

〔苏〕A.Б. 阿英宾杰尔
A.Г. 卡麦尔什捷英

干线管道强度 及稳定性计算

石油工业出版社

071017

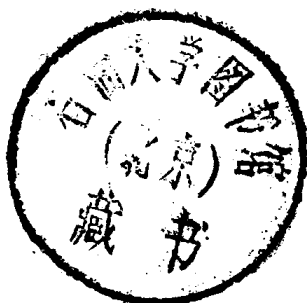
TE 973

干线管道强度及稳定性计算

〔苏〕A.Б.阿英宾杰尔 A.Γ.卡麦尔什捷英

肖 冶 崔东植 戚本明 译

施 奈 校



石油工业出版社

内 容 简 介

本书叙述了铺设在各种条件下的干线管道强度及稳定性的计算方法。提出了应力最大的管段——管道连接件的计算。阐明了应用电子计算机对复杂管道结构的自动计算方法。

本书可供从事干线管道设计、施工和运行的工程技术人员使用。可作为高等院校《油气管道和石油基地建设》专业的高年级学生的参考书。

本书由石油工业部管道局职工学院肖冶(第1~5、9章)崔东植(第6~8、12章)戚本明(第10、11、13~15章、附录)翻译,施奈校。

0752/23

А.Б.Айнбиндер А.Г.Камерштейн
РАСЧЕТ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ
《НЕДРА》МОСКВА 1982

干线管道强度及稳定性计算

(〔苏〕А.Б.阿英宾杰尔 А.Г.卡麦尔什捷英

肖 冶 崔东植 戚本明 译

施 奈 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京计量印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168 毫米 32 开本 14 印张 367 千字 印 1—3,500

1988 年 10 月北京第 1 版 1988 年 10 月北京第 1 次印刷

书号: 15037·2896 定价: 3.45 元

ISBN 7-5021-0045-8/TE·45

序 言

干线管道建设是保证油气工业和能源经济发展的重要建设部门之一。

由于管道建设具有重要意义，建设者面临着一个重大的课题，即提高干线管道的质量和运行的安全性。干线输气和输油管道属于有爆炸和燃烧危险的构筑物，其工作故障会导致严重的后果。的确，由于输气、输油、输成品油管道的事故引起的水质和周围环境的污染，对植物界和动物界可能有毁灭性的危险，所以对于干线管道的高度可靠性应予以特别的重视。提高可靠性是管道运输建设方面技术进步的一个基本任务。作为工程结构物的管道系统可靠性的保证，必须贯穿于从选线开始到完工后构筑物的整个试压过程中。

可靠性的主要保证条件之一是，严格遵守管道计算和设计的规范和规程。但是，规范中不可能包括计算和设计所必须考虑的多种因素、作用力和要求。规范中没有给出设计计算方法，也没有指出诸因素的作用力对管道承载能力的意义和影响。规范中只是给出了管道系统计算和设计必须的基本要求。为此，本书作者将对影响管道强度稳定性的主要作用力和因素，根据实际工作条件加以系统化，并提出考虑这些作用力的管道计算方法。

书中叙述了计算干线管道管子和连接件壁厚的方法，对管道地下铺设系统的计算，给予了足够的重视，阐明了管道与土相互作用的计算模型，研究了地下管道（其中包括铺设在浸水地段线路）纵向位移和纵向稳定性问题。叙述了矿区管道计算的特点及其它。书中介绍了应用电子计算机对不同结构方案的管道的

计算方法，它不仅可以缩短设计期限，而且能更全面地反映管道工作的实际条件。

为便于实际应用上述的计算方法和电算程序，文中给出了许多实例，还有一些附表和图。

目 录

第一章 影响管道强度和稳定性的主要作用力和因素	(1)
第一节 基本前提	(1)
第二节 内压	(1)
第三节 温度的作用	(2)
第四节 土的变形作用	(4)
第五节 施工时管道的预弯曲	(5)
第二章 干管的强度计算	(7)
第一节 计算的基本原则	(7)
第二节 计算管道时采用的荷载和作用力	(9)
第三节 管壁厚度的确定	(15)
第四节 计算实例	(21)
第三章 与管道相互作用的土的计算模型	(27)
第一节 土的物理-力学特性	(27)
第二节 土对管子纵向位移的阻力	(35)
第三节 土对管子横向位移的阻力	(42)
第四章 地下管道的纵向位移	(52)
第一节 纵向位移时确定位移和力的一般解法	(52)
第二节 纵向位移沿管长分布的试验确定	(57)
第三节 地下管段出土处位移的确定	(60)
第四节 补偿装置间距的确定	(62)
第五节 不同温差和内压的两管段连接处纵向位移的确定	(64)
第六节 计算实例	(67)
第五章 在正温差和内压作用下埋地管道的纵向稳定性	(74)
第一节 带有初始弯曲的埋地管道的临界力的确定	(74)
第二节 供实用计算的简化关系式	(91)
第三节 埋地管道纵向稳定性的试验研究	(97)

第四节	计算实例	(101)
第六章	用电子计算机计算在竖直平面内有任意形状	
	轴线的地下管道	(108)
第一节	“Дора”程序的应用范围	(108)
第二节	柔度矩阵元素	(109)
第三节	力和位移的确定	(115)
第四节	系统的几何非线性和土的物理非线性的计算	(119)
第五节	电算程序框图	(121)
第六节	供电算用的初始资料和输出信息	(123)
第七节	计算实例	(126)
第七章	用电子计算机计算在水平面内有任意形状轴	
	线的地下管道	(139)
第一节	“Шаг-лента”程序的应用范围	(139)
第二节	单元的柔度矩阵	(141)
第三节	节点位移的连续性方程	(143)
第四节	管道应力-应变状态的分量	(150)
第五节	电算程序框图	(155)
第六节	供电算用的初始资料的准备	(157)
第七节	输出信息	(161)
第八节	计算实例	(163)
第八章	用电子计算机计算地下管道分叉节点	(185)
第一节	“Уэлы-78”程序的应用范围	(185)
第二节	单元的刚度矩阵	(187)
第三节	力和位移的确定	(194)
第四节	考虑几何和物理非线性的计算方法	(198)
第五节	电算用的初始资料和输出信息	(200)
第六节	计算实例	(202)
第九章	铺设在线路浸水段上的地下管道的计算	(208)
第一节	水的排挤力引起的荷载的确定	(208)
第二节	土对管子位移的阻力	(209)
第三节	有管道压重时对管子位移的阻力	(211)
第四节	管道弹性弯曲加载的确定	(214)
第五节	地下管道的位置稳定和纵向稳定	(218)

第六节	在水平面内有任意形状轴线的管道的计算	(221)
第七节	在竖直平面内有任意形状轴线的管道的计算	(223)
第八节	计算实例	(225)
第十章	装有补偿器的梁式跨越	(265)
第一节	支座间距的确定	(265)
第二节	补偿器温度和内压作用的计算	(270)
第三节	计算实例	(274)
第十一章	单跨无补偿器的地上跨越	(277)
第一节	横向荷载的计算	(277)
第二节	温度和内压作用的计算	(280)
第三节	跨越的应力-应变状态分析	(288)
第四节	计算实例	(292)
第十二章	用电子计算机计算地上无补偿器的梁式管道系统	(298)
第一节	HBII-2 程序的应用范围	(298)
第二节	单元的刚度矩阵	(299)
第三节	节点的平衡方程	(305)
第四节	管道应力-应变状态的分量	(308)
第五节	电算程序框图	(311)
第六节	供计算用的初始资料的准备	(314)
第七节	输出信息和计算结果的分析	(315)
第八节	计算实例	(318)
第十三章	管道地上跨越的承载能力	(323)
第一节	地上跨越的弹性和弹塑性状态分析	(323)
第二节	塑性变形时荷载和作用力的变化对管道承载能力的影响	(333)
第三节	计算实例	(339)
第十四章	铺设在采矿区内的管道计算	(342)
第一节	采矿区地面变形的特性	(342)
第二节	管道强度计算	(346)
第三节	防止管道受采矿有害影响的措施	(349)
第四节	管道纵向应力自补偿的计算	(350)
第五节	管道的地上和地下管沟铺设	(351)

第六节	运行中管道的防护措施.....	(353)
第七节	计算实例.....	(353)
第十五章	管道连接件的强度计算.....	(357)
第一节	曲线管子(弯管)内压计算.....	(357)
第二节	弯管柔性计算.....	(362)
第三节	内压和相连接的直线管段对弯管柔性的影响.....	(365)
第四节	弯管受弯时的应力状态计算.....	(368)
第五节	内压和弯曲共同作用下弯管的应力状态.....	(372)
第六节	弯管疲劳强度计算.....	(375)
第七节	分段焊接的弯管.....	(378)
第八节	三通连接件的计算.....	(379)
第九节	异径管和盲板的计算.....	(383)
第十节	计算实例.....	(386)
附录		(389)
文献目录		(433)

第一章 影响管道强度和稳定性 的主要作用力和因素

第一节 基本前提

内压是影响干管强度的主要作用力之一，根据内压确定管壁厚度，也就是确定管道金属用量这样一个重要的参数。但是管道计算仅考虑内压的一种作用，尚不足以保证管道的强度和稳定性。

众所周知，干线管道铺设在苏联广阔的区域。在这些区域中，气候、土、水文地质和其它条件都有很大的差异，管道处在不同的力的作用影响下，这些力的作用都会不同程度地影响管道的强度和稳定性。正如实践表明，在保证管道可靠性这个总的问题中，这些作用力在许多情况下具有重大的意义，即管道的内压计算对保证其运行的可靠性是一个必要的条件。但这还不够，因为管道在运行过程中会受到许多因素的影响。

第二节 内 压

产品的内压是确定管道应力状态的主要的力的作用之一。干管的壁厚通常仅由产品的内压确定。但管道作为建筑结构在选择其结构方案时，对于所采用的铺管方式，要考虑一切可能出现的作用力。

在内压作用下，管壁中产生环向拉应力，它们按圆柱薄壳无弯矩理论计算，忽略径向应力沿管壁的变化和横断面的初始不圆度。虽然管子的椭圆度（横断面形状与圆形的偏差）与环向拉应力一样也引起弯曲应力，但它们在按极限状态法计算时不予考虑。这可以解释为，在规定的椭圆度公差范围内（管子的实际直径与名义直径之比），对于不同椭圆度的管子其破坏压力实际上是相

同的。但是存在这样一些情况，即管道的极限状态不是管道的破坏，而是容许应力的某一确定值。输送含硫化氢气体的管道就属于此例。研究表明，硫化氢的浓度和分压以及管道的应力愈高，这种管道愈趋向于腐蚀破坏。为了保证这类系统可靠工作，最大容许应力按管子金属的屈服极限确定。当由内压确定环向应力时，必须考虑管道断面的初始椭圆度。

干管中的内压不是常数，因为当输送的产品流动时，要消耗很大的能量来克服管子中的水力阻力。所以，在沿压缩机站和泵站之间的管长上内压逐渐降低。

如果排除了产品返输的可能性，或者不打算在将来沿该线路设置附加的压缩机站或泵站来增加管道的输送能力，那么，在这种情况下确定管壁厚度时，可以按该具体管段上的实际压力计算。实际上泵站之间的管道分为三段，其中每一段的压力都取该段初始点的压力。当偶然出现停泵时，在管子中形成平均压力。这个压力始终是低于初始点的压力，甚至在它们超过计算值并出现附加应力的情况下也是如此，附加应力属于瞬时荷载。在这种情况下，应力状态的容许标准可以提高。

管子中的内压不仅引起环向应力，而且还引起纵向应力。纵向应力与管子轴线的形状及管子同周围介质的相互作用有关。譬如说，当管轴为直线并且没有横向和纵向位移时，纵轴向上的应力大约等于30%的环向应力。当管子轴线不是直线时，纵轴向上的应力取决于管道的位移，此项位移由管子同介质（土、支承等）的相互作用来确定。此时，纵轴向应力可达到50%的环向应力。

第三节 温度的作用

管道的温度随时间变化，因为在施工时它主要由外部气温决定，而在运行过程中则由输送产品的温度决定。

为了计算管道的强度和稳定性使用了温差的概念。温差这个参数决定着管道结构的应力-应变状态。所计算的结构温差，等于运行过程中的管道的温度（计算期间）与该结构施工时的温

度之间的差值。

在计算时用计算简图来代替真实结构，从建筑力学的观点来看，该计算简图反映了管道结构中的力、位移和应力的分布。因此，在干管的设计规范中规定，结构物的温度应理解为管道计算简图所确定的温度。

对于地下管道，计算简图是一个具有纵、横联系的杆件，因此施工温度应理解为铺设在沟底上的、用土回填瞬间的管道温度。

对于地上管道，计算简图是一个放在一些具有固定边界条件的支座上的梁，这些边界条件反映了与地上管道相接触的结构构件的影响。因此，对于这种结构，施工温度应理解为完成一些终端管段作业：焊接补偿器、把管道的地上和地下部分连在一起等等时的温度。

由温差产生的纵向应力，取决于管道的结构措施和管道与其周围介质的相互作用。在没有横向和纵向位移时出现最大的温度应力。对已采取的某一结构措施，容许温差应从规范规定的管道极限状态出发，由计算确定。

表1 引用了按 СНиП II-45—75(建筑法规第二卷第45篇，75年)规定的、依地下管道的弹性弯曲半径而定的容许温差。

表1 容 许 温 差

管 径 (mm)	壁 厚 (mm)	强度极限 (MPa)	屈服极限 (MPa)	在不同的弹性弯曲半径 (m) 下容许温差, °C		
				1500	2000	2500
1420	16.5	600	420	40	49	55
1420	16.5	600	470	66	75	81
1220	14.1	600	420	56	61	64
1220	14.1	600	450	71	76	80

该表说明，即使温差稍有降低，就有可能在相当小的弹性弯曲半径下铺设管道。

具有某一定值的正温差，在管道中引起纵轴向的压应力，此项应力会影响管道的壁厚。因此，由最小壁厚条件出发而得出的值，通常用来限制温差。温差在很大的程度上决定着地下管道的纵向稳定性，此项稳定性要靠选择相应的管道曲率、管道埋深和—管道加压重物来保证。

大口径输气管道的温差可能非常大，为了减小温差，气体在压缩机站的出口处应予以冷却。

第四节 土的变形作用

影响管道应力-应变状态的土的变形，可能与土的位移有关，该位移是由于在管道铺设区内采矿所致。

当开采有用矿藏时，在地下形成一自由空间，而土的上表层移向所形成的空洞中央。受采矿影响的地表区形成所谓“向斜地槽错动”，即呈现为地表下陷的区段。由于在“向斜地槽错动”中土的滑动，在与土紧固在一起的管道中就会出现很大的拉伸应力。因此，在管道计算时应确定由于这项因素的影响所产生的应力，并且在设计中应预先考虑专门的结构措施，以保证在这种条件下管道工作的可靠性。

影响管道强度的土的变形，也可能与发生地震时产生的土的振动有关。

众所周知，由于地震冲击，在土中形成并传播着地震波。因此地下管道作为“土-管子”联合的系统，进入振动过程。地震波在管道中具有传播速度通常比在土中大，沿着管段到达还没有进入振动过程的地方。在这些区段上，可以将管道看成是一个振荡发生器，而将土——当作减振垫板。在这些区段上，管道中的应力，要比由土把振动传给管道的那些区段为小。

因此，应研究在地震振动条件下的两种工作方式：进入振动过程的地下管道，在该振动过程下，管子中的应力是由于土的应力状态引起的，和沉向阻止其振动的土介质中去的振动着的管道。分析一系列地震的影响表明，铺设在地震断裂区以外、地震

稳定土中的地下钢管，能很好地承受 7~8 度的地震烈度。因此设计规范容许对地下管道的地震作用达到 8 度。当地震烈度更大时管道要验算，并根据计算选择相应的结构措施，以保证管道可靠地工作。

土对管道的作用出现在滑坡区段。滑坡土对管道的力的作用分为两种类型。属于第一种类型的是这样一种土的作用，即此时土体滑动的方向与铺在纵向斜坡上的管轴方向一致。由于管道嵌固在土中，那么在上部区段的管子中出现拉应力，而其下部区段则出现压应力。属于第二类型土的作用是这样的，即此时土体滑动的方向垂直于管轴，或与管轴成某一角度。土的力作用的这种类型最为可怕，因为在这种情况下，出现纵轴向应力的同时，还产生弯曲应力。

如果管道的计算强度不够，那么必须采取一系列保护措施。例如，设挡土墙，其基础必须埋在滑坡平面以下，或设置板桩墙，滑坡土灌浆等。

第五节 施工时管道的预弯曲

为了减少土方工程量，管沟的纵断面应接近该段地表的纵断面。管沟的纵断面按管道的铺设条件确定，即按管道在自重作用下沿拟定的纵断面弯曲的可能性，和在内压与温差作用下运行过程中的管道应力状态。

通常，管道的预弯曲是以最小的管轴弹性弯曲半径来表示。研究表明，预先的弹性弯曲对破坏压力不产生影响。但是，随着管轴半径的减小，不仅初始应力增大，而且运行负荷还会引起应力。管道弯曲可能导致整个管道纵向失稳，或在断面受压区管壁局部失稳。因此，管道轴线的最小弹性弯曲，是受变形条件限制的。

弹性弯曲的最小容许半径与管子金属屈服极限的关系，如图 1 所示。该曲线是以直径 1420 mm，工作压力 7.5 MPa 和温差 60℃ 的气管线作出的。从曲线中看出，屈服极限对弯曲半径有重大

的影响。例如，随着屈服极限从 420 MPa 增加到 470 MPa，容许半径从 2800 m 减少到 1350 m，即减少了一半。

利用最小弹性弯曲半径设计管沟的竖直断面可以减少土方工程量。与此同时，在浸水和沼泽区设计管道时应考虑到：随着弯曲半径的增大，为保证纵向稳定所必须的管道的压载也会减少。因此，弹性弯曲半径必须由管子金属的变形条件和纵向稳定条件，根据技术经济的比较方案确定。

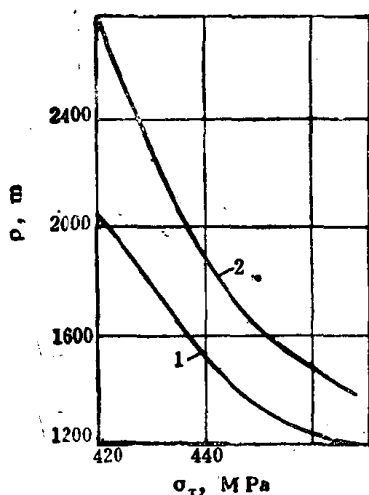


图 1 直径 1420 mm 管道弹性弯曲半径与管子金属
(极限强度为 600 MPa) 屈服极限的关系

($\Delta t = 60^\circ\text{C}$)

1— $\delta = 16.5 \text{ mm}$; 2— $\delta = 17.5 \text{ mm}$

第二章 干管的强度计算

第一节 计算的基本原则

在管道运输工程的建设领域里，确保管道的高度可靠性，是管道技术进步发展的重要课题之一，必须予以十分重视。管道的强度和稳定性计算，应该作为构成管道系统可靠性的总链条上的最重要的一环来研究。

在 СНиП II-45—75 中，对管材的要求包含有：屈服极限与强度极限之比不得超过标准的最高值，冲击韧性、延伸率不得低于标准的最低值，目的在于防止运行过程中管道的脆性破坏。对焊接材料提出的要求是，确保焊缝与管子母材的等强度。

干线管道按极限状态法计算。这个方法的实质是，研究管道不能继续运行时的应力状态。

干管按极限状态法计算，在苏联首先是由全苏干线管道建设科学研究院（ВНИИСТ）的同事们 И. П. 彼得罗夫（Петров）、А. Г. 卡麦尔什捷英（Камерштейн）、В. С. 图尔金（Туркин）等所创立。干管设计规范（СНиП II-45—75）是在 В. И. 普罗科菲叶夫（Прокофьев）领导下，按照这种方法编制的。

管道的第一极限状态——管道在内压作用下破坏。因此，管子金属的极限强度（强度极限）成为管道承载能力的特征。

为了保证管道的可靠工作，当确定计算强度时引入一些差异系数，它们反映了影响管道承载能力的不同因素的概率特性。列为这类系数的有：材料安全系数、管道工作条件系数和可靠性系数。

材料的安全系数表示管子金属的极限强度与其标准值相比时可能有的减少、管壁厚度同其名义值相比时可能有的减少，以及

管子结构的可靠性。后一因素与管子的生产工艺有关。

工作条件系数表示所采取的计算简图与实际的管道结构，包括管道同四周介质相互作用的特性，可能出现的不符。除此以外，工作条件系数还表示管道破坏的后果对人们健康的影响，以及对完成修复工作的折算费用的影响。

可靠性系数于 1975 年首次列入干管设计规范，这是由于所建造的管道直径和所输送产品的工作压力增大引起的。可靠性系数考虑下列一些影响系统工作可靠性的因素：

管道同土的接触表面随直径增大而增大，因此，当土变形时，大直径的管道比小直径的管道处于更不利的条件下；

管子的弯曲刚度随管道直径增大而急剧增大，因此，在铺管时不能保证管线全长紧贴沟底，由此，在管道中就可能出现附加的弯曲应力；

管道的金属用量、焊缝总长度和被熔化过的金属量随管道直径增大而增加，因此，任何一种工艺缺陷的概率都提高了；

管道系统的输送能力随产品工作压力和管道直径的增加而增加，一旦出现故障，可能造成重大的国民经济损失。

根据 СНиП II-45—75 的规定，可靠性系数对于输气管道和输油管道是不同的，并取决于管道直径和产品压力。

当确定管道的应力状态时，对第一极限状态的检验，只考虑实际影响破坏压力的那些应力。

根据试验研究查明，属于此类应力的有内压引起的环向应力和由全部荷载与作用力引起的纵向应力。

在 СНиП II-45—75 中，第一极限状态写成环向拉应力和纵轴向拉应力等于计算强度的等式形式，而在复杂应力状态时——为当量应力等于计算强度的等式。

为了限制塑性变形，СНиП II-45—75 规定用第二极限状态来校核管道。第二极限状态通过应力来表达。

上述这些应力是对管子断面的最大应力点，由全部标准荷载和作用力（考虑它们的组合）确定的。