



特种建（构）筑物建造安全控制技术丛书

特种筒仓结构施工 关键技术及安全控制

The Key Construction Technology and Safety Control of
Special Silo Structure

李慧民 周崇刚 裴兴旺 孟海 著



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn

筑物建造安全控制技术丛书

特种筒仓结构施工 关键技术及安全控制

李慧民 周崇刚 裴兴旺 孟海 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2018

内 容 提 要

本书系统阐述了特种筒仓结构施工关键技术及安全控制方法。全书分为9章,第1章为特种筒仓结构施工安全控制理论,第2章为特种筒仓结构施工关键技术,第3章为特种筒仓结构施工安全数值模拟方法,第4章为特种筒仓结构施工安全动态监测方法,第5章为特种筒仓结构施工安全风险评估方法,第6章~第9章为实例分析,系统全面地阐述了特种筒仓结构钢衬里模块化施工、预应力施工等关键施工技术及其安全控制方法,从而使得全书具有极强的实用性。

本书可作为特种筒仓建设工程从业人员的指导书籍,也可作为高等院校土木工程与安全工程等专业的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

特种筒仓结构施工关键技术及安全控制/李慧民等著. —北京:冶金工业出版社, 2018. 4

特种建(构)筑物建造安全控制技术丛书

ISBN 978-7-5024-7709-7

I. ①特… II. ①李… III. ①筒仓—工程施工—安全技术
IV. ①TU249. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 046216 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjchs@cnmp. com. cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹 蕊 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7709-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版, 2018 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 14 印张; 272 千字; 213 页

68.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

本书主要针对双壳筒体结构施工全过程涉及的关键施工技术 & 安全控制问题进行分析,采用有限元数值模拟、施工现场动态监测、BP 小波神经网络等方法,系统全面地介绍了双壳筒体结构钢衬里模块化施工、预应力施工、非能动结构施工等关键施工技术及其安全控制方法。全书分 2 篇共 9 章,第 1 篇为特种筒仓结构施工关键技术及安全控制基础理论,由特种筒仓结构施工安全控制理论、特种筒仓结构施工关键技术、特种筒仓结构施工安全数值模拟方法、特种筒仓结构施工安全动态监测方法、特种筒仓结构施工安全风险评估方法组成;第 2 篇为特种筒仓结构施工关键技术及安全控制实例分析,由工程概况、特种筒仓结构施工安全数值模拟、特种筒仓结构施工安全动态监测、特种筒仓结构施工安全风险评估组成。章节内容丰富,由浅入深,紧密结合工程实际,便于操作,具有较强的实用性。

本书主要由李慧民、周崇刚、裴兴旺、孟海撰写。其中各章分工为:第 1 章由李慧民、周崇刚、李兵撰写;第 2 章由李兵、周崇刚、盛金喜、王顺泽撰写;第 3 章由孟海、刘兆瑞、裴兴旺、李文龙撰写;第 4 章由周崇刚、李勤、盛金喜、孟海撰写;第 5 章由李勤、赵向东、刘兆瑞、王旋旋撰写;第 6 章由李兵、李勤、袁鹏飞撰写;第 7 章由孟海、李慧民、裴兴旺撰写;第 8 章由李慧民、赵向东、裴兴旺撰写;第 9 章由周崇刚、李文龙、刘怡君撰写。

本书的撰写得到了西安建筑科技大学、中冶建筑研究总院有限公司、北京建筑大学、中天西北建设投资集团有限公司、西安市住房保障和房屋管理局、西安华清科教产业（集团）有限公司、乌海市抗震办公室、百盛联合建设集团等单位的技术与管理的大力支持与帮助。同时在撰写过程中还参考了许多专家和学者的有关研究成果及文献资料，在此一并向他们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2017 年 12 月

目 录

第 1 篇 特种筒仓结构施工关键技术及安全控制基础理论

1 特种筒仓结构施工安全控制理论	1
1.1 特种筒仓结构简介	4
1.1.1 常规筒仓结构	4
1.1.2 广义筒仓结构	10
1.1.3 特种筒仓结构	11
1.2 特种筒仓结构研究现状	12
1.2.1 国外研究现状分析	12
1.2.2 国内研究现状分析	14
1.2.3 边界、内容、技术路线	17
1.3 特种筒仓结构施工安全影响因素	19
1.3.1 结构施工过程中的时变特性	19
1.3.2 结构施工安全的影响因素分析	20
1.3.3 结构施工安全控制存在的问题	21
1.4 特种筒仓结构施工安全控制基础理论	23
1.4.1 结构施工安全控制模型	23
1.4.2 结构施工安全控制方法	24
1.4.3 特种筒仓结构施工安全控制流程	26
2 特种筒仓结构施工关键技术	29
2.1 大体积混凝土施工技术	29
2.1.1 大体积混凝土相关概述	29
2.1.2 某大体积混凝土施工技术	32
2.2 爬升模板施工技术	37
2.2.1 爬升模板相关概述	37
2.2.2 某筒仓爬升模板施工技术	41

2.3	预应力混凝土施工技术	44
2.3.1	预应力混凝土相关概述	44
2.3.2	某筒仓预应力混凝土施工技术	48
2.4	拼装吊装施工技术	51
2.4.1	某筒仓拼装吊装施工技术	51
2.4.2	某核电站穹顶吊装施工技术	55
3	特种筒仓结构施工安全数值模拟方法	61
3.1	施工过程结构分析方法及关键问题	61
3.1.1	施工过程时变分析问题分折	61
3.1.2	施工过程数值模拟分析方法	63
3.1.3	施工过程数值模拟分析软件	71
3.2	钢结构筒仓结构施工时变分析方法	77
3.2.1	结构吊装过程模拟	77
3.2.2	结构拼装过程模拟	80
3.2.3	结构卸载过程模拟	80
3.3	预应力筒仓结构施工时变分析方法	82
3.3.1	正装分析法	83
3.3.2	倒拆分析法	85
3.4	混凝土筒仓结构施工时变分析方法	85
3.4.1	时变因素模拟方法	85
3.4.2	时变结构模拟方法	87
3.5	考虑时变结构的施工过程数值模拟分析方法	88
3.5.1	荷载的统计分析	89
3.5.2	构件抗力统计分析	90
3.5.3	时变结构分析流程	91
4	特种筒仓结构施工安全动态监测方法	93
4.1	特种筒仓结构施工安全监测概述	93
4.1.1	施工安全监测概述	93
4.1.2	施工安全监测系统	97
4.1.3	施工安全监测步骤	99
4.2	特种筒仓结构施工安全监测内容的确定	100

4.2.1 监测项目的确定	100
4.2.2 监测位置的确定	103
4.3 特种筒仓结构施工安全传感器布置理论与方法	103
4.3.1 监测结构传感器的选用	103
4.3.2 传感器布置理论与方法	108
4.3.3 传感器布置的数学描述	113
4.4 基于动静力分析的特种筒仓结构施工安全传感器布置方法	114
4.4.1 特种筒仓结构施工安全传感器布置	114
4.4.2 基于静力分析的传感器布置方法	115
4.4.3 基于动力分析的传感器布置方法	116
4.5 特种筒仓结构施工安全监测数据后处理方法及程序实现	117
4.5.1 数据后处理方法	117
4.5.2 数据处理程序化实现	119
5 特种筒仓结构施工安全风险评估方法	122
5.1 特种筒仓结构施工安全风险评估流程	122
5.1.1 安全风险评估的含义	122
5.1.2 安全风险评估的内容	122
5.1.3 安全风险评估的基础	123
5.2 特种筒仓结构施工安全风险评估指标体系构建	124
5.2.1 安全风险评估指标确定方法	124
5.2.2 安全风险评估指标体系的建立	126
5.3 特种筒仓结构施工安全风险评估方法选择	127
5.3.1 安全风险评估方法	127
5.3.2 BP 神经网络模型	129
5.4 基于小波理论的 BP 神经网络改进方法	134
5.4.1 小波分析理论	134
5.4.2 选取小波函数	137
5.4.3 BP 神经网络的改进	139
5.5 基于 BP 小波理论的特种筒仓结构施工安全风险评估模型构建	141
5.5.1 BP 小波神经网络的算法	141
5.5.2 BP 小波神经网络的模型	142
5.5.3 实现 BP 小波神经网络	145

第2篇 特种筒仓结构施工关键技术及安全控制实例分析

6 工程概况	147
6.1 项目背景	147
6.1.1 项目概况	147
6.1.2 项目难点	150
6.2 特种筒体结构施工逻辑分析	151
6.2.1 “内外兼顾”施工	151
6.2.2 “先内后外”施工	152
6.2.3 “先外后内”施工	153
6.2.4 “施工流程”确定	153
6.3 特种筒体结构关键施工技术	154
6.3.1 双壳爬模体系	154
6.3.2 模块化施工技术	155
6.3.3 双壳穹顶施工技术	156
6.3.4 预应力施工技术	158
7 特种筒体结构施工安全数值模拟	161
7.1 钢衬里施工数值模拟	161
7.1.1 模块吊装计算说明	161
7.1.2 模块1、2、3吊装工况计算分析	164
7.1.3 后装模块对已装模块影响分析	169
7.2 穹顶施工数值模拟	170
7.2.1 穹顶正常吊装工况组计算分析	174
7.2.2 穹顶最大误差吊装工况组计算分析	176
7.2.3 穹顶就位工况计算分析	177
7.3 预应力施工数值模拟	178
7.3.1 安全壳结构分析	178
7.3.2 有限元模型建立	178
7.3.3 分析结果及讨论	180
8 特种筒体结构施工安全动态监测	182
8.1 传感器的布置	182
8.1.1 监测项目的确定	182

8.1.2 监测设备的安装	182
8.1.3 监测工作的开展	185
8.2 变形监测结果	186
8.2.1 地基沉降监测结果分析	186
8.2.2 钢衬里变形监测结果分析	189
8.2.3 筒体变形监测结果分析	189
8.3 应力监测结果	191
8.3.1 吊装工程应力监测结果分析	191
8.3.2 预应力张拉监测结果分析	196
8.3.3 混凝土应力监测结构分析	197
9 特种筒体结构施工安全风险评估	198
9.1 安全风险评估过程及分析	198
9.1.1 评估过程概况	198
9.1.2 评估阶段选择	198
9.2 模型的确定	199
9.2.1 数据的搜集与整理	199
9.2.2 初始化网络	200
9.2.3 确定隐含层节点个数	200
9.3 模型的训练和分析	205
9.3.1 BP 神经网络模型的训练	205
9.3.2 BP 小波神经网络模型的训练	207
9.3.3 模型的训练结果分析	212
参考文献	213

第 1 篇

特种筒仓结构施工关键技术及安全控制基础理论

1 特种筒仓结构施工安全控制理论

20 世纪 90 年代以来,随着我国经济建设的发展,工业项目建设规模不断扩大,生产技术和生产工艺更新步伐明显加快,使得筒仓结构的设计技术不断成熟,从而也推动筒仓施工工艺和施工技术的改进和提高。筒仓结构作为工业建筑配套的重要构筑物之一,也在向着更大的使用空间、更大的储存量以及更高层的方向发展。根据所承担工艺的不断改进和相应生产规模的逐步扩大,单个筒仓库的设计容量从 2000t 增加到 200000t,直径也从 10m 增长到 120m,高度甚至超过 50m,这些明显的发展变化不仅增加了筒仓结构的施工难度,对筒仓施工技术提出了更高的要求,同时也使得此类工程施工更趋于专业化,掌握并不断完善专有施工技术,并对保证施工安全、工程质量和提高市场竞争力具有重要作用。

近十几年来,滑模施工技术得到了大量应用和飞速的发展,在混凝土结构筒仓、混凝土结构圆柱形冷却塔、混凝土结构烟囱等特种工程结构中运用广泛。由于滑模施工属于专业的施工工艺,所要求的技术水平远远高于普通模板支拆施工技术水平,因此滑模施工过程中需要有专业的技术管理人员对施工全过程进行控制,并应具有较为专业的施工队伍和操作人员,滑模设施在施工中才会得到比较充分的利用,工程的质量才能够得到必要的保证。滑模施工属于特种结构施工,总的来说还属于模板工程类别,模板工程中强调的刚度、强度和稳定性也在滑模施工中起到决定作用,同时也对工程造价和安全生产有重要影响。这些大空间、大跨度的圆柱形混凝土结构建筑投资巨大,施工过程中的安全控制难度大,近年来,国内外此类结构的类似安全事故发生很多,尤其以 2016 年江西丰城电厂特大坍塌事故最为惨重。

2016 年 11 月 24 日 7 点左右,江西省宜春市丰城电厂三期在建项目冷却塔施工平桥吊倒塌,造成横板混凝土通道倒塌事故。事故发生的江西丰城电厂三期扩建工程由江西赣能股份有限公司出资建设,是江西省电力建设重点工程,截至 2016 年 11 月 24 日 22 时,确认事故现场 74 人死亡,2 人受伤,直接经济损失 10197.2 万元,为特大灾难事故,如图 1-1、图 1-2 所示。



图 1-1 丰城电厂冷却塔



图 1-2 11·24 丰城电厂施工平台倒塌事故

2009 年 3 月 21 日 21 时 17 分,某水泥厂生料均化库为钢筋混凝土筒仓结构,在生产线调试过程中生料均化库发生整体坍塌事故,造成重大损失。

2006 年 4 月 1 日,山东省滕州市东郭镇山东恒仁工贸有限公司淀粉厂一储粮钢板筒仓发生崩裂坍塌事故,造成 10 人死亡、3 人受伤。

2002 年 9 月 24 日 20 时 30 分,在新疆维吾尔自治区二建公司承建的塔城国家储备粮库 10 号平房仓东北角施工现场,施工单位涂料工违反安全技术操作规程,在移动脚手架车时,脚手架钢架管触到通往机房的 10kV 高压线上,造成 2 人死亡和 1 人受伤。

2001 年 10 月 16 日 16 时 30 分,某钢铁公司 2 号加热炉技术改造工程发生安全事故,7 人当场死亡,2 人受重伤,直接经济损失 130 万元左右。

2000 年 8 月 27 日,孟加拉国某水泥粉磨站,包括一座水泥库,一座熟料库,施工过程中发生了熟料库仓顶整体坍塌事故,整个仓顶平台坍塌,当场造成多人死伤。

据统计,全球有 67% 以上的工程事故是发生在施工阶段,研究成果表明,所有事故中,发生在施工期间的安全事故占到了总数的 83% 之多,而根据 1995 ~ 2004 年间的 357 起施工事故统计显示,78% 的建筑安全事故都是发生在结构施工期。在相当多的工程施工过程中,建设单位为了经济效益而盲目加快施工进度、尽量缩短工期,这就需要减少模板支撑体系的周转时间。同时又没有相应的规范及标准来规定出混凝土结构在施工期的受力以及安全性能,模板支撑系统怎样搭

设才是安全又经济的,什么时候能达到拆除支撑的安全临界状态,施工期的“时变结构”能承受多大荷载等。这些原因就造成了施工与安全之间的相互矛盾,支撑拆除过早或者受荷过大都会给结构带来很大的安全隐患,这就是施工期安全事故概率较高的重要原因之一。

所有成型的建筑结构都是由基本构件一步步通过施工建造最终达到完整的结构形态,整个过程是一个逐步推进且不断变化的过程。在这个过程中结构的受力状态、刚度、约束条件以及材料各项物理特性(如混凝土强度)等都会随着施工的不断推进而发生持续性变化,从而造成结构在施工过程中不断地发生内力重分布,而且结构成型以后的位移变形和内力分布情况也可能因为施工工序的不同而形成差异。传统的结构设计和施工方法并没有考虑到结构施工过程中各方面的动态变化,只是将结构成型的最终状态作为设计计算时的依据。而且现在常用的结构模拟计算软件中能够对连续性施工过程进行比较准确模拟分析的软件也不是很多,譬如目前在设计和施工阶段对结构进行力学分析计算,通常是使用结构PKPM软件在已经成型的结构模型上分楼层施加荷载来实现的。

但是事实上,这种方法并没有反映出结构受力和变形因施工过程中结构形态变化而导致的巨大差异。这种方法用在较为成熟和传统的建筑结构设计 and 施工中可能是可以控制的,但是如果在日益兴起的特种筒仓结构的设计和施工中忽视这种差异,就很有可能给结构施工带来安全隐患,严重时可能造成重大的施工安全事故。据统计,我国近十年来发生在施工过程中的结构坍塌事故很多,发生在施工阶段的坍塌事故占有所有结构坍塌事故的70%以上,而导致施工过程中结构坍塌事故比其他阶段多的主要原因有以下几点:

(1) 内在原因是结构在施工过程中存在许许多多的不确定因素和复杂的结构性能变化,这些不确定因素和变化使得结构在施工阶段要比其他阶段的风险率高出很多。

(2) 目前对于结构施工过程中的各项力学性能和变化规律的研究不尽完善,以及施工人员对施工过程的管理不能完全到位,这些是结构施工阶段发生事故的风险率比其他阶段更高的外在原因。

(3) 结构在设计阶段只是将结构成型的最终状态作为设计计算依据,却没有考虑结构在施工过程中强度、刚度以及边界条件和结构受力形式转换导致的内力以及形态等各方面的动态变化,而是在结构上对这些因素进行一次性加载。但是实际结构施工是一个不断随施工进展而变化的过程,结构的材料强度、约束条件、导荷方式都在不断地发生变化,各种荷载也是慢慢变化逐步加载到结构上的。对不同的施工方案和施工工序而言这些变化的规律也是不尽相同的。对于像特种筒仓结构这样的特殊结构而言,由于其形式复杂,变化因素多,施工周期长,且现在可供借鉴的施工技术和经验较少,这种效应的影响就会被很大程度的

放大,甚至造成严重的工程事故。随着结构施工工艺的不断创新以及越来越多的新颖复杂结构和新问题的不断涌现,传统的设计计算和施工过程验算方法已经很难满足这些结构对安全施工的需求。

因此,急需探索出一个行之有效的方法解决这一问题。本书依托采用我国拥有自主知识产权的第三代核电技术建造的工程为背景,基于施工力学理论和施工控制理论运用有限元模拟软件对特种筒仓结构施工过程进行仿真模拟分析和施工安全监测、安全风险评估研究,为施工安全过程控制和施工事故预防提供了一种有效的方法,对今后类似筒仓结构工程施工也具有一定的参考价值。

1.1 特种筒仓结构简介

1.1.1 常规筒仓结构

1.1.1.1 筒仓的分类

筒仓是用于贮存散状物料的薄壁筒状结构(构筑物),被大量应用于农业与工业领域中。与以往的物料存储方法相比,利用筒仓结构能够缩短物料的装卸流程,同时降低了运输以及维护的成本。随着工业的快速发展以及农业产量的逐年提高,筒仓结构以其占地面积少、存储量大、操作简便等诸多优势备受青睐。

目前,我国工程中应用最多的筒仓结构主要为混凝土筒仓和钢板筒仓,如图 1-3、图 1-4 所示。混凝土筒仓结构发展较早,且更为成熟,1985 年我国发布了《钢筋混凝土筒仓设计规范》,使得混凝土筒仓结构的设计具有可靠依据。钢板筒仓在所有筒仓类型中建造费用最低,除了筒仓本身的造价低,基础部分造价也低,它只有钢筋混凝土筒仓造价的 $1/2$,即使与现行的砖混结构筒仓相比,也能节约 20% 的投资。钢板筒仓的钢材用量与其混凝土筒仓钢筋用量几乎相当,水泥用量节省约 $2/3$,随着钢材的价格进一步降低,建造费用也会逐渐下降。

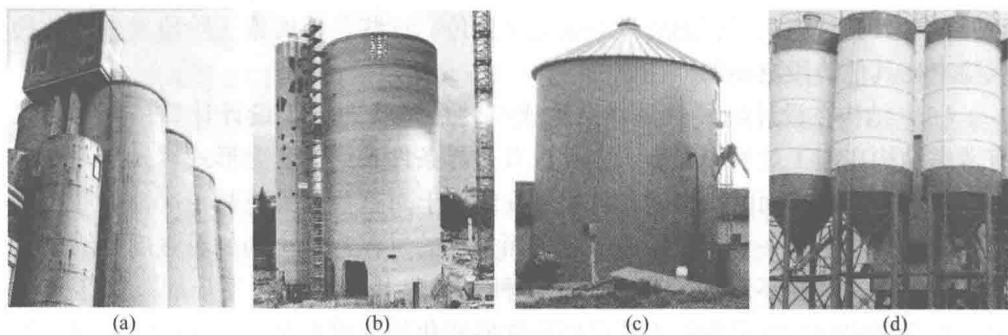


图 1-3 常见的筒仓形式

(a) 混凝土结构群仓; (b) 混凝土结构单体仓; (c) 大直径落地式钢筒仓; (d) 高架支撑式钢筒仓

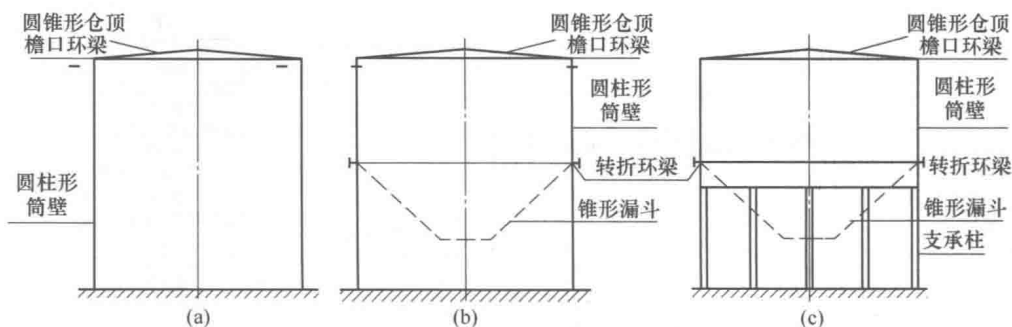


图 1-4 常见的筒仓结构

(a) 落地式钢筒仓; (b) 裙承式高架钢筒仓; (c) 柱承式高架钢筒仓

钢板筒仓的发展已有 100 多年的历史,但早期主要应用于国外,近年来,随着我国钢铁产业的快速发展,钢铁产量大幅升高,钢板筒仓在国内的应用范围逐渐扩大,其发展主要分为四个阶段:铆接式钢板筒仓、焊接式钢板筒仓、装配式钢板筒仓以及螺旋咬边式钢板筒仓。

其中铆接式钢板筒仓的仓壁采用铆接连接,施工费时费力,现已被淘汰;焊接式钢板筒仓的仓壁通过焊接连接成整体,结构气密型很好,该类型筒仓仓壁较厚,需现场焊接,建造成本较高;装配式钢板筒仓的仓壁采用波纹薄钢板,通过装配的方式现场组装,结构具有自重轻、成本低、自动化程度高、便于维护与更换等优点,应用非常广泛;螺旋咬边式钢板筒仓利用了钢材抗拉强度高的特点,在仓壁外咬成一条高于仓壁厚度的螺旋凸条,并且内部附加钢筋,使得仓体强度大大提高,结构安全可靠,目前已在国内被广泛地应用。除了混凝土筒仓和钢板筒仓外,筒仓按照不同的分类方法具有不同的类型,如按使用功能来分,划分为农业筒仓和工业筒仓,农业筒仓用来贮存粮食、饲料等粒状和粉状物料;工业筒仓用以贮存焦炭、水泥、食盐、食糖等散装物料。详细的筒仓分类如图 1-5 所示。

筒仓按材料可划分为钢筋混凝土结构筒仓、钢结构筒仓、砖混结构筒仓。而钢筋混凝土结构筒仓按浇筑形式又可分为预制装配式及整体浇筑式,预应力与非预应力筒仓。从经济、耐久性等方面考虑,工程上应用最广泛的是整体浇筑的普通钢筋混凝土筒仓和以装配式为施工方式的钢板筒仓,如图 1-6、图 1-7 所示。

钢筒仓种类较多,可以按照结构形式分为两大类,一是落地式钢筒仓,二是高架式钢筒仓。典型的高架式钢筒仓由锥形漏斗、漏斗上端筒仓以及支承裙筒组成,裙筒既可以支承于地面,也可以支承于支柱上。落地式钢筒仓将圆柱筒置于环形桩基上,筒仓的压力均匀传递给环形地基,不会出现应力集中的现象,但水平荷载或者温度以及边界变化会导致其壳体出现径向变形,产生弯曲应力。落地式筒仓是典型的均匀支承,本研究主要以落地式钢筒仓为对象。



图 1-5 筒仓分类

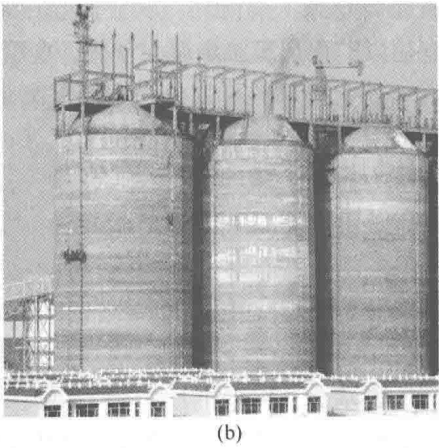
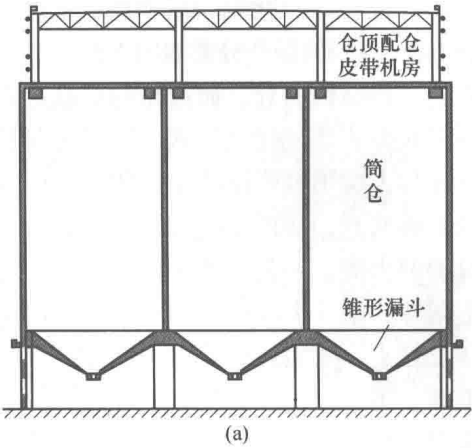


图 1-6 混凝土筒仓
(a) 混凝土筒仓构造；(b) 混凝土筒仓实景图

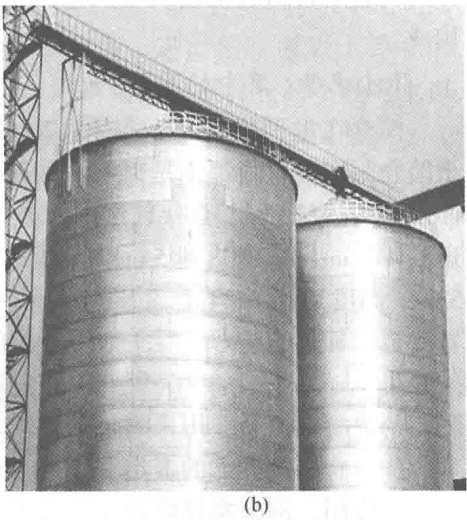
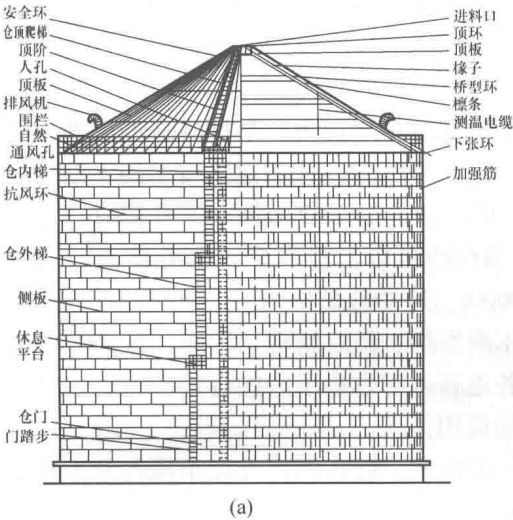


图 1-7 钢板结构筒仓
(a) 钢板筒仓构造；(b) 钢板筒仓实景图

筒仓按平面形状分为圆形、矩形、多边形等，应用最多的是圆形及矩形筒仓。此外，我国《钢筋混凝土筒仓设计规范》（GBJ 77—85）根据筒仓高度与平面尺寸的关系，可分为浅仓和深仓两类，如图 1-8 所示。浅仓主要作为短期贮料用，由于浅仓中所贮存的松散物体的自然崩塌线不与对面仓壁相交，一般不会形成料拱，因此可以自动卸料。深仓中所存松散物体的自然崩塌线经常与对面立壁相交，形成料拱引起卸料时的堵塞，因此，从深仓中卸料需用人力或动力设施，深仓主要供长期贮料用。

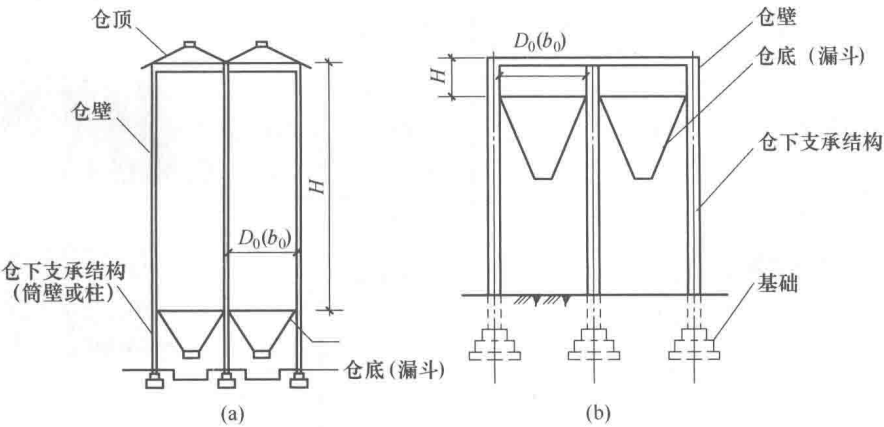


图 1-8 筒仓的形式
(a) 深仓；(b) 浅仓