

[文章编号] 1006-6578(2000)04-0011-10

# 钢筒仓转折环梁的稳定设计准则

滕锦光, 赵 阳

(香港理工大学土木与结构工程系, 香港)

**[摘要]** 钢筒仓结构广泛应用于矿业、冶金、化工、电力、农业等诸多领域中的散料储存。圆形钢筒仓通常由仓筒、锥形漏斗及支承裙筒组成。在仓筒与漏斗的连接处通常设有一道环梁, 以承受由漏斗壁上拉力的水平分力所产生的周向压力。常见的环梁形式包括环板形环梁、T形环梁以及角钢形环梁。环梁在周向压力作用下的破坏模式包括塑性破坏、弹性屈曲以及塑性屈曲。近年来对于均匀支承环梁的屈曲及破坏强度已有了系统的研究, 本文将总结这些研究成果并给出一整套设计公式, 供结构工程师在设计中应用。

**[关键词]** 钢筒仓; 转折环梁; 屈曲; 稳定; 设计准则

**[中图分类号]** TU391.2

**[文献标识码]** A

## 1 引言

筒仓结构广泛应用于矿业、冶金、化工、电力、农业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 年就发布了国家标准“钢筋混凝土筒仓设计规范 (GBJ77-85)”, 但钢筒仓的应用还很有限。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钢筒仓。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许多钢筒仓的结构破坏。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。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>[1]</sup>的出版标志着钢筒仓结构的设计技术达到了新的高度。

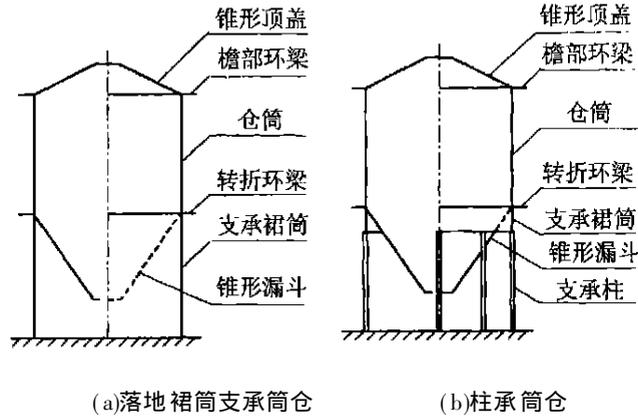
高架式筒仓通常由锥形漏斗、置于其上的仓筒以及支承裙筒组成 (图 1) 其中的仓筒/漏

**[收稿日期]** 2000-06-06

**[作者简介]** 滕锦光 (1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为钢结构尤其是钢筒仓及其它钢壳结构、大跨薄壳屋盖、混凝土结构的复合材料加固技术。

赵 阳 (1970-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为钢壳与空间结构。

斗连接处常称为转折连接。裙筒可直接支承于地面(图 1a),也可由多根柱子支承(图 1b)。当支承柱多于 12根时,可认为是均匀支承的。图 2所示为转折连接处的静力平衡条件。储存的散料在漏斗壁上作用内压及向下的摩擦力,两者均导致漏斗壁上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来承受这个压力,以增加转折连接的强度。最简单也常用的环梁为一圆环板(称为环板形环梁,图 3a),而在圆环板外边缘设置加劲肋而形成的 T形环梁(图 3b)或角钢形环梁(图 3c)也很常见。



(a)落地裙筒支承筒仓 (b)柱承筒仓  
图 1 高架式筒仓

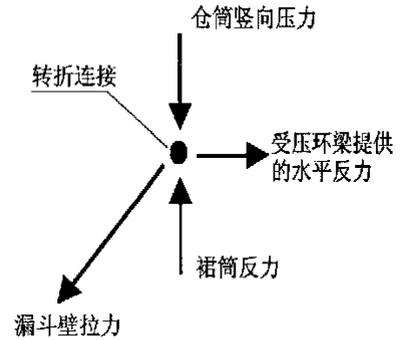
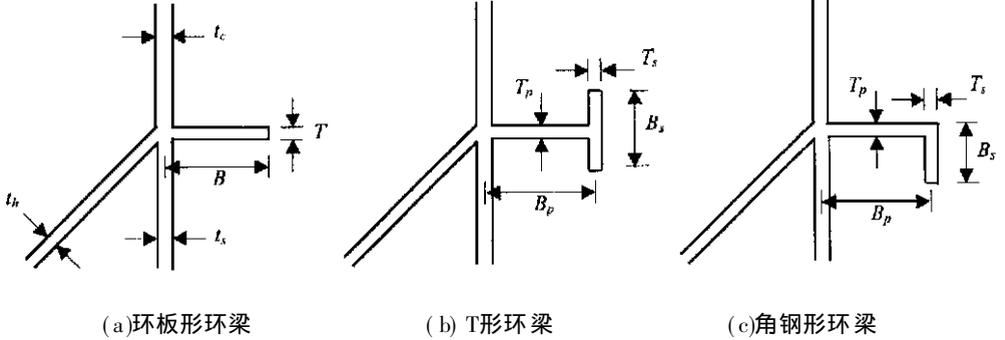


图 2 转折连接处的静力平衡

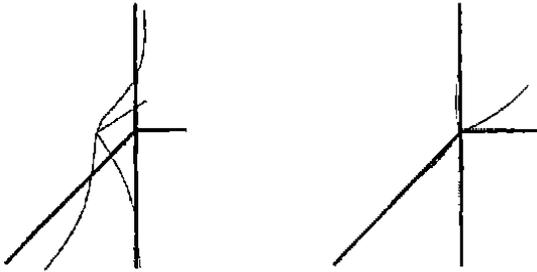


(a)环板形环梁 (b) T形环梁 (c)角钢形环梁  
图 3 环梁的截面形式

在周向压力作用下,环梁的破坏模式包括塑性破坏(图 4a),弹性及塑性屈曲(图 4b)。近年来,本文第一作者及国际上其他一些学者对均匀支承转折连接处环梁的屈曲及破坏强度进行了深入系统的研究,其中的许多成果已为欧洲钢筒仓设计规范<sup>[1]</sup>所吸收。本文的目的就在于总结这些研究成果以供结构工程师在设计中应用,同时为国内编制相应的钢筒仓设计规范提供一定的参考及依据。为此,本文将给出一整套设计公式,其应用范围包括环板形环梁、T形环梁及角钢形环梁的弹性屈曲、塑性破坏以及塑性屈曲。

## 2 转折连接处的周向压力

钢筒仓的转折连接处通常受非均匀内压以及相应摩擦力的作用(图 5)。为了建立转折连



(a)塑性破坏 (b)环梁的平面外屈曲

图4 带环梁转折连接的破坏模式

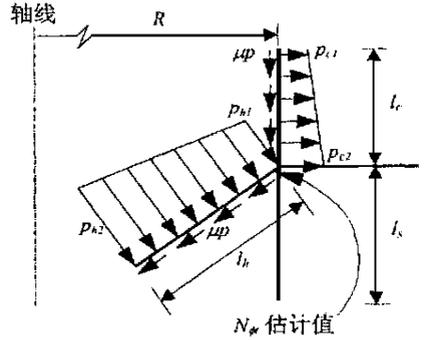


图5 有效截面与局部压力

接的强度准则,需要寻求一种能反映这一复杂荷载条件的简单方法。而转折连接处漏斗壁拉力的水平分力所导致的周向压力是转折连接破坏的控制因素。记漏斗顶部沿母线方向的拉力为  $N_h$  (图 5),则由漏斗拉力引起的周向压力可由下式给出:

$$F_0 = N_h R \sin T \tag{1}$$

式中  $R$  为仓筒半径,  $T$  为锥形漏斗顶角的一半。由于式 (1) 中略去了邻近连接处仓筒及漏斗壁上的局部内压的影响,得出的周向压力值是近似但偏于安全的。

在弹性应力分析及塑性破坏分析中,引入了转折连接有效截面的概念,即假定连接处各壳体的一部分与环梁共同工作,形成用以承受上述周向压力的有效截面 (图 5)。一旦有效截面得以确定,通过引入有效环梁上内压的影响,可以给出周向压力更为精确的表达式<sup>[2]</sup>:

$$F = N_h R \sin T - 0.5(p_{c1} + p_{c2})l_c R - 0.5(p_{h1} + p_{h2})(\cos T - \sin T)l_h R \tag{2}$$

式中  $l_c$  和  $l_h$  分别为仓筒及漏斗的有效长度,压力值  $p_{c1}, p_{c2}, p_{h1}$  及  $p_{h2}$  的定义可参见图 5 筒仓中的压力分布通常为非线性的,但由于有效长度相对于壳体的总长很小,在有效长度范围内压力采用线性分布是可以满足精度要求的。

转折连接处的周向压力  $F$  是一个非常重要的参数,因为对于给定的几何尺寸,以  $F$  表示的转折连接破坏强度基本上与筒仓中具体的荷载分布无关<sup>[3-5]</sup>。文献 [5] 指出,有效长度  $l_c$  和  $l_h$  对弹性应力分析及塑性破坏分析是不同的,从而导致两种情况下的周向压力值  $F$  也稍有不同。为了避免混淆与不便,文 [5] 建议,无论是弹性屈曲或塑性破坏分析,在由式 (2) 计算等效周向压力  $F$  时,均采用弹性条件下的有效长度。本文采用了该建议。

### 3 环梁中最大压应力的有效截面分析

对于环板形环梁,周向压应力沿环板截面是变化的,且于其内边缘达到最大值。该最大压应力可用于表示环板形环梁的弹性屈曲强度<sup>[6]</sup>。弹性条件下,应用上述周向压力有效截面的概念,最大应力值可通过简单的手算方法准确求得<sup>[2]</sup>。最大周向压应力由下式给出:

$$\sigma_0 = \frac{F}{(1 + 0.3B/R)A_e} \tag{3}$$

其中弹性分析的总有效面积  $A_e$  定义为:

$$A_e = \frac{BT}{1 + 0.8B/R} + \sum_{i=1}^{NS} l_i t_i \quad (4)$$

式中,  $NS$  为转折连接处壳体的总片数,  $B$  和  $T$  为环板的宽度和厚度,  $l_i$  和  $t_i$  则为第  $i$  片壳体的有效长度与厚度。为确定各壳体的有效长度  $l_i$ , 需要先把壳体分为两组: 位于环板以上及以下的。对其中包括  $n$  片壳体的每一组, 其等效厚度为:

$$t_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (5)$$

将较薄的一组 (即等效厚度较小的一组) 记为  $A$  组, 较厚的为  $B$  组, 则等效厚度比定义为:

$$Y = t_{eqA} / t_{eqB} \quad (6)$$

各壳体的有效长度为:

$$l_i = 0.778 \sqrt{V_{ei}} R t_i / \cos h \quad (7)$$

其中, 对圆柱壳  $h = 0$ , 对锥壳  $h = T$ , 而相应于第  $i$  片壳体的系数  $V_{ei}$  为:

$$V_{ei} = 1 \quad \text{对较薄组} \quad (8)$$

$$V_{ei} = V_e = 0.5(1 + 3Y^2 - 2Y^3) \quad \text{对较厚组} \quad (9)$$

对其它截面形式的环梁, 最大周向压应力可能并不出现在其内边缘<sup>[7]</sup>, 但这里仍用内边缘处的应力来定义弹性屈服应力。以下在环板形环梁有效截面法的基础上提出的改进方法是针对 T 形环梁提出的<sup>[7]</sup>, 但相信也可用于角钢形环梁。这里, 与公式 (3) 相比, 略去了其中的  $B_p / R$  项, 从而 T 形环梁的内边缘周向压应力可由下式给出:

$$\sigma = \frac{F}{A_e} \quad (10)$$

其中弹性应力分析的总有效面积  $A_e$  为:

$$A_e = A_r + \sum_{i=1}^{NS} l_i t_i \quad (11)$$

式中,  $NS$  为转折连接处壳体的总片数,  $A_r$  为环梁的截面积 ( $= B_p T_p + B_s T_s$ ),  $l_i$  和  $t_i$  为第  $i$  片壳体的有效长度与厚度。各壳体的有效长度  $l_i$  的确定方法与环板形环梁的相同。

由于环板形环梁中  $B/R$  的值通常很小, 利用公式 (10-11) 计算环板形环梁的最大周向压力也应具有足够的精度。此外, 周向压应力的计算中若需考虑周向薄膜应力沿环梁截面的变化, 文献 [8] 提出了更为复杂的方法

## 4 环梁的弹性屈曲

### 4.1 环板形环梁的弹性屈曲

环梁在周向压力的作用下可能失稳。传统的设计准则只考虑平面内屈曲, 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 4b)<sup>[6]</sup>。文 [6] 首先提出了以最大周向压应力表示的环板形环梁弹性屈曲强度的简单设计公式, 其后文 [9] 提出了修正。文献 [6] 中公式的建立采取了以下的方法: 首先建立两种极限情况下 (圆环

板的内边缘固支及简支)的屈曲强度公式,考虑相邻壳体弹性转动约束时的屈曲强度则通过两种极限情况的适当插值而得。具体公式为:

$$\sigma_{cr} = cE \left( \frac{T}{B} \right)^2 \quad (12)$$

式中,  $E$  为弹性模量,  $c$  可通过下式求得:

$$c = \frac{Z_{cs+}}{Z_{s+}} \frac{Z_{cs}}{Z_c} \quad (13)$$

其中,

$$c_s = 0.385 + 0.452 \sqrt{B/R}; \quad c_c = 1.154 - 0.560(B/R) \quad (14 \quad 15)$$

$$Z_s = 0.43 + \frac{(R/B)^2}{4000}; \quad Z_c = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{NS} t_i^{5/2}}{T^{5/2}} \right] \quad (16 \quad 17)$$

文[9]对式(16-17)给出的系数  $Z_s$  及  $Z_c$  进行了修正,但大多数情况下修正后的屈曲应力与文[6]结果相差不超过 5%。因此建议采用形式简单的公式(16-17)

若以转折连接处的周向压力来表示,则弹性屈曲强度由下式给出:

$$F_e = \sigma_{cr} A_e \quad (18)$$

#### 4.2 T形环梁的弹性屈曲

采用与文献[6]相同的思路,文献[7]提出了 T形环梁弹性屈曲应力的计算公式。考虑相邻壳体弹性约束影响的屈曲应力是在两种理想边界条件下屈曲应力的基础上通过适当插值而得:内边缘简支时的屈曲应力  $\sigma_s$  以及内边缘固支时的屈曲应力  $\sigma_c$ 。插值公式为:

$$\sigma_{cr} = \frac{Z_s \sigma_s + Z_c \sigma_c}{Z_{s+} + Z_c} \quad (19)$$

式中  $Z_s$  及  $Z_c$  为插值系数。研究表明用于圆环板的插值系数表达式<sup>[6]</sup>也适用于 T形环梁<sup>[7]</sup>:

$$Z_s = 0.43 + \frac{(R/B_p)^2}{4000}; \quad Z_c = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{t_s}{T_p} \right)^{2.5} + \left( \frac{t_h}{T_p} \right)^{2.5} + \left( \frac{t_s}{T_p} \right)^{2.5} \right] \quad (20 \quad 21)$$

内边缘简支时 T形环梁的屈曲应力为<sup>[10]</sup>:

$$\sigma_s = \frac{EI_x}{Ar^3} [s + 2.3 \sqrt{U}] \quad (22)$$

$$r^3 = \frac{I_x + I_y + A_r x_c^2}{A_r}; \quad s = \frac{GJ}{EI_x}; \quad U = \frac{B_p}{R} \quad (23 \quad 24 \quad 25)$$

式中,  $E$  和  $G$  分别为弹性模量和剪切模量;  $I_x$  和  $I_y$  分别为环梁截面绕经向及竖向轴的惯性矩;  $J$  为扭转常数;  $x_c$  为截面形心到 T形环梁内边缘的距离

内边缘固支时 T形环梁的屈曲应力则由以下近似公式给出<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\sigma_c}{E} = J \left( \frac{T_p}{B_p} \right)^{1.1} \quad (26)$$

$$J = c [0.016 + 0.5d - 0.25d^2]; \quad d = \frac{B_s}{B_p} \frac{T_s}{T_p}; \quad c = \frac{1 + 5d}{1 + 5B_s T_s / (B_p T_p)} \quad (27 \quad 28 \quad 29)$$

对于均匀厚度的 T形环梁(即  $T_s = T_p$ ),以上公式可简化为:

$$\frac{\sigma_c}{E} = \left[ 0.016 + 0.5 \left( \frac{B_s}{B_p} \right) - 0.25 \left( \frac{B_s}{B_p} \right)^2 \right] \left( \frac{T_p}{B_p} \right)^{1.1} \quad (30)$$

### 4.3 角钢形环梁的弹性屈曲

对角钢形环梁的弹性屈曲目前尚无专门的研究,但文献 [12] 所提出的环梁平面外屈曲的闭合解,角钢形环梁是其适用截面中的一个特例。根据该闭合解,忽略相邻壳体弹性约束影响时角钢形环梁的弹性屈曲应力可由下式给出:

$$\sigma_{cr} = \frac{EI_x}{Ar_0^2} \left[ \frac{U(1-c_3)^2 + c_1c_3(1-U)^2}{c_3 - c_2} \right] \quad (31)$$

式中,

$$r_0^2 = \frac{I_x + I_y + A_r x_c^2}{A_r}; \quad U = \frac{B_p}{R + x_c} \quad (32 \quad 33)$$

$$c_1 = \frac{GJ}{EI_x}; \quad c_2 = \frac{B_p x_c}{r_0^2}; \quad c_3 = c_2 \left[ 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{1}{c_2}\right)^2 + \frac{c_1}{U c_2} (1-U)^2} \right] \quad (34 \quad 35 \quad 36)$$

其中各符号的物理意义与 T 形环梁一致。由于公式 (31) 没有考虑相邻壳体的约束作用,得出的弹性屈曲应力是偏低的。

## 5 塑性破坏强度

当环梁刚度较大时不会产生屈曲破坏,塑性破坏成为控制强度的破坏模式。文献 [3] 首次对钢筒仓中转折连接的塑性破坏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。文献 [4] 进一步对该问题进行了全面的研究并把文 [3] 提出的公式推广至由不同厚度壳体组成的转折连接。以转折连接处周向压力表示的塑性破坏强度由下式给出<sup>[4]</sup>:

$$F_p = \sigma_y A_p = \sigma_y (A_r + A_{ps}) = \sigma_y \left( A_r + \sum_{i=1}^{NS} l_{pi} t_i \right) \quad (37)$$

式中,  $A_p$  为塑性破坏时以屈服应力  $\sigma_y$  作为等效应力承受周向压力的壳体总有效面积,  $NS$  为转折连接处壳体的总片数。第  $i$  片壳体的塑性有效长度  $l_{pi}$  为:

$$l_{pi} = 0.975 V_{pi} \sqrt{R t_i / \cos h} \quad (38)$$

与弹性有效长度的计算类似,上式中系数  $V_{pi}$  的确定同样需将壳体分为位于环板以上及以下的两组:

$$V_{pi} = 1 \quad \text{对较薄组} \quad (39)$$

$$V_{pi} = V_p = 0.7 + 0.6Y^2 - 0.3Y^3 \quad \text{对较厚组} \quad (40)$$

式中的等效厚度比  $Y$  同样由式 (6) 确定。

以上公式最初是对环板形环梁的塑性破坏提出的<sup>[4]</sup>,近期的研究表明它同样适用于 T 形环梁的转折连接<sup>[13]</sup>。对角钢形环梁转折连接的塑性破坏强度目前尚无研究,但相信将以上公式用于角钢形环梁也不会导致太大的误差。

## 6 环梁的塑性屈曲

只有当环梁刚度较小或具有较高的屈服应力时,转折连接的强度才由弹性屈曲控制。而由

公式(37)给出的塑性破坏强度又往往会高估其极限强度,因为塑性屈曲很可能在塑性破坏前出现<sup>[13]</sup>。实际上大多数转折环梁的破坏是由塑性屈曲控制的。文献[3]首次考察了环板形环梁的平面外塑性屈曲问题,其后文献[4]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[5]则对环板形环梁的平面外塑性屈曲强度进行了全面的研究,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>[5]</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。因此,通过一定的数值计算及在现有的塑性破坏与弹性屈曲设计公式的基础上,可以建立塑性屈曲强度的设计公式。根据同样的思路,文[13]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。

环梁的长细比参数 $\lambda$ 定义为:

$$\lambda = \sqrt{F_p / F_e} \quad (41)$$

式中, $F_e$ 与 $F_p$ 分别为以周向压应力表示的弹性屈曲强度及塑性破坏强度。

环板形环梁的塑性屈曲强度由下式给出<sup>[5]</sup>:

$$F_f / F_p = 1 - 0.3\lambda^{1.5}, 0 < \lambda \leq 1.62 \quad (42)$$

采用公式(41),弹性屈曲强度可表达为:

$$F_f / F_p = 1 \lambda^2, \lambda > 1.62 \quad (43)$$

公式(42)及(43)中, $F_f$ 表示了由弹性屈曲、塑性屈曲或塑性破坏控制的极限破坏强度。这里,弹性屈曲区与塑性屈曲区的区分是基于强度的,因此弹性屈曲中既包括纯粹的弹性屈曲,也包括在部分屈服后才出现的接近于弹性屈曲的破坏。公式(42)及(43)在连接处( $\lambda = 1.62$ )的值是相等的,且两曲线在该点上的斜率也是相近的(但并不相同),因此是一个令人满意的设计准则。

对于T形环梁,类似地有以下公式<sup>[13]</sup>:

$$F_f / F_p = 1 - 0.383\lambda, 0 < \lambda \leq 1.62 \text{ (塑性屈曲区)} \quad (44)$$

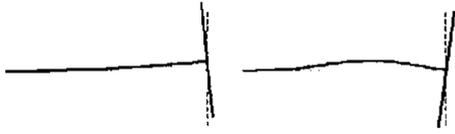
$$F_f / F_p = 1 \lambda^2, \lambda > 1.62 \text{ (弹性屈曲区)} \quad (45)$$

式中, $F_f$ , $F_p$ 及 $\lambda$ 的意义均与环板形环梁相同。

目前对角钢形环梁塑性屈曲强度的研究也尚属空白。在有相关的研究成果之前,建议采用T形环梁的公式(44-45)进行计算。而在由式(41)确定长细比参数时,弹性屈曲强度由式(31)计算,塑性破坏强度则由式(37)确定。

## 7 板件局部失稳及截面尺寸限制

需要补充说明的是,根据不同截面尺寸,T形环梁的失稳可能是平面外失稳(图6a),也可能是板件的局部失稳(图6b)。而本文给出的T形环梁屈曲强度的计算公式只适用于前者,并不适用于后者。因此在应用公式计算环梁的屈曲强度前首先需确定其失稳模态。在钢结构设计中,杆件的局部失稳通常是通过控制截面尺寸来避免的,这里也采用了相同的方法。文献[11]在大量计算的基础上给出了由平面外失稳控制的T形环梁的截面尺寸条件,如图7所示。例如,当均匀厚度的T形环梁中环板的宽厚比小于30时,若加劲肋板与环板的宽度之



(a) 平面外失稳 (b) 板件局部失稳

图 6 T形环梁的失稳模式

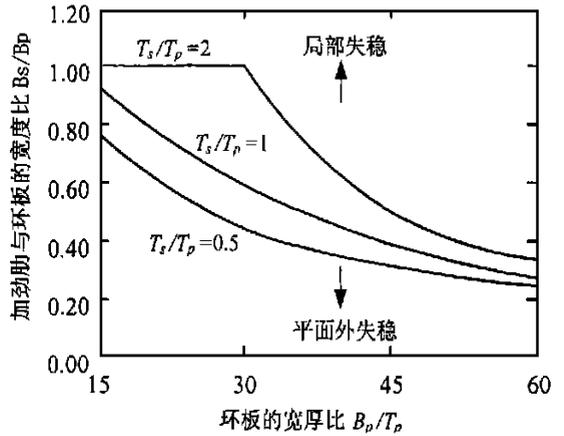


图 7 T形环梁平面外失稳的截面限制

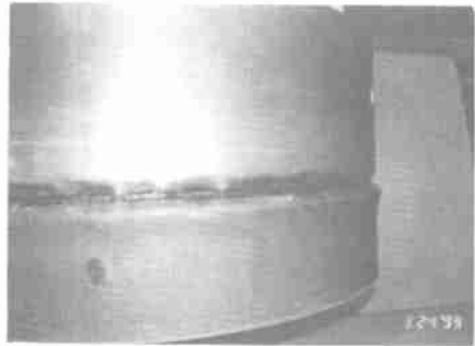
比小于 0.6, 则其破坏由平面外屈曲控制。

### 8 转折连接的试验研究

本文给出的转折连接屈曲强度设计公式并没有考虑初始缺陷的影响。目前对转折连接中初始缺陷的影响所知甚之, 但估计其影响并不严重, 类似于已广泛研究的内压下碟形封头的情况<sup>[15]</sup>。因此, 相信本文给出的屈曲强度计算公式能够反映结构的实际破坏强度, 可以在实际结构设计中应用。当然, 评估初始缺陷影响的最佳途径应该是试验的, 但由于这类薄壳连接的模型试验存在很大的难度, 对钢筒仓转折连接的试验研究还几乎是空白。为弥补这一不足, 香港理工大学正在进行一系列的试验研究<sup>[16]</sup>。首先进行的一组试验没有包括环梁, 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 8所示为两个 1m 直径试验模型的破坏模式。图 8a所示模型具有 1mm 的均匀厚度 (实际筒仓结构中裙筒的厚度通常大于仓筒及漏



(a) 均匀厚度的转折连接



(b) 不均匀厚度的转折连接

图 8 无环梁转折连接的破坏模式

斗,该均匀厚度试件作为比较试件),而图 8b 模型中的裙筒厚度为 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 8),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 8a),而较厚者则在出现很大的塑性变形后破坏(图 8b)。带环梁转折连接的试验正在进行中。

## 9 结 语

本文总结了钢筒仓转折连接处环梁的屈曲行为及其强度的近期研究成果。目前对环板形环梁及 T 形环梁的塑性破坏、弹性屈曲及塑性屈曲的研究已比较成熟,对角钢形环梁则仍有待进一步的研究。本文给出的设计公式可供结构工程师在设计中直接应用,也可供国内编制钢筒仓设计规范时参考。

致 谢 作者衷心感谢香港特区研究资助局 (Project No. PolyU 66/96E)及香港理工大学对其钢壳结构研究的资助。

## 参 考 文 献

- [1] European Committee for Standardisation, Eurocode 3 Design of Steel Structures [S], Part 4- 1: Silos (ENV 1993-4-1), Brussels, 1999.
- [2] Rotter, J. M., Analysis and Design of Ringbeams [A]. Design of Steel Bins for the Storage of Bulk Solids[C], University of Sydney, 1985, 164-183.
- [3] Rotter, J. M., The Buckling and Plastic Collapse of Ring Stiffeners at Cone/Cylinder Junctions [A]. Proc., Int. Colloq. on Stability of Plate and Shell Structures[C], Ghent, Belgium, 1987, 449-456.
- [4] Teng, J. G., Rotter, J. M., The Collapse Behaviour and Strength of Steel Silo Junctions-Part I Collapse Mechanics & Part II Parametric Study [J]. Journal of Structural Engineering, ACSE, 1991, 117 (12): 3587-3622
- [5] Teng, J. G., Plastic Buckling Approximation for Transition Ringbeams in Steel Silos [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, 123(12): 1622-1630.
- [6] Jumikis, P. T., Rotter, J. M., Buckling of Simple Ringbeams for Bins and Tanks [A]. Proc., Int. Conf. Bulk Materials Storage [C]. Handling and Transportation, IEAust, Newcastle, 1983.
- [7] Teng, J. G., Chan, F., Elastic Buckling Strength of T-Section Transition Ringbeams in Steel Silos and Tanks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 56 69-99.
- [8] Chen, J. F., Rotter, J. M., Effective Cross Sections of Asymmetric Rings on Cylindrical Shells [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(9): 1074-1080.
- [9] Sharma, U. C., Rotter, J. M., Jumikis, P. T., Shell Restraint to Ringbeams Buckling in Elevated Steel Silos [A]. Proc., 1st Nat. Struct. Engrg. Conf. [C], IEAust, 1987.
- [10] Teng, J. G., Chan, F., New Buckling Approximations for T-Section Ringbeams Simply-Supported at Inner Edge [J]. Engineering Structures, 1999, 21(10): 889-897.
- [11] Teng, J. G., Chan, F., Out-of-Plane Distortional Buckling of T-Section Ringbeams Clamped at Inner Edge [J]. Engineering Structures, 1999, 21(7): 615-628.

- [12] Teng, J. G., Lucas, R. M., Out-of-Plane Buckling of Restrained Thin Rings of General Open Section [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1994, 120(5): 929-948.
- [13] Teng, J. G., Chan, F., Plastic Buckling Strength of T-Section Ringbeams in Steel Silos and Tanks [J]. *Engineering Structures*. Accepted for publication.
- [14] Teng, J. G., Rotter, J. M., Plastic Buckling of Rings at Steel Silo Transition Junctions [J]. *Journal of Constructional Steel Research*. 1991, 19: 1-18.
- [15] Galletly, G. D., Torispherical Shells. *Shell Structures: Stability and Strength* [M]. R. Narayanan, ed., Elsevier Applied Science, New York.
- [16] Teng, J. G., Zhao, Y., Experiments on Cone-Cylinder-Skirt Junctions in Steel Silos [A]. Proc., 1st Int. Conf. on Structural Engineering [C], Kunming, China, 1999.

## STABILITY DESIGN RULES FOR TRANSITION RINGBEAMS IN STEEL SILOS

TENG Jin-Guang, ZHAO Yang

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

**[Abstract]** Steel silos are widely used for the storage of bulk materials in many industries including mining, metallurgy, chemical, electric power generation and agriculture. A circular steel silo generally consists of a cylinder, a conical hopper and a skirt. The cylinder/hopper junction is subject to a large circumferential compressive force due to the horizontal component of the meridional tension in the hopper, so a ringbeam is usually provided at the junction. Typical forms of the ringbeam include an annular plate, a T-section ring and an angle section ring. Under the circumferential compressive force, the failure modes of the transition ringbeam include plastic collapse, elastic buckling and plastic buckling. Systematic investigations have been carried out on the buckling and collapse strength of uniformly supported transition ringbeams in the recent years. This paper provides a review of these studies and presents a set of design approximations which can be applied in practical design.

**[Key Words]** steel silos; transition ringbeams; buckling; stability; design rules