



**Wang, Xuewen and Qin, Yi and Li, Juanli and Tian, Yankang and Yang, Zhaojian (2015) ??????????????????????. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31 (16). pp. 65-70. ISSN 1002-6819 , 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.010**

This version is available at <https://strathprints.strath.ac.uk/59165/>

**Strathprints** is designed to allow users to access the research output of the University of Strathclyde. Unless otherwise explicitly stated on the manuscript, Copyright © and Moral Rights for the papers on this site are retained by the individual authors and/or other copyright owners. Please check the manuscript for details of any other licences that may have been applied. You may not engage in further distribution of the material for any profitmaking activities or any commercial gain. You may freely distribute both the url (<https://strathprints.strath.ac.uk/>) and the content of this paper for research or private study, educational, or not-for-profit purposes without prior permission or charge.

Any correspondence concerning this service should be sent to the Strathprints administrator: [strathprints@strath.ac.uk](mailto:strathprints@strath.ac.uk)

# 散料在锥仓中的静压接触状态与影响因素

## Static contact statuses between conical silos and granular materials and its influential factors

王学文<sup>1,2</sup>, Qin Yi<sup>2</sup>, 李娟莉<sup>1</sup>, Tian Yankang<sup>2</sup>, 杨兆建<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学机械工程学院煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024 ;

2. Department of Design, Manufacture, and Engineering Management, University of Strathclyde, Glasgow, G1 1XQ, Scotland, UK )

Wang Xuewen<sup>1,2</sup>, Qin Yi<sup>2</sup>, Li Juanli<sup>1</sup>, Tian Yankang<sup>2</sup>, Yang Zhaojian<sup>1</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment, College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Department of Design, Manufacture, and Engineering Management, University of Strathclyde, Glasgow, G1 1XQ, Scotland, UK)

**摘要:** 为研究散料属性与锥仓结构对散料与锥仓之间接触状态的影响, 建立了自由开接触、滑移闭接触、黏着闭接触等状态的接触条件与数学求解模型; 以葵花籽、玉米、煤粉、圆砾石、小麦为实例, 进行了散料在不同倾角锥仓中的静压接触状态有限元分析, 给出了 5 种散料在倾角分别为 20°、33.7°、45°的锥仓中的接触状态。结果显示: 散料堆积密度、弹性模量、泊松比、膨胀角、内摩擦角、内聚力等属性对散料在锥仓中的接触状态影响程度不同, 其中膨胀角和内聚力有较大影响, 膨胀角很小时, 可能会有开接触状态, 内聚力越大, 则黏着接触区越小; 锥仓由深向浅过渡时, 开接触区域会消失, 滑移接触区会变小, 黏着接触区会增大。当散料黏着接触区增加时, 不利于锥仓卸料; 滑移接触区增加则对锥仓表面摩擦损伤大。通过散料在锥仓中的接触状态研究可从力学特性上评价锥仓设计与储料效率。

**关键词:** 有限元; 接触分析; 力学特性; 散料; 锥仓; 接触状态; 滑移; 黏着; 开接触

**Abstract:** Finite element models, which employ the Drucker-Prager yield criterion, have been developed to simulate the static contact statuses between conical silos and granular materials in 3 forms: the near contact, the sliding contact and the sticking contact. Contact conditions are established when 2 separated surfaces touch at normal direction while maintaining tangential relative movement. In general physical meaning, the surfaces in contact status have the following characteristics: 1) No penetration between each other; 2) The normal pressure and the tangent friction force may be transferred during contact; 3) Generally the normal pulling force cannot be transferred when surface separation occurs. Due to the symmetric property of conical structures, simplified two-dimensional contacting simulations are carried out in this paper, nonlinear finite element software ANSYS is used and the contacting surfaces between granular materials and conical silos are defined with rigid-to-flexible surface-to-surface contact pair. The target surfaces of conical silos are modeled with TARGE169 element and the contact surfaces of granular materials are modeled with CONTA171 element. During finite element analysis, conical silos and granular materials are meshed with two-dimensional solid element, PLANE42. The static contact statuses are investigated with conical silos containing different granular materials. The silo geometries vary at a dip angle of  $20^\circ$ ,  $33.7^\circ$  and  $45^\circ$ . Sunflower seeds, corn, coal, rounded gravel and wheat are selected as the granular materials. Results show that the mechanical properties of granular materials (including bulk density, elastic modulus, Poisson's ratio, dilation angle, internal friction angle, cohesion) and silo designs (especially dip angle) have significant effects on the contact statuses at the interface between conical silos and granular materials: 1) For various granular material, 3 contact statuses, i.e. the form of near contact, sliding contact and sticking contact, can be found between granular materials and conical silo walls; 2) The contact statuses between conical silos and granular materials do not depend on (or not mainly depend on) any mechanical property of granular materials. The contact statuses are a combined effect of all mechanical properties of granular materials. Those granular materials with very small dilation angle may have the near contact statuses. Those granular materials with higher cohesive force usually present a smaller sticking contact area, and those granular materials with higher elastic modulus and bulk density usually present a larger sticking contact area than those with opposite material properties; 3) With the decreasing of conical silo depth, the near contact area disappears, the sliding contact area decreases and the sticking contact area increases. 4) Under the sliding contact status, the friction energy dissipation is mainly due to the relative motion between contact surfaces. Under the sticking contact status, the friction energy dissipation is mainly due to the elastic deformation because of the contact. The greater the sticking contact area, the more difficultly the silo discharges. The greater the

sliding contact area, the more seriously the silo internal surfaces could be damaged. Since larger sticking/sliding contact area inevitably causes unloading difficulties or friction damage, contact statuses between granular materials and conical silos should be optimized in the silos design in order to boost storage efficiency.

**Key words:** finite element method; contacts; mechanical properties; granular material; conical silos; contact statuses; sliding contact; sticking contact; near contact

## 0 引言

作为一种工业特种薄壳结构，钢储仓结构简单、存取方便、流通费用低、节约空间、稳定性好，广泛应用于机械、矿山、粮食、冶金、煤炭、化肥、食品、水泥等行业用来贮存松散物料<sup>[1]</sup>。基于外形结构不同，储仓有直筒储仓和锥储仓 2 种，其中锥形储仓有时作为直筒储仓卸料端使用，有时独立使用。

在贮存散料状态下，储仓及储料的受力行为与破坏准则均比较复杂<sup>[2]</sup>，过去几十年，国内外学者围绕散料对储仓的压力与摩擦力影响<sup>[3-5]</sup>、稳定性影响<sup>[6]</sup>、流动性影响<sup>[7]</sup>等进行了大量研究。特别是随着有限元和离散元等方法的发展成熟，数值模拟方法对相关研究作出了很大贡献<sup>[8-10]</sup>。从文献来看，国内外学者比较感兴趣且研究较多的是针对储仓的侧压力进行计算，而且早在 100 多年前即由 Jassan 提出了著名的深仓静态侧压力计算公式<sup>[11]</sup>，直到今天，该公式仍旧被广泛引用和使用，同时，学者们也围绕侧压力和侧压力系数提出了许多新的研究成果<sup>[3,9]</sup>。

事实上，散料对储仓内壁的侧压力和摩擦力与它们之间的接触状态密切相关，一般来讲，接触状态随散料属性和储仓结构不同而不同，不同的接触状态会对仓体结构和物料卸载产生不同的影响，如某种状态下的散料与仓壁接触导致接触压力大于一定水平时，接触摩擦力便随之增大，随之引起物料流动黏着，使得物料在流动中难以有效克服物料内摩擦力和聚集力，最终导致卸料困难。总之，不良的接触状态可能会导致仓体工作不稳、卸载磨损严重，或者出现搭拱、卡塞、鼠洞、粘壁等流动问题<sup>[7,12]</sup>。因此，研究储料与锥仓间的接触分离、接触滑移、接触黏着等状态的力学机理与变化规律对锥仓结构设计、储料效率和生产安全有重要理论意义和工程意义。

但是关于散料与储仓（特别是锥形储仓）接触关系的研究却较少受到关注，也很少见到文献报道。本文在建立合理数学模型的基础上，采用有限元方法，对葵花籽、玉米、煤粉、圆砾石、小麦等 5 种散料在不同倾角锥形钢仓中的接触状态进行研究，分析仓体深浅和散料属性对接触状态的影响，为锥形仓结构设计、散料储卸效率和运行安全提供理论依据。

## 1 力学准则与散料参数

松散体力学中，若假定散料为理想弹塑性体，德鲁克-普拉格 (Drucker-Prager) 屈服准则 (简称 D-P 准则) 被许多有限元软件采用，如 ANSYS。适用 D-P 准则的材料为 DP 材料，其材料参数包括松散堆积密度、内聚力 (或粘聚力)、内摩擦角和膨胀角等，本文以常见的 3 种农业筒仓储料 (葵花籽、玉米、小麦) 和 2 种工业储仓散料 (煤粉、圆砾石) 为例进行分析，属性如表 1<sup>[13-15]</sup>所示。

## 2 仓体定义

锥仓截面形状有圆形、矩形 (含正方形)、菱形和多边形等。目前使用最多的是圆形和矩形 (含正方形) 锥仓，本文以截面形状分别为圆形和矩形的钢板圆锥仓和棱锥仓为研究对象。

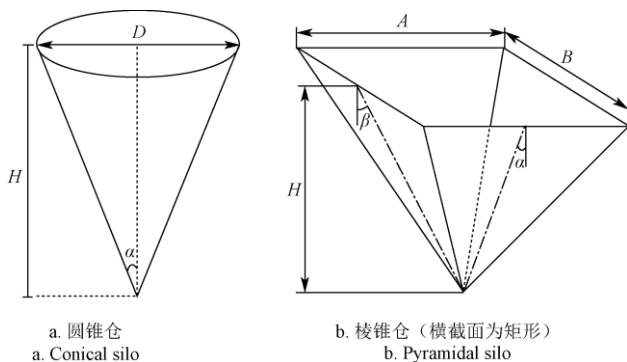
储仓按所用材料一般可分为钢筋混凝土储仓、砖砌储仓和钢储仓等，其中钢储仓<sup>[16]</sup>有以下优点：整体性

能好，寿命长；气密性能好，适应性强；建造工期短，造价低；占地面积小，易管理；自重轻，基础费用低；装拆简单，维修方便；自动化与标准化程度高。因此，钢储仓广泛应用于粮食散料和粉体物料的储存和运输。本文以钢板锥仓为研究对象。

散料与仓壁之间的摩擦作用，会减小物料对仓壁和仓底的压力，也会影响散料在仓内的流动与接触状态。为描述摩擦对仓体的影响，直筒储仓在计算中按受力条件不同以高径比 1.5 为界限被人为区分为深仓和浅仓<sup>[17-18]</sup>，即： $H/D$ （或  $H/B$ ） $\geq 1.5$  时为深仓； $H/D$ （或  $H/B$ ） $< 1.5$  时为浅仓。其中  $H$  为贮料计算高度，m； $D$  为圆形储仓的内径，m； $B$  为矩形储仓的内短边或正方形储仓的内边长，m。直筒深仓在设计计算时，摩擦作用一般不可忽略，浅仓一般忽略。

锥仓也存在摩擦和流动问题，但锥仓在规范中没有规定深仓与浅仓划分标准，也不像直筒储仓一样容易界定。参照直筒储仓的规定，本文暂作如下约定：

1) 对于圆锥仓，当  $H/(D/2) \geq 1.5$  时为深仓；当  $H/(D/2) < 1.5$  时为浅仓。其中  $H$  为锥仓垂直高度，m； $D$  为仓顶开口内径，m（图 1）；或以锥仓倾角  $\alpha \leq 33.7^\circ$ （ $\cot 33.7^\circ \approx 1.5$ ）为深仓， $\alpha > 33.7^\circ$  为浅仓（图 1）。



注： $\alpha$ 、 $\beta$  为锥仓倾角（°），A、B 为仓顶开口内边长（m），H 为锥仓垂直高度（m），D 为仓顶开口内径（m）。  
Note:  $\alpha$  and  $\beta$  are the dip angle（°），A and B are the internal side length（m），H is the height（m），D is the internal diameter（m）.

图 1 锥仓主要尺寸示意图

Fig.1 Main size of conical silos and pyramidal silos

2) 对于棱锥仓，当  $H/[\min(A,B)/2] \geq 1.5$  时为深仓；当  $H/[\min(A,B)/2] < 1.5$  时为浅仓。其中  $H$  为锥仓垂直高度； $A$ 、 $B$  为仓顶开口内边长（图 1）；或以仓板倾角  $\min(\alpha, \beta) \leq 33.7^\circ$  为深仓， $\min(\alpha, \beta) > 33.7^\circ$  为浅仓（图 1）。

### 3 数学模型

#### 3.1 接触状态

当 2 个分离的表面互相碰触并互切时，就可称它们处于接触状态。在一般的物理意义中，处于接触状态的表面有下列特点：①不互相穿透；②可传递法向压力和切向摩擦力；③一般不传递法向拉力。因此，处于接触的 2 个表面可以自由地分开并远离。

接触是基于状态改变的高度非线性问题。随着接触状态改变，接触表面的法向和切向刚度都会有显著变化，

即系统的刚度依赖于接触状态。一般来讲，接触状态可分为开接触、滑移闭接触和黏着闭接触。如图 2 所示。

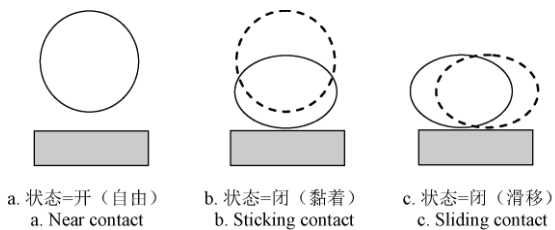


图 2 接触状态分类

Fig.2 Classification of contact statuses





表 1 5 种散料特性与DP 参数

Table 1 Material parameters of sunflower seeds, corn, coal, rounded gravel and wheat

散料 Granular materials	内摩擦角 Internal friction angle/(°)	内聚力 Cohesive force/Pa	膨胀角 Dilation angle/(°)	泊松比 Poisson's ratio	弹性模量 Elastic modulus/Pa	堆积密度(g=9.81N·kg <sup>-1</sup> ) Bulk density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	摩擦系数(对钢板) Friction coefficient (to Steel)
葵花籽Sunflower seeds <sup>[13]</sup>	24.0	18 500	9.7	0.33	0.567×10 <sup>6</sup>	446	0.21
玉米 Corn <sup>[13]</sup>	25.0	18 000	32.7	0.31	3.71×10 <sup>6</sup>	762	0.20
煤粉 Coal <sup>[14]</sup>	40.0	3 000	40.0	0.25	20.0×10 <sup>6</sup>	917	0.41
圆砾石Rounded gravel <sup>[15]</sup>	38.0	4 000	38.0	0.25	33.0×10 <sup>6</sup>	1978	0.51
小麦 Wheat <sup>[13]</sup>	22.2	9 500	23.1	0.37	3.73×10 <sup>6</sup>	852	0.19

### 3.2 数学模型

搜寻准确接触状态的反复迭代过程，就是接触问题的求解过程。即先作一个假设接触状态，之后带入定解条件，可得接触点的接触内力及位移，然后判断是否满足接触条件。条件不满足时修改接触状态重新求解，直到所有接触点都满足接触条件为止。

这里的接触条件，指两节点之间的力和位移及其法向、切向分量之间的关系，因此在讨论接触条件之前应确定局部的接触节点对坐标系。如果用  $\{r^{(m)}\}$  和  $\{r^{(n)}\}$ 、 $\{u^{(m)}\}$  和  $\{u^{(n)}\}$  分别表示接触点对 m、n 在接触节点对坐标系中和总体坐标系中的接触力，用  $\{u^{(m)}\}$ 、 $\{u^{(n)}\}$  和  $\{u^{(m)}\}$ 、 $\{u^{(n)}\}$  分别表示相应的节点位移，用  $[t]$  表示局部坐标系和总体坐标系的变换矩阵，则有：

$$\{r^{(j)}\}=[t]\{r^{(i)}\} \quad (1)$$

$$\{u^{(j)}\}=[t]\{u^{(i)}\} \quad (2)$$

其中，j=m、n。建立接触条件：

1) 开接触：接触点未接触。此时：

$$\begin{aligned} r_i^{(m)} &= r_i^{(n)} = 0 \\ r_i^{-(m)} &= r_i^{-(n)} = 0 \quad (i=1,2,3) \end{aligned} \quad (3)$$

式中：1、2 表示两个切向坐标轴，3 表示法向坐标轴。

2) 滑移闭接触：接触结点对法向无间隙，切向有滑移。此时：

$$\begin{aligned} r_i^{-(m)} + r_i^{-(n)} &= 0 \\ r_i^{-(m)} &= \pm \mu \cdot r_3^{-(m)} \quad (i=1,2) \\ u_3^{-(m)} - u_3^{-(n)} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\mu$  为摩擦系数，正负号取决于相对滑移方向，与坐标正向一致取正号，反之取负号。

3) 黏着闭接触：接触结点对法向无间隙，切向不滑移。此时：

$$\begin{aligned} r_i^{-(m)} + r_i^{-(n)} &= 0 \\ u_i^{-(m)} + u_i^{-(n)} &= 0 \quad (i=1,2,3) \end{aligned} \quad (5)$$

## 4 有限元分析

散料与锥仓的接触是高度非线性行为，求解过程需反复迭代，本文借助 ANSYS 软件求解状态非线性问题对散料与锥仓的接触问题进行求计算，求解主要包括以下内容<sup>[5]</sup>：

1) 将散料与锥仓离散化。散料为接触主动体，锥仓为被动体，其物理模型为散料模型上的点与锥仓表面上的点相接触，此时，互接触的散料与锥仓可传递法向压力与切向摩擦力。

2) 接触定义。将该问题定义为刚-柔、面-面接触，锥仓板为刚性面，作为目标面，用 Targe169 模拟，散料为柔性体，作为接触面，用 Conta171 模拟。

3) 摩擦定义。本文采用 Mohr-Coulomb 模型模拟散料与锥仓的接触摩擦。Mohr-Coulomb 模型使用摩擦因数

$$\mu \text{ 表征表面间的摩擦行为，即 } \tau = \mu p \text{ ( } \tau \text{ 为临界剪应力}$$

( Pa ) , p 为法向接触压力 ( Pa ) )。

4) 对以上 1) 、 2) 、 3) 所述问题进行数学描述，建立求解方程。

锥仓材料参数以及锥仓与散料接触概况如表 2 所示。

表 2 锥仓材料参数以及锥仓与散料接触概况

Table 2 Conical silos material parameters and contact parameters of conical silos and granular materials

参数项 Items	参数值 Parameters
密度 Density/(kg m <sup>-3</sup> )	7 850
杨氏模量 Yang modulus/Pa	2.1×10 <sup>11</sup>
泊松比 Poisson's ratio	0.3
离散单元 Mesh element	PLANE42
接触单元 Contact elements	TARGE169 与 CONTA171
接触类型 Contact form	刚-柔，面-面接触
法向接触刚度因子 Normal contact rigid factor	1
最大穿透 Maximum penetration depth	0.001 m

## 5 结果与分析

6

图 3 为有限元分析获得的分析结果，分别为葵花籽、玉米、煤粉、圆砾石、小麦在锥仓中的接触状态，每种散料与锥仓接触结果分别取锥仓倾角  $\alpha=20^\circ$ 、 $33.7^\circ$  和  $45^\circ$

组数据。为便于比较，图 3 中所有仓体均为统一垂直高度 10 m，如图 3a 所示。

图 4 为根据图 3 玉米、煤粉、圆砾石、小麦等 4 种散料在 3 种倾角锥仓中的“滑移”接触区域绘制折线图，横坐标为锥仓倾角，纵坐标为滑移接触区域垂直高度（实际接触区域为沿锥仓内壁面）。

以下对图 3 和图 4 的结果数据进行分析。

### 5.1 总体状态

1) 针对不同的物料属性和锥仓结构，散料在锥仓中可能有 3 种接触状态（如图 3a.葵花籽  $\alpha$  为  $20^\circ$  和  $33.7^\circ$  所示），也可能只有其中 2 种接触状态（如图 3 玉米、煤粉、圆砾石、小麦所示）。从仓顶到仓底，一般顺序为开接触、滑移接触和黏着接触（葵花籽散料除外）。

2) 散料在锥仓中的开接触区域一般很小或没有。如图 3 玉米、煤粉、圆砾石、小麦所示，3 组数据中均没有开接触状态，葵花籽在  $\alpha$  为  $20^\circ$  和  $33.7^\circ$  数据中也只有很小的开接触区域。表明散料在锥仓中的接触状态中，开接

触不占主导地位。

3) 无论深仓或浅仓以及无论何种散料, 图 3 中所有锥仓中的黏着接触区域均在一半以上, 表明散料在锥仓中的接触状态以黏着为主。

## 5.2 接触状态与散料参数的关系

1) 与其他几组散料相比, 葵花籽散料在深锥仓中有以下接触特点: ①仓顶具有一小部分开接触状态; ②从仓顶到底部出口, 滑移接触区域和黏着接触区域交替出现呈不连续混合区域, 且分布不对称。

和其他散料相比, 葵花籽散料的显著特点是颗粒较大但堆积密度小; 弹性模量小; 内聚力大; 膨胀角很小且远小于内摩擦角, 表明具有类似属性的散料在深锥仓中会出现以上现象。

出现以上现象, 散料参数中膨胀角的影响较大, 因为对压实的散料, 当物料受剪切力作用时, 颗粒发生膨胀, 由膨胀角控制散料体积膨胀的大小, 葵花籽散料膨胀角远小于内摩擦角, 则压实体积膨胀小, 致使其与深锥仓顶部处于开接触状态, 并在其他部分呈分布不对称的混合接触接触。当锥仓由深变浅时, 散料压实体积膨胀因素对接触状态的影响逐步变小, 逐渐呈分布均匀对称的连续接触状态。

以下分析仅针对玉米、煤粉、圆砾石、小麦等 4 种散料。

2) 由图 3 和图 4 可知, 无论在深仓或浅仓中, 4 种散料的滑移接触区按照“玉米-煤粉-圆砾石-小麦”的顺序均呈减小趋势, 但分析表 1 散料属性, 没有任何一种散料属性按照“玉米-煤粉-圆砾石-小麦”顺序呈顺序增大或顺序减小趋势。可见散料在锥仓中的接触状态不决定于 (或不主要决定于) 任何一种特定属性, 其表现出的接触状态应为数种散料属性综合效应。

3) 图 3 中玉米的滑移接触区最大, 黏着接触区域最小 (无论深仓或浅仓)。和其他散料相比, 玉米散料的特点是内聚力很大。特别是和小麦散料进行比较时 (小麦在图 3 中滑移接触区域最小), 除内聚力是小麦散料的约 2 倍外, 其他属性均相差不大。表明内聚力对散料锥仓接触状态影响较大, 内聚力越大, 则滑移接触区越大, 黏着接触区越小。

4) 若比较煤粉和圆砾石 2 种散料的属性, 可知圆砾石弹性模量和堆积密度较大, 其他属性则与煤粉相近, 而圆砾石滑移接触区略小于煤粉。可见堆积密度和弹性模量对接触状态有一定影响, 当两者同时增大时, 则滑移接触区变小, 黏着接触区增大。

## 5.3 接触状态与锥仓深浅的关系

随着锥仓由深仓向浅仓过渡, 开接触区域会消失。如图 3 葵花籽散料所示。由于葵花籽散料在深锥仓的接触状态较复杂, 此处暂不做分析外, 其他 4 种散料均随着锥仓由深向浅过渡, 滑移接触区变小, 黏着接触区变大。如图 3 和图 4 所示。

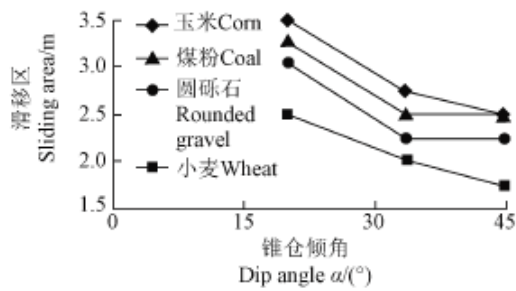


图4 玉米、煤粉、圆砾石和小麦滑移区随锥仓倾角变化图  
Fig.4 Sliding area change tendency with dip angle

#### 5.4 接触状态对锥仓的影响

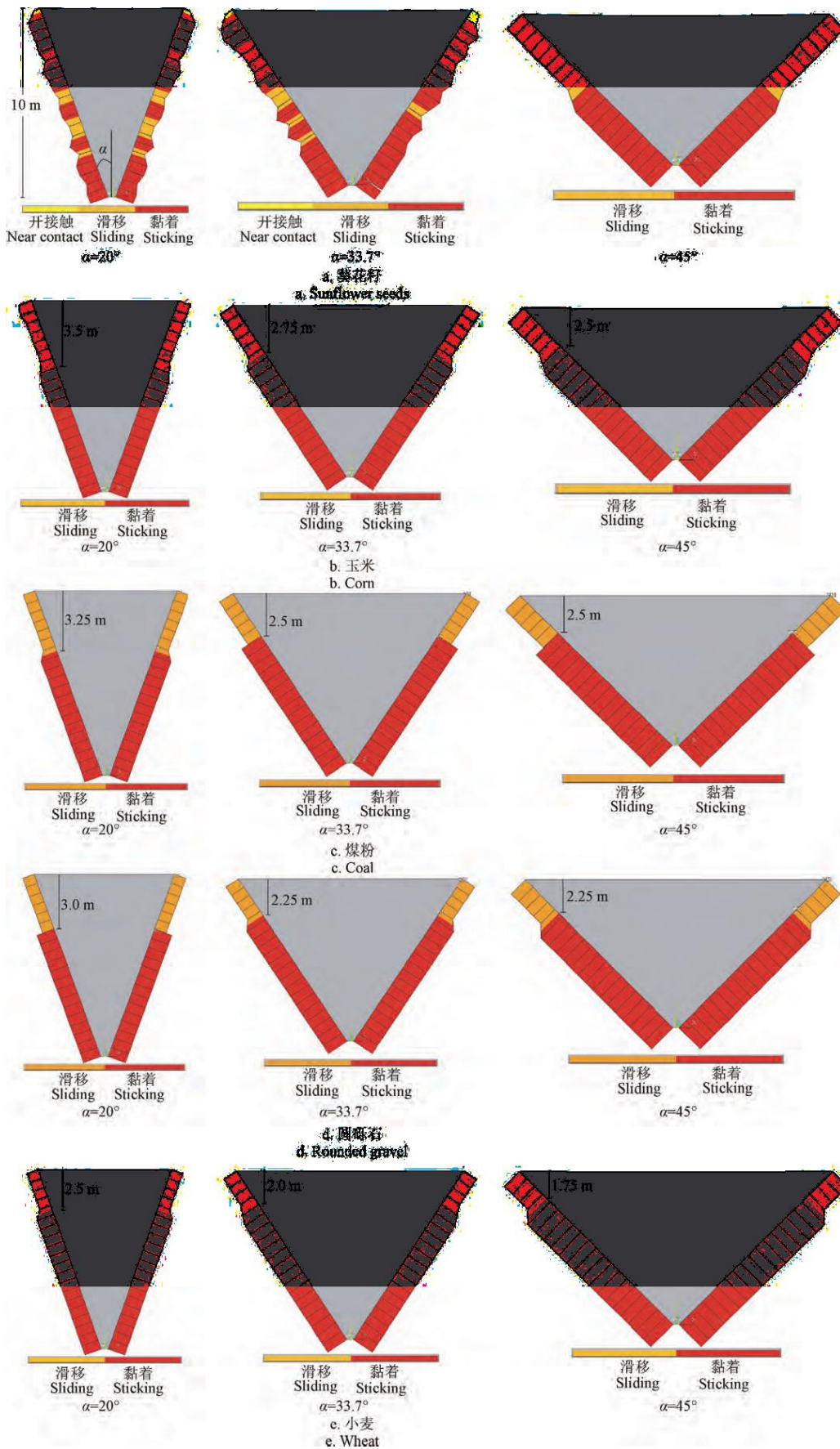
不同的接触状态会对锥仓有不同的影响，主要表现于摩擦力的影响。开接触状态时，散料与锥仓没有实质接触，摩擦作用可以忽略；滑移接触状态下，锥仓摩擦力为外摩擦力，主要表现为接触面间由于相对运动所产生的摩擦耗能；黏着接触状态下，锥仓摩擦力为内摩擦力，主要表现为接触面间由于产生弹性变形而导致能量消耗。

由 5.1 节分析可知，散料在锥仓中的接触状态以黏着为主。显然，黏着接触区增加，总内摩擦力会加大，散料在卸料状态难以有效克服内摩擦力和物料聚集力，更容易出现搭拱、卡塞、鼠洞、粘壁等堵塞和粘料问题；黏着接触区减小，则相对容易卸料，但此时滑移接触区会增加，导致接触面之间的相对运动较多，对仓体内壁面摩擦损伤会增大。

因此，在设计锥仓和储存散料时，应从锥仓结构、锥仓材料、散料属性、卸料方式、疏料措施等方面综合考虑，根据实际情况进行取舍，提高锥仓使用寿命和贮料效率。

#### 5.5 讨论

1) 自然界和工业应用领域存在种类繁多的散料，锥仓结构和锥仓材料也有较多类型，本文计算和分析仅限于所选取的 5 种散料和钢板锥仓，所得结论主要针对本文研究背景，



注：仓体垂直高度为 10 m； $\alpha$  为锥仓倾角(°)。  
 Note: All FE silo models use unified 10 m vertical height.  $\alpha$  is the dip angle (°).

图 3 葵花籽、玉米、煤粉、圆砾石、小麦在锥仓中的接触状态  
 Fig.3 Contact statuses between conical silos and granular materials

其是否具有普遍意义，还需进一步研究。

2) 选取的 5 种散料各具特点，属性分布不具规律性，因此，5.2 节所得结论没能给出单一散料属性如何影响其接触状态。

3) 论文使用有限元方法进行了散料与锥仓的接触状态影响途径研究，若要研究接触状态的影响机理，可借助于离散元方法和技术，对散料离散特性进行深入研究。

## 7 结 论

基于基本问题描述和合理假设，建立数学模型、有限元模型并进行有限元分析基础上，以葵花籽、玉米、煤粉、圆砾石、小麦等 5 种散料为例，研究了散料在锥仓中的接触状态，总结了锥仓结构和部分散料属性影响接触状态的途径，讨论了不同接触状态对锥仓应用和设计的影响方式：

1) 从仓顶到仓底，散料在锥仓中可能有 3 种接触状态，一般顺序为开接触、滑移接触和黏着接触。其中开接触区域一般很小或没有，整个锥仓中接触状态以黏着为主。

2) 散料在锥仓中的接触状态不决定于（或不主要决定于）任何一种特定属性，接触状态为数种散料属性综合效应。其中膨胀角很小时，可能会有开接触状态；内聚力越大，则黏着接触区越小；堆积密度和弹性模量同时较大时，会导致黏着接触区增大。

3) 锥仓由深向浅过渡时，开接触区域会消失，滑移接触区会变小，黏着接触区会增大。

4) 黏着接触区大不利于仓体卸料，更容易出现搭拱、卡塞、鼠洞、粘壁等现象；滑移接触区大相对容易卸料，但接触面之间的相对运动较多，锥仓内壁面摩擦损伤大。

## 参 考 文 献

- [1]. 王磊. 钢筒仓结构节点应力分析. 武汉：武汉理工大学，2010.
- [2]. Wang Lei. Node stress analysis of steel silos. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [3]. 邓楚键，何国杰，郑颖人. 基于 M-C 准则的 D-P 准则在岩土工程中的应用. 岩土工程学报，2006，28(6)：735 - 739.
- [4]. Deng Chujian, He Guojie, Zheng Yingren. Studies on Drucker-Prager yield criterions based on M-C yield criterion and application in geotechnical engineering. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 735 - 739. (in Chinese with English abstract)
- [5]. 王学文，杨兆建，王世文，等. 棱锥形斗仓粉体静压力分布. 机械工程学报，2009，45(3)：263 - 268.
- [6]. Wang Xuewen, Yang Zhaojian, Wang Shiwen, et al. Powder static pressure distributing on pyramidal silo. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 263 - 268. (in Chinese with English abstract)

- [7]. 孙珊珊, 赵均海, 张常光, 等. 基于统一强度理论的大型浅圆筒仓侧压力计算. 工程力学, 2013, 30(5): 244 - 249.
- [8]. Sun Shanshan, Zhao Junhai, Zhang Changguang, et al. Lateral pressure of large squat silos based on the unified strength theory. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 244 - 249. (in Chinese with English abstract)
- [9]. 王学文, 树学峰, 杨兆建. 散料与锥仓接触模拟. 农业机械学报, 2010, 41(10): 86 - 90.
- [10]. Wang Xuewen, Yang Zhaojian, Shu Xuefeng. Contact simulation on loose material and cone-shaped silo. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 86 - 90. (in Chinese with English abstract)
- [11]. 严仁章, 陈志华, 王小盾. 大型焊接储煤钢板仓的结构设计和稳定性分析. 工业建筑, 2014(10): 158 - 165, 180.
- [12]. Yan Renzhang, Chen Zhihua, Wang Xiaodun. Structure design and stability analysis of a large welded steel silo for coal storage. Industrial Construction, 2014(10): 158 - 165, 180. (in Chinese with English abstract)
- [13]. Antonio Cannavacciuolo, Diego Barletta, Giorgio Donsi, et al. Arch-Free flow in aerated silo discharge of cohesive powders. Powder Technology, 2009, 191(3): 272 - 279.
- [14]. Iwicki P, Tejchman J, Chróścielewski, J. Dynamic FE simulations of buckling process in thin-walled cylindrical metal silos. Thin-Walled Structures, 2014, 84: 344 - 359.
- [15]. 俞良群, 邢纪波. 筒仓装卸料时力场及流场的离散单元法模拟. 农业工程学报, 2000, 16(4): 15 - 19.
- [16]. Yu Liangqun, Xing Jibo. Discrete element method simulation of forces and flow fields during filling and discharging materials in silos. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(4): 15 - 19. (in Chinese with English abstract)
- [17]. 徐泳, K.D.KafuiC.Thornton. 用颗粒离散元法模拟料仓卸料过程. 农业工程学报, 1999(3): 65 - 69.
- [18]. Xu Yong, KafuiC.Thornton K.D. Silo discharge simulation with different particulate properties using the distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999(3): 65 - 69. (in Chinese with English abstract).
- [19]. Janssen H A. Versuche uber getreidedruck in silozellen. Z.des Vereines Deutscher Ingenieure, 1895, 39(35): 1045 - 1049.
- [20]. 薛铜龙. 矿井煤仓堵塞的原因分析和解决方法. 煤炭科学技术, 2009, 37(3): 71 - 72, 76.
- [21]. Xue Tonglong. Cause analysis and resolution of mine coal bunker jam. Coal Science and Technology, 2009, 37(3): 71 - 72, 76. (in Chinese with English abstract)
- [22]. Moya M, Aguado P J, Ayuga F. Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. International Agrophysics, 2013, 27: 181-193.
- [23]. 汪碧飞, 陈明祥, 汤正俊, 等. 大型整体式贮煤筒仓基础有限元分析. 岩土力学, 2010, 31(6): 1983 - 1988. Wang Bifei, Chen Mingxiang, Tang Zhengjun, et al. Finite element analysis of huge coal silo foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1983 - 1988. (in Chinese with English abstract)
- [24]. Reimbert M L, Reimbert A M. Silos Theory and Practice. Germany, Trans Tech Publications, 1976.

- [25]. SH 3078-1996. 立式圆筒形钢制和铝制料仓设计规范. 北京：中国石化出版社，2011.
- [26]. Yuan Fang, Wang Hui, Hu Yuxia, et al. A general method for silo classification using rupture plane. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2009, 25(3): 381 - 384.
- [27]. GB50077-2003. 钢筋混凝土筒仓设计规范. 北京：中国计划出版社，2003.