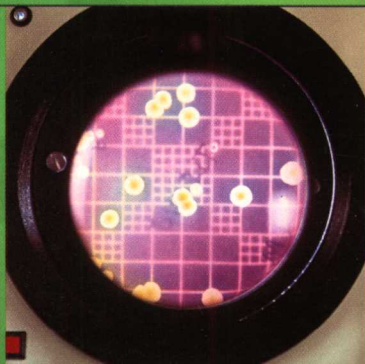




全国高职高专教育“十一五”规划教材



马秉骞 主编

化工设备使用 与维护



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

全国高职高专教育“十一五”规划教材

化工设备使用与维护

马秉骞 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是根据最新高等职业教育化工技术类专业人才培养目标而编写的。全书共 11 章,包括化工设备概述、压力容器基础、换热设备的使用与维护、塔类设备的使用与维护、反应设备的使用与维护、管式加热炉的使用与维护、管道与阀门的使用与维护、泵的使用与维护、压缩机的使用与维护、其他化工设备介绍及化工设备的运行管理等内容。

本书根据高等职业教育的特点,突出了“以应用为目的,以能力培养为目标”的教育理念,体现了“以必需、够用为度”的原则。全书紧密联系生产实际,内容精炼、资料翔实,实用性强。每章后均附有小结及思考与练习题。

本书适用于应用性、技能型人才培养的各类教育,也可供相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工设备使用与维护/马秉骞主编. —北京:高等教育出版社,2007.1

ISBN 978-7-04-020166-6

I. 化... II. 马... III. ①化工设备-使用-高等学校:技术学校-教材②化工设备-维护-高等学校:技术学校-教材 IV. TQ050.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 147455 号

策划编辑 王冰 责任编辑 李京平 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 王艳红 责任校对 朱惠芳 责任印制 尤静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landrace.com
印 刷	化学工业出版社印刷厂		http://www.landrace.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2007 年 1 月第 1 版
印 张	17	印 次	2007 年 1 月第 1 次印刷
字 数	410 000	定 价	21.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20166-00

前 言

本书是根据最新高等职业教育化工技术类专业人才培养目标以及化工设备课程的具体教学要求而编写的。

本书从高等职业教育的特点出发,力求突出“以应用为目的,以能力培养为目标”的教育理念,体现“以必需、够用为度”的原则。对教学内容精心选择、合理安排,注重工程应用和实际操作。

全书内容分为 11 章,包括化工设备概述、压力容器基础、换热设备的使用与维护、塔类设备的使用与维护、反应设备的使用与维护、管式加热炉的使用与维护、管道与阀门的使用与维护、泵的使用与维护、压缩机的使用与维护、其他化工设备介绍及化工设备的运行管理等内容。

本书由兰州石化职业技术学院马秉骞担任主编,并编写第一章、第二章、第九章、第十一章及附录;伍家卫编写第三章、第四章、第五章、第六章、第七章、第十章;张苏编写第八章。全书统稿工作由马秉骞完成。

本书承蒙兰州理工大学俞树荣教授主审。俞教授对本书的初稿进行了详细的审阅,提出了很好的修改意见;参加审稿的承德石油高等专科学校曹克广教授、南京化工职业技术学院丁志平副教授等,也提出了诸多宝贵的意见。本书在编写过程中参阅了一些相关的标准、规范以及近几年出版的相近内容的教材和书目。在此,对俞教授及全体审稿人员、相关作者及所有对本书的出版给予支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中疏漏甚至错误在所难免,请广大读者批评指正。

编者

2006 年 9 月

目 录

第一章 化工设备概述	1	第三节 管式加热炉使用与维护	142
第一节 化工设备的应用与分类	1	第七章 管道与阀门的使用与维护	150
第二节 化工设备常用材料	4	第一节 化工管路的使用与维护	150
第三节 化工设备的腐蚀与防护	11	第二节 阀门	160
第四节 化工工艺设备的构造	14	第八章 泵的使用与维护	174
第二章 压力容器基础	18	第一节 离心泵的结构与工作原理	174
第一节 压力容器的类型及规范 介绍	18	第二节 离心泵的性能	178
第二节 压力容器的设计计算	21	第三节 离心泵的气蚀与安装高度	184
第三节 压力容器的主要零部件	32	第四节 离心泵的使用与维护	186
第三章 换热设备的使用与维护	50	第五节 其他类型泵	193
第一节 换热设备工作过程及类型	50	第九章 压缩机的使用与维护	198
第二节 换热设备的结构	55	第一节 压缩机的类型	198
第三节 换热设备的使用与维护	75	第二节 活塞式压缩机	200
第四章 塔设备的使用与维护	80	第三节 离心式压缩机	211
第一节 塔设备的工作过程及类型	80	第十章 其他化工设备介绍	219
第二节 塔设备的结构	83	第一节 过滤机	219
第三节 塔的使用与维护	102	第二节 离心机	225
第五章 反应设备的使用与维护	108	第三节 风机	231
第一节 反应设备的工作过程及 类型	108	第十一章 化工设备的运行管理	236
第二节 反应器的结构及特点	110	第一节 压力容器的安全附件	236
第三节 反应设备的使用与维护	120	第二节 压力容器的安全使用	244
第六章 管式加热炉的使用与维护	127	第三节 典型化工设备常见事故及 案例	249
第一节 管式加热炉的工作过程及 类型	127	附录 化工设备使用与维护课程参考 教学大纲	259
第二节 管式加热炉的结构	134	参考文献	262

第一章 化工设备概述

知识目标:

- 了解化工设备的类型及在石油化工生产中的应用
- 掌握化工设备常用金属材料的性能及应用
- 了解化工设备常见的腐蚀类型及防护措施

能力目标:

- 能够根据化工设备不同使用条件,对照钢材的标准进行选材



化工生产是以气体、液体、粉体等流动性物料为原料,经过各种工艺过程的加工得到不同类型产品的过程工业,而各种工艺过程都是通过不同的设备来实现的,化工厂的各种生产装置也都是由不同类型的设备所构成的。本章主要介绍化工设备的种类、构造及应用,化工生产对化工设备的要求,化工设备常用金属材料的性能及选用等内容。

第一节 化工设备的应用与分类

一、化工设备在化工生产中的应用

化工生产企业的各种装置都是由不同类型的设备所构成的,石油、化工产品也都是按照一定的工艺过程,利用与之相配套的化工设备生产出来的。例如,管式炉乙烷裂解制乙烯装置,要用到裂解炉、离心式压缩机、各种塔器、换热设备及废热锅炉等设备;炼油厂的加氢裂化装置,要用到加热炉、反应器、分馏塔、氢气压缩机、高压分离器、高压泵、缓冲罐及空气冷却器等设备。典型炼油、化工生产装置所需的化工设备见表 1-1。

表 1-1 典型炼油、化工生产装置所需的化工设备

序号	生产装置名称	所需的主要设备
1	常减压	加热炉、分馏塔、换热器、空气冷却器、各种油泵
2	催化裂化	加热炉、反应器、沉降器、再生器、旋风分离器、分馏塔、空气冷却器、离心式鼓风机、各种油泵、各类容器
3	催化重整	加热炉、分馏塔、反应器、抽提塔、各种换热器、各种油泵
4	溶剂脱沥青	加热炉、抽提塔、蒸发器、丙烷压缩机、各种油泵
5	润滑油脱蜡	加热炉、各类塔器、转鼓式真空过滤机、套管结晶器、离心式空气压缩机、各种泵

续表

序号	生产装置名称	所需的主要设备
6	合成氨	加热炉、反应器、分馏塔、压缩机、换热设备、各种泵
7	丁烯氧化脱氢生产丁二烯	反应器、各种塔器、蒸发器、空气压缩机、混合器、废热锅炉、各种泵
8	乙烯催化水合生产乙醇	加热炉、反应器、压缩机、分馏塔、洗涤塔、各种泵

从表 1-1 可见, 化工生产离不开化工设备, 化工设备是化工生产必不可少的物质技术基础, 是生产力的主要因素之一, 是化工产品质量保证体系的重要组成部分。化工设备性能的优劣及使用者对其掌握的程度, 将直接关系到化工生产的正常进行, 并对整个装置的产品质量、生产能力、消耗定额以及“三废”处理和环境保护等各方面都有重大的影响。不同的化工工艺对化工设备提出了不同的要求, 而设计合理、质量优良的新型高效化工设备又会促使产品质量和产量的提高及消耗的降低, 甚至使原来难以实现的生产工艺成为现实, 生产出许多新的产品。例如, 大型压缩机和超高压容器的研制成功, 使人造金刚石的构想变为现实, 使高压聚合反应得以实现。化工设备不仅用于化工和炼油生产中, 而且在轻工、医药、食品、冶金、能源、交通等工业部门也有着广泛的应用。由此可见, 化工设备与人民生活有着密切的关系, 对国民经济的发展起着十分重要的作用。

二、化工设备的类型

化工生产条件苛刻, 技术含量高, 生产原理多样, 所用设备种类多。各种工艺装置的任务不同, 所采用的设备也不尽相同。按化工设备在生产中的作用可将其归纳为流体输送设备、加热设备、换热设备、传质设备、反应设备及储存设备等几种类型。

1. 流体输送设备

流体输送设备是将原料、成品及半成品, 包括水和空气等各种液体和气体从一个设备输送到另一个设备, 或者使其压力升高以满足化工工艺的要求, 包括各种泵、压缩机、鼓风机以及与其相配套的管线和阀门等。这类设备的一个共同特点是它们都可用于许多场合, 不仅限于化工或炼油生产, 因此也称其为通用设备。

在炼油、化工厂中, 机泵、阀门和管线的用量是很大的。例如在炼油生产的常减压装置中, 泵的投资约占总投资的 5%; 催化裂化装置中的“三机”(增压鼓风机、气体压缩机、主风机) 的投资占总投资的 7%~8%; 加氢裂化装置中机泵的动力消耗相当于整个装置能耗的 60%。一个工艺装置所需的阀门数以千计, 管线的总长可达上万公里。所以, 常把流体输送设备喻为炼油、化工厂的“动脉”。

2. 加热设备

加热设备是将原料加热到一定的温度, 使其汽化或为其进行反应提供足够的热量。在石油化工生产中常用的加热设备是管式加热炉, 它是一种火力加热设备, 按其结构特征有圆筒炉、立式炉及斜顶炉等, 其中应用较多的是圆筒炉。管式加热炉是乙烯生产、氢气和合成氨制备等工艺过程中, 进行裂解或转化反应的“心脏”设备, 它支配着整个工厂或装置的产品质量、收率、能耗及操作周期等。石油化工生产中所用的管式加热炉不同于其他工业中所用的一般加热炉, 它是利用燃料在炉膛内燃烧时产生的高温火焰与烟气作为热源, 加热在炉管中高速流动的物料, 使其在管

内进行化学反应,或达到后续工艺过程所需求的温度。

3. 换热设备

换热设备是将热量从高温流体传给低温流体,以达到加热、冷凝、冷却的目的,并从中回收热量,节约燃料。换热设备的种类很多,按其使用目的有加热器、换热器、冷凝器、冷却器及再沸器等,按换热方式可分为直接混合式、蓄热式和间壁式。在石油化工生产中,应用最多的是各种间壁式换热设备。换热设备的投资也是很大的,在化工厂的建设中,换热设备一般占总费用的10%~20%,在炼油厂中换热设备占全部工艺设备总投资的35%~40%。换热设备在动力、原子能、冶金、轻工、制药、食品、交通及家电等工业部门也有着广泛的应用。

4. 传质设备

传质设备是利用物料之间某些物理性质,如沸点、密度、溶解度等的不同,将处于混合状态的物质(气态或液态)中的某些组分分离出来。在进行分离的过程中物料之间发生的主要是质量的传递,故称其为传质设备。这类设备就其外形而言,大多为细而高的塔状,所以通常也叫塔设备。如精馏塔、吸收塔、解吸塔、萃取塔等。按结构组成塔设备可分为板式塔和填料塔,其中板式塔应用较多。在炼油、化工生产装置中,塔设备的投资费用占整个工艺设备费用的25%~30%。

5. 反应设备

反应设备的作用是完成一定的化学和物理反应,其中化学反应是起主导和决定作用的,物理过程是辅助的或伴生的。反应设备在石油化工生产中应用也是很多的,如苯乙烯、乙烯、高压聚乙烯、聚丙烯、合成橡胶、合成氨、苯胺染料和油漆颜料等工艺过程,都要用到反应设备;在炼油生产中,如催化裂化、催化重整、加氢裂化、加氢精制等装置,都采用不同类型的反应设备。反应设备的种类很多,有的已标准化,如夹套式搅拌反应器,这种反应器在化工生产中应用较多,炼油生产中使用的反应设备大多数都是根据不同装置的具体特点和工艺要求而设计制作的专用工艺设备。

6. 储存设备

储存设备是用来盛装生产用的原料气、液体、液化气等物料的设备。这类设备属于结构相对比较简单的容器类设备,所以又称为储存容器或储罐,按其结构特征有立式储罐、卧式储罐及球形储罐等。球形储罐用于储存石油气及各种液化气,大型卧式储罐用于储存压力不太高的液化气和液体,小型的卧式和立式储罐主要作为中间产品罐和各种计量、冷凝罐用。在炼油厂的储运系统用量最多的是大型的立式储油罐,按其罐顶的构造可分为拱顶油罐、外浮顶油罐和内浮顶油罐等。

在上述各种设备中,有些设备是依靠自身的运转进行工作的,如各种泵、压缩机、风机等,称为“转动设备”,习惯上也叫做“动设备”或“机器”;有些设备工作时不运动,而是依靠特定的机械结构及工艺等条件,让物料通过设备时“自动”完成工作任务,如各种塔类设备、换热设备、反应设备、加热设备等,称为“工艺设备”,习惯上也叫做“静设备”或“设备”。对于在化工和炼油企业工作的机械人员或设备管理人员而言,有必要分清某设备是动设备还是静设备,但对于非机械人员或一般的工作人员来说,往往将化工和炼油生产中所用到的全部设备统称为“化工设备”。本书是供化工工艺类专业学生用的,主要是从使用和维护的角度认识设备的,所以本书所说的“化工设备”是广义的,包括转动设备和工艺设备。

三、化工生产对化工设备的要求

化工生产过程复杂、工艺条件苛刻,介质大多易燃、易爆、有毒、腐蚀性强,加之生产装置大型

化、生产过程具有连续性和自动化程度高等特点。因此要求化工设备既能满足工艺过程的要求,又要能安全可靠地运行,同时还应具有较高的技术经济指标及便于操作和维护的特点。

1. 工艺性能要求

化工设备是为化工工艺服务的,所以设备从结构型式和性能特点上应能在指定的生产条件下完成指定的生产任务。首先应达到工艺指标,如反应设备的反应速度、换热设备的传热量、塔设备的传质效率、储存设备的储存量等;其次还应有较高的生产效率和较低的资源消耗,化工设备的生产效率是用单位时间内单位体积所完成的生产任务来衡量的,如换热设备在单位时间内单位传热面积上的传热量、反应设备在单位时间单位容积内的产品数量等。资源消耗是指生产单位质量或体积产品所需的原料、燃料、电能等。

2. 安全性能要求

化工生产的特点要求化工设备必须有足够的安全性。国内外生产实践表明,化工设备发生事故相当频繁,而且事故的危害性极大。为了保证其安全可靠运行,防止事故的发生,化工设备必须具有足够的强度和刚度,良好的韧性、耐腐蚀性和可靠的密封性。

设备的强度是指在载荷作用下抵抗变形和破坏的能力,所以化工设备及其零部件要有足够的强度,以保证安全运行。设备是由一定的材料构成的,其安全性与材料的性能密切相关,在相同条件下,提高材料的强度可以减小尺寸、减轻重量、降低成本。但是如果过分追求高强度,不仅使材料和制造成本增加,而且高强度的材料一般而言其韧性(指材料在断裂前吸收变形能量的能力)是相对比较差的,化工设备,特别是工艺设备由于制造时的焊接等原因,不可避免地存在裂纹、夹渣、气孔等缺陷,加之使用中产生的疲劳及应力腐蚀等,这就要求制造设备的材料要有良好的韧性。所以选材时要注意材料的综合性能。

刚度是指设备在载荷作用下抵抗变形和保持自身原有形状的能力。刚度与设备结构及尺寸有关、与金属材料的种类关系不大,强度足够的设备刚度不一定满足要求。刚度不足也是化工设备失效的主要形式之一,如在法兰连接中,若法兰刚度不足而发生过度的变形,将会导致密封失效而泄露。

化工设备必须有可靠的密封性,否则易燃、易爆、有毒介质泄漏出来,不仅使生产和设备本身受到损失,而且威胁操作人员的安全、污染环境,甚至引起爆炸,造成极其严重的后果。耐腐蚀性也是保证化工设备安全运行的一个基本要求,化工生产中的酸、碱、盐腐蚀性很强,其他许多介质也都有程度不同的腐蚀性,腐蚀不仅使设备壁厚减薄,而且有可能改变材料的组织和性能,所以要选择合适的耐腐蚀材料或采取相应的防腐蚀措施,以提高设备的使用寿命和运行的安全性。

3. 使用和经济性能要求

在满足工艺要求和安全可靠运行的前提下,要尽量做到适用和经济合理。要求设备结构合理,制造简单,成本低廉,运输与安装方便,操作、控制及维护简便,基本建设投资和日常维护、操作费用低,以获得较好的综合经济效益。

第二节 化工设备常用材料

一、金属材料的力学性能

材料在外力作用下,在变形和强度方面所表现出来的性能称为材料的力学性能。金属材料

的力学性能是材料固有的特性,它与材料的化学成分、冶炼方式、加工和热处理方法及使用条件等因素有关。金属材料的力学性能是通过各种力学试验得到的,如拉伸、压缩、弯曲、冲击、疲劳、硬度等试验。

(一) 材料的弹性和刚度

拉伸试验是确定材料性能的基本试验,试验时所用的标准试件如图 1-1 所示。图中 l 为标距,是用来测量变形的工作长度, F 为拉力, d 为试件中部等径部分的直径。物体受到外力作用后其内部各部分之间产生了相互作用力,称为内力,单位面积上的内力称为应力,用 σ 表示。物体受到外力作用后其原始尺寸或形状发生了变化,这种变化称为变形,变形的量与原始尺寸的比值称为应变,用 ϵ 表示。现以 $\sigma=F/A$ (A 为试件的原始截面积) 为纵坐标, $\epsilon=\Delta l/l$ (Δl 为拉伸时的变形量) 为横坐标得出低碳钢(因为低碳钢应用较为广泛,而且拉伸试验中所表现出来的力学性能也最具有代表性和典型性) 拉伸时的应力-应变曲线,如图 1-2 所示。

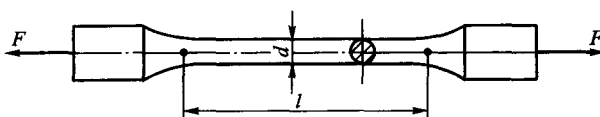


图 1-1 拉伸标准试件

由图 1-2 可见,在拉伸的初始阶段, σ 与 ϵ 的关系为直线 OA , A 点所对应的应力称为比例极限,用 σ_p 表示。这表明当应力不超过比例极限时,应力和应变成正比关系, OA 为成正比阶段,材料服从弹性定律,即胡克定律 $\sigma=E\epsilon$ 。在 OA 阶段,如果消除外力所发生的变形也随之消失,试件恢复到原状。直线 OA 的斜率 $\tan \alpha=E$,很显然比例极限是材料的应力和应变成正比关系的应力极限值。因此胡克定律只适用应力 σ 不超过比例极限 σ_p 的范围。 $E=\sigma/\epsilon$ 称为材料的弹性模量,它反映了材料抵抗弹性变形的能力,即刚度。 E 值越大、材料的刚度也就越大,越不容易发生弹性变形, E 值越小,材料的弹性越好,越容易发生弹性变形。几种材料在常温(室温)下的弹性模量见表 1-2。

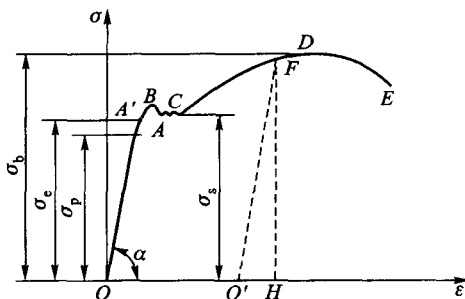


图 1-2 低碳钢的 σ - ϵ 曲线

表 1-2 几种材料在常温下的弹性模量 E $\times 10^4$ MPa

材 料	E 值	材 料	E 值
金刚石	102	铝及铝合金	7.0~8.1
硬质合金	41~55	木材(纵向)	0.9~1.7
钢	20~21.4	尼龙	0.2~0.4
铸铁	17.3~19.4	橡胶	0.001~0.01
铜及铜合金	10.5~15.3	聚氯乙烯	0.0003~0.001

超过比例极限以后,从 A 点到 A' 点, σ 与 ϵ 不再为直线关系,稍有弯曲,说明应力与应变不再

符合胡克定律,但变形仍是弹性的。这时如果消除外力,变形也随之消失,试件也能恢复到原状。试件在外力作用下,发生了变形,而当外力消除以后变形也随之消失,试件恢复到原来的形状,不会产生永久性的变形,这种性质称为材料的弹性。 A' 点所对应的应力称为弹性极限,用 σ_e 表示, OA' 为材料的弹性阶段。比例极限和弹性极限是两个不同的概念,但是在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上两点相距很近,故工程上并不严格区分,因此也可以认为,当应力不超过弹性极限时应力与应变成正比关系,即材料符合胡克定律。

(二) 材料的强度和塑性

强度是指材料抵抗塑性变形和断裂的能力。如果试件在外力作用下,发生了变形,但并未断裂,当外力消除后,变形也没有完全消失而是有一部分被永久性地保留了下来,试件也并没有恢复到它原来的形状,没有恢复而被永久性保留了下来的那一部分变形称为塑性变形,材料能够产生塑性变形的性质称为材料的塑性。

1. 强度指标

如图 1-2 所示,当应力超过弹性极限后,在应力变化不大的情况下应变却增加很快,在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上出现了一段接近水平线的小锯齿形线段。这种应力变化不大而应变显著增加的现象称为材料的屈服。 BC 为屈服阶段,此阶段所对应的最低应力称为屈服点,用 σ_s 表示。当应力达到屈服点时,材料会出现明显的塑性变形, σ_s 越大,材料越不容易发生塑性变形,所以 σ_s 是材料抵抗塑性变形能力的体现,是衡量材料强度的重要指标之一。过了屈服阶段以后,材料又恢复了抵抗变形的能力,这种现象称为材料的强化。 CD 为强化阶段, D 点所对应的应力称为抗拉强度,用 σ_b 表示。抗拉强度是材料在断裂前所能承受的最大应力, σ_b 越大,材料越不容易断裂,所以 σ_b 是衡量材料强度的又一重要指标。

工程上把 σ_s/σ_b 称为屈强比。屈强比越小的材料,即使发生了较大的塑性变形,也不至于立刻断裂。但若屈强比过小,则材料强度的有效利用率太低。有一部分金属材料在做拉伸试验时,并不像低碳钢那样有明显的屈服现象,这时通常以产生 0.2% 的塑性应变时的应力作为屈服应力,称为名义屈服强度或条件屈服强度,用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

2. 塑性指标

由于抗拉强度是材料在断裂前所能承受的最大应力,所以在图 1-2 中过 D 点以后,塑性变形急剧增加,试件出现颈缩现象直至 E 点被拉断。出现颈缩后,使试件继续伸长所需的拉力也相应减小,用试件的原始横截面积 A 算出的应力 σ 也随之下降,所以曲线 DE 呈下垂之势。

试件被拉断后,弹性变形消失,塑性变形保留了下来。试件标距伸长量与原始标距的百分比称为材料的断后伸长率,用 δ 表示。

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 l_1 ——拉断试件对接后测出的标距长度,mm;

l ——试件的原始标距,mm。

试件拉断后缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为材料的断面收缩率,用 ψ 表示。

$$\psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 A ——试件的原始横截面积, mm^2 ;
 A_1 ——试件断口处的横截面积, mm^2 。

δ 和 ψ 都是衡量材料塑性性能的指标, 其值越大, 说明材料在断裂前产生的塑性变形越大, 材料的塑性越好。当试件的标距 l 是其直径 d 的 5 倍时, 断后伸长率用 δ_5 表示; 当 l 是 d 的 10 倍时, 断后伸长率就用 δ 表示。

3. 冷作硬化

如果将试件拉伸到强化阶段的某点, 如图 1-2 中的 F 点, 停止加载而逐渐卸载至零, 此时, 应力和应变则沿着几乎与 OA 平行的直线 FO' 回到 O' 点, 这说明材料在卸载过程中应力与应变成线性关系。 F 点所对应的总应变是 OH , 其中 $O'H$ 是恢复了的弹性应变, OO' 是保留下来的塑性应变。卸载后短期内重新加载, 则应力和应变将沿着 $O'F$ 返回 F 点, 以后仍沿曲线 FDE 变化, 直至拉断。可见再次加载时, 材料在 F 点以前的变形是弹性的, 过 F 点以后才出现塑性变形, 这种现象称为材料的冷作硬化。冷作硬化提高了材料在弹性阶段的承载能力, 但降低了材料的塑性。

(三) 材料的硬度

材料抵抗他物压入或划痕的能力称为硬度。硬度可以通过硬度试验进行测定, 根据测定方法的不同, 有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度, 常用的表示符号分别是 HBS、HRC 及 HV。硬度是表征材料性能的一个综合物理量, 通常材料的硬度越高, 其耐磨性越好。

(四) 材料的冲击韧性

材料抵抗冲击载荷的能力称为冲击韧性。对承受动载荷作用的零部件除要求具备足够的强度、塑性和硬度外, 还应有足够的韧性。材料韧性的大小反映了材料在断裂前吸收变形能量的多少, 常用的冲击韧性指标是冲击功, 用 A_{KV} 表示, 其值可通过常温下的冲击试验测得, 单位面积上的冲击吸收功称为冲击韧度, 用 α_K 表示。

(五) 温度对材料力学性能的影响

一般而言, 随着温度的升高, 钢材的强度下降、塑性提高。材料在高温情况下, 如碳钢在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以上、低合金钢在 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 以上、不锈钢在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 应该考虑蠕变的问题。蠕变是指材料在高温下, 受某一固定应力的作用, 随着时间的延续所发生的缓慢而连续不断的塑性变形的现象。材料在高温下抵抗塑性变形能力的指标称为蠕变极限, 用 σ_n 表示; 在高温下抵抗断裂能力的指标称为持久强度, 用 σ_b 表示。 σ_n 和 σ_b 的值与材料、温度及允许的蠕变速度和持续而不断裂的时间有关。如在石油化工中常规定: 某种材料在某温度下, 经过 10^5 h 其蠕变变形量不超过 1% 时所对应的应力值称为这种材料在该温度、该蠕变速度条件下的蠕变极限; 在某温度下经过 10^5 h 断裂时所对应的应力值称为这种材料在该温度、该持续时间内的持久强度。在低温情况下, 如 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 材料的强度提高而塑性和韧性降低, 使材料产生冷脆性。

二、化工设备常用金属材料

1. 碳钢

工业上使用的金属材料大多是由金属与金属、金属与非金属熔合在一起的合金。以铁为主, 碳的质量分数小于 2.11% 并含有少量的锰、硅、硫、磷等元素的合金称为碳钢, 按 GB/T 221-2000 的规定又称为非合金钢。

碳的质量分数 $\leq 0.25\%$ 时称低碳钢,这种钢强度较低,但塑性好、焊接性能好,在化工设备中广泛应用。碳的质量分数在 $0.25\% \sim 0.60\%$ 时称为中碳钢,这种钢强度、硬度高,塑性、韧性稍差,焊接性较差,不适宜制造化工工艺设备的壳体,多用于制造传动设备的零件。碳的质量分数 $\geq 0.60\%$ 时称高碳钢,这种钢强度、硬度很高,塑性差,焊接性差,常用来制造弹簧、刀具及钢丝绳等。

碳钢中硫的存在会使钢产生热脆性,磷的存在会使钢产生冷脆性,因此一般认为硫和磷是有害元素,硫和磷的质量分数越小,碳钢的品质越好。当碳钢中硫和磷的质量分数不超过 0.045% 时称为普通碳钢,硫和磷的质量分数不超过 0.035% 时称为优质碳钢,硫和磷的质量分数不超过 0.025% 时称为高级优质碳钢。化工设备中常用的普通碳钢见表1-3、优质碳钢见表1-4。

表1-3 普通碳钢的力学性能及应用

钢号	质量等级	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	性能及应用
Q195	—	195	315	33	用于制作承受载荷不大的金属结构件、铆钉、垫圈、地脚螺栓、冲压件及焊接件等
Q215	A,B	215	335	31	
Q235	A,B C,D	235	375	26	有良好的强度、塑性和焊接性,用于制作一般的金属结构件、钢筋、型钢、螺栓、螺母、轴、非受压容器。B、C在限定条件下可制作压力容器的壳体
Q255	A,B	255	410	24	强度较高,用于制作承受中等载荷的零件,如键、销、转轴、拉杆及链轮等
Q275	—	275	490	20	

表1-4 部分优质碳钢的力学性能及应用

钢号	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	性能及应用
10	335	205	31	55	强度、硬度低,塑性、韧性好,冷塑性加工性和焊接性优良,切削加工性欠佳
20	410	245	25	55	
40	570	335	19	45	综合力学性能好,热塑性加工性和切削性较差,冷变形能力和焊接性中等,多在调质或正火下使用,45钢应用最广
45	600	355	16	40	
60	670	400	12	35	强度、硬度高,耐磨性、弹性好,切削性能中等,焊接性能不佳,可做弹簧、钢丝绳等
65	695	410	10	30	
60Mn	695	410	11	35	淬透性和强度较高,可用于制造截面尺寸较大的零件,65Mn常用
65Mn	735	430	9	30	

表1-3中Q235-B和Q235-C在限定条件下可用其制作压力容器的壳体。Q235-B的使用温度为 $0 \sim 350^\circ\text{C}$,用作压力容器壳体时厚度不超过 20 mm ,容器的设计压力不得超过 1.6 MPa ,不得用于毒性程度为高度或极度危害介质的压力容器;Q235-C的使用温度为 $0 \sim 400^\circ\text{C}$,用作压力容器壳体时厚度不超过 30 mm ,容器的设计压力不得超过 2.5 MPa 。

2. 合金钢

合金钢是在低碳钢的基础上,加入了一定量的合金元素而得到的。常加的元素有锰、钼、铌、钒、钛、镍、铬、硅、硼、钨、铝等。当合金元素总质量分数 $\leq 5\%$ (一般不超过 3%)时称为低合金

钢。低合金结构钢的牌号由“平均碳的质量分数的万分数+元素符号+该元素平均质量分数的百分数”表示,当钢中某合金元素的平均质量分数不超过 1.5%时,牌号中只标出元素符号而不标明质量分数;当质量分数大于 1.5%而不超过 2.5%时,在该元素后只标整数 2;以此类推。如 09Mn2V 的平均碳的质量分数为 0.09%、锰的质量分数为 1.4%~1.8%、钒的平均质量分数在 1.5%以下(0.04%~0.1%)。化工设备常用低合金钢见表 1-5 和表 1-6。

表 1-5 压力容器用碳素钢和低合金钢(GB 6654)

钢号	使用状态	厚度/mm	使用温度/℃	说明
20R	热轧或正火	6~100	-20~475	①钢号后的“R”表示是压力容器用钢 ②20R 为碳素钢,其他均为低合金钢 ③15MnVNR 与 16MnR 和 15MnVR 相比,在高温下过热敏感性低且强度高 ④18MnMoNbR、13MnNiMoR 是高强度钢,在高压容器中用得较多 ⑤15CrMoR 具有良好的热强性、热稳定性和高温抗氧化性
16MnR		6~120	-20~475	
15MnVR		6~60	-20~400	
15MnVNR	正火	6~60	-20~400	
18MnMoNbR	正火加回火	30~100	-20~475	
13MnNiMoR		30~120	-20~400	
15CrMoR		6~100	-20~550	

表 1-6 低温压力容器用低合金钢(GB 3531)

钢号	使用状态	厚度/mm	使用温度/℃	最低冲击试验温度/℃
16MnDR	正火	6~36	-40~350	-40
		36~100	-30~350	-30
15MnNiDR	正火,正火加回火	6~60	-45~100	-45
09Mn2VDR	正火,正火加回火	6~36	-50~100	-50
09MnNiDR	正火,正火加回火	6~60	-70~350	-70
07MnNiCrMoVDR	调质	16~50	-40~350	-40

不锈钢是化工设备中使用较多的一种合金钢,其牌号由“平均碳的质量分数的千分数+元素符号+该元素平均质量分数的百分数”表示,如 1Cr13 的平均碳的质量分数为 0.10%、铬的平均质量分数为 13%。当碳的质量分数为 0.03%~0.10%时,用 0 表示,碳的质量分数 \leq 0.03%时,用 00 表示。如 0Cr18Ni10Ti 钢平均碳的质量分数为 0.03%~0.10%,00Cr19Ni10 钢平均碳的质量分数 \leq 0.03%。化工设备常用不锈钢见表 1-7。

表 1-7 不锈钢的耐腐蚀性及应用

钢号	耐腐蚀性	应用举例
0Cr13	耐水蒸气、碳酸氢铵及 500℃以下含硫石油等介质的腐蚀	制作设备衬里、内部元件垫片等
1Cr13	在 30℃以下的弱腐蚀性介质中有良好的耐腐蚀性,在淡水、蒸汽和潮湿的大气中有足够的耐蚀性	在 450℃以下可制造法兰、汽轮机的叶片、螺栓和螺母等零件
1Cr17	对氧化性酸(如一定温度和浓度的硝酸)有良好的耐蚀性	制作腐蚀性不强的防污染设备、家庭用品、家用电器部件

续表

钢号	耐腐蚀性	应用举例
00Cr18Ni8	对氧化性酸有强的耐蚀性,对碱液及大部分有机酸也有一定的耐蚀性,有一定耐晶间腐蚀的能力	制作食品设备、化工设备、输酸管道及容器等
00Cr18Ni10	耐硝酸、大部分有机酸和无机酸的水溶液及碱的腐蚀,能耐晶间腐蚀	制作硝酸、维尼龙及制药等工业设备和管道
0Cr17Ni12Mo2	在海水和其他介质中耐蚀性比0Cr18Ni9Ti好,主要用作耐小孔腐蚀,高温下有较高的强度	制作锅炉过热器、蒸汽管道、高温耐蚀螺栓等
1Cr18Ni9Ti	在不同温度和浓度的各种强腐蚀性介质中有较好的耐蚀性	广泛用于制作耐酸设备、管道及衬里等

3. 铸铁

铸铁是碳的质量分数 $>2.11\%$ 的铁碳合金,工业上常用的铸铁碳的质量分数一般在 $2.5\% \sim 4.5\%$ 之间,而锰、硅、硫及磷的质量分数都高于钢。有时为了改善其性能,还可加入铬、铜、铝等元素,得到合金铸铁。根据碳在铸铁中的存在形式有白口铸铁、灰口铸铁和麻口铸铁之分,其中灰口铸铁应用较多。在灰口铸铁中碳大多以石墨的形式存在,断口呈灰色,根据石墨的存在形式又可将灰口铸铁分为普通灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和蠕墨铸铁。

铸铁具有良好的铸造性、减振性、耐磨性和切削加工性,而且生产工艺简单、成本低,在化工设备,特别是转动设备中有着广泛的应用。灰铸铁可用于制造机器的底座、带轮、不太重要的齿轮、阀体、管线附件、飞轮、气缸体、轴承座等,也可用来制造使用温度在 $-15 \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的常压容器,但不能用于储存剧毒或易燃的物料。灰铸铁的牌号是由“HT+数字”表示,其中“HT”是“灰铁”两字的汉语拼音字头,数字表示最低抗拉强度。如HT200,是最小抗拉强度为200 MPa的灰铸铁。球墨铸铁可用于制造曲轴、连杆、摇臂、齿轮、缸体、阀体、法兰等。球墨铸铁的牌号是由“QT+两组数字”表示,其中“QT”是“球铁”两字的汉语拼音字头,前一组数字表示最低抗拉强度,后一组数字表示最小断后伸长率。如QT450-10,是最小抗拉强度为450 MPa、最小断后伸长率为10%的球墨铸铁。

三、非金属材料

介质腐蚀性强是石油化工生产的特点之一,所以一些具有优良耐腐蚀性的非金属材料在石油化工生产中得到了广泛的应用。非金属材料既可单独做结构材料,又能做金属设备的保护衬里和涂层,也可做设备的密封材料和保温材料。化工设备中常用的非金属材料有化工陶瓷、化工搪瓷、塑料、玻璃钢等。

1. 化工陶瓷

化工陶瓷是以天然硅酸盐矿物为原料,经粉碎、压制成形和高温焙烧而成的。它具有耐磨、耐腐蚀性好,耐高温和抗氧化能力强等优点;但脆性大、热稳定性较差。化工陶瓷除了氢氟酸和含氟的其他介质以及热浓磷酸和碱液外,几乎能耐所有化学介质(如热浓硝酸、硫酸等)的腐蚀,大多用做设备的耐酸衬里,也可用其制造塔器、容器、管路、泵及化工生产设备和腐蚀介质的输送设备。

2. 化工搪瓷

化工搪瓷是将含硅较高的瓷釉涂敷在金属的表面,经 900 °C 左右的高温烧制,使瓷釉紧紧附着在金属胎的表面与其形成一个整体。化工搪瓷具有优良的耐腐蚀性能,除氢氟酸、热磷酸和强碱外,能耐各种浓度的酸、盐类及弱碱的腐蚀。目前,我国已用化工搪瓷制造反应釜、储罐、换热器、蒸发器、塔器和阀门等设备。化工搪瓷具有金属的力学性能,但搪瓷层较脆易碎裂;而且不能用火焰直接加热。

3. 塑料

塑料是以高分子合成树脂为基本原料,在一定温度下塑制成形,并在常温下能保持其形状不变的高聚物。塑料具有密度小、电绝缘性好、耐腐蚀、耐磨等特点,塑料的品种繁多、应用广泛,化工行业中常用的塑料见表 1-8。

表 1-8 化工行业常用塑料的性能及应用

名称	性能	应用
硬聚氯乙烯	能耐稀硝酸、稀硫酸、盐酸、碱、盐等的腐蚀,使用温度为 -15~60 °C;但在四氢呋喃和环己酮中会迅速溶解	可制作容器、塔、储槽、泵、通风 机、管道、管件、阀门等
聚乙烯塑料	电绝缘性、防水性、化学稳定性好,室温下,除硝酸外能抗各种酸、碱、盐的腐蚀,可在 100 °C 以内使用	可制作管道、管件、阀门等
耐酸酚醛塑料	有较好的耐腐蚀性和耐热性,能耐多种酸、盐和有机溶剂的腐蚀,使用温度为 -30~130 °C	可制作容器、塔、储槽、搅拌器、 泵、管道、阀门等
聚四氟乙烯	有很好的绝缘性和耐腐蚀性,能耐大多数强酸、强碱、强氧化剂及溶液,使用温度为 -180~250 °C	可制作填料、垫圈、密封圈、泵、管 道、阀门等

第三节 化工设备的腐蚀与防护

一、腐蚀的概念及类型

材料与其周围的环境发生作用而遭受破坏的现象称为腐蚀。按腐蚀的机理可分为化学腐蚀和电化学腐蚀;按腐蚀破坏的特征可分为均匀腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、晶间腐蚀等。

1. 均匀腐蚀

腐蚀沿金属表面均匀进行,腐蚀的结果使设备壁厚减薄。如碳钢在强酸、强碱中的腐蚀就属于此类。这种腐蚀的危害性不大,可以通过在设计时增加设备的壁厚来保证设备具有一定的寿命。

2. 缝隙腐蚀

在腐蚀性介质中,若金属与金属或与非金属之间存在很小的缝隙,则缝隙内的介质处于滞流状态,使缝内的材料产生腐蚀。如法兰的连接面之间、螺母或铆钉的底面、焊缝的气孔内及锈层的缝隙间、未进行贴胀的换热管与管板孔之间的间隙等。几乎所有的介质、所有的金属都会产生缝隙腐蚀,其中不锈钢和铝在含有氯化物的中性介质中最易发生缝隙腐蚀,一般的介质温度越高,越容易引起缝隙腐蚀。

3. 晶间腐蚀

大多数的金属都是由晶粒组成的,晶粒与晶粒之间的边界称为晶界。腐蚀主要沿着晶界或晶界的邻近区域发生,而晶粒本身的腐蚀很轻微,这种腐蚀称为晶间腐蚀。发生了晶间腐蚀的材料,晶粒之间的结合力大大降低,甚至可使材料的机械强度完全丧失,虽然表面上看起来材料完整无损,但在稍大力量的敲击下便成碎块。由于晶间腐蚀不易被发现,所以容易造成设备的突然破坏,危害性很大。不锈钢、铝合金、镍基合金都对晶间腐蚀敏感性很高,而奥氏体不锈钢又是制造化工设备的常用材料,因此对它的晶间腐蚀问题应予以足够的重视。

4. 应力腐蚀

应力腐蚀是金属材料在拉应力和特定的介质共同作用下所遭受的一种破坏形式。金属发生应力腐蚀时,大部分表面并未遭受腐蚀,只是在局部区域出现一些由表及里的细裂纹,这些裂纹可能是穿过晶粒的,也可能是沿晶界延伸的,裂纹的主干是与最大拉应力垂直的。随着裂纹的扩展,材料的受力截面减小、应力增加,最后导致机械断裂。导致产生应力腐蚀的拉应力可以是设备在使用过程中所承受的各种应力,也可以是设备在制造过程中的残余应力,如焊接应力、变形应力、装配应力等。并不是金属材料在所有介质中都会发生应力腐蚀,只有材料和介质形成了某种组合时,应力腐蚀才会发生。常见的能产生应力腐蚀的一些材料与介质的组合见表 1-9。

表 1-9 产生应力腐蚀的材料与介质的组合

金属材料	腐蚀介质
碳钢和低合金钢	NaOH 溶液、硝酸盐溶液、含 H ₂ S 和 HCl 溶液、42% MgCl ₂ 溶液、海水、海洋大气、工业大气、NH ₄ Cl 溶液等
奥氏体不锈钢	氯化物溶液、NH ₃ 气和溶液、NaOH、KOH、H ₂ SO ₄ + CuSO ₄ 浓缩锅炉水、海水、海洋大气等
铜和铜合金	含氨蒸气、汞盐溶液、湿 H ₂ S、含 SO ₂ 大气、水蒸气等
镍和镍合金	NaOH 水溶液
铝合金	熔融 NaCl、NaCl 水溶液、海水、水蒸气、含 SO ₂ 大气等

5. 化学腐蚀

金属与干燥的气体或非电解质溶液发生化学作用而引起的腐蚀称为化学腐蚀。如管式加热炉的炉管在高温作用下的氧化,金属设备在苯、含硫石油、乙醇等非电解质溶液中的腐蚀,金属钠在氯化氢气体中的腐蚀等都属于化学腐蚀。化学腐蚀的特点是在反应过程中只有氧化-还原反应,没有电流产生,而且温度和腐蚀介质的浓度越高,腐蚀的速率就越快。化学腐蚀后在金属表面形成了一层氧化膜(腐蚀产物),若这层氧化膜在腐蚀介质中是稳定的,又能完整而牢固地附着在金属表面,就可以阻止外部介质与金属继续发生化学反应,从而起到保护金属的作用。

6. 电化学腐蚀

金属与电解质溶液发生电化学作用而引起的腐蚀称为电化学腐蚀。如金属在酸、碱、盐溶液,土壤、海水中的腐蚀等都属于电化学腐蚀。石油化工生产中的腐蚀破坏绝大部分是由电化学腐蚀引起的。

电化学腐蚀是由金属发生腐蚀电池作用而引起的,腐蚀过程中有电流产生。构成腐蚀电池:一是要有电位差,二是要有电解质,三是要有连续传递电子的回路。石油化工生产中的介质绝大