

小麦种类及加工方式对全麦粉粉体特性的影响

郝春明, 郑学玲, 刘 翀, 李利民

(河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了研究全麦粉粉体特性,以卡尔指数原理为理论基础,使用粉体综合特性测试仪,对红麦、白麦、加麦 3 种不同种类的小麦面粉及不同加工方式下全麦粉粉体的特性,包括 Carr 流动性综合指数 F_w 和喷流性综合指数 F_d ,及其单项检测项目等进行逐一对比分析。结果表明,不同种类小麦的面粉及全麦粉的流动性呈显著性差异,面粉与全麦粉流动性呈极显著的差异性($p<0.01$),但不同加工方式的全麦粉流动性没有显著性差异;面粉及全麦粉的流动性均表现不太好,面粉有相当强的喷流性,但全麦粉仅表现出有倾向的喷流性。

关键词: 粉体特性;Carr 指数;流动性;喷流性;全麦粉

中图分类号:TS201.2

文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2013)02-0011-06

Key words: powder property; Carr index; flowability; floodability; whole wheat flour

小麦籽粒由许多部分组成,结构十分复杂^[1],但对于加工(制粉),可分成 3 个解剖区域,即皮层、胚芽和胚乳^[2]。全麦粉是将整粒小麦粉碎加工,或是先精制面粉,再将小麦麸皮和胚芽稳定化处理如数回添,与面粉混合。全麦粉的提取率是 95%以上,即全部小麦成分被加工成小麦粉^[3-4]。全麦粉包含了小麦全部营养成分,营养全面^[2,5],因此,全麦粉加工和全麦粉食品生产已经在全球开始得到重视^[6]。

全麦粉是由不连续的微粒构成的一种固体的特殊形态,具有巨大的比表面积、很小的松装密度以及凝聚性、流动性等一些特殊的物理性质。在全麦粉的许多单元操作过程中涉及粉体的性能,例如在生产、包装、储运和流通等过程,以及不同组分的混合等。全麦粉与面粉成分及加工方法的差异,造成两者粉体特性的显著差异。本文中研究不同加工方式及红麦、白麦、加麦 3 种不同小麦种类对全麦粉粉体 Carr 流动性综合指数、喷流性综合指数及其单项检测项目等特性的影响。

1 实验部分

1.1 实验材料和试剂

小麦样品(红麦、白麦、加麦 2[#])由郑州海嘉食品有限公司提供,2011 年收获。

盐酸、硫酸锌、亚铁氰化钾、乳酸、异丙醇、溴酚蓝等试剂均为分析纯。

1.2 实验设备和仪器

HGT 1000 型容重器;SKCS4100 型单颗粒谷物分析仪,瑞典 Perten 仪器有限公司;MLU-202 型布勒实验磨,瑞士 Buhler 公司;MLU-302 型实验打麸机,瑞士 Buhler 公司;Perten 3100 型锤片式旋风磨,瑞典 Perten 仪器有限公司;FDV 型超微粉碎机,北京兴时利和科技发展有限公司;Infratec1241 型近红外谷物品质分析仪,丹麦 FOSS 特卡托公司;BT-1000 型粉体综合特性测试仪,辽宁丹东百特仪器有限公司;

Effect of Wheat Cultivars and Processing Methods on Powder Properties of Whole Wheat Flour

HAO Chunming, ZHENG Xueling,
LIU Chong, LI Limin(College of Food Science and Technology, Henan University of
Technology, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Based on mechanism of Carr index and using powder property testing instrument, the flowability and floodability comprehensive index of the powder properties affected by wheat cultivars and processing methods were analysed comparatively. The results show that the flowability of different types of wheat flour and whole wheat flour have a significant difference. There is highly significant difference between wheat flour flowability and whole wheat flour flowability ($p<0.01$). But the flowability of whole wheat flour processed in different ways has no significant difference. The wheat flour and whole wheat flour flowability are not very good. The wheat flour shows very strong floodability, but the whole wheat flour only shows a tendency of floodability.

收稿日期:2013-01-14,修回日期:2013-02-12。

基金项目:河南省农业科技成果转化计划项目,编号:200132;河南省小麦产业技术体系建设专项资金资助项目,编号:S2010-01-G06。

第一作者简介:郝春明(1987—),男,硕士研究生,研究方向为粮食工程。E-mail:haochm@126.com。

通信作者:郑学玲(1972—),女,博士,教授,研究方向为粮食品质与加工技术。E-mail:zhengxueling@126.com。

刘翀(1978—),男,博士,硕士生导师,研究方向为粮食品质与加工技术。E-mail:liuachong@126.com。

BT-9300H 型激光粒度分析测试仪, 辽宁丹东百特仪器有限公司; HZF-B2000 型电子分析天平, 美国华志电子科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 籽粒理化性质

1) 小麦容重的测定。采用容重器称重法, 按照 GB/T 5498—1985 进行试验。双试验结果允许差不超过 0.2%, 求其平均数, 即为测定结果。

2) 小麦硬度、单粒质量及粒径的测定。采用单颗粒谷物分析系统, 在 3~4 min 内对 300 个小麦籽粒的特性按 GB/T 21304—2007 进行测定, 然后统计分析, 可得出平均值、标准差并绘出直方图, 同时得到谷物水分、硬度指数、籽粒质量、籽粒直径等指标。

3) 水分、灰分及粗蛋白的测定。采用近红外谷物品质分析仪进行测试分析。

1.3.2 制粉

面粉(RF)采用实验磨制粉, 根据籽粒的硬度确定润麦加水量, 硬麦水分为 16%(质量分数, 下同), 中麦水分为 15%, 软麦不超过 14%, 润麦时间为 24 h, 出粉率控制在 70%左右^[7]。

1.3.3 全麦粉的制备

1) 全籽粒粉碎制备全麦粉。将小麦清理、调质^[8], 通过不同粉碎方式将全籽粒粉碎至与面粉相当的粒度(CB36~CB42), 混合均匀, 即得全麦粉。全籽粒采用锤式旋风磨粉碎制全麦粉(记为 HM), 全部通过 CQ20 筛^[9]; 全籽粒石磨粉碎制全麦粉(记为 SM); 全籽粒采用超微粉碎机粉碎制全麦粉(记为 UM)。

2) 麸皮处理回添的全麦粉制备。将小麦清理、调质、磨粉, 分别得到精制面粉和麸皮, 将麸皮及胚芽等面粉副产物在回添之前经粉碎、稳定化处理后再回添至面粉中制备全麦粉^[10]。辊式磨制粉, 挤压膨化处理麸皮回添制全麦粉(记为 RME); 辊式磨制粉, 湿热处理麸皮回添制全麦粉(记为 RMR); 辊式磨制粉, 锤式旋风磨粉碎麸皮回添制全麦粉(记为 RMH); 辊式磨制粉, 超微粉碎麸皮回添制全麦粉(记为 RMU)。

1.3.4 粉体综合特性测试

1) 休止角 θ_r 。粉体堆积层的自由表面在静平衡状态下, 与水平面形成的最大角度称为休止角^[11]。采用粉体综合特性测试仪的休止角测试组件, 通过振动使粉

体自然下落到组件平台上形成休止角。

2) 崩溃角 θ_f 。给测量休止角的堆积粉体以一定的冲击, 使其表面崩溃后圆锥体的底角称为崩溃角。采用粉体综合特性测试仪崩溃角测试组件测试。

3) 差角 θ_d , 即休止角 θ_r 与崩溃角 θ_f 之差,

$$\theta_d = \theta_r - \theta_f. \quad (1)$$

4) 平板角 θ_s 。将埋在粉体中的平板向上垂直提起, 粉体在平板上的自由表面(斜面)和平板之间的夹角与受到震动后的夹角的平均值称为平板角。采用粉体综合特性测试仪的平板角测试组件测试, 测量时, 平板角以平板提起后的角度和平板受到冲击后去除不稳定粉体的角度的平均值来表示。

5) 松装密度 ρ_a , 指粉体在特定容器中处于自然充满状态后的密度。采用粉体综合特性测试仪非金属粉松装密度测试组件测试^[12]。

6) 振实密度 ρ_p , 指粉体装填在特定容器后, 对容器进行振动, 从而破坏粉体中的空隙, 使粉体处于紧密填充状态后的密度。采用固定体积法利用粉体综合特性测试仪粉末振实密度测试组件测试^[13]。

7) 压缩度 C_p 。同一个试样的振实密度 ρ_p 与松装密度 ρ_a 之差与振实密度 ρ_p 之比为压缩度, 也称为压缩率,

$$C_p = [(\rho_p - \rho_a) / \rho_p] \times 100\%. \quad (2)$$

8) 分散度 D_s 。粉体在空气中分散的难易程度称为分散度^[14]。采用粉体综合特性测试仪的分散度测试组件, 将 10 g 试样从一定高度落下后, 测量接料盘(直径为 100 mm)外试样占试样的质量分数。

9) 空隙率 ε_n , 指粉体中的空隙占整个粉体的体积分数。

10) 均齐度 U_n 。采用激光粒度分析仪测出累积质量分数分别为 60% 和 10% 时的粒径 d_{60} 和 d_{10} , 按下式计算均齐度:

$$U_n = d_{60} / d_{10}. \quad (3)$$

11) 均值比较, 采用统计产品与服务解决方案 (SPSS) 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒的基本指标测定结果

小麦籽粒特性的测定结果如表 1 所示。

根据 GB/T 5498—1985 按小麦容重定等: 大于或等

表 1 小麦籽粒的基本指标测定

Tab. 1 Analytical data of wheat kernel parameters

样品	容重/(g·L ⁻¹)	硬度指数	单粒质量/mg	粒径/mm	水分质量分数/%	灰分质量分数/%
红麦	791.2±1.0	51.68	44.07	3.23±0.40	11.59±0.01	1.528±0.014
白麦	791.5±0.5	41.15	38.21	3.01±0.36	10.91±0.06	1.556±0.013
加麦	824.5±0.5	76.05	31.81	2.83±0.33	12.31±0.17	1.579±0.014

于790 g/L 为一等,<790~770 g/L 为二等,<770~750 g/L 为三等,<750~730 g/L 为四等,<730~710 g/L 为五等,小于 710 g/L 为等外品。美国按 SKCS 划分软硬小麦的方法:SKCS 硬度指数值大于 90 为超硬麦,81~90 为很硬,65~80 为硬麦,45~64 为中硬,35~44 为中软,25~34 为软麦,10~24 为很软,硬度指数值小于 10 为超软^[10]。3 种小麦样品的容重均大于 790 g/L,硬度指数值分别为 51.68、41.15 和 76.05,所以被测样品分别为一等中硬麦、一等中软麦和一等硬麦。

2.2 全麦粉的基本理化指标测试结果

不同小麦品种及加工方式的全麦粉基本品质测定结果见表 2。采用超微粉碎方式导致全麦粉水分显著低于其他粉碎方式,可能是在超微粉碎过程中,转子带动物料高速运转,磨腔温度较高,水分挥发所致。

表 2 全麦粉的基本品质测定结果
Tab. 2 Testing data of whole wheat flour properties

样品	加工方式	水分质量分数/%	灰分质量分数/%
红麦	RF	12.95±0.03	0.653±0.081
	HM	11.59±0	1.528±0.014
	SM	10.75±0.05	1.180±0.030
	UM	7.20±0	1.528±0.017
	RME	9.00±0.15	1.270±0.010
	RMR	13.05±0.05	0.860±0.001
	RMH	12.35±0.05	1.190±0.020
	RMU	11.75±0.05	1.320±0.030
白麦	RF	13.43±0.05	0.614±0.079
	HM	10.91±0.06	1.556±0.013
	SM	10.40±0.10	1.130±0.020
	UM	6.93±0.01	1.555±0.017
	RME	9.60±0.01	1.304±0.012
	RMR	12.60±0.10	0.840±0.011
	RMH	12.15±0.05	1.190±0.020
	RMU	12.00±0.10	1.250±0.051
加麦	RF	14.32±0.07	0.589±0.086
	HM	12.31±0.17	1.579±0.014
	SM	10.75±0.05	1.140±0.021
	UM	7.26±0.01	1.580±0.020
	RME	10.50±0.05	1.293±0.016
	RMR	13.45±0.05	0.820±0.012
	RMH	12.40±0.01	1.280±0.021
	RMU	12.15±0.05	1.380±0.022

2.3 全麦粉的流动特性

休止角对粉体的流动性影响最大,休止角越小,粉体的流动性越好。不同加工方式全麦粉休止角没有显著性差异(数据略),但面粉的休止角与全麦粉休止角有极显著的差异性($p<0.01$),普遍小于全麦粉的休止角,这表明,面粉(RF)的流动性好于全麦粉,可能是麸皮增大了颗粒间的摩擦力,导致粉体休止角增大,这与笹边修司等^[15]关于颗粒间的摩擦力对粉体休止

角影响的研究结果一致。小麦种类对全麦粉休止角的影响明显,白麦粉与红麦粉、加麦粉有极显著的差异性($p<0.01$),白麦全麦粉休止角的变幅为 54~58°,普遍大于其他 2 种小麦全麦粉的休止角,这是由于白麦属软质小麦,产品的粉质粒含量相对高,不易流散,因此在工艺设计过程中,软麦全麦粉的自流角不应小于 60°,单位筛理面积也大于硬质小麦全麦粉的。

松装密度对存储容器和包装袋的设计很重要。加工方式及小麦种类对全麦粉松装密度的影响见图 1。可以看出,全籽粒超微粉碎方式(UM)的松装密度显著小于其他全麦粉制粉方式($p<0.01$),这是由于 UM 方式粒度最小,与江桂林等^[16]对玉米淀粉的研究结果相似。方差分析表明,红麦粉与加麦粉的松装密度没有差异性,而红麦粉、加麦粉分别与白麦粉的松装密度具有显著的差异性($p<0.05$),这可能是由于红麦、加麦均属硬质小麦(红麦、加麦硬度指数分别为 51.68、76.05,见表 1)。

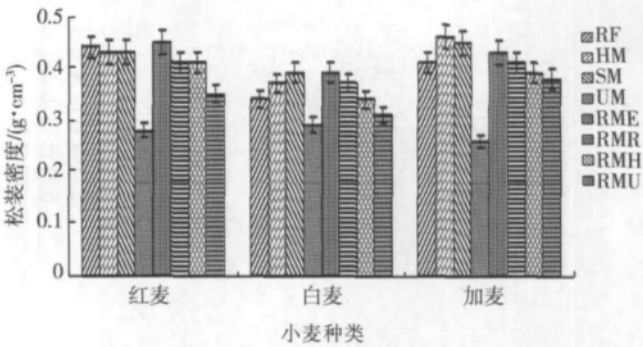


图 1 小麦种类及加工方式对全麦粉松装密度的影响
Fig. 1 Apparent density affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

通过测量振实密度可得粉体的流动性和空隙率等数据。小麦种类及加工方式对全麦粉振实密度的影响见图 2。由图可见,不同加工方法对振实密度有显著影响($p<0.05$)。纯面粉相对全麦粉更容易结块,麸皮弱化了面粉颗粒间的凝聚作用力。SM、HM 及 RF 加工方式的振实密度均相对较大,这可能是由于全籽粒常规

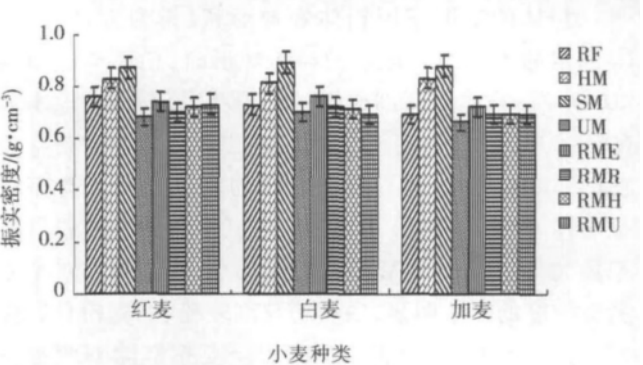


图 2 小麦种类及加工方式对全麦粉振实密度的影响
Fig. 2 Tap density affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

粉碎制得的全麦粉胚乳含量较高,胚乳颗粒相对较小,更易结实,且结实后密度较大。而 RMU 方式制得的全麦粉振实密度显著小于其他方式($p<0.05$),这表明超微粉碎的麸皮回添到面粉里能够强化面粉颗粒间的凝聚作用力,即 RMU 相对其他方法加工的全麦粉更容易结块,不易振实,故振实后密度较小。相同加工方式下不同种类小麦全麦粉的振实密度没有显著性差异。

通常来说,粉体的压缩度越小,粉体的流动性越好。加工方式及小麦种类对全麦粉压缩度的影响见图 3。可以看出,不同加工方式下的压缩度差异性显著($p<0.05$),UM 加工方式制得的全麦粉压缩度最大,这是由于 UM 方式粒度最小,与江桂林等^[16]对玉米淀粉的研究结果类似。在相同的加工方式下,红麦粉与加麦粉的压缩度没有差异性,而红麦粉、加麦粉分别与白麦粉的松装密度具有极显著的差异性($p<0.01$),这可能是由于红麦、加麦均属硬质小麦。

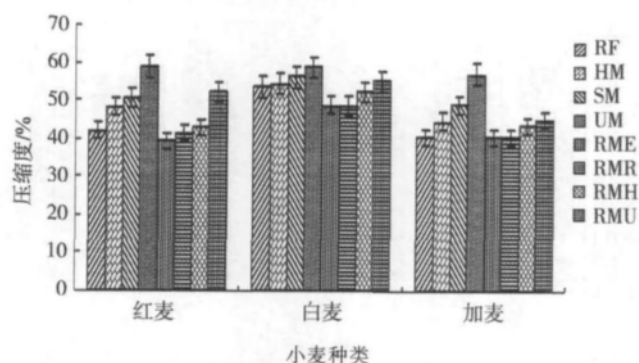


图 3 小麦种类及加工方式对全麦粉压缩度的影响

Fig. 3 Compressed limit affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

粉体平板角用平板提起后的角度与平板受到冲击后除掉不稳定粉体的角度的平均值来表示。方差分析表明,不同加工方式全麦粉及面粉平板角没有显著性差异(数据略)。不同小麦种类的全麦粉平板角没有显著性差异。平板角越小,粉体的流动性越强。一般地,平板角大于休止角。

粉体的空隙率因粉体颗粒形状、排列方式、粒径等因素的不同而变化。颗粒为球形时,粉体空隙率为 40%左右;颗粒为超细或不规则形状时,粉体空隙率为 60%~80%或更大。小麦种类及加工方式对全麦粉空隙度的影响见图 4。可以看出,不同加工方式的空隙率有显著性差异($p<0.05$),UM 加工方式制得的全麦粉空隙率最大,这是由于 UM 方式粒度最小。小麦种类对全麦粉空隙度的影响明显,白麦粉与红麦粉、加麦粉具有极显著的差异性($p<0.01$),白麦全麦粉空隙率变幅为 48%~58%。

根据 Carr 指数法理论,参照 Carr 指数表^[17]换算

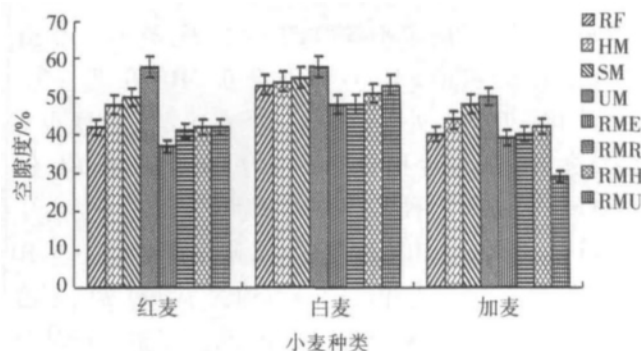


图 4 小麦种类及加工方式对全麦粉空隙度的影响

Fig. 4 Voidage affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

上述测量值,得出测定样品的每一项流动性指数,并累加结果,即可得到 Carr 指数,得出 Carr 流动性综合指数。流动性指数 F_w 是 4 个单项检测项目(休止角 θ_r 、压缩度 C_p 、平板角 θ_s 和均齐度 U_n)指数化后的总和,即

$$F_w = C_p' + \theta_r' + \theta_s' + U_n' \quad (4)$$

式中: F_w 为流动性指数; C_p' 为压缩度指数; θ_r' 为休止角指数; θ_s' 为平板角指数; U_n' 为均齐度指数。

小麦种类及加工方式对全麦粉 Carr 流动性综合指数的影响见图 5。由图可见,面粉与全麦粉的流动性呈极显著的差异性($p<0.01$),但不同加工方式下全麦粉的流动性没有显著性差异。总体来说,面粉及全麦粉的流动性均表现不太好。加麦粉与红麦粉流动性呈显著性差异($p<0.05$),红麦粉与白麦粉流动性呈极显著的差异性($p<0.01$)。

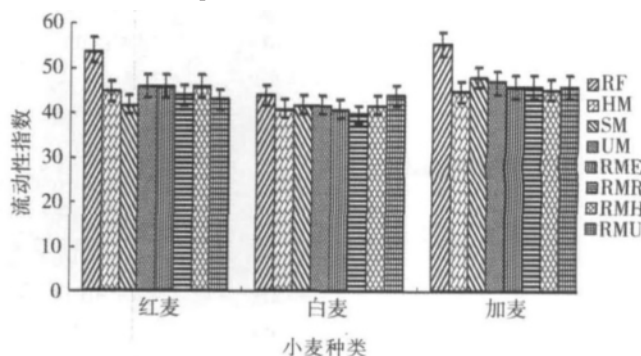


图 5 小麦种类及加工方式对全麦粉的流动性指数的影响

Fig. 5 Flowability affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

2.4 全麦粉的喷流特性

小麦种类及加工方式全麦粉崩溃角的影响见图 6。可以看出,不同加工方式下全麦粉的崩溃角有显著性差异($p<0.05$),面粉(RF)与全麦粉的崩溃角有极显著的差异性($p<0.01$)。同一加工方式不同种类小麦全麦粉的崩溃角没有显著性差异。

小麦种类及加工方式对全麦粉差角的影响见图 7。由图可见,麸皮超微粉碎回添制得的全麦粉(RMU)差角普遍最大,这表明 RMU 全麦粉流动性与

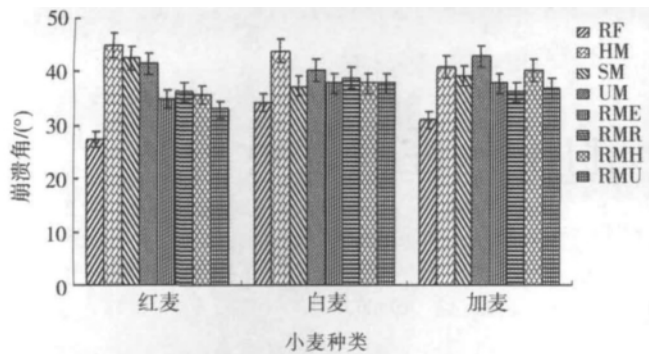


图6 小麦种类及加工方式对全麦粉崩溃角的影响

Fig. 6 Collapsibility affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

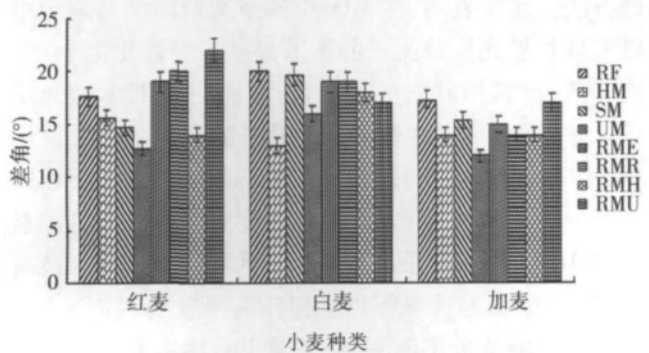


图7 小麦种类及加工方式对全麦粉差角的影响

Fig. 7 Difference angle affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

喷流性都较强。差角越大,粉体的流动性与喷流性越强。小麦种类对全麦粉差角的影响明显,白麦粉与红麦粉、加麦粉差角具有显著性差异($p<0.05$)。

粉体分散度与粉体的分散性、漂浮性和飞溅性有关。如果分散度超过50%,说明该样品具有很强的飞溅倾向。加工方式及小麦种类对面粉及全麦粉分散度没有显著影响(数据未给出),分散度均表现较低,在7%以下,表明全麦粉在空气中分散的难易程度与加工方式及小麦种类没有显著性差异。

Carr 喷流性综合指数 F_d 是单项检测项目(流动性指数 F_w 、崩溃角 H_f 、差角 H_d 、分散度 D_s)指数化后的累积和^[18],即

$$F_d = F_w + H_f' + H_d' + D_s', \quad (5)$$

式中: F_d 为喷流性综合指数; F_w 为流动性综合指数; H_f' 为崩溃角指数; H_d' 为差角指数; D_s' 为分散度指数。

小麦种类及加工方式对全麦粉 Carr 喷流性综合指数的影响见图8。可以看出,面粉与全麦粉的喷流性呈极显著的差异性($p<0.01$),表现出相当强的喷流性。全籽粒锤式旋风磨(HM)和全籽粒超微粉碎(UM)制的全麦粉与其他加工方式制得的全麦粉的喷流性呈显著性差异($p<0.05$),但全麦粉总体均表现出有倾向的喷流性状。红麦粉与加麦粉喷流性呈显著性差异($p<0.05$),加麦粉与白麦粉喷流性呈极显著的差异性($p<0.01$)。

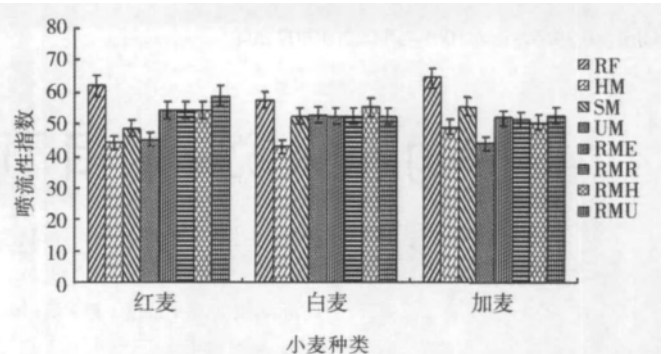


图8 小麦种类及加工方式对全麦粉喷流指数的影响

Fig. 8 Floodability affected by wheat cultivars and processing methods of whole wheat flour

3 结论

对不同小麦种类面粉及不同加工方式的全麦粉粉体特性 Carr 流动性综合指数的单项检测项目(休止角、压缩度、平板角和均齐度)和 Carr 喷流性综合指数单项检测项目(流动性指数、崩溃角、差角、分散度)逐一进行分析对比,并分别指数化后累积加和分析。结果表明,不同小麦种类的面粉及全麦粉的流动性呈显著性差异,面粉与全麦粉流动性呈极显著的差异性($p<0.01$),但不同加工方式的全麦粉流动性没有显著性差异。总体来说,面粉及全麦粉的流动性状均表现不太好,面粉有相当强的喷流性,但全麦粉仅表现出有倾向的喷流性状。该研究可为不同小麦种类面粉及不同加工方式下全麦粉的生产工艺、传输、储存、装填等技术提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 陈志敏, 赵仁勇. 小麦麸皮的开发利用[J]. 粮食流通技术, 1997 (3): 18.
- [2] 王凤成, 唐晓锴, 兰晓光, 等. 全麦粉加工及全麦粉产品[C] // 中国粮食行业协会小麦分会年会论文选编, 2007.
- [3] 徐同成, 王文亮, 祝清俊, 等. 全麦食品的营养与保健功能研究进展[J]. 中国食品与营养, 2009 (10): 55-59.
- [4] 郑学玲, 姚惠源, 李利民, 等. 小麦加工副产品—麸皮的综合利用研究[J]. 粮食与饲料工业, 2001 (12): 38-39.
- [5] 陶海根. 全麦粉营养价值及生产工艺探讨[J]. 大众标准化, 2010 (增刊 1): 101-103.
- [6] 安艳霞, 李水莲, 王亚平. 小麦麸皮的功能成分及加工利用现状[J]. 粮食流通技术, 2011 (2): 55-57.
- [7] 中华人民共和国农业部. NYT 1094—2006 小麦实验制粉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [8] 中华人民共和国农业部. NYT 1094.1—2006 小麦实验制粉: 第1部分: 设备、样品制备和润麦[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 1355—1986 小麦粉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [10] 郝春明, 郑学玲, 刘翀, 等. 挤压膨化处理麸皮对全麦粉品质的影响[J]. 农产品加工: 学刊, 2012 (11): 88-92.

(下转第23页)

行而改变,需要考虑这2个因素对水化程度和水化速率的影响。

参考文献 (References):

- [1] TOMOSAWA F. Development of a kinetic model for hydration of cement[C] // GLASSER F S, JUSTNES H. Proceedings of the 10th international congress on chemistry of cement. Vol.2. Sweden: Amarkai AB and Congrex, 1997: 51–58.
- [2] D'ALOIA L, CHANVILLARD G. Determining the “apparent” activation energy of concrete: E_a numerical simulations of the heat of hydration of cement[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(8): 1277–1289.
- [3] BENTZ D P. Influence of water-to-cement ratio on hydration kinetics: simple models based on spatial considerations[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(2): 238–244.
- [4] MOUNANGA P, KHELIDJA, LOUKILI A, et al. Predicting $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 255–265.
- [5] 吴浪, 宋固全, 雷斌. 基于细观力学模型水泥浆体弹性力学性质的预测[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3): 39–42.
- [6] YE G, LURA P, van BREUGEL K, et al. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(5): 491–497.
- [7] 吴浪, 宋固全, 雷斌. 基于多相水化模型的水泥水化动力学研究[J]. 混凝土, 2010(6): 53–55.
- [8] PARK K B. Prediction of cracking in high strength concrete using a hydration model[D]. Tokyo: The University of Tokyo, 2001.
- [9] PARK K B, JEE N Y, YOON I S, et al. Prediction of temperature distribution in high strength concrete using hydration model [J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(2): 180–186.
- [10] TOMOSAWA F, NOGUCHI T, HYEON C. Simulation model for temperature rise and evolution of thermal stress in concrete based on kinetic hydration model of cement[C] // CHANDRA S. Proceedings of the 10th international congress chemistry of cement. Vol.4. Sweden: Amarkai AB and Congrex, 1997: 72–75.
- [11] JENNINGS H M. Refinements to colloid model of C–S–H in cement: CM–II[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(3): 275–289.
- [12] CHEN W, BROUWERS H J H. Mitigating the effects of system resolution on computer simulation of Portland cement hydration[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(9): 779–787.

(上接第 15 页)

- [11] American Society for Testing Material (ASTM). Standard test method for bulk solids characterization by Carr indices[S]. ASTM international Designation: D 6393–08, 2008.
- [12] 中国国家标准局. GB 1479—1984, 粉末松装密度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1984.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21354—2008/ISO 3953:1993, 粉末产品: 振实密度测定通用方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 崔灵, 笹边修司, 清水健司, 等. 粉体流动性及喷流性测量方法及

其应用[J]. 中国粉体技术, 2012, 18(1): 76–81.

- [15] 笹边修司, 竹林賢治. 複合ナノ粒子とそのサイズ効果によるポリマーの高機能化[J]. 産業機械, 2010, 6: 56–58.
- [16] 江桂林, 汪超, 蓝晶, 等. 玉米淀粉的粉体综合特性研究[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(9): 19–22.
- [17] CARR R L, DIV B. Evaluating flow properties of solids[J]. Chemical Engineering, 1965, 18(1): 163–168.
- [18] 笹边修司, 清水健司. 粉体特性測定の世界的スタンダード～ホソカワ/ミクロンバウタテスト最新型の紹介[J]. 産業機械, 2011, 10: 53–55.

(上接第 18 页)

- [5] YAMADA N, HITOSUGI T, KASAI J, et al. Direct growth of transparent conducting Nb-doped anatase TiO_2 polycrystalline films on glass[J]. J Appl Phys, 2009, 105(12): 123702–1–123702–6.
- [6] CHEN Deming, XU Gang, MIAO Lei, et al. W-doped anatase TiO_2 transparent conductive oxide films: theory and experiment[J]. J Appl Phys, 2010, 107(6): 063707–1–063707–4.
- [7] CHEN S W, LEE J M, LU K T, et al. Band-gap narrowing of TiO_2 doped with Ce probed with X-ray absorption spectroscopy[J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(1): 012104–1–012104–13.
- [8] LI Min, ZHANG Junying, ZHANG Yue. First-principles calculation of compensated (2N, W) codoping impacts on band gap engineering in anatase TiO_2 [J]. Chem Phys Lett, 2012, 527: 63–66.
- [9] 冯庆. Si 掺杂金红石 TiO_2 光学特性的第一性原理研究[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2009, 26(4): 106–109.
- [10] LIU X D, JIANG E Y, LI Z Q, et al. Electronic structure and optical properties of Nb-doped anatase TiO_2 [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(25): 252104–1–252104–3.
- [11] BEHNAJADY M A, ALIZADE B, MODIRSHAHLA N. Synthesis of Mg-doped TiO_2 nanoparticles under different conditions and its photocatalytic activity [J]. Photochem Photobiol, 2011, 87(6): 1308–1314.
- [12] ZHANG Changneng, CHEN Shuanghong, MO Li'e, et al. Charge recombination and band-edge shift in the dye-sensitized Mg^{2+} -doped TiO_2 solar cells[J]. J Phys Chem: C, 2011, 115(33): 16418–16424.
- [13] AVASARALA B K, TIRUKKOVALLURI S R, BOJIA S. Photocatalytic degradation of monocrotophos pesticide: an endocrine disruptor by magnesium doped titania[J]. J Hazard Mater, 2011, 186(2/3): 1234–1240.
- [14] 祝君, 韩琳丽, 董玉涛, 等. 镁离子掺杂 TiO_2 纳米管的水热合成、表征及光催化性能研究[J]. 河南城建学院学报, 2011, 20(2): 32–35.
- [15] 郑树凯, 吴国浩, 王芳, 等. Si 掺杂锐钛矿相 TiO_2 的电子能带结构[J]. 中国粉体技术, 2012, 18(6): 36–38.