

# 大型钢筒仓的结构行为与设计

滕锦光 赵 阳

(香港理工大学土木与结构工程系)

**摘 要** 筒仓结构广泛应用于农业、矿业、化工、电力等诸多领域中的散料储存。混凝土筒仓在国内已有许多应用,但钢筒仓的应用还很有限。过去二十年里国际上对钢筒仓结构的性能及强度进行了大量的研究,香港理工大学在近几年也进行了许多研究。本文总结了大型圆形钢筒仓结构行为及设计方面的近期研究进展。首先对钢筒仓的结构形式及散料荷载进行简单讨论,并介绍钢筒仓的主要破坏形式及相应的研究,给出了可供钢筒仓结构设计直接应用的部分主要设计公式。还介绍了钢筒仓结构设计中的计算机分析方法,最后指出钢筒仓结构尚需进一步研究的课题。

**关键词** 钢筒仓 结构行为 设计 屈曲 计算机分析

中图分类号: TU33 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2001) 04-0046-10

## 1 引 言

筒仓结构广泛应用于农业、矿业、化工、电力等诸多领域中的散料储存。混凝土筒仓在国内已有许多应用,并早在 1985 年就颁布了国家标准《钢筋混凝土筒仓设计规范 (GBJ77-85)》<sup>[1]</sup>,但钢筒仓的应用还很有限。而钢筒仓结构在许多情况下比混凝土筒仓更为经济,目前世界上已建筒仓中大约一半为钢筒仓,其中绝大多数为圆形筒仓。圆形钢筒仓是一种组合的旋转薄壳结构,复杂的结构性能加上不合理的设计准则导致了許多钢筒仓的结构破坏。

近年来,随着散料储存需求量的不断提高,钢筒仓的数量及容量都迅速增加。单位存储量 10,000t 的高架式钢筒仓已成批兴建,而落地式钢筒仓的容量

更超过了 100,000t (直径达 100m)。图 1 所示即为一组单位容量 10,000t 的大型钢筒仓群。传统的简单设计方法成为钢筒仓结构破坏的主要原因,筒仓成为所有工程结构中破坏率最高的结构形式。筒仓结构破坏所导致的经济损失不仅限于结构本身,更主要的是引起工业生产过程的中断。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”的急需研究的对象,超过了桥梁、海洋结构、塔架、大跨屋盖等结构。过去二十年里国际上对钢筒仓结构的性能及强度进行了大量的研究,香港理工大学在近几年也进行了许多研究。最近,世界上第一本钢筒仓结构设计规范——欧洲钢结构设计规范之 4.1: 筒仓<sup>[2]</sup>的出版标志着钢筒仓结构的设计技术达到了新的高度。该规范中许多稳定及强度设计准则参照欧洲钢结构规范之 1.6: 总则: 壳体结构的补充规定<sup>[3]</sup>。

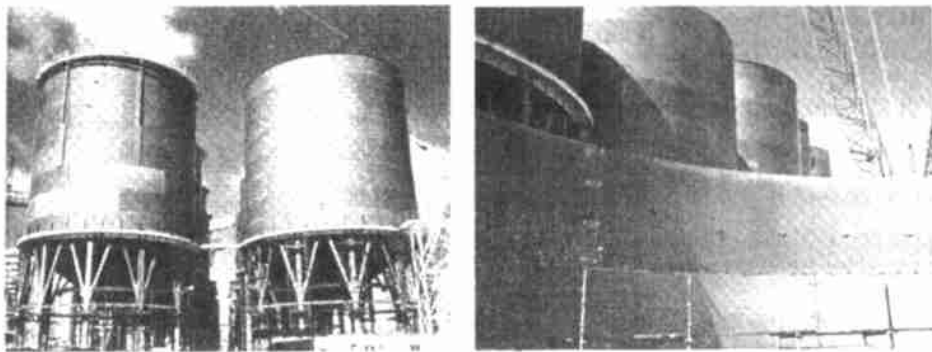


图 1 大型钢筒仓工程实例

本文将总结大型圆形钢筒仓结构行为及设计方面的近期研究进展,并给出了可供钢筒仓结构设计直接应用的部分主要设计公式,其中涉及的许多工作已为欧洲钢筒仓规范<sup>[2]</sup>吸收。本文还将介绍钢筒仓及其它钢壳结构设计中的计算机分析法及相关的技术问题,最后指出钢筒仓结构尚需进一步研究的课题。

## 2 结构形式及荷载

### 2.1 结构形式

钢筒仓可分为落地式(图 2a)和高架式(图 3)两种。典型的高架式筒仓由锥形漏斗、置于其上的仓筒及支承裙筒组成(图 3)。其中的仓筒/漏斗连接处常称为转折连接。裙筒可以直接支承于地面(图 3a),也可由多根柱子支承(图 3b)。落地式筒仓、落地裙筒支承及多柱支承(支承柱多于 12 根)的高架式筒仓都可认为是均匀支承的。

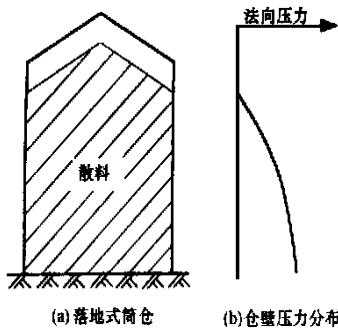


图 2 落地式筒仓及散料荷载

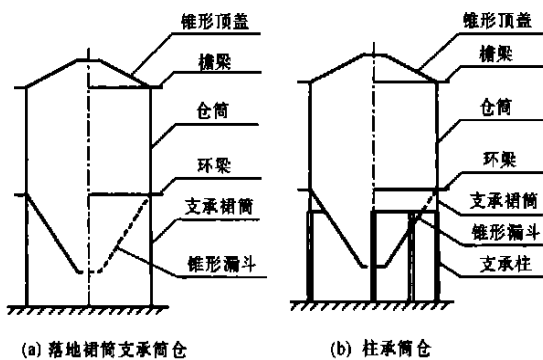


图 3 典型的高架式筒仓

### 2.2 仓筒壁压力分布

除了与其它结构相同的常规外荷载之外,筒仓结构还承受由所储存散料引起的内压及仓壁摩擦力。散料荷载往往是筒仓结构中的主要荷载。作用于仓壁的典型压力分布见图 2。目前国际上许多规范(包括澳大利亚<sup>[4]</sup>, ISO<sup>[5]</sup>, 欧洲<sup>[6]</sup>, 美国<sup>[7]</sup>等)对仓壁压力均直接采用了 Janssen 公式<sup>[8]</sup>。堆料下仓壁的法向压

力由下式给出:

$$p_n = \frac{\gamma R}{2\mu} (1 - e^{-z/z_0}), z_0 = \frac{R}{2\mu k} \quad (1)$$

式中  $\gamma$  为散料的容重,  $R$  为仓筒的内半径,  $\mu$  为仓壁摩擦系数,  $z$  为有效面以下的距离,  $k$  为侧压系数。而有效面则位于散料与仓壁最高接触面以上  $h_0$  处:

$$h_0 = \frac{1}{3} R \tan \phi_r \quad (2)$$

其中  $\phi_r$  为散料静止角。仓壁摩擦力则由下式给出:

$$p_q = \mu p_n = \frac{\gamma R}{2} (1 - e^{-z/z_0}) \quad (3)$$

散料卸载会引起仓壁压力的增加。设计规范中通常在公式(1)的基础上乘一个大于 1 的系数来考虑该影响。国内的混凝土筒仓规范(GBJ77-85)并没有区分堆料及卸料的情况,而是统一引入了一个压力修正系数。应当注意的是,散料的材料特性有一定的不确定性,因而规范通常给出上下限值,对于某种特定的破坏模式,要用适当的上限或下限值求得最不利的仓壁压力。例如在验算仓壁在轴向压力下的屈曲强度时,需用可能的轴向压力的最大值以及可靠内压的最小值(如[4])。另外,国际上最新的两本筒仓荷载规范<sup>[5,9]</sup>还规定,即使对于对称堆料及卸料的筒仓结构,设计中也要考虑非对称内压的影响,并给出了该附加非对称内压的分布及大小。但现有钢筒仓结构设计方面的研究极少考虑这一附加内压的影响。

### 2.3 漏斗壁压力分布

目前各规范中对漏斗壁压力分布采取了不同的形式。澳大利亚规范<sup>[4]</sup>所采用的 Walker 压力分布<sup>[9]</sup>是一种简单合理的形式,其典型压力分布见图 4。位于锥顶以上  $z$  处的法向压力  $p_n$  及摩擦力  $p_q$  为:

$$p_n = F \left[ \frac{\gamma H}{n-1} \left( \left( \frac{z}{H} \right) - \left( \frac{z}{H} \right)^n \right) + q_v \left( \frac{z}{H} \right)^n \right] \quad (4)$$

$$p_q = \mu p_n \quad (5)$$

式中  $F$  为漏斗壁压力与平均竖向应力之比(相当于仓筒中的侧压系数  $k$ ),  $n$  则可通过漏斗上竖向力的整体平衡得到其与  $F$  的关系:

$$n = 2(F\mu \cot \beta + F - 1) \quad (6)$$

图 4 所示的 Walker 堆料压力由式(4)中令  $n=0$  所得,卸料压力则需联同以下公式:

$$F = \frac{1 + \sin \phi \cos \epsilon}{1 - \sin \phi \cos (2\beta + \epsilon)} \quad (7)$$

$$\epsilon = \tan^{-1} \mu + \sin^{-1} \alpha \left[ \operatorname{cosec} \phi \sqrt{\frac{\mu^2}{N(1 + \mu^2)}} \right] \quad (8)$$

式(4)~(8)中  $H$  为漏斗高度,  $\gamma$  为散料容重,  $\beta$  为漏斗顶角之半,  $\phi$  为散料有效内摩擦角,  $\mu$  为漏斗壁摩擦系数,  $q_v$  为转折连接处散料中的平均竖向应力。

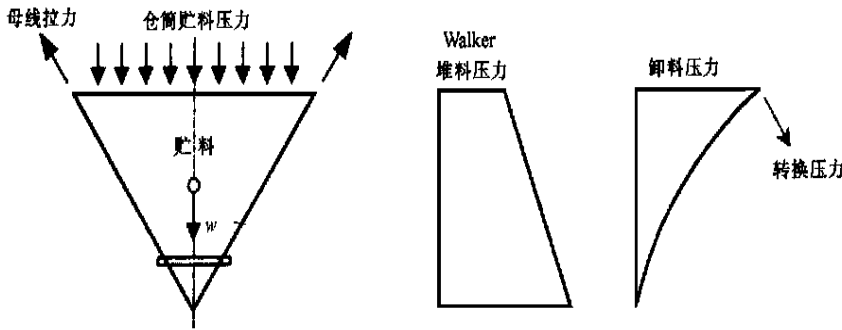


图4 锥形漏斗压力分布

### 3 仓筒的屈曲

#### 3.1 概述

散料摩擦力在仓筒壁引起的竖向压应力会导致钢筒仓结构中最常见的破坏形式：圆柱壳在轴压下的屈曲。在轴对称散料荷载作用及均匀支承条件下，这通常是多数仓筒设计的控制因素。理想圆柱壳在轴压下的弹性经典屈曲应力由下式给出：

$$\sigma_{cl} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left( \frac{t}{r} \right) = 0.605E \frac{t}{r} \quad (9)$$

式中， $E$  为弹性模量， $\nu$  为泊松比， $r$  和  $t$  分别为圆柱壳的半径和厚度。但众所周知该经典解显著高估了实际具有缺陷圆柱壳的屈曲强度。钢筒仓结构中实际圆柱壳在轴压作用下的屈曲强度受许多因素的影响，包括初始几何缺陷的形式和幅值，焊接残余应力，以及储存散料的内压和刚度。

#### 3.2 仓筒中的周向焊缝

大型圆形钢筒仓通常是由预先装配并焊接好的单块板高的圆柱壳通过周向焊缝连接而成的（图1）。由于卷板过程及焊接收缩的影响，在周向焊缝处出现近似轴对称的凹陷。文献 [10, 11] 利用数值计算研究了具有周向焊缝及其它缺陷形式的圆柱壳的屈曲。文 [12] 对具有周向焊缝凹陷的轴压圆柱壳的屈曲进行了试验研究，验证了文 [10] 所提出的轴对称缺陷的两个理论模型，并研究了局部的轴对称凹陷对轴压圆柱壳屈曲强度的影响。文 [13] 引入实测缺陷分析了一个容量 10,000t 的高架式筒仓，研究了周向轴对称缺陷对屈曲强度的影响，并考察了残余应力的影响。文 [14, 15] 也研究了圆柱壳周向缺陷中焊接残余应力的影响。文 [16] 则开始研究由于制作上的不吻合及焊接收缩引起的初始缺陷及随之产生的残余应力场。

#### 3.3 仓筒的屈曲强度

新的欧洲钢壳规范<sup>[3]</sup> 吸收了对钢筒仓及其它土木工程中钢壳结构的近期研究成果（包括上节提及的研究），其中给出的圆柱壳屈曲强度计算公式可用于钢筒仓中仓筒的设计。均匀轴压下圆柱壳屈曲强度标准值  $\sigma_{RK}$  由下式给出：

$$\sigma_{RK} = \alpha_x \sigma_{cl} \quad (10)$$

$\sigma_{cl}$  为由式 (9) 给出的弹性经典屈曲应力， $\alpha_x$  则为考虑初始缺陷影响的折减系数：

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 \left( \frac{\Delta w_k}{t} \right)^{1.44}} \quad (11)$$

其中  $\Delta w_k$  为初始缺陷的幅值：

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} t \quad (12)$$

式中  $Q$  为反映圆柱壳制作质量的参数，制作质量好 (Normal) 时， $Q=16$ ；质量好 (High) 时， $Q=25$ ；质量很好 (Excellent) 时， $Q=40$ 。规范还给出了圆柱壳制作质量的判别标准。该方法的优点在于把屈曲强度与制作质量直接联系起来。

筒仓内散料所产生的内压可显著提高圆柱壳的强度，在广泛使用的 ECSS 规程<sup>[17]</sup> 中已考虑了这一因素。但文献 [10] 的研究表明 ECSS 规程中的设计公式对具周向焊缝导致的缺陷的圆柱壳是不安全的。欧洲规范<sup>[3]</sup> 中轴压和内压共同作用下圆柱壳的屈曲设计准则已克服了上述不足。在公式 (10) 中以  $\alpha_{xpe}$  替代  $\alpha_x$  即为轴压和内压共同作用下圆柱壳的屈曲强度：

$$\alpha_{xpe} = \alpha_x + (1 - \alpha_x) \left[ \frac{\bar{p}}{\bar{p} + 0.3 / \sqrt{\alpha_x}} \right] \quad (13)$$

$$\bar{p} = (pr) / (t \sigma_{cl}) \quad (14)$$

壳体承受很大的内压时会出现局部破坏，典型的例子是地震荷载下出现于容器底部的“象脚 (elephant foot)”破坏。该现象也出现在带环肋、变厚度

或有局部缺陷的圆柱壳中。文献 [18] 首先对该问题进行了研究。这类高内压下圆柱壳的塑性失稳强度可由式 (10) 中以  $\alpha_{\text{pp}}$  替代  $\alpha_x$  求得:<sup>[3]</sup>

$$\alpha_{\text{pp}} = \left[ 1 - \frac{\bar{p}^2}{\lambda_s^2} \right] \left[ 1 - \frac{1}{1.12 + s^{1.5}} \right] \left[ \frac{s^2 + 1.21\bar{\lambda}_x^2}{s(s+1)} \right] \quad (15)$$

式中,  $s = (1/400) (r/t)$ ,  $\bar{\lambda}_x^2 = f_y / \sigma_{ct}$ ,  $f_y$  为屈服应力。

以上欧洲规范中轴压圆柱壳屈曲强度设计公式的有关背景材料可参见文献 [19]。

### 3.4 散粒体对仓筒屈曲强度的影响

所储存散料的有限刚度也会提高仓筒的屈曲强度。文献 [20] 也许是研究该影响的首次尝试。文献 [21] 则在壳体屈曲分析中把散料模拟为 Winkler 弹性地基, 并建立了反映弹性地基刚度与散料特性、屈曲模态及散料应力水平之间关系的简单公式。另外还有一些文献 [如 22—25] 从理论或实验的角度也研究了散料刚度的影响。但目前尚难以定量地对该影响进行分析, 因此在设计中合理地考虑散料刚度的影响仍有困难。

## 4 锥形漏斗的塑性破坏

### 4.1 漏斗中的应力分布

筒仓结构中的锥形漏斗承受着筒仓内储存的大多数散料的重量, 漏斗壁受双轴拉力的作用。采用壳体的薄膜理论, 在 Walker 堆料和卸料压力 (图 4) 下, 位于锥顶以上  $z$  处沿周向及母线方向的薄膜拉力分别为:

$$N_0 = \left[ \frac{\gamma H}{n-1} \left( \frac{z}{H} \right)^2 + \left( q_t - \frac{\gamma H}{n-1} \right) \left( \frac{z}{H} \right)^{n+1} \right] FH \sec \beta \tan \beta \quad (16)$$

$$N_\phi = \left[ \frac{\gamma H}{3(n-1)} \left( \frac{z}{H} \right)^2 + \frac{1}{n+2} \left( q_t - \frac{\gamma H}{n-1} \right) \left( \frac{z}{H} \right)^{n+1} \right] FH \sec \beta (\tan \beta + \mu) \quad (17)$$

漏斗顶部沿母线方向的薄膜拉力可方便地由漏斗的整体平衡求得:

$$N_{\phi t} = \frac{1}{2} H \sec \beta \tan \beta \left[ \frac{\gamma H}{3} + q_t \right] \quad (18)$$

### 4.2 漏斗的薄膜屈服

目前漏斗设计 (如 [26, 27]) 中通常假定壳体的薄膜理论可以应用, 并把双轴薄膜应力下的屈服荷载作为漏斗强度的极限。这一简单的实用设计法称为“薄膜理论屈服破坏准则”。采用 von Mises 屈服准则, 沿周向及母线方向的拉力可合成为如下的有效薄膜拉

$$N_{\text{vm}} = \sqrt{N_\phi^2 - N_\phi N_0 + N_0^2} \quad (19)$$

当漏斗中有效薄膜拉力的最大值达到屈服强度时, 即认为漏斗由于薄膜屈服而破坏:

$$N_{\text{vm}}^{\text{max}} = f_y t_h \quad (20)$$

式中  $f_y$  为屈服应力,  $t_h$  为漏斗壁厚度。文献 [28, 29] 用小挠度弹塑性有限元分析确定了漏斗的塑性极限荷载, 研究表明塑性极限荷载通常稍高于薄膜理论屈服荷载。文献 [30, 31] 采用大挠度理论研究了 Walker 压力 (图 4) 作用下焊接漏斗的破坏特性。研究表明, 当漏斗壁达到薄膜屈服时会出现突然的刚度损失, 因此若不容许漏斗有较大的变形, 设计中采用薄膜屈服强度是合理及安全的。当漏斗锥度很大时, 漏斗在薄膜屈服导致刚度减小时就几乎失去进一步承载的能力, 这时漏斗由于薄膜屈服而破坏, 薄膜理论屈服荷载接近于真正的破坏强度。

### 4.3 漏斗的拉断破坏

大多数漏斗在薄膜屈服导致刚度减小后随着变形的增大可以继续增加荷载。文 [30~32] 的研究表明漏斗最终由于拉断而破坏, 正如 ROTTER 最早在文献 [33] 中提出的那样。漏斗拉断破坏强度可由下式给出:<sup>[27, 30]</sup>

$$N_{\phi t} = \frac{2f_y t_h}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

文 [30~32, 34] 还说明了漏斗顶部的局部转换压力 (图 4) 对漏斗及转折连接的强度的影响。

## 5 环梁的屈曲及破坏

### 5.1 概述

内储的散料作用在漏斗壁上的内压及向下摩擦力均导致漏斗壁产生沿母线方向的拉力, 且于转折连接处达到最大值。该拉力的水平分力导致转折连接中产生相当大的周向压力, 因此在转折连接处通常设置一道环梁承受这个压力 (图 3), 以增加转折连接的强度。最简单也常用的环梁为一圆环板, 而在圆环板外边缘设置加劲肋而形成的 T 形或角钢形环梁也很常见。环梁在周向压力作用下的破坏模式包括塑性破坏 (图 5a)、弹性屈曲以及塑性屈曲 (图 5b)。文献 [31] 给出了 1992 年之前对钢筒仓转折连接的研究总结, 而最近研究进展的综述可参见文献 [35]。文献 [36] 总结了环梁稳定设计的一整套设计公式, 限于篇幅, 本文不再给出具体设计公式。

### 5.2 塑性破坏强度

文献 [37] 首次对钢筒仓中转折连接的塑性破坏

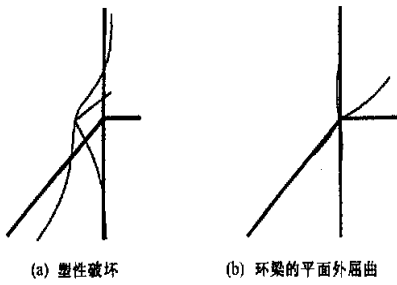


图 5 带环梁转折连接的破坏模式

行为及强度进行了研究，指出当转折连接处各壳体出现一系列塑性铰线并形成机构时结构达到承载极限。文中还给出了由等厚度壳体组成的转折连接的塑性破坏强度简化公式，这也是首次将塑性有效截面法用于壳体塑性强度的计算。文献 [38] 进一步对该问题进行了全面的研究并把文 [37] 提出的公式推广至由不同厚度壳体组成的转折连接。文 [30] 研究了在实际散料压力作用下转折连接的破坏强度，指出局部转换压力是有利的。

### 5.3 环梁弹性屈曲

环梁在周向压力的作用下有可能失稳。环梁所受的周向压应力可由基于弹性有效截面的简单公式计算得到<sup>[27, 39]</sup>。传统的设计指南只考虑平面内屈曲（如 [40]），但实际上由于平面内变形受到仓筒和漏斗薄膜刚度的约束，环梁的失稳通常只限于平面外屈曲（图 5b）<sup>[41]</sup>。文 [41] 研究了环板形环梁的弹性平面外屈曲问题，提出了考虑相邻壳体弹性约束影响的屈曲强度简化公式。文 [42—46] 研究了 T 形环梁的平面外屈曲问题，其中文 [44] 给出了考虑弹性约束的 T 形环梁的屈曲强度计算公式。对角钢形环梁目

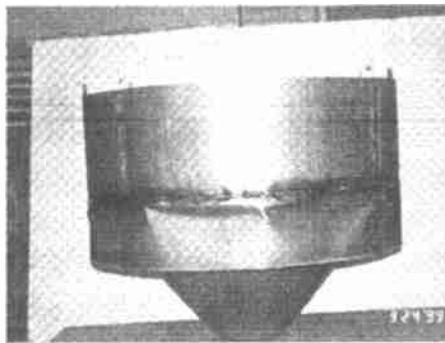
前尚无专门研究，文献 [47] 所提出的环梁平面外屈曲的闭合解，角钢形环梁是适用截面中的一个特例。

### 5.4 环梁的塑性屈曲

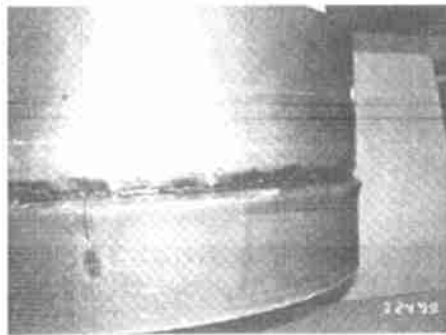
文 [37] 首次考察了环板形环梁的平面外塑性屈曲问题，其后文 [48] 进一步研究了环板形环梁及 T 形环梁的塑性屈曲行为。文献 [49] 则对环板形环梁的平面外塑性屈曲强度进行了全面研究，并首次提出了合理的设计公式。研究发现只需单个参数就可控制屈服与屈曲之间的相关特性，称之为无量纲环梁尺寸参数<sup>[49]</sup>。对于一给定的参数值，只需一个函数就可以给出塑性屈曲强度与弹性屈曲强度、塑性破坏强度之间的关系。文 [50] 对 T 形环梁的塑性屈曲强度进行了类似的研究，同样给出了塑性屈曲设计公式。

### 5.5 试验研究

文献 [49, 50] 所建立的屈曲强度设计公式都没有考虑初始缺陷及残余应力的影响。评估初始缺陷及残余应力影响的最佳途径应该是试验，香港理工大学首次对钢筒仓的转折连接进行一系列的试验研究<sup>[51]</sup>。首先进行的一组试验中没有包括环梁，对这类仓筒、漏斗、裙筒组成的转折连接在理论上目前也还没有研究。图 6 所示为两个直径 1m 模型的破坏模式。图 6a 所示模型具有 1mm 的均匀厚度，而图 6b 模型中的裙筒厚为 2mm。两模型均装满沙后再通过刚性板加载。试验过程中两模型的仓筒底部都出现短波长的屈曲波形（图 6），但屈曲波形的发展并没有导致结构承载能力的下降。最终两试验模型的破坏都出现在裙筒：较薄的裙筒屈曲（图 6a），而较厚者则在出现很大的塑性变形后破坏（图 6b）。带环梁转折连接的试验正在进行中。



(a) 均匀厚度的转折连接



(b) 不均匀厚度的转折连接

图 6 无环梁转折连接的破坏模式

## 6 非均匀荷载下的筒仓设计

### 6.1 柱承圆柱壳的屈曲

柱承筒仓中仓筒的屈曲是局部轴压下圆柱壳屈曲的典型例子。早期的研究仅局限于理想圆柱壳在周向变化压力下的线性分枝屈曲<sup>[52]</sup>，所考虑的荷载及边界条件也没有完全反映离散支承壳的实际情况，因而并不能反映结构的实际屈曲强度。近年来针对柱承筒仓中的仓筒进行了大量的研究。文献[53]首次用数值方法研究了柱承圆柱壳的非线性屈曲行为，此后又有很多有关的研究（如[54—58]），ROTTER对这些工作进行了总结<sup>[59]</sup>，并向ECCS<sup>[17]</sup>提出了一份设计建议<sup>[60]</sup>。这是首次对这一复杂的局部荷载问题提出设计准则。文献[61]则提出了另一份设计建议。文[62]进一步研究了散料内压对柱承圆柱壳屈曲行为的影响。文献[63, 64]则利用局部-整体有限元模型研究了柱承有缺陷旋转壳的非线性屈曲问题。圆柱壳在其它复杂支承条件下的结构行为及强度<sup>[65]</sup>尚有待进一步的研究。

### 6.2 柱承筒仓中的漏斗及转折连接

目前对柱承筒仓结构破坏控制条件的了解还很少。文[33]总结了柱承筒仓中漏斗设计的主要考虑因素。柱承筒仓中漏斗上的应力分布相当不均匀，支承柱附近沿母线方向的拉应力远大于跨中，这在少柱支承的轻型筒仓中尤为突出。目前尚不清楚漏斗是否有足够的延性使非均匀应力得以重分布，以及拉断破坏是否开始于支承柱附近然后扩展至整个漏斗。

关于柱承筒仓中环梁的屈曲问题，目前只有文献[66]研究了环板环梁的弹性屈曲。在少柱支承的筒仓中，环梁中的周向应力沿周向及横截面方向都是变化的。文[66]还提出了基于闭合解的简化公式用于计算内边缘筒支的环梁的强度。

### 6.3 其它非均匀荷载

筒仓结构承受的荷载非常复杂。设计中通常假定储料压力是轴对称分布的，目前的研究也大多局限于轴对称压力的情况。但实际上，筒仓在许多情况下要承受非均匀或局部化的荷载。偏心堆料及偏心卸料固然会导致不均匀甚至局部化的压力，即使是无偏心的堆料和卸料也会导致不均匀的压力分布<sup>[67]</sup>。如前所述，ISO规范<sup>[5]</sup>及欧洲规范<sup>[6]</sup>均规定即使对于对称堆料及卸料的筒仓，设计中也要考虑非对称散料压力的

影响。其它导致不均匀及局部化应力的情况还包括少柱支承及不均匀沉降等。目前对钢筒仓中非均匀压力的研究还非常有限（如[68—70]）。虽然德国规范<sup>[71]</sup>及欧洲钢筒仓规范<sup>[3]</sup>中已包括了非均匀应力状态，但其设计条例偏于保守。对不均匀及局部压应力所产生的影响还需要进行进一步广泛的研究，包括受压区域的大小以及不同缺陷形式与幅值的影响。<sup>[72]</sup>

当钢筒仓没有装料或仅部分装料时，在风荷载作用下可能出现屈曲破坏。过去曾有过几个这样的屈曲破坏的例子<sup>[73]</sup>，因而引发了许多相关的研究，如文献[73—76]。

落地式筒仓在承受不平衡的水平荷载（如偏心堆载，地震及机械运输设备引起的荷载）时，仓筒会在薄膜剪应力下失稳。文献[77]研究了由地震引起的线性变化剪应力（不均匀扭转）<sup>[78]</sup>作用下圆柱壳的弹性屈曲，并提出了相应的设计公式。

## 7 钢筒仓设计中的计算机分析

目前计算机在结构分析中的应用日益广泛。工程师对同一问题可以采取多种不同的分析方法，对具缺陷敏感性的金属薄壳结构更是如此。文[79]归纳了壳体分析中的各类计算机方法，并总结了各种方法的优缺点。工程师在设计中直接应用壳体数值屈曲分析结果的最大困难在于如何把基于各种分析方法的屈曲荷载转换成具体结构的设计强度。近年来一些学者已经提出了一些方法，如文献[80—83]。欧洲钢壳规范<sup>[3]</sup>则首先对此做了规定，表1所示为该规范给出的七类壳体分析方法。

同时考虑大变形、材料塑性以及初始缺陷影响的GMNIA方法对于重要结构无疑是最具吸引力的。这里的主要困难在于确定非线性分析中初始几何缺陷的形式与幅值。文[81]提出采用最低分枝点的屈曲模态作为缺陷的形式，并利用现有圆柱壳的试验结果定出缺陷的幅值。在缺乏真实结构的实际缺陷资料的条件下，这一方法不失为确定初始缺陷分布的较佳方法。欧洲钢壳规范<sup>[3]</sup>中也采取了类似的建议。当然，真正合理的途径应该是针对每一类以同一过程制作的壳体结构，在对真实结构的实际几何缺陷进行大量测量的基础上，建立统计意义上的缺陷模型<sup>[84, 85]</sup>。

表1 壳体分析方法

分析方法	简写	壳体理论	材料准则	几何形状
壳体薄膜理论	—	薄膜平衡	不适用	完善壳
线弹性分析	LA	线性弯曲及拉伸	线性	完善壳
弹性几何非线性分析	GNA	非线性	线性	完善壳
材料非线性分析	MNA	线性	非线性	完善壳
弹塑性几何非线性分析	GMNA	非线性	非线性	完善壳
考虑缺陷的弹性几何非线性分析	GNIA	非线性	线性	缺陷壳
考虑缺陷的弹塑性几何非线性分析	GMNIA	非线性	非线性	缺陷壳

## 8 结 语

本文总结了大型圆形钢筒仓结构行为及设计方面的近期研究进展。通过这些研究，对均匀支承及均匀荷载下钢筒仓的行为及设计已有了较为全面的认识，当然也存在一些不足。而对非均匀条件下钢筒仓结构性能的认识还非常有限。

钢筒仓结构是土木工程钢壳结构的一个分枝，其中的很多问题与其它的钢壳结构有共性。近年钢壳稳定的研究进展在文献 [52] 中已有论述。虽然薄壳屈曲一直是一个很活跃的研究领域，但仍有许多问题有待进一步的解决，包括初始缺陷及残余应力的影响，非对称或局部荷载下的屈曲强度以及计算机分析在设计中的合理应用等等。随着钢壳结构研究的进一步深入，钢筒仓设计中的一些问题也会随之解决。但钢筒仓结构也有许多独特的问题，在本文前面的论述中已经提及各方面有待进一步研究解决的问题，这里需要强调的是：(1) 钢筒仓结构的抗震设计，这方面的研究对地震区的钢筒仓设计是十分必要的，但目前还几乎是空白；(2) 少柱支承钢筒仓的结构行为及设计准则；(3) 所储存散料与钢筒仓结构的相互作用。应该指出，筒仓结构的散料荷载非常复杂，特别是卸料时散料流动的不同形式会显著影响筒仓中的压力分布，围绕散料压力及散料流动目前也有很多研究（如 [86, 87]），有关内容可参阅文献 [88]，本文没有涉及这方面的内容。

国内钢结构的应用与国际先进水平相比还存在较大的差距，近年来在高层钢结构及空间钢结构等诸多方面已有了长足的发展，但钢筒仓结构的应用到目前为止仍非常有限。究其原因，主要是由于缺少有关的参考材料更无相应的规范标准可循，工程师们在设计钢筒仓结构时显得束手无策。作者希望本文的总结与介绍能使广大设计与科研人员对钢筒仓结构及其设计有一个较为全面的了解，为钢筒仓在国内的推广应用

## 起抛砖引玉的作用。

作者衷心感谢香港特区研究资助局及香港理工大学对其钢壳结构研究的资助。

## 参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家标准. 钢筋混凝土筒仓设计规范 (GBJ77-85). 北京, 1986
- 2 European Committee for Standardisation. Eurocode 3; Design of Steel Structures, Part 4-1; Silos (ENV1993-4-1), Brussels, 1999
- 3 European Committee for Standardisation. Eurocode 3; Design of Steel Structures Part 1-6; General Rules; Supplementary Rules for Shell Structures (ENV 1993-1-6), Brussels, 1999
- 4 Standards Australia Loads on Bulk Solids Containers (AS 3774-1990), Sydney, 1990
- 5 International Organization for Standardization. Bases for Design of Structures—Loads due to Bulk Materials (ISO 11697), Switzerland, 1995
- 6 European Committee for Standardisation. Eurocode 1; Basis of Design and Actions on Structures Part 4; Actions in Silos and Tanks (ENV 1991-4), Brussels, 1995
- 7 American Concrete Institute. Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313-97), Michigan, 1998
- 8 Janssen H A. Versuche über Getreidedruck in Silozellen Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1895, 39 (35), 1045-1049 (in German).
- 9 Walker D M. An Approximate Theory for Pressure and Arching in Hoppers. Chemical Engineering Sciences, 1966, 21, 975-977
- 10 Rotter J.M., Teng J.G. Elastic Stability of Cylindrical Shells with Weld Depressions. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1989, 115 (5), 1244-1263
- 11 Teng J.G., Rotter J.M. Buckling of Pressurized Axisymmetrically Imperfect Cylinders under Axial Loads. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 1992, 118 (2), 229-247
- 12 Berry P A. Buckling under Axial Compression of Cylindrical Shells with Circumferential Weld Shrinkage Depressions. PhD Thesis. University of Sydney, Australia, 1997
- 13 Rotter J.M. Elastic-Plastic Buckling and Collapse in Internally Pressurized Axially Compressed Silo Cylinders with Measured Ax-

- isymmetric Imperfections. Proc., Int. Workshop on Imperfections in Metal Silos, Measurement, Characterisation and Strength Analysis CA-Silo, Lyon, France, April 1996, 119-139
- 14 Pircher M, Bridge R. Effects of Weld-Induced Circumferential Imperfections on the Buckling of Cylindrical Thin-Walled Shells. Proc., 5th Int. Conf. on Damage and Fracture Mechanics (eds. A. Carpinteri and C. A. Brebbia), Computational Mechanics Publications, 111-120
- 15 Pircher M, Bridge R. The Influence of Weld-Induced Residual Stresses on the Buckling of Cylindrical Thin-Walled Shells. Proc., 2nd Int. Conf. on Thin-Walled Structures (eds. N. E. Shanmugam et al), Elsevier, 1998, 671-678
- 16 Holst J M F G, Rotter J M, Calladine C R. Imperfections in Cylindrical Shells Resulting from Fabrication Misfits. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1999, 125 (4), 410-418
- 17 European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). Buckling of Steel Shells - European Recommendations. Brussels, Belgium, 1988
- 18 Rotter J M. Local Inelastic Collapse of Pressurised Thin Cylindrical Steel Shells under Axial Compression. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116 (7), 1955-1970
- 19 Rotter J M. Development of Proposed European Design Rules for Buckling of Axially Compressed Cylinders. Advances in Structural Engineering, 1998, 1 (4), 273-286
- 20 Ansourian P, Rotter J M. Buckling: Vertical Load. Structural Aspects of Steel Silos and Tanks. School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, Aug. 1981
- 21 Rotter J M, Zhang Q. Elastic Buckling of Imperfect Cylinders Containing Granular Solids. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116 (8), 2253-2271
- 22 Bucklin R A, Ross I J, White G M. The Influence of Grain Pressure on the Buckling Loads of Thin-Walled Bins. 1983 Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers, Paper No. 83-4005, Bozeman, Montana, June 1983
- 23 Zhang Q, Ansourian P. Stability of Silo Wall Stiffened by Particulate Solids. Civil Engineering Transactions, IEAust, 1991, CE33 (2), 137-141
- 24 Knoedoe P, Ummenhofer T, and Schulz U. On the Modelling of Different Types of Imperfections in Silo Shells. Thin-Walled Structures, 1995, 23 (1-4), 283-293.
- 25 Knebel K, Schweizerhof K. Buckling of Cylindrical Shells Containing Granular Solids. Thin-Walled Structures, 1995, 23 (1-4), 295-312
- 26 Trahair N S, Abel A, Ansourian P, Irvine H M, Rotter J M. Structural Design of Steel Bins for Bulk Solids. Australia Inst. of Steel Constructions, 1983
- 27 Rotter J M. Analysis and Design of Ringbeams. Design of Steel Bins for the Storage of Bulk Solids (ed. J. M. Rotter), University of Sydney, March 1985, 164-183
- 28 Teng J G, Rotter J M. Plastic Collapse of Restrained Steel Silo Hoppers. Journal of Constructional Steel Research, 1989, 14 (2), 135-158
- 29 Teng J G, Rotter J M. The Strength of Silo Transition Rings and Hoppers. Mechanical Engineering Transactions, IEAust, ME14 (4), 1989, 170-177
- 30 Teng J G, Rotter J M. The Strength of Welded Steel Silo Hoppers under Filling and Flow Pressures. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117 (9), 2567-2583
- 31 Teng J G, Rotter J M. Recent Research on the Behaviour and Design of Steel Silo Hoppers and Transition Junctions. Journal of Constructional Steel Research, 1992, 23, 313-343
- 32 Teng J G, Rotter J M. Structural Consequences of Filling and Flow Pressures in Steel Hoppers. Mechanical Engineering Transactions, IEAust, 1993, ME18 (1), 75-89
- 33 Rotter J M. The Structural Design of Light Gauge Silo Hoppers. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116 (7), 1907-1922
- 34 Rotter J M. On the Significance of Switch Pressures at the Transition in Elevated Steel Bins. Proc., 2nd Int. Conf. Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, IEAust, Wollongong, July 1986, 82-88
- 35 Teng J G. Intersections in Steel Shell Structures. Progress in Structural Engineering and Materials, accepted for publication.
- 36 滕锦光, 赵阳. 钢筒仓转折环梁的稳定设计准则. 空间结构, 2000, 6 (4): 11-20
- 37 Rotter J M. The Buckling and Plastic Collapse of Ring Stiffeners at Cone/Cylinder Junctions. Proc., Int. Colloq. on Stability of Plate and Shell Structures, Ghent, Belgium, April 1987, 449-456
- 38 Teng J G, Rotter J M. The Collapse Behaviour and Strength of Steel Silo Junctions-Part I: Collapse Mechanics & Part II: Parametric Study. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117 (12), 3587-3622
- 39 Chen J F, Rotter J M. Effective Cross Sections of Asymmetric Rings on Cylindrical Shells. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124 (9), 1074-1080
- 40 Gaylord E H, Gaylord C N. Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids. Prentice-Hall, New Jersey, 1984
- 41 Jumikis P T, Rotter J M. Buckling of Simple Ringbeams for Bins and Tanks. Proc., Int. Conf. Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, IEAust, Newcastle, Aug. 1983, 323-328
- 42 Teng J G, Chan F. New Buckling Approximations for T-Section Ringbeams Simply-Supported at Inner Edge. Engineering Structures, 1999, 21 (10), 889-897
- 43 Teng J G, Chan F. Out-of-Plane Distortional Buckling of T-Section Ringbeams Clamped at Inner Edge. Engineering Structures, 1999, 21 (7), 615-628
- 44 Teng J G, Chan F. Elastic Buckling Strength of T-Section Transition Ringbeams in Steel Silos and Tanks. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 56 (1): 69-99
- 45 Teng J G, Rotter J M. Buckling of Restrained Monosymmetric Rings. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1998, 114 (10), 1651-1671
- 46 Rotter J M, Jumikis P T. Elastic Buckling of Stiffened Ringbeams for Large Elevated Steel Silos. Proc., Metal Structures Confer-



- ence, IEAust, Melbourne, 1985, 104—111
- 47 Teng J G, Lucas R M. Out-of-Plane Buckling of Restrained Thin Rings of General Open Section. *Journal of Engineering Mechanics* ASCE, 1994, 120 (5), 929—948
- 48 Teng J G, Rotter J M. Plastic Buckling of Rings at Steel Silo Transition Junctions. *Journal of Constructional Steel Research*, 1991, 19, 1—18
- 49 Teng J G. Plastic Buckling Approximation for Transition Ringbeams in Steel Silos. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1997, 123 (12), 1622—1630
- 50 Teng J G, Chan F. Plastic Buckling Strength of T-Section Ringbeams in Steel Silos. *Engineering Structures*, 2000, 23 (3): 280—297
- 51 Teng J G, Zhao Y. Experiments on Cone-Cylinder-Skirt Junctions in Steel Silos. *Proc., 1st Int. Conf. on Structural Engineering*, Kunming, China, Oct. 1999, 594—601
- 52 Teng J G. Buckling of Thin Shells: Recent Advances and Trends. *Applied Mechanics Reviews (ASME)*, 1996, 49 (4), 263—274
- 53 Teng J G, Rotter J M. A Study of Buckling in Column-Supported Cylinders. *Contact Loading and Local Effects in Thin-Walled Plate and Shell Structures* (eds. V. Krupka and M. Drdacky), Springer-Verlag, Berlin, 1991, 52-61
- 54 Ramm E, Butcher N. Buckling of Cylindrical and Conical Shells under Concentrated Loading. *Buckling of Shell Structures, on Land, in the Sea and in the Air* (ed. J. F. Jullien), Elsevier Applied Science, London, 1991, 313-322
- 55 Rotter J M, Teng J G, Li H Y. Buckling in Thin Elastic Cylinders on Column Supports. *Buckling of Shell Structures, on Land, in the Sea and in the Air* (ed. J. F. Jullien), Elsevier Applied Science, London, 1991, 334-341
- 56 Guggenberger W. Buckling of Cylindrical Shells under Local Axial Loads. *Buckling of Shell Structures, on Land, in the Sea and in the Air* (ed. J. F. Jullien), Elsevier Applied Science, London, 1991, 323-333
- 57 Teng J G, Rotter J M. Linear Bifurcation of Column-Supported Cylinders: Support Modelling and Boundary Conditions. *Thin-Walled Structures* 1992, 14, 241-263
- 58 Dhanens F, Lagae G, Rathe J, Impe R V. Stresses in and Buckling of Unstiffened Cylinders Subjected to Local Axial Loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 1993, 27, 89-106
- 59 Rotter J M. The Design of Circular Metal Silos for Strength. *Proc. of an Int. Symp. -Reliable Flow of Particulate Solids II*, Oslo, Norway, Aug. 1993, 219-234
- 60 Rotter J M, Greiner R, Guggenberger W, Li H, She K M. Proposed Design Rule for Buckling Strength Assessment of Cylindrical Shells under Local Axial Loads. *Submission to ECCS TWG8. 4 Buckling of Shells*, Sept. 1993
- 61 Guggenberger W. Proposal for Design Rules of Axially Loaded Steel Cylinders of Local Supports. *Thin-Walled Structures*, 1998, 31 (1-3), 169-185
- 62 Greiner R, Guggenberger W. Buckling Behaviour of Axially Loaded Steel Cylinders on Local Supports-with and without Internal Pressure. *Thin-Walled Structures*, 1998, 31 (1-3), 159-167
- 63 Gould P L, Ravichandran R V, Sridharan S. Efficient Nonlinear Analysis of Column-Supported Shells. *Proc. of IASS-ASCE Int. Symp. 1994 on Spatial Lattice and Tension Structures*, Atlanta, ASCE, 927-935
- 64 Gould P L, Ravichandran R V, Sridharan S. A Local-Global FE Model for Nonlinear Analysis of Column-Supported Shells of Revolution. *Thin-Walled Structures* 1998, 31 (1-3), 25-37
- 65 Gorenc B E. Design of Supports for Steel Bins. *Design of Steel Bins for the Storage of Bulk Solids* (ed. J. M. Rotter), University of Sydney, March 1985, 184—188
- 66 Teng J G, Rotter J M. Buckling of Rings in Column-Supported Bins and Tanks. *Thin-Walled Structures*, 1989, 7 (3 &4), 251-280
- 67 Ooi J Y, Pham L, Rotter J M. Systematic and Random Features of Measured Pressures on Full-Scale Silo Walls. *Engineering Structures*, 1990, 12 (2), 74-87
- 68 Oery H, Reimerdes H G. Stresses in and Stability of Thin Walled Shells under Non-Ideal Load Distribution. *Proc., Int. Colloq. on the Stability of Plate and Shell Structures*, Ghent, Belgium, April 1987, 555-561
- 69 Eggwertz S, Samuelson L A. Buckling of Shells with Local Reinforcements. *Buckling of Shell Structures, on Land, in the Sea and in the Air* (ed. J. F. Jullien), Elsevier Applied Science, London, 1991, 401-408
- 70 Rotter J M. The Analysis of Steel Bins Subject to Eccentric Discharge. *Proc., 2nd Int. Conf. Bulk Materials Storage, Handling and Transportation*, IEAust, Wollongong, July 1986, 264-271.
- 71 DIN18800/Part4. *Steel Structures: Stability, Buckling of Shells*. Berlin, 1990.
- 72 Rotter J M. Shell Structures: the New European Standard and Current Research Needs. *Thin-Walled Structures* 1998, 31 (1-3), 3-23
- 73 Ansourian P. On the Buckling Analysis and Design of Silos and Tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, 1992, 23, 273-294
- 74 Resinger F, Greiner R. Buckling of Wind Loaded Cylindrical Shells-Applications to Unstiffened and Ring Stiffened Tanks. *Buckling of Shells* (ed. E. Ramm), Springer-Verlag, Berlin, 1982, 305-311
- 75 Jeath S, Sadid H. Buckling of Orthotropic Cylinders due to Wind Load. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1985, 111 (5), 610-622
- 76 Greiner R, Derler P. Effect of Imperfections on Wind-Loaded Cylindrical Shells. *Thin-Walled Structures* 1995, 23 (1-4), 271-281
- 77 Jumikis P T, Rotter J M. Buckling of Cylindrical Shells in Non-Uniform Torsion. *Proc., 10th Australian Conf. on Mech. of Struct. and Mats.*, Adelaide, Aug. 1986, 211-216
- 78 Rotter J M, Hull T S. Wall Loads in Squat Steel Silos during Earthquakes. *Engineering Structures*, 1989, 11 (3), 139-147

- 79 Rotter J M. Challenges for the Future in Designing Bulk Solids Storages. Containment Structures, Risk, Safety and Reliability (ed. B. Simpson), E & FN Spon, London, 1997, 11-34
- 80 Schmidt H, Krysik R. Towards Recommendations for Shell Stability Design by Means of Numerically Determined Buckling Loads. Buckling of Shell Structures on Land, in the Sea and in the Air (ed. J. F. Jullien), Elsevier Applied Science, London, 1991, 508-519
- 81 Speicher G, Saal H. Numerical Calculation of Limit Loads for Shells of Revolution with Particular Regard to the Applying Equivalent Initial Imperfections. Buckling of Shell Structures on Land, in the Sea and in the Air (ed. J. F. Jullien), Elsevier Applied Science, London, 1991, 466-475
- 82 Samuelson L, Eggwertz S. Shell Stability Handbook. Elsevier Applied Science, London, 1992
- 83 Teng J G, Rotter J M. Stability Assessment of Complex Shell Structures by Numerical Analysis. Civil Engineering Transactions IEAust, 1995, CE37 (1), 61-69
- 84 Arbocz J. Towards an Improved Design Procedure for Buckling Critical Structures. Buckling of Shell Structures on Land, in the Sea and in the Air (ed. J. F. Jullien), Elsevier Applied Science, London, 1991, 270-276
- 85 Ding X L, Coleman R, Rotter J M. Technique for Precise Measurement of Large-Scale Silos and Tanks. Journal of Survey Engineering, ASCE, 1996, 122 (1), 14-25
- 86 Holst J M F G, Ooi J Y, Rotter J M et al. Numerical Modelling of Silo Filling: Part I-Continuum Analysis & Part II-Discrete Element Analysis. Journal of Engineering Mechanics, ACSE, 1999, 125 (1), 94-110
- 87 Ooi J Y, Chen J F, Rotter J M. Measurement of Solids Flow Patterns in a Gypsum Silo. Powder Technology, 1998, 99 (3), 272-284.
- 88 Brown C J, Nielsen J (eds.) Silos: Fundamentals of Theory, Behaviour and Design. E & FN Spon, London, 1998

## STRUCTURAL BEHAVIOR AND DESIGN OF LARGE STEEL SILOS

Teng Jin-Guang Zhao Yang

(Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University)

### Abstract

Silos are widely used for the storage of bulk solids. While concrete silos have found many applications in China, steel silos have found very limited applications up to now. Internationally, a large amount of research has been carried out in the last two decades on the behaviour and strength of steel silo structures. Vigorous research has also been undertaken at The Hong Kong Polytechnic University in the last few years. This paper provides a review of these research advances. Structural forms and bulk solid loadings are first discussed briefly. The likely failure modes and the existing research on each failure mode are then outlined, and design equations are presented for some of the failure modes. The direct use of computer analysis in the design of steel silos is also addressed. The paper concludes with a summary of issues that are yet to be studied.

**Key words:** steel silo, structural behavior, design, buckling, computer analysis

滕锦光 博士, 教授。主要研究方向: (1) 钢结构, 尤其是钢筒仓及其它钢壳结构; (2) 混凝土结构的复合材料加固技术; (3) 大跨薄壳屋盖。发表学术论文 130 余篇, 其中包括国际学术杂志论文 60 余篇。通讯地址: 香港九龙 香港理工大学土木与结构工程系

赵阳 博士研究生。主要研究方向为钢壳与空间结构。发表论文 20 余篇。