

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.01.025

李倩倩, 陈鑫, 毕文雅, 等. 小麦堆孔隙率测定方法及影响因素研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 187-193.

LI Q Q, CHEN X, BI W Y, et al. Research on determination method and influencing factors of porosity of wheat pile[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(1): 187-193.

小麦堆孔隙率测定方法及影响因素研究

李倩倩, 陈鑫, 毕文雅, 姜俊伊, 石天玉✉

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

摘要: 采用 TSZ-6A 型应变控制式三轴仪对小麦进行不同压力下的堆密度测试, 通过自制孔隙率测定仪进行初始压力孔隙率测试, 根据堆密度与孔隙率的关系计算不同品种、不同含水率、不同压力下样品孔隙率值。结果表明, 小麦孔隙率随压力增大而减小, 满足幂函数关系; 小麦孔隙率随含水率增加而增大, 满足二次函数关系; 在一定尺寸范围内, 品种对孔隙率无明显影响。

关键词: 小麦; 孔隙率; 堆密度; 压力; 含水率

中图分类号: TS210.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)01-0187-07

Research on Determination Method and Influencing Factors of Porosity of Wheat Pile

LI Qian-qian, CHEN Xin, BI Wen-ya, JIANG Jun-yi, SHI Tian-yu✉

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: TSZ-6A strain-controlled triaxial apparatus was used to determine bulk density of wheat under different pressures and initial pressure porosity was tested by self-made porosity mete, the porosity values of samples under different varieties, water content and pressure were calculated according to the relationship between bulk density and porosity. The results showed that the porosity of wheat decreased with the increase of pressure which satisfied the power function relationship; The porosity of wheat increased with the increase of water content, which satisfied the quadratic function relationship; In a certain size range, varieties had no obvious effect on porosity.

Key words: wheat; porosity; shelled wheat; pressure; moisture content

粮食孔隙率是粮食流散特性之一, 是粮食重要的物理特性^[1]。粮堆孔隙分为种粒内孔隙和种粒间孔隙^[2]。种粒内孔隙决定了籽粒硬度、易破损粒、研磨、干燥率和抗真菌发展^[3], 种粒间孔

隙影响粮食呼吸作用、热量的释放和虫霉变化^[4]。

粮堆孔隙率对粮堆内部湿热转移影响较大, 影响通风干燥过程中气体流动阻力, 是粮食储备管理作业中粮堆温湿度的控制工艺选择和优化的重要参数。孔隙率的测定研究对小麦的安全储存有重要意义。

孔隙率的测定方法有比重瓶法, Chang^[5]使用气体比重瓶测定了不同含水率的玉米、小麦和高粱的孔隙率。目前测定粮食孔隙率的常用方法有气体置换法, 根据理想气体状态方程, 直接测量粮食的孔隙率。张淑珍^[6]依据理想气体状态方程

收稿日期: 2020-06-10

基金项目: “十三五”国家重点研发项目 (2016YFD0401605-2; 2016YFD0401001-2)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 13th five-year plan, China (No.2016YFD0401605-2; 2016YFD0401001-2)

作者简介: 李倩倩, 女, 1989 年出生, 研究实习员, 研究方向为粮食储藏。

通讯作者: 石天玉, 男, 1980 年出生, 副研究员, 博士, 研究方向为粮食储藏。E-mail: sty@ags.ac.cn.

研制了孔隙率测定装置,指出此装置对吸湿性强、易溶于水、比重测试较复杂的散粒物料更适用。田晓红^[1]通过对比仪器法和计算方法测定小麦、玉米、大豆、稻谷孔隙率,指出基于理想气体状态方程的仪器法样品剪代表性强,检测方法简单、快捷、重复性好,且整个过程是无损操作,便于推广。李长友^[7]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,开发了自动检测控制系统,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。郝倩^[8]基于理想气体状态方程研究玉米、小麦孔隙度就仓测量法,指出该测量系统测定时无需取样,可以测出粮食在仓储状态下的孔隙度。唐福元^[9]、陈雪^[10]基于理想气体状态方程分别研究了筒仓中稻谷、小麦的空隙率分布规律,为粮仓孔隙率的分布研究提供了新的方法。许倩^[3]利用孔隙率测定仪测定了油菜籽孔隙率,并分析含水率和品种对孔隙率的影响。

本文使用孔隙率测定仪和应变控制式三轴仪,根据理想气体状态方程,测量并计算不同品种、不同含水率、不同压力下小麦的孔隙率值,并分析压力、含水率、品种对孔隙率的影响。为小麦粮堆提高仿真精度,确定合理的通风方式提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

见表 1 和表 2。

表 1 小麦样品尺寸
Table 1 The size of wheat mm

品种	样品	长轴	中轴	短轴
淮麦 20	平均值	6.514 0	3.333 1	2.848 9
	标准差	0.191 1	0.134 9	0.170 9
宁麦 13	平均值	6.275 6	3.397 1	2.896 6
	标准差	0.188 0	0.365 1	0.147 6
济麦 22	平均值	6.418 8	3.547 0	3.263 6
	标准差	0.214 0	0.155 0	0.108 4

表 2 小麦样品的含水情况
Table 2 The moisture content of wheat %

品种	含水率
济麦 22	11.40、13.15、14.46、15.97、17.98
宁麦 13	11.23、12.45、13.93、15.25、17.27
淮麦 20	10.27、11.65、12.83、15.75、17.38

1.2 实验仪器

DGG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱:上海森信实验仪器有限公司;TSZ-6A 型应变控制式三轴仪:南京土壤仪器厂;孔隙率测定仪:自制。

1.3 实验原理

1.3.1 粮食堆密度测定原理

使用应变控制式三轴仪给予粮堆各方向应力,通过应力的改变,观察粮堆体积的变化,从而得到不同加载压力下粮堆的密度。粮堆受力情况如图 1 所示:

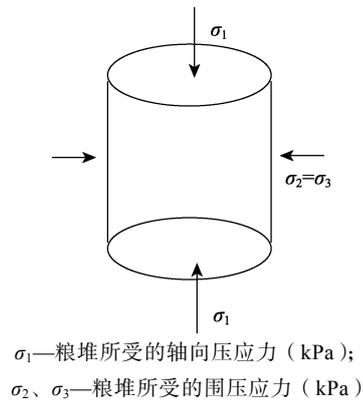


图 1 粮堆应力分布情况
Fig.1 The stress distribution of grain pile

根据粮堆质量 m 即可计算粮堆的初始密度和不同压力条件下的压缩密度:

$$\rho = 1000 \times m / v, \rho - \text{不同压力下粮堆压缩密度 (g/L); } v - \text{不同压力下粮堆的体积 (cm}^3\text{)}.$$

1.3.2 粮食孔隙率测定原理

孔隙率测定仪采用两个容积均为 5 L,且相互可以通过阀门连接的压力容器 A 和 B,压力容器 A 用于压缩气体填充,压力容器 B 用于测试粮种填充,记录两个压力容器联通前后的气体压力数据 $P_1、P_2$ ^[1,3],自制孔隙率测定仪装置示意图(图 2)。

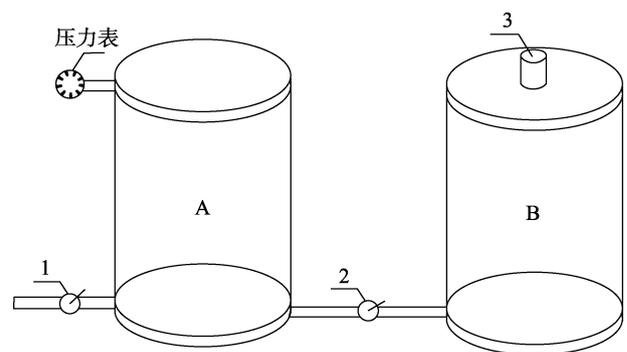


图 2 自制孔隙率测定仪装置示意图
Fig.2 The schematic diagram of self-made porosity tester

视空气为理想气体，根据理想气体方程：

$$PV = MRT, \text{ 及 } M = M_1 + M_2, \text{ 可得 } \frac{P_2(V_1 + V_2)}{RT} =$$

$$\frac{P_1V_1}{R_1T_1} + \frac{P_aV_2}{R_2T_2}, \text{ 设 } RT = R_1T_1 = R_2T_2, \text{ 则可得 } \frac{V_2}{V_1} =$$

$$\frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_a}, \varepsilon = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_a} \times 100\%。 \text{ 自制孔}$$

隙率测定仪设置压力表显示 Pa 为零，故孔隙率计

算公式为 $\varepsilon = \frac{P_1 - P_2}{P_2}$ 。式中， M_1, M_2, M 分别是

容器 A、B 中的空气质量及空气总质量； $V_1、V_2$ 分别是容器 A 的体积及容器 B 中孔隙的体积； R 为空气的气体常数； T 为空气的绝对温度； ε 为孔隙率； P_a 为实验室所在大气压强。

不同压力下样品孔隙率，根据三轴仪测定堆密度原理，不同压力下，样品体积变化即为孔隙体积变化。根据样品堆密度计算公式可得，初始

$$\text{样品堆密度 } \rho_a = \frac{M}{V_a}, \text{ 加压后样品堆密度 } \rho_b = \frac{M}{V_b},$$

$$\text{初始孔隙率 } \varepsilon_a = \frac{V_0}{V_a} \times 100\%, \text{ 加压后孔隙率 } \varepsilon_b =$$

$$\frac{V_0 - (V_a - V_b)}{V_b} \times 100\% = \frac{\rho_b(\varepsilon_a - 1) + \rho_a}{\rho_a}。 \text{ 式中，} \varepsilon_0 \text{ 为}$$

样品初始孔隙率， ε_p 为加压后孔隙率， M 为样品质量， V_a 为初始样品体积， V_0 为样品孔隙体积， V_b 为加压后样品体积。

1.4 实验方法

(1) 检查仪器是否齐全，将待测试样品装入三轴仪橡皮膜，装满密封后安装压力室，对压力室进行注水，压力室注水完成后，关闭排水口和排气阀。

(2) 利用反压调节手轮调节压力室压力，设

置压力梯度：0、50、100、150、200、250、300 kPa。并记录加压后三轴仪体量测试管的体积变化。

(3) 加压结束后将反压调节手轮卸载压力至 0 kPa，打开排水口和排气阀，卸载压力室，进行样品称重记录，用于堆密度计算。

(4) 将不同水分样品进行 3 组重复测试，计算小麦样品不同含水率不同压力下的堆密度。

(5) 根据样品 0 kPa 压力下堆密度计算自制孔隙率测定仪样品室所需样品质量，将样品装满样品室，装好桶盖进行密封，打开阀门向气压室充气，气压室内气压稳定后，关闭阀门，打开气压室与样品室连接阀门，直至气压稳定，记录初始及稳定时气压数值。

(6) 根据自制孔隙率测定仪测定样品在 0 kPa 下的孔隙率及样品在不同压力下的堆密度，进行样品在不同压力下的孔隙率计算。

2 结果与分析

2.1 小麦的孔隙率值

使用孔隙率测定仪和应变控制式三轴仪，测量并计算济麦 22、宁麦 13、淮麦 20 分别在不同含水率、不同压力下的孔隙率，结果如表 3~5 所示。

济麦 22 在含水率 11.40%~17.98%、压力 0~300 Pa 时，小麦孔隙率变化范围是 36.99%~49.73%；宁麦 13 在含水率 11.23%~17.27%、压力 0~300 Pa 时，小麦孔隙率的变化范围是 36.73%~48.49%；淮麦 20 在含水率 10.27%~17.38%、压力 0~300 Pa 时，小麦孔隙率的变化范围是 40.95%~52.83%。

表 3 不同含水率、不同压力下济麦 22 小麦样品孔隙率

Table 3 The porosity of Jimai 22 wheat with different water content and pressure

含水率/%	孔隙率/%													
	压力/Pa													
	0		50		100		150		200		250		300	
平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
11.40	45.14	1.04	41.14	1.05	39.67	0.91	38.89	1.35	38.2	2.00	37.58	1.77	36.99	1.80
13.15	46.08	2.66	41.23	2.71	39.35	2.02	38.2	1.61	37.24	0.72	36.56	0.48	35.94	1.72
14.46	46.38	2.80	42.57	2.73	40.61	3.87	39.29	4.16	38.28	3.07	37.37	2.25	36.58	2.56
15.97	47.92	2.64	43.91	2.13	41.57	1.63	40.12	1.29	38.74	0.75	37.63	1.24	36.63	1.82
17.98	49.73	2.65	45.85	2.22	43.98	1.98	42.53	0.79	41.46	0.98	40.54	0.74	39.81	1.25

表 4 不同含水率、不同压力下宁麦 13 小麦样品孔隙率
Table 4 The porosity of Ningmai 13 wheat with different water content and pressure

含水率/%	孔隙率/%													
	压力/Pa													
	0		50		100		150		200		250		300	
	平均值	标准差												
11.23	44.85	0.00	41.47	3.10	39.77	1.33	38.85	1.56	38.11	0.92	37.45	1.44	36.73	1.65
12.45	44.72	1.85	40.91	2.17	39.49	0.92	38.60	0.70	37.92	1.64	37.26	2.15	36.66	1.75
13.93	46.06	1.07	42.28	1.07	40.83	1.56	39.84	1.74	39.12	1.25	38.48	1.00	37.87	1.31
15.25	46.59	1.07	42.72	0.65	41.28	0.93	40.20	1.39	39.46	1.43	38.77	1.46	38.16	1.60
17.27	48.49	1.08	44.72	1.55	43.28	1.31	42.30	0.71	41.57	1.00	40.96	1.52	40.42	1.60

表 5 不同水分、不同压力下淮麦 20 小麦样品孔隙率
Table 5 The porosity of Huaimai 20 wheat with different water and pressure

含水率/%	孔隙率/%													
	压力/Pa													
	0		50		100		150		200		250		300	
	平均值	标准差												
10.27	47.98	0.97	45.00	0.58	43.71	0.39	42.88	0.85	42.18	1.10	41.53	1.07	40.95	1.09
11.65	48.43	3.63	45.32	3.02	43.94	2.79	43.09	1.70	42.44	1.45	41.88	0.85	41.34	0.50
12.83	49.46	2.70	45.89	2.76	44.64	2.09	43.85	1.40	43.22	1.43	42.75	1.46	42.29	1.86
15.75	50.44	1.65	46.28	2.13	45.39	3.47	44.04	3.94	43.93	2.96	42.99	2.60	42.37	2.28
17.38	52.83	3.33	48.53	3.99	46.54	4.51	45.15	4.43	44.09	4.46	43.14	4.56	42.45	4.58

2.2 压力对孔隙率的影响

根据表 3~5 可做不同含水率小麦的孔隙率随压力变化图，如图 3~5。

三种小麦的孔隙率随压力的变化均成幂函数关系，都可拟合方程： $y=kp^m$ ， y -样品孔隙率（%）， p -样品所受压力（Pa）。压力与孔隙率的拟合方程系数如表 6~8 所示。

从图 3~5、表 6~8 分析，可以看出在一定水分下，小麦的孔隙率随压力的增加而减小，小麦

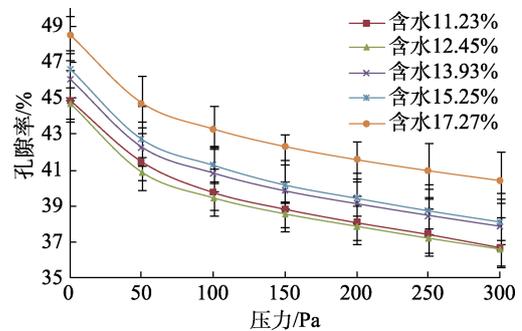


图 4 不同含水率宁麦 13 的孔隙率随压力的变化
Fig.4 The porosity of different water content of Ningmai 13 under different pressure

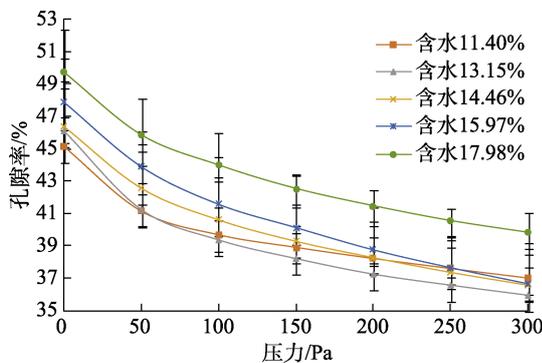


图 3 不同含水率济麦 22 的孔隙率随压力的变化
Fig.3 The porosity of different water content of Jimai 22 under different pressure

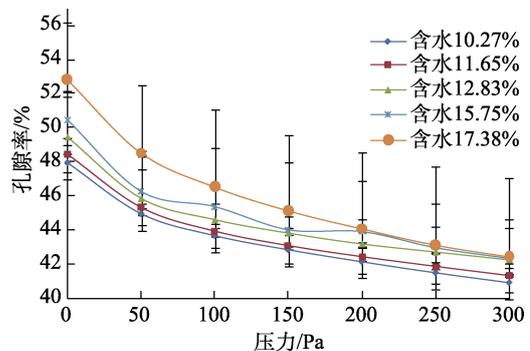


图 5 不同含水率淮麦 20 的孔隙率随压力的变化
Fig.5 The porosity of different water content of Huaimai 20 under different pressure

表 6 济麦 22 压力与孔隙率的拟合方程系数
Table 6 Coefficient of fitting equation between pressure and porosity of Jimai 22

含水率/%	拟合方程系数		R^2
	k_1	m_1	
11.4	44.611	-0.098	0.984 1
13.15	45.527	-0.125	0.989 9
14.46	46.363	-0.120	0.999 6
15.97	48.162	-0.137	0.997 1
17.98	49.722	-0.114	0.999 6

表 7 宁麦 13 压力与孔隙率的拟合方程系数
Table 7 Coefficient of fitting equation between pressure and porosity of Nimai 13

含水率/%	拟合方程系数		R^2
	k_2	m_2	
11.23	44.643	-0.100	0.996 6
12.45	44.298	-0.099	0.989 6
13.93	45.685	-0.098	0.992 2
15.25	46.233	-0.100	0.993 2
17.27	48.088	-0.091	0.991 0

表 8 淮麦 20 压力与孔隙率的拟合方程系数
Table 8 Coefficient of fitting equation between pressure and porosity of Huaimai 20

含水率/%	拟合方程系数		R^2
	k_3	m_3	
10.27	47.802	0.079	0.996 6
11.65	48.160	-0.079	0.994 6
12.83	48.963	-0.078	0.981 9
15.75	49.876	-0.085	0.973 8
17.38	52.660	-0.111	0.999 0

所受压力与孔隙率成幂函数关系。济麦 22 在压力 0~300 Pa 下，含水率 11.40% 的小麦孔隙率从 45.14% 下降到 36.99%，含水率 17.98% 的小麦孔隙率从 49.73% 下降到 39.81%；宁麦 13 在压力 0~300 Pa 下，含水率 11.23% 的小麦孔隙率从 44.85% 下降到 36.73%，含水率 17.27% 的小麦孔隙率从 48.49% 下降到 40.42%；淮麦 20 在压力 0~300 Pa 下，含水率 10.27% 的小麦孔隙率从 47.98% 下降到 40.95%，含水率 17.38% 的小麦孔隙率从 52.83% 下降到 42.45%。小麦的孔隙率随压力的变化幅度是逐渐减小，与程绪铎^[11]的研究结果类似。程绪铎对玉米堆进行压缩特性进行研究，发现压缩密度随着压力的增大变化率变小，根据孔隙率与压缩密度的关系，可以推导出孔隙

率随着压力的增大变化率变小。导致这种现象的原因可能是小麦颗粒随着压力增加，前期种粒间孔隙空间重排占主导因素，后期种粒内孔隙空间重排占主导因素。

2.3 含水率对孔隙率的影响

根据表 3~5 可做不同压力下小麦的孔隙率随含水率变化图，如图 6~8。

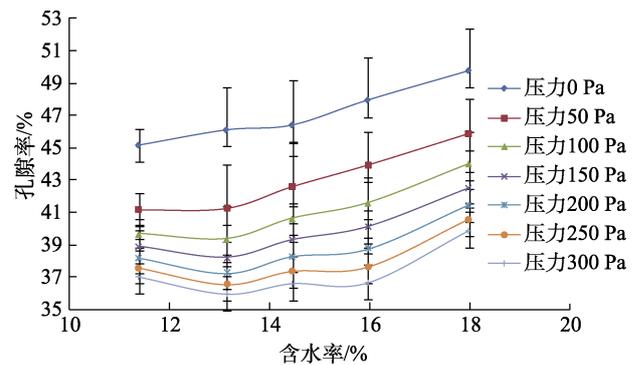


图 6 不同压力下济麦 22 的孔隙率随含水率的变化
Fig.6 The porosity of different pressure of Jimai 22 with different water content

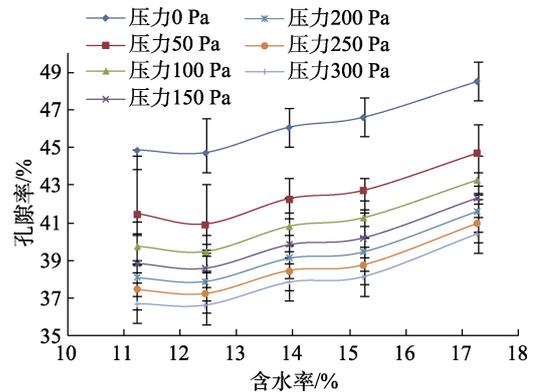


图 7 不同压力下宁麦 13 的孔隙率随含水率的变化
Fig.7 The porosity of different pressure of Nimai 13 with different water content

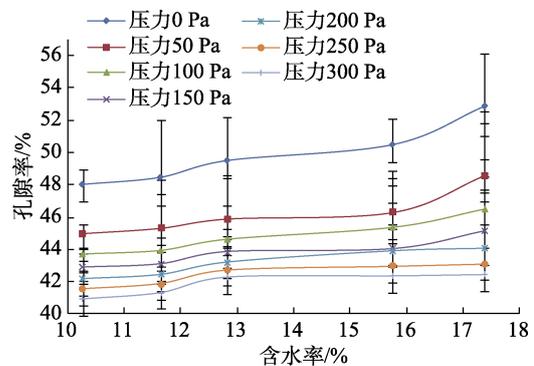


图 8 不同压力下淮麦 20 的孔隙率随含水率的变化
Fig.8 The porosity of different pressure of Huaimai 20 with different water content

三种小麦的孔隙率随含水率变化均成二次函数关系，都可拟合成方程： $z=Ax^2+Bx+C$ ， z -样品孔隙率（%）， x -样品含水率（%）。含水率与孔隙率的拟合方程系数如表 9~11 所示。

表 9 济麦 22 含水率与孔隙率的拟合方程系数
Table 9 Coefficient of fitting equation between water content and porosity of Jimai 22

压力/Pa	拟合方程系数			R_{11}^2
	A_1	B_1	C_1	
0	0.212 9	-0.175 1	45.234	0.984 7
50	0.264 3	-0.375 7	41.160	0.994 2
100	0.368 6	-1.127 4	40.364	0.986 3
150	0.424 3	-1.625 7	40.016	0.980 4
200	0.484 3	-2.103 7	39.768	0.958 0
250	0.522 1	-2.433 9	39.494	0.944 4
300	0.562 1	-2.739 9	39.226	0.921 2

表 10 宁麦 13 含水率与孔隙率的拟合方程系数
Table 10 Coefficient of fitting equation between water content and porosity of Nimai 13

压力/Pa	拟合方程系数			R_{22}^2
	A_2	B_2	C_2	
0	0.232 3	-0.478 9	45.026	0.969 6
50	0.298 6	-0.960 0	42.015	0.951 4
100	0.261 1	-0.687 3	40.120	0.961 5
150	0.273 2	-0.789 6	39.321	0.958 0
200	0.266 7	-0.752 3	38.561	0.958 1
250	0.274 7	-0.795 0	37.949	0.954 1
300	0.267 6	-0.717 7	37.174	0.955 1

表 11 淮麦 20 含水率与孔隙率的拟合方程系数
Table 11 Coefficient of fitting equation between water content and porosity of Huaimai 20

压力/Pa	拟合方程系数			R_{33}^2
	A_3	B_3	C_3	
0	0.273 3	-0.469 5	48.231	0.991 3
50	0.262 4	-0.772 8	45.634	0.955 3
100	0.135 1	-0.100 5	43.658	0.998 2
150	0.087 6	0.023 0	42.771	0.964 7
200	-0.019 9	0.650 8	41.439	0.961 8
250	-0.073 9	0.875 5	40.644	0.960 6
300	-0.106 7	1.042 3	39.926	0.942 4

从图 6~8、表 9~11 分析，可以看出在一定压力下，小麦的孔隙率随含水率增加有增加的趋势。原因可能由于籽粒膨胀导致籽粒体积变大、籽粒间空隙变大，从而孔隙率增加，颗粒尺寸不均匀性也有一定影响。

2.4 品种对孔隙率的影响

实验选取 3 种品种的小麦进行孔隙率的测定，研究品种对孔隙率的影响。小麦尺寸在长轴 6.275 6~6.514 0 mm、中轴 3.333 1~3.547 0 mm、短轴 2.848 9 mm~3.262 3 mm 时，孔隙率随压力的变化成幂函数关系，孔隙率随水分的变化成二次函数关系。可以推测在一定尺寸范围内，品种对孔隙率没有明显影响。这与徐倩^[3]的研究结果相同，她认为油菜籽的品种对孔隙率无明显影响。小麦样品的几何尺寸、体积与结构对孔隙率应该有一定的影响。

3 讨论与结论

小麦的孔隙率随压力的增加而减小，成幂函数关系，变化幅度逐渐减小。济麦 22 在压力 0~300 Pa 下，含水率 11.40% 的小麦孔隙率从 45.14% 下降到 36.99%，含水率 17.98% 的小麦孔隙率从 49.73% 下降到 39.81%；宁麦 13 在压力 0~300 Pa 下，含水率 11.23% 的小麦孔隙率从 44.85% 下降到 36.73%，含水率 17.27% 的小麦孔隙率从 48.49% 下降到 40.42%；淮麦 20 在压力 0~300 Pa 下，含水率 10.27% 的小麦孔隙率从 47.98% 下降到 40.95%，含水率 17.38% 的小麦孔隙率从 52.83% 下降到 42.45%。

小麦的孔隙率随水分的增加而增大，成二次函数关系；在一定尺寸范围内，小麦的品种对孔隙率无明显影响；筒仓中的小麦堆结构、应力和应变复杂，测量孔隙率的分布是个难题。本文测量的孔隙率在实验后期，采用合适数值方法可模拟计算出筒仓中小麦堆孔隙率随粮层深度的规律，从而得到筒仓中孔隙率值的分布。

参考文献：

[1] 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+45.
TIAN X H, LI G T. Determination of grain porosity[J]. Grain Processing, 2009, 34(5): 35-37+45.

[2] 王谧, 金明珠. 浅谈种子孔性[J]. 种子, 2003(2): 56-57.
WANG M, JIN M Z. Discussion on seed porosity[J]. Seed, 2003(2): 56-57.

[3] 许倩, 陶天艺, 徐苏轩, 等. 油菜籽孔隙率的试验研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(5): 73-75+110.
XU Q, TAO T Y, XU S X, et al. Experimental study on the porosity of rapeseed[J]. Oils and Foods, 2018, 43(5): 73-75+110.

- [4] ELZBIETA K, ANDRZEJ K. Testing of a mathematical model of grain porosity TEKA dom[J]. Energ. Roln-OL PAN, 2008, 8a: 112-117.
- [5] CHANG C S. Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer[J]. Cereal Chemistry. 1988, 65(1): 13-15.
- [6] 张淑珍, 巴卫国, 徐宝江, 等. 散粒物料孔隙率测定装置的研究[J]. 农业工程学报, 1996(1): 187-191.
ZHANG S Z, BA W G, XU B J, et al. Study and manufacture of porosity determining apparatus of an unconsolidated mass of materials[J]. Journal of Agricultural Engineering, 1996(1): 187-191.
- [7] 李长友, 方壮东, 麦智炜. 散体物料孔隙率测定装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 200-206.
LI C Y, FANG A D, MAI Z W, et al. Design and test on porosimeter for particle material[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 200-206.
- [8] 郝倩, 陈弘毅, 平学文, 等. 一种新型粮食孔隙度就仓测量系统研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 180-184.
- HAO Q, CHEN H Y, PING X W, et al. Research on a new grain porosity measurement system[J]. Research on Agricultural Mechanization, 2015, 37(9): 180-184.
- [9] 唐福元, 许倩, 程绪铎. 筒仓中稻谷的空隙率分布研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(12): 110-116.
TANG F Y, XU Q, CHENG X D. Research on porosity distribution of paddy in silos[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(12): 110-116.
- [10] 陈雪, 程绪铎, 龙桃, 等. 带锥斗筒仓内小麦堆孔隙率分布研究[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(10): 48-52.
CHEN X, CHENG X D, LONG Tao, et al. Research on porosity distribution of paddy in silos[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2019, 44(10): 48-52.
- [11] CHENG X D, ZHANG Q, YAN X J, et al. Compressibility and equivalent bulk modulus of shelled corn[J]. Biosystems Engineering, 2015, 140: 91-97. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。