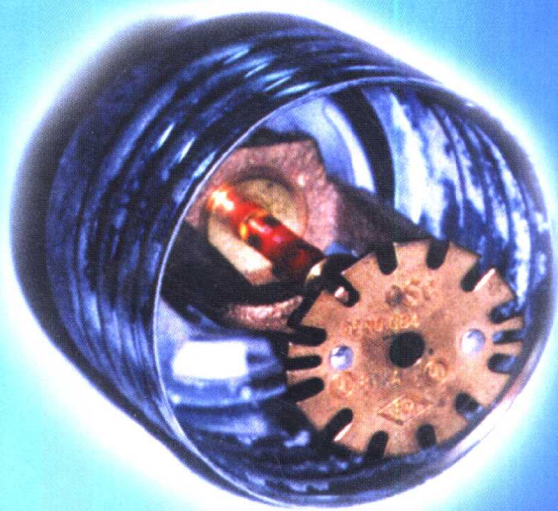
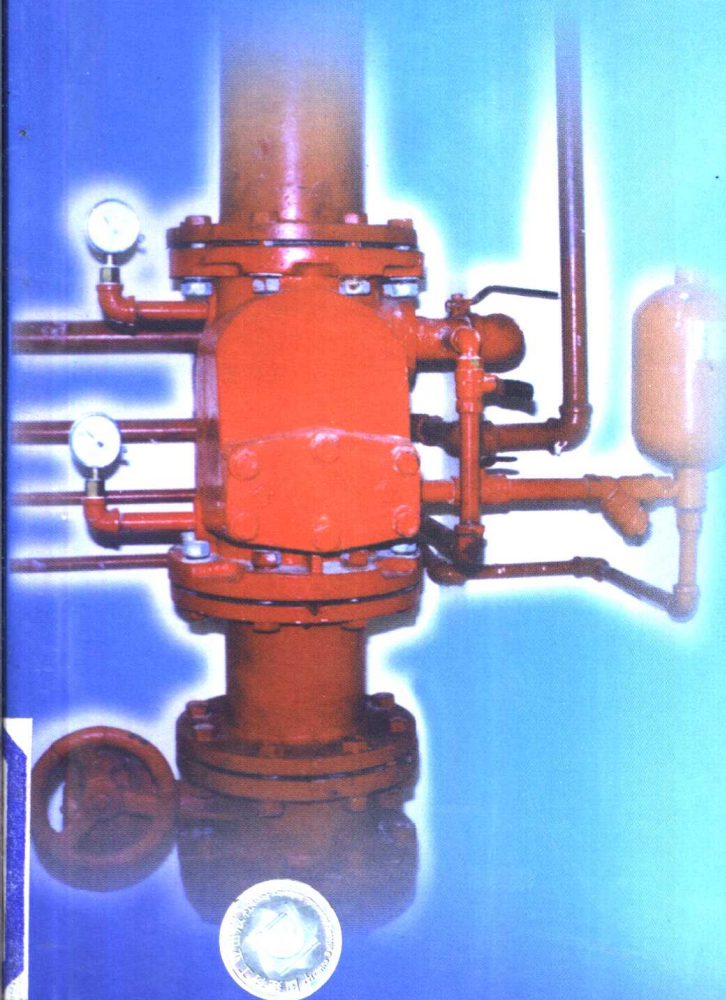


按最新规范编写

建筑消防给水系统的设计施工监理

李念慈 万月明 编著



中国建材工业出版社

TU892
2003095

建筑消防给水系统的 设计施工监理

李念慈 万月明 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑消防给水系统的设计施工监理/李念慈等编著.
—北京:中国建材工业出版社,2002.7
ISBN 7-80159-214-X

I. 建… II. 李… III. ①建筑物—消防设备:给水系统—建筑设计②建筑物—消防设备:给水系统—工程施工—监督管理 IV. TU892

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 045404 号

内 容 简 介

本书融会了建筑消防给水技术与管道安装技术,详细阐述了各类自动喷水灭火系统、水喷雾灭火系统、消火栓给水系统等共八种系统的构成、工作原理、设置要求及控制方式;并对十一种报警阀及其他组件的结构、工作原理、技术条件、接管原理等也作了详细阐述,其中,对增压稳压设施的设置、系统冲洗试压、管道安装技术要求等作了重点介绍。书中还附有大量实例评介,这些实例是笔者在工作中处理过的典型错误设计和安装。本书内容以规范标准为依据,以技术理论为基础,紧密结合实践,深入浅出,既有规范要求,也有经验总结,更有新的探索,适合设计、施工、建审验收技术人员和施工技术工人、监理人员、消防设施检测和维护人员及大专院校师生阅读,还可以作为消防人员的培训教材。

建筑消防给水系统的设计施工监理

李念慈 万月明 编著

*

中国建材工业出版社

(北京三里河路 11 号 邮编 100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

北京丽源印刷厂印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 37 字数: 947 千字

2003 年 1 月第一版 2003 年 1 月第一次印刷

印数: 1~3 000 册 定价: 66.00 元

ISBN 7-80159-214-X/TU·108

前 言

改革开放以来,我国消防工程技术有了突飞猛进的发展,消防工程已逐步形成了自己的标准体系。随着国外消防产品的引进、吸收、消化,丰富了我国的消防工程技术。笔者从多年的实践中体会到,要使消防给水系统既满足使用功能,又经济合理,就要求设计、安装、维护人员不但要掌握系统的构成、工作原理、组件结构及性能,还要了解室内火灾的发展过程和灭火机理,正确地根据保护对象的燃烧特性,选择与之相适应的灭火系统。只有正确地选用组件及设计系统的控制方式,正确安装,加强维护,才能使消防给水系统满足使用需要。本书是笔者多年从事消防工程实践的总结,也是笔者在海南及浙江两省从事七年消防工程监理工作积累的大量实践经验升华的结果。

消防给水技术需要安装技术的支持,而管道安装技术则需要消防技术理论的指导,基于这一点,笔者将多年来在消防工程技术培训班的部分讲稿整理成书,以满足消防工程技术人员在设计、安装、维护方面的需求。

笔者在海南、浙江两省工作期间,得到了两省消防部门领导的帮助和鼓励,特别是付树昌同志给予了指导和激励,激发笔者在工作中以理论指导实践,在实践中升华理论,最终在浙江完成书稿。本书编写过程中还得到海南省消防局张明灿高级工程师、李悦工程师的大力支持,并为本书作了大量的实际工作,使本书得以顺利出版,在此深表谢意。

由于笔者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2002 年 10 月

目 录

第一章 管道标准化及管道材料	(1)
第一节 管道标准化	(1)
第二节 管道的公称直径和公称压力	(1)
第三节 工作压力、设计压力、试验压力	(3)
第四节 管子的壁厚与内应力计算	(4)
第五节 管道的压力分级	(10)
第六节 消防给水管道常用管材	(10)
第七节 管道常用阀门和阀门型号表示方法、弹簧管压力表及可挠曲橡胶接头	(21)
第二章 管道连接形式	(37)
第一节 管螺纹连接	(37)
第二节 承插连接	(42)
第三节 法兰盘连接	(56)
第四节 焊接连接	(69)
第五节 卡箍连接	(78)
第三章 自动喷水灭火系统的基本要求及感温释放元件	(82)
第一节 自动喷水灭火系统的基本构成	(82)
第二节 湿式自动喷水灭火系统的工作原理	(84)
第三节 自动喷水灭火系统应能扑灭和抑制早期火灾	(84)
第四节 自动喷水灭火系统的感温释放元件——闭式喷头	(88)
第四章 干、湿式报警阀组及水流指示器	(106)
第一节 湿式报警阀组的主要功能	(106)
第二节 湿式报警阀的结构和工作原理	(107)
第三节 隔板座圈型湿式报警阀的接管	(110)
第四节 湿式报警阀组的主要组件	(113)
第五节 水流指示器	(121)
第六节 干式报警阀的结构和工作原理	(128)
第七节 干式报警阀组的接管	(129)
第五章 自动喷水灭火系统的设计及安装	(137)
第一节 自动喷水灭火系统的设计基本数据	(137)
第二节 喷头的流量特性系数	(159)
第三节 自动喷水灭火系统的水力计算	(161)
第四节 闭式喷头的选择和安装要求	(172)
第五节 自动喷水灭火系统管网的设置要求	(194)
第六节 系统功能组件的设置	(202)

第七节 系统管网的冲洗	(219)
第六章 雨淋报警阀组及自动喷水灭火系统	(225)
第一节 雨淋阀的分类	(225)
第二节 雨淋阀的结构和工作原理	(226)
第三节 雨淋阀的传动方式	(240)
第四节 雨淋阀组的接管规律	(247)
第五节 雨淋阀组的控制方式	(250)
第六节 小型温感雨淋阀的结构、工作原理和接管方式	(259)
第七节 雨淋阀组系统侧管网的充气和充水附件	(262)
第八节 自动喷水灭火系统中开式系统的设计要求	(264)
第九节 雨淋灭火系统及水幕系统常见的的设计错误	(285)
第十节 雨淋阀组的安装	(287)
第七章 各种类型的自动喷水灭火系统的构成及工作原理	(290)
第一节 湿式自动喷水灭火系统	(290)
第二节 干式及干湿式自动喷水灭火系统	(291)
第三节 预作用自动喷水灭火系统	(293)
第四节 重复启闭预作用自动喷水灭火系统	(295)
第五节 雨淋灭火系统	(296)
第六节 湿式自动喷水—泡沫联用系统	(300)
第八章 水喷雾灭火系统	(308)
第一节 水喷雾灭火系统的构成与特点	(310)
第二节 系统的重要组件——水雾喷头	(311)
第三节 水喷雾灭火系统的设置要求	(322)
第四节 水喷雾灭火系统的水力计算	(329)
第五节 水喷雾灭火系统的控制方式	(330)
第六节 水喷雾灭火系统的安装	(332)
第七节 水喷雾灭火系统的示例分析	(333)
第九章 室内消火栓给水系统	(338)
第一节 室内消火栓给水系统的组成	(338)
第二节 设计基本数据	(339)
第三节 室内消火栓箱及消防卷盘	(357)
第四节 室内消火栓给水系统管网布置	(361)
第五节 室内消火栓管网的分区供水	(365)
第六节 室内消火栓给水系统的安装要求	(371)
第十章 消防给水系统的增压稳压设施	(378)
第一节 高位水箱是最经济的稳压设施	(379)
第二节 稳压泵增压设施	(381)
第三节 消防用气压给水设备	(382)
第四节 变频泵组稳压设施	(409)
第五节 增压稳压设施对报警阀的影响	(411)

第六节	自动喷水灭火系统局部增压和减压的方式	(413)
第七节	多系统共用增压稳压设施应注意的问题	(415)
第十一章	离心式消防泵组的选用、安装及控制	(418)
第一节	离心式消防泵的工作原理和安装要求	(418)
第二节	消防泵的自灌式充水	(424)
第三节	消防泵组的进水管布置	(426)
第四节	消防泵组进出口附件的设置	(432)
第五节	消防给水泵的控制	(438)
第十二章	消防给水管道的支吊架	(448)
第一节	消防给水管道支吊架的类型	(448)
第二节	消防给水管道的防晃措施	(453)
第三节	支吊架的设计和施工安装应注意的问题	(458)
第四节	胀锚螺栓的类型	(465)
第十三章	管道压力试验	(471)
第一节	管道压力试验的目的	(471)
第二节	管道压力试验的分类	(471)
第三节	管道压力试验的介质	(472)
第四节	强度试验的试验压力	(473)
第五节	严密性试验的试验压力	(476)
第六节	压力试验的温度	(477)
第七节	管道泄漏试验及计算	(477)
第八节	阀门的压力试验	(482)
第九节	消防给水系统的压力试验	(486)
第十四章	金属管道的防腐与油漆标志	(492)
第一节	金属管道的腐蚀机理	(492)
第二节	钢质管道的防腐方法	(494)
第三节	消防给水管道的涂色识别	(503)
第十五章	消防工程的验收和质量评定	(504)
第一节	消防工程的商品属性	(504)
第二节	消防工程的验收	(504)
第三节	消防工程的质量	(507)
第四节	消防工程的质量评定	(509)
习题一	判断题	(518)
	判断题答案	(525)
习题二	单项选择题	(528)
	单项选择题答案	(540)
习题三	多项选择题	(542)
	多项选择题答案	(561)
习题四	填空题	(563)
	填空题答案	(569)

习题五 看图题.....	(571)
看图题答案.....	(576)
附表 1 消防给水系统主要计量单位及换算	(579)
附表 2 监理的内涵及其基本工作程序和方法	(581)
附表 3 消防专项监理三大文件的编制目的、依据和内容	(582)
附表 4 建筑物的防火灾能力	(583)
参考文献.....	(584)

第一章 管道标准化及管道材料

第一节 管道标准化

在消防给水及其他生产、生活给水中，常需要把水从一个设备输送到另一个设备或用水点，输送水的通道通常叫管道。

水的输送和分配形式是多种多样的，输送距离有长有短，输送方向可以由集中到分散，也可以由分散到集中。所以，在管道上还需要设置各种各样的管件、附件、组件。其中，有专门连接管子的联结件，如管接头，法兰盘，卡箍；有改变流向的弯头，如三通，四通；有封闭管段的法兰盲板，管帽，堵头。这些管道零件，通常叫管件。

为了控制流体，尚需在管道上安装各类阀件，以截闭流体，调节流量和压力，限定流体流向，控制系统启动，发出报警信号等。因此，阀门的类型和功能是多样的。

另外，为了控制和检测流体的压力、流量，还需要在管道上安装一些检测、控制元件，如压力表、流量计、温度计、压力开关等。

对于消防给水系统而言，系统管道上还需要安装具有各种功能的专用组件，如报警阀、喷头、水力警铃、压力开关、水流指示器等消防系统专用的产品，统称为组件。

管道系统是由设备、管子、管件、阀件、仪表、专用组件共同组成。

在消防给水系统及其他生产、生活给水系统中，由于生产、生活、消防对流体的压力、流速、流量的需要是多种多样的，如果要按照这些需要去设计管子的直径和壁厚，就会有数以百计的规格要求，从而使与管子相连的管件、阀件、组件都要跟着制造数以百计的规格，因而给设计、生产、安装、维修造成诸多不便。

为了适应生产现代化的要求，人们按照科学规律，人为地规定了一系列标准直径、标准压力这两种重要参数，使设计、制造、安装管道时的工作大大简化。因为有了标准直径、标准压力的系列，就使管子和各类管件的结构尺寸大大简化。例如镀锌焊接钢管的规格就只有从 $DN6\text{ mm}$ 到 $DN150\text{ mm}$ 等 13 个规格和普通钢管及加厚钢管两种类型。在同一公称直径的规格中加厚钢管的壁厚大于普通钢管。与镀锌钢管相配的管件规格也与之相应地大大减少。由于结构尺寸的简化，为管子及附件按系列化大规模生产提供了条件，以尽可能少的规格，满足更多更广泛的需要。同时，也使管子附件可以互换通用，提高了通用能力。此外，管道直径系列的标准化，也有利于简化技术标准及施工验收规范的内容，实现质量标准化。在安装生产管理中，也可以按公称直径制定不同规格管道安装的劳动定额，材料消耗；还可以按公称直径制定工程预算定额。因此管道标准化具有重要意义。

第二节 管道的公称直径和公称压力

管子的标准直径以公称直径表示，是管道尺寸的重要参数，它表示管子及附件的名义内径，用 DN 表示，在 DN 后面附加公称直径的尺寸。如 $DN100\text{ mm}$ 的镀锌钢管，其名义内径为 100 mm 。按我国的管道元件的公称通径标准（GB/T 1047—1995），管道的公称直径共

有 65 个规格，其中常用的规格有 28 个。

公称直径仅是名义直径，它既不是管子的实际内径，也不是管子的实际外径。一般情况下，它是接近于管子内径的正整数。对于不同材质的管子其公称直径的含义略有不同，对壁厚变化极小的铸铁管，其公称直径等于其内径；对壁厚变化较大的聚氯乙烯塑料管及聚乙烯管、聚丙烯管、酚醛塑料管、玻璃管等，其公称直径等于或接近于其内径；对水煤气管、螺旋卷管等有缝管，其公称直径比实际内径略小；对无缝钢管、有色金属管，由于壁厚变化大，造成了内径、外径的变化。为了实现附件的通用化，就把管子的外径系列固定，使壁厚按压力分级而变化，因此同一外径系列的管子，就有许多种壁厚规格，这些管子一般用外径乘壁厚来表示其规格。它们的公称直径与管子的外径接近，但略小于其外径。

阀件的公称直径等于其接口内径。

在公称直径系列中，所谓“相当的管螺纹”是指当采用管螺纹连接时，管子及管件的连接部位应加工成与公称直径相当的管螺纹尺寸，如水煤气管及螺纹阀件、管件的管螺纹，都是与公称直径相当的管螺纹。在安装工程中，由于多因素的限制，常用的是公称直径为 15~100 mm 的管螺纹。

由于塑料管不能直接在管子上切削管螺纹，它在螺纹连接时，往往采用凸缘螺纹接管，因此其螺纹尺寸不能与公称直径相当。

用公称直径来表示管子与管件规格的，仅限于阀门、法兰盘、盲板、钢制管件及铸铁管，这些材料的公称直径等于其内径。

对无缝钢管、螺旋卷管、有色金属管，由于公称直径不能反映其具体规格，所以通常应以外径乘壁厚来表示其规格。螺旋卷管还可以用公称外径来表示。

对于焊接钢管及其管件，既可以用公称直径来表示其规格，也可以用管螺纹尺寸来表示其规格，但对管子应注明是普通管，还是加厚管。

管道的公称压力是指与管道元件的机械强度有关的设计给定压力，是仅针对金属管道元件而言的。我国金属管道元件压力分级标准确定的公称压力分级从 0.05~335 MPa，共 30 个压力分级。

公称压力用 PN 表示，在其后附加压力分级的数值，并用 MPa 表示。

公称压力是标准确定的压力，是管道标准化的重要参数，也是设计、安装时，贯彻技术标准的重要依据。设计确定的压力等级不同时，对管道的材料、联结结构、配件选用及管道的试验要求是不同的。

金属材料的机械强度随温度的升高而降低，所以相同材质、相同规格的管子及附件，在不同温度下，所能允许承受的工作压力是不相同的。金属材料的机械强度虽然随温度的升高而降低，但是在不同的温度范围内，其强度的变化速率却有显著的不同。例如，优质碳素钢，Q235 A 碳素钢，10 号、20 号、25 号碳素钢，16 Mn 钢等钢材，在 0~200℃ 的温度下，其机械强度变化不大；铸铁制件在 0~120℃ 时，其机械强度变化不大；铜制件在 0~120℃ 时，其机械强度变化也不大。超过上述温度时，上述材料的机械强度会有明显变化。因此，人们就把 0~200℃ 定为碳素钢及某些低合金钢的公称压力的分级温度；把 0~120℃ 定为铸铁制件、铜制件的公称压力分级温度。也就是说材料的公称压力是在上述温度条件下确定的，当温度升高时，同一公称压力的材料，其最大工作压力有所降低。

例如，10 号无缝钢管制件，当公称压力级别为 1.6 MPa 时，如使用温度不超过 200℃ 时，其最大工作压力为 1.6 MPa；当温度为 201~250℃ 时，其最大工作压力为 1.5 MPa；当

温度为 326~350℃ 时,其最大工作压力为 1.1 MPa;当温度为 436~450℃ 时,其最大工作压力为 0.7 MPa;当温度超过 450℃ 时,则不应选用该材质的制件。

第三节 工作压力、设计压力、试验压力

通常讲的工作压力,有管道元件的工作压力和管道系统的工作压力之分。

管道元件的工作压力,是指材料在不同温度下所能允许承受的最大工作压力,它反映了材料本身在某温度下工作时的耐压能力。例如普通镀锌钢管在 200℃ 以下的温度条件下,其工作压力为 1 MPa,即表示普通镀锌钢管在工作温度不超过 200℃ 时,其工作压力不允许超过 1 MPa,所以管道元件的工作压力就是元件的最大工作压力。

又如公称压力为 1.6 MPa 的单球橡胶柔性接头,其工作压力为 1.6 MPa,表示该柔性接头的最大工作压力为 1.6 MPa,其工作温度不超过 115℃。

消防给水系统的组件是在常温下工作的,其工作压力是指组件在常温下的最大工作压力,不过在行业标准中的称谓不完全统一,如湿式报警阀、雨淋阀的额定工作压力,是指报警阀在伺应状态或工作状态下允许的工作压力;又如水流指示器的最大工作压力为 1.2 MPa;再如压力开关的额定工作压力为 1.2、2.5、4.2、14.7 MPa,而水泵接合器则以公称压力表示,其公称压力为 1.6、2.5 MPa。不论是工作压力,最大工作压力,额定工作压力均指在常温下,组件能够承受的最高工作压力。

管道系统的工作压力,一般是指系统内最危险点处的最大工作压力。在常温下工作的消防给水系统,在设计进行水力计算时,按保证系统最不利点在最大消防流量时的工作压力来选定水泵。当水泵处于系统最底部时,系统的危险点在水泵出口处,这里的工作压力为最大;当水泵不处在系统底部时,最危险点在系统底部,最危险点工作压力等于水泵出口压力加上水泵至最危险点的液柱静压力(即高程差),在水泵工作时,这里压力为最大,因此最危险点的工作压力就是系统的最大工作压力。

但是系统的最大工作压力,是在正常条件下,水泵运行处于最佳工况时的最大工作压力。当水泵工况改变,特别是在系统消耗水量远少于设计选泵时确定的最大流量时,水泵扬程会升高,超过最佳工况时的扬程,这时,最危险点处的最大工作压力会随之升高。例如一个中危险级建筑内设置喷头保护,设计按作用面积 160 m²,喷水强度 6 L/min·m²,并按水力条件选定水泵流量为 24 L/s,但实际工作时,仅有两只喷头喷水,实际消耗水量仅 2.6 L/s。这时水泵不能在最佳工况下工作,流量锐减,扬程升高,危险点压力也会增高,危及最危险点管道元件的安全,这是设计必须予以考虑的。通常指的设计工作压力就是指在管道系统设计时确定的系统工作压力,并预计到系统在最极端条件下,在最危险点可能出现的最大压力。

由于消防给水系统中没有大的温度变化,也没有更多的会明显影响系统压力的因素,而且选泵时,已尽可能选用 $Q-H$ 曲线较为平坦变化的水泵,因此尽管在极端条件下,系统的压力变化不足以危及到元件的破坏,所以把设计工作压力与系统工作压力等同看待。但是,在其他的一些系统中,由于影响压力的因素较多,压力有可能产生较大变化时,设计工作压力与系统工作压力有严格区别。

试验压力是在对管道元件或系统进行压力试验时,规范所规定的压力值。它与管道元件的公称压力、系统的工作压力有密切关系。

试验压力按其试验的目的分为强度试验压力和严密性(渗漏)试验压力。

一般情况下, 强度试验压力按管道元件、管道系统的工作压力或额定工作压力的倍数取值, 而严密性试验压力则以工作压力或额定工作压力取值。

第四节 管子的壁厚与内应力计算

当管子内部存在压力流时, 管子内部的流体压力要均匀地作用于管壁, 并产生一个或几个与外力相平衡的内力, 称为内应力。可以认为管壁上所受到的压力是均匀分布的, 则内应力的大小在管子的各部位是相同的, 内应力随外力的增大而增大, 随外力的消失而消失。

在管壁的任意一点上, 内力由相互垂直的三个主应力构成。即由管子轴向平行的轴向应力 σ_a ; 沿管壁圆周切线方向的环向应力 σ_t ; 沿管子径向的径向应力 σ_r 构成, 如图 1-1。

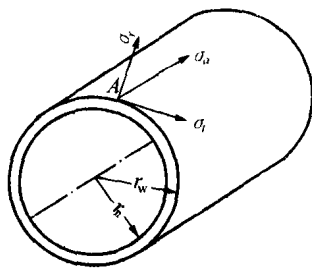


图1-1 内压产生的管壁应力

一、轴向应力 σ_a

轴向应力 σ_a 是内压作用于管壁上, 与管子轴线平行的主应力。按材料力学可知, 作用于管壁上任意一点的轴向应力为:

$$\sigma_a = \frac{Pr_n^2}{r_w^2 - r_n^2} \quad (1-1)$$

式中 P ——管道内压力 (MPa);

r_n ——管子内半径 (mm);

r_w ——管子外半径 (mm);

σ_a ——管壁轴向应力 (MPa)。

从式 (1-1) 可知, 轴向应力的大小与管壁上设计点 A 至管子圆心的半径无关, 即轴向应力在管壁厚度方向上是均匀分布的。另外, 内压产生的轴向应力永远是正值, 永远是拉应力。

二、环向应力 σ_t

环向应力 σ_t 是内压作用于管壁上, 沿管壁圆周切线方向的主应力。按材料力学求主应力的方法可知, 作用于管壁上任意一点的环向应力为:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r_n^2(1 + r_w^2/r^2)}{r_w^2 - r_n^2} \quad (1-2)$$

式中 r ——管壁上任意一计算点至管子圆心的半径 (mm);

σ_t ——环向应力 (MPa)。

其余符号意义同前。

从式 (1-2) 可知, 环向应力的大小与计算点的半径有关。

当计算点 A 在管内壁时, $r = r_n$, 因 $r_w > r_n$, 故 $r_w/r > 1$, 其比值为最大。

当计算点 A 在管外壁时, $r = r_w$, 则 $r_w/r = 1$, 故比值为最小。

所以环向应力在管内壁为最大, 在管外壁

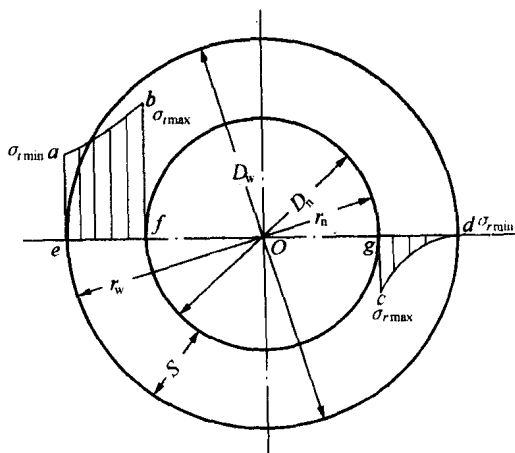


图 1-2 在管壁上应力值变化曲线

力最小, 当计算点从管内壁向管外壁变化时, 环向应力值由最大向最小变化, 如图 1-2 中 ba 曲线。

在内壁上, 环向应力为最大 $\sigma_{t\max}$

$$\sigma_{t\max} = \frac{P(r_n^2 + r_w^2)}{r_w^2 - r_n^2} \quad (1-3)$$

在外壁上, 环向应力为最小 $\sigma_{t\min}$

$$\sigma_{t\min} = \frac{P \cdot 2 \cdot r_n^2}{r_w^2 - r_n^2} \quad (1-4)$$

不管设计点 A 的半径 r 在管内壁与管外壁之间如何变化, 环向应力 σ_t 都是正值, 因此在内压作用下管壁上产生的环向应力永远是拉应力。

三、径向应力 σ_r

径向应力是内压作用在管壁上, 沿径向的应力常称为径向应力, 记作 σ_r , 同样可知:

$$\sigma_r = \frac{P \cdot r_n^2(1 - \frac{r_w^2}{r^2})}{r_w^2 - r_n^2} \quad (1-5)$$

当计算点 A 在管内壁时, $r = r_n$, 因 $r_w > r_n$, 故 $\frac{r_w^2}{r_n^2} > 1$; 当计算点 A 在管外壁时, $r = r_w$, 故 $\frac{r_w^2}{r^2} = 1$ 。因此, 在管外壁, 径向应力最小; 在管内壁, 径向应力最大。当计算点 A 由管内壁向管外壁变化时, 径向应力值由最大向最小变化, 如图 1-2 中 cd 曲线。

在管内壁, 径向应力为最大 $\sigma_{r\max}$

$$\sigma_{r\max} = \frac{P \cdot r_n^2(1 - \frac{r_w^2}{r_n^2})}{r_w^2 - r_n^2} = -P \quad (1-6)$$

在管外壁, 径向应力为最小 $\sigma_{r\min}$

$$\sigma_{r\min} = \frac{P \cdot r_n^2(1 - \frac{r_w^2}{r_w^2})}{r_w^2 - r_n^2} = 0 \quad (1-7)$$

按上面计算可知, 在管内壁, 其径向应力在数值上等于流体压力, 而且是压应力; 在管外壁, 径向应力为零。

为了比较各个方向上的应力在相同条件下的大小及与管壁厚度之间的关系, 我们命 $r_w/r_n = \beta$, 而且 $r_w > r_n$, 故 $\beta > 1$ 。则将式 (1-3)、(1-4)、(1-5)、(1-6)、(1-7) 变换:

$$\text{轴向应力} \quad \sigma_a = \frac{P}{\beta^2 - 1} \quad (\text{在管壁上任一点})$$

$$\text{环向应力} \quad \sigma_{t\max} = \frac{P(\beta^2 + 1)}{\beta^2 - 1} \quad (\text{在管内壁})$$

$$\sigma_{t\min} = \frac{2P}{\beta^2 - 1} \quad (\text{在管外壁})$$

$$\text{径向应力} \quad \sigma_{r\max} = -P \quad (\text{在管内壁})$$

$$\sigma_{r\min} = 0 \quad (\text{在管外壁})$$

我们可以用上式来比较各应力的大小:

(1) 比较环向应力与轴向应力的大小

在管内壁

$$\frac{\sigma_{t\max}}{\sigma_a} = \frac{P(\beta^2 + 1)}{\beta^2 - 1} \times \frac{\beta^2 - 1}{P} = \beta^2 + 1$$

因 $\frac{r_w}{r_n} > 1$, 故 $\beta^2 > 1$, 则 $\frac{\sigma_{t\max}}{\sigma_a} = \beta^2 + 1 > 2$ 。

在管内壁环向应力与轴向应力的比值永远大于 2, 而且当 $\frac{r_w}{r_n}$ 的比值愈大, 则 $\sigma_{t\max}/\sigma_a$ 的比值也愈大, 它表示管壁愈厚, 环向应力与轴向应力的差异愈大。

在管外壁

$$\frac{\sigma_{t\min}}{\sigma_a} = \frac{2P}{\beta^2 - 1} \times \frac{\beta^2 - 1}{P} = 2$$

在管外壁环向应力与轴向应力的比值为 2, 是最小比值。

(2) 轴向应力与径向应力的比值

在管内壁

$$\frac{\sigma_{r\max}}{\sigma_a} = \frac{\beta^2 - 1}{P} \times (-P) = 1 - \beta^2$$

很明显在管内壁轴向应力与径向应力之比与 β 值有关。

当 $\beta \leq 1.41$ 时, $\frac{\sigma_{r\max}}{\sigma_a} \leq 1$;

当 $\beta > 1.41$ 时, $\frac{\sigma_{r\max}}{\sigma_a} > 1$ 。

在管外壁, 由于 $\sigma_{r\min} = 0$, 故 $\frac{\sigma_{r\min}}{\sigma_a} = 0$, 此值无意义。

从以上比较可知, 在壁厚相同条件下, 三个主应力中, 以环向应力为最大, 当 $\beta \leq 1.41$ 时, 轴向应力大于径向应力; 当 $\beta > 1.41$ 时, 轴向应力为最小主应力。而且壁厚是影响轴向应力与径向应力大小变化的因素。

在工程设计中, 由于管壁厚度的变化, 使管壁内和管壁外的应力发生很大变化, 壁厚愈大, 壁内外应力差异愈大。如以管内壁的应力作为计算依据, 管道不安全; 如以管外壁的应力作为计算依据, 不能充分发挥管材的强度, 偏于保守。所以, 一般都不采用以上的管子内、外壁应力作为计算依据, 而是采用管壁平均应力作为计算依据。

四、管壁平均应力

管壁平均应力在数值上, 既不等于外壁或内壁应力, 也不是内壁应力与外壁应力的算术平均值。而是以主应力线构成的面积, 除以壁厚所得的商。这样, 管壁平均应力就比单纯的内壁应力或外壁应力更具有代表意义。

1. 环向平均应力 σ_{tx}

从图 1-2 中可知, 环向平均应力 σ_{tx} 在数值上等于环向应力主应力线 $abfe$ 围成的面积除以 ef (壁厚) 所得的商。

$$A_{abfe} = \int_{r_n}^{r_w} \frac{P \cdot r_n^2 (1 + \frac{r_w^2}{r^2})}{r_w^2 - r_n^2} \cdot dr = P \cdot r_n$$

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \sigma_{tr} &= \frac{A_{dth}}{S} = \frac{Pr_n}{S} \\ \text{因} \quad r_n &= \frac{D_n}{2} \\ \text{故} \quad \sigma_{tr} &= \frac{PD_n}{2S} \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 S —— ef 长度, 即壁厚。

2. 轴向平均应力 σ_{ax}

由于轴向应力在管壁厚度上是均布的, 所以轴向平均应力 σ_{ax} 等于轴向应力 σ_a 。

$$\begin{aligned} \sigma_{ax} = \sigma_a &= \frac{Pr_n^2}{r_w^2 - r_n^2} = \frac{PD_n^2}{D_w^2 - D_n^2} \\ \text{因} \quad D_w &= D_n + 2S \\ \text{故} \quad \sigma_{ax} &= \frac{PD_n^2}{4S(D_n + S)} \\ \text{当壁厚很小时} \quad \sigma_{ax} &= \frac{PD_n}{4S} \end{aligned} \quad (1-9)$$

3. 径向平均应力 σ_{rx}

$$\sigma_{rx} = \frac{\int_{r_n}^{r_w} \frac{Pr_n^2(1 - r_w^2/r_n^2)}{r_w^2 - r_n^2} dr}{r_w - r_n} = \frac{-P \cdot r_n}{2r_n + S} = \frac{-P \cdot D_n}{2(D_n + S)}$$

当壁厚较小时, 可将 S 略去, $(D_n + S) \approx D_n$, 则

$$\sigma_{rx} = -\frac{P}{2} \quad (1-10)$$

按照最大剪应力强度理论, 管子发生破坏取决于最大剪应力。

受内压的管子, 其最大剪应力 $\tau_{\max}$ 等于最大主应力 $\sigma_{\max}$ 与最小主应力 $\sigma_{\min}$ 之差值的一半。即

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

而且 $\tau_{\max} \leq \frac{1}{2} [\sigma]'$ (不发生破坏的强度条件), 故

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} \leq [\sigma]' \quad (1-11)$$

式中 $[\sigma]'$ ——管材在工作温度下的许用应力 (MPa)。

当用平均应力作为计算依据时, 则将 σ_{tr} 、 σ_{rx} 代入式 (1-11), 整理后得:

$$S_1 = \frac{PD_n}{2[\sigma]' - P} \quad (\text{以内径为基础}) \quad (1-12)$$

$$S_1 = \frac{PD_w}{2[\sigma]' + P} \quad (\text{以外径为基础}) \quad (1-13)$$

式中 S_1 ——管子的理论壁厚。

五、管子强度修正系数及壁厚附加值

S_1 仅仅是只考虑以强度条件满足内压要求所需的壁厚, 而没有考虑制管工艺对强度和壁厚的削弱, 也没有考虑在一定的使用年限内, 因磨损、腐蚀而需要增加的壁厚裕量, 因此在实际使用中还应考虑以下因素:

1. 管子强度修正系数 η

η 也叫许用应力修正系数。它是考虑管子制管工艺对强度的削弱, 而对其许用应力进行修正。

无缝钢管由于管身无缝, 可以认为它的 η 为 1。也就是说其制管工艺对强度没有削弱。

焊接钢管管身有纵缝, 螺旋卷管管身有螺旋形焊缝, 其焊缝处应力分布不均, 主应力线歪扭, 焊缝根部也存在应力集中, 再加上焊缝处难以避免的缺陷, 焊缝处的强度就会降低。但制管工艺不同, 焊缝对管子强度的影响也不完全相同。这取决于焊缝的坡口型式和焊接工艺。当焊缝采用对接焊缝, 双面焊双面成型工艺时, 合格焊缝的许用应力修正系数 $\eta=1$; 也就是说, 焊缝强度与母材等强。除此之外, 单面焊接工艺的焊缝强度都比母材略小, 其修正系数 η 如表 1-1 所示。

表 1-1 管材及制管工艺的 η 值

管材及焊接方法		坡口型式及焊接工艺	η 值
无缝钢管			1.0
单面螺旋卷管			0.6
纵缝焊接钢管	手工电弧焊或气焊工艺	双面, 对接, 有坡口	1.0
		单面, 对接, 有垫板, 有坡口	0.8
		单面, 对接, 有坡口, 氩弧焊打底	0.9
		单面, 对接, 有坡口	0.75
	埋弧自动焊工艺	双面, 对接	1.0
		单面, 对接, 有坡口	0.85
		单面, 对接, 无坡口	0.8

由于许用应力修正系数 η 是对许用应力的修正, 因此式 (1-12) 及式 (1-13) 应作如下修正:

$$S_1 = \frac{PD_n}{2[\sigma]^t \eta - P} \quad (1-14)$$

$$S_1 = \frac{PD_w}{2[\sigma]^t \eta + P} \quad (1-15)$$

式中 S_1 ——管子计算壁厚 (mm);

P ——管道设计工作压力 (MPa);

D_n ——管子内直径 (mm);

D_w ——管子外直径 (mm);

$[\sigma]^t$ ——管道在工作温度下的许用应力值 (N/mm²);

η ——修正系数。

2. 壁厚附加值 C

实际上管子的壁厚, 由于加工误差, 可能偏离理想值。若大于理想值, 则不影响安全; 若存在负偏差, 则按公式计算选定的壁厚。在某些部位的壁厚可能小于理想值, 这就会降低强度。另外, 弯曲管子的背部也会减薄, 降低强度; 介质或环境对管子的腐蚀、磨损等都会使管子的有效厚度变薄, 降低强度。为了在一定的年限内确保管壁厚度维持在预定值, 所以在设计计算时都预先给予补偿, 在壁厚上给予附加值, 因而管子的需要壁厚 S 为:

$$S = S_1 + C_1 + C_2 + C_3$$

式中 S ——管子的需要壁厚 (mm), 即实际壁厚;

S_1 ——管子的计算壁厚 (mm);

C_1 ——附加的、补偿负偏差的附加值 (mm);

C_2 ——管子在预定年限内的腐蚀裕度 (mm);

C_3 ——管子加工减薄量 (mm)。

$$\text{令} \quad C = C_1 + C_2 + C_3$$

故将公式 (1-14) 及 (1-15) 改写为:

$$S = \frac{PD_n}{2[\sigma]^t \eta - P} + C \quad (1-16)$$

$$S = \frac{PD_w}{2[\sigma]^t \eta + P} + C \quad (1-17)$$

通常, 由于在中低压管道中, 内压 P 在分母中的值对壁厚计算的影响不大, 完全可以忽略不计, 故可将公式 (1-16) 及 (1-17) 作如下改写:

$$S = \frac{PD_n}{2[\sigma]^t \eta} + C \quad (1-18)$$

$$S = \frac{PD_w}{2[\sigma]^t \eta} + C \quad (1-19)$$

公式 (1-18) 及 (1-19) 就是常用的管子壁厚的计算公式。

应当说明, 以上两个计算公式是按管壁平均应力推导而得, 但是起主导作用的环向应力及径向应力在管壁上并不是均匀分布的。当管壁较薄时, 在管内壁和管外壁上的这些应力, 是相差不大的, 而且都不会超过平均应力的水平, 仍是安全的; 但当管壁较厚时, 这些应力相差较大, 当壁厚足够大时, 管内壁应力可以超过平均应力, 并导致产生大面积屈服。因此在运用上述公式时, 应对壁厚加以限定。一般规定 $\beta \leq 1.7$ 时, 均可使用以平均应力推导的壁厚计算公式。

按照上述公式计算的管壁厚度, 常常比实际选用的壁厚要小。这是因为:

(1) 钢管的壁厚仅满足内压要求的强度是不够的, 还必须满足管道安装及运行条件下, 外部荷载及管道自重, 流体重量对管道强度和刚度的要求。因此, 管道实际的选用壁厚大于计算壁厚。

(2) 大规模的工业生产不可能按每一个计算壁厚来进行生产和供应, 那样会有成千上万个壁厚规格, 给生产、管理、营销造成困难。因此只能统筹固定的壁厚系列进行生产。同一外径的管子, 其壁厚只能有几个, 甚至十余个壁厚规格, 这就是壁厚的标准化。在有的管材的规格中, 有公称壁厚的称谓, 只要选用的标准壁厚大于计算壁厚即可。

焊接钢管的壁厚分为普通管壁厚和加厚管壁厚两种, 普通管的工作压力为 1 MPa, 加厚管的工作压力为 1.6 MPa。

无缝钢管的壁厚系列比焊接钢管多, 一个外径规格往往有许多壁厚。在中低压级的管道中, 当计算的壁厚确定后, 如何选择经济合理的壁厚呢? 通常认为, 最小采用壁厚是既安全又经济合理的壁厚。表 1-2 为最小采用壁厚的数据。

当计算壁厚小于最小采用壁厚, 其工作压力小于其公称压力所对应的工作温度下的最大工作压力时, 则不必进行计算, 可直接按表选用最小采用壁厚。