

综 述

# 固定顶油罐的罐顶结构

孔 昭 瑞\*

(江汉石油学院)

孔昭瑞:固定顶油罐的罐顶结构,油气储运,1997(10)16,1~5。

**摘 要** 全面介绍了工程上常见的一些罐顶结构形式,并对各自的结构特点、使用范围及应用情况进行了简述。通过分析认为,目前国内新开发的球面网壳顶,对容积在  $10\,000\text{ m}^3$  以上的大型固定顶油罐具有一定的推广价值,但有几方面的问题应予以注意:此种罐顶结构的理论分析、设计计算和施工中的构件预制及罐顶安装等比较复杂,需要具备资格的单位来完成;选择技术可靠和实用性强的网格结构使之推广,并不断进行完善;对与使用安全有关的技术问题要给予足够重视。此外,对其它罐顶结构形式也应予以充分地考虑。

**主题词** 油罐 固定顶油罐 罐顶 罐顶结构

固定顶油罐是指储存原油或液体石油产品的钢制固定顶立式圆柱形油罐(含内浮顶油罐)。这是一类应用最广的石油储存容器,其特点是结构简单、预制及安装方便,同时,建造成本及维护费用也都较低,使用安全性好;在加装内浮顶之后,还具有良好的防蒸发损耗性能。固定顶油罐由罐基础、罐底、罐壁、罐顶及配件等五部分构成,严格地讲内浮顶属于配件的范畴。其中,除了罐顶部分之外,其余四部分的结构形式对不同容积的油罐而言基本上都是相同的,故固定顶油罐是以罐顶结构的不同来分类的。

油罐属于化工容器,在设计中应考虑的首要问题是安全与经济。就是说,首先要考虑使用过程中的安全性,在此前提下要兼顾其成本,即每立方米储存容积的造价要尽可能低。当然,维护费用低、防耗效果好,也应属于经济性的范畴之内。在各国的钢制油罐标准中,对基础、罐底、罐壁及配件等的设计、选材及制作要求,都有很详尽、明确的规定。因此,对一座具体的固定顶油罐而言,其上述部分只要严格地遵循标准中的规定要求去做,使用安全性是可以保证的,同时,在经济性方面也没有很大的潜力可挖。可是各国标准对于罐顶结构却都给出了较大的选择范围,因此,在设计油罐时罐顶结构的合理选择便成为一个值得关注的问题。本文仅围绕这个问题作一些

粗略的阐述以供参考。

## 一、罐顶的作用

固定顶油罐虽然属于常压容器的范畴,但由于它储存的是具有一定蒸气压力的油品,同时在一定程度上又要求密闭,所以还是要求有一定承压能力的,只不过很低罢了。罐内设计正压力一般取  $2\text{ kPa}$ ,真空度取  $0.5\text{ kPa}$ 。上述载荷都要直接由罐顶及与之有关的构件来承受,除此之外,罐顶还要承受自重、雪载荷及活动载荷等。因此,罐顶的作用可以概括为下述几项:①在正常工况下对油罐起密闭作用;②承受外载荷,保证油罐的整体稳定性;③在一定设计条件下,当油罐内的正压力产生事故性超压时,罐顶应首先在其边缘处开裂使油罐卸压,从而保证不致引发重大事故。

## 二、罐顶结构对油罐造价的影响

除了有特殊需要的,或在地质条件很差的地方建造的油罐之外,固定顶油罐的造价主要取决于钢材用量及制作、安装费用。如上所述,在造价方面除

\* 434102,湖北省荆州市;电话:(0716)8431324。

了罐顶之外,其余几个部分在一般情况下是没有很大潜力可挖的,可以认为,罐顶成本直接影响油罐的造价。与其他部分一样,罐顶成本中占主要份额的也是钢材用量的多少。以目前国内应用最多的圆拱顶油罐系列为例,罐顶每平方米投影面积的钢材用量如图 1 所示。

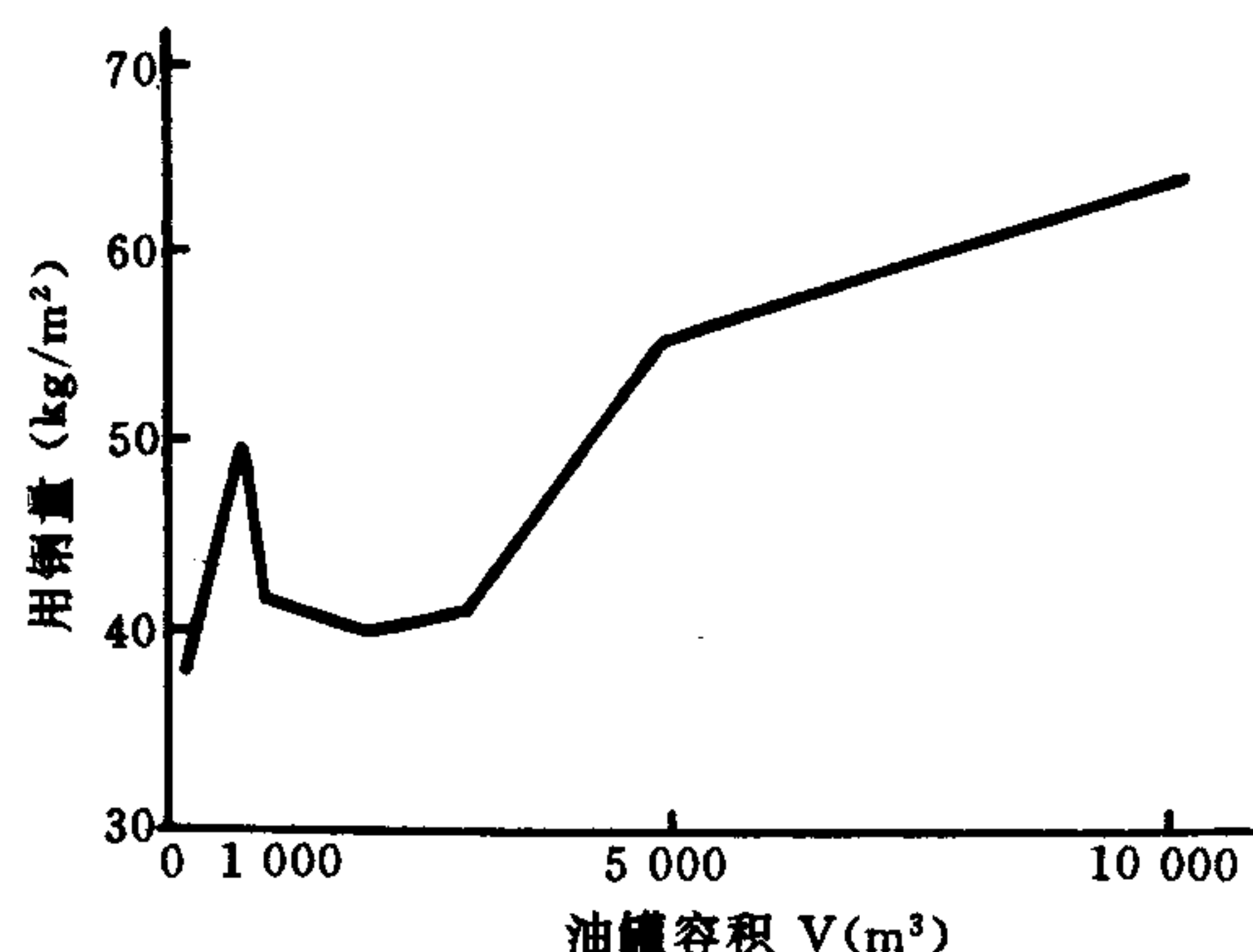


图 1 拱顶罐罐顶用钢量与油罐容积的关系

罐顶钢材用量在油罐钢材总用量(不包括配件)中所占的百分比,如图 2 所示。由图 1 可以看出,油罐容积自 2 000 m³ 开始,单位投影面积的罐顶钢材用量呈上升趋势,至 10 000 m³ 时已达 60 kg/m² 以上,至 30 000 m³ 时可达 100 kg/m²。

根据图 2 可以看出,油罐容积自 1 000 m³ 开始,罐顶钢材用量在总重中所占比例亦呈上升趋势,至 5 000 m³ 时已占总用钢量的 25 %。由于单位投影面积上罐顶用钢量的多少主要取决于罐顶的结构形式,因此,合理选择罐顶结构是大容积油罐降低成本的一个重要途径。此外,罐顶结构的预制难易程度

及其对安装方法的影响等,也对油罐的造价产生一定的影响,为此,在选择罐顶结构形式时亦应给予足够的考虑。

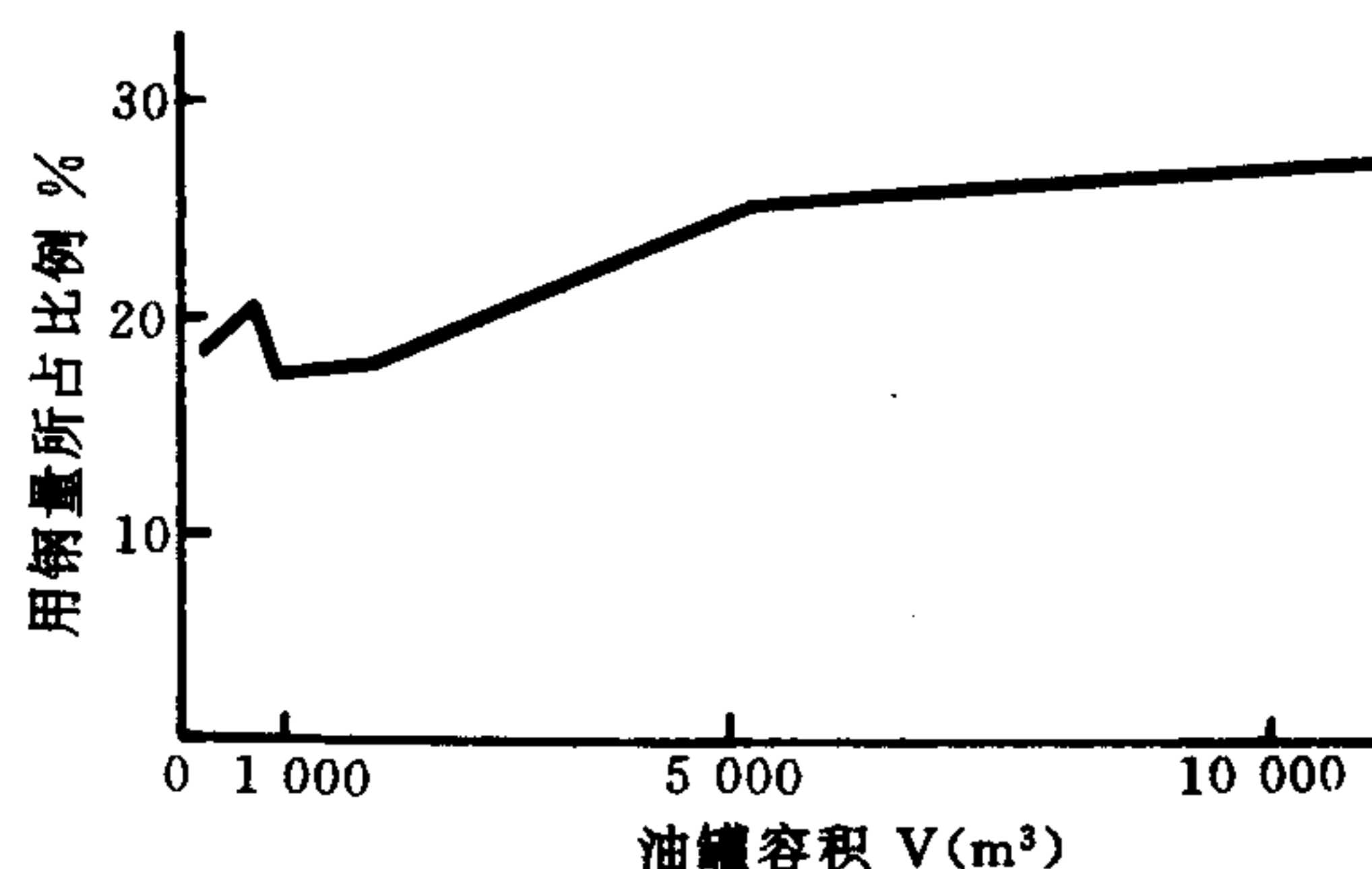


图 2 拱顶罐罐顶用钢量在油罐总重中所占份额

### 三、几种常用的罐顶结构

国内外固定顶油罐常用的罐顶结构大体上有下述四种类型,即锥顶(含梁柱式平锥顶)、无力矩顶、圆拱顶以及近几年随着油罐的大型化而发展起来的球面网壳顶。现将它们的结构特点、使用范围及应用情况等简述如下。

#### 1、锥 顶

它是油罐最早应用的罐顶结构形式,大体上可分为无构架的自支承锥顶、有桁架的自支承锥顶及梁柱式有支撑的平锥顶等三种形式,其结构简图如图 3 所示。

图 3(a)所示为无构架自支承锥顶罐结构,它依靠罐顶钢板来承受载荷,因此只能用于小容积的油罐上。

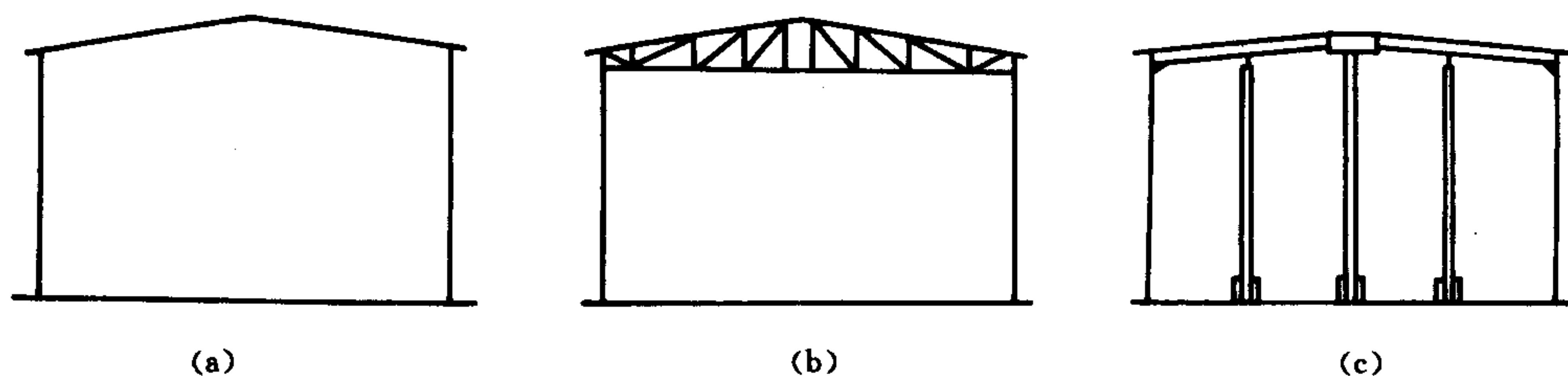


图 3 锥顶油罐结构简图

按照标准中的规定,它虽然可以用于直径不大于 7.5 m 的油罐(即容积在 300 m³ 以下),但从经济性的角度来考虑,实际上只能用于容积小于 100 m³ 的油罐。图 3(b)所示为有桁架的自支承锥顶罐结构,虽然使用了桁架而能够用于大容积的油罐,但由于单位投影面积上桁架的钢材用量是与桁架的跨度

成正比关系的,所以,这种锥顶结构一般也只能用于容积不大于 2 000 m³ 的油罐。图 3(c)所示为梁柱式有支撑的平锥顶罐,锥顶坡度可小至 1/16,同时又有立柱分担载荷,而且能够设计成“弱顶”结构,故可以用于 10 000 m³ 以上的大容积油罐。由于构件数量较多,且不宜用“倒装法”安装油罐,以及不利于加

装内浮顶等原因,近几十年来国内已经极少使用这种结构的罐顶。

## 2、无力矩顶

无力矩顶油罐的结构简图如图4所示。它的罐顶形状是一个由悬索线绕中心轴线旋转而形成的凹锥面,中心部位有一根可以沿轴线上下滑动的支柱,罐内压力升高时整个罐顶可随支柱上举(如图中虚线所示),使罐内气体空间加大,从而减少罐内烃蒸气的外逸;罐内压力下降时,罐顶则随支柱下落,使罐内气体空间减小,避免了吸入罐外的新鲜空气,以减轻罐内液烃的再次蒸发。因此,采用这种罐顶结构的无力矩油罐具有一定的减少油品蒸发损耗的作用。此外,由于这种罐顶在承受内、外均布载荷时均仅受拉力,所以罐顶可以用较薄的钢板制作(一般厚度为3~4.5 mm),故罐顶自重很轻。无力矩油罐是50年代中后期在引进前苏联技术的基础上由原石油部北京石油勘察设计院设计的,设计容积为100~10 000 m<sup>3</sup>,其中100~5 000 m<sup>3</sup>的无力矩油罐为系列定型设计,在50年代末到70年代初的10余年中曾在国内大量建造。此后,由于悬索旋转体本身的一些固有不足之处,以及某些客观原因,它逐渐被圆拱顶油罐取代。但应该指出的是,在所有罐顶结构中悬索转体是最轻的一种,每平方米投影面积的钢材用量仅为25~50 kg。

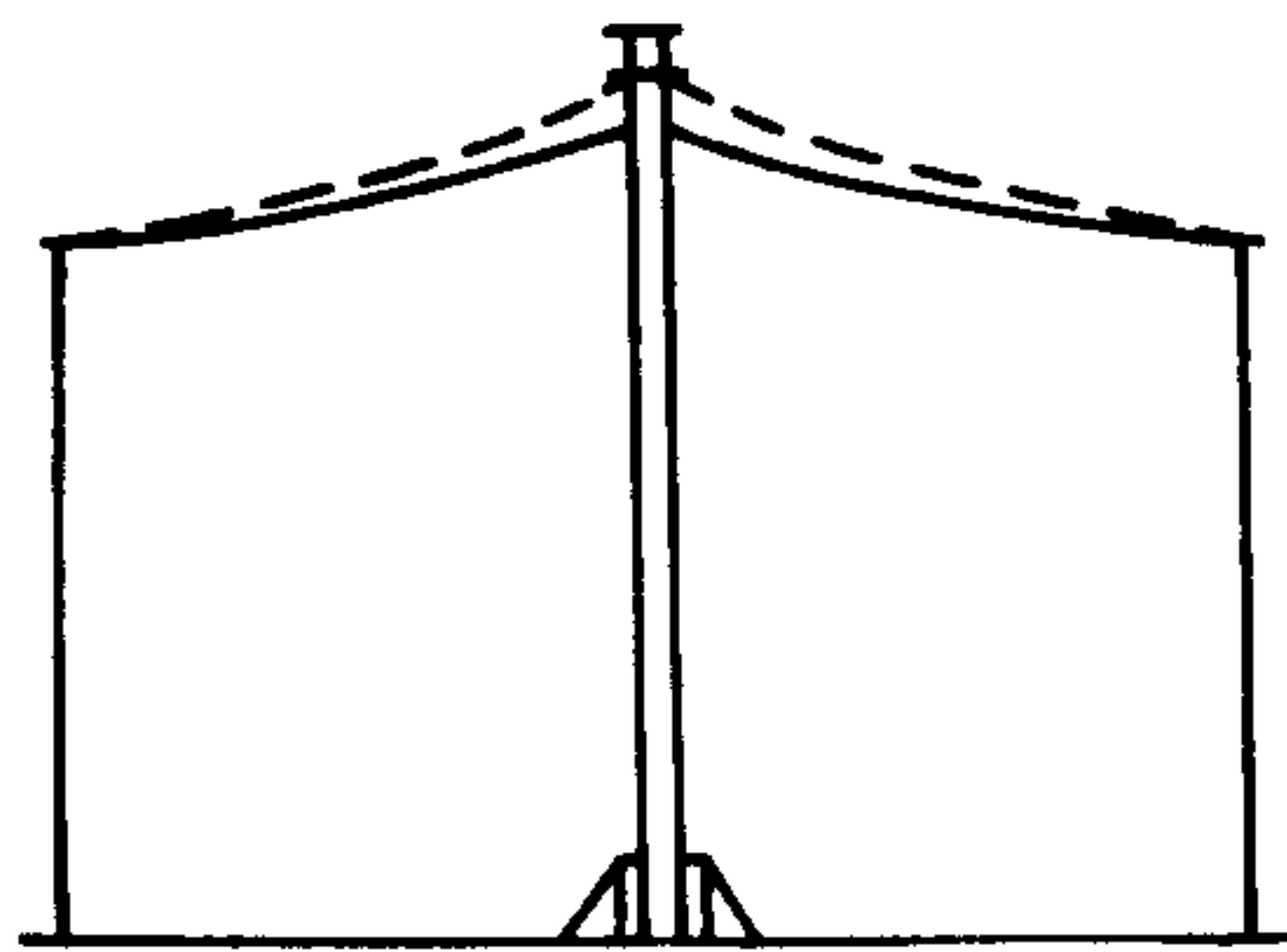


图4 无力矩油罐结构简图

## 3、圆拱顶

圆拱顶油罐的结构如图5所示,其中图5(a)为不带肋的圆拱顶罐,图5(b)为带肋的圆拱顶罐。通常,前者用于容积在1 000 m<sup>3</sup>以下的油罐罐顶,后者用于1 000 m<sup>3</sup>以上(含1 000 m<sup>3</sup>)的油罐罐顶。这类罐顶是由一段球壳构成(即扁球壳),其截面圆直径基本上与油罐直径 $D$ 相等,球壳半径 $R$ 一般在 $0.8D \sim 1.2D$ 之间选取。因此,在承受罐内压力时球壳段的各个方向均受拉,承受外载荷时则全部受压,即使在集中外载荷的作用下内力也可以很快地

得到分散,所以材料的局部效能可以得到较充分地发挥。基于上述各点可以认为,在上述几种罐顶结构中圆拱顶的强度和刚度都是很好的。由于上述优点,以及便于安装等原因,自70年代至今,这种罐顶结构在国内几乎成为独一无二的罐顶形式。但是,为了使罐顶在承受外载荷时不致于因失稳而破坏,制作罐顶的钢板必须有足够的厚度(或折算厚度),因此,由前面的图1、2可以看出,当油罐容积达到10 000 m<sup>3</sup>时,这种罐顶单位投影面积的钢材用量已超过60 kg/m<sup>2</sup>,且随容积的继续增大呈上升趋势。所以,从经济性上考虑,这种罐顶结构不宜在容积大于10 000 m<sup>3</sup>的油罐上使用。

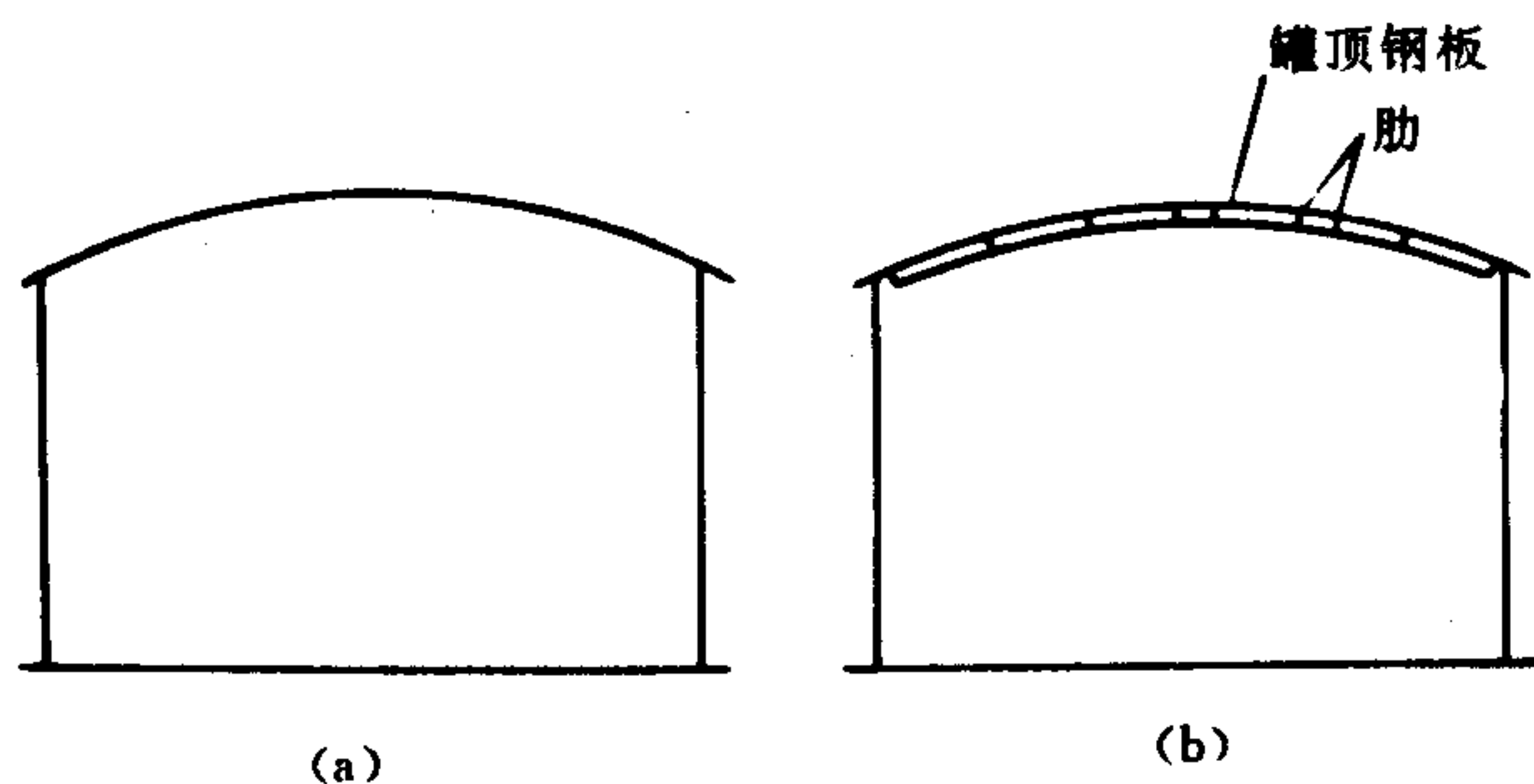


图5 圆拱顶油罐结构简图

## 4、球面网壳顶

随着工业与经济的发展和,大容积油罐的建造数量将会不断地增加。近几年来国内出现了如图6所示的球面网壳顶油罐,它的单罐容积均在10 000 m<sup>3</sup>以上。这种较新的罐顶结构形式是从近代大型体育馆或展览大厅的屋顶结构借鉴而来的。

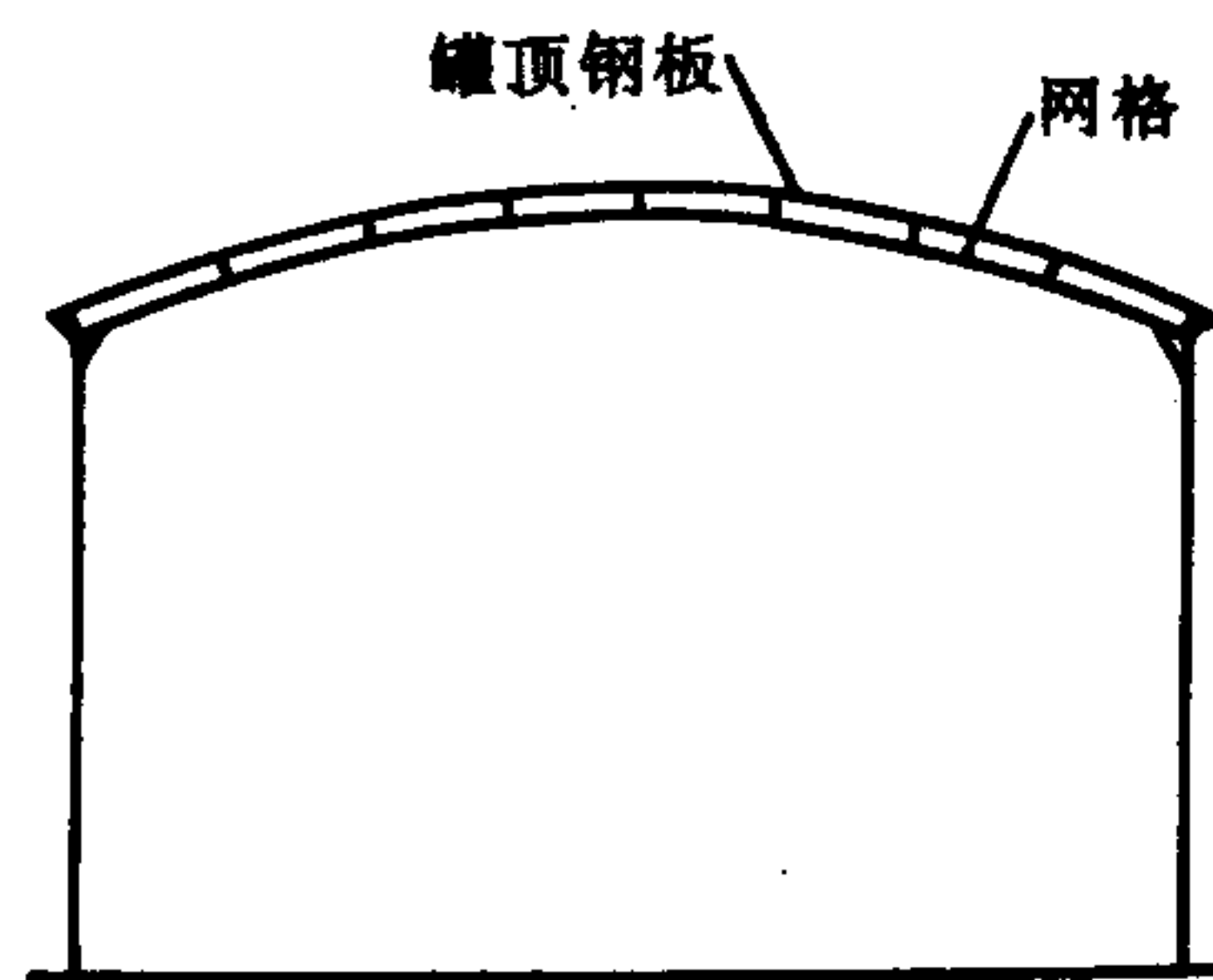


图6 球面网壳顶油罐结构简图

球面网壳顶的主体结构是一个与罐壁相联并置于罐顶钢板之内的单层球面网壳(即网格),当罐顶承受外载荷时,网格对其外面很薄的钢板球壳起支承作用,在罐顶承受罐内压力时则对包边角钢起支承作用。这样,罐顶钢板除了在承受罐内压力时会产生一定的拉应力之外,主要是做为一层“蒙皮”起到

密封油罐的作用。因此,其厚度则按标准中规定的最小厚度或略大一点来选取,从而降低罐顶单位投影面积的钢材用量。此外,由于这种罐顶具有足够的刚度,故宜于采用“倒装法”安装油罐。以上特点便成为它适合于制作大容积油罐罐顶的主要原因。为了对这种较新的罐顶结构形式有一个基本的了解,下面作一些简略的介绍。

#### 四、球面网壳在大容积油罐上的应用

网壳是网状壳体的简称。它是由许多纵横交叉的网肋(或称肋杆)构成的一种规整的网格状结构体,同时其外形又是一个具有一定曲面形状的壳,故名为网壳。球面网壳是网壳中的一种,其曲面形状为简单的球面。用做油罐的罐顶时,因仅取了半球体中靠近球顶的一小部分,故球面网壳顶与前述的圆拱顶一样,是一个扁球壳。

这种外形为球面的建筑物在建筑学上称之为“穹顶”,在古罗马及伊斯兰的国家常被用做寺庙、教堂的屋顶。以钢材为骨架的穹顶(即球面网壳)作为空间大跨度无柱结构应用于大型建筑物,最早可追溯到上个世纪末及本世纪初。至本世纪 60 年代,由于建筑费用的剧增,以及设计与施工技术的进步和钢材性能的提高等,而使球面网壳结构得到了很快的发展,至今已成为大跨度建筑物中应用最普遍的屋顶结构形式之一。现在,最大球面网壳顶的投影圆直径已达 200 m 以上,100 m 跨度的球面网壳则是很普通的了。

球面网壳之所以能够在大跨度结构中得到发展,是因为首先它具有各向受力的特点,并以面内力或轴力为主,且力的传递路线短捷;其次,内力分布具有均匀性和分散性,在均布载荷作用下内力均匀地作用在连续曲面上,即使是在集中载荷作用下也能较快地分散开来;再次是立体性强,具有空间结构的特点,是以整个结构的形体来抵抗外载荷的作用。所以,相对于其它结构形式而言,它具有刚度大,稳定性和承受动载荷的性能都比较好,以及结构自重较轻等优点,故宜于在大跨度结构中应用。但应注意的是,它既然是一个刚性壳体,就不允许有任何弯曲、扭转及法向剪切力存在,同时还必须有足够的刚度以保证壳体不会因翘曲而失稳。因此,不仅要在设计中充分地认识上述要求,同时,在预制及安装过程

中也必须严格保证曲面形状的准确性。

根据已掌握的资料,近几年来国内已有两种不同结构形状的球面网壳顶在大容积固定顶油罐上使用。其中,一种是如图 7(a)所示的双向子午线网格结构,用于某炼厂的 20 000 m<sup>3</sup> 油罐上,油罐直径为 38 m;另一种是如图 7(b)所示的短程线网格结构(图中仅绘出 1/5 的网格),用于某油库的 30 000 m<sup>3</sup> 油罐上,油罐直径为 46 m。从图 7(a)可以看出,前者的网格是由两组正交子午线束构成,采用工字钢连续网肋,节点为固联,据测算,单位投影面积上网壳的钢材用量在 67 kg/m<sup>2</sup> 左右(含罐顶钢板);图 7(b)短程线网格结构,网肋为工字钢制成的短网肋,全部节点均为铰接,单位投影面积上网壳的钢材用量为 67.4 kg/m<sup>2</sup>(含罐顶钢板)。

上述图 7 中的两种球面网壳顶虽然各具特色,但都能够满足于网格结构的基本要求,同时单位投影面积的钢材用量均在 67 kg/m<sup>2</sup> 左右,基本上与 10 000 m<sup>3</sup> 固定顶油罐圆拱顶的钢材用量(64 kg/m<sup>2</sup>)持平,而远低于相同容积圆拱顶油罐的钢材用量(100 kg/m<sup>2</sup> 左右)。

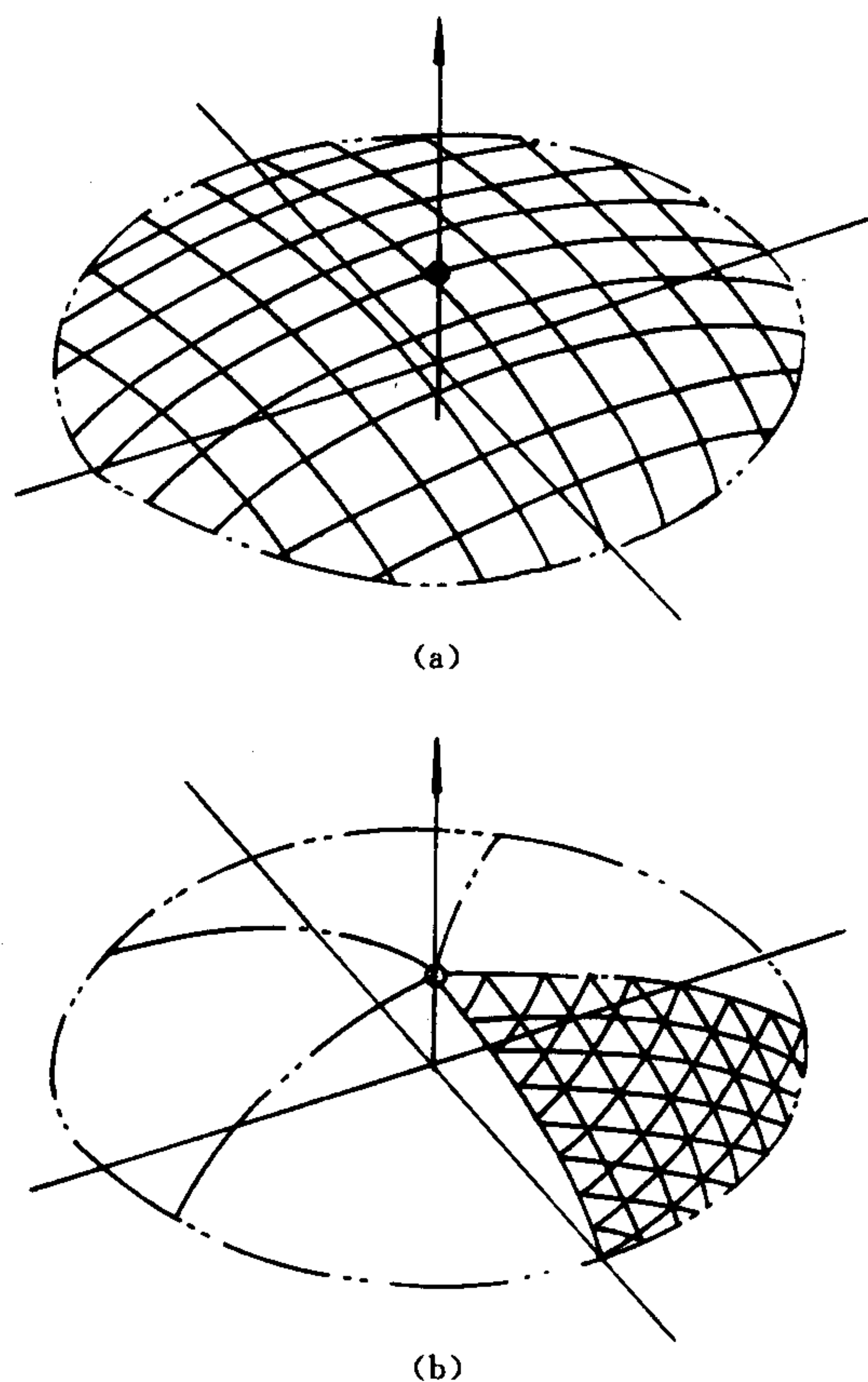


图 7 已用于油罐顶的两种网格形式

## 五、几点建议

(1)社会的现代化水平愈高,能源对生产与生活所产生的影响就愈大,一旦能源得不到足够的供应,即便是暂时的短缺,也会对生产与生活带来极为不利的影响。因此,对于一个国家来讲,随着国民经济的发展,就必须考虑到增加石油储备的问题,从而起到未雨绸缪的作用。从这个角度出发,预计在近几年中我国石油的战略储备量将会继续增加。这样,10 000 m<sup>3</sup> 以上的油罐在储油容器中所占的比例将会明显增大。对大容积油罐罐顶结构的研制工作应通过认真总结尽快地从试验研究阶段转入提高与推广阶段,以适应实际需要。

(2)从设计理论、施工技术及经济性这三个方面来看,大容积油罐采用球面网壳顶是可行的,可以作为一个发展方向。但应注意的是:这种罐顶结构的理论分析与设计计算,以及构件预制、罐顶安装等,都需要较高的技术和一定的装备条件,需要由掌握这项专门技术及具有施工能力的单位来承担设计与施工任务,千万不要一哄而上,否则其后果将会是令人担心的;球面网壳的网格划分方法有多种,虽各具特色,但其结果则是殊途同归。因此,作为一项实用技

术似乎没有必要搞“百花齐放”,以免鱼目混珠,故认为,可以在充分调研的基础上确定 2~3 种技术可靠、实用性强的网格结构予以推广,从而使之能够精益求精、不断完善;球面网壳顶的应用对国内油罐来讲还是一项较新的技术,尚未达到十分完善的水平,因此尚需不断总结、不断改进,特别是对其中与使用安全有关的技术问题必须给予足够的重视。

(3)过去曾使用过的某些罐顶结构形式,由于某些原因而被其它的结构形式所取代,这是一种进步。但应看到的是,它既然曾被大量应用则必然有其优异之处,随着科技的进步,若能克服不足、发挥优势,将仍然会成为一个可以考虑的发展方向。比如无力矩油罐,它在 70 年代以后逐渐被取代,原因如前所述。但应注意到的是,它有一个不可忽视的优点,即单位投影面积的钢材用量最少,即使在大容积油罐上也不会超过 50 kg/m<sup>2</sup>。利用当代的技术理论并结合现在的钢材性能及技术条件,它的一些不足之处也并非没有解决的可能。因此,除了球面网壳之外,对于其它的有可能制作大容积油罐罐顶的结构形式亦应给予充分地考虑。科学技术只有依靠认真总结,不断改进,勇于创新,才能发展、进步。

(收稿日期:1997-03-19)

编辑:刘春阳

## 国际有关油气储运会议(1997 年 7~12 月)

### 第 21 届流体瞬变分析年度短训班

时间:1997-07-07~11

地点:美国密执安州安阿伯

主办单位:美国密执安州大学

### 1997 年马来西亚油气和石油工程展览

时间:1997-07-14~17

地点:马来西亚吉隆坡

主办单位:海外展览服务公司

### 南部气体协会输气会议

时间:1997-07-23~25

地点:美国得克萨斯州休斯敦

主办单位:南部气体协会

### 1997 年石油会议

时间:1997-09-03~04

地点:挪威哈尔斯塔

主办单位:挪威石油学会

### 美国气体协会天然气车辆会议

时间:1997-09-07~09

地点:美国犹他州盐湖城

主办单位:美国气体协会

### 国际管线和海洋承包商协会年会

时间:1997-09-29~10-05

地点:意大利罗马

主办单位:国际管线和海洋承包商协会

### 美国石油工程师学会年会

时间:1997-10-05~08

地点:美国得克萨斯州圣安东尼奥

主办单位:美国石油工程师学会

### 第十五届世界石油大会

时间:1997-10-12~16

地点:中国北京

主办单位:中国国家石油总公司

### 管线模拟权益集团年度会议

时间:1997-10-15~17

地点:美国亚利桑那州塔克森

### 第十届世界液化石油气论坛

时间:1997-10-15~17

地点:阿根廷布宜诺斯艾利斯

主办单位:世界液化石油气协会

### 运输燃料质量世界会议

时间:1997-10-22~24

地点:美国华盛顿特区

### 美国石油学会年会

时间:1997-11-09~10

地点:美国伊利诺斯州芝加哥

主办单位:美国石油学会

摘编自《世界石油工业》1997 年 6、7 期