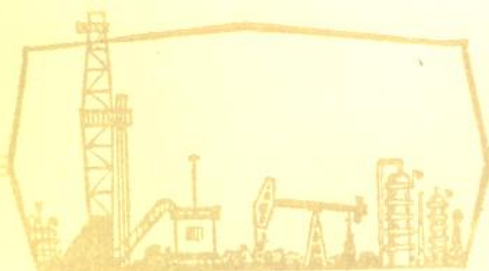


高等学校教学用书

油罐及管道强度设计

潘家华 郭光臣 高锡祺 编



石油工业出版社

(北京)

3

书号	087172
分类号	TE 863
种次号	005

(2)

高等学校教学用书

油罐及管道强度设计

潘家华 郭光臣 高锡祺 编



石油工业出版社

(京) 新登字082号

内 容 提 要

本书系高等院校石油 天然气储存与运输专业的专业教材之一。书中系统介绍了立式和卧式钢油罐、地上和地下管道的强度、稳定计算理论和设计方法。本书是在综合我国油罐及管道强度设计的经验和科研成果,并广泛参阅国外资料的基础上编写的。

书中部分章节可作为选修课教材。

本书亦可供从事油罐及管道强度设计的工程技术人员参考。

高等学校教学用书

油罐及管道强度设计

潘家华 郭光臣 高铸祺 编

*

中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京902信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京通县印刷厂排版

北京市朝阳区北苑印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 20¹/₂印张 517千字 印9001—11000

1986年4月北京第1版 1993年11月北京第3次印刷

ISBN 7-5021-0547-6/TE·521 (课)

定价: 9.35元



前 言

随着我国石油工业的迅速发展，不论在油田、炼厂、长距离输油管道、各类油库都必须大量建设储油罐和地上、地下管道。而且，油罐的容量和长输管道的口径均有向大型化发展的趋势，油罐和管道的强度设计问题已日益成为有关设计和科研单位的重要课题。

《油罐及管道强度设计》是在华东石油学院储运教研室多年讲授本课程的经验 and 原有教材的基础上，广泛参阅了国内外近年来有关油罐及管道强度设计方面的论著、设计规范、科研资料而编写的。本书系统介绍了立式钢油罐（重点是拱顶罐和浮顶罐）、卧式钢油罐、地上管道和地下管道的结构知识、强度和稳定计算理论和设计方法，并介绍了学习本课程必要的某些基础知识，在最后一章“长输管道及油罐的断裂分析”中扼要介绍了断裂力学在油罐及管道设计上的应用。在编写过程中，力求阐明基本理论和反应最新的设计经验及科研成果。

油罐和管道的强度及稳定计算理论在某些方面还不够成熟，许多问题存在争议，有待通过进一步的科研工作来完善和发展。本书除介绍我国常用的设计计算方法外，还特别注意介绍国外的设计方法和国内外有关的科研成果，并指出目前设计计算方法中某些不足之处和有待进一步研究探讨的问题，以扩展视野。

本书按石油储运专业40学时必修课和40学时选修课（共计80学时）的教学要求编写，也适当考虑到工程技术人员的参考需要。

本书由潘家华、郭光臣、高锡祺合编，具体执笔是：第一章、第四章（除第一节外）、第五章、第六章、第八章、第十二章潘家华；第二章、第三章的第二节、第四章的第一节、第七章郭光臣；第三章（除第二节外）、第九章、第十章、第十一章高锡祺。全书由高锡祺负责统稿。本书由蔡强康教授主审，参加审稿的还有于乐群、陈冠卿、陈涤非、李文绮、蔡伯纯、施奈、肖冶、沈绩仁等同志。

在本书编写过程中，得到管道勘察设计研究院、北京炼油设计院、商业部设计院、中国人民解放军后勤工程学院、石油部管道职工学院和其它许多单位的大力协助，在此谨向各有关单位致以衷心的感谢。

限于编者的水平和编写时间比较仓促，本书疏漏和错误之处在所难免，对本书的体系、选材和编写风格也可能有不同的意见，对书中阐述的有关问题更可能有不同的观点，编者热诚欢迎对本书的批评意见和对不同观点的争论意见。

目 录

第一章 钢油罐设计的基本知识	1
第一节 金属油罐的发展趋势.....	1
第二节 对钢油罐的基本要求.....	2
第三节 钢油罐的种类.....	4
第四节 油罐钢材的选择.....	6
第二章 轴对称回转薄壳的内力及位移分析	14
第一节 回转薄壳的基本概念和几何特征.....	14
第二节 轴对称回转薄壳的内力及位移分析.....	15
第三节 一些常见轴对称回转薄壳的薄膜内力和位移分析.....	25
第四节 轴对称回转薄壳的边缘问题.....	40
第三章 立式圆柱形油罐的尺寸选择和罐壁强度设计	48
第一节 罐壁钢板厚度计算.....	48
第二节 立式圆柱形油罐直径和高度的选择.....	56
第三节 罐壁边缘应力计算(下节点计算).....	62
第四节 罐壁的开孔补强.....	80
第四章 立式圆柱形油罐罐顶(固定顶)设计	82
第一节 梁柱式顶的设计.....	82
第二节 拱顶的设计.....	85
第三节 悬链式无力矩顶的设计.....	94
第五章 浮顶的设计	97
第一节 浮顶的结构.....	97
第二节 浮顶的设计准则.....	101
第三节 第一准则的计算和校核.....	101
第四节 第二准则的计算和校核.....	104
第五节 第三准则的计算和校核.....	140
第六节 浮顶的强度及稳定性校核.....	110
第七节 油罐的密封装置.....	115
第六章 立式钢油罐的抗风设计	119
第一节 风载荷的分布和计算.....	119
第二节 抗风圈的设计和计算.....	121
第三节 加强圈的设计和计算.....	123
第七章 立式油罐罐底和油罐基础设计	131
第一节 罐底设计.....	131
第二节 油罐基础的设计要求.....	134
第三节 油罐基础的形式和做法.....	134

第四节	油罐地基地质调查	141
第五节	油罐基础设计	144
第六节	油罐地基的处理	154
第八章	立式钢油罐的抗震设计	163
第一节	工程抗震	163
第二节	地震对油罐的破坏	166
第三节	油罐的抗震设计	168
第四节	垂直地震载荷的影响	179
第五节	油罐抗震加固的措施	180
第九章	卧式油罐设计	182
第一节	概述	182
第二节	卧式油罐的封头设计	183
第三节	双支座卧罐筒体受力分析	188
第四节	卧式油罐支座反力的分布	202
第五节	地上卧罐鞍座处筒体加强环(带有三角支撑)的受力分析	206
第六节	地上卧罐的鞍座设计	212
第七节	地下卧式油罐设计	214
第十章	地上管道	222
第一节	概述	222
第二节	管道壁厚计算	222
第三节	管道跨度计算	223
第四节	三通强度计算	230
第五节	曲管的强度和柔性计算	234
第六节	管道热应力计算	248
第七节	常用补偿器的设计计算	263
第八节	管道支架受力计算	272
第十一章	地下管道	284
第一节	概述	284
第二节	地下管道的强度计算	286
第三节	地下管道的轴向稳定性	288
第四节	地下管道的热伸缩	292
第五节	埋地管道曲管的热胀弯矩和位移计算	295
第六节	固定支墩的设计计算	299
第七节	地下管道的抗震计算	303
第十二章	长输管道及油罐的断裂分析	309
第一节	概述	309
第二节	长输管道的断裂分析	310
第三节	钢油罐的断裂分析	322

第一章 钢油罐设计的基本知识

第一节 金属油罐的发展趋势^{(1),(2)}

近一、二十年来,油罐的设计与施工技术都较过去有了更快的发展。从世界范围来讲,这一状况与前一个时期国际上的能源危机有关。由于能源危机,近若干年来许多工业化的、靠进口原油的国家都增加了原油的储备量,这就迫使这些国家不得不建造更多更大的油罐。这一经济需求不仅促进了油罐事业的发展,也使越来越多的工程技术人员从事油罐的设计和研究工作。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,随着这些新课题的研究和解决,也就使油罐的设计与施工技术进一步发展和深化。

自大庆油田发现以来,我国的油罐事业也得到了较快的发展。七十年代初期,由于长距离输油管道的建设,使这一发展得到了加速。我国目前最大的油罐为5万m³,始建于1973年。至今已有七座5万m³油罐投入使用,预计在不久的将来将会建造更大的油罐。

1962年美国芝加哥桥梁公司首先建成10万m³浮顶油罐,直径87m,高约21m。1964年壳牌石油公司在欧洲建成10万m³油罐。1967年,委内瑞拉建成15万m³油罐,其直径为115m,高为14.6m。1971年,日本建成16万m³浮顶油罐,直径为109m,高为17.8m。目前世界上最大油罐达24万m³。

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具有下列优点:

(1)节省钢材。表1-1列出了不同容量的油罐单位容积所需钢材的净重。

表1-1 钢油罐单位容积所需钢材净重

油罐容量, m ³	单位容积所需钢材净重, kgf/m ³
5,000	26.2
10,000	23.0
20,000	21.5
50,000	19.2
100,000	15.
200,000	10.0

注:表中5万m³及更小的油罐的数据是根据我国1973年以前油罐的实际情况算出的。大于5万m³油罐的数据是根据国外有关资料算出的。

从表1-1可以看出,油罐容量越大,单位容积所需的钢材量越少。20万m³油罐比5000m³油罐单位容积所需的钢材量下降近62%。

根据日本统计资料,如以15万m³油罐每m³容积所消耗的钢材为100%,则10万m³为105%,5万m³为125%,1万m³为150%。

(2)减少投资。从我国情况来看,5000m³油罐平均每吨钢材造价为1800元,10000m³油罐为1600元,20000m³油罐为1550元,50000m³油罐为1520元(此系我国鲇鱼湾油库数据,因

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40万 m^3 的油库，若以由4台10万 m^3 油罐组成的造价为100%，则由8台5万 m^3 油罐组成的，造价为109%；由10台4万 m^3 油罐组成的，造价为119%；而由20台2万 m^3 油罐组成的，其造价可高达141%。

表1-2列举了日本不同容量油罐的投资额。

表1-2 油罐单位容积所需投资(日本)

油罐容积, m^3	单位容积的投资, 日元/ m^3
10,000	9150
50,000	7060
100,000	5767
150,000	5573

由以上资料明显看出，一个油库，由大罐组成要比由小罐组成节省大量投资。

(3)占地面积小。因罐与罐之间要有防火距离，所以在总容量相同的情况下，几台大罐比一群小罐的占地面积要节省得多。

(4)便于操作管理。几台大罐与一群小罐相比，在检尺、维护、保卫等方面都比较方便。

(5)节省管线及配件。几台大罐与一群小罐相比，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。

由以上分析可以看出，油罐大型化有许多经济利益，这也就是出现这种趋势的动力。目前油库的组成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在油罐设计、研究、建造等方面技术水平高低的一个尺度。以日本鹿儿岛市日石喜入油库为例，该油库至目前为止，总容量为660万 m^3 ，其中第一期工程1972年12月投入使用，共有30台10万 m^3 油罐，二期工程1975年12月建成，共有24台15万 m^3 油罐，该油库全部由大型油罐组成。

当然，在商业油库、军用油库、炼厂和一些其它使用单位也有相当数量的小型油罐和卧式油罐存在，这要根据实际工艺要求来决定。

第二节 对钢油罐的基本要求

对钢油罐的基本要求主要有以下五个方面：

(1)强度要求。油罐在卸载以后不应留下塑性变形。

(2)有抵抗断裂的能力。无论在水压试验或操作状况下，油罐不得产生断裂破坏。

(3)有抵抗风荷的能力。在整个建造及使用期间，在建罐地区的最大风荷下不产生破坏。

(4)有抗地震的能力。要求在整个使用期间内，在建罐地区的最大地震烈度下不产生破坏。

(5)油罐要座落在稳固的基础之上。油罐基础在整个使用期间的不均匀沉陷要在允许的范围之内。

上述基本要求是就总体而言的，具体的某一构件还要有其各自的特殊要求。

对于设计工作者来说,要在满足以上五个基本要求的前提下使结构合理,投资最低。通常,前四个基本要求是由油罐的设计者来完成的,而第五个要求是由油罐的设计者提出条件,由土木工程师完成。

如前所述,油罐大型化以后给人们带来了一些利益,但另一方面随着油罐大型化,也出现了一些新的技术课题。因而要付出更大的努力才能满足以上五个基本要求。

油罐的大型化使罐壁钢板越来越厚。然而,由于罐壁在施工现场无法进行退火处理,所以允许的壁板厚度是有一定限度的。例如美国石油学会钢制焊接油罐标准:API650规定壁板的最大厚度为1.75in(44.45mm),英国油罐规范ES2654规定为40mm,日本油罐规范JIS B8501规定为45mm。以上数据是各国根据自己的实践经验提出的。我国SYJ1016-82规定的壁板最大厚度见第三章表3-2。由于有了厚度的限制,为了既满足强度要求,又要建造更大的钢罐,就必须研制高强度的板材。

一般来说,钢材的强度(指屈服极限、强度极限)越高,则断裂韧性越低,也就是说越容易产生断裂。这就要求油罐的设计工作者要正确选材,特别是在气候寒冷的地区建罐,更要注意在满足强度要求的同时,恰当地提出断裂韧性的要求及其检验的方法和手段。这是油罐大型化过程中遇到的第一个问题。

一般来说,钢板越厚在焊缝或热影响区附近越易于产生裂纹,由于这些原始裂纹的存在,从而增加了断裂的危险性。这是油罐大型化过程中遇到的第二个问题。

现以日本神奈川县的球罐为例。该地区自1955年以来共建200m³以上的球形罐210座。由于连续发生破裂事故,他们做了一次普查,在210座球罐中检查了209座,其中有152座有深度1mm以上的裂纹,在152座中有50座存在深度为5mm以上的裂纹。根据统计,厚度与裂纹率(即有裂纹的罐占总数的百分比)有明显的关系,见表1-3〔8〕

表1-3 日本神奈川县对球罐裂纹的统计

厚度, mm	<10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~50
裂纹率, %	33	48	73	74	87	87

一般来说,钢板强度等级越高,其可焊性越低,这就要求油罐设计者选材时注意其可焊性,同时采取合适的焊接工艺。焊前的预热、焊接顺序、线能量的大小、环境条件(大气温度、湿度、风速)等都与焊缝质量有密切关系。这是油罐大型化过程中遇到的第三个问题。

随着油罐的大型化,壁厚 t 与直径 D 之比,即 t/D 值降低,这使油罐刚性降低,从而使油罐抵抗风荷的能力下降了。采取何种方法校核油罐抵抗风荷的能力,以及用何种方法增强这种能力,这是油罐大型化过程中遇到的第四个问题。

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。但造成小油罐与大油罐地震破坏的因素并不完全相同,油罐越大,则在地震时与油罐一致运动的那部分储液(地震波中短周期成分起作用)所占的比例越小,而参与晃动的那部分储液(地震波中周期成分起作用)所占的比例越大。对大型油罐地震破坏的研究及其相应的抗震措施是油罐大型化过程中遇到的第五个问题。

油罐大了,油罐基础所占的面积也大了,许多大型油罐基础的直径在100m以上。在这样大的面积上要找到均匀的工程地质状况往往是比较困难的。大型油罐基础的设计、如何恰当

地提出对于沉陷的要求，以及采用何种结构以增加油罐抵抗不均匀沉陷的能力等是油罐大型化过程中所遇到的第六个问题。

油罐大了以后，一旦发生事故就是一次灾难。例如，1974年12月18日，日本的水岛炼厂发生了一起 5万m^3 油罐的破坏事故。这次事故共跑油 4.3万m^3 。油从罐壁与罐底之间的角缝处冲出，将一个立梯冲倒，并将防油堤冲开，共污染地面 14.83万m^2 ，大约有 $7500\sim 9500\text{m}^3$ 油流到海面上，波及日本冈山县、香川县、德岛县和濑户内海东部一带，使日本受到不小的损失〔4〕。由于大罐事故危害性大，这就要求在设计时更加慎重。随着油罐的大型化，对于油罐受力状况的分析方面，如采用有矩原理进行计算等也都有了相应的发展。

总之，随着油罐的大型化，不仅给人们带来了一些利益，也随之带来了一些技术课题。而对于这些课题的研究和解决又促进了人们对这一技术领域的认识。到目前为止，油罐的设计与建造已逐渐形成了一个独立的技术领域。〔5〕〔6〕

第三节 钢油罐的种类〔7〕

钢油罐的种类一般是按照其几何形状来划分的。通常可分为三大类，即立式圆柱形油罐、卧式圆柱形油罐和双曲率油罐(如滴状油罐和球形油罐)。在以上三大类中，立式圆柱形罐占绝大多数，对大型油罐更是如此。卧式油罐常做为小容器使用。滴状油罐可承受 $0.4\sim 1.2\text{kgf/cm}^2$ 的剩余压力，可消除小呼吸损耗，适于储存挥发性大的油品，但这种油罐结构复杂，施工困难，建设费用高，故在国内尚未采用，国外用的也不多。这种油罐自问世以来，实际上没有得到推广。球罐用于储存液化气，其设计一般划在受压容器范围内。

立式圆柱形油罐，根据其顶部结构的不同又可分为以下几种：

(1)浮顶油罐(见图1-1)。这种油罐的罐顶浮在油面上，并随油品的收发而上下浮动。在浮顶与罐内壁之间的环形空间有随着浮顶上下浮动的密封装置。因为这种油罐几乎全部消灭

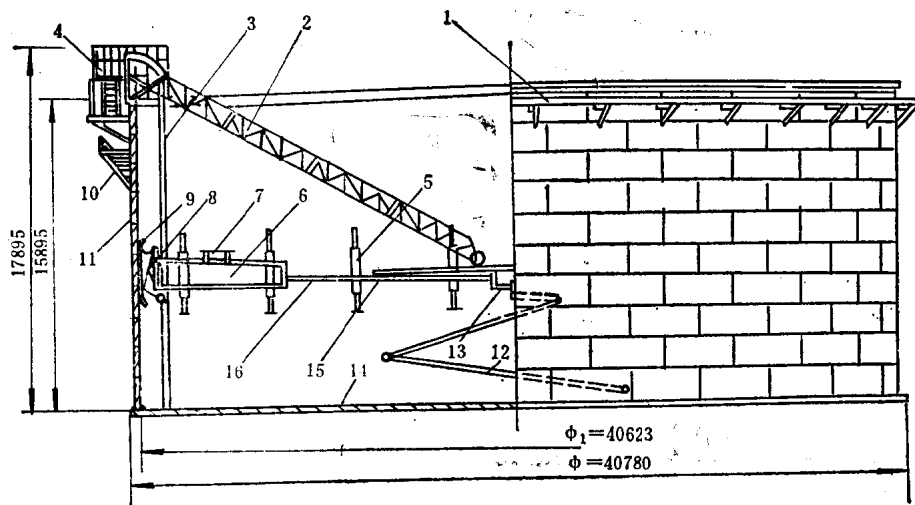


图1-1 浮顶油罐(图中尺寸为 2万m^3 罐尺寸)

1—抗风圈；2—浮梯；3—量油管；4—罐顶平台；5—浮船支柱；6—浮船船舱；7—船舱人孔；8—伸缩吊架(剪刀撑)；9—密封板；10—盘梯；11—罐壁；12—折叠排水管；13—集水坑；14—底板；15—浮梯轨道；16—浮船单盘

了气体空间，从而大大减少了油品的蒸发损耗。此外，这种油罐的顶部与其它固定罐顶相比，在设计时其结构易于处理，由于罐顶的自重受储液支承，其受力状况良好，故大型油罐（ 1万m^3 或更大的）大多采用浮顶油罐。

(2) 拱顶油罐(见图1-2)。拱顶油罐的罐顶为球面的一部分，它是由4~6mm的薄钢板和加强筋组成的。这种罐顶的优点是施工容易，造价低。其缺点是：与浮顶罐相比油气损耗较大；因中间无支撑，罐顶的直径受到一定限制。目前国外最大的拱顶罐5为万 m^3 ，直径50.302m，高23.67m，建在日本。国内最大的拱顶罐为2万 m^3 。最常用的范围为1万 m^3 或更小的油罐。

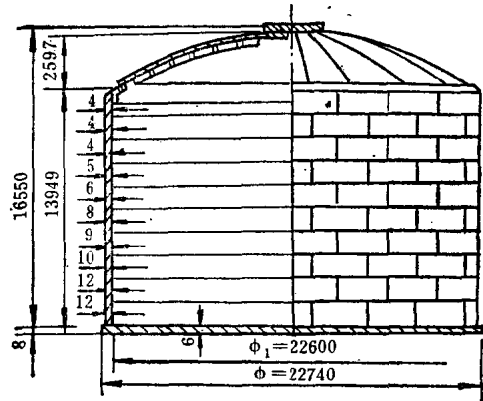


图 1-2 拱顶油罐(图中尺寸为5000 m^3 罐尺寸)

(3) 内浮顶油罐(见图1-3)。这种罐的顶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品的蒸发损耗，外部的拱顶可防止雨水、尘土等进入罐内。这种罐主要用来储存航空汽油、航空煤油等，在国内

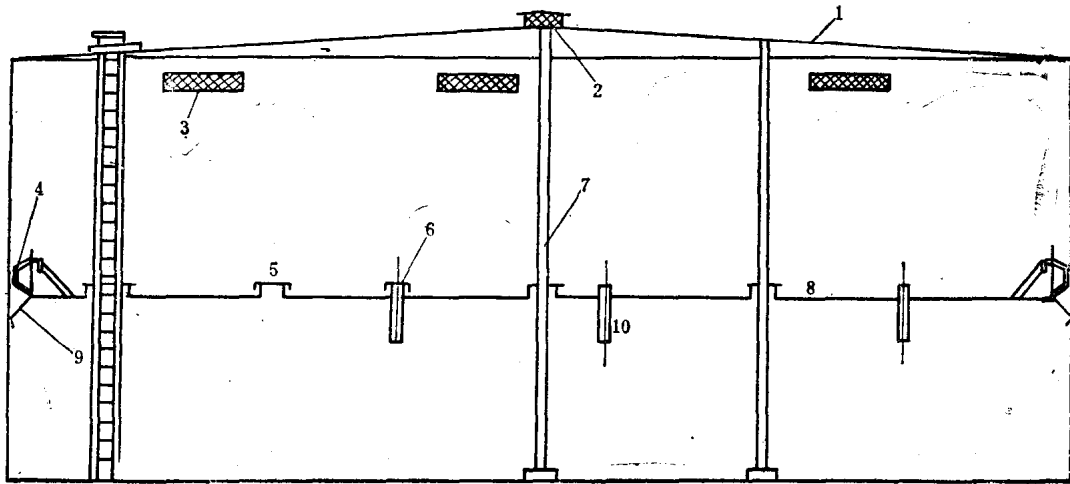


图 1-3 内浮顶油罐

1—罐顶；2—罐顶通气孔；3—罐壁通气孔；4—密封装置；5—单盘人孔；6—自动通风孔；7—罐顶支柱；8—内浮顶；9—导向板；10—浮顶立柱

外有日趋推广的趋势，且采用它来储存车用汽油。

(4) 锥顶油罐(见图1-4)。锥顶油罐的罐顶为圆锥形，坡度为1:20~1:40。根据油罐直径的大小，顶部可设计成自支承式、梁柱式或桁架式。这种类型的油罐在五十年代曾得到广泛的应用，但近许多年来已很少建造了。锥顶罐与拱顶罐相比，有采用型钢种类多，结构比较复杂，施工比较困难等缺点。

(5) 悬链式油罐(见图1-5)。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的。组成罐顶的每块薄钢板都做成扇形，两端分别支于中心柱和罐壁的上周边处，形成一悬链形曲线。在这种情况下，在薄板中只有拉应力而无弯曲应力，故称无力矩油罐。这种油罐五十年代由苏联传至我国，曾一度得到较广泛的应用，并将100~5000

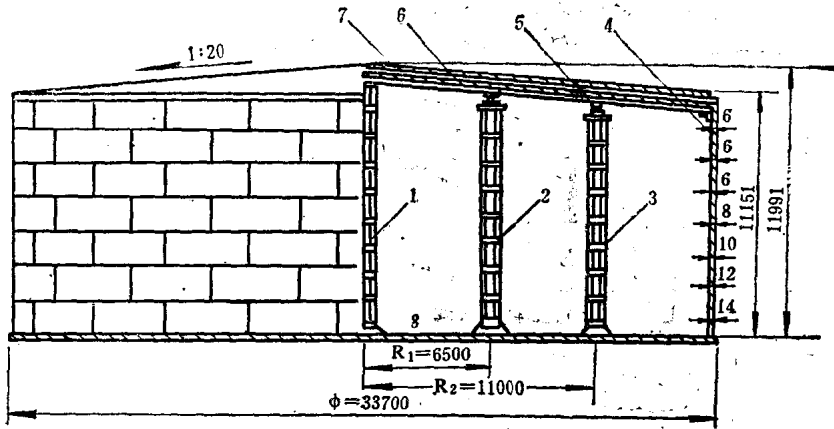


图 1-4 锥顶油罐 (图中所注为 1 万 m³ 罐尺寸)

1—中心立柱；2—内立柱；3—外立柱；4—罐壁；5—内外保温；6—椽；7—顶板；8—底板

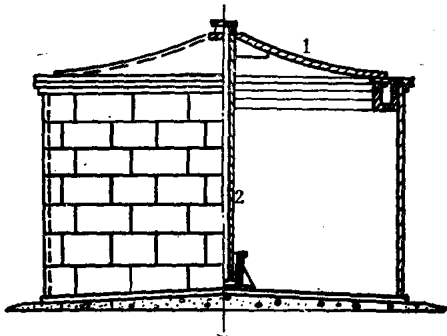


图 1-5 悬链式油罐

1—悬链式罐顶；2—中心柱

m³ 的油罐做成标准设计。这种油罐由于在悬链的最低点易积存雨水而遭锈蚀，目前已逐渐为拱顶罐所代替，现已很少再建。

第四节 油罐钢材的选择

对于立式油罐来说，最重要的部位也是受力状况最严重、消耗金属最多的部位是罐壁和罐底的边板。在储液的静水压力作用下，不同高度处的壁板所受的外载是不同的，因此在设计油罐时，靠下部的一部分壁板的厚度应根据强度条件确定，而上部

几圈壁板的厚度则按刚性条件确定，即按最小壁厚确定。由强度决定的罐壁、罐底的边板、开口接管、补强板等原则上应选择同一种钢材。按照我国目前通常的设计，2 万、3 万、5 万 m³ 油罐，由强度决定的罐壁部分一律采用 16MnR 钢板，由刚性决定的罐壁部分采用 A3F 钢板。由刚性决定的罐壁部分由于受力小、钢板薄（一般为 6~10mm），故在非严寒地区采用沸腾钢不会有危险。有关钢材选用的具体规定在第三章介绍。

由 1000 至 1 万 m³ 的小型油罐，由强度决定的罐壁部分，根据用途及建罐地区最低日平均温度，一般可分别采用 A3F 和 A3 钢板。

当这些小型油罐储存原油时，因罐内均设置加热盘管以防止原油凝固，罐壁温度不会太低，故罐壁材料取 A3F。但不应在气温低于 A3F 的最低使用温度下进行油罐的水压试验。

当这些小型油罐储存轻质油品时，则应根据建罐地区最低日平均温度选取不同材料。当最低日平均温度在 -10℃ 以上时，取 A3F。低于 -10℃ 时取 A3。

我国目前最大的油罐为 5 万 m³，对于 7 万和 10 万 m³ 的油罐可供选用的钢板为 15MnVR。对于更大的油罐则需发展高强度的新钢种。

许多国家生产了专供油罐用的钢板，这种钢板强度高、韧性和可焊性好，钢板的宽度也比较宽。

近年来日本的油罐事业发展较快，其罐壁由刚性决定的部分一般采用 SS41 (JIS G3101，

为一般构造用压延钢)；由强度决定的部分，小于2万m³的油罐，一般取SM41钢材(JIS G 3106)，其中以SM41B、SM41C用的较多。更大的油罐多选用HW50(WES-135-1970)，也有采用SM型钢材的，如SM50，SM55，SM58。表1-4为日本一些油罐选材的实例。钢号HW50中，H代表高强度钢(High Strength Steel)，W代表焊接结构(Welding Structure)，后面的两位数字为屈服极限(kgf/mm²)的最低值。HW型钢材的化学成分只对碳的当量含量和磷、硫元素做了规定，而对其它元素未做规定。各钢厂在满足强度和冲击韧性等要求下，在合金元素上可采用不同配方。

日本在罐壁上常用的另一种钢材为SM型钢材，其中SM41，SM50，SM53，SM58应用较多，其中SM41及SM53在我国均有采用。SS41大约相当于我国的A3F，SM41相当于我国的A3R，SM50与我国的16MnR相近，SM53与我国的15MnVR相近。

表1-4 油罐壁板选材实例(日本)

层数	容量m ³		4万		5万		10万		13万		14万	
	材质及厚度		材质	厚度mm	材质	厚度mm	材质	厚度mm	材质	厚度mm	材质	厚度mm
	10	SS41	8	—	—	SS41	10	SS41	10	—	—	—
9	SS41	8	SS41	8	HW50	10	HW50	10	SS41	10	SS41	10
8	HW50	8	HW50	8	HW50	10	HW50	11	SM58	11	SM58	11
7	HW50	9	HW50	9	HW50	13	HW50	14	SM58	16	SM58	16
6	HW50	11	HW50	12	HW50	16	HW50	18	SM58	21	SM58	21
5	HW50	14	HW50	15	HW50	20	HW50	21	SM58	25	SM58	25
4	HW50	16	HW50	17	HW50	23	HW50	25	SM58	30	SM58	30
3	HW50	18	HW50	20	HW50	26	HW50	28	SM58	35	SM58	35
2	HW50	21	HW50	23	HW50	31	HW50	32	SM58	41	SM58	41
1	HW50	23	HW50	27	HW50	36	HW50	41	SM58	49	SM58	49

美国油罐一般采用ASTM标准钢板，常用的有：A283，A285，A131，A36，A442，A573，A516，A662，A537，A633，A678，A737等十二种。

对于罐壁用钢材有三项主要要求：

(1)强度要求。近年来，对于作为罐壁用的钢材(不包括由刚性决定的部分)，选用的强度值越来越高。这一状况主要由两种因素造成，一是采用高强度钢比较经济。以A3R和16MnR为例，16MnR比A3R大约贵10%，而强度却大约提高30%。另一因素是各国规范均对罐壁的允许最大厚度做了限制。由于有了这一限制，为建设更大的油罐，必须在保证可焊性和冲击韧性的前提下，提高钢板的强度。

钢板的强度(屈服极限、强度极限)是确定罐壁厚度的主要依据，因而对到货钢板的强度指标必须严格检查。

(2)可焊性要求。对钢板的可焊性一般用两种指标控制，一是碳的当量含量，二是热影响区的硬度。

碳的当量含量有不同的计算方法，因而在规定碳当量含量的极限时，必须同时明确计算方法。

英国油罐规范BS2654对碳当量含量的要求比较严格，该规范规定碳当量含量按下式计算

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1-1)$$

式中 C_{eq} ——碳当量含量；

C ——碳含量；

Mn ——锰含量；

Cr ——铬含量；

Mo ——钼含量；

V ——钒含量；

Ni ——镍含量；

Cu ——铜含量。

式(1-1)为热分析值。 C_{eq} 的限制与钢板厚度有关,当厚度为20~25mm时, $C_{eq} \leq 0.43\%$,当厚度大于25mm时, $C_{eq} \leq 0.42\%$ 。

当采用复核分析时,碳当量按式(1-2)计算, $C_{eq} \leq 0.43\%$

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} \quad (1-2)$$

日本对 C_{eq} 的要求比英国宽,例如HW50的 C_{eq} 值按下式计算, $C_{eq} \leq 0.46\%$ 。

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (1-3)$$

对 C_{eq} 的要求与现场焊接条件有关,如最低焊接温度、预热条件控制得较好,则 C_{eq} 可略高些,否则取较低值为妥。

可焊性的另一指标是热影响区的硬度,热影响区的硬度与 C_{eq} 及冷却速度有关。 C_{eq} 越高、冷却速度越快,则热影响区的硬度越高,当把热影响区的硬度做为可焊性的指标时,国际焊接学会IIW(International Institute of Welding)对冷却速度规定为:工件由800°C至500°C的冷却时间为7秒。对HW50钢板规定:热影响区的硬度不大于390Hv(测试载荷为10kgf)。

(3)冲击韧性要求。冲击韧性要求是防止油罐产生脆性断裂破坏的一个重要指标。关于油罐脆性破坏的事例和机理将在本书的第十二章详细地论述,这里仅扼要地对影响油罐脆性断裂的因素加以说明。影响油罐脆性断裂的因素可概括地归纳为以下几方面:

1)脆性破坏的产生主要与材料本身的性质有关。韧性越高的钢材,即却贝冲击值CVN(Charpy V Energy)越高则对于脆性破坏的阻力越大,亦即越不容易产生脆性破坏。

2)脆性破坏的发生与裂纹所在部位的应力水平有关,应力越高则越容易产生脆性破坏。

3)与裂纹的尺寸和形状有关,裂纹尖而长则易于产生脆性破坏。

4)与罐壁的温度有关,温度越低,钢材的韧性越差,越容易产生脆性破坏。

5)与钢板的厚度有关,钢板越厚越容易产生脆性破坏。

世界上许多国家对罐壁钢材的冲击韧性都提出了明确的、大致相同的要求,这些要求反映了以上几个因素的影响。

英国油罐规范BS2654根据钢材的强度等级将其分成三类,并对每一类提出了各自的冲击韧性要求:

(1)材料等级等于或小于43级(大致相当于我国的A 3 R),壁厚 $t \leq 12.5\text{mm}$ 时,可不作冲击韧性试验;壁厚 $t > 12.5\text{mm}$ 时,应做却贝V冲击韧性试验,试验温度取20°C和图1-6中

所示的试验温度中的较低者。在该试验温度下要求 $CVN \geq 27$ 焦耳(2,754kgf-m)。

(2) 材料等级在由大于43至50的范围内(大约相当于我国的16MnR钢), 壁厚 $t \leq 12.5$ mm时, 可不作冲击韧性试验; 壁厚 $t > 12.5$ mm时, 应做却贝V冲击试验, 试验温度取 -5°C 和图1-6中所示试验温度中的较低者。在该试验温度下要求 $CVN \geq 41$ 焦耳(4,182kgf-m)。

(3) 材料等级大于50级(相当于我国16MnVR或更高)时, 任何厚度均需进行冲击试验。试验温度取 -15°C 和图1-6中所示的试验温度中的较低者。在该试验温度下要求 $CVN \geq 41$ 焦耳。

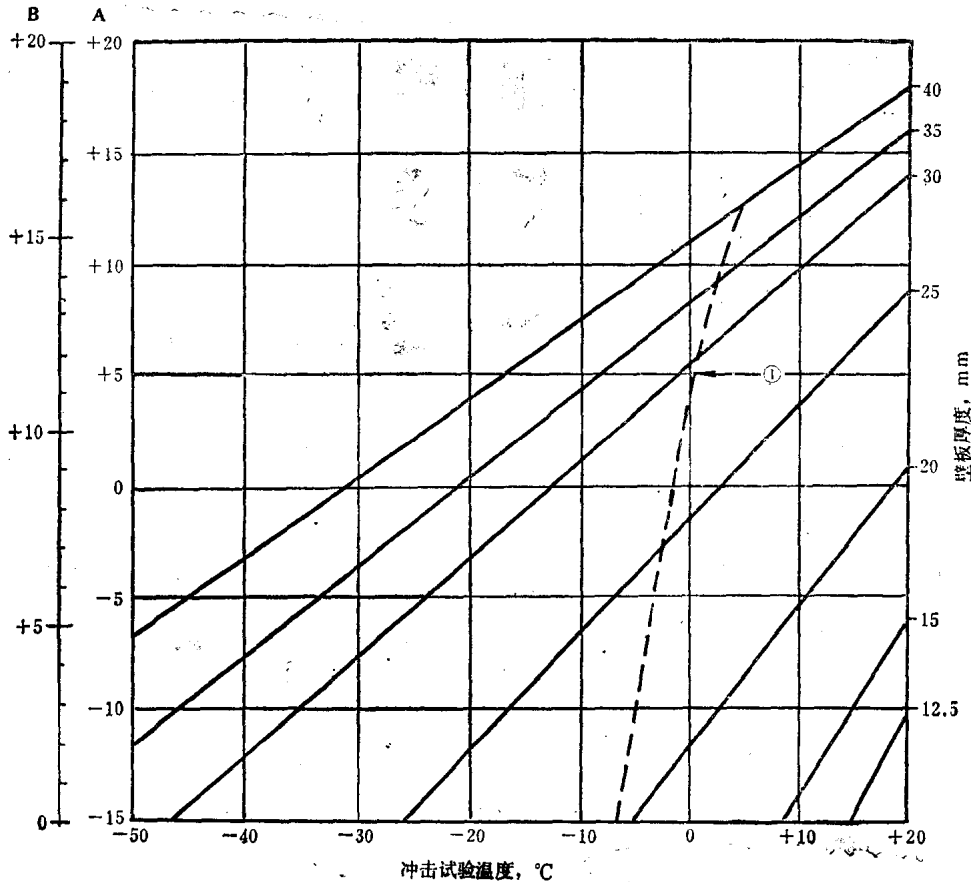


图 1-6 冲击试验温度

A—最低设计温度, $^{\circ}\text{C}$; B—充水试压最低温度, $^{\circ}\text{C}$

图 1-6 中的设计温度取建罐地区最低日平均温度再加上 10°C 。

$\sigma_s < 460\text{N}/\text{mm}^2$ 的碳钢或碳锰钢, 在图 1-6 中的①线右侧可不作冲击试验。

由图 1-6 可以看出, 对于同一种材料, 在同样的设计温度下, 钢板越厚要求的冲击试验温度越低。例如, 当设计温度为 0°C 时,

$t = 40\text{mm}$, 试验温度为 -31°C

$t = 35\text{mm}$, 试验温度为 -21°C

$t = 30\text{mm}$, 试验温度为 -12°C

$t = 25\text{mm}$, 试验温度为 3°C

$t = 20\text{mm}$, 试验温度为 19°C

由图 1-6 还可看出, 对于同一种材料, 同样厚度时, 设计温度越低, 在一定范围内试验温度的要求也越低。例如, 对于 $t = 25\text{mm}$ 的钢板,

设计温度 = -15°C 时, 要求试验温度 = -26°C

设计温度 = -10°C 时, 要求试验温度 = -17°C

设计温度 = -5°C 时, 要求试验温度 = -7°C

设计温度 = 0°C 时, 要求试验温度 = 3°C

以上反映了钢板越厚、罐壁温度越低, 越容易产生脆性破坏这一事实。

美国石油学会油罐规范 API650 把钢材分为六类, 材质相近者归为一类, 对每一类在不同厚度下的设计温度和冲击韧性有不同的要求。

属于 I 类的钢材有 A283C, A285C, A131A (最大厚度为 0.5in), A36 (最大厚度 0.5in) 等半镇静钢。

属于 II 类的钢材有 A131B (最大厚度为 1 in), A36, A442-55, A422-60 等镇静钢和半镇静钢。

属于 III 类的钢材有 A573-58, A516-55, A516-60 等细晶粒镇静钢。

属于 III A 类的钢材有 A131CS 细晶粒镇静钢, 经正常化处理。

属于 IV 类的钢材有 A573-65, A573-60, A516-65, A516-70, A662B 等细晶粒镇静钢。

属于 IV A 类的钢材有 A662C 等细晶粒镇静钢。

属于 V 类的钢材有 A573-70, A516-63, A516-70 等细晶粒镇静钢, 经正常化处理。

属于 VI 类的钢材有 A131EH36, A633C, A633D, A537 I, A537 II, A678A, A678B, A737B 等细晶粒镇静钢, 经正常化或调质处理。

厚度小于或等于 1.5in 的钢板 (控制轧制钢板除外), 按图 1-7 可求出不同厚度、不同种类钢材的允许设计温度值, 如实际设计温度等于或高于允许设计温度时, 则不必进行冲击韧性试验, 否则需进行试验。例如选用 0.50in 厚的 A285C 钢板, 设计温度为 10F。A285C 属于 I 类钢材, 由图 1-7 求出允许设计温度为 20F, 而实际设计温度为 10F, 低于允许值, 故必需进行冲击韧性试验。

API650 规定设计温度为最低日平均温度加 15F。

API 规定钢板的最大厚度为 1.75in, 厚度大于 1.5in 的钢板必须经过冲击韧性试验, 且必须是细化晶粒镇静钢, 且需经过正常化和回火处理或调质热处理。

表 1-5 最小允许冲击韧性值

钢材类别	厚度, in	三个试样的平均值, lb.-ft.	
		纵向	横向
I, II, III, IIIA	最大厚度规范中另有规定	15	13
IV, IVA, V, VI (调质钢除外)	$t \leq 1.5$	30	20
	$1.5 < t \leq 1.75$	35	25
	$1.75 < t \leq 2$	40	30
	$2 < t \leq 4$	50	40
VI (调质钢)	$t \leq 1.5$	35	25
	$1.5 < t \leq 1.75$	40	30
	$1.75 < t \leq 2$	45	35
	$2 < t \leq 4$	50	40

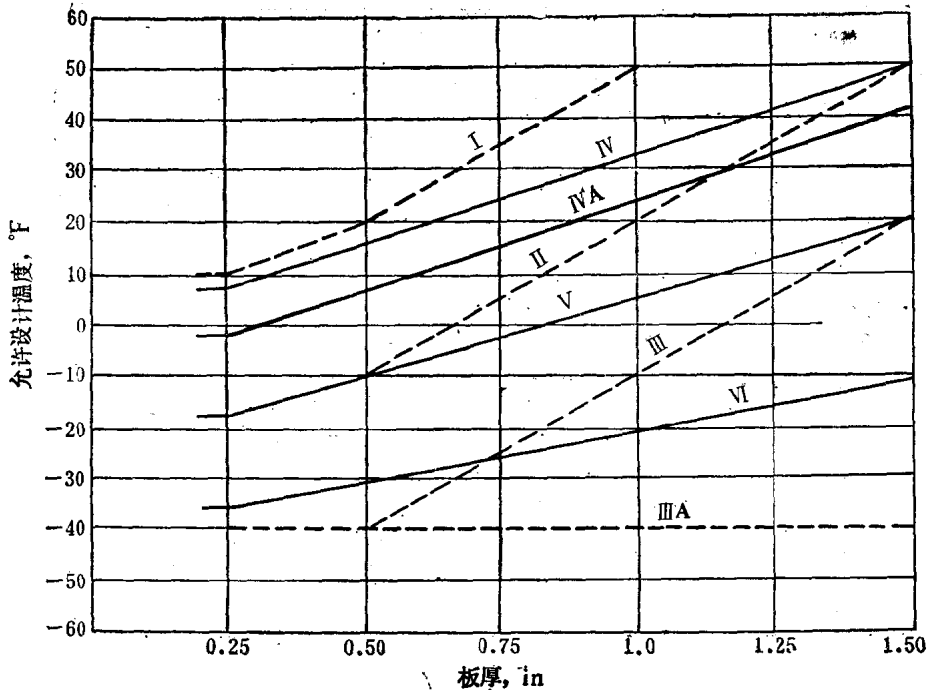


图 1-7 不进行冲击试验的最低设计温度

对于最小允许的冲击韧性值API650做了详细规定，具体数值见表 1-5。由表中看出，钢板越厚、强度等级越高，则冲击韧性要求越高。在同一个位置上要取三个试样，三个试样的平均值应大于或等于规定的最小允许冲击韧性值，且只允许三个试样中只有一个试样冲击韧性值低于要求的数值，若多于一个试样或三个试样中有任一个试样的冲击韧性值低于规定的允许最低值的 $2/3$ ，则应重新进行试验。重新试验的三个试样的冲击韧性值必需均大于或等于规定的最小允许冲击韧性值。

关于沸腾钢的使用许多国家的油罐规范都做了严格的限制，在我国早些时候对此也是有争议的，有些人认为应推广使用，因为沸腾钢价格便宜，而且有些地方曾用沸腾钢建造了油罐，长期使用并未破坏。另一些人则不赞成推广使用。

镇静钢与沸腾钢在冶炼方法上是不同的，镇静钢在冶炼时，出钢前在炉中加Mn、Si进行脱氧。一般出炉后还加Al进一步脱氧，故脱氧完全，钢水在浇铸过程中保持镇静状态。沸腾钢在冶炼时只用Mn进行部分脱氧，出炉后也不再处理，因此出炉的钢水中仍有较多的氧，这些氧与钢中的碳相互作用，形成CO，在凝固时，这些CO不断由钢中逸出，造成沸腾状态，故称之为沸腾钢。

镇静钢在国外称为“Killed Steel”，意思是切头的钢。镇静钢在浇铸之后，由于钢液的凝缩，在钢锭上形成一个很大的缩口，这一段在压轧之前必须切掉。

沸腾钢在凝固过程中产生大量的CO，这些气体一部分由钢中逸出，另一部分则来不及排出而在钢中形成气孔。这些气孔大大地减小了或完全抵消了由于钢液凝缩而形成的缩口，因而可以不切头或减少切头量，由于沸腾钢气孔中的CO不会使孔的四壁氧化，故这些小孔在压轧过程中就会焊合。

沸腾钢的强度极限、屈服极限均与镇静钢相同，但沸腾钢成材率高，所用的还原剂少，