

Tongcanglilun yu Shijian

筒仓理论与实践

中国建筑工业出版社

68
2

筒仓理论与实践

M.L.赖姆伯特 著
A.M.赖姆伯特

顾华孝 译

中国建筑工业出版社

036434

本书介绍有关筒仓的理论、设计计算、施工、使用、维护以及各种类型的筒仓实例。内容上侧重粮食筒仓，但对其它用途的筒仓也有叙述。

书中对目前筒仓发展中有关卸料过程动载应力的关键问题，作了深入的探讨，并提出了消除或减少动载应力的具体解决办法。本书还反映了西欧、美洲等地区筒仓建筑的近况。

本书可供从事筒仓土建设计、科研、教学人员参考。

M.L.Reimbert, A.M.Reimbert
Silos Theory and Practice
Trans Tech Publications
Germany 1976

* * *
筒仓理论与实践
顾华孝译

*
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*
开本：787×1092毫米 1/16 印张：15½ 字数：374千字
1981年11月第一版 1981年11月第一次印刷
印数：1—3,700册 定价：1.60元
统一书号：15040·3947

译 者 的 话

本书译自西德一九七六年英文版马塞尔·赖姆伯特和安德烈·马塞尔·赖姆伯特合著的《筒仓理论与实践》一书。

全书共三篇十二章，介绍了有关筒仓的理论、设计计算、施工、使用、维护以及各种类型筒仓的实例。

本书内容侧重于粮食筒仓，但对于其它用途的筒仓，诸如贮藏糖、饲料、砂、水泥等的筒仓也有叙述。书中对有关筒仓设计新的算法，尤其是对卸料过程中动载应力这一关键问题，作了比较详细而深入的探讨，并提供了使用“抗动载管”以及采用正多边形折板仓壁结构的筒仓等消除或减少动载应力的具体解决办法。此外，预制件在筒仓建造上的应用、各种类型筒仓的实例等内容，还反映了西欧、美洲等地区筒仓建造的近况。原书已发行法文本五版、德文本二版以及西班牙文、波兰文、南斯拉夫文和英文版本。

我国许多部门例如在冶金、建材、煤炭、化工、轻工、食工等一些工业部门，国家粮食仓库和国营农场，以及内陆运输、码头、港口等外贸、交通部门，都有应用筒仓贮藏各种用途的散装物料。本书的有关内容对如何结合我国实际情况以解决目前迫切需求方面，具有一定的参考价值。为此，将本书译出，供我国从事各类筒仓设计、建造的有关工程技术人员、科研和教学人员参考。

由于译者水平有限，译文难免有许多错误之处，希望读者批评指正。

本书译文承蒙粮食部河南科学研究设计所郑双穗、荣兰荪，开封地区建委韩曜午，南京化工学院朱庆伟，郑州粮食学院秦礼谦、袁宝成、蔡育之等同志的审阅及指导，全书插图由郑州市粮食局巴自力同志重新描绘，在此一并致谢。

1976/10/21

序

为了更好地深入了解筒仓内贮料的特性，最近几十年已经进行了许多理论和试验方面的研究，其中最有价值的是马塞尔·赖姆伯特（Marcel L.Reimbert）和安德烈·马塞尔·赖姆伯特（Andre M.Reimbert）的研究。当前，在各方面迫切要求不断增加筒仓容量的情况下，这方面的研究显得更为重要。

目前筒仓设计发展中具有最广泛而深远意义的，就是承认筒仓在卸料过程中产生超压的问题。充分考虑了超压因素并采取相应措施，筒仓的设计才能更为准确。这样的设计结果，比仅用著名的詹森（Janssen）和艾里（Airy）的经典方法更为安全和可靠。试验表明，在设计时采用恰当的理论 and 试验数据，是能够避免过去许多筒仓损坏事件的。

本书作者以杰出的理论研究和试验工作而闻名，赢得了世界范围的公认，认为他们是现代筒仓设计方法的创始人。在与作者多年来的技术交流中，我对作者运用理论阐明实际问题的能力，以及采用专业工程师需要的形式表达试验成果的能力，都有很深刻的印象。

从试验到实际工作者采用试验成果，通常有一段延缓时间。但赖姆伯特这本著作的英文版本将有助于缩短这一期限，同时也将满足所有使用英语国家长期以来的需求。作者不仅是筒仓建筑的理论家，而且是对各种仓型设计和建造积累了渊博的理论和实践知识、具有丰富实践经验的设计工程师。

当然，仅仅一本著作是不能满足一切需要的。但是，本书将能满足筒仓设计和建造许多方面的要求，并明确的以实用方式介绍当前有关的技术水平。本书对于从事这方面实践工作的工程师肯定是一本有价值的参考著作，特此推荐。

萨吉斯S.萨法里埃，P.E.

美国混凝土学会（ACI）混凝土筒仓和料仓313委员会主席

目 录

译者的话

序

引言 1

第一篇 筒仓计算

第一章 试验和基本理论 3

1-1 引言 3

1-2 一般概念 4

1-2-1 贮料的主要特性 4

1-2-2 仓底压力的测定 10

1-3 第一组试验——仓底压力测压膜片测试 12

1-3-1 试验结果 12

1-3-2 贮料压力的一般概念 16

1-3-3 仓壁压力计算 17

1-3-4 平均垂直压力与侧压力比值 q/p 的大小 20

1-3-5 侧压力和垂直压力 24

1-3-6 关于仓壁摩擦平衡荷载曲线函数关系的研究 25

1-3-7 关于圆筒仓仓底垂直压力的结论——特性纵坐标 29

1-3-8 仓壁上的总侧压力 30

1-3-9 正多边形筒仓 33

1-3-10 矩形筒仓 33

1-3-11 无定界两平行垂直仓壁筒仓 34

1-3-12 贮料内竖杆上的拉应力 34

1-3-13 湿物料的筒仓 35

1-3-14 试验结果与计算结果的对比 35

1-3-15 测压膜片测压试验的结论 41

1-4 第二组试验——仓底压力压电测试 43

1-4-1 试验 43

1-4-2 试验结果 45

1-5 结论 57

1-6 第一章附录 60

1-6-1 计算方法提要 60

1-6-2 $\operatorname{tg}^2 \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right]$ 的等值 63

1-6-3 与过去方法相比,对现有计算法的探讨 64

1-6-4 模型筒仓试验的观察结果 64

1-6-5 度量单位 64

第二章 筒仓最大应力的确定 65

2-1 贮料特性和仓壁性质 65

2-1-1 光滑仓壁 66

2-1-2 粗糙仓壁 66

2-2 卸料引起的超压 66

2-3 偏心卸料的影响 66

2-4 仓壁状况的影响 66

2-4-1 应力 66

2-4-2 温度变化 67

2-5 贮料特性变量的研究 69

2-5-1 容重 69

2-5-2 内摩擦 70

2-5-3 对仓壁的摩擦 70

第三章 仓壁上的静应力与计算实例 70

3-1 圆筒仓 70

3-1-1 钢筋混凝土筒仓 70

3-1-2 先张法和后张法预应力的混凝土筒仓 71

3-2 正多边形筒仓 72

3-3 矩形筒仓 73

3-3-1 应力 73

3-3-2 确定矩形筒仓仓壁上弯矩的实际方法 74

3-4 确定仓壁应力公式的数值应用 76

3-4-1 光滑仓壁圆形筒仓 76

3-4-2 粗糙仓壁方形筒仓 77

3-4-3 粗糙仓壁矩形筒仓 78

3-4-4 正多边形筒仓 79

3-5 仓壁上的总侧压力 80

3-6 筒仓内吊杆上的拉应力 80

第四章 仓壁横截面的确定 81

4-1 钢筒仓 81

4-1-1 圆筒仓 81

4-1-2 方筒仓 83

4-2 钢筋混凝土筒仓 88

4-2-1 圆筒仓 88

4-2-2 矩形筒仓 90

第五章 筒仓漏斗	93
5-1 荷载	93
5-1-1 贮料引起的压力	94
5-1-2 装满漏斗的贮料重量和漏斗及其装置的重量	94
5-2 各种形状漏斗的计算	95
5-2-1 截头圆锥形漏斗	95
5-2-2 正棱锥形漏斗	96
5-2-3 不对称(偏心)漏斗	97
第六章 筒仓支柱	98
6-1 应力	98
6-1-1 压应力	99
6-1-2 弯矩	99
6-2 支柱计算要点	101
第七章 混凝土仓壁配筋示例	104
第八章 大容量水平筒仓仓壁的应用力计算	105
8-1 按挡土墙计算的大仓壁	106
8-1-1 第一种情况: 贮料顶面为水平	106
8-1-2 第二种情况: 贮料顶面为倾斜	107
第二篇 筒仓的使用与维护	
第九章 筒仓的卸料	108
9-1 卸料过程详述	108
9-1-1 上层料过重压实下层物料产生的内聚作用	108
9-1-2 贮料内温度变化使颗粒相互结块而产生的内聚作用	113
9-1-3 物料贮藏不当引起发热而产生的内聚作用	113
9-2 仓形对卸料速度的影响	114
9-3 偏心卸料	114
9-4 均匀卸料	115
9-5 料堆层次无颠倒的卸载	120
9-6 物料通过孔口时的流动	122
9-7 筒仓卸料时的超压	122
9-7-1 说明和试验	122
9-7-2 “减压管”(“抗动载管”)	126
9-7-3 布置在仓筒内的横向障碍物	130
9-7-4 已坏筒仓的检修	130
9-8 平底筒仓的特殊情况	137

9-9 取样	139
第十章 粮食和油料的贮藏、糖的贮藏, 筒仓的火灾和窒息	139
10-1 气控保藏	140
10-1-1 粮食生命活动加剧	140
10-1-2 微生物	140
10-1-3 防治	141
10-2 粮食通风保藏	141
10-3 最新研究	142
10-3-1 害虫和螨类	142
10-3-2 某些油料种籽在二氧化碳气体中表现的特性	142
10-3-3 低温与粮食贮藏	144
10-4 糖的贮藏	144
10-5 筒仓的粉尘爆炸和窒息事故	144

第三篇 各种类型筒仓的建造

第十一章 筒仓的种类	145
11-1 农业筒仓	145
11-1-1 农场筒仓	145
11-1-2 合作社筒仓	145
11-1-3 港口筒仓	146
11-2 工业筒仓	146
第十二章 各种类型筒仓的建造	146
12-1 木结构筒仓	146
12-1-1 板条仓壁筒仓	147
12-1-2 镶板条仓壁筒仓	147
12-1-3 组合板件仓壁筒仓	147
12-1-4 波形仓壁筒仓	153
12-2 钢筒仓	155
12-2-1 正多边形钢筒仓	155
12-2-2 自行运载式筒仓	172
12-2-3 用折板仓壁形成星仓的圆筒仓	173
12-2-4 波形钢板圆筒仓	176
12-2-5 预制钢板件圆筒仓	194
12-2-6 叠板结构筒仓	202
12-2-7 螺旋面筒仓	207
12-3 钢筋混凝土筒仓	211
12-3-1 预制构件钢筋混凝土筒仓	211
12-3-2 常用的钢筋混凝土筒仓	222
12-3-3 预应力钢筋混凝土筒仓	233
12-4 塑料筒仓	237

引 言

粮食收获随季节而变化及其产量不规则，加以全世界粮食分布也不相同，已不断地造成粮食消费上的不平衡。因此须把粮食储存起来，以保证更加均衡的粮食商品消费。

对于谷类、大麦、制麦芽的大麦等粮食，正逐渐广泛采用筒仓贮存(实际上现已采用)，这样能够消除繁重的袋装作业和节省劳力费用。鉴于工业化加速发展的结果，对于某些食品如糖、面粉和饲料等，以及某些工业产品如塑料粒、各种粉料等，亦可采用筒仓贮存。

筒仓通常是用钢或钢筋混凝土建造的。它是由各种不同截面、较高的单个筒仓并排组成的。筒仓底部安装卸料漏斗，仓筒上边的上通廊装有仓筒装料的运输设备。

筒仓设施基本方案(图1-1)包括：

- 1) 卸料接收坑 F 。
- 2) 把接收坑的来料升运到仓顶上通廊的提升机 E 。
- 3) 上通廊皮带运输机 T ，将提升机卸下的粮食输送至仓顶进粮口流入仓筒。
- 4) 仓筒 C 。
- 5) 下通廊皮带运输机 T' ，将仓筒卸下的粮食运出。

其它辅助设备，如清理设备、称重设备等，因不属本书范围，故从略。

通常，粮食装运设备是由专门公司进行设计的，而筒仓的结构设计以及由贮料引起的应力问题，属于土木工程师的研究范围，是本书第一篇的课题。

关于贮料的侧压力及其与仓壁摩擦力在仓壁上产生相当大的应力问题，在探讨最初按经验计算的方法和按改进方法进行不断试验的结果等过程中，为确定上述问题，提出了一些建议。

最初，筒仓设计者在计算仓壁时，把贮料的作用看成似乎与贮料比重相同液体的作用一样。

随后，另外一些筒仓设计者引用了挡土墙侧压力的计算理论。

以后，又有一些试验者，如汉堡(Hamburg)的一位工程师普兰特(Prante)和法国的艾里，一方面论证了上述这些计算方法是错误的，另一方面用实验证明，筒仓内贮料的侧压力和仓底压力不是无限地增大，而是趋于某个极值。

最后，某些作者例如詹森、库宁(Koenen)和莫尔施(Mörsch)，根据贮料侧压力与其垂直压力的比值 P/q 不变的假设，提出了若干理论。

对仓壁无限小单元体上贮料平衡的函数进行积分，假设所得的比值 P/q 为常数，则用

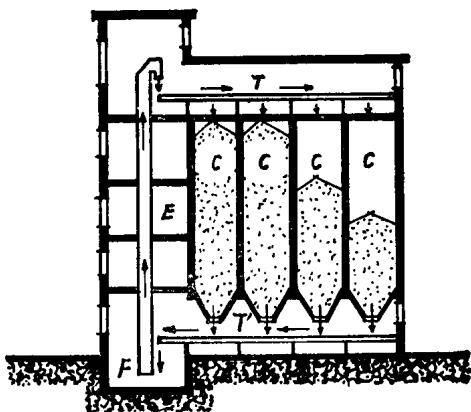


图 1-1

数学方法能很容易地解释这些理论，同时得到一个指数式，用它能比较简便地计算贮料对仓壁的侧压力。

在这以后，由于利用压电原理和使用应变仪测压的新方法，对各种缩小比例、不同形状的模型筒仓和实际筒仓曾进行了许多精确的试验。

本书将介绍这些试验所取得的主要成果，以及由此导出的计算方法。从而可以看出，这些试验证实了目前计算方法是非常完善的。

为了便于更熟练地应用这些公式，书中提供了有关仓壁和筒仓主要构件的许多计算实例。

本书的第二篇将阐述有关筒仓的操作、维护、卸料，以及粮食和油料贮藏方面的问题。

第三篇是专论现代各种类型筒仓构造，以便对目前使用的各种方案有一个总的概念。

目前世界各国对筒仓均感需要，我们希望本书在筒仓设计和构造方面的阐述，对读者有所裨益。

第一篇 筒仓计算

第一章 试验和基本理论

1-1 引言

关于筒仓的研究已经进行了多年。作者之一曾作为专家被邀从事粮食圆筒仓主要是在仓筒上部和悬吊漏斗处开裂问题的研究，以便提出如何加强钢筋混凝土的措施。

在漏斗与仓壁连接处出现裂缝并不意外，因为在审查设计计算书时发现，这是由于设计者在设计时没有把动载应力考虑进去，而在卸料过程中，这种动载应力有时是相当大的。

不过，在筒壁上部 $1/4$ 处的复杂裂缝倒是令人意外的。如果设计者在筒壁配筋时极限有效荷载取得大一点的话，计算表明仍为原来贮料对仓壁作用出现的初期应力状态，照理在所有仓筒上是不应该有复杂裂缝的。

对于建造在室内的仓筒来说，只受到贮料作用产生的应力。这时只需要检查该应力是否已被设计者所考虑。为此，曾经在两条切径母线上纵剖的圆筒仓上进行实验。两个相对安放的半圆筒用带子捆在一起，按经典的詹森理论进行平衡计算。

当筒仓装料时，在粮食高度还未达到平衡计算高度以前，带子被绷开了。因此，在开始研究时，使我们得出结论：用詹森法计算的侧压力显然比实际值小。

于是用缩小比例的各种形状和尺寸的模型筒仓以及实际筒仓进行系统试验。试验得到与经典理论不同的结果。

(1) 仓底平均垂直压力与仓壁平均侧压力的比值 q/p 不是一个常数，它随贮料高度和仓形而变化。

(2) 在矩形筒仓内，在同一高度上，仓壁长边和短边的平均侧压力是不相同的。

(3) 平均水力半径相同的多边形筒仓和圆筒仓，在同一深度上的平均单位压力各不相同，它与仓形有关。

在技术文献上，还未见到关于多边形筒仓根据试验结果进行计算的确切资料。然而，在开始的一些试验中清楚地表明，多边形仓底最大压力与相同平均水力半径圆仓底最大压力之间看来似乎存在某些相关规律。关于这些规律，曾用各种不同尺寸的筒仓进行反复试验研究，并得到了证实。

现将试验结果，以及由此导出的筒仓计算方法介绍于下。

最初，是用压力膜片测量仪进行试验，后来改用了压电式测压仪。在以后的章节中，将按试验顺序介绍测定结果。

我们将用到为采用压电式测压仪来计算仓底压力所需的知识，并提供这些试验结果。然后，把压电测量试验的计算结果与压力膜片测量试验的计算结果进行对比。

现对矩形筒仓的情况，包括筒仓卸料期间观察到的现象进行研究。在开始研究前，先回顾一下某些一般概念。

1-2 一般概念

筒仓内贮存的是粉状的或散粒状的物料，对于它们的平衡规律至今认识还很不完善。根据实验观察，曾经企图把弹性、均质、各向同性、无定形物料的平衡理论转用于解决散粒体问题。但遗憾的是，这些假设没有一个可以适用于粉状物料。此外，这种方法对大多数应考虑的因素也未能完全包括进去。

很显然，时间因素、装料速度、贮料压实情况、筒仓装料时物料的下落高度以及贮料的压缩性，对于贮料的主要性质：容重、内摩擦角以及仓壁的摩擦系数的影响都很大。

贮料的平衡问题是非常复杂的。弹性理论不适用，也不能彻底解决问题。因此，针对仓壁上的贮料侧压力几乎不可能直接确定的情况，引进了把贮料在仓壁各处摩擦力的测定结果进行积分的方法，将全部观察到的现象联系起来，以数学函数形式表示，然后推导演算出仓壁上侧压力的数值。

因此，研究的目的是确定仓底上的总压力，因为它与贮料已知重量的差数就是贮料对仓壁摩擦的平衡荷载。

为了能够对各次试验结果进行比较和准确地解释，试验通常是在相同的条件下进行的。所以，把各试验筒仓的装料速度和贮料下落高度都调节到恒值。

所有试验的时间因素、贮料的容重和内摩擦角也是相同的。

因此，按照筒仓“控制”装料时所观察到的试验实况用数学方法表示，提出了根据这些试验建立的计算方法。然而，在工业筒仓中，装料速度不是固定不变的，贮料下落高度也有变化。这就是说，堆料是不受控制的。因此，在应用按堆料受控导出的公式时，应把预先取得的贮料主要特性在最不利时的极值考虑进去。

现在，对贮料这些性质的上限值和下限值知道得还很少，因为公式中所包括的数据很大一部分是不准确的，或者是不完善的。

用某些物料进行的研究已部分地填补了这一空白，不过还需要用其它粉状贮料进行研究加以完善。下面将提供一些贮料的资料。

1-2-1 贮料的主要特性

为了研究每一种贮料，需要测定下列特性：

1. 内摩擦角：颗粒间的摩擦角。
2. 在光滑混凝土壁、粗糙混凝土壁、光滑钢板、粗糙钢板上的摩擦系数。
3. 休止角。
4. 容重。

1. 内摩擦角

应用赫沃尔斯利 (Hvorsley) 扭转-剪切仪，先加以由 0.110 至 0.861 公斤/厘米²的

正常荷载，然后再施加更高的压力（所用单位见1-6-5节），测量贮料的内摩擦角和贮料对仓壁的摩擦系数。

现已知道，试样周长上只需要发生几毫米（4~6毫米）的形变，内摩擦角即迅速地达到最大值。与此同时，试样的体积增加了3~4%。然后，在持久的剪切过程难于建立而略有波动的情况下，剪切阻力减小。

因此，对于同一压力，可以求得内摩擦角最小值和最大值两个数值范围（最大值是在形变很小时测得的）。粟的内摩擦最大值和最小值的变化幅度列于表1。

粟的内摩擦最大值和最小值的变化幅度

表 1

正常压力 (公斤/厘米 ²)	tgφ 最大值	tgφ 最小值	摩擦角	
			最大值	最小值
0.1105	0.524~0.477	0.467~0.370	27°30'~25°30'	25°~20°10'
0.233	0.617~0.530	0.493~0.401	31°40'~27°55'	26°15'~21°50'
0.648	0.645~0.608	0.528~0.475	32°50'~31°20'	27°50'~25°25'
0.861	0.651~0.608	0.528~0.487	33°05'~31°20'	27°50'~26°

其它散粒体摩擦角极值的研究结果见图1-2~图1-12。

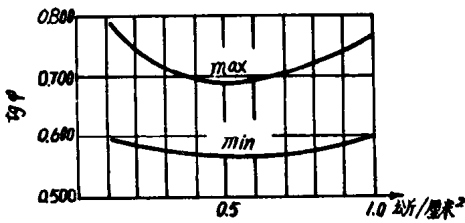


图 1-2 油菜籽

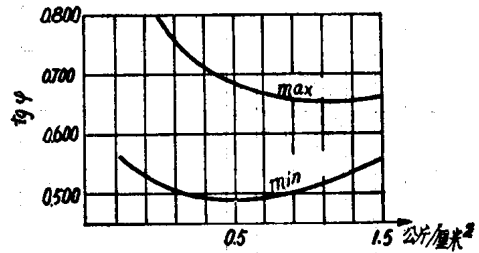


图 1-3 芸苔(欧洲油菜籽)

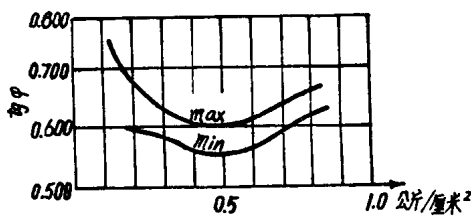


图 1-4 山茶籽

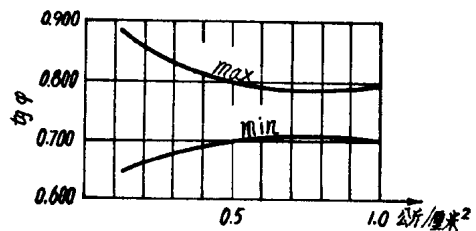


图 1-5 粟

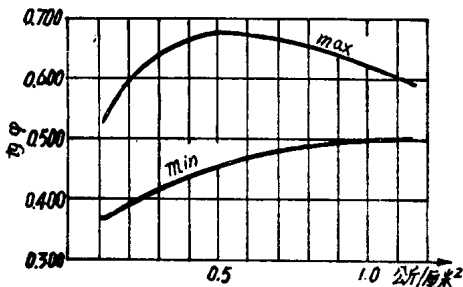


图 1-6 粟

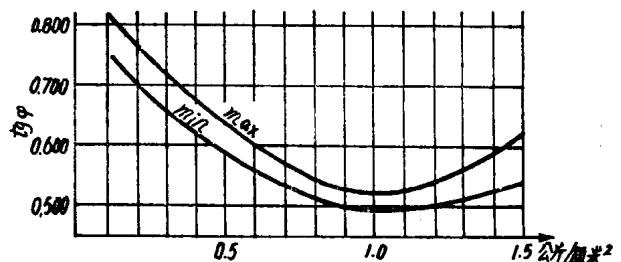


图 1-7 玉米

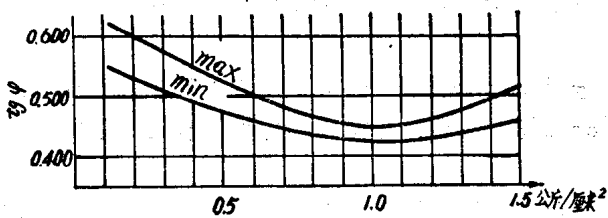


图 1-8 大麦

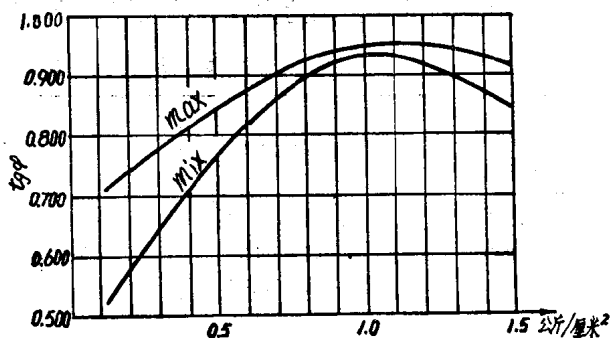


图 1-9 过磷酸钙粉末

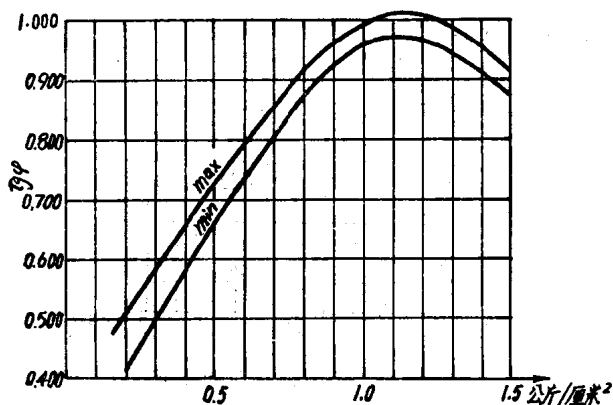


图 1-10 Reno 过磷酸钙

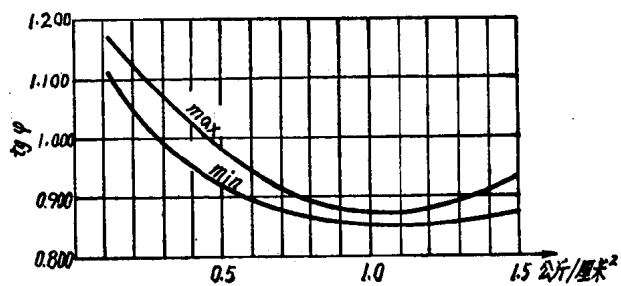


图 1-11 Agrophos 过磷酸钙

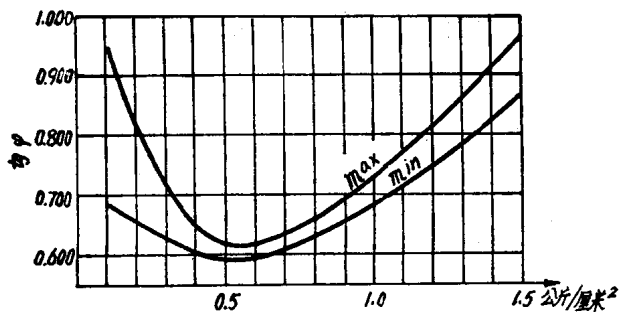


图 1-12 Gafsa 过磷酸钙

这些图线是以压力作为横坐标，相应的摩擦角的 tg 值作为纵坐标绘成的。可以看出，所得的全部图线并不完全相似：

以粟为例，内摩擦系数随荷载的增加有规律地急剧增加，随后趋于恒值。

对油料籽粒来说，情况各不相同，有的是内摩擦系数达到最小值以后再增加，有的如芸苔的内摩擦系数最大值曲线没有递增^①。

由于颗粒性质不同，在内摩擦上的这些差异，需要作一些探讨。

如果贮料内部的颗粒没有很大压缩性，贮料所得的各种参数，是贮料各组成部分间的内摩擦以及料堆压实程度增加的综合结果。实际上，静压力对综合作用变化的影响是不大的。但另一方面，静压力对振动是非常敏感的。

由于粮食的比重小，这种静压力的波动实际上是很小的，而粮食可压缩的范围倒是很大的。

以粟为例，不仅必须考虑粮粒的可压缩性，而且还要考虑表皮的柔软性，该表皮不与内部粘附、包围在粮粒外边。可以想象，最初随着压力的逐渐增加，粮食的压实度由于粮粒表皮的柔软性而迅速增加。一旦粮粒表皮与压缩性差的粮粒接触，其压实度变化就不再容易察觉，至少在试验压力范围内是如此。

对于油料来说，另一特性是摩擦接触表面的类似润滑作用（reciprocal friction）。事实上，即使在压力很小的条件下，一点液态油也会减少粮粒表面的摩擦作用。因此，剪切试验所测得的摩擦力，是类似润滑作用引起的摩擦减小，以及全部粮粒压缩引起的摩擦增加两者的综合结果（图1-2~图1-12）。

2. 仓壁上的摩擦系数

在平均压力0.162公斤/厘米²时进行测定。在光滑和粗糙的钢筋混凝土仓壁上，以及在钢板上的摩擦系数测定结果列入表2。

由于贮料和仓壁的种类繁多，表上不可能列出全部的摩擦力情况。因此，对于特殊贮藏情况建议先进行试验，以便在各项计算中采用精确的假设。

3. 休止角

在平行六面体框架上，用精密水准仪直接目测物料在大玻璃上的倾角，来测定物料的休止角。测得的平均值列于表3。

4. 表观密度（容重）

应用具有一定下落高度的漏斗，采用测定粉料（水泥）表观密度的方法测定。测定结果列于表4、5。表5所列的其它物料的数值供对比用。

贮料物理性能的变动，对于由贮料引起的应力计算有很大影响。这一点在以后（第二章）要进一步阐明。使用者和设计者所签定的合同，应该精确地规定贮料特性的极值（最大值和最小值），这是很重要的，以便在上述条件最大应力的作用下，筒仓具有足够的稳定性，很明显，最大应力的确定与贮料这些特性有直接关系。

显然，这些准确的说明使设计者不致于过低地假设应力，以确保使用者能获得需要的筒仓。从而，可以避免许多严重事故和诉讼事件。

在订购筒仓以前，将贮料的样品送到专门的实验室，能很容易地断定贮料的特性。此

① 原书为“降低没有最小值”。——译者

在光滑和粗糙表面仓壁上的摩擦系数

表 2

物料种类	摩擦表面	tg φ		摩擦角 φ		
		最大值	最小值	最大值	最小值	
油菜籽	A	0.387	0.311	21°10'	17°15'	
	B	0.858	0.655	40°40'	33°15'	
	C	0.310	0.274	17°15'	15°20'	
	D	0.438	0.470	28°20'	25°10'	
山茶籽	A	0.405	0.396	22°05'	21°05'	
	B	0.698	0.597	35°	30°50'	
	C	0.382	0.356	20°55'	19°40'	
	D	0.443	0.429	23°55'	23°15'	
芸 苔	A	0.355	0.327	19°35'	18°10'	
	B	0.524	0.405	27°40'	22°	
	C	0.337	0.319	18°40'	17°40'	
	D	0.302	0.291	16°50'	16°15'	
罂 粟	A	0.448	0.417	24°10'	22°40'	
	B	0.723	0.642	35°50'	32°45'	
	C	0.362	0.330	19°55'	18°15'	
	D	0.474	0.374	25°20'	20°30'	
粟	A	0.542	0.486	28°30'	25°55'	
	B	0.536	0.404	28°10'	22°	
	C	0.343	0.324	18°55'	18°	
	D	0.412	0.343	22°20'	18°55'	
过 磷 酸 钙	Gafsa	A	0.715	0.629	35°30'	32°10'
		B	1.040	0.825	46°15'	39°30'
		C	0.468	0.342	25°05'	18°55'
	粉 末	A	0.678	0.512	34°10'	27°10'
		B	0.678	0.555	34°10'	29°
		C	0.637	0.570	32°30'	29°40'
	Reno	A	0.653	0.530	33°10'	27°55'
		B	0.872	0.561	41°05'	29°20'
		C	0.715	0.468	35°30'	25°05'
	Agrophos	A	0.745	0.590	36°40'	30°35'
		B	0.752	0.653	36°55'	33°10'
		C	0.905	0.715	42°10'	35°35'

表中, A——光滑的钢筋混凝土;
 B——粗糙的钢筋混凝土;
 C——光滑钢板;
 D——粗糙钢板。

不同物料的休止角

表 3

物料种类	休止角	物料种类	休止角
玉米	25°	油菜籽	28°40'
燕麦	33°	山茶籽	29°20'
有芒大麦	27°30'	过磷酸钙 {	Agrophos 42°
粟	24°20'		Gafsa 40°
芸苔	27°		Reno 41°
罌粟	29°30'		粉末 35°

不同物料的容重

表 4

贮料	容重 (公斤/米 ³)	贮料	容重 (公斤/米 ³)
玉米	750	油菜籽	650
燕麦	495	山茶籽	665
有芒大麦	552	过磷酸钙 {	Agrophos 780
粟	690~705		Gafsa 950
小米	765		Reno 1105
芸苔	655		粉末 1301
罌粟	600		

不同物料的容重、休止角和在仓壁上的摩擦系数

表 5

贮料	平均容重(公斤/米 ³)	休止角	仓壁上的摩擦系数
燕麦	500~540	26°~28°	0.359~0.466*
小米	750~840	24°~26°	0.361~0.466*
亚麻籽	600~680	23°~26°	0.308~0.414*
玉米	780~820	26°~29°	0.308~0.424*
麦芽	530~600	21°~23°	0.325~0.445*
大麦	550~690	25°~29°	0.325~0.456*
豌豆	800~880	24°~26°	0.268~0.445*
大米	580~620	24°~26°	0.394~0.601
面粉	500~800	35°~45°	0.577~0.840
水泥	1400~1500	30°~40°	0.477~0.555
无烟煤	780~820	26°~28°	0.466~0.510
大煤块	800~850	35°~40°	0.404~0.700
劣煤	820~880	27°~32°	0.345~0.650
熔渣	635~750	35°~40°	0.730~0.840
焦炭	440~500	37°~41°	0.466~0.730
云煌岩	1900~2100	43°~46°	0.730~0.840
干砂	1600~1800	38°~45°	0.510~0.785
碎石	1700~1850	40°~45°	0.510~0.785

* 在平板仓壁上测得摩擦系数的最小值。

外，使用者可以要求设计者必须做这方面的调查。然后，设计者能够把满足合同要求而选定的计算结果通知使用者。

1-2-2 仓底压力的测定

必须叙述以往的许多试验情况（包括初期试验失败的教训），以便了解试验中遇到的困难。实际情况表明，这类试验做得还很不够，各次试验得出的结论也有差异。

1. 采用与粉状贮料直接接触的测压膜片

最初采用的试验装置如图1-13所示，它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所组成。

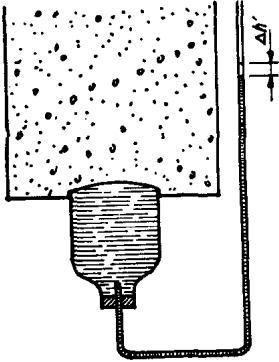


图 1-13

往该玻璃管内和瓶内注水，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。

最初以为，在校正测压管后，将粉状贮料装入试验料箱，就足以能够测定箱内粉状贮料压力的变化情况，因为当传感膜片上的压力每次发生变化时，测压管内的水柱高度照理应产生相应的变化。

然而，实际情况决非如此，因为要使传感膜片上压力的传递作用能够进行下去，贮料必须处于游动状态（move about），以造成能使传感膜片运动以及迫使测压管内水柱升降的条件。这时，传感膜片上的或影响传感膜片的那部分贮料，因在它们朝传感膜片运动时，受到邻近静止贮料的摩擦作用，运动便受到限制，所以，根据测压管内水柱高度变化所测定的压力，只是作用于贮料内部实际压力的一部分。

因此，不再用这种仪器测定粉状贮料在仓壁上的压力，而只是用它来测定具有2/10000毫米精度的贮料线性位移。

事实上，测压管内水柱高度的变化 $\Delta h'$ ①，并没有提供粉状贮料内压力变化的准确估计，但提供了传感膜片体积变化的精确资料，即传感膜片上贮料的线性位移。

试验所用传感膜片的直径为10厘米，传感膜片凸度为4毫米时，直径0.3厘米校正测压管内水柱高度作为初始高度读数。测压管内的液面用游标尺读数，接近到1/10毫米的精度（图1-14）。

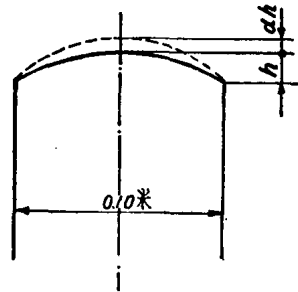


图 1-14

因此，可以按下列计算准确估计贮料的线性位移。

传感膜片所围部分球体的体积为：

$$V = \frac{1}{6} \pi h (3a^2 + h^2)$$

所以

$$dV = \frac{1}{2} \pi (a^2 + h^2) dh$$

测压管内液面变化为 $\Delta h'$ ，则相应的体积变化为： $\frac{\pi d^2 \Delta h'}{4}$ 。

d 和 $\Delta h'$ 用下列数值代入：

$$d = 0.3 \text{ 厘米 (测压管内径)}$$

① 原书为 h' 。——译者