



Y ALI GUANDAO
FUSHI YU FANGHU

压力管道腐蚀与防护

祝新伟 © 主编

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

压力管道腐蚀与防护

祝新伟 主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

压力管道腐蚀与防护/祝新伟主编. —上海:华东理工大学出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-5628-4283-5

I. ①压… II. ①祝… III. ①压力管道-管道防腐 IV. ①U177

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 110905 号

压力管道腐蚀与防护

主 编 / 祝新伟

责任编辑 / 马夫娇 花 巍

责任校对 / 李 晔

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部) (021)64251137(编辑室)

传 真:(021)64252707

网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟市新骅印刷有限公司

开 本 / 787mm×1092mm 1/16

印 张 / 22

字 数 / 555 千字

版 次 / 2015 年 7 月第 1 版

印 次 / 2015 年 7 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-4283-5

定 价 / 88.00 元

联系我们:电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

天猫旗舰店 <http://hdlgdxpbs.tmall.com>

华东理工大学出版社



用手机扫描进入天猫旗舰店

序

管道运输作为五大运输方式之一,已经有上百年的历史了,为迎合市场对能源的需求,管道事业的发展势头蒸蒸日上。管道的功用在于输送、分配、混合、分离、排放、计量、控制和截止流体流动,它由管道组成件和管道支承件组成。压力管道属于管道的一部分,是指由管道组成件、管道支承件、安全保护装置和附属设施等组成的系统。压力管道内或管外承受压力,其内部输送的介质是“气体、液化气体和蒸汽”或“可能引起燃爆、中毒或腐蚀的液体”。国务院颁布的《特种设备安全监察条例》明确规定:压力管道和锅炉、压力容器、起重机械为不安全因素较多的特种设备。

伴随着技术的进步,压力管道使用的范围越来越广,而其压力、温度、介质的危害性也在增大。压力管道如若发生爆炸、泄漏都易引发灾难性事故。压力管道的腐蚀是管道泄漏失效的关键因素之一,由压力管道泄漏引起的恶性突发事件,往往造成巨大的经济损失、环境污染和严重的社会后果。

压力管道腐蚀是长期存在的一种现象,它是由于受到内部输送物料及外部环境介质的化学或电化学反应(也包括机械等因素的共同作用)而产生的。特别是化学工业,因其介质腐蚀性强,并常常伴有高温、高压、磨损等,最易发生管道腐蚀导致的泄漏事故。我国的管道投产1~2年后即发生腐蚀穿孔的现象屡见不鲜。因此,压力管道的腐蚀与防护是一个非常重要的课题。

为了更有效地控制腐蚀,延长管道的使用寿命,提高工业生产安全性保障广大人民群众生命安全,本文系统而全面地介绍了压力管道的腐蚀机理、腐蚀种类、腐蚀现状以及腐蚀防护措施。这些内容都是当前国内外压力管道腐蚀与防护领域科研人员一直在研究的重点课题。

本书作者根据国内外有关压力管道腐蚀与防护的最新进展,从理论与实践相结合的角度,总结了压力管道各种腐蚀破坏形态,包括全面腐蚀、局部腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、氢损伤、磨损腐蚀、环境腐蚀等,并提出了抑制与消除各种腐蚀的途径和措施,为减少因压力管道腐蚀而造成的事故提供了解决问题的基础知识。作者长期从事压力管道的检验检测与腐蚀防护新技术研究工作,在长期实践经验的基础上进行了系统的理论总结。该书内容丰富,重点突出,并给出了各种类型的腐蚀失效案例,不仅具有典型性,而且数据非常详尽,具有很高的参考价值。随着2014年1月1日《特种设备安全法》的正式实施,本书的编著和出版更凸显出重要意义。

本书具有很强的实用性,适合从事压力管道领域工作的工程技术人员、研究人员和大专院校相关专业学生阅读,相信会对广大读者有所裨益。



2014年10月28日

于中国特种设备检测研究院

前 言

压力管道大量应用于化工、石油、电力、核工业、城市燃气和供热等领域。在压力管道中的流体介质往往具有爆炸危险性、毒性或环境破坏性,一旦破裂泄漏将会造成人员伤亡、财产损失、环境污染等巨大损失。根据对历年来发生的各类工业管道泄漏事故的研究分析总结发现,由各类腐蚀所造成的事故比例很高,约占总体的60%。因此研究探讨压力管道腐蚀与防护有关的机理和应用技术是一件迫切的且有重大实际意义的课题。

本书对压力管道腐蚀的基础理论最新研究成果进行了总结,对相关的腐蚀形态和机理进行了详细介绍,进而对各种腐蚀控制和防护技术以及相关的腐蚀监测和检测技术进行了针对性的讲解。另外,还结合具体案例对工业中各类典型压力管道的腐蚀失效进行了分析。

编著者编写此书的目的是使在压力管道腐蚀与防护第一线工作的工程技术人员能够全面了解有关压力管道腐蚀与防护的最新理论与实践知识,以期对这项工作有所促进,并有效减少因管道腐蚀造成的人员伤亡和经济损失。

本书由祝新伟策划并主编,具体编写分工为:第1章由祝新伟、李云编写,第2章由潘金平、王春雷编写,第3章由谭连江、张荣泉编写,第4章由程宏辉、张敬尧编写,第5章由张红星、蒋腾波编写,第6章由沈美华、廖富荣编写,第7章由郭演星、高洪阳编写,第8章由祝新伟、李勇编写。全书由祝新伟统稿。在本书的编著过程中,中国特种设备检测研究院沈功田副院长、胡斌博士、杨柯研究员、季诚昌教授、沈黎教授级高工等均提出了许多宝贵意见。另外还有许多国内同仁对本书的形成提供了帮助,由于篇幅有限,不能全部列出,在此一并表示感谢。

由于时间仓促和编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评、指正。

编 者

2014年9月

目 录

第 1 章 压力管道概述	1
1.1 压力管道的定义和分类(级)	1
1.1.1 压力管道的定义	1
1.1.2 压力管道的分类(级)	2
1.2 压力管道的特点	6
1.3 压力管道的安全形势及安全监察体制	7
1.3.1 压力管道的安全形势	7
1.3.2 国内压力管道的安全监察体制	11
1.4 压力管道腐蚀的定义及危害	14
1.4.1 金属腐蚀概述	14
1.4.2 压力管道的腐蚀及危害	15
1.5 压力管道用材料	16
1.5.1 金属材料的基础知识	16
1.5.2 黑色金属	26
1.5.3 有色金属	32
1.5.4 型钢	33
1.5.5 压力管道工程常用金属材料的基本限制条件	35
第 2 章 压力管道腐蚀的理论基础	40
2.1 物理腐蚀	40
2.1.1 固态金属材料在液态金属中的腐蚀	40
2.1.2 固态金属材料在熔融盐中的腐蚀	42
2.2 化学腐蚀	43
2.2.1 气体腐蚀	44
2.2.2 金属在非电解质溶液中的腐蚀	44
2.3 电化学腐蚀	45
2.3.1 电化学腐蚀概述	45
2.3.2 电极和电极电位	48
2.3.3 腐蚀原电池	54
2.3.4 电化学腐蚀热力学	65
2.3.5 电化学腐蚀动力学	72
2.3.6 去极化作用	80
2.3.7 金属的钝化	81

第3章 压力管道腐蚀形态与机理	84
3.1 材料腐蚀的分类	84
3.1.1 按照腐蚀形态分类	84
3.1.2 按照腐蚀反应机理分类	85
3.1.3 按照腐蚀的环境分类	86
3.2 全面腐蚀	87
3.3 局部腐蚀	88
3.3.1 点蚀	89
3.3.2 缝隙腐蚀	93
3.3.3 选择性腐蚀	96
3.3.4 晶间腐蚀	98
3.3.5 磨损腐蚀	102
3.3.6 电偶腐蚀	104
3.4 应力腐蚀	106
3.4.1 应力腐蚀的概念	106
3.4.2 应力腐蚀发生的基本条件和特征	106
3.4.3 应力腐蚀的影响因素	107
3.4.4 应力腐蚀破裂的机理	108
3.4.5 应力腐蚀的控制	108
3.5 腐蚀疲劳	109
3.5.1 疲劳和腐蚀疲劳	109
3.5.2 腐蚀疲劳的特征	110
3.5.3 腐蚀疲劳的机理	110
3.5.4 影响腐蚀疲劳的因素	111
3.5.5 腐蚀疲劳的控制措施	111
3.6 氢损伤	112
3.6.1 氢损伤的定义及其发展	112
3.6.2 氢损伤的分类	112
3.6.3 氢鼓泡	113
3.6.4 氢脆	114
3.6.5 脱碳	116
3.6.6 氢腐蚀	116
3.7 环境腐蚀	117
3.7.1 大气腐蚀	118
3.7.2 淡水腐蚀	118
3.7.3 海水腐蚀	119
3.7.4 土壤腐蚀	120
3.7.5 微生物腐蚀	121
3.7.6 硫化氢腐蚀	121
3.7.7 高温腐蚀	122

第4章 压力管道防腐蚀设计	123
4.1 防腐蚀设计的基本内容	123
4.1.1 防腐蚀设计的意义	123
4.1.2 防腐蚀设计的内容	124
4.1.3 防腐蚀设计的现状及发展趋势	125
4.2 防腐蚀材料的选择	126
4.2.1 防腐蚀材料的选择原则	126
4.2.2 防腐蚀材料的选择步骤	128
4.2.3 腐蚀介质的类别及选材	130
4.2.4 金属材料及其耐蚀性	131
4.2.5 常用金属材料及其腐蚀	133
4.3 防腐蚀结构设计	142
4.3.1 电偶腐蚀的防止	143
4.3.2 缝隙腐蚀的防止	145
4.3.3 磨损腐蚀的防止	146
4.3.4 热电池腐蚀和冷凝液腐蚀的防止	148
4.3.5 其他类型腐蚀的防止	150
4.4 防腐蚀强度设计	158
4.4.1 对于全面腐蚀的腐蚀裕度的确定	159
4.4.2 对应力腐蚀破裂的考虑	162
4.5 对制造安装及检修的要求	162
4.5.1 焊接要求	163
4.5.2 热处理要求	163
4.5.3 检修要求	164
第5章 压力管道腐蚀失效具体案例分析	165
5.1 电力工业中压力管道腐蚀失效案例分析	165
5.1.1 电站锅炉系统简介	169
5.1.2 电站锅炉系统压力管道腐蚀	170
5.1.3 水冷壁管腐蚀失效案例分析	186
5.1.4 过热器管腐蚀失效案例分析	187
5.1.5 再热器管腐蚀失效及案例分析	195
5.2 油气生产及输运过程压力管道的腐蚀失效及案例分析	199
5.2.1 酸性条件下的油气生产及输运过程压力管道的腐蚀失效	200
5.2.2 油气生产及输送过程中管线材料的腐蚀与防护概述	206
5.2.3 天然气工业管道腐蚀失效案例分析	206
5.2.4 石油工业管道腐蚀失效案例分析	212
5.2.5 煤气输送管道腐蚀失效案例分析	225
5.3 化工生产中的压力管道腐蚀失效案例分析	228
5.3.1 化工生产中管线材料的腐蚀与防护概述	228

5.3.2	化工管道腐蚀失效案例分析	229
第 6 章	压力管道的腐蚀防护	237
6.1	压力管道的腐蚀防护概述	237
6.2	压力管道的腐蚀防护措施	237
6.2.1	正确选材与合理的结构设计	239
6.2.2	电化学保护	240
6.2.3	缓蚀剂保护	263
6.2.4	自组装膜技术	283
6.2.5	热喷涂技术	285
6.2.6	电镀	287
第 7 章	压力管道腐蚀监测技术	309
7.1	警戒孔监视	310
7.2	挂片法	310
7.3	电阻法	310
7.4	氢压法	311
7.5	线性极化电阻法	317
7.6	交流阻抗法(EIS)	317
7.7	腐蚀电位法	318
7.8	无损检(监)测法	318
7.9	电偶法	319
7.10	化学分析法	320
7.11	氢渗透法	320
第 8 章	压力管道腐蚀检测技术	322
8.1	变频选频技术	322
8.2	直流电压梯度技术	323
8.3	密间隔电位检测技术	324
8.4	管地电位检测技术	326
8.5	多频管中电流法(PCM 法)	327
8.6	漏磁检测技术	328
8.7	导波检测技术	329
8.8	C 扫描技术	331
8.9	CCTV 摄像技术	332
8.10	涡流检测技术	332
8.11	瞬变电磁检测技术	333
8.12	人体电容检测技术	334
参考文献	335	

第 1 章 压力管道概述

1.1 压力管道的定义和分类(级)

1.1.1 压力管道的定义

管道(Piping)作为五大运输方式之一,已经有上百年的历史了,为迎合市场对能源的需求,管输事业的发展势头蒸蒸日上。到目前为止,世界范围内长距离输送管道已达 200 万千米以上。管道的功能在于输送、分配、混合、分离、排放、计量、控制和截止流体流动,它由管道组成件和管道支承件组成。管道组成件是用于连接或装配管道的元件,包括管子(Pipe)、管件、法兰、螺栓连接、垫片、阀门以及管道特殊件等设施。管道支承件(Pipe-supporting Elements)则包括了管道安装件和附着件:安装件(Fixtures)是将负荷从管子或管道附着件上传递到支承结构或设备上的元件,包括吊杆、弹簧支吊架、斜拉杆、平衡锤、松紧螺栓、支撑杆、链条、导轨、锚固件、鞍座、垫板、滚柱、托座以及滑动支架等;而附着件(Structural Attachments)则是采用焊接或螺栓连接等方法附装在管子上的,如管吊、吊(支)耳、圆环、夹子、吊夹、紧固夹板、裙式管座等零件。

压力管道(Pressure Piping,图 1-1)属于管道中的一部分,是指由管道组成件、管道支承件、安全保护装置和附属设施等组成的系统。其中压力管道主要元件包括管子、管件、法兰、阀门、补偿器、阻火器密封件、支吊架等;安全保护装置包括安全阀、压力表、爆破片、紧急切断阀等;附属设施包括阴极保护装置、压气站、泵站、阀站、调压站、监控系统等。

广义的压力管道是指所有承受内压或外压的管道,无论其管内介质如何。自我国颁布《压力管道安全管理与监察规定》以来,“压力管道”就成为了受监察管道的专用名词。《压力管道安全管理与监察规定》第二条将压力管道定义为:“在生产、生活中使用的可能引起燃爆或中毒等危险性较大的特种设备”。2009 年 5 月 1 日,国务院颁发实施了《特种设备安全监察条例》(以下简称《条例》),在《条例》中进一步明确压力管道是“利用一定的压力,用于输送气体或者液体的管状设备,其范围规定为最高工作压力大于或者等于 0.1MPa(表压)的气体、液化气体、蒸汽介质,或者可燃、易爆、有毒、有腐蚀性、最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体介质,且公称直径大于 25

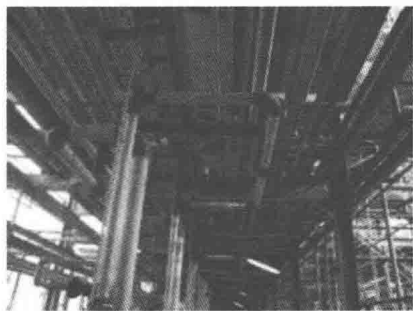


图 1-1 压力管道

mm 的管道”。据此,准确来说,压力管道是这样一种设备:其管内或管外承受压力,其内部输送的介质是“气体、液化气体和蒸汽”或“可能引起燃爆、中毒或腐蚀的液体”。

伴随着技术的进步,压力管道使用的范围越来越广,而其压力、温度、介质的危害性也在增大。压力管道如若发生爆炸、泄漏都易引发灾难性事故。据有关部门统计,事故起数呈逐年递增的趋势,这些都说明了压力管道监察的必要性。虽然目前压力管道的监察仍存在无统一标准体系、安全质量控制不到位、底数不清等缺陷,使其较复杂且工作难度较大,但压力管道监察业已成为发达工业国家的通行做法。1995 年,我国原劳动部将压力管道纳入安全监察范围,次年颁布《压力管道安全管理与监察规定》,并积极开展专项普查工作:

- (1) 查清压力管道的分布和数量;
- (2) 督促使用单位建章建制,落实安全管理制度,落实使用单位安全管理责任;
- (3) 对具备条件的工业管道,在全面检验的基础上,核实其安全状况等级。

需要说明的是,在《压力管道安全管理与监察规定》中还指出了不属于监察范围的压力管道:

- (1) 设备本体所属管道;
- (2) 军事装备、交通工具和核装置中的管道;
- (3) 无毒、不可燃、无腐蚀性的气体,公称直径小于 150 mm 且工作压力小于 1.6MPa 的管道;
- (4) 入户前的最后一道阀门之后的生活用燃气管道,以及热力点之后的热力管道。

1.1.2 压力管道的分类(级)

压力管道的分类(级)方法很多,在进行压力管道设计或压力管道的防腐蚀设计时尤其应区分清楚,而且压力管道的分类(级)方法并非一成不变,它可能会随着压力管道设计标准规范的更新而不断变化。

1. 压力管道常见分类依据

(1) 按材料分类

按照材料分类,压力管道分为金属管道和非金属管道两大类。其中金属管道又可细分为铸铁管道、碳钢管道、合金钢管道、不锈钢管道和有色金属管道;而非金属管道则有塑料管道、混凝土管道、陶瓷管道、玻璃管道,以及金属与非金属复合管道。

(2) 按敷设位置分类

这种分类方法包括三种管道:架空及地面敷设管道、地沟敷设管道和埋地管道。

(3) 按介质分类

① 按介质压力分为:超高压管道($>42\text{MPa}$)、高压管道($42\sim10\text{MPa}$)、中压管道($10\sim1.6\text{MPa}$)、低压管道($<1.6\text{MPa}$)和真空管道。

② 按介质温度分为:高温管道($>200^{\circ}\text{C}$)、常温管道($-29\sim200^{\circ}\text{C}$)和低温管道($<-29^{\circ}\text{C}$)。

③ 按介质毒性分为:剧毒管道(极度危害)、有毒管道(非极度危害)和无毒管道。

④ 按介质可燃性分为:可燃介质管道和非可燃介质管道两种。

⑤ 按介质腐蚀性分为:腐蚀性介质管道和非腐蚀性介质管道两类。

(4) 按用途分类

在《压力管道安全管理与监察规定》中,将压力管道按用途划分为三大类:长输管道、公用

管道和工业管道,表 1-1 列出了各类管道输送介质的特征及其设计条件。

表 1-1 压力管道的类别、输送介质特征及设计条件

管道类别		输送介质特征和设计条件
GA (长输管道)	GA1	1. 有毒、可燃、易爆气体,设计压力 $p > 1.6\text{MPa}$
		2. 有毒、可燃、易爆气体,输送距离 ^① $\geq 200\text{ km}$ 且 $\text{DN} \geq 300\text{ mm}$
		3. 浆体,输送距离 $\geq 50\text{ km}$ 且 $\text{DN} \geq 150\text{ mm}$
	GA2	1. 有毒、可燃、易爆气体,设计压力 $p \leq 1.6\text{MPa}$
		2. GA12.范围以外的
		3. GA13.范围以外的
GB (公用管道)	GB1	燃气
	GB2	热力
GC (工业管道)	GC1	1. 毒性程度为极度危害介质 ^②
		2. 甲、乙类可燃气体或甲类液体 ^③ ,且设计压力 $p \geq 4.0\text{MPa}$
		3. 可燃流体、有毒流体,设计压力 $p \geq 4.0\text{MPa}$,且设计温度 $T \geq 400^\circ\text{C}$
		4. 流体,且设计压力 $p \geq 10.0\text{MPa}$
	GC2	1. 甲、乙类可燃气体或甲类液体,且设计压力 $p < 4.0\text{MPa}$
		2. 可燃流体、有毒流体,设计压力 $p < 4.0\text{MPa}$,且设计温度 $T \geq 400^\circ\text{C}$
		3. 非可燃流体、有毒流体,设计压力 $p < 10.0\text{MPa}$,且设计温度 $T \geq 400^\circ\text{C}$
		4. 流体,设计压力 $p < 10.0\text{MPa}$,且设计温度 $T < 400^\circ\text{C}$

① 输送距离指产地、储存库、用户间的用于输送商品介质的管道的直接距离;
② GB 5044—1985《职业性接触毒物危害程度分级》规定的;
③ GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》规定的。

长输管道(GA):产地、储存库、使用单位间用于输送商品介质(油、气等),并跨省、市,穿、跨越江河、道路等,中间有加压泵站的长距离(一般大于 50 千米)管道。地域特性是跨地区(跨省、跨地市)使用。

公用管道(GB):城市、乡镇、工业厂矿生活区范围内用于公用事业或民用的燃气管道和热力管道。地域特性是在一个城市或乡镇范围内使用。

工业管道(GC):企业、事业单位所属的用于输送工艺介质的工艺管道、公用工程管道及其他辅助管道。地域特性是在一个企业或事业单位内使用。

2. 压力管道级别划分

(1) 美国国家压力管道标准的管道分级(类)

美国管道规范属 ASME B31,它包括以下七部单独出版的压力管道美国国家标准:

- ① ASME B31.1-2012《动力管道(Power Piping)》
- ② ASME B31.3-2012《工艺管道(Process Piping)》
- ③ ASME B31.4-2012《液态烃和其他液体管道输送系统(Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids)》
- ④ ASME B31.5-2013《制冷管道(Refrigeration Piping)》
- ⑤ ASME B31.8-2012《输气和配气管道系统(Gas Transportation and Distribution)

Piping Systems)》

⑥ ASME B31.9 - 2011《建筑管道(Building Services Piping)》

⑦ ASME B31.11 ASME B31.4 - 2012《浆液管道输送系统(Slurry Transportation Piping Systems)》

以上每部标准均为包括了设计、材料、管道组件限制、制作、装配、安装、检查、检验和试验等内容的完整的综合性标准。其中 ASME B31.3 - 2012《工艺管道》内容涉及化工和石油化工等行业的管道,该标准最初由美国标准协会(ASA)组织编制,首版标准(《美国试行标准——压力管道规范》)于 1935 年面世,1942 年正式以标准号 ASA B31.1 出版,1995 年为适应不同行业要求,决定单独出版不同行业的压力管道规范,这直接导致了以上几部标准的出版。

美国国家标准 ASME 压力管道规范 ASME B31.3 - 2012 根据被输送流体的性质和泄漏时造成的后果,将化工厂和炼油厂管道输送的流体分为 D 类、M 类、高压和常规四类流体工况:

① D 类:不易燃、无毒、并且在规定操作条件下对人类机体无害;设计压力不大于 1 035kPa(150psi 或 1.05MPa);设计温度在 $-29(-20) \sim 186^{\circ}\text{C}(366^{\circ}\text{F})$ 之间。

② M 类:有剧毒,在输送过程中如有较少量泄漏到环境中,被人吸入或与人体接触时能造成严重的和难以治疗的伤害,即使迅速采取措施也无法挽救。

③ 高压:按 ASME 标准的高压管道进行设计和建造的工况。

④ 常规:不受 D 类、M 类或高压流体工况管辖的管道。

(2)《工业金属管道设计规范》的管道分级(类)

GB 50316—2000《工业金属管道设计规范》(2008 版)按照所输送流体的性质和泄漏时造成的后果,将管道分为 A1、A2、B、D 和 C 五类流体管道:

① A1 类流体管道:此类流体是指剧毒流体,在输送过程中如有极少量的流体泄漏到环境中,被人吸入或与人体接触,能造成严重中毒,脱离接触后,不能治愈。

② A2 类流体管道:此类流体是指有毒流体,接触后将有不同程度的中毒,脱离接触后可治愈。

③ B 类流体管道:该类流体在环境或操作条件下是一种气体或可闪蒸产生气体的液体,可点燃并在空气中连续燃烧。

④ D 类流体管道:不可燃、无毒、设计压力小于或等于 1.0MPa,且设计温度在 $-20 \sim 186^{\circ}\text{C}$ 之间的流体属于此类。

⑤ C 类流体管道:C 类流体是指不包括 D 类流体的不可燃、无毒的流体。

(3)《化工金属管道工程施工及验收规范》的管道分级(类)

《化工金属管道工程施工及验收规范》(HG 20225—95)将化工行业金属管道按照管道所输送的介质分为 A(输送剧毒介质的管道)、B(输送可燃介质或有毒介质的管道)、C 和 D(输送非可燃介质、无毒介质的管道,其中设计压力小于或等于 1MPa,且设计温度为 $-29 \sim 186^{\circ}\text{C}$ 的管道为 D 类管道)四类。

(4)《石油化工管道设计器材选用通则》的管道分级(类)

《石油化工管道设计器材选用通则》(SH/T 3059—2012)对输送有毒、可燃介质管道的分级见表 1-2。

表 1-2 《石油化工管道设计器材选用通则》管道分级

管道级别	适用范围
SHA	1. 毒性程度为极度危害介质管道(苯管道除外)
	2. 毒性程度为高度危害介质的丙烯腈、光气、二硫化碳和氟化氢介质管道
	3. 设计压力大于或等于 10.0MPa 的介质管道
SHB	1. 毒性程度为极度危害介质的苯管道
	2. 毒性程度为高度危害介质管道(丙烯腈、光气、二硫化碳、氟化氢介质除外)
	3. 甲类、乙类可燃气体和甲 A 类液化烃、甲 B 类、乙 A 类可燃液体介质管道
SHC	1. 毒性程度为中度、轻度危害介质管道
	2. 乙 B 类、丙类可燃液体介质管道
SHD	设计温度低于-29℃的低温管道
SHE	设计压力小于 10.0MPa,且设计温度不低于-29℃的无毒、非可燃介质管道

注:1. 毒性程度是根据《职业性接触毒物危害程度分级》(GB 5044—1985)划分的。极度危害属于Ⅰ级,车间空气中有毒物质最高容许浓度 $<0.1\text{ mg/m}^3$;高度危害属于Ⅱ级,最高容许浓度 0.1 mg/m^3 。极度危害(Ⅰ级)的介质如汞及其化合物、苯、砷及其无机化合物、氯乙烯、氯甲醚、锰及其无机化合物、氰化物等;高度危害(Ⅱ级)的介质如三硝基甲苯、铅及其化合物、二硫化碳、氯、丙烯腈、硫化氢、甲醛、氟化氢、镉及其化合物、氯丙烯、溴甲烷、金属镍、敌敌畏、光气、一氧化碳等;中度危害(Ⅲ级)的介质如苯乙烯、甲醇、硝酸、硫酸、盐酸、甲苯、三氯乙烯、苯酚、氮氧化物等;轻度危害(Ⅳ级)的介质如溶剂汽油、丙酮、氢氧化钠、四氯乙烯、氨等。常用有毒介质按危害程度的分类详见 GB 5044—1985。

2. 甲类、乙类可燃气体是根据《石油化工企业设计防火规范》(GB 50160—2008)中可燃气体的火灾危险性分类划分的。甲类是指可燃气体与空气混合物的爆炸下限 $<10\%$ (体积);乙类是指可燃气体与空气混合物的爆炸下限 $\geq 10\%$ (体积)。甲类可燃气体如乙炔、环氧乙烷、氢气、合成气、硫化氢、乙烯、丙烯、丁烯、甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、甲醛、甲醚、氯乙烯等,乙类可燃气体如一氧化碳、氨、溴甲烷等。详见 GB 50160—2008。

3. 可燃气体、液化烃、可燃液体的火灾危险性分类是根据 GB 50160—2008 确定的,见表 1-3。
4. 混合物料应以其主导物料作为分级依据。
5. 当操作温度超过其闪点的乙类液体,应视为甲 B 类液体;当操作温度超过其闪点的丙类液体,应视为乙 A 类液体。

表 1-3 可燃气体、液化烃、可燃液体的火灾危险性分类

类别		名称	特征	举例
甲	A	液化烃	15℃时的蒸气压力>0.1MPa 的烃类液体及其他类似的液体	液化石油气、液化天然气、液化甲烷、液化丙烷等
	B	可燃液体	甲 A 类以外、闪点<28℃	汽油、戊烷、二硫化碳、石油醚原油等
乙	A		28℃≤闪点≤45℃	喷气燃料、煤油、丙苯、苯乙烯等
	B		45℃≤闪点≤60℃	—35 号轻柴油、环戊烷等
丙	A		60℃≤闪点≤120℃	轻柴油、重柴油、20 号重油、锭子油等
	B		闪点≥120℃	蜡油、100 号重油、油渣、润滑油、变压器油等
甲		可燃气体	可燃气体与空气混合物的爆炸下限<10%(体积)	
乙			可燃气体与空气混合物的爆炸下限≥10%(体积)	

表 1-2 中的 SHA、SHB 以及 SHC 级主要是按照 GB 5044—1985《职业性接触毒物危害程度分级》和 GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》的规定进行划分的。SHA 级主要用于极度危害介质管道,其中 GB 5044 中虽然规定苯是极度危害介质,但根据石油化工生

产的特点将其并入 SHB 级,同时将 GB 5044 中规定的高度危害介质二硫化碳、丙烯腈、氟化氢和光气并入 SHA 级。SHE 级为无毒、非可燃介质管道,而 SHD 级则包括了有毒、可燃介质低温管道和无毒、非可燃介质低温管道。

(5)《石油化工有毒、可燃介质管道工程施工及验收规范》的管道分级(类)

SH 3501—2011《石油化工有毒、可燃介质管道工程施工及验收规范》的管道分级见表 1-4。

表 1-4 《石油化工有毒、可燃介质管道工程施工及验收规范》管道分级

管道级别	适用范围
SHA	1. 毒性程度为极度危害介质管道(苯管道除外) 2. 毒性程度为高度危害介质的丙烯腈、光气、二硫化碳和氟化氢介质管道 3. 设计压力大于或等于 10.0MPa 输送有毒、可燃介质管道
SHB	1. 毒性程度为极度危害介质的苯管道 2. 毒性程度为高度危害介质管道(丙烯腈、光气、二硫化碳和氟化氢管道除外) 3. 甲类、乙类可燃气体和甲 A 类液化烃及甲 B 类、乙 A 类可燃液体介质管道
SHC	1. 毒性程度为中度、轻度危害介质管道 2. 乙 B 类、丙类可燃液体介质管道
SHD	设计温度低于-29℃的低温管道

(6)《电力建设施工及验收技术规范》的管道分级(类)

电力行业标准《电力建设施工及验收技术规范》(管道篇)DL 5190.5—2012 按设计压力分为高压、中压和低压三级管道。设计压力 $>8\text{MPa}$ 的为高压管道; $1.6\text{MPa}<\text{设计压力}\leq 8\text{MPa}$ 的为中压管道;设计压力 $\leq 1.6\text{MPa}$ 的为低压管道。注意,再热冷段和热段管道被视为高压管道。

1.2 压力管道的特点

国务院颁布的《特种设备安全监察条例》明确规定,压力管道和锅炉、压力容器、起重机械并列为不安全因素较多的特种设备。压力管道主要具有以下几个特点:

(1) 压力管道是一个系统,相互关联相互影响,牵一发而动全身。

(2) 压力管道长径比很大,跨越空间大,边界条件复杂,极易失稳,受力情况也比压力容器更复杂。压力管道内流体流动状态复杂,缓冲余地小,工作条件变化频率比压力容器高(如高温、高压、低温、低压、位移变形、风、雪、地震等都有可能影响压力管道受力情况)。

(3) 管道组成件和管道支承件的种类繁多,各种材料各有特点和具体技术要求,材料应用种类多,选用复杂。

(4) 管道上的可能泄漏点多于压力容器,仅一个阀门通常就有五处,从而要求投入更多的管理与监察。

(5) 压力管道种类多,数量大,标准多,设计、制造、安装、检验、应用、管理环节多,与压力容器大不相同。

- (6) 布置方式多样,现场安装条件差,工作量大。
- (7) 失效的模式多样,失效概率大。
- (8) 检验难度大。
- (9) 管道及其元件生产厂的生产规模较小,产品质量难以得到保证。

1.3 压力管道的安全形势及安全监察体制

1.3.1 压力管道的安全形势

1. 概况

国际上将管道运输与铁路、公路、水运、航空运输并列称为五大运输方式。压力管道是在一定温度和压力下,用于运输流体介质的特种设备,它广泛应用于石油化工、冶金、电力等行业生产以及城市燃气和供热系统等公众生活之中。压力管道中的流体介质往往是具有爆炸危险性、毒性或对环境有破坏性的,一旦泄漏将会造成人员伤亡、财产损失、环境污染和巨大的经济损失,有时甚至会严重影响人们的生活。随着工业生产的发展及城市燃气和热力管网的普及,各类管道的数量不断增加,特别是运输可燃、易爆及对人体和环境有害的介质的压力管道的数量逐年递增,这些因素都增大了事故发生的可能性。

鉴于压力管道的特点和在社会、经济生活中特殊的重要性,其安全问题早已受到我国安全监察机构的重视。早在1989年,原劳动部职业安全卫生与锅炉压力容器安全监察局就已组织有关单位开展了三年的调查活动,调查结果表明:压力管道的安全管理应以法相治,在我国开展压力管道的安全监察是完全必要的。通过强制性的国家监察,将压力管道作为特种设备(如锅炉压力容器),指定专门机构负责压力管道的安全监察工作,并制定一系列的法规、规范和标准,供从事压力管道设计、制造、安装、使用、检验、修理、改造各方面的工作人员共同遵循,并监督各环节对规范的执行情况,从而形成压力管道安全监察或监督管理体制,最终目的是将压力管道事故的发生率控制到最低程度。

2. 我国压力管道安全形势

压力管道的应用范围非常广泛,在石油、化工、能源、航空、制药、公用工程等各行各业中都有不同程度的应用。长期以来,由于对压力管道安全管理工作的认识尚浅,多年来一直处于部门分割管理的状态,至今还未形成一个完善的压力管道安全管理体系。由于在各行业使用的压力管道所输送的介质不同、工作压力和工作温度不同、在生产环节中所处的位置不同、管理技术队伍的素质不同,因此安全技术管理水平差异很大。相对于锅炉、压力容器等而言,压力管道的安全管理在法律、法规、标准规范的建设方面都不够完善,各行业设计、制造、安装、检验、运行管理等各环节自成体系,自行制定了一些行业标准,将除长输管道和城市燃气管道以外的压力管道,从属于压力容器一并管理,有些企业的压力管道管理处于从属位置甚至处于有机构无人员的状态。市场经济的发展促使企业自主性加强的同时,导致主管部门对企业的约束力减弱,很多企业都不同程度地存在着疏于管理的现象。

下面以压力管道比较集中的行业,如化工、石化、电力、冶金系统、城市燃气管道、石油天然

气运输管道为例,分析我国压力管道的安全形势,这些行业中压力管道的使用、管理情况基本可以反映我国压力管道的安全状况。

(1) 化工系统 化工系统使用的大量压力管道的工作条件各不相同:工作压力可从真空、负压直至 300MPa 以上的高压、超高压变化;工作温度可由 -200°C 以下至 $1\,000^{\circ}\text{C}$ 以上变化;许多输送的流体介质有毒、易燃、易爆。而很多化工企业规模小、职工技术素质低、管理方式落后、压力管道安全管理不正规,很少进行定期安全检测,仅对高压管道有较为严格的管理规定;许多厂是利用已设置的锅炉、压力容器检验站来兼顾压力管道的检验工作;一些小型企业对压力管道的管理较混乱,这些都成为化工系统内压力管道使用的极大隐患。1995 年原化工部在总结以往压力管道安全管理经验教训的基础上,颁布了《化工企业压力管道管理规定》和《化工企业压力管道检验规程》,将压力管道按承受压力、温度和管内介质特性进行了分类管理,此举对化工系统压力管道安全管理正规化、科学化起到了积极作用。

(2) 石化系统 中国石化总公司所属的现代化大型企业拥有 I、II、III 类管道达 6 300 km 以上,管内介质或高温、高压或易燃易爆、有毒有害,工作压力最高可达 300MPa 以上,且装置基本都具有技术密集、规模大、连续化生产等特点。石化总公司作为新建制单位,起点高,对安全生产比较重视:总公司于 1985 年颁发《工业管道维护检修规程》和《工业管道技术管理制度》,1992 年又修订了《工业管道维护检修规程》;按规程对 I、II、III 类管道建立技术档案,建档率达 88% 以上;部分单位对压力管道安全管理工作要求非常严格,已经做到一管一档,记录了每条管道的设计、制造、安装、使用、维修和定期检验、变更和改造全部资料,形成完整的管道技术状况历史档案资料;石化企业“三老四严”的传统作风形成了包括岗位责任制、巡回检查制、安全生产制、设备维护保养制等一系列生产管理制度及经济责任制考核办法和细则,使压力管道安全管理做到规范化;所属大部分企业建有锅炉压力容器检验站,对压力管道实行一年一次的外部检验和六年一次的全面检验,定期检验率一般可达 70% 左右。近年来,我国科技发展迅速,但仍存在一些问题,如管件的制造质量、管道的安装质量、运行管理人员的素质参差不齐,管道的检修周期长,检修项目与检修时间的矛盾突出,检修质量常存在一些问题尤其是焊接质量问题(有的企业焊接缺陷占总缺陷数的 80%,有的单位检验后发现焊缝合格率只有 20%~30%),在这种形势下,加强压力管道安全管理工作的任务仍然十分紧迫和繁重。

(3) 电力系统 电力系统对高压、超高压蒸汽管道的管理历来较为严格:原水电部从 20 世纪六十年代开始,就对工作温度不低于 450°C 、工作压力大于 5.88MPa 的蒸汽管道和部件开展安全监察工作,并于 1983 年颁布了《火力发电厂安全技术监督规程》,对高温高压部件提出了安全要求,保证安全运行;整个电力系统的管理比较严格,设计、制造、安装均由原电力部进行资格认可,重要管道、管件从国外进口,国产管道、管件均由原电力部定点生产;在组织体系上,原电力部有锅炉压力容器安全监察委员会,各网局设锅炉压力容器检测中心、焊工培训中心,各电厂有安全监督车间和安全监督员。在上述条件的保障下,火电厂高温、高压管道事故很少,但中低压管道由于管理工作不够严格,事故相对多一些。

(4) 冶金系统 冶金系统内老企业多、运行时间长、改造次数多、管理较为混乱,其中氧气管道的危险性较大,发生的事故也较多。为此,原冶金部先后颁发了《钢铁企业氧气管网的若干技术规定》《氧气安全规程》和《冶金工业压力管道管理若干规定》,以保证氧气管网的安全运行。

(5) 城市燃气管道 改革开放以来,我国城市燃气的气化率大幅度提高,到 1996 年,全国城市燃气供应总量已发展到 471.75 亿立方米;城市用气人口由 1978 年的 1 108.4 万发展到