



潘家华 编著



圆柱形 金属油罐设计



机械工业出版社

圆柱形金属油罐设计

潘家华 编著

烃加工出版社

内 容 提 要

本书共分十二章，分别就油罐基础的要求，钢材的选择，罐底、罐壁、浮顶、拱顶、内浮顶的设计，抗风、抗震能力的计算以及断裂力学分析等内容进行了较详细的论述。对计算工作量较大的部分，给出了电算程序。

本书可供油罐设计及施工人员、油库管理工作者以及石油储运专业、化工设备专业的高等院校师生阅读。

圆柱形金属油罐设计

潘家华编著

*

轻工业出版社出版

(北京安外大街33号)

新城印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

(根据石油工业出版社纸型重印)

850×1168毫米 32开本 8¹/₄印张 209千字 印1—2000

1986年8月北京新1版 1986年8月北京第1次印刷

书号：15391·57 定价：1.50元

前 言

近一、二十年来,国内外在油罐的设计与施工技术方面均有了很快的进步。在国内自六十年代以来,中国科学院力学研究所就曾对油罐的罐壁应力分析、浮顶的计算以及油罐的抗风能力等进行了有意义的研究工作。此后北京炼油设计院、华东石油学院、东北石油学院、管道设计院等单位又曾分别对两万、五万立方米油罐进行了应力测定和理论分析。炼油设计院金维昂、黄才良等同志在进行油罐的标准化、系列化的过程中也进行过大量的、有成效的工作。

遗憾的是这些工作未曾全面地、系统地整理过,国内至今也尚无一本关于油罐设计方面的书籍。

此书于1980年动笔,在编写过程中查阅了国外近三十年来数十篇文献,吸收了国内的科研成果,并加以综合、分析、归纳、整理。油罐设计中的某些部分计算工作量很大,对这些部分,为方便设计人员,在书中给出了电算程序。

断裂力学是一门新兴的科学。早在1925年美国就曾发生过油罐的破裂事故,此后在世界范围内又曾发生过多起油罐的破裂事故,笔者在讲授断裂力学课程时曾找到大量油罐破裂的事例。在本书的最后一章对油罐进行了断裂力学分析。

在本书的编写过程中曾得到管道设计院陈涤非同志、北京炼油设计院,中国石油学会储运学会等许多单位和同志的帮助,在此谨向这些单位和同志表示谢意。

目 录

第一章	概说	1
第一节	金属油罐的发展概况	1
第二节	油罐的种类	6
第三节	油罐的容量	7
第二章	油罐的基础	9
第一节	基础的沉陷	9
第二节	油罐基础设计与建造的技术要求	12
第三节	基础的沉降观测	15
第三章	油罐材料的选择	17
第一节	油罐的脆性断裂及对材料的韧性要求	17
第二节	关于沸腾钢在油罐上的使用	20
第三节	油罐的选材	23
第四章	罐底的设计与施工	33
第一节	罐底的受力状况	33
第二节	罐底的设计	35
第三节	罐底的施工与验收	42
第五章	罐壁的设计与施工	45
第一节	罐壁的受力状况	45
第二节	罐壁的设计	67
第三节	用变点法确定壁厚	74
第四节	罐壁的施工与验收	86
第六章	油罐的风力稳定计算及抗风措施	102
第一节	风载的分布和计算	102
第二节	抗风圈的设计与计算	106
第三节	加强圈的设计与计算	108
第四节	TI-59机计算程序	114
第七章	油罐抗震设计与计算	122

第一节	油罐的震害	122
第二节	API650油罐抗震计算及其分析	124
第三节	国内油罐抗震规范及其分析	139
第四节	垂直方向地震加速度的影响	155
第五节	抗震加固的措施	157
第八章	浮顶的设计	161
第一节	浮顶的结构	161
第二节	浮顶的设计准则	167
第三节	第一准则的计算和校核	167
第四节	第二准则的计算和校核	172
第五节	按第三准则进行设计和校核	181
第六节	浮顶的强度及稳定性校核	189
第七节	紧急排水管的设计与计算	190
第八节	油罐的密封装置	193
第九章	拱顶的设计	199
第一节	拱顶结构及主要几何尺寸	199
第二节	计算荷载的确定	201
第三节	包边角钢	202
第四节	球壳的设计	205
第五节	拱顶的施工要求和试压	213
第十章	内浮顶的设计	215
第一节	概述	215
第二节	盘式浮顶的设计	217
第三节	对罐体的要求	227
第十一章	油罐的搅拌装置和清扫孔	227
第一节	搅拌装置	229
第二节	油罐清扫孔	241
第十二章	油罐破坏的断裂力学分析	249

第一章 概 说

第一节 金属油罐的发展概况

一、发展的经济背景

近一、二十年来油罐的设计及施工技术都有了较过去更快的发展。从世界范围来讲,这一状况与国际上的能源危机有关。由于能源危机,近若干年来许多原油依靠进口的工业化国家都增加了原油的储备量。以日本为例:

1972年	上半年贮油日数	47.5日
	下半年贮油日数	50.0日
1973年	上半年贮油日数	52.5日
	下半年贮油日数	55日
1974年	上半年贮油日数	57.5日
	下半年贮油日数	60日

对于日本来说,60日的储油量为5010万吨,这个数字是不小的,比六十年代初期大了许多倍。

西方一些工业化国家也不例外,英国的储备政策规定要有90天的原油储备量,法国也规定要有90天的原油储备量,西德在75年规定要有55天的储备量,而在76年10月又决定改为要有70天的储备量。

由于原油储备量的增加,就迫使许多国家要建造更多、更大的油罐。这一经济需求促进了油罐事业的发展。有越来越多的工程技术人员从事油罐的设计、研究工作。与此同时,随着油罐的大型化,实践也提出了越来越多的新课题,随着这些课题的研究和解决,也就使油罐的设计与施工技术进一步发展和深化。

我国自大庆油田发现以后，油罐事业得到了较快的发展，70年代初期由于长距离输油管线的建立，使这一发展得到加速。我国目前最大的油罐为5万米³，预计在不久的将来将会设计与建造更大的油罐。

二、油罐的发展趋势——大型化

近二十年来，油罐迅速向大型化发展，1962年美国芝加哥桥梁公司首先建成10万米³浮顶油罐，直径87米，高约21米。1964年壳牌石油公司在欧洲建成10万米³浮顶油罐。1967年委内瑞拉建成15万米³浮顶油罐，直径115米，高14.6米。

日本发展得比较晚，但近年来已迅速赶上。日本1965年建成10万米³浮顶油罐，1971年建成16万米³浮顶油罐，直径109米，高17.8米。近年来准备建造20万米³浮顶油罐。目前世界上最大的油罐为24万米³。由以上看出，油罐发展的总趋势是走向大型化，而所以有此趋势是由于大型化比较经济。

油罐大型化主要有以下优点：

1. 节省钢材

表1-1为每1米³容积所需钢材的净重。其中5万米³及更小的油罐数字是根据我国75年以前油罐的实际情况算出的，更大的油罐则是根据国外有关资料算出的。

表1-1 油罐单位容积所需金属净重

油罐容积，米 ³	每米 ³ 容积需金属净重，公斤/米 ³
5,000	26.2
10,000	23
20,000	21.5
50,000	19.2
100,000	15
200,000	10

根据日本的统计资料来看，如15万米³油罐每立方米容积所投入的金属为100%，则10万米³为105%，5万米³为125%，1万米³为150%。

由以上看出油罐越大越节省钢材。

2. 节省投资

以我国情况来看, 5 千米³油罐平均每吨钢材造价为1800元, 1 千米³油罐为1600元, 2 千米³油罐为1550元, 5 千米³油罐为1520元(因属某工程队第一次施工, 故造价偏高)。

第七届世界石油会议提供了以下资料: 如准备建一个40 千米³的油库, 若由 4 台10千米³油罐组成其造价为100%, 若由 8 台 5 千米³油罐组成则造价为109%, 10台 4 千米³油罐组成成为119%, 若20台 2 千米³油罐组成则为141%。

再以日本的情况为例, 每 1 米³油罐容积所需的投资见表 1-2。

表1-2 油罐单位容积所需的投资(日本)

油罐容积, 米 ³	每米 ³ 容积的投资, 日元/米 ³
10,000	9150
50,000	7060
100,000	5767
150,000	5573

由以上可以明显看出, 一个油库, 由大油罐组成就比由小油罐组成节约大量的投资。

3. 占地面积小

因罐与罐之间要有防火距离, 所以在总容积相同的情况下, 几台大罐比一群小罐占地面积要节省得多。

4. 便于操作管理

几台大罐比一群小罐在检尺、维护、保卫等方面都比较方便。

5. 节省配件和罐区管网

几台大罐比一群小罐库区管网要简单得多, 而且罐前的阀门、仪表、消防设施、油罐配件等也都可以节省。

由以上可以看出, 油罐的大型化是有许多好处的, 这就是

这一趋势的动力。目前油库的结构与十多年前相比已大为改观，由油罐的小而多变为大而少，这一点也是衡量一个国家油罐设计、研究、建造的技术水平高低的一个尺度。现以日本鹿儿岛市日石喜入油库为例，该油库至目前为止，总容积为660万米³，其中第一期工程1972年12月投入使用，共有30台10万米³油罐，二期工程1975年12月建成，共有24台15万米³油罐，该油库全部由大型油罐组成。

三、油罐大型化遇到的新课题〔1〕〔2〕

随着油罐的大型化，也产生了一些新问题。

首先，油罐大型化以后，危险性增加了。这里所说的危险性有两个含意，第一是油罐大了以后一旦出了事故危害性大，第二是油罐大了以后，如无相应的技术措施跟上则易产生危险。

先谈第一个含意。罐大了以后，一旦发生事故就是一次灾难。1974年12月18日日本的水岛炼厂发生了一起5万米³油罐的破坏事故。这次事故共跑油4.3万米³，油从罐壁与罐底之间的角缝处冲出，将一个立梯冲跑，并将防油堤冲开，共污染地面14.83万米²，大约有7500~9500米³的油流到海面上，波及日本冈山县、香川县、德岛县和瀬户内海东部一带，使日本受到不小的损失〔3〕。

由于大罐的事故危害性比小罐更大，因此要求在研究、设计、施工、验收等方面更加慎重。

危险大的第二个含意是容易产生危险，这主要表现在两方面：

(1) 油罐大了以后，油罐基础所占的面积大了，许多大型油罐基础直径在100米以上。在这样大的面积上，要找到完全均匀的工程地质状况往往是比较困难的。六十年代后期，欧洲先后有三台油罐连续发生不均匀沉陷而造成罐底破裂事故。三个当中第一个是装有油的，在破坏时幸好未发生火灾，其余两个是装满水时破坏的。其中第三个罐破坏得最为严重。基础沿

着罐壁周长被冲去大约有67英尺(20.4米),深度达18英尺(5.5米)。水将防油堤冲开,并将电焊机和其他一些施工机具冲走,这台罐局部沉降量达6英寸(152.4毫米)。

(2)罐大了以后,罐壁板相应加厚了,所选用的材料屈服极限增高了,这二者都会造成材料冲击韧性下降的趋势。冲击韧性的下降增加了由于切口脆性而产生破坏的可能性。1952年英国菲雷地区两个油罐在试水时发生的破坏事故就是由于切口脆性破坏而造成的。

对大型油罐的威胁主要来自以上两个方面。有些破坏是以上两种情况兼而有之,如前面所说的日本水岛炼厂那台油罐的破坏就是如此。

油罐基础的设计是属于土木工程学范畴内的问题,本书不加论述,而只是提出油罐对基础的要求,而对于油罐的脆性破坏问题我们将在本书第十二章中详细加以讨论。

随着油罐的大型化,近十多年来在风力作用下罐壁的稳定性研究,罐壁应力的分布状况及按有矩原理计算罐壁应力以及大型浮顶的研究等都有了不少成就,这将在以后的章、节中加以介绍。

地震可能给油罐带来很大的破坏,给人民的生命财产造成很大的损失。1964年6月16日日本新潟地震时(7.5级),有一台油罐破裂起火,大火持续了两周(352小时),烧毁了油罐80余座。1978年6月12日日本宫城县地震时(7.4级),仙台炼油厂C-4罐区10台油罐中有3台遭到破坏,污染了该区36000米²的面积,并有5000米³的油流入海中,污染了大片海面。

我国海城地震及唐山地震也使许多油罐遭到不同程度的破坏。

小油罐与大油罐造成地震破坏的因素并不完全相同,由于地耐力的限制,故罐高有一定限制。大型油罐D/H值较大,而径高比D/H越大则在地震时与油罐一致运动的那部分储液所占的比例越小,而容易晃动的那部分储液所占的比例越大。

随着油罐的大型化，近年来对于由长周波引起晃动的研究日益加深，这将在本书第七章中详加论述。

第二节 油罐的种类

油罐的种类一般是按照几何形状来划分的。按几何形状油罐可分为三大类，即立式圆柱形油罐、卧式圆柱形油罐、双曲率油罐，即滴形油罐。在以上三大类中圆柱形油罐占绝大多数，对大型油罐更是如此。卧式油罐只做为小容器用，其设计一般划在受压容器的范围内。滴形油罐可承受 $0.4\sim 1.2$ 公斤/厘米²的剩余压力，可消灭小呼吸，适于储存易挥发的油品。但这种油罐结构复杂、施工困难，建设费用高，故在国内还没有建造过，在国外也用得很少，这种油罐自问世以来，实际上没有得到推广使用。

在本书中所要讨论的是圆柱形油罐。圆柱形油罐根据其顶部结构的不同，可分为以下几种：

一、锥顶油罐

锥顶油罐的顶部为圆锥形的，坡度为 $1:20\sim 1:40$ 。根据油罐直径的大小，顶部可设计成自支承式的、梁柱式的和桁架式的。这种类型的油罐在五十年代曾得到广泛的应用，但近若干年来已基本上不再建造了。这种油罐与下面将要介绍的拱顶罐相比，消耗钢材多，施工也比较困难。

二、悬链式油罐

悬链式油罐在我国又称为无力矩油罐，它是根据悬链线理论用薄钢板和中心柱组成顶部。薄钢板支于中心柱和罐壁上，形成一悬链曲线。在这种情况下，薄板中只有拉应力而无弯曲应力，故又称无力矩油罐。我国最大的无力矩油罐为 5000米^3 ，由 100米^3 至 5000米^3 已有标准设计。这种罐由于顶板过薄，易遭损坏，且在悬链的最低点容易积存雨水而遭锈蚀，这种罐近年来也逐渐为拱顶罐所代替，目前已很少再建。

三、拱顶油罐

拱顶罐的罐顶为球面的一部分，它是由4~6毫米的薄钢板和加强筋组成的，这种罐顶可承受较高的剩余压力，因而油耗较少。近若干年来国内、外广泛采用气顶法建造这种油罐，施工容易，造价低。拱顶罐与下面将要介绍的浮顶罐是国内、外目前得到最广泛应用的一种油罐。国内最大的拱顶罐为2万米³，最常用的范围为1万米³或更小。国外最大的拱顶罐为5万米³，直径为50.3米，高23.67米，建在日本。

四、浮顶油罐

这种罐的浮顶可直接放于油面上，随油品收发而上下浮动，在浮顶与罐内壁之间的环形空间有随着浮顶上下的密封装置。因为这种罐几乎全部消灭了气体空间，从而大大减少了油品的蒸发损耗。此外这种油罐的顶部与拱顶相比，结构处理容易，故大型油罐几乎全部采用浮顶油罐。

五、内浮顶油罐

这种罐的顶部为拱顶与浮顶的结合，外部为拱顶，内部为浮顶。内部的浮顶可减少油的蒸发损耗，而外部的拱顶又可避免雨水、尘土等异物从环形空间进入罐内。这种罐主要用于储存航空煤油等要求高的油品。

本书主要介绍拱顶、浮顶、内浮顶油罐的设计。

第三节 油罐的容量

油罐的容量大部分国家用米³或千升(1千升=1米³)来表示，也有些国家，如美国，用桶来表示(1桶≈0.159千升)。

油罐的容量有三种不同的说法：

一、公称容量

公称容量是指按照油罐的几何尺寸向上或下圆整，以整数表示的容量。

$$\text{计算容量} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (1-1)$$

式中: D —— 油罐内径, 米;

H —— 罐壁高度, 米。

对于浮顶罐, H 指至包边角钢上沿的高度。计算容量经圆整后便是公称容量, 圆整量一般不超过 $\pm 5\%$ 。通常所说的 1 万米³油罐, 5 万米³油罐便是指的公称容量(见图1-1)。

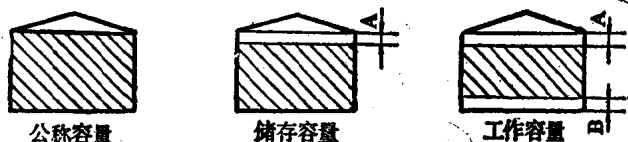


图 1-1 油罐的容量

二、储存容量

储存容量是指油罐实际上可储存的最大容量(见图1-1)。计算容量减去 A 部分的容积, 便是储存容量。

对于拱顶罐, $A = 300$ 毫米, 对于浮顶罐 A 约为 900 毫米, 根据实际情况有时可取得更大些。

三、工作容量

工作容量是指允许油罐液面上、下波动范围内的容量。储存容量减去 B 部分的容量, 便是工作容量。

B 的计算方法与排油管的结构有关(见图1-2)。

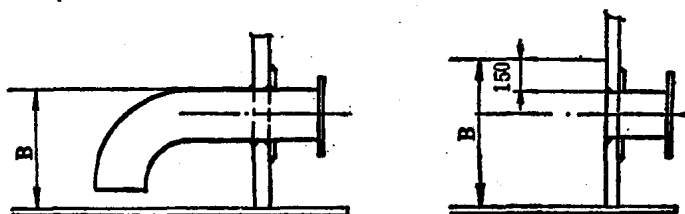


图 1-2 B 值的计算

参 考 文 献

- [1] 河野和间, 岩上昭夫: 石油と石油化学, Vol18, №4, PP61-70
- [2] 柳生政男, 篠原刚: 石油と石油化学, Vol18, №4, PP55-60
- [3] 木原博等: 《三菱石油水岛製油所タンク事故原因調査報告書》, 1974

第二章 油罐的基础

第一节 基础的沉陷

一、沉陷的类型及其影响〔1〕〔2〕〔3〕

在第一章已经说过，对于油罐，尤其是大型油罐的威胁主要来自两个方面，一是基础不均匀沉陷，二是材料的脆性破坏。这二者往往是结合在一起的。由于不均匀沉陷造成罐底或罐底与罐壁板间的角缝处产生过大的应力。在过大的应力下，再加上这个应力的交变，就会使原来存在的缺陷扩展，而这一扩展最终造成脆性破坏事故。上一章所说的水岛炼厂油罐事故就是这样发生的。

油罐基础的沉陷有以下五种类型：

1. 均匀沉陷

均匀沉陷见图2-1a，这种沉陷的特点是整个基础全体均匀下沉，这种类型的沉陷只有达到很严重的程度时才会造成损坏。油罐与进、出油管相连接，当油罐下沉时，就会在进、出口管与油罐罐壁相接处产生附加应力。当下沉很严重时，在油罐开口处应力会很大，甚至造成破坏。

2. 倾斜不均匀沉陷

倾斜不均匀沉陷，见图2-1(b)。这种不均匀沉陷的特点有二：一是虽为不均匀沉陷，但罐底的整个周边仍保持在同一平面上；二是该平面一侧沉降得较少，而对面的另一侧沉降得较多，以致造成倾斜。

这种不均匀沉陷对罐底和罐底与壁板间的角缝都不会造成威胁，但倾斜严重时会使壁板中的环向应力略有增加。J. M. Langevela认为当高点与低点相差50厘米时，环向应力增加

2 %。

这种类型的沉陷对浮顶油罐有可能会造成一定威胁。当油罐倾斜时，则油面处的平面变成椭圆的。对于机械密封浮顶油罐，其调节量较小，这时有可能会把浮船卡住。但是如采用软密封时，一般不存在这个问题。

3 盘形不均匀沉降

盘形不均匀沉降见图2-1c，这种不均匀沉降的特点是：罐底周边沉降少，中心沉降多，以致使罐底形成盘形。罐底周边的沉降量比中心沉降量一般要小30~40%，这是罐底下面压缩性土壤中承压区的应力分布状况所决定的。为弥补这一状况，在建罐时先使罐底中心高于四周。如事先预留的高出量不够或罐底部砂垫层未充分夯实则会造成在充油一段时间后，使罐底中心较多地低于周边。

对于大型储罐，中心与周边之间的最大允许沉降差，国外有的公司采用以下公式计算：

$$f = \frac{D}{2} \sqrt{\left(\frac{f_0}{D}\right)^2 + 3.75} \quad (2-1)$$

式中：f——罐底最大允许相对下沉量，厘米；

D——罐内径，米；

f_0 ——建罐时初始的上凸量，厘米。

建立这一公式的原则是保证罐底中的拉应力不大于200公斤/厘米²，由上式可以看出，对于大罐来说f值是很大的。以我国自行设计的5万米³油罐来说，D=60米， $f_0=45$ 厘米，由(2-1)式算出f=62.29厘米。在一般情况下不会超出允许的范围，因而这种沉陷也不造成真正威胁。

4. 壁板周边的不均匀沉陷

这种不均匀沉陷见图2-1d。

5. 壁板周边的局部沉降

这种不均匀沉陷见图2-1e。

以上两种沉陷实际上属于同一类型，是最危险的一种沉

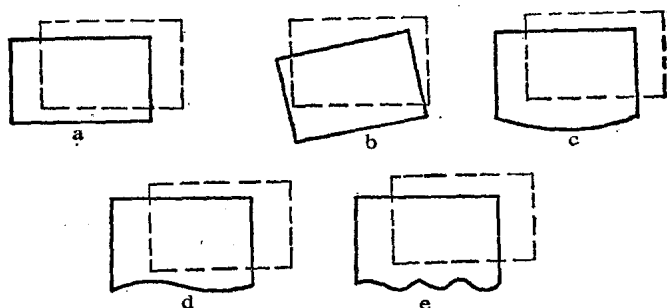


图 2-1 油罐基础沉陷类型示意图

陷。由于罐壁在垂直方向的刚性是很大的，当下部基础沉陷时，就会使罐底与罐壁间的角缝和罐底的边缘板受力状况急剧恶化。

对罐底基础沉陷的控制实质上是控制这两种不均匀沉陷。

二、对沉陷的限制

如前所述，罐底的不均匀沉陷以图 2-1 中的 d、e 两种类型为最危险，因而对不均匀沉陷的限制也主要针对这两种情况。

ESSO 公司有三台储罐曾先后主要由于上述的原因而发生了破坏事故，对此曾有许多人进行了研究，研究结果表明油罐对于不均匀沉陷的适应能力与罐底的结构有关。这里所说的罐底的结构包括罐底边缘板的宽度、厚度、角焊缝的韧性等。根据这些研究结果，可把罐分为三类，见表 2-1，各类允许的沉降值见表 2-2^[3]。

以上数据是 ESSO 公司在伦敦的一次国际石油工业讨论会上提出的，目前已为越来越多的人所接受。

油罐基础的设计人员应与油罐的设计人员配合好。当工程地质条件较差时，如软弱地盘，则油罐应采取 I 类罐底，这样虽然罐底投资会略高些，但基础的工程费用会大为降低，相反，如地质条件较好时，如油罐座落在均一的岩石上，则可取