

非金属圆柱形储罐

设计与计算

吕龙水 吕凌云 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

非金属圆柱形储罐 设计与计算

吕龙水 吕凌云 编著
唐锦春 审稿

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统地叙述了非金属圆柱形储罐尤其是钢筋混凝土和砖石结构圆柱形储罐的设计与计算,其中包括储罐壁板、顶盖、底板的设计与计算等内容。条理清晰,推导完整,理论与实践结合紧密。

本书可供非金属储罐研究、设计和施工的技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

非金属圆柱形储罐设计与计算/吕龙水,吕凌云编
著. —北京:中国石化出版社,2008
ISBN 978-7-80229-604-6

I. 非… II. ①吕…②吕… III. ①非金属材料-圆柱体-储罐-储油设备-设计②非金属材料-圆柱体-储罐-储油设备-计算 IV. TE973.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 066422 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京密云红光制版公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

850×1168 毫米 32 开本 6.625 印张 171 千字

2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

定价:18.00 元

前 言

非金属储罐广泛地在民用和工业建设中应用,用以储存水、石油和化工产品等;除容量较小的采用砖石结构外,其余大都采用钢筋混凝土结构。非金属储罐具有耐久、耐火和整体性能好等特点,钢筋混凝土材料中大量的砂、石均可就地取材,多而易得。

非金属储罐储罐体形可塑,受力均衡性较好,多采用圆柱体,其壁厚比直径少得很多,可以把它视为薄壳体结构。但非金属圆柱形储罐计算较为冗繁,为减少计算工作,视壁板为弹性地基上无限长梁进行计算式的推导,将繁杂的计算列出系数表格,大大减少计算工作量。

本书编写过程中蒋巧玲、吕零筠两工程师协助制作插图,浙江大学建筑工程学院唐锦春教授对全书进行审阅,在此致以诚挚的感谢。

限于作者技术水平,不揣粗浅、错谬及不足之处,敬请广大工程技术人员和院校师生批评指正。

编著者

2008年3月于浙江金华

目 录

第一章 概述	(1)
一、储液罐的分类	(1)
(一) 按平面形状分类	(1)
(二) 按建造安放的位置分类	(2)
(三) 按储存的液质分类	(2)
二、储液罐容积及高度的合适尺寸	(3)
第二章 壁板的设计与计算	(5)
第一节 小尺寸开口储液罐壁板的计算	(6)
第二节 圆柱形储液罐壁板内力的准确计算法	(9)
一、圆柱形罐壁的变位微分方程及其通解	(9)
(一) 物理方程	(9)
(二) 罐壁径向位移的微分方程	(10)
(三) 罐壁内力计算式	(17)
二、三角形荷载作用时罐壁五种不同边界条件时	
壁板弯矩和环向力计算(坐标原点在壁顶端) ...	(18)
(一) 壁顶自由, 壁底铰接	(19)
(二) 壁顶自由, 壁底固接	(21)
(三) 壁顶铰接、壁底固接	(24)
(四) 壁顶铰接、壁底铰接	(25)
(五) 壁顶固接、壁底固接	(26)
(六) 非齐顶荷载作用时罐壁内力计算	(28)
三、均布荷载作用于罐壁时五种不同边界条件	
的壁板弯矩和环向力的计算	(28)
(一) 壁顶自由, 壁底铰接	(29)
(二) 壁顶自由, 壁底固接	(30)

(三) 壁顶铰接、壁底固接	(31)
(四) 壁顶铰接、壁底铰接	(33)
(五) 壁顶固接、壁底固接	(34)
第三节 温度作用下的内力计算	(35)
一、温度作用下壁板的弯矩和环向力	(35)
(一) 油品加热温度	(35)
(二) 罐体构件的温度计算	(36)
(三) 罐体构件热工物理指标	(41)
(四) 温度内力的计算	(42)
二、温度作用下壁板五种不同边界条件的弯矩和 环向力的计算	(44)
(一) 壁顶自由、壁底铰接	(44)
(二) 壁顶自由、壁底固接	(46)
(三) 壁顶铰接、壁底固接	(48)
(四) 壁顶铰接、壁底铰接	(49)
(五) 壁顶固接、壁底固接	(50)
第四节 温度作用下混凝土强度和 构件截面刚度的计算	(50)
(一) 油罐构件截面的刚度	(50)
(二) 在温度作用下混凝土的设计强度	(50)
(三) 温度作用下混凝土的弹性模量	(51)
第五节 罐壁构造与配筋	(51)
一、罐壁材料的强度等级	(51)
二、增大罐容量的措施	(52)
三、壁板的边界条件	(52)
四、壁板上、下端边界支承情况的相互影响	(52)
五、壁板配筋	(54)
(一) 壁板所承受的荷载	(54)
(二) 荷载组合	(55)
(三) 壁板配筋	(55)

(四) 预应力罐壁板、预应力钢筋的计算	(57)
六、预应力钢丝的计算	(60)
第三章 储罐顶盖设计	(61)
第一节 预制装配扇形板顶盖	(61)
一、扇形板顶盖结构系统梁、板、柱的布置	(61)
二、扇形板的设计与计算	(63)
三、中心板计算	(67)
(一) 单柱支承的中心圆形板计算	(67)
(二) 周边支承的圆板、半圆板计算	(73)
四、环梁计算	(74)
五、柱子计算	(80)
第二节 无梁楼盖式顶盖	(80)
一、无梁顶盖的构造	(81)
二、无梁顶盖截面的弯矩计算	(83)
三、无梁顶盖的配筋计算	(85)
第三节 圆锥壳顶盖	(86)
一、顶盖荷载	(86)
二、内力分析	(86)
(一) 由壳面上荷载引起的内力(设壳面上 荷载为均匀分布)	(87)
(二) 作用于内环上的线荷载引起的内力	(89)
(三) 内力组合	(90)
三、锥壳截面计算	(90)
第四节 圆顶壳顶盖	(91)
一、圆顶壳的型式	(91)
二、圆顶壳孔洞构造	(93)
三、平滑圆顶壳的计算	(93)
第四章 储液罐底板设计	(99)
第一节 罐内无柱的底板设计	(99)
第二节 罐内有柱时的底板设计	(104)

第三节 底板构造	(104)
第四节 工程实例	(106)
(一) 各部尺寸	(109)
(二) 材料容重及荷载系数	(109)
(三) 内力计算	(109)
附录一 三角形荷载作用下计算壁板弯矩用系数和计算环 向力用系数	(117)
附录二 均布荷载作用下计算壁板弯矩用系数和计算环 向力系数	(147)
附录三 计算壁板内外温度差 Δt 作用下壁板弯矩系数和 环向力系数	(177)
参考文献	(201)

第一章 概 述

非金属储液罐在工业和民用事业上广泛地应用着，常常用来储存水或其他液体如酒精、石油及石油产品(汽油、煤油、柴油、……)。

本书主要论述钢筋混凝土圆柱形储液罐。无论储存何种液体，当其结构外形相同时，其计算方法基本相同，仅仅作用的荷载大小、种类有别以及对储存不同的液体其防渗要求等不同而已。

一、储液罐的分类

储液罐的分类方法繁多。人们常以建筑材料而分，可分为钢罐、钢筋混凝土罐和砖石罐。这里主要论述钢筋混凝土罐，钢罐不在此列。

就其有无顶盖而论分为开口储罐和封闭(加顶盖)储罐。

按其施工方式来分(均指钢筋混凝土罐)可分为装配式、整体现浇式或混合式(有现浇、又有预制装配)。通常储液罐的底板都是现浇钢筋混凝土结构，仅将壁板、顶盖做成预制或现浇结构。

储罐按其是否对壁板施加预应力而论，人们又称其为预应力储罐或非预应力罐。

除了上面这些分类之外，还有如下一些分类。

(一) 按平面形状分类

按储罐的平面形状可分为圆形罐和矩形(或方形)罐，为了区别，人们称圆形的为储液罐，称矩形(或方形)的为储液池。

在建设中采用圆形罐还是矩形池应视工艺要求、施工条件、经济效益以及具体场所而定，矩形池施工比较方便，当其壁高与圆形罐差不多时，多个储液池建造在一起时，其平面布局紧凑、

占地面积小，土地利用率高。

圆形罐其体型为圆柱形。罐底板有平底、锥形底或球形底的。顶盖有平顶、锥壳顶或球形顶盖的。但无论顶盖和底板的形式如何变化，其壁板受力明确，环向只受拉（或压）应力。而矩形池的壁板除水平方向有拉（压）应力外其水平及竖向均有弯矩作用，因此壁板就需设计得厚一些。矩形池壁板所受弯矩较大，其高度受限，一般以小于 5m 为宜。建造同样容量的储液池，由于高度小，其顶盖和底板所耗材料就比较多。一般情况下，圆形储罐壁板的受力性能和节约材料方面都比矩形池有利。但是综合技术经济条件，对于普通钢筋混凝土储液罐（池）来讲当容积为 $50 \sim 100\text{m}^3$ 时，采用矩形、圆形都可以，其建造经济投入不相上下。当容积为 $100 \sim 5000\text{m}^3$ 时，采用圆形罐有利。当容积为 5000m^3 以上时，采用矩形池比较经济。

当采用预应力钢筋混凝土罐壁时，圆形罐的使用范围可扩大，国内外有建造几万甚至于几十万立方米预应力钢筋混凝土圆形罐的。

（二）按建造安放的位置分类

1. 地下罐

当罐内液面低于附近地面（指 6m 以内）0.2m 以下者。

2. 半地下罐

罐底埋入地下深度不小于罐高的一半且罐内液面高于附近地面的最低标高少于 2m 者。如图 1-1 所示。

3. 地上罐

不符合上列两种情况者称为地上罐。

（三）按储存的液质分类

按储存液质类别讲，不外乎水罐及油罐。储水罐为人们所熟悉，这里主要介绍储油罐。

1. 原油罐

在炼油厂与油田常建造为数不少的原油罐，每个容量在几千、几万或几十万立方米。我国除金属罐储存原油外，各地建造

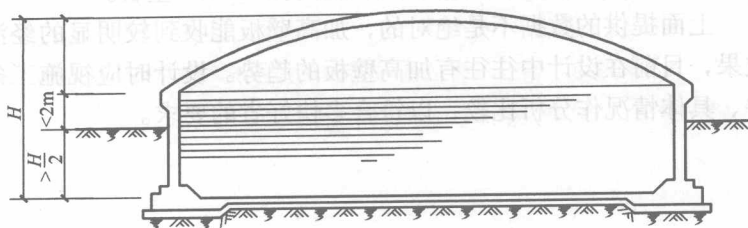


图 1-1 半地下罐

了大量钢筋混凝土或砖原油罐。当非金属原油罐建于地下时，原油内的轻质油渗透性亦较强，当防渗层做得不好时待渗漏一段时间后，罐周土壤被油品饱和就不再渗漏。国外有利用地下盐矿坑穴以储存几十万立方米原油的。

2. 重油罐

用于储存重油如燃料油、渣油等，使用情况与原油罐相似。渣油罐内温度较高，一般为 85°C 左右。对罐壁受力有较大影响，设计时应加以计算与考虑。

3. 轻油罐

用来储存汽油、煤油、柴油及苯、甲苯、二甲苯芳烃类油品。这类油品渗透能力强并有一定的腐蚀性。因此，当用非金属油罐时往往要加衬里。要求衬里有足够的抗渗能力和耐腐蚀的能力以及对储存的油品质量不受影响。

二、储液罐容积及高度的合适尺寸

要把储液罐设计得经济合理，正确确定它的平面尺寸和罐壁高度是很重要的。非金属储罐(池)壁板高度当容积为 $50 \sim 500\text{m}^3$ 时以 3.5m 为宜；容积为 $600 \sim 2000\text{m}^3$ 时，壁高以 4.5m 左右为宜；当容积为 $2500 \sim 5000\text{m}^3$ 时壁高以 6.0m 左右为佳。同样容量的罐，加高壁板可使顶盖及底板节省较多的材料。但是由于罐(池)壁受力情况以及施工方面的条件所限，一般壁高在 $4.5 \sim 7.0\text{m}$ 之间，很少超过 8m 的。

砖壁储罐一般做成圆形平面，壁高在4~6m左右。

上面提供的数据不是绝对的，加高壁板能收到较明显的经济效果，目前在设计中往往有加高壁板的趋势。设计时应视施工条件、具体情况作分析比较，以符合多快好省的要求。



图 1-1

用，但不宜在壁板上开孔，如需开孔，应设在壁板下部，且应加设加强圈。壁板上部应设通风管，其管径不宜小于100mm。壁板上部还应设排水管，其管径不宜小于50mm。壁板上部还应设检修门，其门径不宜小于1000mm。壁板上部还应设爬梯，其爬梯应符合有关规范的要求。

3. 壁板厚度

壁板厚度应根据储罐的容量、壁高、材料强度等因素确定。一般壁板厚度不宜小于100mm。对于容量大于1000m³的储罐，壁板厚度不宜小于150mm。对于容量大于2000m³的储罐，壁板厚度不宜小于200mm。对于容量大于3000m³的储罐，壁板厚度不宜小于250mm。对于容量大于4000m³的储罐，壁板厚度不宜小于300mm。对于容量大于5000m³的储罐，壁板厚度不宜小于350mm。对于容量大于6000m³的储罐，壁板厚度不宜小于400mm。对于容量大于7000m³的储罐，壁板厚度不宜小于450mm。对于容量大于8000m³的储罐，壁板厚度不宜小于500mm。对于容量大于9000m³的储罐，壁板厚度不宜小于550mm。对于容量大于10000m³的储罐，壁板厚度不宜小于600mm。

4. 壁板材料

壁板材料应根据储罐的容量、壁高、材料强度等因素确定。一般壁板材料不宜采用普通粘土砖，应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于1000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于2000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于3000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于4000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于5000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于6000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于7000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于8000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于9000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。对于容量大于10000m³的储罐，壁板材料应采用高强度、耐腐蚀的特种砖。

5. 壁板施工

壁板施工应符合下列规定：(1) 壁板施工前应进行技术交底，明确施工要求。(2) 壁板施工前应进行材料检验，合格后方可使用。(3) 壁板施工前应进行基础验收，合格后方可施工。(4) 壁板施工时应严格控制壁板厚度，不得有负偏差。(5) 壁板施工时应严格控制壁板垂直度，不得有负偏差。(6) 壁板施工时应严格控制壁板平整度，不得有负偏差。(7) 壁板施工时应严格控制壁板接缝质量，不得有渗漏。(8) 壁板施工时应严格控制壁板外观质量，不得有缺陷。(9) 壁板施工时应严格控制壁板施工进度，不得有延误。(10) 壁板施工时应严格控制壁板施工成本，不得有超支。

第二章 壁板的设计与计算

储存水及石油液体产品的容器很多采用非金属材料制作，一般做成方形或圆柱形。这里，本文只讨论钢筋混凝土圆柱形储液罐壁板的设计与计算，砖壁圆柱形储液罐的计算与其有类同处。

圆柱形钢筋混凝土储液罐壁板视储存石油产品的性质、防渗漏要求以及施工条件，有时做成装配整体式，有时现浇混凝土而成。无论是预制壁板装配整体式或现浇混凝土壁板，其壁板与储液罐的底板往往连结成整体。

圆柱形储液罐的壁板，其受力情况不但因有无顶盖、顶盖的形式(平顶、曲面、球形)以及壁顶(盖)的连接方式而异，而且与储液罐的直径、高度有关。这里应着重指出的是，预制装配式圆柱形储液罐壁板的高度受施工运输及受力过大等因素有一定的限制，一般高度为5~6m，很少超过8m。(现浇壁板的高度不在此限，应通过受力计算及经济比较而定。)

当储液罐的高度为一定值时，其大小主要视直径而定，而当储液罐的容量较大，其直径就大；那么，储液罐壁板的内力分析应采用较准确的方法。当直径较小且无顶盖(即开口圆柱形罐)，而且壁板与底板连结成整体，其壁板的受力分析可视其壁(板)底(板)两者无连系采用近视的方法。这样在荷载作用下，罐壁只产生环向力。

作用在储液罐罐壁上的荷载在罐内的有液体压力(呈三角形分布)，当储存石油液体产品时尚有油气正压力(或负压力)的作用(为均布荷载)；非金属储液罐由于工艺生产等方面的要求，常做成地下或半地下式。如储水罐为防止冰冻往往覆土成为地下或半地下式水罐；炼油厂由火车罐车卸下来的原油储存罐均设计为地下罐(俗称零位罐，因为它的标高在附近地面以下)；为了

减少成品油因气温变化挥发损耗，往往埋设于地下或半地下式。这时罐壁外部有土压及地下水压力(当有地下水时)的作用。土压力呈三角形或梯形分布，地下水荷载则为三角形。

第一节 小尺寸开口储液罐壁板的计算

当储液罐的直径较小且无顶盖或有预制顶盖，但其壁(板)与顶盖无构造连接时，顶盖对罐壁的变形无约束作用，我们均可按开口储液罐视壁顶、壁底无连接而计算其内力。

分析计算罐壁受力时，我们只要分析在梯形荷载作用下的情况就可以了。图 2-1(a) 为一个高度为 H 、直径为 $2R$ 、壁厚度为 h 且等厚度壁板(壁板上、下端厚度相同)，壁板上、下端为自由的圆柱形罐。作用于壁顶端的荷载为 q_2 ，作用于壁底端的荷载为 q_1 的梯形荷载。当 $q_2 = 0$ 时，则作用于罐壁的即为三角形荷载；当 $q_1 = q_2$ 时，即为均布荷载。

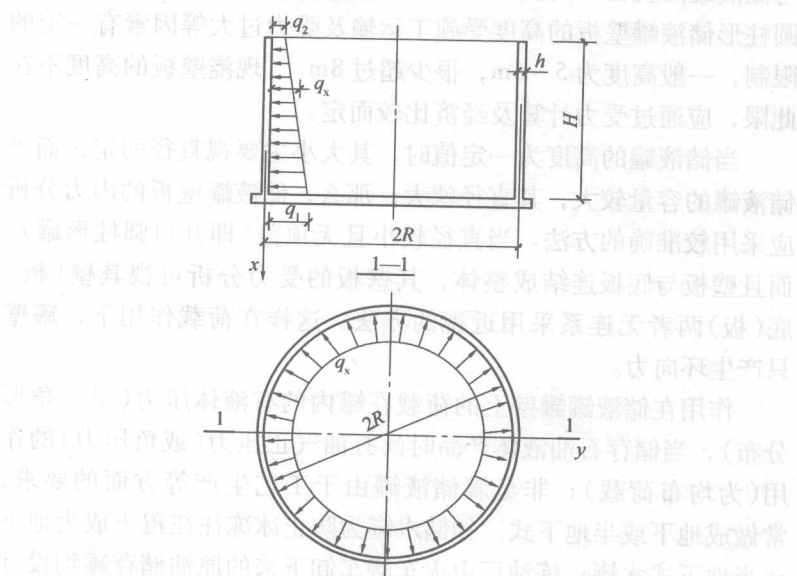


图 2-1(a) 开口储液罐

在液面以下 x 处切取高度 $\Delta x = 1$ 的一个半圆环，设半环壁截面上的内力——环向力为 T_x 。当求得 T_x 的大小后即可设计计算壁板的厚度及配筋。

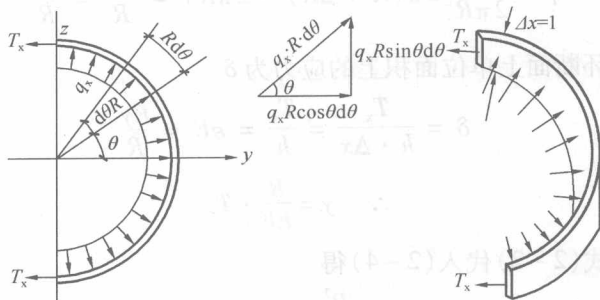


图 2-1(b) 环向受力图

在深度为 x 处，罐壁单位面积上作用的静压力为 q_x ，则

$$q_x = q_2 + \gamma x \quad (2-1)$$

相当于 $d\theta$ 角的单位面积 $dF = \Delta x \cdot ds$ 上的液体静压力等于

$$q_x \cdot \Delta x \cdot ds = q_x \cdot R \cdot d\theta \quad (ds = R \cdot d\theta, \Delta x = 1)$$

其水平分力为

$$q_x \cdot R \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

取 x 轴方向合力为零

$\Sigma F_x = 0$ 则

$$2T_x - 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_x R \cos \theta d\theta = 0$$

所以

$$\begin{aligned} T_x &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} q_x R \cos \theta d\theta = q_x R [\sin \theta]_0^{\frac{\pi}{2}} = q_x R \\ &= (q_2 + \gamma x) R \end{aligned} \quad (2-2)$$

再计算上、下端为自由的等厚度圆柱形罐壁壁板的径向变形 γ_0 、转角 β 及壁板的弯矩 M_x 和切力 Q_x 。

设壁板在环向力 T_x 作用下(设 T_x 为拉力)圆环将伸张扩大，其半径 R 伸张后为 $R + \Delta R = R + \gamma$ ，则张大后的圆环圆周长度为

$$2\pi(R + \Delta R) = 2\pi(R + y)$$

圆环圆周的应变为 ε

$$q = \frac{1}{2\pi R} [2\pi(R + \Delta R) - 2\pi R] = \frac{\Delta R}{R} = \frac{y}{R}$$

圆环断面上单位面积上的应力为 δ

$$\delta = \frac{T_x}{h \cdot \Delta x} = \frac{T_x}{h} = \varepsilon E = \frac{E y}{R} \quad (2-3)$$

$$\therefore y = \frac{R}{Eh} \cdot T_x \quad (2-4)$$

将式(2-2)代入(2-4)得

$$y = \frac{R^2}{Eh} (q_2 + \gamma x) \quad (2-5)$$

对式(2-5)求导得

$$\beta = \frac{dy}{dx} = \frac{\gamma R^2}{Eh} \quad (2-6)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_x}{EJ} = 0 \quad (2-7)$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{Q_x}{EJ} = 0 \quad (2-8)$$

由式(2-6)可知, $\beta = \text{常数}$, 即上、下端为自由的圆柱形罐壁板在梯形荷载(三角形或矩形荷载也同样)作用下, 其罐壁在纵向任意点的转角 β 值相等。换言之, 其罐壁变形后呈直线, 仅转动了一个 β 角度。

由式(2-7)、式(2-8)可知, 壁板所受 $M_x = 0$ 、 $Q_x = 0$, 这表明罐壁竖向没有受剪力和弯矩。

当上、下端自由其厚度不相等的变截面罐壁, 即壁板顶部厚度较小、底部厚度较大的梯形截面圆柱形罐壁在荷载作用下, 也可证明它只产生环向力 T_x 。

壁板厚度及其配筋设计计算将在第四节讨论。

第二节 圆柱形储液罐壁板 内力的准确计算法

在工程实践中,壁板底部一般均与罐底板刚性连接,因此,在计算直径较大的罐壁内力时,应考虑这种结构上的连续性采用较准确的计算方法。

一、圆柱形罐壁的变位微分方程及其通解

容量较大的非金属圆柱形储液罐其直径(设为 $2R$)比壁板厚度(设壁厚为 h)大得多,这时可视其如圆柱薄壳一样,在外荷载作用下,罐体除产生环向力外,沿罐壁垂直方向还有弯矩和剪力,在这些力的共同作用下,使罐壁产生径向挠度 y 和角度变位 θ ($\theta = \frac{dy}{dx}$)。

罐壁上切出单位宽度 $ds = 1$ 的垂直带如图 2-2。则此带可视为下端固定于底板、上端自由的梁,该梁沿全长(高度方向)被与挠度成正比的内部弹性力 T_{2x} 所支持。由于梁长(即壁板高度)比壁厚度大得多,所以这个壁板带可视为弹性地基上的无限长梁来计算。

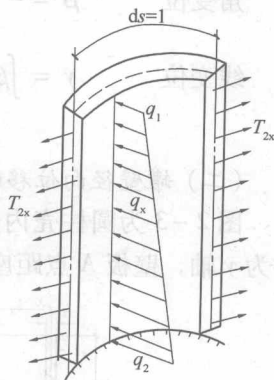


图 2-2 壁板受力图

(一) 物理方程

为便于下面的计算,我们先重温一下材料力学的公式,当梁的挠曲方程 $y=f(x)$, 则

1. 微分关系

$$\text{线变位(即挠度)} \quad y=f(x) \quad (2-9)$$

$$\text{角变位(即转角)} \quad \beta = \frac{dy}{dx} = y' \quad (2-10)$$

$$\text{弯矩} \quad M = -EJ \frac{d\beta}{dx} = -EJ \frac{d^2y}{dx^2} = -EJy'' \quad (2-11)$$