

# 压力管道应力分析

(第二版)

唐永进 著

中国石化出版社

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

# 压力管道应力分析

(第二版)

唐永进 著

中国石化出版社

## 内 容 提 要

管道应力分析是压力管道设计的重要内容,它直接关系到管道自身和与其相连的机器、设备、土建结构的安全。本书从基本理论、标准规范和分析计算方法几个方面对管道应力分析进行了详尽和全面的介绍。内容包括管道应力分析工作的任务和工作过程、管道应力分析基础知识、压力作用下管道组成件的强度设计、管道允许跨距的计算、管道应力分析的安全评定方法、管道的柔性设计、管道应力分析中的特殊问题(夹套管和埋地管的分析、安全阀排气反作用力的计算、水锤荷载的计算、高压管道的应力分析)、管道支吊架的设计选用原则、往复压缩机管道的防振设计、各种管道振动问题、有限元法在管道应力分析中的应用、管道应力分析程序介绍。

本书不但能够对石油、石化、化工、电力、钢铁、市政等各个行业的管道应力工程师提供很大帮助,同时也可供配管和管道材料工程师参考。此外,本书还可供大专院校相关专业师生作为参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

压力管道应力分析 / 唐永进著. —2 版. —北京: 中国石化出版社, 2009  
ISBN 978 - 7 - 5114 - 0090 - 1

I. 压… II. 唐… III. 压力管道 - 应力分析 IV. U173.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 165526 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

### 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](mailto:press@sinopec.com.cn)

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

\*

787 × 1092 毫米 16 开本 13 印张 1 插页 325 千字

2010 年 1 月第 2 版第 2 次印刷

定价: 35.00 元

# 前 言

为了保障压力管道运行安全、保护人民生命和财产安全，劳动部于1996年颁发了《压力管道安全管理与监察规定》。其后，为了加强对压力容器压力管道设计单位的质量监督和安全监察、确保压力容器压力管道的设计质量，国家质量监督检验检疫总局制定了《压力容器压力管道设计单位资格许可与管理规则》。该规则规定，从事压力容器压力管道设计的单位，必须具有相应级别的设计资格，取得《压力容器压力管道设计许可证》。对于压力管道的设计，取得许可证的条件之一，就是从事压力管道设计的批准(或审定)人员、审核人员，必须经过规定的培训，考试合格，并取得相应资格的《设计审批员资格证书》。设计单位取得压力管道的设计许可证，除必须具备规定数量的审批人员外，设计、校核人员也必须通过相应的考试。自1998年起，本书作者作为考核人员参加了中国石化集团公司的压力管道设计单位资格认证工作，并担任了审批人员资格考试的管道应力分析专业培训主讲教师，此外还在各种管道应力培训班上主讲了管道应力分析。在上述活动中，作者深感管道应力分析人员的水平在理论和实践两个方面都有待进一步提高。另外，国内的管道应力分析参考书均编写于20世纪80年代初，在某些方面已跟不上技术的最新进展，有些文献在内容上还存在着一些较为严重的错误，容易给读者以误导。基于上述原因，作者以压力管道审批人员资格考试培训班和其他管道应力培训班的讲义为基础，进一步汇集了国内外管道应力分析方面的最新进展，并结合作者多年管道应力分析工作经验编成本书，以求对管道应力分析人员有所帮助。

压力管道设计分为三个专业——配管、管道材料和管道应力。其中管道应力分析直接关系到管道自身和与其相连的机器、设备、土建结构的安全，具有很高的技术含量，在管道设计中受到越来越多的重视。与国外相比，我国的管道应力分析工作开展较晚，在国家标准GB 50316《工业金属管道设计规范》中，与管道应力相关的部分主要参考了美国规范。对于压力管道设计，美国规范为ASME Code for Pressure Piping, B31系列。例如，动力管道的设计规范为ASME B31.1, Power Piping; 工艺管道的设计规范为ASME B31.3, Process Piping。各类管道的设计有其自身的特点，在管道应力分析方法和应力校核准则的具体表达形式等方面也有所不同；但就基本原理而言，没有本质的区别，特别是动力管道与工艺管道之间具有更多的共性。为叙述简洁明确起见，本书主要针对动力管道与工艺管道进行讨论，并力求兼顾其他各种情况。管道支吊架的设计

是压力管道设计的一个重要方面，由于本书的侧重点是管道的应力分析，因此只对支吊架的位置确定和选用进行了必要的讨论，没有涉及支吊架本身的强度设计等内容，支吊架自身的设计需要由专门的著作加以讨论。

本书第一章详细介绍了管道应力分析工作的任务和工作过程；第二章从实验结果和基本概念出发，介绍了管道应力分析所必需的基础知识；第三章讲述了压力作用下管道组成件的强度设计方法，涉及壁厚确定和开孔补强等内容；第四章介绍了管道允许跨距的计算方法；第五章全面介绍了管道应力分析的安全评定方法和受力校核准则；第六章详细讨论了管道的柔性设计方法及措施；第七章介绍了管道应力分析中的一些特殊问题，涉及夹套管和埋地管的分析、安全阀排气反作用力的计算和水锤荷载的计算及高压管道的应力分析等内容；第八章叙述了管道支吊架的设计选用原则；第九章详细介绍了往复压缩机管道的防振设计方法和相应的控制标准；第十章对各种管道振动问题进行了讨论；第十一章讲述了有限元法在管道应力分析中的应用；第十二章对管道应力分析程序进行了介绍。

编写本书时，作者力求从基本理论、标准规范和分析计算方法几个方面对管道应力分析进行尽可能全面的阐述。通过本书，希望能够使初学者对管道应力分析的内容和方法有一个较为全面的了解；使已经从事管道应力分析的人员加深对分析方法和标准规范的认识。应该说明的是，本书内容是根据各标准规范的现行版本编写的，标准规范总是在不断的修订完善之中，读者在引用标准规范的具体内容时，应查阅其原文有关条款。

在本书的编写过程中，得到了有关方面的热情帮助。全国锅炉压力容器标准化技术委员会秘书长、教授级高级工程师寿比南在百忙之中仔细审阅了全书；清华大学副校长、博士生导师岑章志教授对本书的部分内容提出了宝贵意见；清华大学工程力学系刘应华博士帮助作者收集了有价值的相关资料；作者所在单位，中国石化工程建设公司的各级领导给予了积极的支持；在此作者对上述帮助一并表示感谢。

本书第一版出版以来，对压力管道设计人员特别是管道应力分析人员的工作起到了一定帮助作用，作者对此感到非常欣慰。

近年来，压力管道应力分析受到了越来越多的重视，应力分析的范围不断扩大。与此同时，由于技术的进步，相关的各种标准规范、分析方法和分析手段也有了很新的进展。基于此，本书第二版对第一版中过时的内容进行了更新、修改和补充，并对第一版中的个别错误进行了修正。

由于作者水平有限，在本书的内容方面不可避免地存在某些不当之处，敬请读者提出宝贵意见。

# 目 录

<b>第一章 管道应力分析工作的任务和工作过程</b> .....	( 1 )
第一节 管道应力分析工作的任务 .....	( 1 )
第二节 管道应力分析的工作过程 .....	( 2 )
第三节 需要进行详细应力分析管道的确定方法 .....	( 7 )
<b>第二章 管道应力分析基础知识</b> .....	( 12 )
第一节 应力、应变及应力状态 .....	( 12 )
第二节 材料的机械性能 .....	( 15 )
第三节 强度理论 .....	( 22 )
第四节 管道变形的基本形式 .....	( 25 )
<b>第三章 压力作用下管道组成件的强度设计</b> .....	( 33 )
第一节 压力作用下薄壁圆筒和厚壁圆筒中的应力分布 .....	( 33 )
第二节 压力作用下直管壁厚的确定 .....	( 34 )
第三节 弯管、弯头和斜接弯管的压力设计 .....	( 37 )
第四节 焊接支管连接的补强 .....	( 39 )
<b>第四章 管道允许跨距的计算</b> .....	( 44 )
第一节 水平直管的允许跨距 .....	( 44 )
第二节 一些特定布置情况下的管道允许跨距 .....	( 49 )
第三节 管道最大导向间距的确定 .....	( 50 )
<b>第五章 管道应力分析的安全评定</b> .....	( 51 )
第一节 管道应力的校核准则 .....	( 51 )
第二节 管道二次应力校核准则的来源 .....	( 61 )
第三节 应力增大系数和柔性系数 .....	( 64 )
第四节 压力管道与压力容器应力分类及校核准则的比较 .....	( 66 )
第五节 转动机器的允许受力限制 .....	( 69 )
第六节 静设备的允许受力限制 .....	( 76 )
<b>第六章 管道的柔性设计</b> .....	( 79 )
第一节 管道柔性设计的目的和一般方法 .....	( 79 )
第二节 金属波纹管膨胀节的选用 .....	( 81 )
第三节 冷紧及简单管系对固定点的作用力 .....	( 88 )
第四节 容器管口的柔性 .....	( 91 )
第五节 转动机器管道的柔性设计 .....	( 93 )

<b>第七章</b>	<b>管道应力分析中的特殊问题</b>	( 95 )
第一节	夹套管的分析	( 95 )
第二节	埋地管的分析	( 95 )
第三节	安全阀排气反作用力的计算	( 99 )
第四节	水锤荷载的计算	( 105 )
第五节	高压管道的应力分析	( 106 )
<b>第八章</b>	<b>管道支吊架的设计选用原则</b>	( 109 )
第一节	支吊架的种类、作用及选用原则	( 109 )
第二节	弹簧支吊架的选用	( 111 )
<b>第九章</b>	<b>往复压缩机管道的防振设计</b>	( 121 )
第一节	往复压缩机管道振动的原因及控制标准	( 121 )
第二节	往复压缩机管道的防振设计方法	( 124 )
<b>第十章</b>	<b>管道振动分析</b>	( 127 )
第一节	机械振动理论的基本概念及管道振动问题的处理方法	( 127 )
第二节	单自由度系统的振动	( 130 )
第三节	多自由度系统的振动	( 136 )
<b>第十一章</b>	<b>有限元法在管道应力分析中的应用</b>	( 144 )
第一节	局部坐标系中的单元刚度矩阵及等效节点荷载列阵	( 145 )
第二节	整体坐标系中的单元刚度矩阵和等效节点荷载列阵	( 152 )
第三节	管系总体刚度矩阵和管系节点荷载列阵	( 153 )
<b>第十二章</b>	<b>管道应力分析程序的应用</b>	( 157 )
第一节	管道应力分析程序简介	( 157 )
第二节	CAESAR II 软件的应用	( 157 )
<b>附录 A</b>	<b>金属材料的平均线膨胀系数</b>	( 169 )
<b>附录 B</b>	<b>金属材料的单位线膨胀系数</b>	( 170 )
<b>附录 C</b>	<b>常用钢管许用应力</b>	( 171 )
<b>附录 D</b>	<b>金属材料的弹性模量</b>	( 174 )
<b>附录 E</b>	<b>连续敷设管道的允许跨距</b>	( 175 )
<b>附录 F</b>	<b>柔性系数和应力增大系数</b>	( 194 )
<b>附录 G</b>	<b>可变弹簧荷载位移选用表</b>	( 195 )
<b>附录 H</b>	<b>恒力弹簧荷载位移系列</b>	( 插 200 页后 )
<b>参考文献</b>		( 198 )

# 第一章 管道应力分析工作的任务和工作过程

管道设计的基本过程是，根据管道和仪表流程图，简称为 P&ID ( piping and instrument diagram) 的要求，利用管道将各个设备连接起来。管道设计过程中，在满足 P&ID 要求的同时，还应使管道的设计既经济合理又安全可靠，管道应力分析是实现这一目标的手段和方法。

## 第一节 管道应力分析工作的任务

压力、重力、风、地震、压力脉动、冲击等外力荷载和热膨胀的存在，是管道产生应力问题的主要原因。其中，热膨胀问题是管道应力分析所要解决的最常见和最主要的问题。

通俗来讲，物体内某一点的应力，是指物体内该点单位面积上的内力。应力分析的直接理解，应该是通过计算得到物体内的应力分布和数值。然而，通常所说的管道应力分析工作不仅仅是简单计算一下管道的应力，它是一个扩展的概念。管道应力分析的任务，实际上是指对管道进行包括应力计算在内的力学分析，并使分析结果满足标准规范的要求，从而保证管道自身和与其相连的机器、设备以及土建结构的安全。

一般来讲，管道应力分析可以划分为静力分析和动力分析两部分。静力分析是指在静力荷载的作用下对管道进行力学分析，并进行相应的安全评定，使之满足标准规范的要求。动力分析则主要指往复压缩机和往复泵管道的振动分析、管道的地震分析、水锤和冲击荷载作用下管道的振动分析，其目的是使地震和振动的影响得到有效控制。为便于工程应用，相当一部分动力分析采用等效静力法进行。

### 1. 管道静力分析的任务

管道静力分析需要完成下列任务：

- 1) 计算管道中的应力并使之满足标准规范的要求，保证管道自身的安全(包括防止法兰泄漏)；
- 2) 计算管道对与其相连的机器、设备的作用力，并使之满足标准规范的要求，保证机器、设备的安全；
- 3) 计算管道对支吊架和土建结构的作用力，为支吊架和土建结构的设计提供依据，保证支吊架和土建结构的安全；
- 4) 计算管道位移，防止位移过大造成支架脱落或管道碰撞，并为弹簧支吊架的选用提供依据。
- 5) 埋地管的稳定性计算，避免管道失稳。

### 2. 管道动力分析的任务

管道动力分析需要完成下列任务：

- 1) 管道的地震分析，防止管道在地震中发生破坏；
- 2) 往复压缩机和往复泵管道的固有频率和振型分析，防止管道系统发生机械共振；
- 3) 往复压缩机和往复泵管道的强迫振动分析，控制管道的振动应力，防止管道因振动发生疲劳破坏；



4) 往复压缩机和往复泵管道介质压力脉动的声学模拟分析, 计算管内气(液)体的气(液)柱固有频率和压力脉动, 避免气(液)柱共振和压力脉动过大, 从而防止管道振动过大;

5) 水锤、安全阀泄放荷载和两相流所产生的支架荷载计算, 为支架和土建结构的设计提供依据。

在进行上述分析的过程中, 应该根据实际情况不断对管道布置和支吊架设置加以修改, 在满足安全性的前提下, 力求得到最优化的结果。

应该说明的是, 并不是所有管道均需要进行计算分析。何种管道应进行何种分析应按相关标准、规范和规定执行。

## 第二节 管道应力分析的工作过程

为使管道应力分析工作有章可循, 并使整个工作可靠而高效, 下面介绍在设计项目执行中, 管道应力分析的工作过程, 以及在此过程中需要注意的问题。

由外力和热膨胀等因素引起的管道应力问题, 对于管系的操作运行具有重要的影响。大多数配管设计工程师对管道应力问题的了解非常有限, 同时由于解决管道应力问题往往需要调整管道的布置, 因此在整个设计过程中, 管道应力分析工程师必须与配管工程师相互紧密配合, 共同完成管道的应力分析任务。

管道应力分析的工作过程和步骤, 可能因项目的大小和复杂程度, 以及业主要求不同而有所不同, 但一般来讲包括以下内容。

### 一、编制项目的管道应力分析技术统一规定

项目的管道应力分析技术统一规定, 是对项目执行中各种管道应力问题解决方案的规定。它与工程标准有所不同, 工程标准规定的是设计中某方面技术问题所要遵循的规则, 项目的技术统一规定则是对项目执行中, 各个方面做出的规定, 它可以引用或包含多个工程标准的内容。项目的技术统一规定不但包含技术方面的内容, 还可以对分析深度, 以及不同专业之间的接口关系等管理方面的内容做出规定, 并应充分反映业主要求。工程标准所作的规定, 是普遍的一般要求, 具有一定的稳定性; 项目的技术统一规定, 则是针对具体项目的具体要求, 它涉及项目执行中的各个方面, 不同的项目, 技术统一规定的内容也有所不同。

项目的管道应力分析技术统一规定一般涉及以下方面:

- 1) 技术统一规定的适用范围;
- 2) 项目执行中使用的标准规范及版本;
- 3) 温度、压力等计算条件的确定方法;
- 4) 分析中需要考虑的荷载及计算方法;
- 5) 管道应力分析所使用的软件;
- 6) 项目中需要进行详细应力分析的管道类别;
- 7) 管道应力的安全评定条件;
- 8) 机器、设备的允许受力条件或遵循的标准;
- 9) 防止法兰泄漏的条件;
- 10) 膨胀节、弹簧等特殊元件的选用要求;
- 11) 专门问题(如摩擦力、冷紧等)的处理方法;
- 12) 业主的特殊要求;

- 13) 不同专业之间的接口关系;
- 14) 其他要求。

## 二、确定需要进行详细应力分析的管道

所谓详细应力分析,通常是指利用可靠的管道应力分析计算机程序,对管系进行分析计算。需要进行详细应力分析的管道,一般是管径较大、温度较高或与重要机器、设备相连的管道。不需要进行详细应力分析的管道,并不意味着不需要进行分析,或布置管道时不需要考虑应力问题。只是有些管道可以通过目测进行分析,有些管道可利用经验公式或图表进行分析,有些管道根据相应的标准规范及设计手册中规定的常规设计方法进行布置,便不会出现应力问题。

为了确定需要进行详细应力分析的管道,首先应该熟悉工艺流程图和管道说明表。工艺流程图就是通常所说的工艺管道和仪表流程图,它是管道设计的基础。图中应表示出系统中的设备、所需的仪表和设备间的连接管道。工艺管道和仪表流程图由工艺专业提供。管道说明表是所要设计的管道总表,它通常包括管道号、管道材料等级、管道类别、管道起止点、管道尺寸、操作压力和操作温度、设计压力和设计温度、管内介质、管道材质、保温层厚度等内容。管道说明表也由工艺专业提供。

根据工艺管道和仪表流程图及管道说明表,应力分析工程师便可以与配管工程师一道确定需要进行详细应力分析的重要管道,具体方法在下一节进行讨论。

## 三、接收管道应力分析三维轴测图

需要进行详细应力分析的管道确定之后,通常将其汇集成需要进行详细应力分析的重要管道表,配管工程师对表中所列管道进行初步的布置规划后,绘制成管道应力分析三维轴测图,提交管道应力分析工程师进行分析计算。

### 1. 管道应力分析三维轴测图包含的内容

管道应力分析三维轴测图通常包含以下主要内容:

- 1) 管号、管道材料等级、管道类别、管道材质;
- 2) 管道走向、尺寸、标高、管内介质流向;
- 3) 管径、壁厚、弯头的曲率半径;
- 4) 可以设置支吊架的位置及支吊架形式;
- 5) 阀门、法兰等刚性元件的重量、保温层的厚度和密度,以及其他集中或均布荷载条件;
- 6) 管道计算温度、计算压力和管内介质密度;
- 7) 正常操作条件外的特殊工况,如开车、停车、除焦、再生等工况;
- 8) 机器制造商的允许受力要求;
- 9) 往复机泵的激振频率;
- 10) 管道端点约束条件或附加位移、管道所连接的机器设备。

### 2. 应考虑端点附加位移的情况

在分析中,与下列机器、设备连接的管道应考虑端点附加位移:

- 1) 静设备热胀冷缩时对连接管道施加的附加位移;
- 2) 转动机器热胀冷缩在连接管口处产生的附加位移;
- 3) 加热炉管对加热炉进出口管道施加的附加位移;
- 4) 储罐等设备基础沉降在连接管口处产生的附加位移;

5) 不和主管一起分析的支管, 应将分支点处主管的位移作为支管端点的附加位移。

### 3. 热胀冷缩引起位移的计算

由热胀冷缩引起的设备管口附加位移按以下公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \alpha L_x \Delta T \\ \delta_y &= \alpha L_y \Delta T \\ \delta_z &= \alpha L_z \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (1.2.1)$$

式中  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ ——设备管口沿  $X, Y, Z$  三个方向的附加位移, mm;

$\alpha$ ——设备材料从安装温度变化到操作温度的平均线膨胀系数, mm/(mm·°C);

$L_x, L_y, L_z$ ——设备固定点至管口之间沿  $X, Y, Z$  三个方向距离, mm;

$\Delta T$ ——设备壳体从安装状态到操作状态的温度变化值, °C。

由于通常将安装状态的温度取为 20°C, 所以一般将  $\alpha$  取为操作温度与 20°C 之间的平均线膨胀系数(见附录 A),  $\Delta T$  为设备操作温度与 20°C 之间的差值。当设备温度不均匀时, 应将设备分为若干段, 认为每段温度是均匀的, 利用上述公式分别计算各段位移后, 相加得到最终的设备管口位移。

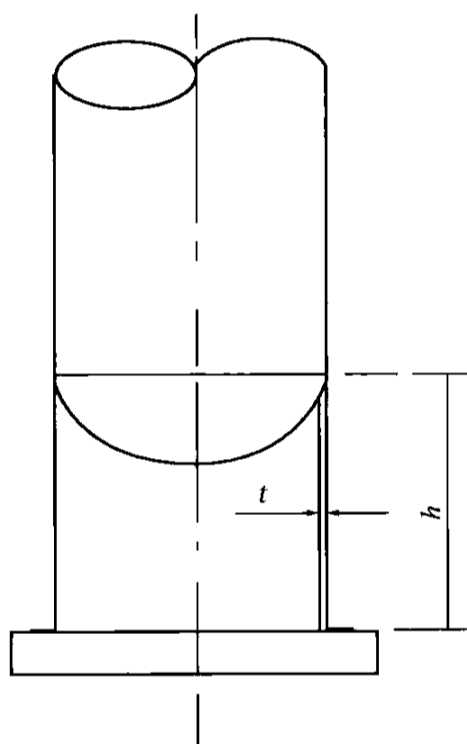


图 1.2.1 裙座示意图

如果将材料的单位线膨胀系数  $\alpha_1$  定义为:

$$\alpha_1 = \alpha \Delta T \quad (1.2.2)$$

各个方向的位移可由式(1.2.3)计算:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \alpha_1 L_x \\ \delta_y &= \alpha_1 L_y \\ \delta_z &= \alpha_1 L_z \end{aligned} \right\} \quad (1.2.3)$$

金属材料的单位线膨胀系数  $\alpha_1$  的数值见附录 B。采用单位线膨胀系数  $\alpha_1$  计算位移, 比采用平均线膨胀系数更为简便。

### 4. 裙座位移的计算

如图 1.2.1 所示, 当设备由裙座支撑时, 上述附加位移计算中的固定点应是裙座顶部。裙座本身的热膨胀所产生的影响, 可采用两种不同方法进行处理。第一种方法是根据经验在上述设备位移的计算结果基础上适当增大余量, 这种方法需要较多的工程实践经验, 通常较难把握。第二种方法是

采用经验公式计算出裙座顶部的位移, 再与上述设备位移相加得到最终的设备管口位移。

裙座顶部位移的计算可按以下方法进行:

1) 根据裙座的高度、壳体壁厚和保温情况

按照式(1.2.4)计算参数  $c$ :

$$c = \frac{0.0165kh}{\sqrt{t}} \quad (1.2.4)$$

式中  $h$ ——裙座高度, mm;

$t$ ——裙座厚度, mm;

$k$ ——隔热层影响系数, 全隔热裙座取为 1, 防火隔热裙座取为 1.7, 不隔热裙座取为 2.7。

2) 根据图 1.2.2 确定温度修正系数  $F$ ;

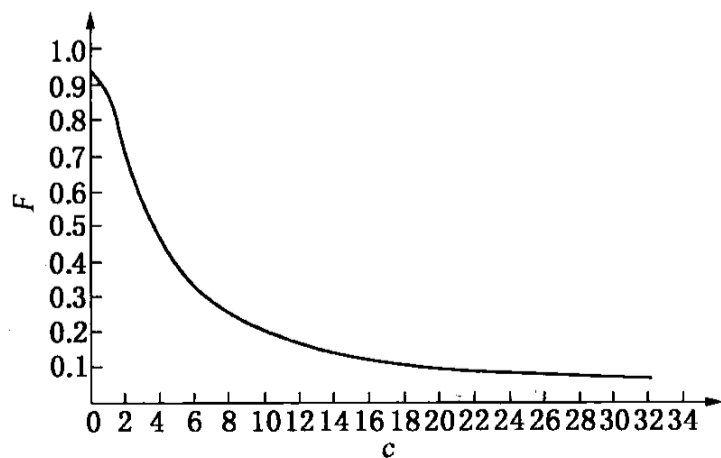


图 1.2.2 温度修正系数  $F$  的确定

3) 根据式(1.2.5)计算裙座平均温度  $T_a$ ;

$$T_a = F(T_1 - T_0) + T_0 \quad (1.2.5)$$

式中  $T_a$ ——裙座平均温度,℃;

$T_1$ ——裙座顶部温度,℃;

$T_0$ ——裙座安装温度,℃。

4) 根据式(1.2.6)计算裙座顶部位移:

$$\delta_{\text{裙座}} = \alpha h(T_a - T_0) \quad (1.2.6)$$

式中  $\alpha$ ——裙座材料从安装温度变化到平均温度的平均线膨胀系数,  $\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$h$ ——裙座高度, mm。

**裙座位移确定实例:**

假设裙座高度为 3000mm, 裙座厚度为 25mm, 裙座顶部温度为 350℃, 裙座安装温度为 20℃, 裙座为全隔热, 裙座材料为低碳钢, 试确定裙座顶部的位移。

**解答:**

1) 根据式(1.2.4)得到:

$$c = \frac{0.0165 \times 1 \times 3000}{\sqrt{25}} = 9.9$$

2) 根据图 1.2.2 确定温度修正系数  $F = 0.21$ ;

3) 根据式(1.2.5)计算裙座平均温度:

$$T_a = 0.21 \times (350 - 20) + 20 = 89.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4) 根据式(1.2.6)计算裙座顶部位移:

低碳钢在 89.3℃时的平均线膨胀系数约为  $1.144 \times 10^{-5} \text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$

$$\delta_{\text{裙座}} = 1.144 \times 10^{-5} \times 3000 \times (89.3 - 20) = 2.4 \text{ mm}$$

#### 四、对管系进行分析计算

由于目前管道应力分析软件所采用数值分析方法均为有限元法, 所以分析计算时, 首先要将管系通过节点划分为有限个单元, 建立管系的计算模型。建立计算模型时, 一般应在下列各处设置节点:

- 1) 管道端点;
- 2) 管道约束点、支吊点和给定位移处;
- 3) 管道方向改变点或分支点;
- 4) 管径、壁厚改变点;
- 5) 保温厚度、保温材料改变点;
- 6) 管道计算温度、计算压力改变点;
- 7) 管道外力荷载改变处;
- 8) 管道材料改变处(包括刚度改变处, 例如刚性元件、膨胀节);
- 9) 直接埋地管出入地面处;
- 10) 需要了解分析结果处(例如跨距较长时的跨中点处);
- 11) 动力分析须增设节点。

建立起计算模型且输入数据正确无误后, 便可对管系进行初步计算。初步计算时, 通常可采用计算软件推荐的工况组合(如有特殊工况应人为进行组合), 弹簧可由程序自动选取。对于初步计算结果, 通常应查看以下内容:

- 1) 查看一次应力和二次应力的校核结果；
- 2) 查看安装状态和操作状态的位移；
- 3) 查看机器、设备受力；
- 4) 查看支吊架受力；
- 5) 查看弹簧表。

大多数情况下，不可能由计算程序计算一次便得到满意的结果，因此需要对计算模型进行反复修改，直至计算结果满足标准规范的要求。如须对管道布置及支吊架进行必要的修改，应力工程师应与配管工程师紧密配合共同商讨，得到满意的修改方案。

计算结果不满足要求时，通常存在以下问题：

- 1) 一次应力超标：缺少支吊架；
- 2) 二次应力超标：管道柔性不够或三通须加强；
- 3) 冷态位移过大：缺少支吊架；
- 4) 热态水平位移过大：缺少固定点或Ⅱ形弯、管托应加长；
- 5) 机器、设备受力过大：管道柔性不够、支吊架设置不合理；
- 6) 固定支架、限位支架水平受力过大：固定点、限位点位置选择不当或管道柔性不够；
- 7) 支吊点垂直力过大：考虑采用弹簧支吊架；
- 8) 支吊点脱空：考虑采用弹簧支吊架；
- 9) 弹簧荷载、位移范围选择不当：人为进行调整；
- 10) 计算工况组合不当：人为进行调整。

#### 五、编制计算书、向相关专业提交分析计算结果

在分析计算结果满足标准规范的要求后，应力工程师应编制计算书，并向相关专业提交分析计算结果。

##### 1. 计算书包括的内容

计算书一般包括以下内容：

- 1) 主要输入数据；
- 2) 管道一次应力的校核结果；
- 3) 管道二次应力的校核结果；
- 4) 管道端点和各约束点、与机器设备的连接点、固定点、支吊点、限位和导向点以及位移给定点处的安装状态和操作状态的受力；
- 5) 各节点处安装状态和操作状态的位移；
- 6) 弹簧支吊架和膨胀节的型号等有关信息；
- 7) 离心压缩机、汽轮机、离心泵的受力校核结果；
- 8) 往复压缩机、往复泵管系的固有频率；
- 9) 经分析计算最终得到的管道三维轴测图，包括支吊架的位置及形式、膨胀节位置等信息。

##### 2. 向相关专业提交的分析计算结果

向相关专业提交的分析计算结果主要有：

- 1) 向配管专业提交管道应力分析计算书；
- 2) 向设备和机械专业提交需要其确认的设备和机器受力；

- 3) 如果支撑点、固定点、限位点、导向点的荷载较大, 应向土建专业提交荷载数值;
- 4) 将往复压缩机、往复泵的管道布置和支架设置提交机器制造厂确认。

### 第三节 需要进行详细应力分析管道的确定方法

确定哪些管道需要进行详细的应力分析, 是管道应力分析的一项重要内容。所有管道都进行详细的应力分析, 显然不现实, 也没有必要。但如果进行详细应力分析的管道过少, 则可能漏掉某些重要管道, 造成安全隐患。因此恰到好处地确定需要进行详细应力分析的管道非常必要。管道是否需要进行详细的应力分析与管径、温度和所连接的设备有关。一般来讲, 管径较大、温度较高以及与重要机器设备相连的管道需要进行详细的应力分析。由于管内介质的危害程度、配管标准规范的完善程度和配管设计人员的经验水平也对管道是否需要进行详细应力分析具有重要影响, 因此不同行业、不同工程公司以至于不同设计项目对哪类管道需要进行详细应力分析也有不同的规定。下面对几种确定方法分别加以介绍。

#### 一、GB 50316 的规定

在 GB 50316 中, 对管道柔性计算的范围和方法做了如下规定:

- 1) 管道的设计温度小于或等于  $-50^{\circ}\text{C}$  或大于或等于  $100^{\circ}\text{C}$ , 均应为柔性计算的范围;
- 2) 对柔性计算的公称直径范围应按设计温度和管道布置的具体情况在工程设计时确定;
- 3) 第 1) 条的规定以外, 满足下列条件之一的管道, 也应列入柔性计算的范围:
  - a. 受室外环境温度影响的无隔热层长距离的管道;
  - b. 管道端点附加位移量大, 不能用经验判断其柔性的管道;
  - c. 小支管与大管连接, 且大管有位移并会影响柔性的判断时, 小管应与大管同时计算。
- 4) 具备下列条件之一的管道, 可不作柔性分析:
  - a. 该管道与某一运行情况良好的管道完全相同;
  - b. 该管道与已经过柔性分析合格的管道相比较, 几乎没有变化。
- 5) 柔性计算方法应符合下列规定:
  - a. 对于与敏感机器、设备相连的或高温、高压或循环当量数大于 7000 等重要的以及工程设计有严格要求的管道, 应采用计算机程序进行柔性计算;
  - b. 对简单的 L 形、 $\Pi$  形、Z 形等管道, 可采用表格法、图解法等验算, 但所采用的表和图必须是经过计算验证的;
  - c. 无分支管道或管系的局部作为计算机柔性计算前的初步判断时, 可采用简化的分析方法。

#### 二、GB/T 20801 的规定

- 1) 符合以下条件之一的管道系统应进行管道应力分析:
  - a. 设备管口有特殊的荷载要求;
  - b. 预期寿命内热循环次数超过 7000 的管道;
  - c. 操作温度大于等于  $400^{\circ}\text{C}$ , 或小于等于  $-70^{\circ}\text{C}$  的管道。
- 2) 符合以下条件之一的管道系统可免除应力分析:
  - a. 与运行良好的管道系统相比, 基本相同或基本相当的管道系统;
  - b. 与已通过应力分析的管道系统相比, 确认有足够强度和柔性的管道系统。

### 三、ASME B31.3 的规定

ASME B31.1 中的规定与 ASME B31.3 中的规定相类似，现以 ASME B31.3 为例进行说明。在 ASME B31.3 中，将正式的管道柔性分析方法划分为简化的近似分析方法和详细分析方法两类并做了如下规定：

#### 1. 不需要进行正式柔性分析的管道

下列管道不需要进行正式柔性分析：

- 1) 与运行良好的管道相同或没有重要变动的管道；
- 2) 与分析过的管道相比较，能够容易地判断出具有足够柔性的管道；
- 3) 对具有同一尺寸、不多于两个固定点、无中间约束，并且满足以下经验公式的管道：

$$\frac{D_o Y}{(L - U)^2} \leq 2.08 \times 10^5 S_A / E_a \quad (1.3.1)$$

式中  $D_o$ ——管道外径，mm；

$Y$ ——需要由管系吸收的总变形合成值，mm；

$L$ ——两固定点之间管道的展开长度，m；

$U$ ——两固定点之间的直线距离，m；

$S_A$ ——许用位移应力范围(与式(5.1.6)中 $[\sigma]_A$ 的表达式相同)，MPa；

$E_a$ ——材料在 20℃ 时的弹性模量，MPa。

ASME B31.3 对上式的使用条件做了如下说明：

- a. 无法提供全面的证明来说明该式能得出准确或一贯保守的结果；
- b. 本式在下列情况不适用：
  - Ⓐ 剧烈循环条件下运行的管道(剧烈循环条件是指，计算得到的管道应力变化范围超过 0.8 倍许用应力变化范围，并且在运行寿命期间等效循环次数超过 7000 次的循环)；
  - Ⓑ  $L/U > 2.5$  的不等腿 U 形弯管管道，或近似直线的锯齿状管道；
  - Ⓒ 大直径薄壁管道(管件处的应力增大系数  $i \geq 5$ )；
  - Ⓓ 与端点连线不在同一方向的端点附加位移量占总位移量中大部分的管道。

#### 2. 需要进行正式柔性分析的管道

下列管道需要进行正式柔性分析：

1) 凡不满足上述第 1 条的管道，均应采用适当的简化方法、近似方法或详细分析方法对管道进行分析。

2) 简化的或近似的方法只能应用于一些特定的管系，对于这些管系该方法的有效性应已得到充分的证明。

3) 详细分析方法可以是解析法也可以是图表法，但这些方法应能够计算出位移应变所引起的作用力、力矩和应力。

4) 详细分析方法应能够考虑直管以外任何管件的应力增大系数以及这些管件额外的柔性，这种柔性对管系是有利的。

通过以上的叙述可以看出，ASME B31.3 在提及详细分析方法时，并未说明应采用计算机程序进行分析，而将其定义为解析法或图表法，这实际上与标准中该条款的编写历史有关。其原因是该条款早期在标准中就已形成，当时计算机在工程领域还未得到广泛应用。然而标准中的条款大多具有一定的稳定性，由于一直没有出现大的问题，因此该条款多年来一

直没有改动。但是，在计算机软硬件都已非常发达的今天，采用计算机软件进行分析无疑是详细分析最有效和最便利的手段。

在 ASME B31.3 中规定，只要满足式(1.3.1)便可免除正式的应力分析。虽然该公式在很多文献中被普遍引用，但应如何使用该公式进行计算，有些文献没有给出说明，有些则说明不够清楚。使用该式的关键是如何计算需要由管系吸收的总变形合成值  $Y$ ，现将  $Y$  值的计算方法和步骤说明如下。

1) 确定一个空间坐标系  $XYZ$ ， $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴指向哪个方向都可以。一旦坐标系确定之后，下列计算均参照该坐标系进行；

2) 假设两固定端一端为  $a$  端，另一端为  $b$  端；

3) 令  $\Delta X_1$ 、 $\Delta Y_1$ 、 $\Delta Z_1$  为  $b$  端沿  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴方向的附加位移值减去  $a$  端相应方向的附加位移值。附加位移与坐标方向相同时取正值，相反时取负值；

4) 令  $\Delta X_2$ 、 $\Delta Y_2$ 、 $\Delta Z_2$  为假设  $b$  端放松后由于管道热胀引起的  $b$  端沿  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴方向的位移值。 $\Delta X_2$ 、 $\Delta Y_2$ 、 $\Delta Z_2$  按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_2 &= \alpha L_x \Delta T \\ \Delta Y_2 &= \alpha L_y \Delta T \\ \Delta Z_2 &= \alpha L_z \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (1.3.2)$$

式中  $\Delta X_2$ 、 $\Delta Y_2$ 、 $\Delta Z_2$ —— $b$  端放松后由于管道热膨胀引起的  $b$  端沿  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴方向的位移值， $\text{mm}$ ；

$\alpha$ ——管道材料从安装温度变化到操作温度的平均线膨胀系数， $\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$L_x$ 、 $L_y$ 、 $L_z$ ——以  $a$  端为坐标原点时， $b$  端在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向坐标值， $\text{mm}$ ；

$\Delta T$ ——管道从安装状态(一般取为  $20^\circ\text{C}$ )到操作状态的温度变化值， $^\circ\text{C}$ 。

5) 管系在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的变形  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \Delta X_2 - \Delta X_1 \\ \Delta Y &= \Delta Y_2 - \Delta Y_1 \\ \Delta Z &= \Delta Z_2 - \Delta Z_1 \end{aligned} \right\} \quad (1.3.3)$$

6) 需要由管系吸收的总变形合成值为：

$$Y = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

**判断式(1.3.1)的应用实例：**

如图 1.3.1 所示， $DN250$  的管道外径为  $273\text{mm}$ ，操作温度为  $300^\circ\text{C}$ ，管道材质为 20 号钢，材料在  $20^\circ\text{C}$  和  $300^\circ\text{C}$  时的许用应力分别为  $130\text{MPa}$  和  $101\text{MPa}$ ，位移应力范围减小系数  $f$  等于 1，材料在  $20^\circ\text{C}$  时的弹性模量为  $1.92 \times 10^5\text{MPa}$ ，判断该管系是否需要需要进行正式的柔性分析。

**解答：**

1) 选定的坐标及  $a$ 、 $b$  端如图 1.3.1 所示；

2) 管系两固定点间的展开长度为：

$$L = 1.28 + 3.75 + 2.5 + 1.95 + 2.5 = 11.98 \text{ m}$$

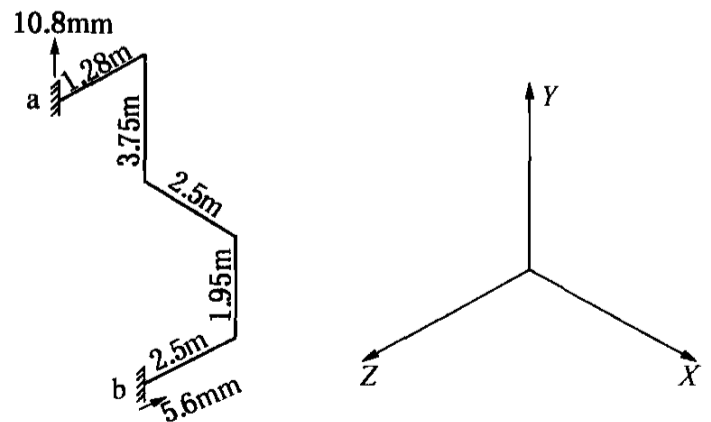


图 1.3.1 判断式应用实例



3) 管系两固定点间的直线距离为:

$$U = \sqrt{2.5^2 + (3.75 + 1.95)^2 + (2.5 - 1.28)^2} = 6.34 \text{ m}$$

4) 计算  $\Delta X_1$ 、 $\Delta Y_1$ 、 $\Delta Z_1$ :

$$\Delta X_1 = 0 - 0 = 0$$

$$\Delta Y_1 = 0 - 10.8 = -10.8 \text{ mm}$$

$$\Delta Z_1 = -5.6 - 0 = -5.6 \text{ mm}$$

5) 计算 b 端放松后由于管道热膨胀引起的 b 端位移值  $\Delta X_2$ 、 $\Delta Y_2$ 、 $\Delta Z_2$ :

根据标准, 管系安装温度一般取  $20^\circ\text{C}$ 。由附录 A 查得碳钢从  $20^\circ\text{C}$  变为  $300^\circ\text{C}$  的平均线膨胀系数为  $12.9 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

$$\Delta X_2 = 12.9 \times 10^{-6} \times 2500 \times (300 - 20) = 9.03 \text{ mm}$$

$$\Delta Y_2 = 12.9 \times 10^{-6} \times [-(3750 + 1950)] \times (300 - 20) = -20.59 \text{ mm}$$

$$\Delta Z_2 = 12.9 \times 10^{-6} \times (-1280 + 2500) \times (300 - 20) = 4.41 \text{ mm}$$

6) 计算管系在 X、Y、Z 三个方向的变形  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ :

$$\Delta X = \Delta X_2 - \Delta X_1 = 9.03 - 0 = 9.03 \text{ mm}$$

$$\Delta Y = \Delta Y_2 - \Delta Y_1 = -20.59 - (-10.8) = -9.79 \text{ mm}$$

$$\Delta Z = \Delta Z_2 - \Delta Z_1 = 4.41 - (-5.6) = 10.01 \text{ mm}$$

7) 计算需要由管系吸收的总变形合成值 Y:

$$Y = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} = \sqrt{9.03^2 + (-9.79)^2 + 10.01^2} = 16.66 \text{ mm}$$

8) 计算右端项

由式(5.1.6)计算  $S_A$ :

$$S_A = 1 \times (1.25 \times 130 + 0.25 \times 101) = 187.75 \text{ MPa}$$

$$2.08 \times 10^5 \times S_A / E_a = 2.08 \times 10^5 \times 187.75 / (1.92 \times 10^5) = 203.4$$

9) 利用式(1.3.1)进行核算:

$$\frac{D_o \times Y}{(L - U)^2} = \frac{273 \times 16.66}{(11.98 - 6.34)^2} = 143 < 203.4$$

因此不必进行正式的柔性分析。

应该说明的是, 该公式在实际应用中存在较大局限性。第一, 如前所述, 该公式的使用具有很多限制条件, 即使满足该式也不能保证得到一贯保守的结果。第二, 满足该式至多只能说明管系自身具有足够柔性, 位移应力不会超出许用范围, 也就是说管系自身是安全的。但并不表明管道对相连设备的作用力处于允许的范围内, 亦即不能表明设备也总是安全的。第三, 该式涉及的荷载只是管道的热胀、冷缩等位移荷载, 且不允许存在中间支撑, 因此应用该式无法确定支吊架荷载, 也不能得出管道对端点的作用力。

GB 50316、GB/T 20801 和 ASME B31.3 是一般性的标准, 对于如何确定需要进行详细应力分析的管道, 只在某些方面规定了大的原则, 对于细节并未做出具体规定, 因此上述规定的可操作性有限。为解决这一问题, 一些行业 and 公司的标准在参考上述规定的基础上, 进一步做出了更具体的规定。

#### 四、SH/T 3041 的规定

由中国石油化工集团公司负责编制的行业标准 SH/T 3041《石油化工管道柔性设计规范》根据石化行业的特点, 将管道柔性设计方法划分为简化分析和计算机分析两种方法; 并规定