



普通高等教育“十三五”规划教材

机械与压力容器安全

Safety of Mechanical and Pressure Vessels

郭泽荣 袁梦琦 © 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

机械与压力容器安全

Safety of Mechanical and Pressure Vessels

郭泽荣 袁梦琦 © 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

机械与压力容器安全以在生产过程中使用机械与压力容器出现的安全问题为主线,介绍各类危险机械和压力容器的组成、工作原理及作业场所的环境;识别机械危险有害因素和作用机理,压力容器在内压作用下的应力分布及特点,压力容器使用中的危险有害因素,全面地体现出机械安全技术体系和内容。兼顾理论性与实用性、经典性与时代性、深度与易读性,力争全面而系统地介绍机械与压力容器安全的基本概念、基本理论、基本方法及案例分析等内容,编成一部理论框架完整、内容条理清晰、叙述通俗易懂的教材,便于本科生深入地熟悉机械与压力容器安全。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械与压力容器安全 / 郭泽荣, 袁梦琦编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2017.1
ISBN 978-7-5682-3612-6

I. ①机… II. ①郭… ②袁… III. ①机械设备-安全技术-高等学校-教材 ②压力容器安全-高等学校-教材 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 002919 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 18.75

字 数 / 437 千字

版 次 / 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 党选丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

安全生产事关人民群众的生命财产安全，事关改革发展和社会稳定大局。搞好安全生产工作是企业生存与发展的基本要求，是全面建设小康社会、统筹经济社会全面发展的重要内容，是贯彻落实科学发展观、实施可持续发展及建设和谐社会的重要组成部分，也是政府履行社会管理和市场监督职能的基本任务。

随着生产力的发展与科技的进步，机械设备已成为现代生产中各行各业不可缺少的设备，不仅工业生产要用到它，其他行业不同程度上也用到它，它是解放劳动力、提高生产率的有力工具，也是现代工业的基础。各种机械设备已悄然进入我们日常生产、生活的各个角落，日益广泛地影响着我们的生产、生活安全，充分地实现这些机械设备的效能就成了必然之需，我们对它们的安全使用也必须深入了解。在使用各类机械设备的过程中，它们的本质安全正在成为企业发展和家庭文明以及社会和谐的重要要求。

当前，由于企业形式的多样化，机械设备呈现出手工操作、半手工操作、机械化作业、智能化生产同时并存的现状。由于人的不安全行为和物的不安全状态引发的机械伤害事故屡见不鲜，因机械故障造成的经济损失也时有发生。因此，很有必要强化机械设备安全管理，普及机械设备安全技术。

鉴于机械设备种类繁多、性能各异，本书不可能涉及所有的机械设备，只能讲解通用的机械安全技术，以及预防机械事故的一般原则和安全要求，重点介绍危险机械安全技术及压力容器安全技术。

为了提高安全工程专业本科毕业生对生产、生活场所安全状况的深入把握，提高其掌握解决复杂安全技术问题的能力，特开设机械与压力容器安全课程。本课程主要讲授机械制造业中危险机械安全及特种设备中的压力容器安全。

危险机械是危险性较大、人工上下料的机械，事故率高，是事故隐患比较集中的行业。危险机械安全以危险辨识和本质安全为主线，主要介绍金属冷、热加工机械和木工机械等机械制造过程中的安全技术。

压力容器是一类广泛使用的特种设备，所承载的压力和复杂介质构成危险源，一旦发生事故，必将导致恶劣的事故。在容器的设计、制造、安装、使用、检修和改造等众多环节中存在的缺陷都可能成为引发事故的潜在隐患。因此，压力容器安全一直是安全领域的重点研究内容和管理对象。压力容器安全从本质安全的角度着手，主要从容器的强度设计着手，研究容器工作过程中的应力分析及强度设计、安全附件等安全技术。

在本书编写过程中力图实现既注重基础又突出实用目的，根据安全工程专业本科生的基础知识，适度介绍了相关领域的基础理论，主要侧重于通用性知识与技能的介绍。

本书在编写过程中参阅了大量的资料，在此，谨对原作者表示最真诚的谢意。

编 者

目 录

CONTENTS

模块 I 机械安全基础知识

第一章 绪论	003
第一节 安全与安全科学技术概述	003
一、危险及危险源	003
二、事故与事故特征	004
三、安全与安全科学技术	007
第二节 本质安全	010
一、本质安全的含义	010
二、本质安全具有的特征	010
三、本质安全管理的目标	011
四、本质安全的安全功能	011
五、实现本质安全的途径	011
第三节 研究的内容与任务	013
思考题	014
第二章 机械安全基础	015
第一节 机械	015
一、机械系统的优点	015
二、机械及其功能	015
第二节 机械安全的认识过程	017
一、安全自发认识阶段	018
二、安全局部认识阶段	018
三、系统安全认识阶段	018
四、安全系统认识阶段	021
第三节 用安全系统的认识方法解决机械安全问题	022
第四节 机械伤害类型	023
思考题	024

模块 II 危险机械安全

第三章 危险机械安全概述	027
第一节 机械的组成及安全	027
一、机械的组成规律和工作原理	027
二、机械的使用环节、状态与危险区	028
第二节 机械中危险和有害因素的识别及机械事故的原因分析	030
一、危险和有害因素	030
二、危险和有害因素的分类	031
三、由机械产生的危险	032
四、机械危险的主要伤害形式和机理	033
五、事故原因分析	036
第三节 实现机械安全的途径与措施	037
一、机械本质安全技术	037
二、履行安全人机工程学原则	042
三、安全防护措施	047
四、安全信息的使用	051
五、附加预防措施	056
六、实现机械安全的综合措施和实施阶段	057
思考题	060
第四章 危险机械安全技术	061
第一节 金属冷加工机械安全技术	061
一、金属切削加工机械安全技术	062
二、压力加工机械安全技术	077
第二节 金属热加工机械安全技术	089
一、热加工中的危险和有害因素	089
二、铸造安全技术	089
三、锻造安全技术	093
四、热处理安全技术	097
五、焊接安全技术	100
第三节 木工机械安全技术	105
一、木工事故特点和危险因素识别	106
二、木工机械加工操作区的安全技术	107
三、木工平刨床安全技术	108
思考题	110

模块Ⅲ 压力容器安全

第五章 压力容器基础知识	115
第一节 压力容器	115
一、压力容器定义	115
二、压力容器的分类	116
第二节 压力容器的结构	119
一、容器的基本组成及其作用	120
二、球形压力容器的结构	120
三、圆筒形压力容器的结构	123
第三节 压力容器的法规标准体系	127
一、欧盟	128
二、美国	128
三、中国	129
思考题	130
第六章 压力容器应力分析	131
第一节 概述	131
一、应力分析设计法	131
二、压力容器的应力分类	132
三、压力容器典型零部件中的应力分布	134
第二节 薄壁壳体在内压作用下的应力	135
一、无力矩理论及基本方程	135
二、无力矩理论在旋转薄壳中的应用	141
第三节 厚壁圆筒及球壳在内压作用下的应力	146
一、厚壁壳体的应力特点	146
二、厚壁圆筒轴向应力	147
三、厚壁圆筒环向应力与径向应力	147
四、厚壁与薄壁圆筒应力公式比较	151
五、厚壁球壳应力分析	152
第四节 承内压圆平板的应力	153
一、承内压圆平板的应力特点	153
二、挠度微分方程及其求解	154
三、周边铰支圆平板	154
四、周边固支圆平板	155
五、与相连圆筒壳的比较	156
第五节 热应力	157
一、温差应力的计算分析	157
二、温差应力的近似分析	158

第六节 边界效应与应力集中	159
一、边界应力概念	159
二、关于边界效应的一般性结论	161
三、应力集中	162
思考题	164
第七章 压力容器强度设计及制造管理	165
第一节 强度设计概述	165
一、概述	165
二、强度设计的任务	165
三、强度理论及强度条件	166
四、设计准则	166
五、应力分析设计	167
第二节 压力容器用钢材	168
一、金属材料的常温力学性能	168
二、钢材的力学性能	169
三、温度对材料力学性能的影响	170
四、钢材的脆性	172
五、钢材的腐蚀	173
六、对压力容器用钢的要求	173
七、压力容器常用的钢材	175
第三节 筒体与封头强度设计	175
一、主要设计参数	175
二、内压筒体与封头设计	180
第四节 开孔补强	183
一、不需补强的最大孔径	183
二、补强的有关要求	183
三、补强面积	185
四、补强形式与结构	185
五、补强面积的分布	186
第五节 压力容器结构设计的安全问题	186
一、结构设计应遵循的原则	186
二、对封头及法兰结构的要求	187
三、对开孔的要求	188
四、对焊接结构的要求	188
第六节 压力容器制造管理	190
一、压力容器制造单位的资格	190
二、压力容器制造过程中的质量管理	191
三、质量保证系统和质量保证手册	191
思考题	192

第八章 压力容器安全装置	193
第一节 安全泄压装置与安全泄放量	193
一、安全泄压装置	193
二、安全泄放量	196
第二节 安全阀和爆破片	198
一、安全阀	198
二、爆破片	206
第三节 其他安全附件	215
一、压力表	215
二、液面计	218
三、减压阀	221
四、测温装置	223
思考题	225
第九章 压力容器失效形式及预防	226
第一节 断裂的定义及类型	226
第二节 延性断裂	227
一、概述	227
二、延性断裂的特征	228
三、延性断裂事故的预防	229
第三节 脆性断裂	230
一、脆性断裂的基本原因	231
二、脆性断裂的特征	231
三、脆性断裂事故的预防	232
第四节 疲劳断裂	233
一、金属疲劳现象	233
二、压力容器承压部件的疲劳断裂	235
三、疲劳断裂的特征	236
四、压力容器疲劳断裂的预防	237
第五节 应力腐蚀断裂	237
一、应力腐蚀及其特点	237
二、应力腐蚀断裂的特征	238
三、应力腐蚀断裂过程	238
四、应力腐蚀断裂的预防	238
第六节 蠕变断裂	239
一、高温部件蠕变断裂的常见原因	239
二、蠕变过程及蠕变断裂	239
三、蠕变断裂的特征	240
四、蠕变断裂的预防	240
思考题	241

第十章 压力容器安全检测技术	242
第一节 无损检测	242
一、概述	242
二、射线检测	245
三、超声检测	248
四、磁粉检测	253
五、渗透检测	256
六、涡流检测	259
七、声发射检测	259
第二节 耐压试验和泄漏试验	261
一、耐压试验	261
二、泄漏试验	268
第三节 其他检测技术	270
一、磁记忆检测技术	270
二、磁光/涡流成像技术	273
思考题	275
第十一章 压力容器安全管理	276
第一节 压力容器安全管理思想	276
一、本质安全管理思想	276
二、宏观管理与微观管理相结合的思想	276
三、生命周期全过程安全管理的思想	277
第二节 压力容器安全管理体系	277
一、管理总体要求	277
二、生命周期全过程安全管理	277
三、压力容器监督管理	287
四、压力容器事故管理	287
思考题	287
参考文献	288

模块 I 机械安全基础知识



第一章

绪 论



学习指导

1. 熟悉安全科学技术的一些基本概念。
2. 掌握本质安全及实现本质安全的措施。

第一节 安全与安全科学技术概述

一、危险及危险源

1. 危险

危险是系统、产品、设备或操作的内部和外部的一种潜在的状态，其发生可能造成人身伤害、职业病、财产损失、作业环境破坏等的状态。

危险由危险性表征，指造成人身伤亡和物质损失的可能性。它是由危险严重程度及危险概率表示的可能损失，是表征潜在的危险后果。危险概率是指危险转变成事故的可能性，即频度或单位时间危险发生的次数。危险严重程度是指每次危险发生导致的伤害程度或损失大小。它们之间的关系为：

$$D=PC \quad (1-1)$$

式中 D ——危险；

P ——危险概率；

C ——危险严重程度。

危险同时具备发生的可能性和后果的严重性两个特点，即有发生事故的可能性和造成人员伤亡、财产损失和环境破坏的潜在隐患。如果发生危险的概率为 100%，但危险的严重程度不会造成人员伤亡、财产损失和环境破坏，那么不存在危险；如果危险的严重程度很高，但发生危险的概率为 0，那么也不存在危险。

2. 危险源

危险源是指可能导致人员伤害或疾病、物质财产损失、工作环境破坏或这些情况组合的根源或状态因素。在《职业健康安全管理体系要求》(GB/T 28001—2011)中的定义为：可能导致人身伤害和(或)健康损害的根源、状态或行为，或其组合。危险源由三个要素构成：潜在危险性、存在条件和触发因素。工业生产作业过程的危险源一般分为七类：化学品类、辐射类、生物类、特种设备类、电气类、土木工程类和交通运输类。

危险货物根据所具有的不同危险性或最主要的危险性分为九大类，爆炸品，气体，易燃液体，易燃固体、易于自燃的物质、遇水放出易燃气体的物质，氧化性物质和有机过氧化物，毒性物质和感染性物质，放射性物质，腐蚀性物质，杂项危险物质和物品〔《危险货物分类和品名编号》（GB 6944—2012）〕。

具体地说，危险源是一个系统中具有潜在能量和物质释放危险的，可造成人员伤害，在一定的触发因素作用下可转化为事故的部位、区域、场所、空间、岗位、设备及其位置。它的实质是具有潜在危险的源点或部位，是爆发事故的源头，是能量、危险物质集中的核心，是能量传出或爆发的地方。危险源存在于确定的系统中，不同的系统范围，危险源的区域也不同。例如，从全国范围来说，对于危险行业（如石油、化工等）中具体的一个企业（如炼油厂）就是一个危险源；而从一个企业系统来说，可能某个车间、仓库就是危险源；可能一个车间系统的某台设备是危险源；可能某台设备的某个运动部件是危险源。因此，分析危险源应按系统的不同层次来进行。一般来说，危险源可能存在事故隐患，也可能不存在事故隐患，对于存在事故隐患的危险源一定要及时加以整改，否则，随时都可能导致事故。

危险源即危险的根源，在系统安全研究中，认为危险源的存在是事故发生的根本原因，防止事故就是消除、控制系统中的危险源。

各种事故的致因因素都是危险源。事故致因的因素种类繁多，根据危险源在事故发生、发展中的作用，将其划分为两大类。

1) 第一类危险源

根据能量意外释放论，事故是能量或危险物质的意外释放，作用于人体的、过量的能量或干扰人体与外界能量交换的危险物质，是造成人身伤害的直接原因。于是，把系统中存在的、可能发生意外释放能量的能源、载体或危险物质称作第一类危险源。

2) 第二类危险源

在生产和生活中，为了利用能量，让能量按照人们的意图在系统中流动、转换和做功，必须采取措施约束、限制能量，即必须控制危险源。约束、限制能量的屏蔽应该可靠地控制能量，防止能量意外释放。实际上，绝对可靠的控制措施并不存在。在许多因素的复杂作用下，约束、限制能量的控制措施可能失效，能量屏蔽可能被破坏而发生事故。导致约束、限制能量措施失效、故障或破坏的各种不安全因素称为第二类危险源。它包括人、物、环境三个方面的问题，即物的故障、人为失误和环境因素。

一起伤亡事故的发生往往是两类危险源共同作用的结果。第一类危险源是伤亡事故发生的能量主体，决定事故后果的严重程度；第二类危险源是第一类危险源造成事故的必要条件，决定事故发生的可能性。

二、事故与事故特征

1. 事故

事故是发生于预期之外的造成人身伤害，财产、经济损失和环境破坏等的事件，是发生在人们的生产、生活活动中的意外事件。

在事故的种种定义中，伯克霍夫（Berckhoff）的定义最为著名。伯克霍夫认为，事故是人（个人或集体）在为实现某种意图而进行的活动过程中突然发生的、违反人的意志的、迫使活动暂时或永久停止或迫使之前存续的状态发生暂时或永久性改变的事件。

事故是一种动态事件，它开始于危险的激化，并以一系列原因使事件按一定的逻辑顺序流经系统而造成损失，即事故是指造成人员伤亡、死亡、职业病或设备设施等财产损失和其他损失的意外事件。

若以人为中心，按事故后果，事故可分为一般事故和伤亡事故。

1) 一般事故（无伤害事故）

一般事故是指人身没受到伤害或微伤，停工短暂或与人的生理机能障碍无关的未遂事故。无伤害事故占事故的 90%。

2) 伤亡事故

《企业职工伤亡事故分类》(GB/T 6441—1986) 规定，伤亡事故是指企业职工在生产劳动过程中发生的人身伤害（伤害）、急性中毒（中毒）。伤亡事故按是否在生产区域中发生和是否与生产有关分为工伤事故和非工伤事故。

工伤事故是指企业在生产活动中所涉及区域内，在生产过程中，在生产时间内，在生产岗位上，与生产直接有关的伤亡事故；在生产过程中存在的有害物质在短期内大量侵入人体，使职工工作立即中断并需进行急救的中毒事故；不在生产和工作岗位上，但由于企业设备或劳动条件不良而引起的职工伤亡。

2. 伤亡事故的分类

1) 按伤害程度划分

(1) 轻伤。轻伤是指损失工作日低于 105 日的失能伤害。

(2) 重伤。重伤是指造成职工肢体残缺或视觉、听觉等器官受到严重损伤，一般能导致人体功能障碍长期存在，或损失工作日等于或超过 105 日而小于 6 000 日，劳动能力有重大损失的失能伤害事故。

(3) 死亡。死亡是指事故发生后当即死亡（含急性中毒死亡）或负伤后在 30 天内死亡。损失工作日定为 6 000 日。

2) 按事故严重程度划分

(1) 轻伤事故。轻伤事故是指只有轻伤的事故。

(2) 重伤事故。重伤事故是指有重伤而无死亡的事故。

(3) 死亡事故。死亡事故是指事故发生后当即死亡（含急性中毒死亡），或负伤后 30 天内死亡的事故。死亡的损失工作日为 6 000 日（这是根据我国职工的平均退休年龄和平均死亡年龄计算出来的）。

3) 按伤害方式划分

伤亡事故可划分为 20 种：物体打击、车辆伤害、机械伤害、起重伤害、触电、淹溺、灼烫、火灾、高处坠落、坍塌、冒顶片帮、透水、放炮、火药爆炸、瓦斯爆炸、锅炉爆炸、容器爆炸、其他爆炸、中毒和窒息、其他伤害。

上述三种划分方法在《企业职工伤亡事故分类》(GB/T 6441—1986) 中有明确规定。

4) 按伤亡事故的等级划分

自 2007 年 6 月 1 日起施行的《生产安全事故报告和调查处理条例》将伤亡事故分为以下几种：

(1) 特别重大事故。特别重大事故是指造成 30 人以上（包括本数）死亡，或者 100 人以上重伤（包括急性工业中毒，下同），或者 1 亿元以上直接经济损失的事故。

(2) 重大事故。重大事故是指造成 10 人以上 30 人以下（不包括本数）死亡，或者 50 人以上 100 人以下重伤，或者 5 000 万元以上 1 亿元以下直接经济损失的事故。

(3) 较大事故。较大事故是指造成 3 人以上 10 人以下死亡，或者 10 人以上 50 人以下重伤，或者 1 000 万元以上 5 000 万元以下直接经济损失的事故。

(4) 一般事故。一般事故是指造成 3 人以下死亡，或者 10 人以下重伤，或者 1 000 万元以下直接经济损失的事故。

5) 按事故发生的原因划分

(1) 直接事故。直接事故是指机械、物质或环境的不安全状态，人的不安全行为。

(2) 间接事故。间接事故是指技术上和设计上有缺陷，教育培训不够，劳动组织不合理，对现场工作缺乏检查或指导错误，没有安全操作规程或规程不健全，没有或不认真实施事故防范措施，对事故隐患整改不力等。

3. 事故的特性

为了积极预防事故发生，安全发展，需要注重深入研究事故的特性。

1) 因果性

因果性是指某一现象作为另一现象发生依据的两种现象之间的关联性。事故是相互联系的诸原因的结果。事故这一现象都和其他现象有着直接或间接的联系。在这一关系上看来是“因”的现象，在另一关系上却是以“果”的形式出现，反之亦然。

事故的因果关系有继承性，即多层次性：第一阶段的结果往往是第二阶段的原因。

给人造成伤害的直接原因易于掌握，因为它所产生的某种后果显而易见。然而，要找出究竟是何种间接原因，又是经过何种过程而造成事故，却非易事。因为随着时间的推移，会有种种因素同时存在，有时诸因素之间的关系相当复杂，还有某种偶然因素存在。因此，在制定事故预防措施时，应尽最大努力掌握造成事故的直接和间接原因，深入剖析事故根源，防止同类事故重演。

2) 偶然性

从本质上讲，事故的发生是一个随机事件，即使完全掌握了事故的原因，也不可能保证绝对不发生事故。这种偶然性表现在：对特定的事故，其发生的时间、地点、状态等均无法预测（如地震、洪水等）；事故是否产生后果，以及后果的大小如何都难以预测；反复发生的同类事故并不一定产生相同的后果。

3) 必然性

事故是一系列因素互为因果、连续发生的结果。事故因素及其因果关系的存在决定事故或迟或早必然要发生。事故的必然性中包含着规律性，既为必然，就有规律可循。必然性来自因果性，深入探查、了解事故的因果关系，就可以发现事故发生的客观规律，从而为防止事故发生提供依据。

4) 规律性

在一定范围内，随着科学技术的发展，可以找出事故的近似规律，从外部和表面上的联系找到内部的决定性的主要关系。从事故的偶然性找出必然性，认识事故发生的规律性，使事故消除在萌芽状态之中，变不安全条件为安全条件，化险为夷。

5) 潜在性

事故在未发生和造成损失之前，有一个孕育发展的过程，这就是事故的潜在性（事故的