

散体物料孔隙率测定装置设计与试验^{*}

李长友 方壮东 麦智炜

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为了提高散体物料孔隙率检测精度及可靠性,基于理想气体状态方程,按照气体置换法,研制了一种定容型散体物料孔隙率的快速测定装置,开发了自动检测控制系统。在设定的 0.1~0.4 MPa 测量范围内,采用可精确测得其体积且形态各异的标准不锈钢球体、塑料四棱柱体、鹅卵石以及细石子的试验结果发现,系统的充气压力越高,测量误差相对越小且重复性越好。采用标准不锈钢球体与圆柱体,在孔隙率分别为 16.02%、25.14%、35.57%、49.05%、58.42%、67.79%、76.57%、85.36%、94.14% 的标准条件下,给出了补偿系数的计算式。在样品填充率分别为 25%、50%、75%、100%,充气上限压力为 0.4 MPa 的试验条件下,检测湿基含水率为 13.5% 的稻谷的试验结果显示,测量误差极差为 0.3%,证实了测量结果的可靠性。

关键词: 散体物料 孔隙率 测定装置 设计 试验

中图分类号: TS210.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0200-07

引言

孔隙率是物料在充填、输运、仓储、干燥等过程中的基本物理特征参数之一,也是工程设计、装备工艺评价及产品分析中不可缺少的最基本的原始数据和重要的工程参数^[1-4]。散体物料种类繁多、物质组态差异极大,尤其是非均匀散体农业物料。在粮食干燥机设计及其产品分析中若用统一的形状和尺寸等基本物理参数得到的物料流变特性、运动特征、动力学特性以及热质传递特性,来解析粮食在干燥机内的架桥现象、仓储效应时往往与实际情况存在较大的差异^[5-8]。用不同测定方法和表示方法所得数值可比性较差。如物料的干燥过程以及受到外部载荷作用时,自身的组态发生变化,孔隙率也随之改变,进而影响其流动特征、力学特性及热质传递过程^[9-12]。快速可靠地测量散体物料在不同工况下的孔隙率,是目前物性测量领域研究较为薄弱的环节之一。

测定物料孔隙率的方法有液体置换法和气体置换法。液体置换法是利用不与物料发生化学反应的液体如水、水银、二甲苯、水-乙醇混合物等来置换物料自身或堆积形成的空隙,通过测定物料的真实密度间接计算出孔隙率^[13-14]。对有较强吸湿性的散体物料,液体置换法存在吸收置换液的潜在可能;同

时,一些颗粒有着粗糙带毛的外表面、不规则的孔隙和褶皱,在常压下会因液体较大的表面张力而无法完全充满整个孔隙,造成测量偏差较大,应用面较窄^[15-17]。气体置换法是基于理想气体状态方程,检测孔隙率的有效方法之一,其测定装置主要有定容型^[18-20]、变容型^[21]和比较型^[22]。现行测量方法需要多次改变测量工况参数,来换算物料的实际体积,精度较高的测量范围为物料真实体积占样品容器容积的 40%~70%。在测定不同散体物料时需要更换不同容积的样品容器。传感器误差、零部件加工误差、气体泄漏以及物料填充率等都会影响气体置换法的测量精度与可靠性^[23]。为消除测定过程变工况参数与物料填充率对测定结果的影响,提高测量精度及可靠性,拓展测量范围,本文基于理想气体状态方程测试原理^[24],设计一种一次加压恒定条件下,得到散体物料孔隙率的定容型测定装置,实现测定过程的自动控制与数据自动采集。针对不同测定工况,利用不同形态的散体物料考证其测量精度。在恒定条件下利用表面致密的高精度钢球对测定装置进行校准,消除填充率对测量精度的影响,并通过稻谷试验证实其检测精度与可靠性。

1 测定装置工作原理和总体设计

1.1 工作原理

孔隙率测定装置工作原理如图 1 所示,容器 A

收稿日期: 2014-05-15 修回日期: 2014-07-02

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31371871)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114404110021)和广东省产学研资助项目(2012B091000135)

作者简介: 李长友,教授,博士生导师,主要从事农业装备技术研究,E-mail: lichyx@scau.edu.cn

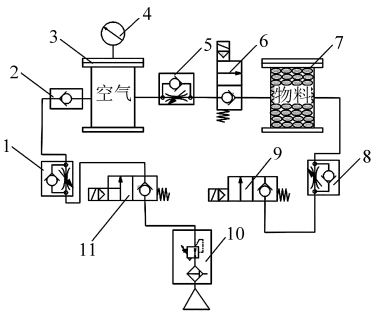


图 1 孔隙率测定装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of porosity measuring device
1. 节流调速阀 2. 单向阀 3. 容器 A 4. 压力表 5. 节流调速
阀 6,9,11. 电磁阀 7. 容器 B 8. 节流调速阀 10. 空气压缩机

与容器 B 为容积相等的刚性容器,容积为 V 。测量时,容器 B 充填待测物料,开启电磁阀 9,使容器 B 与大气相通。系统开启电磁阀 11 后,自动关闭电磁阀 6,控制压气机对容器 A 充气,压力数据由气压传感器实时传输到处理器。达到设定压力上限后,关闭电磁阀 11,等待容器 A 气压稳定,采集表压并记为 p_1 ,然后,系统自动关闭电磁阀 9,开启电磁阀 6,联通容器 A 和容器 B,待压力容器压力平衡后,采集表压并记为 p_2 ,由理想气体状态方程得到孔隙率,即

$$(p_1 + p)(V + V_1) = M_1RT \tag{1}$$

$$p_a(V_k + V_2) = M_2RT \tag{2}$$

$$(p_2 + p_a)(V + V_k + V_1 + V_2) = MRT \tag{3}$$

$$M = M_1 + M_2 \tag{4}$$

联立式(1)~(4)可得

$$\frac{V_k + V_2}{V + V_1} = \frac{p_1 - p_2}{p_2}$$

设 $\varepsilon = \frac{p_1 - p_2}{p_2}$,则有

$$\frac{V_k}{V} = \varepsilon + \frac{\varepsilon V_1 - V_2}{V} \tag{5}$$

式中 V ——容器 A 内空气体积, cm^3
 V_k ——容器 B 内空气体积, cm^3
 M_1 ——容器 A (含连接管道)内空气的质量, g
 M_2 ——容器 B (含连接管道)内空气的质量, g
 V_1 ——容器 A 连接管道内气体的体积, cm^3
 V_2 ——容器 B 连接管道内气体的体积, cm^3
 M ——容器 A 和容器 B 及其连接管道内的气体质量的总和, g
 T ——空气热力学温度, K
 R ——空气气体常数,为 $287.1 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 p_a ——当时当地大气压, Pa
 ε ——孔隙率

在式(5)中,连接管道容积 V_1 、 V_2 很小,不足容器容积 V 的万分之一,同时,把连接管道 V_2 的容积

设计为近似于 εV_1 ,这样,式(5)简化为

$$\frac{V_k}{V} = \varepsilon = \frac{p_1 - p_2}{p_2} \tag{6}$$

1.2 测定系统设计

容器 A 与容器 B 的加工精度、气密性以及人为读数操作引入的误差等皆会影响测量精度。本装置通过结构上的承压密封设计与电控系统来确保装置密封性和杜绝人为操作引入的误差。

1.2.1 测定装置结构设计

为使测定装置能消除管道引入误差和有足够的充气上限压力,容器容积设计应远大于管道容积并在承受 1 MPa 气压下不发生变形,容器结构如图 2 所示,设计参数如表 1 所示。筒体环向应力

$$\sigma = \frac{pD}{2\delta} < \frac{[\sigma]}{n}$$

式中 σ ——筒体环向应力, MPa
 $[\sigma]$ ——304 不锈钢许用应力, $[\sigma] = 620 \text{ MPa}$
 p ——压力容器工作压力, MPa
 D ——容器外径, mm
 δ ——容器壁厚, mm n ——安全系数

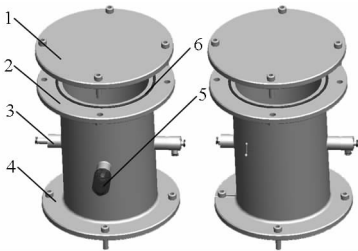


图 2 压力容器结构图

Fig.2 Construction diagram of pressure vessel
1. 端盖 2. 上法兰 3. 气动接头 4. 下法兰 5. 压力传感器
6. O 型密封圈

表 1 设计参数
Tab.1 Design parameters

参数	数值
容器材质	304 不锈钢
容器外径/mm	134
容器内径/mm	124
容腔高度/mm	200
容器壁厚/mm	5
O 型圈内径 × 线径/mm × mm	140 × 3.5
O 型圈沟槽宽度/mm	4
O 型圈沟槽深度/mm	2
O 型圈压缩率/%	28

由设计要求可知最大工作压力 $p = 1 \text{ MPa}$,外径 $D = 134 \text{ mm}$,安全系数选 $n = 8$,壁厚 $\delta = 5 \text{ mm}$,计算得 $\sigma = \frac{pD}{2\delta} = 13.4 < \frac{[\sigma]}{n} = 77.5$,环向应力小于许用应力,满足强度要求。

容器内外壁面光滑,上下端面设计有固定法兰,

下法兰固定在支架上,上法兰与端盖连接。上法兰端面设计了 O 型密封沟槽,密封圈压缩率为 28%。气动接头设计在容器中部。

1.2.2 电控系统设计

电控系统由上位机、A/D 模数转换模块、压力传感器、电磁阀和电源模块等组成,如图 3 所示。

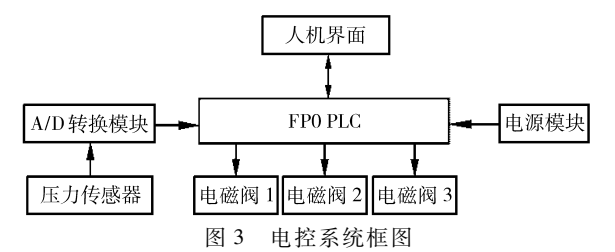


图 3 Diagram of electric control system

PLC 通过模数转换模块将压力传感器信号传输给上位机,组态软件通过多次查询压力数值,从而判定容器压力是否达到所设置的上限值或平衡值。依据设定的测定程序,由组态软件向下位机 PLC 发出指令,控制电磁阀开关,自动控制测定过程。开发的上位机运行的人机交互界面,如图 4 所示。

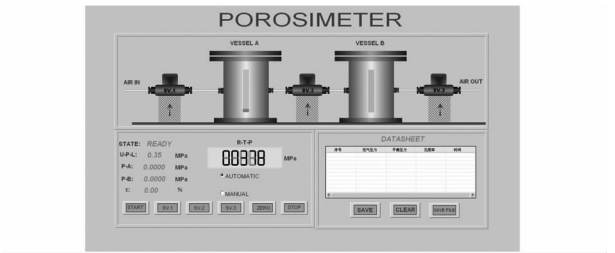


图 4 人机交互界面

Fig. 4 Human-computer interaction interface

人机交互界面分为装置动态反馈、参数设定与显示以及数据保存。实时反馈装置在动态加载、卸载过程及平衡状态下的状态参数测量值并输出显示各电磁阀开闭状态与气流流动情况。系统的输入量为容器充气上限压力,控制量是充气压力,检测量为压力,输出量是实时的压力、装置的各阀门的开闭状态及孔隙率。控制系统的控制器本身是一套完整的独立控制单元,同时又是一个基本的数据采集节点,实现数据的自动存储。测定时,在人机界面上点击开始按钮,装置便自动运行直至获得孔隙率。具体设计参数与主要元件如表 2 所示。

2 测定装置试验与结果分析

2.1 正交试验

2.1.1 试验材料与设备

试验材料利用可精确测得其体积且形态各异的标准不锈钢球体、塑料四棱柱体、鹅卵石以及细石子。将鹅卵石和细石子在干燥箱内干燥,去除挥发

物。通过计算和排水法分别测得各试验样品体积,并根据压力容器容积设定试验样品孔隙率如表 3 所示。试验测定装置实物如图 5 所示。

表 2 元件型号与工作参数

Tab. 2 Type and operating parameter of components		
元件	型号	工作参数
空气压缩机	OTS-550	0~0.7 MPa
压力传感器	SMC PSE560-02	0~1 MPa
两位两通电磁阀	SMC AS2201F	0~0.6 MPa
节流调速阀	SMC KH06A-01S	0~1 MPa
过滤减压阀	SMC AW20-02BG	0~1 MPa
管道	SMC 外径 4mm	0~1 MPa
PLC	松下 FP0	24 V
A/D 转换模块	松下 AFP0480	0~5 V
人机界面	力控 Force Control	

表 3 试验样品孔隙率

Tab. 3 Porosity of test samples		%			
散体物料	尺寸/mm	孔隙率水平			
		1	2	3	4
不锈钢球体	30	50.20	64.86	80.09	94.73
四棱柱	29×23×37	51.94	65.52	80.10	94.78
鹅卵石	25~40	50.99	66.08	80.48	95.05
石子	5~10	50.34	66.87	81.45	95.02

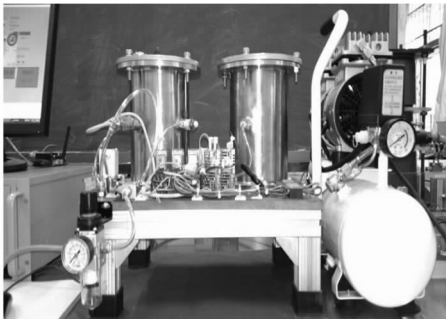


图 5 孔隙率测定装置

Fig. 5 Porosity measuring device

2.1.2 试验方法

影响孔隙率测定装置测量精度的因素除传感器误差和系统误差外,待测物料组态、充气压力、容器之间的节流减速阀开度等都可能给测量系统带来误差。不同孔隙率与充气压力会影响到最终平衡压力,产生系统误差;不同节流阀开度则会改变充气过程的气流速度与充气时间,致使容器之间存在压降;不同的物料状态导致测量过程中物料表面特征改变,致密光滑或粗糙多孔都可能使充气过程存在差异。为考证这些因素的影响,采用测量误差 Δ 与测量重复性 S² 指标来衡量测定装置性能的主要评价指标。

(1) 测量误差

$$\Delta = x - L$$

式中 x——测量值,%

L ——理论计算值, %

(2)测量重复性

通过在同一试验条件下重复测量, 获得一组数据, 方差反映了该组数据的分散程度即可衡量测量重复性, 方差越大重复性越差。方差为

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

式中 x_i ——测量数据 $\bar{x}$ ——均值

为了探明影响测量性能的主次因素, 根据孔隙率测定装置的评价指标, 选择待测物料孔隙率、待测物形态、连通容器的调速节流阀开度以及充气压力进行 4 因素 4 水平正交试验。试验因素水平如表 4 所示。

表 4 试验因素与水平

Tab.4 Experimental factors and levels

水平	因素			
	孔隙率/ %	物料形态	节流阀 开度/%	充气压力/ MPa
1	50	球体	25	0.1
2	65	四棱柱	50	0.2
3	80	鹅卵石	75	0.3
4	95	石子	100	0.4

2.1.3 试验结果

选用正交试验设计表 $L_{16}(4^5)$, 留一空列作为估算试验误差, 测量误差为在同等试验条件重复 10 次后误差均值, 重复性为该组数据方差。正交试验结果见表 5。

表 5 正交试验结果

Tab.5 Results of orthogonal experiment

试验 序号	孔隙 率/ %	物料 形态	节流阀 开度/ %	充气 压力/ MPa	空列	试验指标	
						测量误差	重复性
1	50	球体	25	0.1	1	1.127 1	0.240 3
2	80	鹅卵石	25	0.3	3	0.187 9	0.059 8
3	95	石子	25	0.4	4	-0.423 6	0.001 8
4	65	四棱柱	25	0.2	2	0.919 6	0.086 2
5	65	石子	75	0.1	3	1.351 7	0.136 3
6	95	鹅卵石	50	0.1	2	-0.324 6	0.284 4
7	80	四棱柱	100	0.1	4	0.623 2	0.514 8
8	50	石子	100	0.3	2	1.159 6	0.032 8
9	95	球体	100	0.2	3	-0.572 0	0.049 4
10	50	鹅卵石	75	0.2	4	1.142 4	0.047 1
11	65	鹅卵石	100	0.4	1	0.893 2	0.022 8
12	65	球体	50	0.3	4	0.480 2	0.028 1
13	80	球体	75	0.4	2	0.200 6	0.013 2
14	80	石子	50	0.2	1	0.801 8	0.085 9
15	95	四棱柱	75	0.3	1	-0.388 2	0.037 9
16	50	四棱柱	50	0.4	3	1.459 5	0.031 8

2.1.4 试验结果方差分析

对表 5 方差分析的结果如表 6 所示。

表 6 方差分析结果

Tab.6 Result of variance analysis

项目	测量误差				测量重复性			
	孔隙 率	物料 形态	节流阀 开度	充气 压力	孔隙 率	物料 形态	节流阀 开度	充气 压力
自由度	3	3	3	3	3	3	3	3
F 值	81.813 5	5.493 0	0.702 3	0.038 1	1.817 1	1.911 1	1.480 4	46.205 0
Sig. 值	0.002 0	0.098 0	0.611 0	0.193 0	0.318 0	0.304 0	0.378 0	0.025 0
显著性	显著	—	—	—	—	—	—	显著

从表 6 看出, 影响测定装置测量误差和重复性的主要因素分别为待测物料孔隙率和充气压力。假设容器 A 与容器 B 之间的误差为 e_v , 则有

$$V_A = V_B + e_v \tag{7}$$

由式(6)知, 参与计算的 V 为容器 A 的容积, 而实际孔隙率为

$$\varepsilon_{\text{true}} = \frac{V_k}{V_B} \tag{8}$$

测量误差

$$\Delta = \varepsilon - \varepsilon_{\text{true}} = \frac{V_k}{V_A} - \frac{V_k}{V_B} + e \tag{9}$$

由式(6)~(9)可得

$$\Delta = \varepsilon \left(1 - \frac{V_A + e_v}{V_B} \right) + e \tag{10}$$

式中 V_A ——容器 A 容积
 V_B ——容器 B 容积
 e_v ——容器加工误差
 e ——其他误差总和

由式(10)知, 测定装置的系统误差遵循一定规律, 可以通过补偿有效地消除。由表 6 看出, 不同的物料组态、节流阀开度、充气压力对测定装置的测量误差影响并不显著, 该套测定装置能够满足不同种类物料孔隙率的测定。

由试验结果估算充气压力因素及测量重复性指标边际均值的结果如表 7 所示。

表 7 边际均值

Tab.7 Marginal mean

充气压力/MPa	重复性
0.4	0.017
0.3	0.040
0.2	0.067
0.1	0.294

由表 7 看出, 充气压力越高, 重复试验数据方差越小, 重复性越好。引入传感器误差后, 由式(6)可得

$$\varepsilon = \frac{p_1 - p_2 + e_{p1} - e_{p2}}{p_2 + e_{p2}} = \frac{p_1 - p_2}{p_2 + e_{p2}} + \frac{e_{p1} - e_{p2}}{p_2 + e_{p2}} \quad (11)$$

式中 e_{p1} ——充气压力测量误差
 e_{p2} ——平衡压力测量误差

由式(11)可以知,充气压力 p_1 越高,平衡时压力 p_2 越高,误差对计算结果的影响也越小,测量越稳定。由于传感器的误差是随机变动的,无法消除,但可以通过选择合适的充气压力来减少随机误差。鉴于各元件的正常工作压力范围,测定装置的较优充气压力选定位 0.4 MPa。

2.2 测定装置校准试验

2.2.1 试验材料与方法

校准材料选用 $\phi = (30 \pm 0.02)$ mm 高精度表面致密性很高的不锈钢球和体积一定的塑料圆柱体。通过精确测得测定装置容器 B 容积,利用不锈钢球与塑料圆柱分别配出孔隙率为 18.75%、26.80%、41.43%、50.20%、60.17%、70.13%、80.32%、90.04% 的试验样品。设置测定装置充气上限压力为 0.4 MPa,分别对各个孔隙率值样品测量 15 次,获得数据与理论值比较从而得出该装置的误差变化规律并进行补偿。

2.2.2 试验结果与分析

测定装置校准试验结果如表 8 所示。

表 8 各样品孔隙率测定值与误差值

Tab.8 Porosity and error of test samples

理论孔隙率/%	测定孔隙率平均值/%	测量误差/%
18.75	20.19	1.44
26.80	28.18	1.38
41.43	42.29	0.86
50.20	50.90	0.70
60.17	60.71	0.54
70.13	70.52	0.39
80.32	80.60	0.28
90.04	89.72	-0.32
100	99.05	-0.95

从表 8 看出,测量误差随孔隙率的增大单调减小,符合式(10)的分析结果,可以确定为测定装置的系统误差并通过误差补偿消除。利用 Matlab 数据处理软件对试验值进行拟合分析的结果如图 6 所示。

获得误差随测定孔隙率变化的补偿公式为

$$\Delta\varepsilon = -0.000\,010\,78x^3 + 0.001\,723x^2 - 0.105x + 3.046$$

式中 x ——测定孔隙率
 $\Delta\varepsilon$ ——偏差值

基于补偿公式和组态软件,对测定结果进行修正。采用不锈钢球和不锈钢圆柱体配出理论孔隙率

为 16.02%、25.14%、35.57%、49.05%、58.42%、67.79%、76.57%、85.36%、94.14% 的试验样品,各个样品用补偿后的装置分别测定 5 次取平均值,获得补偿后与补偿前测量误差如图 7 所示。

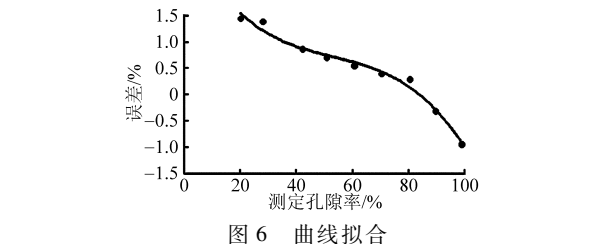


图 6 曲线拟合

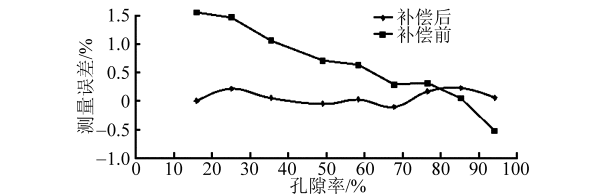


图 7 补偿前后误差对比

Fig.7 Comparison diagram of error before and after compensation

可以看出,补偿后误差最大变化极差小于 0.3%,证实了补偿方案的有效性。

2.3 稻谷孔隙率测定试验

2.3.1 试验材料与方法

在充气压力为 0.4 MPa、填充率分别为 100%、75%、50%、25% 的条件下,利用含水率为 13.5% (湿基)的稻谷,对装置的测试精度进行试验考证。试验中,每组样品均按同样下落方式填充,重复 15 次试验,对比测量前后试样质量、含水率,并通过所测得孔隙率,计算得出稻谷的真实密度,对比不同填充率下真实密度的计算值与测量值,从而衡量测定装置测量可靠性。稻谷真实密度为

$$\rho_{\text{true}} = \frac{M_{\text{rice}}}{(1 - \varepsilon) V_B}$$

式中 M_{rice} ——稻谷质量,g

2.3.2 试验结果与分析

试验结果如表 9 所示。

表 9 稻谷孔隙率测定试验结果

Tab.9 Results of paddy porosity determination

填充率/%	稻谷质量/g		稻谷含水率/%		孔隙率均值/%	真实密度/(g·cm ⁻³)
	测量前	测量后	测量前	测量后		
100	1 335.5	1 335.5	13.60	13.60	59.88	1.379 74
75	1 001.7	1 001.6	13.56	13.55	69.79	1.374 37
50	667.8	667.6	13.51	13.50	79.95	1.380 53
25	333.9	333.7	13.50	13.53	90.00	1.383 99

从表 9 看出,测量前后稻谷的质量与含水率基本一致,表明测定过程对物料没有造成影响。在不

同的填充率下,由测出的孔隙率值换算得出的稻谷真实密度,检测精度的极差为 0.3%,表明系统检测的稳定性、精度及可靠性都比较高。在填充率为 100% 的情况下,测得孔隙率为 59.88%,稻谷真实密度为 $1.379\ 66\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。国外学者利用甲苯取代法和天平比重瓶组合法实验测得水稻孔隙率分别为 59.2%、60.93% 和 60.37%,真实密度分别为 1.300 2、1.390 和 $1.193\ 4\ \text{g}/\text{cm}^3$ ^[25-28]。国内学者测定水稻的孔隙率 50%~65% 之间^[19-20]。对比前人的研究结果,可以推断设计的孔隙率检测装置的检测数据可信。

3 结论

(1) 基于理想气体状态方程,设计了定容型散体物料孔隙率的测定装置,实现了测定过程的自动

控制和检测参数的实时显示与存储,结构简单,操作方便,测量可靠性高。

(2) 在填充率分别为 100%、75%、50%、25% 条件下,测量湿基含水率为 13.5% 稻谷的试验结果显示,检测装置的测量误差极差为 0.3%,证实了系统检测的稳定性及精度都比较高。

(3) 试验得到了测量误差随孔隙率值的变化规律,给出了补偿系数的计算式。在充气上限压力为 0.4 MPa 的条件下,采用不锈钢球与圆柱体,在填充率分别为 16.02%、25.14%、35.57%、49.05%、58.42%、67.79%、76.57%、85.36%、94.14% 考证试验结果显示,测量误差的极差小于 0.3%。

(4) 充气压力对测量精度有一定的影响,在设定的 0.1~0.4 MPa 测量范围内,充气压力越高,测量误差相对越小且重复性越好。

参 考 文 献

- 1 速宝玉,詹美礼,张祝添. 充填裂隙渗流特性实验研究[J]. 岩土力学,1994,15(4):46-52.
Su Baoyu, Zhan Meili, Zhang Zhutian. Experimental research of seepage characteristic for filled fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(4):46-52. (in Chinese)
- 2 解本铭,朱晨,崔大妍. 散状物料流动特性及仓体设计研究进展[J]. 煤矿机械,2005(12):3-5.
Xie Benming, Zhu Chen, Cui Dayan. Advances on flow property of bulk solids and silo design[J]. Coal Mine Machinery, 2005(12):3-5. (in Chinese)
- 3 刘相东,杨德勇. 生物物料颗粒空隙率对其干燥质量的影响[J]. 农业机械学报,1999,30(6):56-63.
Liu Xiangdong, Yang Deyong. Effect of bio-material structure on quality retention during thermal drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(6):56-63. (in Chinese)
- 4 李长友,张烨,麦智炜. 高湿粮食贮藏干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):231-235.
Li Changyou, Zhang Ye, Mai Zhiwei. Design and experimental study of dryer for high moisture grain storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):231-235. (in Chinese)
- 5 姚宗路,欧阳双平,孟海波,等. 颗粒状秸秆物料流动特性试验[J]. 农业机械学报,2012,43(7):112-116.
Yao Zonglu, Ouyang Shuangping, Meng Haibo, et al. Flow characterization of biomass particle straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7):112-116. (in Chinese)
- 6 陈坤权,刘寄星. 颗粒物质(上)[J]. 物理,2004,33(9):629-635.
Chen Kunquan, Liu Jixing. Static and dynamic properties of granular matter(I)[J]. Physics, 2004, 33(9):629-635. (in Chinese)
- 7 黄志刚. 转筒干燥器中颗粒物料流动和传热传质过程的研究[D]. 北京:中国农业大学,2004.
Huang Zhigang. Study on particulate materials flow and heat and mass transfer in rotary dryers[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 8 张烨,李长友,马兴灶,等. 干燥机粮层阻力参数的试验与数值模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(7):216-221.
Zhang Ye, Li Changyou, Ma Xingzao, et al. Experiment and numerical simulation of layer resistance parameters in dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7):216-221. (in Chinese)
- 9 雷树业,王利群,贾兰庆,等. 颗粒床孔隙率与渗透率的关系[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(5):76-79.
Lei Shuye, Wang Liqun, Jia Lanqing, et al. Relationship between porosity and permeability of the particles packed bed[J]. Journal of Tsinghua University:Sci. &Tech., 1998, 38(5):76-79. (in Chinese)
- 10 李长友,方壮东. 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J]. 农业机械学报,2014,45(5):210-215.
Li Changyou, Fang Zhuangdong. Analytical model of high moisture content paddy in multistage countercurrent drying and tempering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):210-215. (in Chinese)
- 11 Lyes B, Azeddine B. Mathematical description of heat and mass transfer during deepbed drying: effect of product shrinkage on bed porosity[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17):2633-2644.
- 12 Gustafson R J, Hall G E. Density and porosity changes of shelled corn during drying[J]. Trans. Amer. Soc. Agr. Eng., 1972, 15:523-525.
- 13 Guan-Sajonz H, Guiochon G E, Gulakowski K. Study of the physico-chemical properties of some packing materials III. Pore size

and surface area distribution[J]. Journal of Chromatography A, 1997,773(2):33–51.

14 Lu P, Lannutti J J, Klobes P, et al. X-ray Computed tomography and mercury porosimetry for evaluation of density evolution and porosity distribution[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83(3): 518–522.

15 Chang C S. Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer[J]. Cereal Chemistry, 1988, 65(1):13–15.

16 Fang C, Campbell G M. Effect of measurement method and moisture content on wheat kernel density measurement[J]. Food and Bioproducts Processing, 2000, 78(4):179–186.

17 Walker C K, Panozzo J F. Development of a small scale method to determine volume and density of individual barley kernels, and the relationship between grain density and endosperm hardness[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(3):311–316.

18 Zink F J. Specific gravity and air space of grain and seeds[J]. Agric. Eng. , 1935, 16(11):439–440.

19 田晓红,李光涛. 粮食孔隙率测定方法探讨[J]. 粮食加工,2009,34(5):35–37.

Tian Xiaohong, Li Guangtao. Determination of grain porosity[J]. Journal of Food Processing, 2009, 34(5):35–37. (in Chinese)

20 张淑珍,巴卫国,徐宝江,等. 散粒物料孔隙率测定装置的研制[J]. 农业工程学报,1996,12(1):187–191.

Zhang Shuzhen, Ba Weiguo, Xu Baojiang, et al. Study and manufacture of porosity determining apparatus of an unconsolidated mass of material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1996, 12(1):187–191. (in Chinese)

21 Marinder B O. A simple apparatus for determining the density of solids[J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7(11): 1569–1573.

22 Bielders C L, Debacker L W, Delvaux B. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer[J]. Soil Science, 1990, 54(3):822–826.

23 Tamari S, Aguilar-Chavez A. Optimum design of gas pycnometers for determining the volume of solid particles[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2005, 33(2):1–6.

24 周祖饬. 农业物科学[M]. 北京:农业出版社, 1994:12–20.

25 Blake G R, Nelson W W, Allmaras R R. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer[J]. Soil Science, 1976, 54(3):822–826.

26 Varnamkhistia G M, Moblia H, Jafari A, et al. Some physical properties of rough rice (*Oryza sativa* L.) grain[J]. Journal of Cereal Science,2008,47(3):496–501.

27 Reddy B S, Chakraverty A. Physical properties of raw and parboiled paddy[J]. Biosystems Engineering, 2004,88(4):461–466.

28 Mehdi G V, Hossein M, Ali J, et al. Some engineering properties of paddy (var. Sazandegi)[J]. International Journal of Agriculture & Biological Engineering, 2007, 9(5):763–766.

Design and Test on Porosimeter for Particle Material

Li Changyou Fang Zhuangdong Mai Zhiwei

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To improve detection precision and reliability of the porosimeter for particle materials, a constant volume porosimeter and an automatic control system were developed based on the ideal gas state equation and gas displacement method. In 0.1~0.4 MPa, the results showed that the higher the inflation pressure, the better the repeatability and precision of porosimeter when stainless steel balls, prisms, pebbles and fine stones were used in the test. The equation of error compensation was proposed through the calibration experiment using standard stainless steel balls and cylinders in the standard condition. The porosity of the samples were 16.02%, 25.14%, 35.57%, 49.05%, 58.42%, 67.79%, 76.57%, 85.36%, 94.14% respectively. In the inflation pressure limit of 0.4 MPa, with 13.5% wet basis of paddy porosity, the test results showed that the range of porosity was 0.3%, when filling rates of sample were 25%, 50%, 75%, 100% respectively. The reliability of measurement was proved by the results.

Key words: Particle material Porosity Measurement Design Test