**doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.010**
**引用格式：**王俊，金凯，杨金山，张建刚. 基于离散元仿真模拟的颗粒流建模与矿仓参数优化[J]. 矿冶，2026，35(2)：250-258.
WANG Jun, JIN Kai, YANG Jinshan, ZHANG Jiangang. Modeling of granular flow based on discrete element method simulation and optimization of ore bin parameters[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 250-258.

# 基于离散元仿真模拟的颗粒流建模与矿仓参数优化

王 俊 金 凯 杨金山 张建刚
（长沙有色冶金设计研究院有限公司，长沙 410019）

**摘 要：**选矿厂矿仓尺寸参数通常根据所贮存矿石的堆积角进行经验设计，但在矿石含水率高、含泥量大时，易出现物料堆积板结、有效容积利用率低等问题，严重影响工艺流程的通畅性与矿山正常生产。针对上述问题，本文提出一种模拟仿真与优化设计相结合的矿仓设计方法。以钼矿中细碎仓物料、钼矿高压辊磨仓物料、铜矿粉矿仓物料、铝土矿原矿仓物料四种物料类型为研究对象，采用Cradle软件开展离散元模拟仿真试验，系统揭示了黏性阻尼系数、静摩擦系数及滚动阻力系数对颗粒堆积行为的影响规律，并建立了多种矿石颗粒流的参数化模型，组建相应数据库以提升陌生物料的建模效率。在阐明矿仓半顶角、卸料口尺寸及矿仓高度等关键参数对卸料性能影响规律的基础上，引入仓内颗粒占总容积70%和30%时料层表面与水平面的夹角、料拱高度、料拱维持时间及成拱瞬时应力等多维指标，构建矿仓卸料性能评价体系。结合Jenike理论与临界拱高公式，分析了卸料口尺寸与料拱高度、颗粒黏结力与临界成拱高度之间的定量关系。以新疆某铜矿为例进行应用验证，通过模拟评估优化后的矿仓卸料效果，结果表明：矿仓半顶角过大易导致物料出现静止区、卸料流型转变为中心流；根据仿真结果增大卸料口尺寸后，棚料状况明显改善，模拟结果与现场实际工况吻合良好。研究验证了所提方法的可靠性与工程实用价值，为复杂工况下矿仓的精细化设计提供了理论依据与技术支撑。

**关键词：**离散元法；矿仓颗粒流；颗粒参数标定；设计参数优化；Cradle
**中图分类号：**TD952 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0250-09

# Modeling of granular flow based on discrete element method simulation and optimization of ore bin parameters

WANG Jun JIN Kai YANG Jinshan ZHANG Jiangang
(CINF Engineering Co. Ltd., Changsha 410019, China)

**Abstract:** The dimensional parameters of ore bins in mineral processing plants are typically designed empirically based on the repose angle of the stored ore. However, when the ore has high moisture and clay content, issues such as material compaction and low effective volume utilization rate are prone to occur, severely impacting the smoothness of the process flow and normal mine production. To address these problems, this paper proposes an ore bin design method that integrates simulation and optimization design. Four types of materials were taken as research objects, including materials from the medium-fine crushing bin of molybdenum ore, materials from the high-pressure grinding roll bin of molybdenum ore, fine ore bin materials of copper ore, and run-of-mine bin materials of bauxite. Discrete element simulation tests were carried out using Cradle software to systematically reveal the influence laws of viscous damping coefficient, static friction coefficient and rolling resistance coefficient on particle accumulation behavior. Parametric models for particle flow of various ores were established, and a corresponding database was constructed to improve the modeling efficiency for unfamiliar materials. Based on elucidating the influence patterns of key parameters—such as bin half-angle, outlet size, and bin height—on discharge performance,

**收稿日期：**2025-11-28 **修回日期：**2026-01-27 **录用日期：**2026-01-26
**第一作者：**王俊，硕士，高级工程师，研究方向为矿山机械工程。E-mail：18370979262@163.com
**通信作者：**金凯，硕士，工程师；E-mail：13689295605@163.com
©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

a multi-dimensional evaluation system for ore bin discharge performance was constructed. This system incorporates indicators including the angle between the material layer surface and the horizontal plane when the internal particles account for 70% and 30% of the total volume, arch height, arch duration, and instantaneous arching stress. Combining Jenike's theory and the critical arching height formula, the quantitative relationships between outlet size and arch height, as well as between particle cohesion and critical arching height, were analyzed. A copper mine in Xinjiang was taken as a case study for application verification. The optimized ore bin discharge effect was evaluated through simulation. The results indicate that an excessively large bin half-angle can easily lead to stagnant zones in the material, transforming the discharge flow pattern into funnel flow. Increasing the outlet size based on simulation results significantly improved the bridging situation, with simulation findings showing good agreement with actual site conditions. This study validates the reliability and engineering practical value of the proposed method, providing a theoretical basis and technical support for the refined design of ore bins under complex operating conditions.

**Key words:** discrete element method (DEM); ore bin granular flow; particle parameter calibration; design parameter optimization; Cradle

矿仓是选矿厂常用的贮矿设施，常规的矿仓设计以满足物料堆积时间为原则，参考类似矿石安息角，靠以往设计经验大致确定矿仓的卸料口尺寸、矿仓半顶角、矿仓高度等参数[1]。由于矿仓参数的设计过程未考虑实际矿物颗粒的流动性因素，导致在实际生产中存在有效容积利用率低、卸料口堵塞、矿仓超压变形等问题，严重者会影响到矿山正常生产[2,3]。实际生产中矿仓内颗粒的流动形式主要分两种：整体流动和中心流动，矿仓卸料往往会“先整体流动，后中心流动”。卸料初期仓内料位较高时，颗粒所受压力分布均匀，仓壁附近的颗粒不会因摩擦力单独停滞，整个矿仓横截面上的颗粒同步向下移动；仓内料位降低后，颗粒间的压实程度降低，仓壁外摩擦力的占比显著上升，仓壁附近的颗粒因与仓壁的摩擦阻力，无法随中心颗粒同步向下移动，逐渐进入静止状态，仅矿仓中心轴线区域的颗粒，受重力主导且无仓壁摩擦约束，持续向下流动。仓壁附近的颗粒长期停滞，逐步出现板结现象，引起矿仓堵塞并形成管斗。

为了能够在设计阶段解决矿仓卸料不畅的问题，有必要对矿仓卸料流动特性进行探究。离散元（DEM）法作为一种不连续的数值研究方法，目前在研究颗粒流动问题方面得到了广泛应用[4-6]。基于上述研究方法的成果主要集中在颗粒流态、颗粒比重、颗粒形状、颗粒密实度、矿仓设计参数、入料方式、颗粒接触力学参数等颗粒参数[6-10]对矿仓中物料流态的影响研究上，但针对实际矿物的矿仓尺寸参数对颗粒流整体流动形态影响的研究相对较少。

本文采用Cradle软件开展颗粒流仿真模拟，该软件可以对颗粒输送、多相流/颗粒模型耦合等进行模拟分析，同时具有强大的网格自动划分和重叠网格功能、完善的后处理功能。本研究建立矿仓内部颗粒流场模型，以钼矿中细碎仓物料、钼矿高压辊磨仓物料、铜矿粉矿仓物料、铝土矿原矿仓物料四种物料实际颗粒堆积角为模型依据，揭示了黏性阻尼相关系数、静摩擦相关系数、滚动阻力相关系数对颗粒堆积的影响规律，并建立多种矿石颗粒流的参数化模型。对上述四类物料开展矿仓半顶角、卸料口尺寸、矿仓高度等矿仓设计参数对卸料性能影响规律研究，制定了表征矿仓卸料性能的评价指标，提出一种矿仓设计参数优化方法，并以新疆某铜矿为例，演示了矿仓参数优化过程，并对实际矿仓卸料过程效果进行模拟评估。

# 1 建模

## 1.1 矿仓内部流体域模型

试验所用矿仓几何模型参考设计阶段常用的方形矿仓，矿仓几何模型图见图1，图中黄线位置为剖面位置，矿仓剖面图见图2，下述矿仓具体尺寸是以图2中物理符号描述。矿仓几何模型由方形矿仓贮料区域、类漏斗区域及出料口、出料口下方堆料平台组成，其中方形矿仓贮料区域、出料口采用类锥体结构，底部为敞口，出料口横截面为矩形截面。

采用Cradle软件提取几何模型内部流体域并构建分析模型，参数见表1。设定流体为不可压缩空气、不可压缩、标准大气压、温度20 ℃、流体域边界静止、无滑移应力、不考虑粗糙度、边界与颗粒接触处理为碰撞。

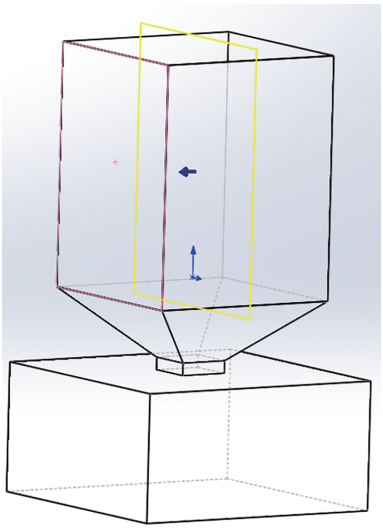


图1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

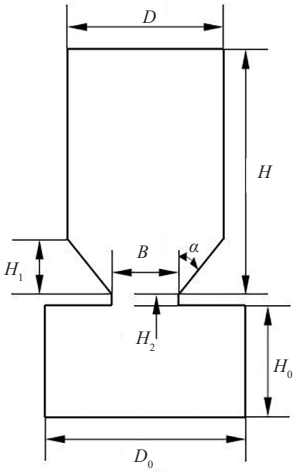



图2 矿仓剖面图

Fig. 2 Ore bin profile

表1 矿仓内部流体域模型参数

Table 1 particles in lead-zinc ore powder silo as an example

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 刻面类型 | Soild-based 刻面 |
| 刻面精度/mm | 0.3 |
| 角度精度下限/(°) | 5 |
| 边长缩小比率 | 0.1 |
| 边长最大值(相对默认值) | 1 |
| 自动去除细小面的参考值/%（相对刻面尺寸的比率） | 5 |

## 1.2 scflow 仿真数值模型及卸料特性表征公式

为保持整体流所需的最大半顶角$\alpha$，计算见式(1)：

$$\alpha=\frac{1}{2}(180-\psi_w)-\frac{1}{2}\left[\cos^{-1}\left(\frac{1-\sin\psi_e}{2\sin\psi_e}\right)+\sin^{-1}\left(\frac{\sin\psi_w}{\sin\psi_e}\right)\right] \quad (1)$$

式中：$\alpha$为矿仓半顶角，°；$\psi_w$为壁面摩擦角，°；$\psi_e$为颗粒有效内摩擦角，°。

理想的仓内颗粒流的流动形态应为“先进先出”的整体流动形态，但矿仓的卸料口尺寸较小或矿仓半顶角过大时，颗粒在颗粒间摩擦力和内聚力、仓壁摩擦力、颗粒互锁作用以及物料与仓壁的黏附作用的影响下，会在卸料口上方形成“拱桥”状稳定的力学平衡结构，导致仓内物料堆积板结，引起矿仓堵塞并形成管斗[11,12]。

式(2)常用于判断料仓内物料是否会形成稳定料拱导致堵塞：

$$H_c=\frac{B/2}{\tan\left(45^\circ+\frac{\Phi}{2}\right)}+\frac{2c}{\rho g\tan\Phi} \quad (2)$$

式中：$H_c$为物料形成稳定料拱的临界料拱高度；第一项为卸料口跨度引起的几何效应项，第二项为黏结力引起的抗拱效应项；$\rho$为物料密度，kg·m$^{-3}$；$\Phi$为堆积角，°；$c$为黏结力，Pa；$B$为卸料口尺寸，$m$；$g$为重力加速度，取值为9.8 m·s$^{-2}$。当仓内物料形成的拱体高度小于$H_c$时，易发生拱体局部颗粒脱落，应力分布突变或受外部冲击等情况，拱结构将连锁崩塌，物料下落，不影响颗粒流动[13]。

矿仓的最小卸料尺寸应满足Jenike粉体流动性理论，该理论通过确定物料颗粒结拱状态瞬时应力$\sigma$，建立颗粒参数→料仓设计指标”的定量关系，确保粉体在料仓中实现稳定、无堵塞的整体流的矿仓最大半顶角$\alpha$和最小卸料口$B$，见式(3)。

$$\sigma=\frac{\rho B}{H(\theta)} \quad (3)$$

式中：$\sigma$为料拱应力，Pa；$B$为卸料口尺寸，$m$；$\rho$为物料密度，kg·m$^{-3}$；$H(\theta)$为料仓半顶角的函数，$H(\theta)$=(1+$m$)+0.01×(0.5+$m$)$\alpha$，$m$为料仓的形状系数，对于轴对称圆锥料斗，$m$取值为1，对于平面对称楔形，$m$取值为0[14]。

本文根据实际颗粒的静态堆积角、粒度组成等参数，以式(1)计算所得的最大半顶角$\alpha$为依据，进行卸料口尺寸$B$、矿仓半顶角$\alpha$的多条件模拟仿真，监测模拟过程中形成的料拱的瞬时应力$\sigma_o$以及瞬时料拱高度$H_o$，并对比其与式(2)、式(3)所计算的临界料拱高度$H_c$、料拱应力$\sigma$，判定矿仓卸料口尺寸$B$、矿仓半顶角$\alpha$的合理性，并用于生产实际。

## 1.3 矿物颗粒流模型

试验选用钼矿中细碎仓物料、钼矿高压辊磨仓物料、铜矿粉矿仓物料、铝土矿原矿仓物料四种物料作为研究对象，参考实际−15 mm物料颗粒粒径基本分布建立模拟仿真颗粒流模型，以实际物料−15 mm颗粒的堆积角为依据开展颗粒参数标定正交试验。

本文模拟仿真计算采用Hertz-Mindlin模型，该模型基于以下假设：颗粒为表面光滑的刚性球体，颗粒间碰撞接触区域远小于颗粒尺寸，且接触仅发生弹性变形，忽略颗粒表面粗糙度等微观细节。该模型适用于模拟球体等基本颗粒构型的接触问题，其核心是通过理论推导建立颗粒接触时的力—位移关系，兼顾弹性变形与能量耗散，准确反映颗粒间的力学相互作用。当颗粒与流体域边界碰撞时，假定流体域边界存在一颗粒与之碰撞，流体域边界所假定颗粒采用以下相关参数：黏性阻尼相关系数2.0、静摩擦相关系数2.0、滚动阻力相关系数2.0、杨氏模量30 GPa、泊松比0.2。

试验模拟所用颗粒各颗粒流颗粒总量能够确保仓内贮料高度（$H-H_1$）不小于3 000 mm，模型内部颗粒生成区域见图3。矿物颗粒标定试验所需参数见表2，包含颗粒堆积角、颗粒直径、各粒径颗粒质量占比、颗粒比重、泊松比、杨氏模量、各模型方形矿仓贮料区域尺寸D，并以粉矿仓铜矿物料为例，对正交试验结果进行极差分析、方差分析，数据见表3、表4。

粉矿仓铜矿物料极差分析表明，黏性阻尼相关系数、静摩擦相关系数、滚动摩擦相关系数的$Y_{3sum}$均为同列最小值，依次分别为8.2%、3.0%、6.9%，因此三类相关系数理论最优水平分别为1.8、2.4、2.4。方差分析可见，三类相关系数对应的F值依次分别为0.034 66、0.801 35和0.148 96，因此，静摩擦相关系数对颗粒堆积角相对误差的影响最为显著，滚动摩擦系数次之，黏性阻尼系数影响最小。

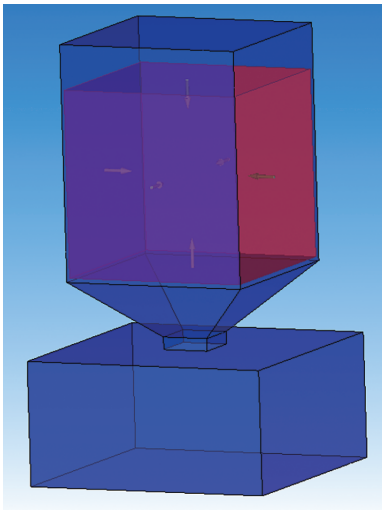


**图3 几何模型内部流体域及颗粒生成区域**

**Fig. 3 Internal fluid domain and particle generation region of the geometric model**

为了验证各因素理论最优水平的准确性，在Cradle软件中设置黏性阻尼相关系数、静摩擦相关系数、滚动摩擦相关系数分别为1.8、2.4和2.4，同时保持其他参数均不变的情况下，粉矿仓铜矿物料堆积角测定值为38.20°，与实测值相对误差为0.20%，参数仅滚动摩擦系数设置不同，试验9的堆积角测定值为37.7°，与颗粒堆积角实测值相对误差为0.3%。因此本文粉矿仓铜矿物料的黏性阻尼相关系数、静摩擦相关系数、滚动摩擦相关系数分别为1.8、2.4和2.4，

**表2 矿物颗粒标定试验所需参数**

**Table 2 Parameters required for mineral particle calibration tests**

| 物料种类 | 堆积角/(°) | 比重/(g·cm$^{-3}$) | 模拟所用颗粒直径/mm | 颗粒质量占比/% | 方形矿仓贮料区域尺寸D/mm | 泊松比 | 杨氏模量/GPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 中细碎仓钼矿 | 31 | 2.7 | 6 | 52.28 | 600 | 0.22 | 37 |
| | | | 3 | 24.26 | | | |
| | | | 1 | 23.46 | | | |
| 高压辊磨仓钼矿 | 36 | 2.7 | 3 | 23.10 | 300 | 0.22 | 37 |
| | | | 1 | 38.40 | | | |
| | | | 0.5 | 38.50 | | | |
| 粉矿仓铜矿 | 38 | 2.75 | 8 | 40.92 | 600 | 0.20 | 38 |
| | | | 5 | 22.92 | | | |
| | | | 2.5 | 8.39 | | | |
| | | | 1.5 | 27.77 | | | |
| 原矿仓铝土矿及原矿仓内黏土 | 32 | 铝土矿 3.4 | 6 | 17.70 | 400 | 0.21 | 36 |
| | | | 4 | 4.70 | | | |
| | | | 1.5 | 4.40 | | | |
| | | | 0.5 | 4.90 | | | |
| | | 黏土 2.4 | 6 | 13.90 | 400 | 0.25 | 32 |
| | | | 4 | 10.40 | | | |
| | | | 1.5 | 20.20 | | | |
| | | | 0.5 | 23.80 | | | |

表3 矿物颗粒接触力学参数标定正交试验结果极差分析(以铜矿粉矿仓颗粒为例)

Table 3 Range analysis of orthogonal test results for calibration of contact mechanical parameters of mineral particles (taking particles from the copper ore fine ore bin as an example)

| 试验编号 | 黏性阻尼相关系数 | 静摩擦相关系数 | 滚动摩擦相关系数 | 空列 | 相对误差 $Y$/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.2 | 1.8 | 1.8 | 1 | 10.9 |
| 2 | 1.2 | 2.1 | 2.1 | 2 | 2.4 |
| 3 | 1.2 | 2.4 | 2.4 | 3 | 0.4 |
| 4 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 3 | 7.3 |
| 5 | 1.5 | 2.1 | 2.4 | 1 | 1.2 |
| 6 | 1.5 | 2.4 | 1.8 | 2 | 2.3 |
| 7 | 1.8 | 1.8 | 2.4 | 2 | 5.3 |
| 8 | 1.8 | 2.1 | 1.8 | 3 | 2.6 |
| 9 | 1.8 | 2.4 | 2.1 | 1 | 0.3 |
| $Y_{1sum}$/% | 13.7 | 23.5 | 15.8 | – | – |
| $Y_{2sum}$/% | 10.8 | 6.2 | 10 | – | – |
| $Y_{3sum}$/% | 8.2 | 3.0 | 6.9 | – | – |

表4 矿物颗粒接触力学参数标定正交试验结果方差分析(以铜矿粉矿仓颗粒为例)

Table 4 Variance analysis of orthogonal test results for calibration of contact mechanical parameters of mineral particles (taking particles from the copper ore fine ore bin as an example)

| 差异来源 | 离差平方和 | 自由度 | 均方和 | F值 | 优选方案 |
|---|---|---|---|---|---|
| 粘性阻尼相关系数 | 3.695 6 | 2 | 1.847 8 | 0.034 66 | |
| 静摩擦相关系数 | 85.442 2 | 2 | 42.721 1 | 0.801 35 | 1.8、2.4、2.4 |
| 滚动摩擦相关系数 | 15.882 2 | 2 | 7.941 1 | 0.148 96 | |
| 误差 | 106.622 2 | 2 | 53.311 1 | – | – |
| 总和 | 211.642 2 | 8 | – | – | – |

并以此参数开展模拟仿真计算。钼矿中细碎仓物料、钼矿高压辊磨仓物料、铜矿粉矿仓物料、铝土矿原矿仓物料四种物料的参数标定正交试验结果见表5。表2、表5即为本文试验模拟所用颗粒物理性质参数。

表5 矿物颗粒接触力学参数标定正交试验结果

Table 5 Results of orthogonal test for calibration of contact mechanical parameters of mineral particles

| 物料种类 | 黏性阻尼相关系数 | 静摩擦相关系数 | 滚动摩擦相关系数 |
|---|---|---|---|
| 中细碎仓钼矿 | 1.5 | 2.1 | 1.2 |
| 高压辊磨仓钼矿 | 1.8 | 2.1 | 1.8 |
| 粉矿仓铜矿 | 1.8 | 2.4 | 2.4 |
| 原矿仓铝土矿及原矿仓内黏土 | 1.8<br>2.7 | 2.1<br>2.1 | 1.5<br>1.8 |

## 2 试验结果与分析

### 2.1 矿仓半顶角对颗粒流的影响

根据表2四类物料的实际颗粒的静态堆积角、粒度组成等参数，以式(1)计算最大半顶角$\alpha$，式中$\psi_w$壁面摩擦角与$\psi_e$颗粒有效内摩擦角与物料黏聚力$c$相关，公式取值及所得的最大半顶角$\alpha$见表6，卸料口尺寸$B$=8$d_{max}$，保持矿仓总容积、料仓长宽$D$不变，料仓高度$H$随矿仓半顶角的增大而降低。对不同的矿仓半顶角$\alpha$开展条件试验，考察达到稳态所需的时间、仓内颗粒占总容积的70%、30%时料层表面与水平面的夹角三个指标，试验结果见表7。

表6 保证物料整体流下落的理论最大半顶角$\alpha$

Table 6 The maximum halfapex angle $\alpha$ of the ore bin for ensuring the overall downward flow of materials

| 物料种类 | 堆积角/(°) | 壁面摩擦角/(°) | 颗粒有效内摩擦角/(°) | 理论最大半顶角/(°) |
|---|---|---|---|---|
| 中细碎仓钼矿 | 31 | 30 | 32 | 73.83 |
| 高压辊磨仓钼矿 | 36 | 35 | 37 | 71.25 |
| 粉矿仓铜矿 | 38 | 36 | 39 | 70.76 |
| 原矿仓铝土矿 | 32 | 30 | 37 | 73.89 |

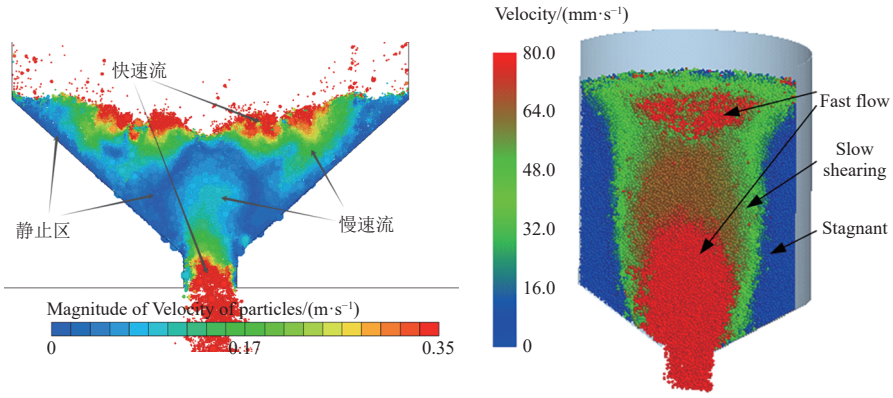
图4为模拟过程中出现的卸料流动特性，参考文献流形图为典型中心流流形示意图[15]，从图4可知，物料流动区分为快速流、慢速流、静止区3个区域。对比图4(a)和图4(b)，可见物料流动区域分布基本一致，半顶角45°时颗粒流呈现中心流流型，无法呈整体流卸落，其中静止区的颗粒在储存过程中因流动条件不足而长期滞留、不参与流动的区域，是散体物料储存中常见的工程现象，需要注意的是，具体的工程过程情况需结合粉体力学原理与工程实践进行分析。

四类物料的中细碎仓钼矿物料粒度组成最粗，原矿仓铝土矿物料颗粒粘结力最大。由表7可知，当$\alpha$=90°、矿仓为平底仓时，部分物料将保留至仓体两侧，中细碎仓钼矿物料形成的自然堆积角最大，为62.8°，

**表7 矿仓半顶角对颗粒流的影响**

**Table 7 Effect of silo half-apex angle on granular flow**

| 物料种类 | 矿仓半顶角/(°) | 达到稳态时间/s | 仓内颗粒占总容积的70%时料层表面与水平面的夹角/(°) | 仓内颗粒占总容积的30%时料层表面与水平面的夹角/(°) |
|---|---|---|---|---|
| 中细碎仓钼矿 | 90 | 6.16 | 12.4 | 62.8 |
| | 73.5 | 7.25 | 13.2 | 29.2 |
| | 60 | 7.08 | 15.6 | 40.2 |
| | 45 | 7.49 | 16.9 | 51.8 |
| 高压辊磨仓钼矿 | 90 | 8.74 | 13.8 | 54.7 |
| | 71 | 9.26 | 12.7 | 30.6 |
| | 54 | 9.72 | 14.6 | 45.7 |
| | 46 | 10.02 | 14.2 | 51.2 |
| 粉矿仓铜矿 | 90 | 9.62 | 15.6 | 52.1 |
| | 70 | 10.06 | 14.3 | 33.6 |
| | 60 | 10.48 | 14.8 | 41.4 |
| | 55 | 10.78 | 15.2 | 44.8 |
| | 45 | 11.16 | 14.6 | 53.3 |
| 原矿仓铝土矿 | 90 | 22.66 | 17.8 | 52.8 |
| | 73.5 | 23.96 | 18.6 | 32.2 |
| | 60 | 25.14 | 18.5 | 43.8 |
| | 45 | 27.32 | 18.3 | 57.4 |




(a)半顶角45°自由卸落流形图 (b)参考文献自由卸料流形图[15]

**图4 矿仓自由卸料流型图**

**Fig. 4 Flow pattern diagram of free discharge in silo**

说明粗颗粒在平底仓中更易形成大倾角滞留；减小半顶角$\alpha$后物料与壁面形成的夹角最小，表明粒度组成越细，物料越难实现整体流下落；物料卸落达到稳态的时间随半顶角$\alpha$的减小而增加，原矿仓铝土矿达到稳态所需时间最长，$\alpha$对原矿仓铝土矿的影响最显著。

## 2.2 矿仓卸料口对颗粒流的影响

以式(2)、式(3)计算临界料拱高度$H_c$、料拱应力$\sigma$，式中矿仓半顶角$\alpha$取45°，卸料口宽度$B$=8~11$d_{max}$，计算结果见表8。

由图4可见，慢速颗粒在卸料口上方形成一片弯曲的瞬时料拱，该弧面的垂直高度即为料拱高度，从料拱开始形成至无法稳定维持的时长为料拱持续时间。试验模拟仿真保持料仓高度$H\geqslant 2H_c$，并随矿仓卸料口宽度的增大而降低，按料仓长宽D、卸料口尺寸$B$、料仓高度$H$、半顶角$\alpha$计算矿仓总容积，并保持不变。对表8中不同的矿仓卸料口宽度$B$开展条件试验，考察料拱高度、料拱持续时间、成拱瞬时料拱应力三个指标，试验结果见表9。部分相关模拟结果如图5所示。图5中颗粒按颗粒直径大小呈红、绿、蓝、浅蓝色。

根据表7、表8、图5试验结果，任一条件下，表9成拱瞬时料拱应力均小于表8料拱应力，这与Jenike理论一致，模拟结果合理。试验过程中发现，料位越高，整体流越稳定；低于临界料位(通常为仓高的1/2)后，几乎必然转为中心流，由于料仓高度$H\geqslant 2H_c$，因此转为中心流时大致为料拱形成阶段，表明料拱形成是影响颗粒流态的主要因素：同种物料的卸料口尺寸与料拱高度成反比、与临界拱高成正

表 8　临界料拱高度、瞬时料拱应力计算结果

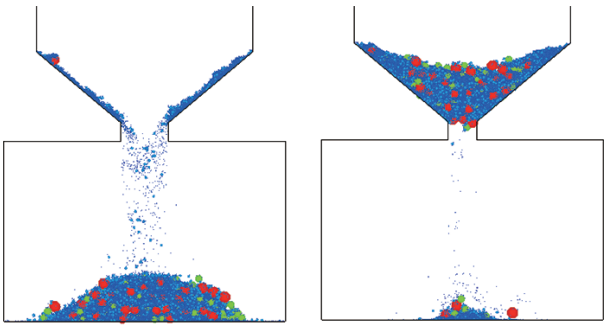
Table 8　Critical arch height and instantaneous arch stress calculation results

| 物料种类 | 物料比重/(kg·m$^{-3}$) | 黏结力/kPa | 卸料口尺寸/mm | 临界料拱高度/mm | 料拱应力/Pa |
|---|---|---|---|---|---|
| 中细碎仓钼矿 | 2.7 | 5 | 50 | 643.12 | 110.20 |
| | | | 55 | 644.54 | 121.22 |
| | | | 60 | 645.95 | 132.24 |
| 高压辊磨仓钼矿 | 2.7 | 7 | 25 | 734.61 | 55.10 |
| | | | 30 | 735.89 | 66.12 |
| | | | 35 | 737.16 | 77.14 |
| 粉矿仓铜矿 | 2.75 | 15 | 65 | 1 440.65 | 145.92 |
| | | | 73 | 1 442.60 | 163.88 |
| | | | 80 | 1 444.31 | 179.59 |
| 原矿仓铝土矿 | 3.4 | 45 | 50 | 4 336.49 | 138.78 |
| | | | 55 | 4 337.88 | 152.65 |
| | | | 60 | 4 339.26 | 166.53 |

表 9　矿仓卸料口尺寸对颗粒流的影响

Table 9　Effect of discharge outlet size on granular flow in silo

| 物料种类 | 卸料口尺寸/mm | 料拱高度/mm | 料拱持续时间/s | 成拱瞬时料拱应力/Pa |
|---|---|---|---|---|
| 某钼矿中细碎仓物料 | 50 | 687 | 37.28 | 95.25 |
| | 55 | 624 | 32.76 | 112.28 |
| | 60 | 607 | 29.84 | 124.31 |
| 某钼矿高压辊磨仓物料 | 25 | 765 | 33.34 | 50.01 |
| | 30 | 741 | 27.34 | 62.35 |
| | 35 | 717 | 22.58 | 73.68 |
| 某铜矿粉矿仓物料 | 65 | 1 484 | 40.48 | 132.05 |
| | 73 | 1 451 | 37.12 | 146.38 |
| | 80 | 1 427 | 34.74 | 162.94 |
| 某铝土矿原矿仓物料 | 50 | 4 358 | 76.42 | 125.64 |
| | 55 | 4 342 | 74.34 | 141.22 |
| | 60 | 4 311 | 73.28 | 152.87 |



(a)$B=8d_{max}$　(b)$B=4d_{max}$

图 5　矿仓卸料口宽度对颗粒流的影响

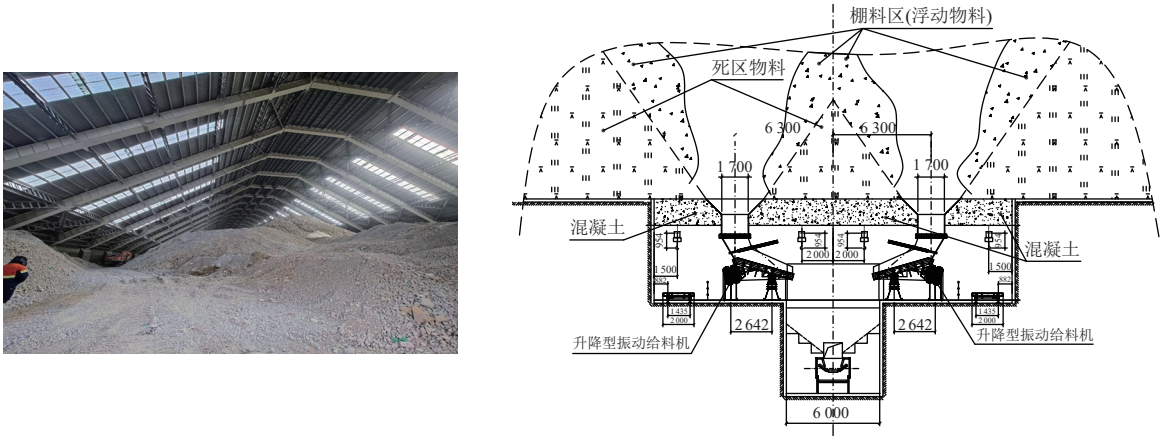
Fig. 5　Effects of silo discharge outlet width on granular flow

比，当实际料拱高度高于临界拱高时，该卸料口尺寸偏小，物料极易成拱；在卸料口尺寸不变时，不同物料的物料湿度越高，黏结力$c$值越大，临界成拱高度越高，物料形成的实际料拱高度越高，实际生产中物料一旦出现性质波动、停车检修等导致矿仓内物料滞留时间加长的情况时，其发生堵料的几率大大增加，因此高黏结力物料需在模拟所得的卸料口尺寸适当加大，以确保实际生产中物料能够保持整体流泄落。

## 2.3　实际矿仓堵塞过程模拟及矿仓优化

以新疆某铜矿为例，实际矿仓为铜矿粗碎产品多卸料口平底矿仓，长280 m，宽70 m，物料粒度为−300 mm，矿石堆密度为1.75 t·m$^{-3}$，矿石堆积角为38°，含水率5%左右，由于堆场下料口开孔率较低，导致死区物料占比达到35%，并且物料细粒级含量高，黏性大，时常发生井状棚料与黏壁棚料（图6），给生产运营带了极大阻碍。

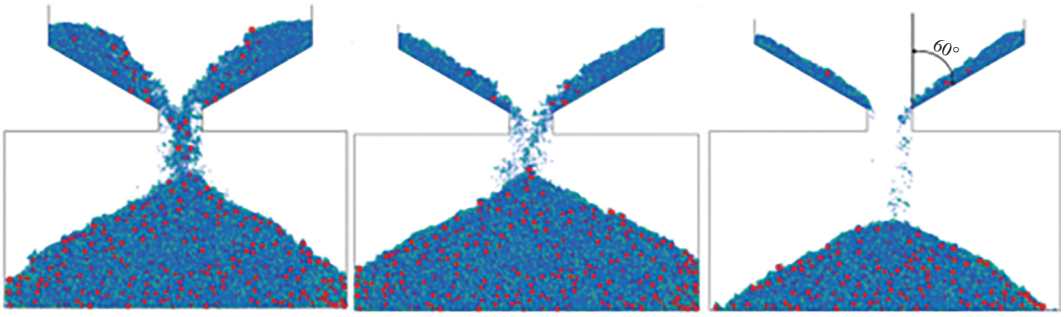
采用上述方法开展模拟仿真试验，死区物料使得矿仓$\alpha$=60°，矿仓静止区形成过程如图7所示。试验通过对实际矿仓卸料过程的模拟发现，任一颗粒接触系数的增加均会导致颗粒堆积角变大，相应的颗粒间接触力亦变大，死区物料受到挤压、板结作用，该区物料颗粒接触力学相关系数明显高于表5系数。从图7可见，在矿仓中明显留存大量颗粒，并且距离卸料口越近，颗粒厚度越小，呈现倒三角形的形态。矿仓半顶角过大时，仓内物料极易出现静止区，使料仓卸料流动形态变为中心流，严重影响生产，该现象与实际生产过程一致，模拟仿真结果基本可靠。现场




(a)井状棚料 (b)黏壁棚料(图中尺寸单位为mm)

**图6 实际矿仓棚料状况**

**Fig. 6 Actual bin bridging condition**




(a)卸料前期 (b)卸料中期 (c)卸料终点

**图7 矿仓静止区形成过程模拟(红色：3 mm、绿色：1 mm、蓝色：0.5 mm)**

**Fig. 7 Simulation of the formation process of the stagnant zone in the silo (Red: 3 mm, Green: 1 mm, Blue: 0.5 mm)**

根据仿真结果，增大卸料口尺寸，棚料状况有所改善。

## 3 结论

1）本文提出的模拟仿真与优化设计相结合的矿仓设计方法，通过建立颗粒流参数化模型，揭示了黏性阻尼系数、静摩擦系数及滚动阻力系数对颗粒堆积行为的影响规律，并将研究结果组建数据库，为陌生物料颗粒的快速建模提供了依据。

2）卸料口尺寸与料拱高度呈反比关系，在卸料口尺寸不变的条件下，颗粒黏结力与临界成拱高度呈反比。综合引入料层表面夹角、料拱高度、料拱维持时间及成拱瞬时应力等多指标评价体系，结合设计经验，可实现对矿仓结构参数的优化确定。

3）以新疆某铜矿为例进行应用验证的模拟结果表明，矿仓半顶角过大易导致物料出现静止区，使卸料流动形态转变为中心流，与现场实际工况吻合。根据仿真结果增大卸料口尺寸后，棚料状况得到明显改善，验证了该方法的可靠性与工程应用价值。

## 参考文献

[1] 蔡同祥，王学文，王淑平，等. 筒仓卸料时超压与变形分析[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(4): 15-19.
CAI T X, WANG X W, WANG S P, et al. Analysis on lateral overpressure and deformation simulation during discharging in silo[J]. China Powder Science and Technology, 2015, 21(4): 15-19.

[2] 吴震，王利强，徐立敏，等. 粉体料仓设计及卸料特性综述[J]. 中国粉体技术, 2023, 29(1): 19-30.
WU Z, WANG L Q, XU L M, et al. Powder silo design and discharge characteristics: a review[J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(1): 19-30.

[3] 欧阳鸿武, 黄誓成, 彭政, 等. 颗粒物质的堵塞行为[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008(5): 260-268.
OUYANG H W, HUANG S C, PENG Z, et al. Jamming of granular matter[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2008(5): 260-268.

[4] 王学文, QIN Y, TIAN Y K, 等. 基于EDEM的煤仓卸料时煤散料流动特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 130-134.

WANG X W, QIN Y, TIAN Y K, et al. Analysis on flow features of bulk coal during coal unloading period based on EDEM[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 130-134.

[5] 杜建斌，任世业．基于DEM-MBD-FEM的振动筛物料冲击性能研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(12): 219-222, 226.
DU J B, REN S Y. Research on material impact properties of vibrating screen based on DEM-MBD-FEM[J]. Modern Mining, 2024, 40(12): 219-222, 226.

[6] 韦熙, 周甲伟, 徐耀杰. 基于DEM模拟的筒仓卸料过程瞬时拱影响因素分析[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(4): 56-66.
WEI X, ZHOU J W, XU Y J. Analysis of influence factors of instantaneous arch during silo discharging process based on DEM simulation[J]. Packaging and Food Machinery, 2024, 42(4): 56-66.

[7] 郭慧珠. 筒仓中物料流动特性研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
GUO H Z. Study on flow characteristics of materials in silos[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.

[8] 杨世明, 刘克瑾, 姚辉江, 等. 粒径对平底筒仓中心卸料的流态及仓壁压力分布的影响[J]. 中国油脂, 2025, 50(7): 145-152.
YANG S M, LIU K J, YAO H J, et al. Influence of particle size on flow pattern and wall pressure distribution of central discharge in flat-bottom silo[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(7): 145-152.

[9] 陈泉．矿仓内颗粒流动力学特征的多尺度测量和研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2021.
CHEN Q. Multiscale measurement and investigation on dynamic characteristics of particle flow in ore bins[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2021.

[10] 刘克瑾，黄硕硕，姚辉江，等．贮料重度对卸料流态及仓壁压力分布的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(15): 44-53.
LIU K J, HUANG S S, YAO H J, et al. Influences of gravity density on discharge flow pattern and pressure distribution along silo walls[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(15): 44-53.

[11] GUTIÉRREZ G D, MONCADA D Z, ZÚÑIGA I, et al. Influence of particle size in silo discharge[J]. The European Physical Journal Conferences, 2017, 140: 03021.

[12] XU C, WANG F L, WANG L P, et al. Inter-orifice distance dependence of flow rate in a quasi-two-dimensional hopper with dual outlets[J]. Powder Technology, 2018, 328: 7-12.

[13] 叶方平，李郁，胡吉全，等．颗粒凝聚力对筒仓装卸过程影响的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(7): 91-96.
YE F P, LI Y, HU J Q, et al. Research of particle cohesion influence on the silo loading and unloading process[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(7): 91-96.

[14] 刘克瑾，姚辉江，袁铮．平底筒仓中心卸料流态演化过程及仓壁压力波动性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 15-24.
LIU K J, YAO H J, YUAN Z. Evolution process of center discharge flow pattern and pressure fluctuation of silo wall in a flat-bottomed silo[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(15): 15-24.

[15] 谭援强，郑军辉，张浩，等．基于离散元法的锥形筒仓中颗粒流体的数学模拟[J]. 过程工程学报, 2015, 15(6): 916-922.
TAN Y Q, ZHENG J H, ZHANG H, et al. Mathematical simulation of granular flow in conical silo based on discrete element method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(6): 916-922.