更增大。图1B的另一个缺点是相对于底面来说,室内容积较大,因此采暖和加压所用的能源费用需增加。

如要避免这两个缺点,就必须减低气囊的高度,使C和A的最大高度相同,并有相同的内压,这时C的薄膜应力比A大2.5倍。因此,如果希望加大跨度而不增大容积和薄膜拉力,那么唯一的方法就如图1D那样,借助附加稳定构件来减小曲率半径。