

普通高等院校机电工程类规划教材

机械与过程装备 制造技术

主 编 王 昌

副主编 贾慧灵

参 编 孟智慧 韩军 陈晓娟

主 审 汪建新

普通高等院校机电工程类规划教材

机械与过程装备 制造技术

主 编 王 昌

副主编 贾慧灵

参 编 孟智慧 韩军 陈晓娟

主 审 汪建新

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书根据机械类专业以及过程装备与控制工程(原“化工设备与机械”)专业教学改革的基本要求,在总结各高校教改经验并结合编者多年的教学实践,考虑目前高等工科院校课程体系改革的需要以及已毕业学生反馈意见的基础上编写而成。

全书除绪论外分为7章,内容包括:机械制造过程基础知识、过程装备制造与检测、机械加工工艺规程设计、机械装配工艺规程设计、机械加工质量分析与控制、数控加工编程技术、现代机械制造技术的发展。

全书结构严谨,系统性强,对机械与过程装备制造技术课程的体系架构进行了一定的改革尝试,主要考虑了宽基础、大口径的知识体系结构和有兴趣读者的自学需要,力求较全面地反映机械与过程装备制造技术的发展规律,使之有益于培养读者的创造性思维,提高他们对装备制造业的创新能力。

本书可作为高等工科院校机械类专业和过程装备与控制工程专业的基本教材,同时兼顾了机械工程和化工设备类高职高专教学的要求,可供高职高专及成人高校选用,也可作为对机械工程与过程装备类知识有兴趣的读者的自学和参考用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机械与过程装备制造技术/王昌主编.--北京:清华大学出版社,2011.6

(普通高等院校机电工程类规划教材)

ISBN 978-7-302-25230-6

I. ①机… II. ①王… III. ①机械过程:化工过程—化工设备—制造—高等学校—教材 IV. ①TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 061875 号

责任编辑:庄红权

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544



印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市漂源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:23.75 字 数:542千字

版 次:2011年6月第1版 印 次:2011年6月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:42.00元

产品编号:041439-01

前 言

根据机械类专业以及过程装备与控制工程(原“化工设备与机械”)专业教学改革的基本要求,在总结各高校教改经验和我们多年的教学实践以及已毕业学生反馈意见的基础上,我们编写了这本以满足机械设计制造及其自动化和过程装备与控制工程专业教学为主,兼顾车辆工程、工业设计以及高职高专等相关专业教学的机械与过程装备制造技术教材,以期更大程度、更大范围地满足教学和社会的需求。

机械与过程装备制造技术是我国高等院校机械设计制造及其自动化专业和过程装备与控制工程专业制造工艺教育的一门重要的技术基础课。在汲取同类教材宝贵经验的基础上,本书对该课程的体系和结构进行了一定的改革,主要考虑了宽基础、大口径的知识体系结构和有兴趣读者的自学需要,力求较全面地反映机械与过程装备制造技术的发展规律,使之有益于培养读者的创造性思维,提高他们对装备制造业的创新能力。

本书有以下特点:

(1) 充分考虑机械设计制造及其自动化、过程装备与控制工程、车辆工程、工业工程、物流工程等本科专业以及高职高专等相关专业的教学,力求满足上述各类专业的要求。

(2) 在知识体系上力求首先给读者一个机械制造的总概念,然后再分述,有利于提高学习效果及掌握知识的系统性,且留有足够的内容供因缺少学时而又有学习兴趣的学生和读者选修、选学。

(3) 全书以机械及过程装备制造工艺为教学重点,增加了对数控编程技术、精密与超精密加工技术、先进制造技术以及非传统加工技术的内容介绍,以方便机械设计制造及其自动化、过程装备与控制工程、车辆工程、物流工程、工业设计等本科专业以及高职高专等相关专业依据自身的教学要求进行教学内容的选讲与自学,具有鲜明的综合式宽口径教育的特色。

(4) 通过本书,过程装备与控制工程专业的学生除了学习过程装备制造与检测基础知识外,还可以系统地学习机械制造的基础知识以及了解机械制造技术的进展;而机械设计制造及其自动化等其他专业的学生也可以适当了解过程装备制造知识,以利于毕业后跨行业就业。

(5) 全书内容详略得当,力求贯彻可持续发展的观点,运用系统工程理论方法进行内容的编排,有利于提高读者分析问题和解决问题的能力。

全书由王昌主编并统稿,贾慧灵任副主编,孟智慧、韩军、陈晓娟参编。具体分工如下:绪论由汪建新编写;第1章由孟智慧编写;2.1节~2.4节由贾慧灵编写,2.5节~2.10节由王昌编写;第3章和第6章由韩军编写;第4章和第5章由陈晓娟编写;第7章由王昌编写。

本书由汪建新教授主审。在本书编写过程中得到李强教授的全力指导和帮助,同时还得到天津大学、大连理工大学、内蒙古科技大学、南京化工职业技术学院等院校有关领

导及相关同志的鼓励、支持和帮助,研究生王久旺、李静、郝俊信参与部分编辑工作,在此对各位领导、老师、同志以及有关参考教材的作者表示深深的敬意和感谢。

教材的编写是一个探索和追求的过程。由于编者的水平与经验所限,书中难免存在错误和不妥之处,殷切地希望广大师生及读者提出宝贵意见,以便我们在今后的再版中不断改进和完善。

主 编

2011 年 4 月

目 录

绪论	1
第 1 章 机械制造过程基础知识	8
1.1 生产与制造	8
1.2 成组技术	8
1.3 机械制造工艺概论	15
1.4 机械制造工艺过程	16
1.5 零件的机械加工方法	17
1.5.1 零件的种类及组成	17
1.5.2 组成零件的表面	18
1.5.3 常用加工方法	18
1.6 切削用量与切削层截面参数	33
1.7 基准、定位与夹紧	34
1.7.1 概述	34
1.7.2 定位	35
1.7.3 工件在夹具中的夹紧	48
1.8 金属切削机床	49
1.8.1 机床的分类	49
1.8.2 机床型号的编制	51
1.9 金属切削刀具	54
1.9.1 刀具材料	54
1.9.2 车刀结构及几何参数	58
思考题与习题	61
第 2 章 过程装备制造与检测	63
2.1 压力容器的发展	63
2.2 钢制压力容器的焊接	65
2.2.1 焊接接头	65
2.2.2 常用焊接方法及其焊接工艺	75
2.3 常用钢材的焊接	91
2.3.1 碳钢的焊接	91
2.3.2 低合金钢的焊接	93

2.3.3 奥氏体不锈钢的焊接	96
2.3.4 钛及钛合金的焊接	97
2.3.5 异种金属的焊接	97
2.4 受压壳体制造的准备	98
2.4.1 钢材的预处理	98
2.4.2 划线	104
2.5 成形加工	109
2.5.1 筒节的弯卷成形	109
2.5.2 封头的成形	119
2.5.3 管子的弯曲	136
2.6 典型压力容器	146
2.6.1 管壳式换热器	146
2.6.2 高压容器的制造	153
2.7 过程装备制造的定期检测	157
2.7.1 定期检测	157
2.7.2 常规检测	159
2.8 射线检测及缺陷等级评定	161
2.8.1 X射线、 γ 射线的产生和性质	161
2.8.2 射线检测的原理和准备	162
2.8.3 焊缝射线透照缺陷等级评定	169
2.8.4 射线防护	170
2.9 超声波检测及缺陷等级评定	171
2.9.1 超声波检测的基础知识	171
2.9.2 超声波检测缺陷	182
2.9.3 超声检测焊接接头的缺陷等级评定	188
2.10 表面检测及缺陷等级评定	189
2.10.1 磁粉检测	190
2.10.2 渗透检测	196
思考题与习题	199
第3章 机械加工工艺规程设计	201
3.1 制定工艺规程的步骤和方法	201
3.1.1 机械加工工艺过程	201
3.1.2 生产纲领和生产类型	203
3.1.3 机械加工工艺规程	205
3.1.4 工件的装夹	208
3.1.5 工件的基准	209
3.2 定位基准的选择	210

3.3	加工路线的拟定	213
3.4	分析零件的结构工艺性	216
3.4.1	概述	216
3.4.2	零件结构工艺性设计的一般原则	217
3.4.3	毛坯的选择	222
3.5	工序集中与工序分散	223
3.6	工序尺寸的确定	225
3.7	工艺尺寸链	227
3.8	计算机辅助工艺过程设计	241
3.9	工艺过程经济性分析	247
	思考题与习题	250
第4章	机械装配工艺规程设计	252
4.1	机械装配概述与装配尺寸链	252
4.1.1	装配工作的基本概念	252
4.1.2	装配精度与装配尺寸链	255
4.2	装配工艺规程制定	256
4.3	装配方法及其选择	257
4.3.1	互换装配法	257
4.3.2	分组装配法	259
4.3.3	修配装配法	261
4.3.4	调整修配法	264
4.3.5	自动装配	266
4.3.6	装配方法的选择	267
	思考题与习题	267
第5章	机械加工质量分析与控制	269
5.1	概述	269
5.2	机械加工的经济精度	271
5.3	工艺系统几何精度对加工精度的影响	278
5.3.1	加工原理误差	278
5.3.2	机床误差	278
5.3.3	刀具与夹具误差	282
5.3.4	调整误差	283
5.4	工艺系统受力变形对加工精度的影响	284
5.4.1	基本概念	284
5.4.2	夹紧力、重力、传动力和惯性力引起的加工误差	285
5.4.3	机床部件刚度及其影响因素	287

5.5	工艺系统热变形及其对加工精度的影响	288
5.6	加工误差的分析	290
	思考题与习题	296
第 6 章	数控加工编程技术	298
6.1	概述	298
6.1.1	数控编程的作用与目的	298
6.1.2	数控编程的内容和步骤	298
6.1.3	数控编程的方法	299
6.2	数控编程的基本知识	300
6.2.1	数控加工程序的结构	300
6.2.2	程序段格式	300
6.2.3	数控机床的坐标系	302
6.3	常用功能代码	303
6.3.1	准备功能 G 代码	304
6.3.2	辅助功能 M 代码	306
6.3.3	F、S、T 代码	308
6.4	常用准备功能指令的编程方法	308
6.4.1	与坐标系相关的指令	308
6.4.2	运动控制指令	309
6.4.3	刀具补偿指令	311
6.4.4	固定循环指令	311
6.5	数控加工程序的编制	312
6.5.1	数控车床的程序编制	312
6.5.2	数控铣床的程序编制	314
6.5.3	加工中心的程序编制	316
	思考题与习题	318
第 7 章	现代机械制造技术的发展	320
7.1	制造自动化技术	320
7.1.1	柔性制造系统	321
7.1.2	自动检测技术	326
7.2	现代精密制造技术	327
7.3	现代制造生产模式	330
7.3.1	并行工程	330
7.3.2	智能制造	335
7.3.3	绿色制造	337
7.3.4	虚拟制造	345

7.3.5 云制造.....	350
7.4 非传统加工技术	352
7.4.1 电火花加工.....	353
7.4.2 高能束加工.....	355
7.4.3 复合加工.....	361
7.4.4 水喷射加工.....	365
思考题与习题.....	367
参考文献.....	368

绪 论

1. 机械制造业的发展

人类文明的发展与制造业的进步密切相关。早在石器时代,人类就开始利用天然石料制作工具,用其猎取自然资源为生。到了青铜器和铁器时代,人们开始采矿、冶炼、铸锻工具,并开始制作纺织机械、水利机械、运输车辆等,以满足以农业为主的自然经济的需要。此时,采用的是作坊式的以手工劳动为主的生产方式。

直至18世纪70年代,以瓦特改进蒸汽机为代表,引发了第一次工业革命,产生了近代工业化的生产方式,手工劳动逐渐被机器生产所代替,机械制造业逐渐形成规模。到19世纪中叶,电磁场理论的建立为发电机和电动机的产生奠定了基础,从而迎来了电气化时代。以电力作为动力源,使机械结构发生了重大的变化。与此同时,互换性原理和公差制度应运而生。所有这些使机械制造业发生了重大变革,并进入了快速发展时期。

20世纪初,内燃机的发明,使汽车开始进入欧美家庭,引发了机械制造业的又一次革命。流水生产线的出现和泰勒科学管理理论的产生,标志着机械制造业进入了大批量生产(mass production)的时代。以汽车工业为代表的大批量自动化生产方式使得生产率获得极大的提高,从而使机械制造业有了更迅速的发展,并开始成为国民经济的支柱产业。

第二次世界大战后,电子计算机和集成电路的出现,以及运筹学、现代控制理论、系统工程等软科学的产生和发展,使机械制造业产生了一次新的飞跃。传统的自动化生产方式只有在大批量生产的条件下才能实现,而数控机床的出现则使中小批量生产的自动化成为可能。科学技术的高速发展,促进了生产力的极大提高。传统的大批量生产方式已难以满足市场多变的需要,多品种、中小批量生产日渐成为制造业的主流生产方式。

20世纪80年代以来,信息产业的崛起和通信技术的发展加速了市场的全球化进程,市场竞争更加激烈。为了适应新的形势,在机械制造领域提出了许多新的制造哲理和生产模式,如计算机集成制造、精良生产、并行工程、敏捷制造等。

计算机集成制造是信息技术和传统制造技术相结合的产物,其宗旨是提高制造企业生产率和对市场的响应能力,其核心在于利用信息技术使企业的各个自动化孤岛和生产全过程集成起来,以取得更大的效益。

精良生产是对日本丰田公司生产方式的一种描述,其实质是除掉生产活动中的一切冗余,实行准时生产(just in time, JIT)。

并行工程是对产品及相关过程(制造过程和支持过程)进行并行、一体化设计的一种系统化的工作模式。这种工作模式力图使设计者从一开始就考虑到产品全生命周期中的所有因素,以最大限度地缩短产品开发周期,减少设计失误。

敏捷制造提出“虚拟企业”的概念,意在建立柔性化、模块化的设计方法和制造系统的基础上,实现企业内部与外部更广泛的集成,以进一步增强快速响应市场的能力和形成竞争优势。

进入 21 世纪,机械制造业正向着自动化、柔性化、集成化、智能化、网络化、清洁化以及领先制造的方向发展。

2. 机械制造业在国民经济中的地位

如前所述,制造业是生产离散型产品的企业,而离散型产品又是具有直接使用价值的产品,与生产活动和人民生活息息相关。当今制造业不仅是科学发现和技术发明转换为现实规模生产力的关键环节,并已成为为人类提供生活所需物质财富和精神财富的重要基础。良好的人居环境,充分的能源供给,便捷的交通和通信设施,丰富多彩的印刷出版、广播影视和网络媒体,优良的医疗保健手段,可靠的国家和社区安全以及抵抗自然灾害的能力等,均需要制造业的支持。

制造业在国民经济中的地位可以用以下几个简单的数字来进行说明:美国 68% 的财富来源于制造业;日本约 49% 的国民经济总产值由制造业提供。在先进的工业化国家中,约有 1/4 的人口从业于制造业,在非制造业部门中,又有约半数人员的工作性质与制造业密切相关。

在整个制造业中,机械制造业占有特别重要的地位。因为机械制造业是国民经济的装备部,国民经济各部门的生产水平和经济效益在很大程度上取决于机械制造业所提供的装备的技术性能、质量和可靠性。因而,各发达国家都把发展机械制造业放在了突出的位置上。

纵观世界各国,任何一个经济发达的国家,无不具有强大的机械制造业,许多国家的经济腾飞,机械制造业功不可没。其中,日本最具有代表性。第二次世界大战后,日本先后提出“技术立国”和“新技术立国”的口号,对机械制造业的发展给予全面的支持,并抓住机械制造的关键技术——精密工程、特种加工和制造系统自动化,使日本在战后短短 30 年里,一跃成为世界经济大国。

与此相反,美国自 20 世纪 50 年代以后,曾在相当长的一段时间内忽视了制造技术的发展。美国政府历来认为生产制造是企业界的事,政府不必介入。而美国学术界则只重视理论成果,忽视实际成果的转化,一部分学者还错误地主张应将经济重心由制造业转向高科技产业和第三产业。结果导致美国经济严重衰退,竞争力明显下降,在汽车、家电等行业不如日本。

直到 20 世纪 80 年代,美国政府才开始认识到问题的严重性,白宫的一份报告指出:美国在重要的、高速增长的技术市场上失利的一个重要原因是美国没有把自己的技术应用到制造上。自此,美国政府在进行深刻反省之后,重新确立了制造业的地位,并对制造业给予了实质性的和强有力的支持,制订并实施了一系列振兴美国制造业特别是机械制造业的计划。其效果十分显著,至 1994 年,美国汽车产量重新超过日本,并重新占领了欧美市场。

3. 我国机械制造业面临的机遇和挑战

我国是一个文明古国。早在 50 万年以前的远古时代,已开始使用石器和钻木取火的工具。公元前 16—11 世纪的商代,已出现可转动的琢玉工具。车削加工和车床雏形在我国出现早于欧洲近千年。到了明代,在古天文仪器加工中,已采用铣削和磨削加工方法,并出现了铣床、磨床和刀刃刃磨机床的雏形。但近百年来,由于封建制度的束缚,严重阻

碍了中国工业化的进程。至中华人民共和国成立前夕,中国的机械制造业几乎为零。

解放以来的 60 多年间,我国机械制造业有了很大的发展,开始拥有了自己独立的汽车工业、航天航空工业等技术难度较大的机械制造工业。特别是改革开放以来,我国机械制造业充分利用国内外两方面的资金和技术,进行了较大规模的技术改造,使制造技术、产品质量和水平及经济效益有了很大的提高,为推动国民经济发展起到了重要作用。

但与工业发达的国家相比,我国机械制造业的水平还存在阶段性的差距,主要表现在产品质量和水平不高,技术开发能力不强,基础元器件和基础工艺不过关,生产率低,科技投入严重不足等。例如,在 20 世纪末,我国机械制造业拥有 300 多万台机床,2 000 多万职工,堪称世界之最。但由于产品结构和生产技术相对落后,致使我国许多高精尖设备和成套设备仍需大量进口,机械制造业人均产值仅为发达国家的几十分之一。

面对越来越激烈的国际市场竞争,我国机械制造业面临着严峻的挑战。我们在技术上已经落后,加上资金不足,资源短缺,以及管理体制和周围环境还存在许多问题,需要改进和完善,这些都给我们迅速赶超世界先进水平国家带来极大的困难。但另一方面,随着我国改革的不断深入,对外开放的不断扩大,为我国机械制造业的振兴和发展提供了前所未有的良好条件。当今,制造业的世界格局已经和正在发生重大的变化,世界经济重心开始向亚洲转移,制造业的产品结构、生产模式也在迅速变革之中。中国俨然已成为制造大国,但还不是世界的制造强国,我们需要涌现更多的拥有自主知识产权和高附加值的创新性的高新技术。

4. 过程装备与控制工程在国民经济中的地位和作用

过程装备与控制工程是工程科学的一个分支,它是机械、化学、电子、能源、信息、材料工程乃至医学、系统工程等学科的交叉学科,是在多个大学科发展的基础上交叉、融合而出现的新兴学科分支,也是生产需求牵引、工程科技发展的必然产物。显而易见,过程装备与控制工程学科具有强大的生命力和广阔的发展前景。

学科交叉、融合和用信息化改造传统的“化工设备与机械”学科产生了过程装备与控制工程学科。化工设备与机械专业是在建国初期向苏联学习,在我国几所高校首先设立而发展起来的,半个世纪以来,毕业生一直供不应求,为我国社会主义建设输送了大批优秀工程科技人才。1998 年 3 月教育部应教学指导委员会建议正式批准建立了“过程装备与控制工程”学科。这一学科在欧美国家的本科和研究生专业目录上是没有的,在我国已有 70 多所高校开设了这一专业,是适合我国国情的具有中国特色的一门新兴交叉学科。其主要特点如下:

(1) **过程装备** 与生产工艺即加工流程性材料紧密结合,有其独特的过程单元设备和工程技术,如混合工程、反应工程、分离工程及其设备等,与一般机械设备完全不同,有其独特之处。

(2) **控制工程** 对过程装备及其系统的状态和工况进行监测、控制,以确保生产工艺有序稳定运行,提高过程装备的可靠度和功能可利用度。

(3) **过程装备与控制工程** 过程工艺、过程装备、电气仪表一体化连续的复杂系统,它需要长周期稳定运行;并且系统中的各组成部分(过程参量、机泵、工程单元设备、管道、阀门、监测仪表、计算机系统等)均互相关联、互相作用和互相制约,任何一点发生故障

或问题都会影响整个系统；又由于加工的过程材料有些是易燃易爆、有毒或是加工要在高温、高压下进行，系统的安全可靠性十分重要。

过程装备与控制工程的上述特点就决定了其学科研究的领域十分宽广，一是要以机电工程为主干与过程工艺密切结合，创新单元工艺装备；二是与信息技术和知识工程密切结合，实现智能监控和过、装、控一体化；三是不仅研究单一的设备和机器，而且更主要的是研究与过程生产融为一体的过程工艺、装备、电气仪表这一连续复杂系统，在工程上就是要设计建造过程工业大型成套设备。因此，要密切关注其他学科的新的发展动向，博采众长、集成创新，把诸多学科最新研究成果之他山之石为我所用；同时要以现代系统论和耗散结构理论为指导，研究过程装备与控制工程复杂系统独特的工程理论，不断创新和发展过程装备与控制工程学科。

我国科技部和国家自然科学基金委员会在 21 世纪初发表了《中国基础学科发展报告》，其中分析了世界工程科学研究的发展趋势和前沿，这也为过程装备与控制工程学科的发展指明了方向，值得借鉴和参考。

(1) 全生命周期的设计/制造正成为研究的重要发展趋势。由过去单纯考虑正常使用的设计，前后延伸到考虑建造、生产、使用、维修、废弃、回收和再利用在内的全生命周期的综合策略。

过程装备的检测与诊断工程、绿色再制造工程和装备的全寿命周期费用分析、安全和风险评估等正在流程工业开始得到应用。工程科技界已开始移植和借鉴现代医学与疾病做斗争的理论和方法，去研究过程装备故障自愈调控(fault self-recovering regulation)，探讨装备医疗工程(plant medical engineering)理论。

(2) 工程科学的研究尺度向两极延伸。过程装备的大型化是多年以来的发展方向，近年来又有向小型化、集成化发展的趋势。

(3) 广泛的学科交叉、融合，推动了工程科学不断深入和精细化，同时也提出了更高的前沿科学问题，尤其是计算机科学和信息技术的发展冲击着每个工程科学领域，影响着科学的基础格局。过程装备与控制工程学科的发展也必须依靠学科交叉和信息化，改变传统的生产观念和 production 模式，过程装备复杂系统的监控一体化和数字化是发展的必然趋势。

(4) 产品的个性化、多样化和标准化已经成为过程领域竞争力的标志，要求产品更精细、灵巧并满足特殊的功能要求。产品创新和功能扩展/强化是工程科学研究的首要目标，柔性制造和快速重组技术在大流程工业中也得到了重视。

(5) 先进工艺技术得到前所未有的广泛重视，如精密、高效、短流程、敏捷制造、虚拟制造等先进制造技术对机械、冶金、化工、石油等制造工业产生了重要影响。

(6) 可持续发展的战略思想渗透到工程科学的多个方面，表现了人类社会与自然界协调一致的发展趋势。制造工业和大型工程建设都面临着有限资源和破坏环境等迫切需要解决的难题，从源头控制污染的绿色设计和制造系统为今后发展的主要趋势之一。

众所周知，过程工业是国民经济的支柱产业，是发展经济提高我国国际竞争力的不可缺少的基础；过程工业是提高人民生活水平的基础，是保障国家安全、打赢现代战争的重要支撑，没有过程工业就没有强大的国防；过程工业是实现经济、社会发展与自然相协调

从而实现可持续发展的重要基础和手段。因而,过程装备与控制工程在发展国民经济的重要地位是显而易见和举足轻重的。

5. 过程机械制造业的发展

1) 压力容器向大型化发展

压力容器的大型化可以节约能源、节约材料、降低投资、降低生产成本、提高生产效率。近年来压力容器大型化的趋势仍在继续。国外合成氨和尿素装置已基本稳定在年产 30 万~45 万 t,个别有年产 60 万 t,乙烯装置稳定在年产 30 万~50 万 t,个别有年产 68 万~75 万 t。中国已制造出年产 30 万 t 热套式合成氨塔设备。

中国正在发展汽包式 30 万 kW 和 60 万 kW 的电站锅炉,预计锅炉汽包厚度将在 130mm 以上。目前中国已基本掌握了厚度为 150~200mm 的大型容器的制造、焊接和检测技术,厚度在 200mm 以上的压力容器制造、焊接和检测技术也已成熟。

随着压力容器向大型化的发展,其制造装备也必须紧紧跟上,如容器制造厂的高大厂房、吊车、水压机、弯板机、各种类型的焊接变位机械和热处理设备等。世界上能制造 4t 级超重容器的苏联伏尔加格勒厂,吊车达 1 200t 且水压机在 6 000t 以上。前西德 Sack 公司水压机重达 12 000t,能锻造 500t 的钢锭,弯板机在 4 000t 以上。美国 CF 查塔努加厂生产的 14 000t 弯板机,冷弯最大厚度 380mm,宽 6m,冲压封头的水压机吨位常为 1 000~3 000t,大厂有 4 000t 以上的。世界上最大的三台 8 000t 封头水压机都在日本。重型的旋压机可加工直径为 7m、厚度 165mm 的椭圆形封头。

2) 压力容器用钢的发展

压力容器向大型化发展,对钢材要求日益严格,材料技术的不断提高使压力容器大型化有了可靠的保证。压力容器的整个制造工艺流程中提出的所有技术要求都是以材料为基础的。当前压力容器用钢发展的主要特点有如下几个。

(1) 随着钢材强度的提高,同时要改善钢材的抗裂性和韧性指标。通过降低碳的含量同时加入微量合金元素以保证钢材具有一定的强度,不断提高锻钢技术使钢水杂质含量大幅度降低。日本炼钢可使磷降到 0.01% 以下,硫可降到 0.002% 以下。

(2) 对于高温抗氢用钢,尽量减轻钢的回火脆性和氢脆倾向。

(3) 降低大型钢锭中的夹杂物及偏析等缺陷以保证内部性能均匀,提高钢锭的利用率。随着容器大型化,钢锭重量明显增大,出现了大厚钢板。

(4) 出现了大焊接线能量下焊接性能良好的钢板。

3) 焊接新材料、新技术的产生和应用

1981 年 9 月在联邦德国埃森国际焊接博览会上蒂森公司首次向世界宣布造型焊接技术,采用多丝埋弧焊法制造压力容器筒体,整个压力容器筒体都是由焊肉组成,也可称为全焊肉(the total weldment)材料。这也是压力容器材料在铸、锻、轧 3 种形式之外的第 4 种焊接材料。这种全焊肉材料有以下两大特点。

(1) 焊肉性能完全可根据需求来决定,焊后只需要做消除应力热处理,不像锻件和电渣焊成形需要做长时间热处理。

(2) 堆焊层之间以及焊肉、芯筒之间基本上没有热影响区,过渡层处显微组织和硬度基本不变。这一新技术的出现,将为压力容器提供新的材料来源。

为适应大型和厚壁容器的发展,国内外普遍采用了强度级别较高的钢材,这时为降低焊缝中的氢含量,提高焊接接头的断裂韧性,超低氢焊条的研制成为各厂家所关心的问题。日本神钢公司研制成功了UL系列超低氢焊条,当采用这种焊条时,止裂温度可降低25%~50%。同时该焊条吸湿性很小,管理也很简便。还有一种超低氢焊条,其接头质量超过纤维型涂料的碱性焊条,采用该焊条,对600MPa级的高强度钢施焊时,甚至可以不预热。

新的焊接工艺和新的焊接方法的采用大大改善了焊缝区及热影响区的组织和性能,焊接时严格控制焊接线能量、采用窄间隙焊等都收到了较好的效果。

窄间隙焊是在金属极氩弧焊(MIG)的基础上发展起来的,也可以用于钨极氩弧焊(TIG)、埋弧焊(ESW)等,可焊接板厚20~500mm的压力容器。

自动焊接技术和焊接机器人的使用使大型容器上百米的纵焊缝、环焊缝和接管的鞍形焊缝实现了自动化,提高了焊缝质量和效率,降低了劳动强度,改善了劳动条件。

焊接耐腐蚀不锈钢是制造加氢容器的关键工艺,美国已使用六丝无保护气体堆焊工艺,质量超过了埋弧焊。美国林德(Linde)公司研制成功热丝等离子弧堆焊工艺,并已在压力容器制造上应用。欧洲在带极堆焊工艺方面做了大量的工作。日本已使用150mm的宽带极堆焊,其熔敷率高、稀释率低。带极堆焊的比重日益增大。

4) 无损检测技术的可靠性逐步提高

无损检测技术在对过程装备的材料和整个制造过程以及在役装备检验方面起着重要作用,有效地保证了装备的安全。工程上主要的检测方法如下。

(1) 射线探伤

同位素探伤主要采用 ^{60}Co 和 ^{192}Ir ,由于其灵敏度较低、能量小、照射时间长、需要严格防护,所以用途受到限制,目前主要用于小直径厚壁管子焊缝的探伤。

X射线探伤主要用于20~40mm板厚的检验。荷兰Philips公司生产的X光机最大能量达420keV,可探厚度达100mm以上。

电子束探伤的主要射线源为直线加速器和电子感应加速器。直线加速器靶点较大(3mm),灵敏度稍低(1%),但仍优于X光机,照射速度快,价格高。电子感应加速器靶点小($0.1\times 1\text{mm}$),灵敏度高(0.3%),照射时间长,价格低。因此,实际检测中在灵敏度能满足要求的条件下,一般常使用直线加速器以缩短检测时间。目前美国、日本的直线加速器能量可达15MeV,据称检测厚度356mm的时间为3min。安装于日本的26MeV的感应加速器,检测厚度50~400mm的时间为14min。

(2) 超声波探伤

超声波检测压力容器缺陷,是应用最广的无损检验方法,能发现钢板及焊缝中的各类缺陷,且定位较准确、安全、自动化和计算机控制程度高,制造和在役检验都较方便。

目前广泛应用各种方式的脉冲反射机理,已能测出2~5mm的裂纹。

英国巴勃考公司推出容器检测用微机控制自动超声系统,可检测环焊缝、接管及法兰。信号经处理后可以绘制并显示缺陷形状和位置,且可测定缺陷尺寸。通过更换软件包,可按容器形状尺寸迅速换用新的扫查程序及其超声方法,探头定位精度为1mm,从而使缺陷尺寸测量精度达到2mm,测试通道可达256个。

美国电力研究所今年发展的超声检测技术,在形象技术方面采用了复合孔径聚焦法(SAF法)和声全息法(AH法)。AH法对判定缺陷特征的能力,优于脉冲回波法,且不易受不锈钢复层的影响,检测速度快,便于形象重显。

(3) 表面探伤

用于表面探伤的方法主要是着色法、磁粉法和涡流法,近年来观察效果不断提高。可用光镜、光纤图像仪、电视摄像镜进行检验观察,并可输出图形、信号,通过计算分析使检测更方便准确。

(4) 声发射

声发射用于动态检测,如在役压力容器疲劳裂纹及应力腐蚀裂纹的扩展、变化的监测和不停产操作。声发射也用于水压试验及材料检验等。

另外,在缺陷评定方面也取得了迅速发展,使得压力容器的安全性和制造质量、服役寿命得到了较好的保证。