

高等院校石油天然气类规划教材

管道及储罐强度设计

帅 健 于桂杰 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

管道及储罐强度设计

帅健 于桂杰 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

“管道与储罐强度”是油气储运系统设计的重要内容，它直接关系到油气输送管道和油品储存设施的安全。本书从基本理论、标准规范和分析计算方法等方面，对油气管道和储罐的结构型式及应力分析进行了详尽而全面的介绍。内容包括地下管道、地上管道、海底管道和储罐设计与安装的分析计算，以及油气管道的稳定性、抗震分析理论和在役管道的剩余强度评价。

本书可作为油气储运及其他相关专业的教材，也可供从事管道和储罐设计的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

管道及储罐强度设计/帅健，于桂杰编著.

北京：石油工业出版社，2006.6

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 7-5021-5485-X

I. 管…

II. ①帅… ②于…

III. ①石油管道-强度-设计-高等学校-教材

②储罐-强度-设计-高等学校-教材

IV. TE 973.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 028999 号

出版发行：石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址：www.petropub.com.cn

总 机：(010) 64262233 发行部：(010) 64210392

经 销：全国新华书店

印 刷：石油工业出版社印刷厂

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：17.5

字数：442 千字 印数：1—3000 册

定价：26.00 元

(如出现印装质量问题，我社发行部负责调换)

版权所有，翻印必究

前 言

“管道与储罐强度”是油气储运工程专业本科生的一门重要专业课。开设该课程的目的是使学生对油气管道与储罐强度及其他相关问题有比较全面的认识 and 了解,并且掌握各类压力管道及储罐强度分析与设计的基本概念、基本原理与基本方法。

近年来,我国油气储运系统的建设得到了空前发展,对油气储运设施的安全可靠性提出了越来越高的要求,油气管道与储罐强度设计的新技术、新方法不断发展,需要将油气管道和储罐强度设计的基础理论、设计计算方法和标准规范予以总结,为油气储运工程技术人员提供较为全面的参考资料。

编者根据自己在中国石油大学讲授“管道与储罐强度”课程的教学经验编写了本书。在编写过程中,力求阐明管道和储罐强度的基本概念、基本理论,并反映最新的设计方法。

本书第一章是地下管道。地下管道是油气输送管道的主要部分,有关内容也是本书后续内容的基础。本章介绍了管道的环向、轴向以及弯曲应力分析与校核的基本理论,油气管道的壁厚、埋地管道的固定支墩、地下弯管、管道穿越和管道在水击压力下的设计计算方法,以及管道的重要附件——弯头和三通的应力分析与设计计算。并且介绍了近年来在国际上管道设计标准中已采用的新理念——基于可靠性的设计方法,拓展读者的视野。

第二章是地上管道。地上管道是油气管道系统的重要组成部分。本章介绍了地上管道的结构型式、载荷计算、跨度计算、振动分析和管道跨越结构的设计与计算,以及平面管系的热应力分析理论与方法。

第三章是海底管道。我国的海底管道也发展很快,而且一些陆地管道在跨越大型河流时也有采用水下敷设的方法,因此海底管道的设计也应该是油气储运专业本科生需要掌握的内容。本章介绍了海水对管道的动力作用、海底管道的稳定性设计、管道—土壤体系的稳定性分析、管道悬空段的涡激分析等基础理论,也介绍了水下双层管的结构与强度、海底管道铺管时的应力分析方法。

第四章是管道的屈曲分析。管道的屈曲是管道施工和运行期间容易遇到的实际问题。管道屈曲的形式很多,理论分析上有一定的难度,本章着重介绍了管道的轴向失稳、集中载荷下管道的凹陷、外压管道的屈曲和海底管道的屈曲传播的基本概念与理论分析方法。

第五章是地下管道的抗震设计计算。近年来大型管道的抗震设计受到了高度关注,本章介绍了管道工程抗震的基本知识,着重介绍了地下管道在场地液化、地质断层和地震波动作用下的管道的应力与应变分析方法。

第六章是关于含缺陷管道的剩余强度评价。含缺陷管道的剩余强度是油气管道长期安全性的核心问题,一直受到管道设计和运营部门的高度重视。本章介绍了含缺陷管道剩余强度评价的断裂力学基础、管道上两种常见缺陷(裂纹和体积型缺陷)管道剩余强度评价的工程方法以及含缺陷管道的修复措施。

第七章至第十二章系统介绍了立式圆柱形储油罐的罐壁、罐顶(固定顶和浮顶)、罐底的结构与强度设计知识,以及立式圆柱形储油罐的抗风和抗震设计的基本概念和分析方法。

按照上述编排方式,能满足对不同类型管道和储罐的工程分析要求,且各章有一定的相

对独立性,教师可根据教学时数、学生的基础状况和后继课程的需要,作适当的取舍。本书的编写还兼顾了油气储运工程技术人员的参考需要。

与石油工业出版社 1986 年出版的我国著名管道专家潘家华教授等编写的同类教材相比,本书在编排方式、内容取舍上已作了很大变化,但仍保留了一部分章节内容和例题。编写本书用到的其他主要参考资料在本书“参考文献”中列出,读者可根据需要查阅这些参考资料。

本书的第八章至第十一章由合作编写者于桂杰执笔,帅健编写了其余各章并负责全书的统稿。

中国石油大学的吕英民教授认真审阅了本书的编写计划和书稿。在本书的编写过程中,中国石油大学的博士研究生陈福来和硕士研究生冯建有、王晓明、谷志宇、刘梅玲等承担了本书初稿的打印和绘图工作。石油工业出版社教材中心对本书的编写给予了高度关注和大力协助,一并表示衷心感谢!

限于编者的水平和编写时间的要求,书中难免有错误及不足之处,恳请兄弟院校的教师及读者批评指正。

帅 健

2006 年 1 月

目 录

第一章 地下管道	(1)
第一节 荷载和作用力.....	(1)
第二节 环向应力.....	(2)
第三节 许用应力与壁厚设计.....	(4)
第四节 轴向应力与变形.....	(8)
第五节 固定支墩的受力计算	(12)
第六节 管道弯曲应力	(16)
第七节 弯管的强度与柔性设计	(19)
第八节 三通	(25)
第九节 管道的强度校核	(28)
第十节 基于可靠性的设计方法	(29)
第十一节 地下弯管的热应力	(35)
第十二节 穿越公路及铁路管道应力的计算	(39)
第十三节 水击压力下管道的应力计算	(43)
第二章 地上管道	(47)
第一节 地上敷设管道的支承形式	(47)
第二节 架空管道的荷载计算	(51)
第三节 管道跨度计算	(55)
第四节 管道热应力计算(弹性中心法)	(59)
第五节 考虑弯管柔性平面管系热应力计算	(66)
第六节 管道热应力的补偿及其设计计算	(70)
第七节 管道振动	(77)
第八节 悬索管道跨越的设计计算	(79)
第九节 拱形管道跨越的设计计算	(81)
第三章 海底管道	(86)
第一节 波浪、海流对管道的作用	(86)
第二节 海底管道的稳定性及其设计	(94)
第三节 埋设	(98)
第四节 海底管道的锚固.....	(100)
第五节 管道—土壤稳定性分析.....	(104)
第六节 管道悬空段的涡激振动.....	(106)
第七节 双层管的结构与强度.....	(109)
第八节 铺管船法铺管的应力分析.....	(114)
第九节 海底挖沟敷设管线的应力分析.....	(117)

第四章 管道的屈曲分析	(121)
第一节 地下管道的轴向屈曲.....	(121)
第二节 海底管道的上浮屈曲.....	(125)
第三节 集中荷载作用下的管道的局部失稳.....	(128)
第四节 外压作用管道的屈曲.....	(129)
第五节 海底管道的屈曲传播.....	(131)
第五章 管道抗震设计计算	(138)
第一节 地震波、震级、烈度.....	(138)
第二节 场地及地基土类别的划分.....	(142)
第三节 跨越断层管道的抗震设计.....	(144)
第四节 砂土的地震液化.....	(148)
第五节 地震波动作用下管道的应力与应变.....	(151)
第六章 含缺陷管道的剩余强度评价	(156)
第一节 含缺陷管道剩余强度评价的断裂力学基础.....	(156)
第二节 含裂纹缺陷管道的剩余强度评价.....	(162)
第三节 含体积型缺陷管道的剩余强度评价.....	(165)
第四节 管道缺陷的修理.....	(170)
第七章 立式储罐罐壁强度设计	(174)
第一节 钢油罐的分类及对其承载能力的基本要求.....	(174)
第二节 罐壁的受力分析.....	(176)
第三节 罐壁厚度计算(定点法).....	(178)
第四节 罐壁厚度计算(变点法).....	(181)
第五节 罐壁的开孔补强.....	(187)
第六节 罐壁边缘应力(罐壁与底板连接处).....	(189)
第七节 罐壁边缘应力(壁厚突变处).....	(195)
第八章 立式油罐固定顶的设计	(197)
第一节 计算荷载的确定.....	(197)
第二节 拱顶结构.....	(197)
第三节 包边角钢.....	(199)
第四节 球壳的设计.....	(201)
第五节 柱支承锥顶的设计.....	(204)
第九章 浮顶的设计计算	(208)
第一节 浮顶结构.....	(208)
第二节 第一准则的计算和校核.....	(212)
第三节 第二准则的计算和校核.....	(215)
第四节 第三准则的计算和校核.....	(221)
第五节 浮顶的强度及稳定性校核.....	(222)
第十章 罐底和基础的设计与计算	(227)
第一节 罐底的设计.....	(227)
第二节 油罐基础的形式.....	(230)

第三节 油罐基础的沉陷..... (235)
 第四节 对油罐基础的基本要求..... (236)
 第五节 油罐基础设计计算..... (237)
 第十一章 油罐的抗风设计..... (247)
 第一节 风荷载的分布和计算..... (247)
 第二节 抗风圈的设计和计算..... (250)
 第三节 加强圈的设计和计算..... (252)
 第十二章 立式钢油罐的抗震设计..... (260)
 第一节 倾覆力矩的计算..... (260)
 第二节 罐壁压应力和临界压应力的计算..... (264)
 第三节 油罐抗震加固的措施..... (268)
 参考文献..... (269)

第一章 地下管道

长距离油气管道和矿场集输管道一般直接敷设于地下,据统计,在已建成的各种干线管道的总长度中约有 98% 左右是地下埋设的。管道地下敷设的好处是施工简单、占地面积小、节省投资,且埋于地下的管道容易受到保护,不影响交通和农业耕作,因而这种敷设方式为长距离油气输送管道以及矿场集输管道普遍采用。管道过沼泽、高地下水位和重盐碱土地区时,可采用土堤敷设。

地下敷设管道的埋设深度的确定要综合考虑农田耕作深度、地面负荷、热油管道对土壤保温与约束等因素。一般情况下管顶覆盖土厚度为 1~1.2m。对于热油管道,考虑到土壤的保温作用,一般情况下热油管道管顶埋深取为 1.2m。穿越铁路和公路时,管道(或其套管)顶部距铁路轨底应不小于 1.3m,距公路路面应不小于 1m。此外,管道应埋在略低于冰冻线处,这样可降低热油管道的热损失(冻土的导热系数比未冻土的导热系数高 10%~15%),对于不加热的管道则可避免土壤冻结和解冻过程中造成的不均匀沉陷,还可防止输送的油气中可能含有的水分在管道中冻结。

当要求管道的平面走向或高程发生变化时,可采用弹性敷设或弯头(弯管)。弹性敷设是利用管道在外力或自重作用下产生弹性弯曲变形来改变管道的走向或适应高程的变化。弯头有预制弯头、现场冷弯管等做法。弯头的强度应与相邻管段一致,以保证管道安全。冷弯弯管和煨制弯头的任何部位不得出现皱折、裂纹和其他机械损伤。任何部位的管径减小不得超过管子外径的 2.5%,以保证管道的安全运行和清管器的顺利通过。在地下弯头的两侧一定位置上有时采用固定支墩进行保护,固定支墩的设置视管道的具体情况而定。

在管道沿线,气候、土壤、水文地质和其他条件都有很大差异,管道处于不同因素作用下,这些因素的作用都会不同程度地影响到管道的强度和稳定性。通过对管道强度和稳定性的分析,一方面可以提高管道的可靠性,另一方面可优化管道设计,降低工程造价和成本。本章着重地下管道的强度计算,管道的稳定性分析将在第四章专门阐述。

第一节 荷载和作用力

荷载是管道及其附件的强度设计依据。实际管道工程中存在多种荷载,各具不同特征,这种区别造成相应的应力具有不同的性态,所造成的材料破坏形式和机理存在差异。对管道、管道附件和支承件,应根据敷设形式、所处环境和运行条件,分析可能同时出现的永久荷载、可变荷载和偶然荷载,并组合后进行设计。

永久荷载有以下 7 种:

- (1) 输送介质的内压力;
- (2) 钢管及其附件、绝缘层、保温层、结构附件的自重;
- (3) 输送介质的重量;
- (4) 横向和竖向的土壤压力;
- (5) 静水压力和水浮力;

(6) 温度应力以及静止流体由于受热膨胀而增加的力;

(7) 由于连接构件相对位移而产生的作用力。

可变荷载有以下 6 种:

(1) 试运行时的水重量;

(2) 附在管道上的冰雪荷载;

(3) 由于内部高落差或风、波浪、水流等外部因素产生的冲击力;

(4) 车辆荷载及行人;

(5) 清管荷载;

(6) 检修荷载。

偶然荷载有以下 5 种:

(1) 位于地震基本烈度 7 度及 7 度以上地区的管道, 由地震引起的活动断层位移、沙土液化、地基滑坡等施加在管道上的力;

(2) 由于振动和共振所引起的应力;

(3) 冻土或膨胀土中的膨胀压力;

(4) 沙漠中沙丘移动的影响;

(5) 地基沉降附加在管道上的荷载。

确定油气管道的设计荷载还应考虑以下几点:

(1) 任何一处管道及管道附件的设计压力不应小于该处的最高稳态操作压力, 且不应小于管内流体处于静止状态下该处的静水压力。当设置反输流程时, 输油管道任何一处的设计内压力, 不应小于该处正、反输送条件下的最高稳态操作压力的较高者。

(2) 考虑到管道施工和运行期间, 可能会出现外压力超过内压力的情况, 因此, 输送流体的管道及管道附件, 应能承受作用在其上的外压与内压之间的最大压差。

(3) 输油管道的设计应做水击分析, 并应根据分析结果设置相应的控制和保护设备。在正常操作条件下, 由于水击和其他因素造成的瞬间最大压力值在管道系统和设备中的任何一点都不得超过输油管道设计内压的 110%。

(4) 输气管道在试验和运行期间可能全部或局部充水, 而原油管道或成品油管道充空气, 因此, 必须考虑沿管长因输送产品重量而引起的荷载变化。

(5) 输油管道的设计温度, 当加热输送时应为被输送流体的最高温度; 当不加热输送时, 应根据环境条件确定流体的最高或最低设计温度。

第二节 环向应力

环向应力是由管道输送介质内压产生, 而内压是影响管道强度的主要作用荷载之一。根据内压确定管道壁厚, 也就是确定管材用量这样一个重要的参数。

一、薄壁管道环向应力的计算

管道中的内压既产生环向应力, 也引起轴向应力。按圆柱薄壳无弯矩理论, 可以忽略径向应力。由切向力的平衡条件确定管道的环向应力 (如图 1-1 所示), 选取单位长度管道, 假定管道由水平面分开, 则内压 (p) 作用在分开的管道上的垂直合力近似为 pD (D 为管道外径), 而在管壁上作用环向应力 σ_h , 管壁截面的面积为 $\delta \times 1$ 。由切向力的平衡条件, 得:

$$pD = 2\delta\sigma_h \quad (1-1)$$

$$\sigma_h = \frac{pD}{2\delta} \quad (1-2)$$

等式 (1-2) 也称为 Barlow 等式。

由轴向力的平衡条件确定管道的轴向应力 (如图 1-2 所示), 假定两端封闭的管道从横截面处断开, 由内压引起的作用于管端的纵向合力约为 $F \approx p \frac{\pi D^2}{4}$, 该力和作用于管道横截面上的轴向应力 σ_a 的合力 $\sigma_a A$ 平衡, 横截面的面积 A 约为 $\pi D \delta$, 所以轴向应力 σ_a 应为:

$$\sigma_a = \frac{F}{A} \approx \frac{p \pi D^2}{4 \pi D \delta} = \frac{pD}{4\delta} \quad (1-3)$$

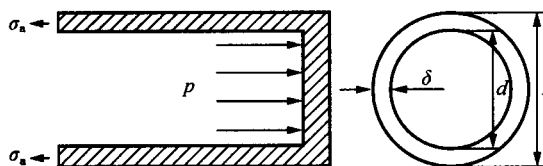


图 1-2 薄壁管道轴向力的平衡

精确公式:

$$\sigma_a = \frac{F}{A} = \frac{p \pi d^2}{\pi (D^2 - d^2)} = \frac{p d^2}{D^2 - d^2} \quad (1-4)$$

在以上公式中, D 和 d 分别为管道的外径和内径。

除管道的轴向应力外, 管道横截面的截面系数也有类似情况。管道横截面的截面系数 Z 的近似值为 $Z \approx \pi r_p^2 \delta$, 其中 r_p 是横截面的平均半径, 而其精确的表达式为 $Z = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right)$ 。

例 1-1 管道外径 273mm, 壁厚 9mm, 内压 10MPa, 分别按精确值和薄壁近似公式计算管道的轴向应力和管道横截面的截面系数, 并比较两种计算方法的差别。

解: 已知: $D = 273\text{mm}$, $\delta = 9\text{mm}$, $d = 255\text{mm}$, $p = 10\text{MPa}$

分别按精确值和薄壁近似计算公式计算管道的轴向应力如下:

精确值: $\sigma_a = \frac{p d^2}{D^2 - d^2} = \frac{10 \times 255^2}{273^2 - 255^2} = 68.4 (\text{MPa})$

近似值: $\sigma_a = \frac{pD}{4\delta} = \frac{10 \times 273}{4 \times 9} = 75.8 (\text{MPa})$

两者的相对误差为 10.8%。

管子横截面系数的计算如下:

精确值: $Z = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{3.14}{32} \times \frac{273^4 - 255^4}{273} = 4.7672 \times 10^5 (\text{mm}^3)$

近似值 (薄壁): $Z \approx \pi r_p^2 \delta = \pi \left(\frac{D+d}{4} \right)^2 \delta = 3.14 \times \left(\frac{273+255}{4} \right)^2 \times 9 = 4.9240 \times 10^5 (\text{mm}^3)$

或者说有 3.3% 的偏差。

如果此例中的管道壁厚等于 14mm, 则上述两种方法的计算轴向应力及截面系数的相对误差分别为 17.8% 及 5.1%, 用薄壁计算公式偏于保守。

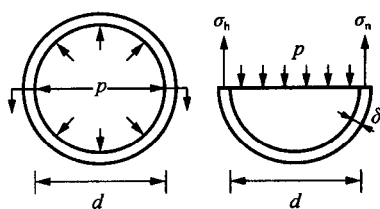


图 1-1 薄壁管道环向力的平衡

管道轴向应力和截面系数的近似值的保守性随比值 D/δ 增大而增大, 一般而言, 如果 D/δ 比值小于 20, 则应按厚壁管考虑。

二、厚壁管道环向应力的计算

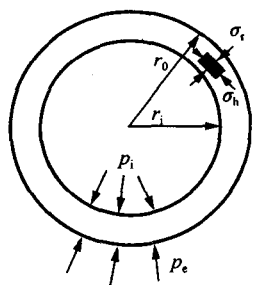


图 1-3 厚壁管的环向应力与径向应力

厚壁管的环向应力 (σ_h) 沿壁厚变化, 且存在径向应力 (σ_r)。

图 1-3 所示内径 r_i 和外径 r_0 的厚壁管, 作用有内压 p_i 和外压 p_e 。应用弹性力学的 Lamé 公式如下:

$$\sigma_h = \frac{p_i r_i^2 (r_0^2 + r^2) - p_e r_0^2 (r^2 + r_i^2)}{r^2 (r_0^2 - r_i^2)} \quad (1-5)$$

以及

$$\sigma_r = \frac{-p_i r_i^2 (r_0^2 - r^2) - p_e r_0^2 (r^2 - r_i^2)}{r^2 (r_0^2 - r_i^2)} \quad (1-6)$$

式中 r ——管壁中一点相对于圆心的径向坐标。

只受内部压力的情况下, $p_e = 0$, 此时式 (1-5) 和式 (1-6)

分别变成:

$$\sigma_h = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (1-7)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (1-8)$$

从这里容易看出, $\sigma_r < 0$, 而 $\sigma_h > 0$, 即 σ_r 为压应力, 而 σ_h 为拉应力, 最大环向拉应力发生在管道内壁, 即 $r = r_i$ 处, 其值为:

$$(\sigma_h)_{\max} = \frac{p_i (r_0^2 + r_i^2)}{r_0^2 - r_i^2} \quad (1-9)$$

例 1-2 管道外径 273mm, 壁厚 9mm, 内压 10MPa, 分别用薄壁和厚壁管道的应力计算公式计算管道的环向应力, 并比较两者的差别。

解: 已知 $D = 273\text{mm}$, $\delta = 9\text{mm}$, $r_0 = 136.5\text{mm}$, $r_i = 127.5\text{mm}$, $p = 10\text{MPa}$, 分别按薄壁和厚壁管道环向应力公式 (1-2)、(1-9) 计算如下:

$$\text{薄壁: } \sigma_h = \frac{pD}{2\delta} = \frac{10 \times 273}{2 \times 9} = 151.7(\text{MPa})$$

$$\text{厚壁: } (\sigma_h)_{\max} = \frac{p_i (r_0^2 + r_i^2)}{r_0^2 - r_i^2} = \frac{10 \times (136.5^2 + 127.5^2)}{136.5^2 - 127.5^2} = 146.8(\text{MPa})$$

两者的相对误差为 3.3%。

油气管道多属于薄壁管道, 一般应用薄壁管道计算公式计算应力以及截面几何性质。

第三节 许用应力与壁厚设计

一、管道许用应力的计算

管道的许用应力按下式计算:

$$[\sigma] = K \phi \sigma_s \quad (1-10)$$

式中 $[\sigma]$ ——许用应力;

K ——强度设计系数 (设计系数由设计规范确定, 它反映具体管段的运行特性、可能出现的破坏后果、检修的难度、安全和环保要求等。我国分别将输油和输气管

道根据具体情况作出了规定)；

ϕ ——焊缝系数，见表 1-1；

σ_s ——钢管的最低屈服强度，按表 1-1 的规定取值。

管道的许用应力，除在式 (1-10) 中考虑设计系数和焊缝系数外，某些情况下，还将考虑温度折减系数。

表 1-1 钢管的最低屈服强度和焊缝系数

钢管标准名称	钢号或钢级	最低屈服强度 σ_s (MPa)	焊缝系数 ϕ	备 注
《输送流体用无缝钢管》 GB/T 8163—1999	Q295	295 ($\delta > 16\text{mm}$ 为 285)	1.0	δ 为钢管的 公称壁厚
	Q345	295 ($\delta > 16\text{mm}$ 为 315)		
	20	245 ($\delta > 16\text{mm}$ 为 235)		
《石油天然气工业 输送 钢管交货条件 第 1 部 分：A 级钢管》 GB/T 9711.1—1997	L175 (A25)	175 (172)	1.0	
	L210 (A)	210 (207)		
	L245 (B)	245 (241)		
	L290 (X42)	290 (289)		
	L320 (X46)	320 (317)		
	L360 (X52)	360 (358)		
	L390 (X56)	390 (386)		
	L415 (X60)	415 (413)		
	L450 (X65)	450 (448)		
	L485 (X70)	485 (482)		
	L555 (X80)	555 (551)		
《石油天然气工业 输送 钢管交货条件 第 2 部 分：B 级钢管》 GB/T 9711.2—1999	L245NB L245MB	245~440 *	1.0	B 级管的质量 和试验要求高 于 A 级管
	L290NB L290MB	290~440 *		
	L360NB L360QB L360MB	360~510 *		
	L415NB L415QB L415MB	415~565 *		
	L450QB L450MB	450~570 *		
	L485QB L485MB	485~605 *		
	L555QB L555MB	555~675 *		

注：1. NB 为无缝钢管和焊接钢管用钢，QB 为无缝钢管用钢，MB 为焊接钢管用钢。

2. 括号内的钢级及屈服强度为 API 5L 标准的数值。

3. 带 * 数值为 0.5% 应变的应力值，在此值范围内，由用户在合同书中提出具体要求。

二、管道壁厚的设计

1. 输油管道直管段壁厚的设计公式

管道的壁厚由环向应力公式并遵循有关规范或标准确定，按照我国《输油管道工程设计规范》(GB 50253—2003) 中规定，输油管道直管段的设计公式如下：

$$\delta = \frac{pD}{2[\sigma]} \quad (1-11)$$

式中 δ ——壁厚，m；
 p ——设计压力，MPa；
 D ——外径，m；
 $[\sigma]$ ——输油管道的许用应力，MPa。

输油管道的许用应力按式 (1-10) 计算。输送 C_5 及 C_5 以上的液体管道的设计系数除穿越段按现行标准《原油和天然气输送管道穿跨越工程设计规范》(SY/T 0015) 的规定取值外，输油站外一般地段取 0.72。

2. 输气管道直管段壁厚的设计公式

按照我国《输气管道工程设计规范》(GB 50251—1994)，输气管道直管段管壁厚度按下式计算：

$$\delta = \frac{pD}{2\sigma_s \phi F t} \quad (1-12)$$

式中 δ ——钢管设计壁厚，m；
 p ——设计压力，MPa；
 D ——钢管外径，m；
 σ_s ——钢管的最低屈服强度，MPa；
 F ——强度设计系数，输气管道的强度设计系数应根据地区分类选取，详见后文；
 ϕ ——焊缝系数，符合国家现行标准《输送液体用无缝钢管》(GB/T 8163—1999)、《石油天然气工业 输送钢管交货条件 第 1 部分：A 级钢管》(GB/T 9711.1—1997)、《石油天然气工业 输送钢管交货条件 第 2 部分：B 级钢管》(GB/T 9711.2—1999) 的有关规定，取焊缝系数 $\phi = 1.0$ ；
 t ——温度折减系数，当温度低于 120℃ 时，取 $t = 1.0$ 。

计算所得的管壁厚度应向上圆整至钢管的公称壁厚，输气管道的最小公称壁厚应符合表 1-2 的规定。

表 1-2 输气管道的最小公称管壁厚度

公称直径 (mm)	公称壁厚 (mm)	公称直径 (mm)	公称壁厚 (mm)
100、150	2.5	600、650、700	6.5
200	3.5	750、800、850、900	6.5
250	4.0	950、1000	8.0
300	4.5	1050、1100、1150、1200	9.0
350、400、450	5.0	1300、1400	11.5
500、550	6.0	1500、1600	13.0

输气管道通过的地区，应按沿线居民户数和（或）建筑物的密集程度，划分为四个地区

等级：

沿管道中心线两侧各 200m 范围内，任意划分成长度为 2km 并能包括最大聚居户数的若干地段，按划定地段内的户数划分为四个等级。在农村人口聚集的村庄、大院、住宅楼，应以每一独立户作为一个供人居住的建筑物计算。

- (1) 一级地区：户数在 15 户或以下的区段；
- (2) 二级地区：户数在 15 户以上、100 户以下的区段；
- (3) 三级地区：户数在 100 户或以上的区段，包括市郊居住区、商业区、工业区、发展区以及不够四级地区条件的人口稠密区；
- (4) 四级地区：系指四层及四层以上楼房（不计地下室层数）普通集中、交通频繁、地下设施多的地区。

根据地区分类不同，输气管道的强度设计取不同的设计系数：一级地区 0.72，二级地区 0.6，三级地区 0.5，四级地区 0.4。

穿越铁路、公路和人群聚集场所的管段以及输气站内管道的强度设计系数，应符合表 1-3a 中的规定。跨越管道的强度设计系数应符合表 1-3b 中的规定，其中甲类为通航河流跨越，乙类为非通航河流及其他障碍跨越。

表 1-3a 穿越铁路、公路和及输气站内管道的强度设计系数

管道及管段	地区等级			
	一	二	三	四
	强度设计系数 F			
有套管穿越Ⅲ、Ⅳ级公路的管道	0.72	0.6	0.5	0.4
无套管穿越Ⅲ、Ⅳ级公路的管道	0.6	0.5	0.5	0.4
有套管穿越Ⅰ、Ⅱ级公路或高速公路、铁路的管道	0.6	0.6	0.5	0.4
输气站内管道及其上、下游各 200m 管道，截断阀室管道及其上、下游各 50m 管道（其距离从输气站和阀室边界线起算）	0.5	0.5	0.5	0.4
人群聚集场所的管道	0.5	0.5	0.5	0.4

表 1-3b 管道跨越强度设计系数

工程等级 设计系数 跨越工程分类		大 型		中 型		小 型	
		输气	输油	输气	输油	输气	输油
甲类		0.4	0.45	0.45	0.5	0.5	0.55
乙类		0.5	0.55	0.55	0.6	0.6	0.65

管道跨越工程的等级划分见表 1-4。

表 1-4 管道跨越工程等级

工程等级	总跨长度 (m)	主跨长度 (m)
大型	≥300	≥500
中型	≥100~<300	≥50~<150
小型	<100	<50

第四节 轴向应力与变形

地下管道产生轴向应力的原因是温度变化和环向应力的泊松效应。在地下管道的出土处，温度变化等因素的作用还将使管道产生不可忽视的轴向变形。

一、热应力

物体一般都有热胀冷缩的性质，管道也不例外。当温度升高时管道要伸长，在温度下降时管道要缩短。显然，如果温度变化时管道能够自由伸缩，管道将不受力。而当管道受到某种约束时，它不能自由伸缩或伸缩受到一定限制，管道就要受力。在管道中由于温度变化产生的应力，称为管道热应力。

管道出现温度变化的主要原因是：管道在敷设施工时的温度由外部气温决定，而在运行过程中则由输送产品的温度决定，两者之间必然存在差别，不可避免地在管道运行过程中产生应力或伸缩变形。管道工作温度高于安装温度时，热应力为压应力；管道工作温度低于安装温度时热应力为拉应力。

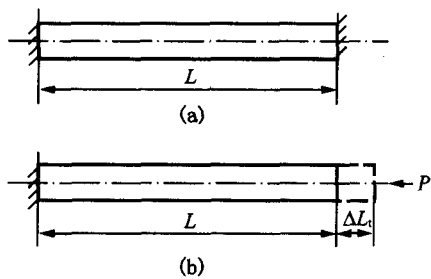


图 1-4 两端固定管道的热应力
(a) 两端被固定的直管段；(b) 一端施加作用力的直管段

如图 1-4 所示，设一直管段两端被固定，管段长度为 L ，横截面积为 A ，弹性模量为 E ，管道的温度变化为 Δt ，管材的线膨胀系数为 α 。

如果管道能自由伸缩，则伸长量为（设 $\Delta t > 0$ ）：

$$\Delta L_t = \alpha L \Delta t$$

但直管段两端固定，管段不能有任何伸缩，这时可理解为管道先自由伸长，然后在其一端施加作用力 P ，在 P 的作用下管段仍压缩到原来的位置，也就是压缩了 ΔL_t 长度。根据材料力学的有关知识，相当于一端施加的作用力 P 为：

$$P = \frac{\Delta L_t EA}{L} = \alpha EA \Delta t \tag{1-13}$$

于是，管道横截面（ A ）上的热应力（ σ_t ）为：

$$\sigma_t = \frac{P}{A} = \alpha E \Delta t \tag{1-14}$$

式中 α ——管道材料的线膨胀系数，部分钢材的线膨胀系数见表 1-5 和表 1-6；
 E ——管材的弹性模量，部分钢材的弹性模量见表 1-5 和表 1-6；
 Δt ——管道的工作温度（ t_1 ）与安装温度（ t_0 ）之差， $\Delta t = t_1 - t_0$ 。

表 1-5 普通碳素钢在不同温度下的弹性模量和线膨胀系数

温度（℃）	弹性模量 E （GPa）	线膨胀系数 α （ $\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）
20	205.0	1.18
75	199.0	1.20
100	197.5	1.22
125	195.0	1.24
150	193.0	1.25
175	191.5	1.27

续表

温度 (°C)	弹性模量 E (GPa)	线膨胀系数 α ($\times 10^5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
200	187.5	1.28
225	184.7	1.30
250	182.0	1.31
270	179.0	1.32
300	175.5	1.34
325	172.7	1.35
350	169.5	1.36
375	166.5	1.37
400	163.0	1.38
425	160.0	1.40

表 1-6 优质碳素钢和 16Mn 在不同温度下的弹性模量及线膨胀系数

钢 材 种 类	温度 (°C)	弹性模量 E (GPa)	线膨胀系数 α ($\times 10^5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
10	20	200.0	1.16
	100	195.0	1.19
	200	185.0	1.26
	300	175.0	1.28
	400	160.0	1.30
15	20	202.0	—
	100	196.0	1.19
	200	188.0	1.25
	300	175.0	1.30
	400	161.0	1.33
20	20	202.0	—
	100	187.0	1.16
	200	179.0	1.26
	300	170.0	1.28
	400	151.0	1.30
25	20	202.0	—
	100	200.0	1.11
	200	195.0	1.23
	300	189.0	1.28
	400	167.0	1.33
16Mn	20	210.0	—
	100	208.0	1.20
	200	205.0	1.26
	300	197.0	1.32
	400	189.0	1.37