



中国石油大学(北京)学术专著系列

管线力学

帅 健 著



科学出版社

www.sciencep.com

中国石油大学(北京)学术专著系列

88

管线力学

帅健 著

科学出版社

北京

TE913

S665

内 容 简 介

本书主要内容为管道失效判据、含缺陷(体积型缺陷、面积型缺陷、几何凹陷)管道和管道修复结构的剩余强度评价和剩余寿命评价、输气管道的止裂控制、灾害地质条件(采空沉陷、占压、冻土、地震波等)作用下管道的应力与应变分析以及海底管道的若干力学问题,其中包括基于可靠性的评价方法,内容涵盖了油气输送管线工程设计和安全评价中的主要力学理论与方法。

本书可供油气储运工程专业及其相关领域的技术人员、研究人员、大专院校的教师、研究生和高年级大学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

管线力学/帅健著. —北京:科学出版社, 2010
(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-027045-0

I. 管… II. 帅… III. ①力学-应用-石油管道:长输管道 ②力学-应用-天然气管道:长输管道 IV. TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 045778 号

责任编辑:杨 震 周 强 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2010 年 4 月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—2 000 字数: 353 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

大学是以追求和传播真理为目的, 并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织. 1953 年, 为适应国民经济和石油工业发展需求, 北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立, 成为新中国第一所石油高等院校. 1960 年成为全国重点大学. 历经 1969 年迁校山东改称华东石油学院, 1981 年又在北京办学, 数次搬迁, 几易其名. 在半个多世纪的历史征程中, 几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神. 在曲折中奋进. 在奋进中实现了一次次跨越. 目前, 学校已成为石油特色鲜明, 以工为主, 多学科协调发展的“211 工程”建设的全国重点大学. 2006 年 12 月, 学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列.

学校在发展历程中, 有着深厚的学术记忆. 学术记忆是一种历史的责任, 也是人类科学技术发展的坐标. 许多专家学者把智慧的涓涓细流, 汇聚到人类学术发展的历史长河之中. 据学校的史料记载: 1953 年建校之初, 在专业课中有 90% 的课程采用前苏联等国的教材和学术研究成果. 广大教师不断消化吸收国外先进技术, 并深入石油厂矿进行学术探索. 到 1956 年, 编辑整理出学术研究成果和教学用书 65 种. 1956 年 4 月, 北京石油学院第一次科学报告会成功召开, 活跃了全院的学术气氛. 1957~1966 年, 由于受到全国形势的影响, 学校的学术研究在曲折中前进. 然而许多教师继续深入石油生产第一线, 进行技术革新和科学研究. 到 1964 年, 学院的科研物质条件逐渐改善, 学术研究成果以及译著得到出版. 党的十一届三中全会之后, 科学研究被提到应有的中心位置, 学术交流活动的日趋活跃, 同时社会科学研究成果也在逐年增多. 1986 年起, 学校设立科研基金, 学术探索的氛围更加浓厚. 学校始终以国家战略需求为使命, 进入“十一五”之后, 学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路, 尤其重视基础和应用基础研究. “十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高, 成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究以及科技信息和学术交流的主要基地.

在追溯学校学术记忆的过程中, 我们感受到了石大学者的学术风采. 石大学者不但传道授业解惑, 而且以人类进步和民族复兴为己任, 做经世济时、关乎国家发展的大学问. 写心存天下、裨益民生的大文章. 在半个世纪的发展历程中, 石大学者历经磨难、不言放弃, 发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风, 创造了不凡的学术成就.

学术事业的发展有如长江大河, 前浪后浪, 滔滔不绝, 又如薪火传承, 代代相继,

火焰愈盛。后人做学问，总要了解前人已经做过的工作，继承前人的成就和经验，在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平，凸显石油科技特色，弘扬科学精神，积淀学术财富，学校从 2007 年开始，建立“中国石油大学（北京）学术专著出版基金”，专款资助教师们以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版，形成《中国石油大学（北京）学术专著系列》丛书。受学校资助出版的每一部专著，均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序，确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说，学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台，也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者，在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标，并且在不断产生着引领学术前沿的新军，他们形成了一道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚，为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作，在园丁们灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生，展现在我们眼前的一定是石大寥廓辽远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步，不断迈向新的高度！

中国石油大学（北京）校长

张来斌

2008 年 3 月 31 日

前 言

作为五大运输方式之一的管道运输,是油气资源配送的主要方式,在国民经济中占有重要地位。近年来,随着“西气东输”等一批重要油气长距离输送管线的建成与投产,我国已形成遍布全国并连接国外的油气输送管网,促进了社会的经济发展,改善了人民生活。油气管线在带来巨大好处的同时,由于输送介质的易燃、易爆特性,一旦失效,可能引发人员伤亡和环境污染等灾难性事故,因此,油气管线的安全可靠性历来受到高度关注。管线力学研究管道的失效方式与安全承压能力,是保障油气输送管线安全性的必备理论基础。

世界范围的油气管线建设的高速发展极大促进了力学理论与方法在管线中的应用。例如,早期建成的油气管线,随着其服役时间的延长,腐蚀或第三方破坏等问题对管线的影响日渐突出,为保障在役管线的安全运行并延长其使用寿命,需要进行管线剩余强度和剩余寿命的评价;再者,新建油气管线向高压、大口径和薄壁的发展趋势,要求大量采用高强度和高韧性管材,因而断裂控制和安全可靠性理论等成为管线设计与制造的关键因素;此外,因沿线自然环境变化或生产建设活动,油气输送管线可能遭遇不良地质环境等复杂情况,合理评价不良地质条件对管线的影响,既是管线工程设计也是管理维护的依据。所有这些重大的工程需求,给力学分析方法提出了许多挑战性的问题。

经过长期发展,油气管线的力学分析已经涵盖了固体力学的许多分支,从材料力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学到结构力学,从理论分析、数值模拟到实验研究,每一个方面在油气管线的工程分析中都有广泛而深入的应用。例如,在管道中的失效模式一般涉及塑性失稳、断裂和结构稳定性,还由于其特殊的服役环境和结构特点,管道中还有裂纹动态扩展等问题,与之相关的研究实际上处于相关学科领域前沿。系统总结在油气输送管线的设计、制造与运行管理中遇到的力学问题,阐述其解决方法和共同的理论基础,有利于推动管线力学研究体系的逐步完善和研究内容的不断深化,提升油气管线工程设计和运行管理的技术水平。

本书力图概括油气输送管线工程设计和安全评价中的主要力学理论与方法,主要材料来源于作者近年来完成的科研课题、学术论文以及所指导和合作指导的博士、硕士研究生的学位论文,此外,还参考了一定数量的国内外文献。读者读完本书后,将对油气管线的力学分析理论有较系统、全面而深入的了解,并为进一步的

研究提供帮助。

值此书出版之际,首先感谢我的研究生导师蔡强康、吕英民教授,他们开创了中国石油大学的管道和储罐强度的研究方向,为后来的发展奠定了基础;还要感谢我的同事许葵,多年来,他带领研究生做了许多扎实的研究工作;感谢卜文平、王晓霖为本书的第7章、第9章提供了资料;其他研究生也不同程度地为本书作出了贡献,在此一并表示感谢。

由于作者的水平有限,书中内容若有疏漏或不妥之处,诚恳地欢迎读者批评指正!

帅 健

2010年1月8日

目 录

丛书序

前言

第 1 章 管道失效判据	1
1.1 管道的应力-应变曲线	1
1.2 基于应力的失效判据	4
1.3 基于应变的失效判据	5
参考文献	7
第 2 章 含体积型缺陷管道的剩余强度评价	9
2.1 失效压力	9
2.2 评价标准及方法	12
2.2.1 ASME B31G 标准	13
2.2.2 DNV RP-F101 标准	14
2.2.3 PCORRC 方法	14
2.3 有限元分析	15
2.3.1 有限元建模	15
2.3.2 计算实例	18
2.3.3 拟合公式	21
2.4 评价方法的验证	23
2.5 组合型缺陷的评价	26
参考文献	28
第 3 章 含裂纹管道的断裂评定	30
3.1 应力强度因子	30
3.2 裂纹尖端张开位移	32
3.3 J 积分及其全塑性解	35
3.4 失效评定图方法	38
3.5 J 积分计算的有限元方法	41
3.5.1 裂尖奇异单元	41
3.5.2 线弹簧单元	43
3.6 失效评定曲线的验证	45
3.7 失效评定曲线的影响因素	47

参考文献	49
第 4 章 基于可靠性的管道安全评价方法	50
4.1 极限状态与失效概率	50
4.2 含体积型缺陷管道的失效概率	51
4.2.1 极限状态方程	51
4.2.2 失效概率的求解方法	52
4.2.3 腐蚀管道失效概率的影响因素分析	54
4.3 分项安全系数法	55
4.4 腐蚀管道的剩余寿命预测	57
4.5 含面积型缺陷管道的失效概率	60
4.5.1 基于断裂判据的极限状态方程	60
4.5.2 Monte-Carlo 模拟法	60
4.5.3 断裂失效概率的影响因素分析	62
4.6 基于失效评定图的失效概率分析	66
参考文献	69
第 5 章 管道的疲劳寿命预测	71
5.1 管道运行压力的循环计数	71
5.2 管道疲劳裂纹扩展速率	74
5.3 含裂纹管道的剩余寿命预测	79
5.4 管道低周疲劳寿命预测	80
5.4.1 Manson-Coffin 公式	81
5.4.2 管道钢低周疲劳性能测试	82
5.4.3 管道的疲劳累积损伤	86
5.5 管材的 $S-N$ 曲线	88
参考文献	90
第 6 章 凹陷管道的评价	91
6.1 凹陷形成的有限元模拟	91
6.2 外载与凹陷深度的关系	94
6.3 凹陷回弹	97
6.4 基于应变的凹陷评估	99
6.4.1 凹陷应变计算	99
6.4.2 凹陷轮廓曲线插值	101
6.4.3 凹陷的计算长度	103
6.5 含划伤凹陷的评估	106
6.6 凹陷的疲劳	108

参考文献	109
第 7 章 管道焊接修复结构的安全评价	111
7.1 管道修复结构的全尺寸实验	111
7.1.1 试验方法	111
7.1.2 爆破情况	112
7.1.3 应变测量	113
7.1.4 极限载荷	117
7.1.5 分析与讨论	118
7.2 管道修复结构的有限元分析	119
7.2.1 接管修复结构的计算与分析	119
7.2.2 补板修复结构的计算与分析	126
7.2.3 多接管修复结构的计算与分析	130
7.3 管道焊接结构的残余应力测试	132
参考文献	136
第 8 章 输气管道的裂纹动态扩展及止裂	137
8.1 管道止裂判据	137
8.1.1 能量判据	137
8.1.2 速度判据	138
8.2 管道止裂韧性测试	138
8.2.1 夏比冲击功	138
8.2.2 落锤吸收能量	139
8.2.3 裂纹尖端张开角	140
8.3 管道止裂设计	142
8.3.1 动态脆性断裂的止裂设计	142
8.3.2 动态延性断裂的止裂设计	143
8.4 富气输送管道的减压行为	147
8.5 CTOA 作为止裂判据的研究	148
8.6 管道裂纹动态扩展的有限元模拟	152
8.6.1 气体压力模式	153
8.6.2 节点力释放技术	153
8.6.3 裂纹驱动力计算	154
参考文献	156
第 9 章 采空沉陷区管道的应力分析	158
9.1 采空沉陷及其对管道的作用	158
9.1.1 地表连续性移动	159

9.1.2 地表非连续破坏	159
9.2 采空沉陷预测	160
9.3 管-土相互作用模型	163
9.4 有限元分析方法	166
9.5 解析分析方法	168
9.5.1 柔性判据	169
9.5.2 计算方法	170
9.5.3 算例分析	176
9.6 简化评估方法	178
参考文献	179
第 10 章 占压管道的应力分析	180
10.1 占压载荷	180
10.1.1 管顶土压力	180
10.1.2 附加载荷	181
10.2 占压管道的截面变形	186
10.2.1 Spangler-Iowa 方法	186
10.2.2 有内压埋地管道的截面变形	187
10.3 占压管道的有限元模型	188
10.3.1 土体本构模型	188
10.3.2 非线性接触	190
10.3.3 有限元模型	191
参考文献	197
第 11 章 冻土区管道的应力分析	198
11.1 管道周围冻土温度场分析	198
11.1.1 控制微分方程	198
11.1.2 相变问题的处理	199
11.1.3 计算模型	200
11.2 差异性冻胀下管道的应力分析	204
11.2.1 冻胀量的计算	205
11.2.2 蠕变量的计算	206
11.2.3 管-土系统有限元模型	207
11.3 地基融沉时管道的应力分析	210
参考文献	212
第 12 章 地震波动下的管道随机振动分析	214
12.1 管道振动的基本方程及其特征解	214

12.1.1 轴向振动	214
12.1.2 横向振动	217
12.2 地震地面随机运动	219
12.2.1 地震动平稳自功率谱	220
12.2.2 非平稳地震随机过程	222
12.2.3 地震动的空间相关性	222
12.3 埋地管道的平稳随机振动	223
12.3.1 轴向振动	223
12.3.2 横向振动	229
12.4 埋地管道的非平稳随机振动	235
12.5 参数随机变化的振动分析	241
参考文献	247
第 13 章 海底管道的若干力学问题	248
13.1 铺管船法铺管时的应力分析	248
13.2 挖沟铺设时管道的应力分析	253
13.3 海底管道的上浮屈曲	257
13.4 海底管道起吊时最佳吊点位置的选择	260
参考文献	264

但是它们也有一些共同的特点,典型的应力-应变曲线如图 1-1 所示,根据试件的变形发展,可以将其分为 4 个阶段:① 弹性阶段, A 点以下,应力与应变之间的关系是线性,从 A 点到 B 点,应力与应变之间的关系不再是线性,但是解除拉力后变形仍可完全消失,这种变形称为弹性变形;② 屈服阶段,当应力超过 B 点,应变有明显的增加,出现了近似水平的线段, B 点到 C 点这种应力基本保持不变,而应变显著增加的现象,称为屈服或流动;③ 强化阶段, C 点以后,材料又恢复了抵抗变形的能力,要使它继续变形必须增加拉力,在材料的屈服阶段或强化阶段卸载,

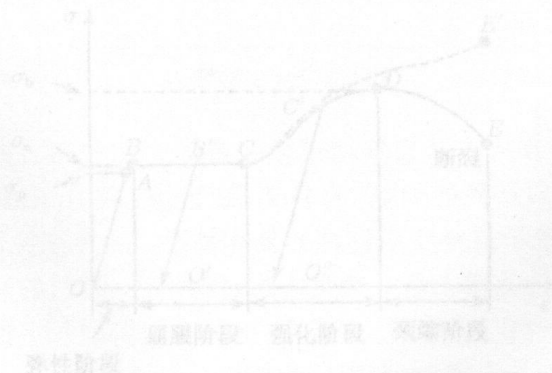


图 1-1 应力-应变曲线的基本特征

第 1 章 管道失效判据

管道的失效是由外部载荷的作用所致,作用在管道上的载荷复杂多样,如功能载荷、环境载荷、安装载荷和偶然载荷等,按其作用方式划分为载荷控制(结构响应主要由所施加的力引起)和位移控制(结构响应主要由所施加的位移引起)两种。一般来讲,管道在外力的作用下,当应力或应变达到某一临界值时,即发生失效。合理确定管道失效时的应力或应变的临界值,需要研究管道在外力作用下的力学行为。根据是取应力还是取应变作为衡量管道失效时的指标,分别有基于应力的失效判据和基于应变的失效判据。

1.1 管道的应力-应变曲线

认识管道在外力作用下的强度和变形方面的各种性能,首先需要了解材料应力-应变曲线的一般特征。

应力-应变曲线一般由简单拉伸试验确定,不同材料有不同的应力-应变曲线,但是它们也有一些共同的特点,典型的应力-应变曲线如图 1-1 所示,根据试件的变形发展,可以将其分为 4 个阶段^[1]: ① 弹性阶段, A 点以下,应力与应变之间的关系呈线性,从 A 点到 B 点,应力与应变之间的关系不再呈线性,但是解除拉力后变形仍可完全消失,这种变形称为弹性变形; ② 屈服阶段,当应力超过 B 点,应变有明显的增加,出现了近似水平的线段, B 点到 C 点这种应力基本保持不变,而应变显著增加的现象,称为屈服或流动; ③ 强化阶段, C 点以后,材料又恢复了抵抗变形的能力,要使它继续变形必须增加拉力,在材料的屈服阶段或强化阶段卸载,在材料的屈服阶段或强化阶段卸载,

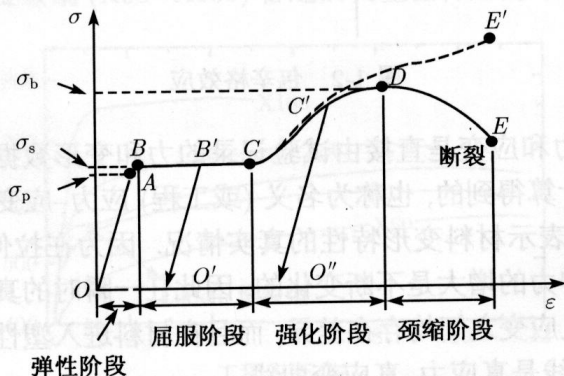


图 1-1 应力-应变曲线的基本特征

卸载线 $B'O'$ 或 $C'O''$ 平行于弹性线 OA , 材料存在残余塑性变形, 如果在 O'' 点重新加载, 则加载过程仍沿 $C'O''$ 线进行, 直到 C' 点后材料才开始屈服, 即在强化阶段卸载后, 屈服极限升高; ④ 颈缩阶段, 过 D 点后, 在试样的某一局部范围内, 横向尺寸突然急剧缩小, 形成颈缩. 由于在颈缩部分横截面面积迅速减小, 使试样继续伸长, 所需要的拉力也相应减少, 试样在 E 点迅速断裂.

在材料的应力-应变曲线上, A 点对应的应力称为比例极限 σ_p , B 点对应的应力称为屈服极限或屈服强度 σ_s , D 点对应的应力称为强度极限或抗拉强度 σ_b . σ_s 和 σ_b 是衡量管材强度的两个重要指标, 此外, 还用延伸率和截面收缩率来衡量管材的延展性. 某些材料的应力-应变曲线没有明显的屈服阶段, 这时屈服极限规定用产生 0.2% 塑性应变所对应的应力来表示.

如果在试验中, 不单是全部卸去拉伸载荷, 而且在逐渐相反方向上加上压缩载荷, 如图 1-2 所示, 则反向加载荷时的屈服点对应的应力 σ'_s 小于屈服极限 σ_s , 这是由于经过拉伸塑性变形改变了材料内部的微观结构, 使得在压缩时的屈服应力有所降低; 同样, 在压缩时经过压缩塑性变形提高压缩的屈服极限后, 拉伸的屈服极限有所降低, 这种现象称为包辛格效应. 包辛格效应存在于管道的制造过程中.

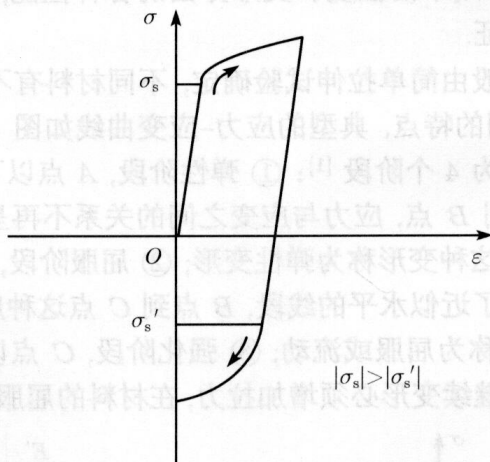


图 1-2 包辛格效应

以上所说的应力和应变是直接由试验记录的力和变形数据分别除以试样的初始横截面积和标距计算得到的, 也称为名义 (或工程) 应力-应变曲线. 但是, 名义应力-应变曲线并不能表示材料变形特性的真实情况. 因为在拉伸过程中, 试样的截面积和长度随着拉伸力的增大是不断变化的, 因此任一瞬时的真应力和真应变与相应的名义应力和名义应变之间均存在差异, 而且在材料进入塑性后这种差异更加明显, 如图 1-1 中的虚线是真应力-真应变曲线.

试件在拉伸力 F 的作用下, 假定材料的拉伸变形过程中体积不变, 即 $A_0 L_0 =$

AL , 这里 A_0 和 L_0 分别为试件的初始横截面积和标距, A 和 L 分别为试件变形过程中的实际横截面积和标距, 则真应变 ε_t 与名义应变 ε 、真应力 σ_t 和名义应力 σ 之间就有如下关系

$$\varepsilon_t = \int d\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon) \tag{1-1}$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 \frac{L_0}{L}} = \sigma(1 + \varepsilon) \tag{1-2}$$

根据以上两式, 可以由名义应力-应变曲线得到真应力-真应变曲线。

管道的应力-应变曲线由取自于管道上的试样获得, 由于在制管过程中板材轧制、卷板等机械加工产生的加工硬化与包辛格效应, 不仅导致板材的纵向和横向拉伸性能的差异, 而且沿管道的环向和轴向的性能也存在差异, 如图 1-3 中所示的 X65 管道的轴向和环向拉伸曲线。

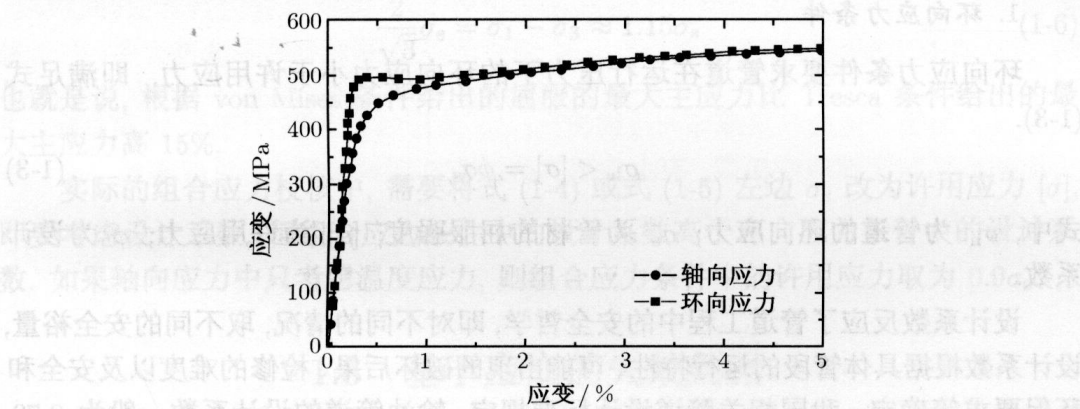


图 1-3 X65 管道的应力-应变曲线

图 1-4 是不同强度级别 (X60~X100) 管道的典型拉伸应力-应变曲线, 与普通管

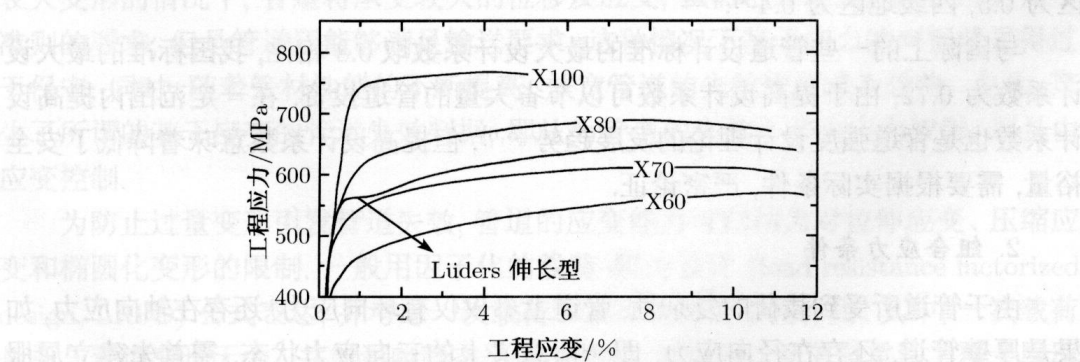


图 1-4 不同强度级别管道的典型拉伸应力-应变曲线

道相比, 现代高强度级别管线钢管具有高的屈强比 (屈服极限与强度极限之比) 和在后屈服范围内不同的应力-应变曲线形状, 这种屈服后应力与应变曲线的形状影响管道的应变能力。

管线钢管的应力-应变关系曲线还分类为 Lüders 伸长型 (有明显屈服平台) 和连续屈服型 (无明显屈服平台) 两种^[2], 如图 1-4 所示。研究表明, 有无屈服平台, 对管道的应变能力影响很大, 与具有连续屈服型应力-应变曲线的管道相比, Lüders 伸长型管道的屈曲应变能力较低。

1.2 基于应力的失效判据

管道的强度设计传统上一直遵循基于应力的判别准则, 即保证在工况条件下, 管道的最大应力应小于其屈服应力。根据要求, 管道的强度应同时满足以下两个条件。

1. 环向应力条件

环向应力条件要求管道在运行压力下的环向应力小于许用应力, 即满足式 (1-3)。

$$\sigma_h < [\sigma] = \phi \sigma_s \quad (1-3)$$

式中, σ_h 为管道的环向应力; σ_s 为管材的屈服强度; $[\sigma]$ 为许用应力; ϕ 为设计系数。

设计系数反应了管道工程中的安全哲学, 即对不同的情况, 取不同的安全裕量, 设计系数根据具体管段的运行特性、可能出现的破坏后果、检修的难度以及安全和环保要求等确定。我国相关管道设计标准规定, 输油管道的设计系数一般为 0.72, 穿跨越、站内管道另有规定^[3]; 输气管道通过的地区, 根据沿线人口或建筑物的密集程度, 划分为 4 个地区等级, 一级地区设计系数为 0.72, 二级地区为 0.6, 三级地区为 0.5, 四级地区为 0.4^[4]。

与国际上的一些管道设计标准的最大设计系数取 0.8 相比, 我国标准的最大设计系数为 0.72, 由于提高设计系数可以节省大量的管道投资, 在一定范围内提高设计系数也是管道强度设计理论的发展趋势^[5,6], 但提高设计系数意味着降低了安全裕量, 需要根据实际条件, 严密论证。

2. 组合应力条件

由于管道所受到载荷的复杂性, 管道上不仅仅有环向应力, 还存在轴向应力, 如果是厚壁管道, 还存在径向应力, 即一般意义上的三向应力状态, 需首先建立屈服条件。常用的是 Tresca 条件和 von Mises 条件。

记单元体的三个主应力为 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, Tresca 屈服条件假设最大剪应力达到极值时发生屈服, 此时的屈服条件用下式表达:

$$\sigma_{\text{Tresca}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (1-4)$$

式中, σ_s 代表单向拉伸或压缩时的屈服应力. 在 Tresca 条件下, 第二 (中间) 主应力对屈服没有作用.

von Mises 屈服条件, 也称为最大形状改变比能理论, 即认为最大形状改变比能达到一定值时发生屈服, 屈服条件的表达式为

$$\sigma_{\text{von Mises}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s \quad (1-5)$$

von Mises 条件的典型特征是第二主应力 σ_2 对屈服产生影响.

只有 σ_2 等于最大或最小主应力时式 (1-5) 才与 Tresca 条件式 (1-4) 相符, 两种屈服条件最大的差别是当 $\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ 时, 式 (1-5) 变为

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s = \sigma_1 - \sigma_3 \approx 1.15 \sigma_s \quad (1-6)$$

也就是说, 根据 von Mises 条件给出的屈服的最大主应力比 Tresca 条件给出的最大主应力高 15%.

实际的组合应力校核中, 需要将式 (1-4) 或式 (1-5) 左边 σ_s 改为许用应力 $[\sigma]$, 即要考虑设计系数, 但组合应力条件中的设计系数高于环向应力条件中的设计系数. 如果轴向应力中只考虑温度应力, 则组合应力条件中的许用应力取为 $0.9\sigma_s$.

1.3 基于应变的失效判据

长期以来, 基于应力的判据处于主导地位. 然而, 随着研究的深入与发展, 越来越多的研究表明在某些特殊工况环境下, 如冻土、地震和滑坡等地质灾害区域的地表大变形的情况下, 管道将承受较大的位移及应变, 虽然已经达到或超过应力判别准则的要求, 但是管道还能够满足输送要求, 这种情况下基于应力的判据就显得过于保守; 同时, 随着管材性能的不断提高, 放宽管道的失效判据成为趋势. 由此, 产生了所谓的基于应变的管道失效判据, 即认为管道的失效不再由应力控制, 而是由应变控制.

为防止过量变形引发管道失效, 管道的应变能力可归纳为对拉伸应变、压缩应变和椭圆化变形的限制, 一般用因子化的载荷-阻力设计 (load resistance factorized design, LRFD) 公式表达, 并考虑一次载荷和二次载荷的不同作用, 其中, 一次载荷是指与管道变形无关、并能影响静态平衡的载荷, 如内压、管道自重和上覆土层压力等; 二次载荷是指引发或阻碍管道变形的载荷, 如温度变化等.