

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307083

基于修正剑桥模型的堆料质量测量方法研究

李昕民 沈小燕

(中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018)

摘要:针对堆料盘点时工作效率低、结果不准确等问题,研究了一种基于修正剑桥模型的质量测量方法,并通过对小型石英砂堆料进行质量测量实验验证了该方法的可行性。为了提高堆料质量盘点时的工作效率以及测量结果的准确度,基于积分原理,结合修正剑桥模型描述的应力应变关系构建堆料的应力-密度模型,基于薄膜式压力传感器设计密度测量装置,根据储料场中常见堆料的形式设计两种不同的堆料,对两种石英砂堆料分别进行质量测量实验,通过获取堆料不同高度以及径向不同深度处的压力进而得到密度,结合三维激光扫描仪采集到的点云数据得到堆料体积,从而实现堆料质量的测量。实验结果表明,对于质量为92.1 kg和86.1 kg的石英砂堆料,该方法测得结果的相对误差均在4%以下。实验结果证明了该测量方法的可行性,后续可为大型堆料的盘点提供参考,有助于企业进一步进行生产计划安排。

关键词:堆料质量盘点;修正剑桥模型;密度测量;三维激光扫描

中图分类号: TM930

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 410.55

Research on measurement method of pile quality based on modified cam clay model

Li Xinmin Shen Xiaoyan

(College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems such as low efficiency and inaccurate results in powder pile inventory, a quality measurement method based on modified cam clay model is studied, the feasibility of this method is verified by the quality measurement experiment of small quartz sand. In order to improve the efficiency of material quality inventory and the accuracy of measurement results, a stress-density model is constructed based on the integral principle and the stress-strain relationship described by the modified cam clay model, based on the thin-film pressure sensor, a density measuring device is designed, and two different kinds of stacking materials are designed according to the common stacking materials in the storage yard, the density can be obtained by the pressure at different height and radial depth, and the volume can be obtained by the point cloud data of three-dimensional laser scanner. The experimental results show that the relative error of the results obtained by this method is below 4% for quartz sand piles with masses of 92.1 kg and 86.1 kg. The experimental results prove the feasibility of the measurement method, which can provide reference for the inventory of large-scale stack and help enterprises to make further production planning.

Keywords: stock quality inventory; modified cam clay model; density measurement; three-dimensional laser scanning

0 引言

堆料在煤炭行业、建材行业、粮食加工行业、冶金行业等均较为常见,定期盘点库存物料,是企业成本核算和战略采购的重要措施。物体质量可直接称重获得^[1],也可通过基本物理公式“质量=密度×体积”间接获得。对

于长期堆积的物料,对其称重是不现实的,不仅测量不准确还工作效率低,因此常采用体积密度法进行盘点。目前体积测量技术成熟,主要有摄影测量方法^[2-3]、激光和摄影结合测量法^[4-6]以及激光扫描测量法^[7-8]。其中激光扫描测量法具有采集精度高、采集速度快、采集数据全面、非接触性的特点,采集作业时不会受到地理空间和光照等因素影响。目前堆料密度测量常采用模拟法或沉筒

法,模拟法是根据存料的种类、水分等选择具有代表性的存料,将容器内充满堆料后按实际受压情况不同进行不同的加压实验进行密度测定;沉筒法需要选择具有代表性的测点位置,将无底钢桶完全压入堆料使其与表面平齐,而后挖出进行称重求得密度。模拟法所得结果的准确度取决于加压实验接近真实情况的程度,沉筒法将钢桶反复压入堆料时会导致堆料松动,从而使测得结果比实际密度小很多^[9],因此如何使测量结果更接近于密度真值是一个亟待解决的问题。Thompson 等^[10]通过实验测定不同压力和水分条件下的小麦堆密度值并给出了预测密度的经验方程;陈雪等^[11]通过有限元软件 ABAQUS 求解修正剑桥模型,通过有限元仿真计算平房仓内粮堆的密度,测量结果的误差在 0.93%~1.64%,其研究的仿真模型为平房仓近似的长方体,但实际中的堆料形状并不能一直保持为长方体,该方法在实际应用时存在一定的限制;张新新^[12]利用电磁波的折射与反射原理测定粮堆的介电常数,根据介电常数与密度的关系模型求解粮堆密度分布,但电磁波在粮堆深处易被干扰,难以准确测量;此外,还可利用伽马射线测量堆料密度,根据衰减程度不同得到堆料密度分布,该方法可现场测量,但放射性元素对操作人员有害^[13];Ai 等^[14]通过有限元方法研究了圆锥沙堆的应力分布,为圆锥沙堆压力与密度之间的关系的研究奠定了基础。

目前体积计量技术日趋成熟,但如何获得更接近真值的密度一直以来是个难点,该问题制约着企业的精细化管理。针对上述问题,本文基于修正剑桥模型建立压力-密度公式,基于压阻式传感器设计密度测量装置,通过测量堆料不同高度以及径向不同深度处的压力进而得到密度,结合三维激光扫描仪采集到的点云数据,对石英砂堆积成的小型圆锥堆料进行质量测量以验证该方法的可行性。

1 质量测量原理

1.1 基本原理

堆料堆积时通常为“点源式”堆积,形成的堆料多成圆锥体。其内部压力分布不均匀,压力大的地方密度较大,压力小的地方密度较小,因此通过测量堆料内部不同高度和径向不同深度的点的压力得到密度,通过积分得到质量。质量测量原理如图 1 所示。假设圆锥体堆料的半径为 R ,高度为 H ,堆料不同位置的密度为 $\rho(r, h)$ ($r \in (0, R), h \in (0, H)$),取多个测点 n_1, n_2, n_3, n_4 测量其密度,以底面圆心 O 为原点,以底面圆互相垂直的两条半径作为 x, y 轴,以垂直底面圆的一条直线作为 z 轴建立直角坐标系。将圆锥堆料看作无数个微元,每个微元可近似看作一个圆柱体,以高 $h \in (h, h + \Delta h)$,半径

$r \in (r, r + \Delta r)$ 的环状区域为例,该区域的体积可表示为:

$$\Delta V = A \Delta h \tag{1}$$

其中, A 为环状区域底面积,即:

$$A = \pi[r^2 - (r + \Delta r)^2] \tag{2}$$

每个小圆柱体的体积可表示为:

$$\Delta V = \pi[r^2 - (r + \Delta r)^2] \Delta h \tag{3}$$

那么每个小圆柱体的质量为:

$$\Delta m = \rho(r, h) \Delta V = \rho(r, h) \pi[r^2 - (r + \Delta r)^2] \Delta h \tag{4}$$

则堆料质量为:

$$m = \iint \rho(r, h) \pi[r^2 - (r + \Delta r)^2] dA = \iint \rho(r, h) \pi[r^2 - (r + \Delta r)^2] r dr dh \tag{5}$$

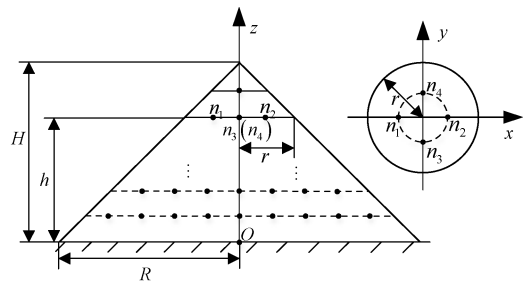


图 1 质量测量原理

Fig. 1 Principle of mass measurement

该方法中的关键在于求解密度函数。由于堆料内压力不同的位置密度不同,为了探究堆料的密度分布情况,首先要选择合适的应力-应变本构方程。而修正剑桥模型是一个描述应力-应变关系的本构模型,且该模型参数易于测定,考虑了弹性阶段和塑性阶段的体积变化,因此基于修正剑桥模型构建密度与压力的关系公式。

1.2 压力—密度模型

修正剑桥模型(modified cam clay model, MCC)是一个用弹塑性增量理论描述应力-应变关系的弹塑性本构模型^[15-16],受到外界力的作用时,物体产生的应变增量包括体积应变增量和剪切应变增量,而总体积应变增量等于弹性体积应变增量 $d\varepsilon_v^e$ 和塑性体积应变增量 $d\varepsilon_v^p$ 的和^[17]:

$$\begin{cases} d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p \\ d\varepsilon_v^e = \frac{3(1-2\nu)}{E} dp \\ d\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\frac{M^2 - \eta^2}{M^2 + \eta^2} \frac{dp}{p} + \frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} \frac{dq}{p} \right] \end{cases} \tag{6}$$

式中: ν 为泊松比; E 为弹性模量,单位为 kPa。 λ 为对数硬化模量; κ 为等向膨胀系数; e_0 为初始孔隙比; $\eta = q/p$, 广义剪切力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$, 平均主应力 $p = (\sigma_1 + \sigma_2 +$

$\sigma_3)/3 = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, σ_1 为轴压, $\sigma_2 = \sigma_3$ 为围压; M 为临界状态应力比。

堆料堆积时产生的应变以体积应变为主, 对式(6)进行积分, 可得堆料的体积应变为:

$$\varepsilon_v = \frac{3(1 - 2\nu)}{E} p + \ln p^{\frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0}} + C \quad (7)$$

式中: C 为常数, 根据所测材料的应力应变曲线确定。

体积应变指物体在外力作用下体积变化的大小 ΔV 与原来体积 V_0 之比, 则堆料的密度为质量 m_0 与体积 V 之比:

$$\rho = \frac{m_0}{V} = \frac{m_0}{V_0 - \Delta V} = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon_v} \quad (8)$$

将式(3)代入式(4)可得:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \left[\frac{3(1 - 2\nu)}{E} p + \ln p^{\frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0}} + C \right]} \quad (9)$$

式中: ρ_0 为表层密度, 单位为 kg/m^3 ; p 为测点在 x, y, z 这 3 个方向所受压力平均值, 单位为 kPa 。由式(9)可知, 需要确定的参数包括表层密度 ρ_0 、泊松比 ν 、弹性模量 E 、对数硬化模量 λ 、等向膨胀指数 κ 、初始孔隙比 e_0 以及常数 C 。

2 测量实验

2.1 堆料的形成以及参数确定

堆料进入储料场后或每次存货盘点前通常需要人工对堆料进行整形, 将其整成相对规则的三棱锥体, 整形过程费时费力, 为了提高盘点效率, 减少人力资源的消耗, 本文针对图 2 中未整形的单个圆锥体堆料和相邻两个圆锥体堆料进行研究。

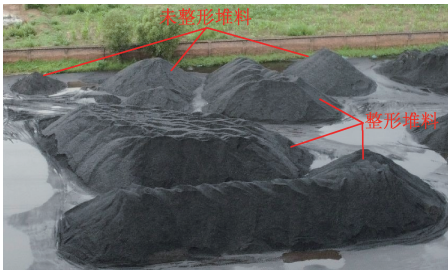


图 2 储料场中堆料

Fig. 2 Stacking materials in the storage yard

本次室内模拟实验采用 50~100 目石英砂, 石英砂经过距地面 70 cm 的漏斗缓慢下落, 最终形成图 3(a) 所示的高 32 cm, 底面直径为 90 cm 的近似圆锥形堆料(1)。石英砂经过距地面 70 cm 的漏斗缓慢下落, 先堆积成图 3(b) 所示的左侧为高 23 cm, 底部直径约 74 cm 的堆料,

一段时间后将装置向左平移 45 cm 再进行堆积, 堆积成高 21 cm, 底部直径约 65 cm 的堆料, 最终形成堆料(2)。



(a) 堆料(1) (a) Sandpile(1)
(b) 堆料(2) (b) Sandpile(2)

图 3 堆料实际堆积情况示意

Fig. 3 Schematic diagram of actual stacking of materials

针对图 3 的堆料确定式(9)的各个参数。

1) 石英砂的表层密度 ρ_0 。用天平分别测量空量杯质量 m_1 和装满样品后的量杯(装满之后用直尺刮平表面)质量 m_2 , 按照公式 $\rho_0 = (m_2 - m_1)/V$ 计算, 取 3 次测量的平均值作为最终测量结果, 即 ρ_0 为 $1\,356.05\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

2) 石英砂的初始孔隙比 e_0 。取清水缓慢倒入装满样品的量杯中至水满(水的密度取 $1\text{ g}/\text{cm}^3$), 用天平称量此时的质量 m_3 , 按照公式 $e_0 = \frac{V_{\text{孔}}}{V - V_{\text{孔}}} =$

$\frac{(m_3 - m_2)/\rho_{\text{水}}}{V - (m_3 - m_2)/\rho_{\text{水}}}$ 计算, 取 3 次测量结果的平均值作为最终测量结果, 即 e_0 为 0.91。

3) 修正剑桥桥模型参数泊松比 ν 、弹性模量 E 、对数硬化模量 λ 、等向膨胀指数 κ 以及常数 C 。文献[18]针对石英砂做了室内三轴实验, 因此泊松比 ν 以及常数 C 的确定参考文献[18]中的实验结果, 对数硬化模量 λ 、等向膨胀指数 κ 引用文献[19]中所测参数, 石英砂的弹性模量 E 参考松砂的弹性模量。公式中所涉及到的各参数值如表 1 所示。

表 1 公式参数值

Table 1 The value of the formula parameter

参数	参数值
对数硬化模量 λ	0.2
等向膨胀指数 κ	0.02
初始孔隙比 e_0	0.91
泊松比 ν	0.2
弹性模量 E/kPa	1.8×10^4
表层密度 $\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 356.05
常数 C	0.046

将各个参数代入式(9), 则密度-压力公式为:

$$\rho = \frac{1\,356.05}{1 - (0.000\,1p + \ln p^{0.094} + 0.046)} \quad (10)$$

2.2 密度测量

为了确定堆料内部压力, 本文根据压力-密度公式设计密度测量装置, 该装置主要由单片机 MSP430F149、压力测量模块、温湿度测量模块以及软件模块组成。密度

测量装置基本结构如图4所示。料堆密度检测规程要求,每个料堆必须在其内部上、中、下取样测定密度求平均值。为了尽量减少传感器对堆料内部的扰动,选用薄膜式压力传感器RXD1016测量堆料内部压力,用双面胶将薄膜式压力传感器粘贴在不锈钢杆件上,压力传感器粘贴在探测杆上之后并不能完全传递实际受力情况,将不同质量的金属块分别置于粘贴前的压力传感器在与粘贴后的压力传感器上,可得到粘贴后的显示值约为实际值的70%~80%,因此在实际计算时按照比例系数0.75进行补偿。不同温湿度对应不同的修正剑桥模型参数,通过温湿度传感器SHT30采集堆料内部温湿度来调用对应的修正剑桥模型参数。

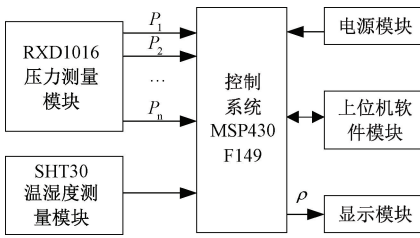


图4 密度测量装置基本结构

Fig. 4 Basic structure of density measuring device

为了避免实验过程中石英砂颗粒进入缝隙中影响传感器测量结果,选用的杆件边长等于传感器直径16 mm,并对传感器整体均进行贴装。测头实物如图5所示。

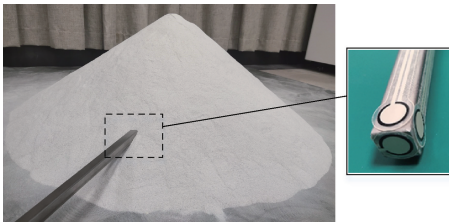
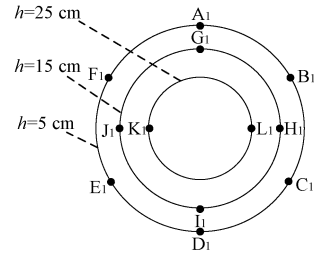


图5 密度测量装置测头实物

Fig. 5 Measuring head of density measuring device

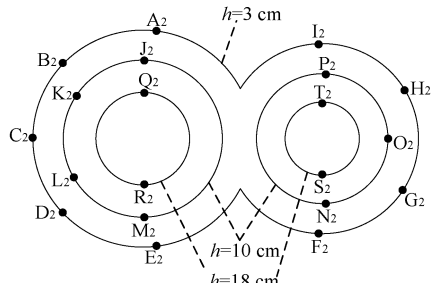
将堆料在高度方向上分层,测量每层的中间位置;将堆料在径向上分段,测量每段的中间位置,将各部分近似看作空心圆柱体。本实验中的堆料形状较规则,其压力呈对称分布,因此将各测点在同一径向深度的密度平均值作为该半径处的堆料密度。实验时将堆料分为上、中、下3个部分,用探测杆测量堆料(1)5、15、25 cm高度处的密度,为尽量减小探测杆伸入堆料对其内部应力变化的影响,从上往下依次对3个部分环绕式取点测量。下层均匀取6个测点,每个测点分别使探测杆伸入12、22、32 cm,测量每个测点在不同深度时的密度;中层均匀取4个测点,每个测点分别使探测杆伸入8、18 cm,测量每个测点在不同深度时的密度;上层均匀取2个测点,每个测

点测量4 cm深处的密度;共12个测点。测点选取的整体示意图如图6(a)所示。用探测杆测量堆料(2)3、10、18 cm高度处的密度,左侧堆料下层取5个测点,每个测点分别使探测杆伸入5、15、25 cm,中层取4个测点,每个测点分别使探测杆伸入3、10、17 cm,上层取2个测点,每个测点测量4 cm深处的密度,共11个测点;右侧堆料下层取4个测点,每个测点分别使探测杆伸入5、14、23 cm,中层取3个测点,每个测点分别使探测杆伸入4、13 cm,上层取2个测点,每个测点测量3 cm深处的密度,共9个测点;接触部分在高度为3 cm处测量,两侧均测量6 cm和16 cm深度处的密度。测点选取的整体示意图如图6(b)所示。



(a) 堆料(1)测点选取示意图

(a) Schematic diagram for selecting measurement points for sandpile (1)



(b) 堆料(2)测点选取示意图

(b) Schematic diagram for selecting measurement points for sandpile (2)

图6 测点选取示意图

Fig. 6 Survey point selection schematic

2.3 体积测量

采用三维激光扫描仪 Lecia HDS7000 对沙堆进行扫描,如图7所示。



图7 体积测量过程

Fig. 7 Volume measurement process

通过配套软件 Lecia Cyclone 的“Mesh”以及“Reference Plane”功能对采集到的点云数据进行体积测量。首先对采集到的点云数据预处理(点云去噪、点云统一等),其次对点云数据进行 Mesh 创建(Tools-Mesh>Create Mesh-Tin Meshing),最后调出参考面,设置参考面的位置,选中 Mesh,计算得到体积结果(Tools-Measure-Mesh Volume),沙堆点云数据如图 8 所示。

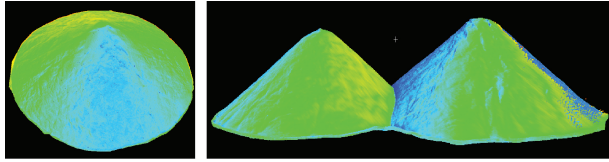


图 8 堆料点云数据

Fig. 8 Sandpile point cloud data

3 实验结果分析

点源式堆积形成的沙堆会出现应力拱效应,最大密度并非出现在底部中心点,底部中心点出现应力凹陷现象。由于堆料内部密度分布并不均匀,因此盘点时直接以部分代替整体的方式并不准确,根据本文的质量测量原理,通过纵向分层,径向分段的方式测得各部分堆料密度,结合三维激光扫描仪测得的体积结果,对小型堆料进行三次重复试验。结果如表 2 所示。

表 2 质量测量结果

Table 2 Quality measurement results

堆料 编号	体积/ m ³	实际质量/ kg	ρ_0 计算质 量/kg	相对误差	模型计算 质量/kg	相对 误差
堆料 (1)	0.0673	92.1	91.26	0.9%	89.36	3.0%
	0.0667	91.5	90.45	1.2%	88.56	3.2%
	0.0661	91.3	89.63	1.8%	88.04	3.6%
堆料 (2)	0.0659	86.1	89.36	3.8%	83.20	3.4%
	0.0655	85.8	88.82	3.5%	83.06	3.2%
	0.0654	85.5	88.69	3.7%	82.64	3.3%

由实验结果可知,对于质量约为 90 kg 的单个圆锥堆料,直接由表层密度计算质量得到的相对误差小于模型测得的质量的相对误差,而对于质量约为 86 kg 的相互接触的堆料,采用模型计算质量得到的结果更加准确。研究显示,分别采用平均密度法和构建密度模型法盘点矿产资源时,平均密度法比密度模型法得到的结果低 3% 左右,在盘点大型堆料时偏差会更加明显^[20]。而实际储料场中堆料大多类似于堆料(2),相邻堆料互相接触且堆料场中存料体积较大,因此实际应用中采用平均密度计算是不准确的。由模型计算质量产生相对误差的原因可能是在杆件伸入堆料时会向内部推动石英砂,导致密度测量结果偏大。传统盘点时需要将堆料进行整形,将堆

料尽量修成平顶或斜平顶式的堆料以便于测量,本方法直接对点源式堆积形成的堆料进行研究,实验结果表明可行性较高,可省去堆料整形的过程,相较于传统测量方法大大降低了时间成本和人力成本,为企业成本核算以及后续生产计划安排提供数据支撑。

4 结 论

对堆积物料进行科学、快速、准确的盘点是企业发展的必然之路,提高盘点的准确程度,有助于企业进行生产管理与成本核算,提升企业管理水平。本文基于修正剑桥模型所描述的应力-应变关系推导出压力-密度模型,根据推导出的公式设计密度测量装置并对石英砂堆料进行模拟实验,通过获取堆料不同高度以及径向不同深度处的压力进而得到密度,结合三维激光扫描仪采集到的点云数据,实现堆料质量的测量,该方法测得的质量结果的相对误差约为 3%~4%,说明本方案的可行性较高,可为后续的现场盘点工作提供参考。在实际应用中,大型堆料与小型堆料存在一定的差异,因此需要实际实验时对该方法进行优化调整,比如被测材料与温湿度不同时可采用不同的修正剑桥模型参数、堆积情况不同的堆料选点时可参考堆料受力仿真结果等,后续可针对该方法在大型堆料上的应用进行研究。

参考文献

- [1] 郭军. 固体散状物料贸易结算用计量器具选型方案探讨[J]. 中国计量, 2020(11): 123-125.
GUO J. Discussion on the selection scheme of measuring instruments for trade settlement of solid bulk materials[J]. China Metrology, 2020(11): 123-125.
- [2] 杨春雨, 顾振, 张鑫, 等. 基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 164-174.
YANG CH Y, GU ZH, ZHANG X, et al. Binocular vision measurement of coal flow of belt conveyors based on deep learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 164-174.
- [3] ROBERTS L. Machine perception of three-dimensional solids[J]. Optical and Electro-optical Information Processing, 1965: 159-197.
- [4] 刘辉, 张春波, 卢进南, 等. 基于激光三角法的煤矸石装载体积测量方法[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 630-635.
LIU H, ZHANG CH B, LU J N, et al. Coal gangue loading volume measurement method based on laser triangulation[J]. Laser Technology, 2021, 45(5): 630-635.
- [5] 贺杰, 王桂梅, 刘杰辉, 等. 基于图像处理的皮带机上

- 煤量体积计量[J]. 计量学报, 2020, 41(12): 1516-1520.
- HE J, WANG G M, LIU J H, et al. Volume measurement of coal volume on belt conveyor based on image processing[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(12): 1516-1520.
- [6] LERMA J L, NAVARRO S, CABRELLES M, et al. Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic cave of Parpallo as a case study[J]. Journal of Archaeological Science, 2010, 37(3): 499-507.
- [7] 郝华东, 李存军, 刘瑛, 等. 基于激光扫描的立式金属罐容量计量方法[J]. 计量学报, 2018, 39(2): 222-227.
- HAO H D, LI C J, LIU Y, et al. Volume measurement method of vertical metal tank based on laser scanning[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(2): 222-227.
- [8] 谢小芳, 万勇, 严可馨, 等. 地下洞库三维激光扫描云区域分割和容积计算[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 80-86.
- XIE X F, WAN Y, YAN K X, et al. Regional segmentation and volume calculation of 3D laser scanning point cloud in underground caverns [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 80-86.
- [9] 向学军. 火电厂储煤场盘点初探[J]. 新型工业化, 2020, 10(8): 56-58.
- XIANG X J. Preliminary exploration on inventory of coal storage yard in thermal power plants[J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(8): 56-58.
- [10] THOMPSON S A, ROSS I J. Compressibility and frictional coefficients of wheat [J]. Transactions of ASAE, 1983, 26(4): 1171-1176.
- [11] 陈雪, 程绪铎, 胡美珠. 基于有限元方法的平房仓中小麦堆的密度分布研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 108-113.
- CHEN X, CHENG X D, HU M ZH. Density distribution of wheat pile in a flat warehouse on finite element method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(6): 108-113.
- [12] 张新新. 粮仓储粮水平衡条件下的密度分布电磁波检测方法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
- ZHANG X X. A study on electromagnetic wave detection for density distribution of grain pile under water balance[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015.
- [13] 武兴隆, 石宗户. 地质勘查放射性测量方法的应用探析[J]. 中国高新技术企业, 2016(23): 151-152.
- WU X L, SHI Z H. Application analysis of radioactive measurement methods in geological exploration [J]. China High-Tech Enterprises, 2016(23): 151-152.
- [14] AI J, CHEN J F, OOI J Y. Finite element simulation of the pressure dip in sandpiles[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(6): 981-995.
- [15] 罗汀, 姚仰平, 侯伟. 土的本构关系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- LUO T, YAO Y P, HOU W. Soil Constitutive Models[M]. Beijing: China Communication Press, 2010.
- [16] ROSCOE K H, BURLAND J B. On the Generalized Stress Strain Behavior of Wet Clay [M]. Cambridge University Press, 1986: 535-609.
- [17] TRIPODI M A, PURI V M, MANBECK H B, et al. Triaxial testing of dry, cohesive powder and its application to a modified Cam-clay constitutive model [J]. Powder Technol, 1994, 80(1): 35-43.
- [18] 田思磊. 石英砂颗粒体材料泊松比特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- TIAN S L. Study on the poisson's ratio of quartz sand[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [19] 吕阳. 基于三轴试验的 ABAQUS 修正剑桥模型参数分析[J]. 土工基础, 2016, 30(6): 651-657.
- LYU Y. Modified cam clay model parameters in ABAQUS from triaxial tests [J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(6): 651-657.
- [20] CELSO R, CARLOS A, ADILSON C, et al. Impact of bulk density estimation in mine planning [J]. Mining Technology, 2021, 130(1): 60-65.

作者简介



李昕民, 2021 年于山东理工大学获得学士学位, 现为中国计量大学在读研究生, 主要研究方向为仪器仪表工程。

E-mail: LXM00679@163.com

Li Xinmin received her B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2021. Now she is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. Her main research interest is Instrumentation Engineering.



沈小燕(通信作者), 2005 年于河北工业大学获得学士学位, 2010 年于天津大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为光学检测、精密测试技术。

E-mail: xyshen@cjlu.edu.cn

Shen Xiaoyan (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2005 and Ph. D. degree from Tianjin University in 2010. Now she is a professor in China Jiliang University. Her main research interests include optical detection and precision testing technology.