

筒仓物料 颗粒流与有限元数值模拟

SILO HANDLING

GRANULAR FLOW AND FINITE ELEMENT SIMULATION

主编 王胤



大连理工大学出版社

筒仓物料 颗粒流与有限元数值模拟

SILO HANDLING

GRANULAR FLOW AND FINITE ELEMENT SIMULATION

主编 王胤



大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

筒仓物料颗粒流与有限元数值模拟 / 王胤主编. —
大连 : 大连理工大学出版社, 2015. 9
ISBN 978-7-5685-0042-5

I. ①筒… II. ①王… III. ①筒仓—细粒物料—物料
输送系统—有限元法—数值模拟 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 181022 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84708943 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连金华光彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:170mm×240mm 印张:15.75 字数:291千字
2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

责任编辑:王晓历

责任校对:栗蜚悦

封面设计:张莹

ISBN 978-7-5685-0042-5

定价:36.00元

前 言

筒仓是一种贮存散装物料的特种结构,广泛应用于粮食储藏、化工、煤矿、能源以及建筑等多个行业。由于筒仓内的物料要经常进行装卸,其理论分析和结构设计不同于其他一般形式的建筑物,对其结构的强度和稳定性要求较高。决定筒仓结构强度和稳定性的主要因素是物料作用于筒壁上的压力,而筒壁压力在装料、贮料和卸料过程中也表现出不同的状态;另外,物料作为散体介质具有较强的力学特性和流动时产生的不同流动模态,这些都决定了筒仓结构设计和理论分析具有一定的复杂性。由于筒仓结构应用的广泛性和设计分析的复杂性,因此其一直以来都是各国学者和工程师们关注的热点。研究筒仓问题的方法主要有三种:理论计算方法、实验测量方法和数值模拟方法。有限元法是基于连续体力学理论的一种高效、常用的数值计算方法。利用有限元法对筒仓结构及其内部物料的受力状态和运动过程进行模拟和计算,能够很好地分析筒壁压力分布、物料流动模态及整个结构体系的稳定性,因此这种方法成为在筒仓问题研究中被普遍使用的一种数值方法。然而,在使用有限元法对筒仓进行模拟研究时,往往存在几个难点:1. 需采用合适的本构模型,既能反映物料散体特性又能表达物料在静止和流动不同状态下的力学特征;2. 在模拟装料和卸料过程时,由于物料发生大变形而引起的有限元网格畸变问题亟需解决;3. 对于数值模拟的结果,需要准确地鉴别和区分哪些是数值计算引起的误差,哪些才是实际物理现象。只有很好地解决上述难点问题,才能利用有限元法,充分发挥其优点,为筒仓结构设计和稳定性分析提供帮助。

本书为作者几年来在筒仓结构、散体颗粒及大变形有限元法领域上的最新研究成果,也反映了筒仓研究的发展趋势。作者从2008年开始在英国爱丁堡大学从事筒仓颗粒流问题的博士课题研究,之后在2013年回国加入大连理工大学岩土工程研究所,继续从事散体颗粒力学及数值模拟的研究。本书提出了采用一种新型有限元法——任意拉格朗日与欧拉算法(ALE)对筒仓物料的处理过程进行模拟,这种方法在传统有限元法的Lagrange坐标系

统下引入 Euler 坐标系统,结合物理参量传递和自适应网格优化技术,很好地解决了由于物料大变形而引起的网格畸变问题,从而能够较好地模拟出筒仓物料的装料、贮料及卸料的整个过程。考虑物料的力学性质,本书数值模拟中除了采用传统的颗粒材料本构模型外,还介绍并采用了一种特殊的本构模型——非共轴本构模型,该模型能够考虑物料在卸料过程中所产生的主应力和主应变的旋转特性。针对实际筒仓卸料过程中所产生的压力振荡现象,本书还采用 ALE 数值模拟技术,并结合试验结果和理论分析模型,对这一影响筒仓结构稳定性的不利现象的产生机理进行了合理解释,并提出了相应的解决方案。

本书内容涉及筒仓结构压力、物料颗粒流动及有限元数值模拟等多个问题,共分 7 章,均由大连理工大学王胤编写:绪论;基于任意拉格朗日与欧拉算法的有限元法;颗粒散体中应力波传播特性;锥形筒仓卸料动力学机制与数值模拟;圆柱形平底筒仓物料流动模态与筒壁压力;圆锥形底部组合型筒仓的筒壁压力;非共轴本构模型在筒仓颗粒流数值模拟中的应用。

本书的研究成果得到了国家留学基金委与爱丁堡大学博士联合奖学金、国家自然科学基金项目(批准号:51409036)、中央高校基本科研业务费专项(DUT13RC(3)66)资金资助,在此表示衷心的感谢。同时感谢 J. Y. Ooi 教授、Y. Lu 教授对本书研究课题提供的指导和帮助,感谢杨蕴明博士、C. M. Wensrich 博士对本书研究课题提供的合作和指导,特别感谢杨庆教授对本书的撰写提供的大力支持和良好建议。

由于作者水平有限,书中仍有错误和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2015 年 9 月

所有意见和建议请发往:dutpbk@163.com

欢迎访问教材服务网站:<http://www.dutpbook.com>

联系电话:0411-84708462 84708445

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 筒仓压力理论	4
1.3 筒仓的试验研究	9
1.4 筒仓的数值模拟研究	15
第 2 章 基于任意拉格朗日与欧拉算法的有限元法	19
2.1 引 言	19
2.2 任意拉格朗日与欧拉结合算法	21
2.3 显式有限元求解方法	32
2.4 ALE 大变形网格优化算例	44
2.5 结 论	47
第 3 章 颗粒散体中应力波传播特性	48
3.1 引 言	48
3.2 应力波传播力学模型	50
3.3 有限元数值模拟	55
3.4 数值模拟结果与讨论	57
3.5 结 论	64
第 4 章 锥形筒仓卸料动力学机制与数值模拟	66
4.1 引 言	66
4.2 锥形筒仓数值模型的建立	68
4.3 经典理论	71
4.4 数值模拟结果	73
4.5 动态效应产生机理	84
4.6 参数分析	89
4.7 结 论	93

第 5 章 圆柱形平底筒仓物料流动模态与筒壁压力	95
5.1 引言	95
5.2 筒仓试验介绍	98
5.3 数值模型及其验证	103
5.4 物料流动模态分析	111
5.5 结论	118
第 6 章 圆锥形底部组合型筒仓的筒壁压力	120
6.1 引言	120
6.2 筒仓模型试验与数值模拟	122
6.3 筒壁拐点的数值处理	126
6.4 动摩擦模型	132
6.5 筒壁动压力	139
6.6 结论	143
第 7 章 非共轴本构模型在筒仓颗粒流数值模拟中的应用	144
7.1 引言	144
7.2 非共轴模型及其数值积分方法	145
7.3 单剪试验的有限元验证	149
7.4 筒仓卸料有限元模拟	156
7.5 结论	162
附录 1 锥形筒仓有限元模型程序代码	163
附录 2 直剪试验有限元模型程序代码	183
附录 3 非共轴本构模型 ABAQUS 程序 UMAT 代码(Fortran 95 程序语言)	188
参考文献	229

1.1 引 言

作为一种储存与处理散体颗粒材料的结构形式,筒仓广泛应用于粮食、建筑、能源、化工、煤炭等行业中。它具有占地面积小、存储容量大以及容易操作等诸多优点。

近些年来,随着颗粒散料储存与处理需求量的不断提高,筒仓的数量及容量也都迅速增加。1985年澳大利亚一项对金属结构研究需求的调研表明“筒仓”为仅次于“房屋”的急需研究对象,超过了桥梁、海洋结构、塔架、大跨度屋盖等结构(腾锦光和赵阳,2001)。我国仅粮食行业就兴建了几百亿斤的粮库,对贮藏库体的巨大需求极大地促进了筒仓结构的研究和发展。与此同时,单个筒仓的体积和容量也在增加,直径甚至可以达到100米以上,容量高达100万吨。

筒仓的结构形式有很多种,按照截面形式划分主要有方形筒仓和圆形筒仓,其中圆形筒仓具有受力均匀、材料能充分合理利用等优点。筒仓根据建筑材料的不同主要划分为钢筋混凝土筒仓和钢筒仓,其中钢筒仓具有施工周期短、成本低等优点而得到更广泛的应用。据调查,世界上已建筒仓中大约一半为钢筒仓,绝大多数为圆形筒仓,常见的筒仓结构形式如图1-1所示。

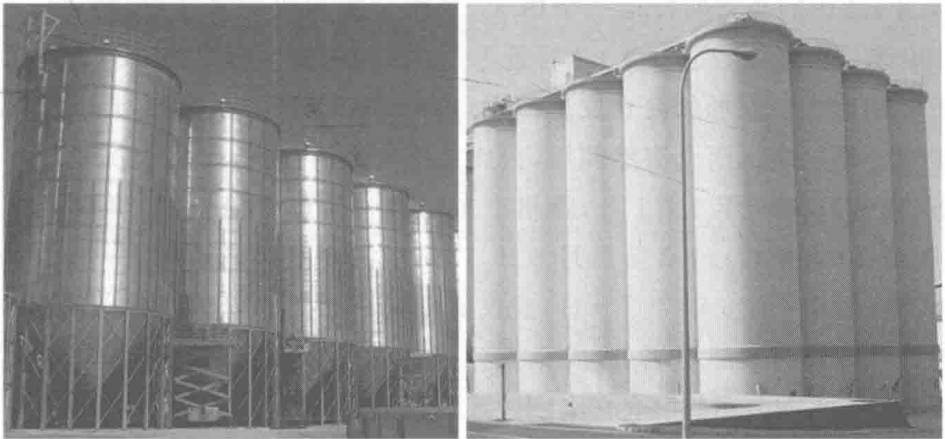


图 1-1 常见筒仓结构形式

我国早在 1985 年就颁布了国家标准《钢筋混凝土筒仓设计规范》(GB J77-85),而后又发布了修订本《钢筋混凝土筒仓设计规范》(GB 50077-2003)。与此相比,钢筒仓结构的应用显得有限。早期由于我国钢产量的制约,钢筒仓的应用受到一定的限制,因此缺少相应的设计标准和技术规范。近来,这种情况得到了一定程度上的改善,2001 年我国颁布了《粮食钢板筒仓设计规范》(GB 50322-2001),但此规范略显简单,理论不够完善,与钢筒仓结构的实际应用尚存在一定差距。

世界上其他国家和地区对钢筒仓结构的性能及强度以及筒仓的散料压力荷载进行了大量而系统的研究。世界上第一部钢筒仓结构设计规范——《欧洲钢结构设计规范之 4-1:筒仓》(ENV 1993-4-1:1999)的出版标志着钢筒仓结构的设计技术达到了新的高度。在此之后,《欧洲筒仓荷载规范》(ENV 1991-4:1999;2006)等也陆续颁布,极大地推动了钢筒仓的发展和应用。2001 年,爱丁堡大学 J. Michael Rotter 出版了《圆形钢筒仓设计指南》(Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos)一书,该书系统地总结了各国工程师、学者对钢筒仓做出的重要工作和研究成果,并对《欧洲钢筒仓设计规范》做了详细的诠释。

随着筒仓的结构规模越来越大,筒仓倒塌事故也逐渐增多。1979 年,美国爱荷华州布特城发生一起高 45 米、容重 2 500 吨的混凝土筒仓突然倒塌事故;1994 年 12 月,呼和浩特市面粉厂一筒仓在装料过程中发现筒仓的钢板漏斗变形,下沉及环梁内侧灰层脱落、露筋等现象(陈文明,1999);1996 年 9 月,美国西部一座直径为 80 英寸、容量 9 000 吨的飞灰筒仓发生倒塌事故;1997 年,法国的布雷斯特市一个由 44 个筒仓所构成的筒仓组,所占空间为长 100 米、宽 20 米、高 40 米,总容量为 130 000 吨发生倒塌,造成 11 人死亡;相近时期瑞士一农场的筒仓发生倒塌(Kiseslbach,1997);1998 年,我国天水市粮食一库一座钢筒仓突然倒塌,造成 2 死 3 伤的悲剧,损失 130 多万元(归衡石,1999);2006 年 4 月 1 日,滕州市东郭镇一储粮钢筒仓发生崩裂倒塌事故,造成 10 人死亡;2008 年 2 月 8 日,广州经济开发区新港码头一个 13 000 吨钢筒仓倒塌;2008 年 7 月 9 日,武汉青山区一个直径 7 米、高 21 米的钢板矿粉仓在卸料时突然坍塌,造成 2 人死亡(赵松,2013);2012 年年底,内蒙古霍林郭勒一水泥公司的筒仓在刚刚建成后便倒塌,造成上千万元的经济损失;与此同时,新疆天业电厂承建的 50 000 吨粉煤灰筒仓发生倒塌,也造成很大的

经济损失(李贺林,2013),如图 1-2 所示。



图 1-2 新疆天业电厂承建筒仓倒塌事故

事故的发生是多方面原因引起的。但筒壁压力计算理论,特别是卸料过程的筒壁压力计算理论不够完善,是事故发生的主要原因之一。目前,筒仓设计仍以 Janssen 压力公式初步计算贮料侧压力为基础,然后将计算结果乘以适当的修正系数以考虑物料特性及卸料时物料流动状态等不利因素的影响。然而,这些修正系数具有一定的局限性,同时 Janssen 压力公式是以静力平衡条件为基础推导出来的,没有考虑物料流动特性的影响,因此按照 Janssen 压力公式获得的筒壁压力值普遍小于实际卸料时的筒壁压力值。某些情况下卸料时实际筒壁压力值可能要达到静止贮料时的 2~3 倍。而对于同一个筒仓来说,既有静态也有动态的工况。对于筒仓这样一个动力和静力响应共存的结构来说,仅用一种静力理论模型进行计算显然是不够的,这样会给设计带来巨大难度,给结构的使用留下安全隐患。

研究表明,筒仓内物料对筒壁法向压应力受多种因素影响,十分复杂。而不同物料又具有各自的力学特性。计算不同的筒壁法向压应力有不同的理论方法。虽然近年来很多专家、学者对其进行了广泛研究,但由于人们在研究过程中分析、考查的角度和重点有所不同,目前还没有一个理论被普遍接受。因此,无论从基础理论方面,还是从实际设计方面来考虑,为筒仓的使用提供安全保障、提高生产效率,都需要进行深入细致的研究,特别是对筒仓内物料压力的空间分布状态以及随时间变化规律的研究。

1.2 筒仓压力理论

最早的筒仓压力理论是建立在流体力学理论基础上的,研究者认为筒仓内物料压力和流体压力相似,是沿筒仓高度呈线性分布的,其大小只与物料的密度和高度有关。但在该理论提出后一段时间,有学者发现运用该理论计算得到的结果与试验测得的情况相差较大。进一步研究发现,筒仓内散体物料的压力并不是像液体物料的压力沿筒仓高度呈线性分布的,其压力值呈一定的曲线分布形式,如图 1-3 所示,并受到散体物料的物理因素的影响。之后,各国学者改变了散体物料的压力计算方法,经过研究,发表了多个相关的压力计算理论及方法。

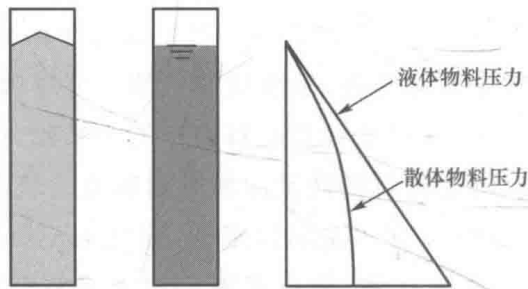


图 1-3 筒仓内液体与散体物料压力分布

1.2.1 Janssen 压力理论

1895 年,德国科学家 Janssen 推导出了著名的筒仓压力计算公式 (Janssen, 1895)。该公式的提出对筒仓压力的计算具有划时代的意义。之后的许多理论方法都是在该公式的基础上取得的,同时在当今正在使用的各国筒仓规范或设计手册中,关于筒仓内物料压力的计算都是以该公式作为依据的。

Janssen 理论公式结合了库仑土压力理论,对条形微分单元进行静力平衡分析,提出了筒仓压力计算公式。图 1-4 为 Janssen 筒仓压力计算公式推导的条形微分单元受力分析简图。

如图 1-4 所示,根据竖直方向上的应力平衡条件,可得

$$\sigma_v A + \gamma A dz = A \left(\sigma_v + \frac{d\sigma_v}{dz} dz \right) + \mu_w p_{wn} \quad (1-1)$$

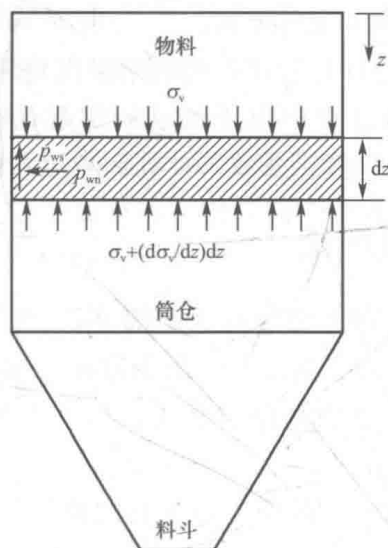


图 1-4 Janssen 筒仓压力计算公式推导条形微分单元受力分析

式中 σ_v ——物料竖向应力；
 A ——筒仓横截面积；
 γ ——物料的重度；
 z ——竖向距离，从物料顶面向下为正；
 μ_w ——物料-筒壁摩擦系数；
 p_{wn} ——筒壁法向压应力。

在 Janssen 筒仓压力计算公式中，引入了土力学中的侧压力系数的概念，即假定筒仓内物料的法向压应力 p_{wn} 与竖向应力 σ_v 值之比为—常数 k ，有 $p_{wn} = k\sigma_v$ ，将式(1-1)积分整理，可得

$$p_{wn} = \frac{\gamma R}{2\mu_w} (1 - e^{-z/z_0}) \quad (1-2)$$

式中 R ——筒仓半径；

z_0 ——Janssen 应力特征高度， $z_0 = \frac{R}{2\mu_w k}$ 。

Janssen 筒仓压力计算公式使用方便，在工程设计中被广泛使用，但其存在以下不足：

(1) Janssen 筒仓压力计算公式推导过程假设沿筒仓径向上物料的竖向应力为均匀分布的，而在实际筒仓中，由于筒径较大以及筒壁摩擦力作用，竖向应力沿径向为不均匀分布的，因此会导致公式的计算结果与实际情况不符。

(2) Janssen 筒仓压力计算公式引入了土力学中的侧压力系数，并假设其为常数，但在实际情况中侧压力系数随着高度的不同是变化的，故导致公式

计算结果与实际情况存在一定的差别。

(3) Janssen 筒仓压力计算公式得到的结果仅是考虑物料静止时的压力, 而没有考虑物料在卸料过程中由于流动所引起的压力增大现象, 故应在 Janssen 压力的基础上乘以修正系数来计算卸料过程的影响。

1.2.2 Jenike 压力理论

1973 年, Jenike 等将圆形筒仓分为两部分: 上部垂直部分和底部漏斗部分, 通过一系列图表的形式建立筒仓的最大侧压力和物料重度的比值与筒仓的高径比的关系, 以及筒仓的直径与高径比的关系, 从而推算筒仓的动、静压力。

对于漏斗部分, Jenike 等采用了可变化的侧压力系数, 得到了压力计算公式

$$p_{wn} = \gamma k_h \left\{ \frac{h-z}{n-1} + \left[h_s - \frac{h}{n-1} \right] \left[\frac{h-z}{h} \right]^n \right\} \quad (1-3)$$

其中

$$n = (m_e + 1) \left[k_h \left(1 + \frac{\mu_w}{\tan \theta} \right) - 1 \right] \quad (1-4)$$

$$h_s = \frac{R}{\mu_w k} (1 - e^{-\frac{z}{R}}) \quad (1-5)$$

式中 k ——侧压力系数;

h ——物料堆积高度;

m_e ——对称系数, 当物料为轴对称时取 1, 其他则取 0。

其中对于侧压力系数, Jenike 等给出了其变化公式:

对于静力问题, 有

$$k_h = \frac{\tan \theta}{\tan \theta + \mu_w} \quad (1-6)$$

考虑卸料过程的动态问题, 有

$$k_h = \frac{2(1 + \sin \delta \cos 2\eta)}{2 - \sin \delta [1 + \cos 2(\alpha + \eta)]} \quad (1-7)$$

其中

$$\eta = 0.5 \left(\phi_w + \frac{\sin \phi_w}{\sin \phi} \right) \quad (1-8)$$

式中 θ ——漏斗壁与水平方向夹角;

δ ——筒仓尺寸特征角;

- α ——锥形筒仓的半顶角；
 ϕ_w ——物料与筒壁的摩擦角；
 ϕ ——物料的内摩擦角。

Jenike 等认为物料在流动状态下,侧压力系数 k 是最大主应力与最小主应力的比值,而实际上主应力平面只有在筒仓轴线上才存在;Jenike 等假定物料无论是整体流动还是管状流动,侧压力分布曲线都是平滑的、统一的,但是由于物料本身的不均匀性及其分布的随机性,导致侧压力的分布也是不均匀的。

1.2.3 Reimbert 压力理论

1976 年,Reimbert 等在深筒仓试验基础上,推导了物料静止下的筒仓侧压力计算公式

$$p_{wn} = \gamma \left[H_z \left(1 + \frac{H_z}{C_0} \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right] \quad (1-9)$$

其中

$$C_0 = \frac{R}{\mu_w k} - \frac{h}{3} \quad (1-10)$$

式中 H_z ——物料堆填高度；
 k ——物料的侧压力系数。

1980 年,Reimbert 等提出了一种新的计算方法用于分析筒仓的受力机制,其中包括筒仓在偏心和不偏心卸料时的动压力情况,并通过试验得到了超压系数。他们认为超压系数主要取决于物料的力学性质、筒仓出口的形状以及筒仓的高径比。

1.2.4 Walker 压力理论

在 Janssen 理论上,Walker(1966)考虑了沿水平方向上竖向应力的不均匀分布情况,利用条形微分单元对 Janssen 解析做了进一步的改进,并将其推广到对锥形筒仓结构的筒壁压力分布计算中。Walker 筒壁压力计算公式可以表达为

$$p_{wn} = (\sigma_{hh})_w \frac{1 + \sin\phi \cos(\omega + \phi_w)}{1 - \sin\phi \cos(\omega + \phi_w + 2\alpha)} \quad (1-11)$$

其中

$$(\sigma_{hh})_w = \frac{\gamma h'}{m-1} \left[1 - \left(\frac{h'}{h_{\max}} \right)^{m-1} \right] + Q_0 \left(\frac{h'}{h_{\max}} \right)^m \quad (1-12)$$

$$m = \frac{2\sin\phi\sin(\omega + \kappa\phi_w + 2\kappa\alpha)}{\tan\alpha[1 - \kappa\sin\phi\cos(\omega + \kappa\phi_w + 2\kappa\alpha)]} \quad (1-13)$$

其中, $\sin\omega = \frac{\sin\phi_w}{\sin\phi}$

式中 Q_0 ——物料顶部均匀附加应力值;

α ——锥形筒仓的半顶角;

h' ——物料的堆积高度,从锥形体底部延伸顶点向上量起;

h_{\max} ——物料堆积的最大高度,即当筒仓内填满物料时, $h' = h_{\max}$;

ϕ ——物料的内摩擦角;

ϕ_w ——物料与筒壁的摩擦角;

κ ——筒仓物料装载参数,当填料或贮料时, κ 取值 -1;当筒仓卸料时, κ 取值 1(Nedderman, 1992)。

1.2.5 原方压力理论

在 2003 年我国发布的《钢筋混凝土筒仓设计规范》(GB 50077-2003)中采纳了原方等建立的浅仓物料压力计算方法。该方法根据物料破裂面可能发生的不同方位,将计算模型分为三种工况考虑:

(1)上部物料为锥形堆体,破裂面与筒仓中轴线相交的工况,如图 1-5(a)所示;

(2)上部物料为锥形堆体,破裂面不通过筒仓中轴线的工况,如图 1-5(b)所示;

(3)上部物料为锥形堆体,破裂面通过锥顶的工况,如图 1-5(c)所示。

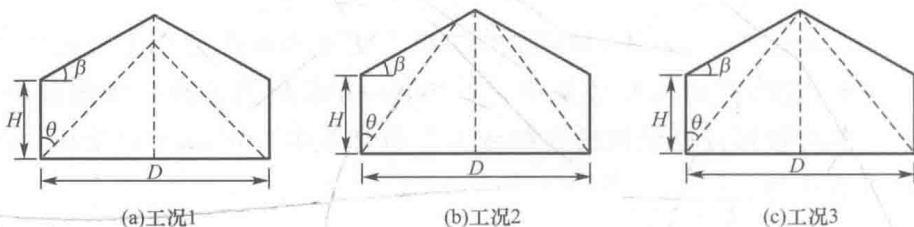


图 1-5 筒仓内物料工况示意图

以工况 1 为基本力学模型,原方等根据筒仓内物料楔形体受力平衡条件进行了推导,从保守设计角度出发,在不考虑物料与筒壁之间摩擦力作用情

况下获得了物料作用在筒壁上的法向压应力,可表达为

$$p_{wn} = \gamma s_0 \lambda_e \quad (1-14)$$

其中

$$s_0 = h + \frac{1}{3} R \tan \beta \quad (1-15)$$

$$\lambda_e = \frac{1}{4\delta_H(2 + \tan\beta)} (\tan\beta + 6\delta_H - \cot\theta) \cot(\theta + \phi) \quad (1-16)$$

式中 γ ——物料的重度;

δ_H ——筒仓高径比, $\delta_H = \frac{H}{D}$;

ϕ ——物料的内摩擦角。

对于其他两种工况,分别取不同的物料楔形体进行分析,根据几何关系分别获得物料对筒壁的法向压应力。

1.3 筒仓的试验研究

试验研究一直是筒仓研究中的重要组成部分,通过对筒仓进行试验,可以直观地获得筒壁压力的分布规律,同时也可以很好地分析各个参数对压力的影响。国内外学者做了大量筒仓试验工作,取得了丰硕的研究成果。

1.3.1 早期筒仓试验

20世纪初期,由于试验设备不够完善,学者只能对筒仓采用直接接触的测压膜片进行筒仓压力测量(赖姆伯特等,1981)。测压力设备由橡皮传感膜片密封的无底瓶,以及通过瓶颈塞子的一根玻璃弯管组成。当向该玻璃弯管内和瓶内注水时,在水压作用下,橡皮传感膜片成为具有一定凸度的部分球状体。最初认为,在校正测压管后,将颗粒状物料装入试验料箱,就足以测定箱内散体物料压力的变化情况。然而,实际情况并非如此,因为要使橡皮传感膜片上压力的传递作用能够进行下去,物料必须处于游动状态,以创造能使橡皮传感膜片运动迫使测压管内水柱升降的条件。但橡皮传感膜片上的物料在朝着橡皮传感膜片运动时,受到其他物料摩擦,会限制它们的运动,从而造成试验结果与实际情况不符。

尽管早期试验条件和试验装置不完善,不能精确地测得筒壁上的压力值,但通过这些试验仍可得出筒仓物料压力的变化规律,从而修正了早期利用静水压力理论计算筒仓物料压力的误差,这对后期的筒仓研究起到了一定的指导作用。

1.3.2 塔赫塔美谢夫筒仓试验

1938~1940年,苏联学者塔赫塔美谢夫(赖姆伯特等,1981)对苏联多处实体筒仓进行了大规模的试验。试验测得了筒仓在装料、静止贮料以及卸料情况下的筒壁压力值变化情况,如图1-6所示。

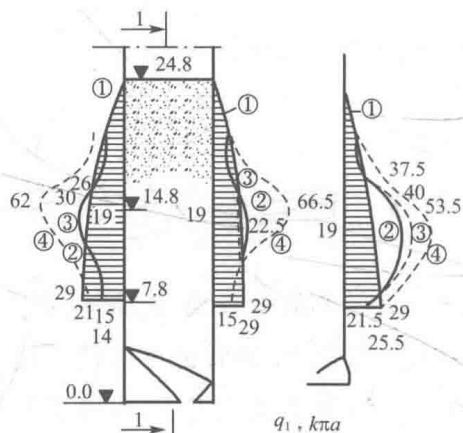


图 1-6 塔赫塔美谢夫筒壁压力试验结果

曲线①—理论压力;曲线②—装满仓后的压力;

曲线③—昼夜之后的压力;曲线④—卸料开始时的压力

同时,通过改变装料速度、出料口布置等因素,综合分析了一些参数对筒仓压力的影响,主要获得了以下结论:

(1)在大多数情况下,筒仓静止时的压力值与 Janssen 筒仓压力计算公式计算结果相一致。

(2)当筒仓卸料时,在约 1/3 仓高位置筒壁会出现超压现象。在筒仓底部漏斗部分,卸料时的压力会减小。

(3)在筒仓卸料过程中,筒壁压力会出现持续的波动。