

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.044

糙米发芽前含水率提升工艺优化

邱 硕 贾富国 韩燕龙 蒋龙伟

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 糙米发芽前的吸水过程是导致籽粒裂纹的根本原因, 制约着发芽糙米品质和口感。为降低发芽前糙米裂纹增率, 探究了完整吸湿区间内各含水率水平糙米的最优吸湿速率。将糙米初始含水率至发芽含水率的完整区间分为若干子区间, 在各区间内以不同加湿速率加湿至该区间目标含水率。探究各区间内裂纹增率的变化规律, 建立裂纹增率与加湿速率变化规律的数学模型, 以低裂纹增率为目标确定最优加湿速率。在此基础上, 得出完整区间内以低裂纹增率及高效率为目标的加湿速率数学模型并试验验证。与前期分段加湿工艺相比, 本优化工艺可降低发芽前糙米和发芽糙米裂纹增率 ($41.48 \pm 0.15\%$) 和 ($43.67 \pm 0.26\%$), 糙米发芽率和 γ -氨基丁酸含量增加 ($6.92 \pm 0.25\%$) 和 ($25.03 \pm 0.18\%$), 为高品质发芽糙米的生产方法提供参考。

关键词: 发芽糙米; 加湿速率; 裂纹增率; 优化工艺; 数学模型

中图分类号: Q939.9; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0345-06

Optimization of Moisture Increase Technique for Brown Rice before Its Germination

QIU Shuo JIA Fuguo HAN Yanlong JIANG Longwei

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Moisture adsorption of brown rice is the fundamental reason for kernel cracking, which restricts the quality and texture of germinated brown rice. Moisture adding technique needs to be further optimized to reduce cracked kernel percentage of brown rice before germination. The whole moisture adding interval was divided into 12 intervals of 13.0% ~ 14.4%, 14.4% ~ 15.5%, 15.5% ~ 16.5%, 16.5% ~ 17.8%, 17.8% ~ 19.2%, 19.2% ~ 20.9%, 20.9% ~ 22.2%, 22.2% ~ 23.2%, 23.2% ~ 24.3%, 24.3% ~ 25.6%, 25.6% ~ 27.3% and 27.3% ~ 29.0%, and moisture adding procedure was finished within 1.0 min, 1.5 min, 2.0 min, 2.5 min, 3.0 min, 3.5 min, 4.0 min, 4.5 min, 5.0 min and 5.5 min respectively. In each interval, cracked kernel additional percentage was found to first decrease and then increase in range of moisture adding percentage. Mathematical models to describe variation in cracked kernel additional percentage were established, and derivation to models was applied to determine the optimal moisture adding rate. Optimal moisture adding rates for brown rice with moisture of 13.0%, 14.4%, 15.5%, 16.5%, 17.8%, 19.2%, 20.9%, 22.2%, 23.2%, 24.3%, 25.6% and 27.3% were 0.3212%/min, 0.2851%/min, 0.4338%/min, 0.3299%/min, 0.3485%/min, 0.4382%/min, 0.4993%/min, 0.5494%/min, 0.6396%/min, 0.7352%/min, 0.8735%/min and 0.8436%/min, which varied first slowly, then rapidly and finally slowly within the whole moisture adding interval. Based on above values, the mathematical model to describe moisture adding rate within the whole moisture adding interval was obtained. Compared with traditional segmented moisture adding technique, optimized moisture adding technique resulted in decreases of ($41.48 \pm 0.15\%$) and ($43.67 \pm 0.26\%$) in the cracked kernel additional percentage of non-germinated and germinated brown rice, respectively, while the germination rate and γ -aminobutyric acid content of germinated brown rice had increases of ($6.92 \pm 0.25\%$) and ($25.03 \pm 0.18\%$). The optimized technique featured by continuous varied adding rate provides a reference method for high quality production of germinated brown rice.

Key words: germinated brown rice; moisture adding rate; cracked kernel additional percentage; optimized technique; mathematical model

收稿日期: 2016-10-31 修回日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575098)、黑龙江省自然科学基金项目(E201322)和哈尔滨市应用技术与开发项目(2013DB2BG005)

作者简介: 邱硕(1983—), 男, 博士生, 主要从事农产品加工与贮藏研究, E-mail: beibeiqu2014@126.com

通信作者: 贾富国(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工技术及设备研究, E-mail: jfg204@163.com

引言

发芽糙米是糙米萌发后由幼芽、糠层和胚乳组成的糙米制品^[1]。糙米发芽过程中多种酶被激活,生成 γ -氨基丁酸等有益的生物活性成分,因此发芽糙米具有独特的营养价值^[2]。含水率提升至适宜水平是糙米发芽的必要条件。传统浸泡工艺糙米因吸水过快而产生裂纹,裂纹不利于发芽且影响发芽糙米的品质和口感;且浸泡时存在厌氧呼吸而制约发芽,还会导致 γ -氨基丁酸流失^[3]。为促进发芽糙米产业的健康发展,亟需一种既可提高发芽糙米品质又利于萌发的糙米含水率提升工艺。

为减少糙米浸泡过程中的吸湿裂纹,国内外学者进行了广泛研究^[4-8]。SATAKE等^[9]微量加湿糙米时发现,含水率14%~17%内以0.5%/h加湿时轻度和重度裂纹率升至16.0%和4.0%,含水率17%~23%内以0.5~1.2%/h加湿时2种裂纹粒数不增加。张强等^[10]在划分的3个区间内以不同速率加湿糙米,发芽后裂纹增率低于30%。贾富国等^[11]指出单次加湿量过大会影响糙米品质,单次加湿量过小则制约生产效率,并以提高发芽糙米营养成分含量为优化目标,提出发芽糙米的非浸泡分段加湿工艺,取得了有益进展。然而进一步研究发现糙米吸湿后的裂纹增率对发芽糙米品质有重要影响,且不同含水率糙米因吸湿速率差异而产生裂纹的敏感程度不同,因此糙米发芽前的吸湿工艺仍需深入研究。

本文以不同含水率糙米为原料,采用分区间加湿方法设计试验,研究加湿速率对裂纹增率的影响规律,以低裂纹增率为指标确定不同区间的最优加湿速率,建立发芽前完整含水率区间的持续变速率加湿工艺。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试糙米品种为沈农054,2015年10月收获于沈阳农业大学水稻研究所,精选完整无裂纹籽粒作为含水率提升试验材料,糙米初始含水率为13.0%。

1.2 试验仪器

DHG-9120A型鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;MP-2002型电子天平,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;Quintix-224型电子分析天平,北京赛多利斯工业称重设备有限公司;CTHI-100B型恒温恒湿培养箱,上海施都凯仪器设备有限公司;DNP-9082型电热恒温培养箱,上海精宏实验设备

有限公司;TX-200型米粒透视器,日本株式会社Kett科学研究所;Agilent-1100型高效液相色谱分析仪,美国安捷伦科技有限公司;自购微量喷壶。

1.3 试验方法

1.3.1 不同含水率样本制备

参照周玉龙等^[12]的方法提升糙米含水率。准备11份(每份50g)初始含水率样本,移入空气温度30℃和相对湿度95%的恒温恒湿培养箱。依预备试验结果确定各样本的提升时间,制备含水率为14.4%、15.5%、16.5%、17.8%、19.2%、20.9%、22.2%、23.2%、24.3%、25.6%、27.3%的样本,密封于无菌袋内,以备后续试验所用。

1.3.2 分区间加湿工艺

将糙米发芽前的含水率完整区间(13.0%~29.0%)分成12个区间,即以1.3.1节相邻两目标含水率为一个区间的左右端点。在各区间内,将样本持续喷雾加湿至目标含水率,置于25℃电热恒温培养箱内60min。移出样本后密封于三层无菌袋内,室温静置10min后测定裂纹增率,各区间的加湿速率计算公式为

$$M_s = \frac{M_i}{t_s} \quad (1)$$

式中 M_i ——含水率增幅,%

t_s ——加湿时间,min

M_s ——加湿速率,%/min

1.4 试验指标

每个样本的裂纹增率、发芽率、 γ -氨基丁酸含量重复测定5次,计算平均值和标准差。

1.4.1 裂纹增率

糙米裂纹依据程度不同分为单裂、双裂和龟裂3种^[13],本研究不分别统计,只统计至少单裂的全部粒数。

从样本中随机取50粒,放入TX-200型米粒透视器的透视板内。内置光源从籽粒背面透射至正面,由于胚乳完整处和裂纹处透射率不同,可准确判定籽粒是否有裂纹。测定2次得100粒中裂纹粒数,裂纹增率计算公式为

$$C_s = \frac{N_a - N_b}{N_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中 N_a ——加湿后样本裂纹粒数

N_b ——加湿前样本裂纹粒数

N_2 ——样本总粒数

C_s ——裂纹增率,%

1.4.2 发芽率

参照王京厦^[14]的方法判定发芽粒数,发芽率计算公式为

$$G = \frac{N_1}{N_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中 G ——发芽率, %

N_1 ——样本发芽粒数

1.4.3 γ -氨基丁酸含量

γ -氨基丁酸含量测定参照程威威等^[15]方法,使用 Agilent-1100 型高效液相色谱分析仪测定。

1.5 对比试验设计

优化加湿工艺与传统分段加湿工艺进行对比试验。2组试验均准备初始含水率糙米 50 g, 含水率提升至 29.0% 后均匀铺在密闭无菌培养皿内, 30℃ 电热恒温培养箱内发芽 24 h。

传统分段加湿工艺^[16]: 在子区间 13.0% ~ 18.0%、18.0% ~ 25.0%、25.0% ~ 28.9% 内依次以

1.0、1.4、1.3% /h 加湿糙米。

优化加湿工艺: 分别计算各区间的加湿总量和最优加湿时间以实现速率优化, 计算公式为

$$W_a = \frac{50M_i}{1 - M_b - M_i} \quad (4)$$

式中 M_b ——本区间的样本初始含水率, %

W_a ——加湿总量, g

$$T_o = \frac{M_i}{M_o} \quad (5)$$

式中 M_o ——最优加湿速率, % /min

T_o ——最优加湿时间, min

在各区间内依次以最优速率加湿糙米, 方案见表 1。

表 1 各区间的加湿方案

Tab. 1 Design of moisture increase in different moisture intervals

参数	含水率/%											
	13.0 ~ 14.4	14.4 ~ 15.5	15.5 ~ 16.5	16.5 ~ 17.8	17.8 ~ 19.2	19.2 ~ 20.9	20.9 ~ 22.2	22.2 ~ 23.2	23.2 ~ 24.3	24.3 ~ 25.6	25.6 ~ 27.3	27.3 ~ 29.0
加湿总量/g	0.82	0.65	0.66	0.80	0.87	1.07	0.84	0.65	0.73	0.87	1.17	1.20
最优加湿时间/min	4.5	4.0	2.5	4.0	4.0	4.0	2.5	2.0	1.5	2.0	2.0	2.0

测定加湿糙米裂纹增率, 发芽糙米裂纹增率、发芽率和 γ -氨基丁酸含量, 对 2 种工艺优劣进行评价。

1.6 数据处理

采用 SigmaPlot 12.5 绘制各区间的裂纹增率散点图和建立拟合方程; 采用 SPSS 22.0 进行对比试验数据的显著性分析; 对各拟合方程求导并令导函数为零, 确定对应加湿速率。

2 结果与分析

2.1 各区间的加湿速率

各区间的加湿速率如表 2 所示。含水率增幅最小 (1.0%) 时加湿速率为 0.18 ~ 1.00% /min, 含水率增幅最大 (1.7%) 时加湿速率为 0.31 ~ 1.70% /min。

表 2 各区间的加湿速率

Tab. 2 Moisture adding rates in different moisture intervals

含水率区间/%	加湿时间/min									
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
13.0 ~ 14.4	1.40	0.93	0.70	0.56	0.47	0.40	0.35	0.31	0.28	0.25
14.4 ~ 15.5	1.10	0.73	0.55	0.44	0.37	0.31	0.28	0.24	0.22	0.20
15.5 ~ 16.5	1.00	0.67	0.50	0.40	0.33	0.29	0.25	0.22	0.20	0.18
16.5 ~ 17.8	1.30	0.87	0.65	0.52	0.43	0.37	0.33	0.29	0.26	0.24
17.8 ~ 19.2	1.40	0.93	0.70	0.56	0.47	0.40	0.35	0.31	0.28	0.25
19.2 ~ 20.9	1.70	1.13	0.85	0.68	0.57	0.49	0.43	0.38	0.34	0.31
20.9 ~ 22.2	1.30	0.87	0.65	0.52	0.43	0.37	0.33	0.29	0.26	0.24
22.2 ~ 23.2	1.00	0.67	0.50	0.40	0.33	0.29	0.25	0.22	0.20	0.18
23.2 ~ 24.3	1.10	0.73	0.55	0.44	0.37	0.31	0.28	0.24	0.22	0.20
24.3 ~ 25.6	1.30	0.87	0.65	0.52	0.43	0.37	0.33	0.29	0.26	0.24
25.6 ~ 27.3	1.70	1.13	0.85	0.68	0.57	0.49	0.43	0.38	0.34	0.31
27.3 ~ 29.0	1.70	1.13	0.85	0.68	0.57	0.49	0.43	0.38	0.34	0.31

2.2 加湿速率对裂纹增率的影响规律

图 1 分别描述了各初始含水率 M_b 的样本在不同加湿速率 M_s 下裂纹增率 C_s 散点图和拟合曲线。同一图内 C_s 随 M_s 增大呈现先降低后升高的趋势, 存

在最小值和最大值。 M_b 越低籽粒脆性越大, M_b 越高籽粒抗拉强度越小^[17-18], 加湿过慢或过快无法保证加湿水渗透均匀和平缓, 局部区域受超过其抗拉强度的拉应力而产生过多应力裂纹。 M_b 逐渐升高后

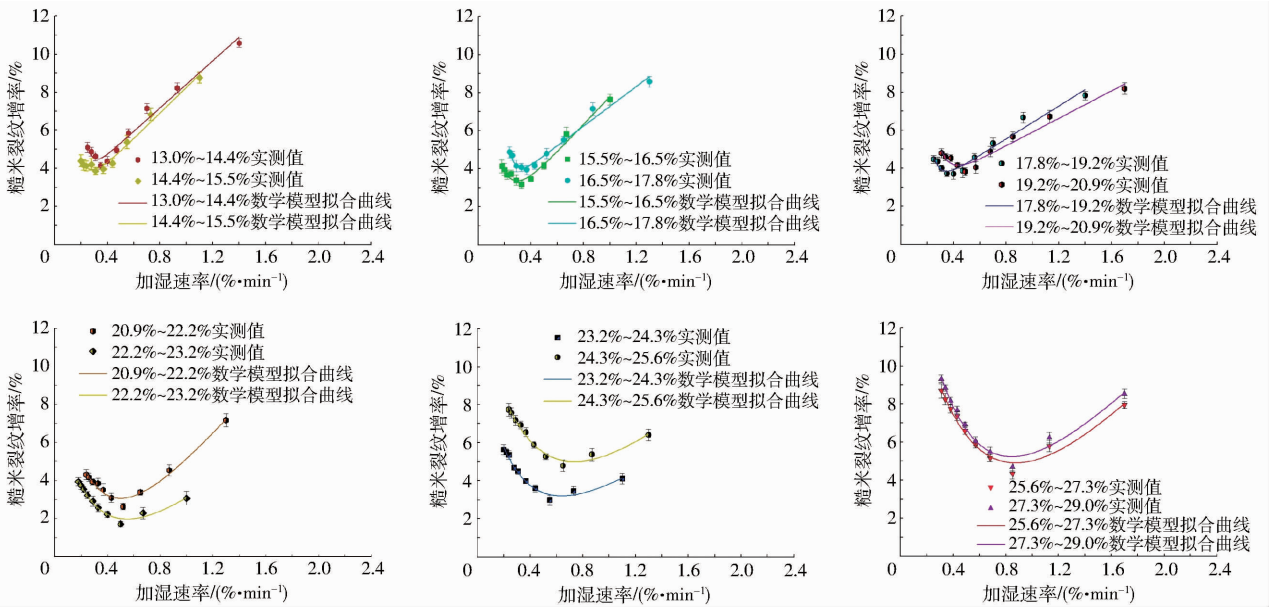


图1 不同区间内加湿速率对裂纹增率的影响

Fig. 1 Effect of moisture adding rate on cracked kernel additional percentage in different moisture intervals

籽粒韧性相应提高, M_s 变化对 C_s 影响减弱, C_s 变化范围缩小。 M_b 最低 (13.0% ~ 14.4%) 时, C_s 最大值和最小值为 $(10.59 \pm 0.17)\%$ 和 $(4.14 \pm 0.11)\%$; M_b 适中 (17.8% ~ 19.2%) 时, C_s 最大值和最小值为 $(7.82 \pm 0.10)\%$ 和 $(3.69 \pm 0.08)\%$; M_b 较高 (23.2% ~ 24.3%) 时, C_s 最大值和最小值为 $(5.64 \pm 0.14)\%$ 和 $(2.98 \pm 0.05)\%$ 。

C_s 随 M_s 的变化规律近似描述为指数衰减和线性增长两段, 可用四系数 Exponential Linear Combination 数学模型拟合。拟合方程和拟合误差见表 3, 各拟合方程极显著, 调整决定系数为 0.9427 ~ 0.9737, 标准估计误差为 0.1536% ~ 0.3925%。为考察各拟合方程精确性, 以 M_s 为 0.50%/min 在不同区间内加湿, 记录 C_s 实测值, 与方程提供预测值对比, 计算预测相对误差, 验证结果见表 4, 各区间的预测相对误差为 $(0.96 \pm$

0.05)% ~ $(2.73 \pm 0.16)\%$, 结果可接受。

2.3 各区间的最优加湿速率

计算各区间内裂纹增率 C_s 最小值对应的加湿速率 M_s , 即最优加湿速率 M_o , 结果见表 5 和图 2。 M_o 随初始含水率 M_b 升高时呈现先慢速、后快速、最终慢速的三段增大趋势, 可用四系数 Sigmoidal 方程拟合, 公式为

$$M_o = k + \frac{f}{1 + e^{-\frac{M_b - g}{h}}} \quad (6)$$

式中 f —— 放缓常数, 反映 M_o 变化速率放缓状态
 g —— 加湿突变点, 反映 M_o 变化速率突变时的 M_b , %

h —— 动力常数, 反映 M_o 变化内在动力

k —— 初始常数, 反映 M_o 变化固有属性

表3 裂纹增率拟合方程和拟合误差

Tab. 3 Fitting equation and fitting error for cracked kernel additional percentage

含水率区间/%	拟合方程	标准估计误差/%	调整决定系数	P
13.0 ~ 14.4	$C_s = 2.2256 + 542.0119e^{-23.7795M_s} + 6.1961M_s$	0.3925	0.9640	< 0.0001
14.4 ~ 15.5	$C_s = 1.1519 + 23.6345e^{-13.5313M_s} + 6.7509M_s$	0.2592	0.9737	< 0.0001
15.5 ~ 16.5	$C_s = 0.5180 + 16.8238e^{-10.7975M_s} + 7.2774M_s$	0.2541	0.9662	< 0.0001
16.5 ~ 17.8	$C_s = 2.0780 + 243.5289e^{-20.8583M_s} + 5.2102M_s$	0.2829	0.9655	< 0.0001
17.8 ~ 19.2	$C_s = 2.0959 + 125.7627e^{-17.9644M_s} + 4.3182M_s$	0.3300	0.9427	0.0001
19.2 ~ 20.9	$C_s = 2.2956 + 88.4549e^{-13.1815M_s} + 3.6121M_s$	0.3269	0.9429	0.0001
20.9 ~ 22.2	$C_s = -2.6755 + 13.3153e^{-3.8291M_s} + 7.5356M_s$	0.2428	0.9614	< 0.0001
22.2 ~ 23.2	$C_s = -2.0554 + 10.0504e^{-3.6779M_s} + 4.8988M_s$	0.1536	0.9543	< 0.0001
23.2 ~ 24.3	$C_s = -0.5057 + 11.2723e^{-3.6131M_s} + 4.0376M_s$	0.1705	0.9653	< 0.0001
24.3 ~ 25.6	$C_s = -0.9165 + 14.2751e^{-2.6782M_s} + 5.3365M_s$	0.2064	0.9587	< 0.0001
25.6 ~ 27.3	$C_s = -4.3133 + 21.9130e^{-2.2287M_s} + 6.9704M_s$	0.3345	0.9466	< 0.0001
27.3 ~ 29.0	$C_s = -2.7104 + 23.1981e^{-2.6683M_s} + 6.5165M_s$	0.3139	0.9592	< 0.0001

表 4 验证试验结果
Tab. 4 Results of verification tests

参数	含水率/%											
	13.0 ~ 14.4	14.4 ~ 15.5	15.5 ~ 16.5	16.5 ~ 17.8	17.8 ~ 19.2	19.2 ~ 20.9	20.9 ~ 22.2	22.2 ~ 23.2	23.2 ~ 24.3	24.3 ~ 25.6	25.6 ~ 27.3	27.3 ~ 29.0
裂纹增率预测值	5.336 9	4.929 6	4.234 8	4.694 6	4.277 1	4.223 2	3.055 1	1.991 5	3.358 1	5.489 0	6.361 8	6.655 7
裂纹增率实测值	5.22 ± 0.04	5.04 ± 0.07	4.17 ± 0.03	4.77 ± 5.0.06	4.18 ± 0.09	4.15 ± 0.04	3.09 ± 0.08	2.07 ± 0.12	3.30 ± 0.10	5.62 ± 0.07	6.26 ± 0.13	6.74 ± 0.12
预测相对误差	2.16 ± 0.08	2.05 ± 0.11	1.39 ± 0.16	1.34 ± 0.06	2.12 ± 0.09	1.73 ± 0.12	0.96 ± 0.05	2.73 ± 0.16	1.64 ± 0.10	2.13 ± 0.03	1.55 ± 0.14	1.22 ± 0.09

注:数据为指标“平均值 ± 标准差”(n = 5)。

表 5 各含水率区间的最优加湿速率和裂纹增率预测值

Tab. 5 Optimum moisture increase percentage and predicted cracked kernel additional percentage in different moisture intervals

参数	含水率/%											
	13.0 ~ 14.4	14.4 ~ 15.5	15.5 ~ 16.5	16.5 ~ 17.8	17.8 ~ 19.2	19.2 ~ 20.9	20.9 ~ 22.2	22.2 ~ 23.2	23.2 ~ 24.3	24.3 ~ 25.6	25.6 ~ 27.3	27.3 ~ 29.0
最优加湿速率/(%·min ⁻¹)	0.321 2	0.285 1	0.433 8	0.329 9	0.348 5	0.438 2	0.499 3	0.549 4	0.639 6	0.735 2	0.873 5	0.843 6
裂纹增率预测值/%	4.476 9	3.936 5	3.826 2	4.047 0	3.844 0	4.152 8	3.055 1	1.968 4	3.194 6	4.999 7	4.903 1	5.229 7

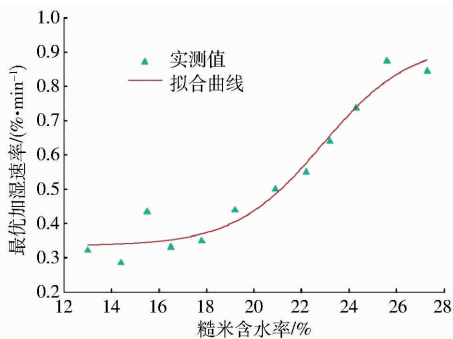


图 2 各初始含水率糙米的最优加湿速率散点图和拟合曲线

Fig. 2 Scatter diagram and fitting curve of optimal moisture increase percentages for brown rice with different initial moisture contents

本研究中 M_0 随 M_b 变化趋势可用 $M_0 = 0.337 7 + \frac{0.593 3}{1 + e^{-\left(\frac{M_b - 22.876 0}{1.850 6}\right)}}$ 表达,拟合方程 P 值小于 0.005,各拟合系数 P 值均小于 0.005,标准估计误差为 0.048 5%,调整决定系数为 0.944 4。本方程可用来预测完

整区间内任意初始含水率样本加湿时的最优速率。

2.4 对比试验结果与讨论

对比试验结果见表 6。糙米和发芽糙米裂纹增率由传统分段加湿的(27.52 ± 0.17)%和(34.79 ± 0.24)%降低到优化加湿的(16.27 ± 0.23)%和(19.45 ± 0.05)% ,降幅为(41.48 ± 0.15)%和(43.67 ± 0.26)%。发芽糙米发芽率和 γ -氨基丁酸含量(质量比)由传统分段加湿的(87.96 ± 0.12)%和(26.08 ± 0.08) mg/(100 g)升到优化加湿的(93.46 ± 0.20)%和(32.60 ± 0.14) mg/(100 g),增幅为(6.92 ± 0.25)%和(25.03 ± 0.18)%。发芽过程是休眠态向代谢活跃态的转变过程,内源酶激活后大分子有机物逐渐向小分子有机物转化^[19-20]。糙米含水率和胚乳组织结构完整性会影响内源酶活性和有机物转化效率。裂纹增率过高表明胚乳组织结构已受损严重,有机物转化过程受明显抑制而影响发芽率和 γ -氨基丁酸富集。

表 6 对比试验结果

Tab. 6 Results of contracts tests

对照组	加湿后裂纹增率/%	发芽糙米裂纹增率/%	发芽糙米发芽率/%	发芽糙米 γ -氨基丁酸含量/(mg·(100 g) ⁻¹)
传统分段加湿工艺	27.52 ± 0.17 ^a	34.79 ± 0.24 ^a	87.96 ± 0.12 ^a	26.08 ± 0.08 ^a
优化加湿工艺	16.27 ± 0.23 ^b	19.45 ± 0.05 ^b	93.46 ± 0.20 ^b	32.60 ± 0.14 ^b

注:数据为指标“平均值 ± 标准差”(n = 5),同一列不同字母表示差异显著(P < 0.05)。

3 结论

(1)建立了各含水率区间内糙米裂纹增率与加湿速率关系的数学模型,得出了试验范围内任意初始含水率糙米制取发芽糙米的最优加湿方案,降低

了糙米吸湿裂纹率并兼顾了加湿效率。

(2)与前期分段加湿工艺相比,基于优化加湿工艺的发芽糙米裂纹增率降低(43.67 ± 0.26)% ,发芽率和 γ -氨基丁酸含量提高(6.92 ± 0.25)%和(25.03 ± 0.18)%。

参 考 文 献

- 1 ZHANG Q, XIANG J, ZHANG L, et al. Optimizing soaking and germination conditions to improve gamma-aminobutyric acid content in japonica and indica germinated brown rice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 10(10): 283–291.
- 2 CHO D H, LIM S T. Germinated brown rice and its bio-functional compounds[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196(8): 259–271.
- 3 温坤芳,林亲录,吴跃,等. 浸泡工艺对糙米发芽率的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2012(2): 5–9.
WEN Kunfang, LIN Qinlu, WU Yue, et al. Effect of soaking process on the germination rate of brown rice[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2012(2): 5–9. (in Chinese)
- 4 CHUNG H J, JANG S H, CHO H Y, et al. Effect of steeping and anaerobic treatment on GABA (γ -aminobutyric acid) content in germinated waxy hull-less barley [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2009, 42(10): 1712–1716.
- 5 GENKAWA T, TANAKA F, HAMANAKA D, et al. Incidence of open crack formation in short-grain polished rice during soaking in water at different temperatures [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(4): 457–463.
- 6 PEREZ J H, TANAKA F, UCHINO T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions [J]. *Food Research International*, 2011, 44(9): 2615–2623.
- 7 PEREZ J H, TANAKA F, UCHINO T. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition: with dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature—a 3D finite element approach [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(3): 519–527.
- 8 张新伟,李心平,杨德旭,等. 玉米种子内部机械裂纹产生与扩展的微观机理[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(12): 72–76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121214&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.014.
ZHANG Xinwei, LI Xinping, YANG Dexu, et al. Micromechanism of inner mechanical cracks generation and expansion of corn seed kernel [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12): 72–76. (in Chinese)
- 9 SATAKE T, FUKUMORI T, LIU H G, et al. Development of processing technology for highly functional rice (Part 3)—GABA formation in brown rice by micro-hydration [J]. *Journal of the JSAM*, 2004, 66(5): 117–124. (in Japanese)
- 10 张强,郑先哲,贾富国,等. 循环加湿工艺降低发芽糙米爆腰增率并提高得率[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(11): 241–247.
ZHANG Qiang, ZHENG Xianzhe, JIA Fuguo, et al. Decreasing crack additional percentage and improving yield in preparation of germinated brown rice with cyclic moisture conditioning treatment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(11): 241–247. (in Chinese)
- 11 贾富国,兰海鹏,左彦军,等. 糙米二次加湿调质工艺优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(5): 95–98.
JIA Fuguo, LAN Haipeng, ZUO Yanjun, et al. Optimization of technology for twice moisture conditioning treatment for brown rice [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(5): 95–98. (in Chinese)
- 12 周玉龙,贾富国,付倩,等. 贮藏条件对糙米水分变化的影响规律[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 383–386.
ZHOU Yulong, JIA Fuguo, FU Qian, et al. Influence regularity of storage conditions on brown rice moisture changes [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 383–126. (in Chinese)
- 13 王正,陈江,梁礼燕,等. 稻谷吸湿裂纹生成与扩展的机理分析[J]. *粮食储藏*, 2011(1): 30–36.
WANG Zheng, CHEN Jiang, LIANG Liyan, et al. Mechanism on the formation and development of moisture-adsorption cracks of Paddy [J]. *Grain Storage*, 2011(1): 30–36. (in Chinese)
- 14 王京厦. 发芽糙米工艺研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2006.
WANG Jingxia. Study on craft of germinated brown rice [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 15 程威威,周婷,吴跃,等. 高效液相色谱法测定发芽糙米中 γ -氨基丁酸含量[J]. *食品科学*, 2014, 35(12): 98–101.
CHENG Weiwei, ZHOU Ting, WU Yue, et al. HPLC analysis of γ -amino butyric acid in germinated brown rice [J]. *Food Science*, 2014, 35(12): 98–101. (in Chinese)
- 16 CAO Y P, JIA F G, HAN Y L, et al. Study on the optimal moisture adding rate of brown rice during germination by using segmented moisture conditioning method [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(10): 6599–6606.
- 17 肖威,马小愚. 常温下稻米籽粒湿应力裂纹机理的试验[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(3): 86–89.
XIAO Wei, MA Xiaoyu. Study on wet stress crack of rice kernel under normal temperature [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(3): 86–89. (in Chinese)
- 18 肖威. 常温下稻米湿应力场物理参数及裂纹机理的试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2007.
XIAO Wei. Experimental study of rice moisture stress field physics parameter and crack mechanism under normal temperature [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 19 WICHAMANE Y, TEERARAT I. Production of germinated red Jasmine brown rice and its physicochemical properties [J]. *International Food Research Journal*, 2012, 19(4): 1649–1654.
- 20 邱硕,贾富国,韩燕龙,等. 基于分段加湿法的待发芽糙米臭氧水预处理工艺优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 271–278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161233&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.033.
QIU Shuo, JIA Fuguo, HAN Yanlong, et al. Optimization of ozonated water pretreatment for brown rice before germination based on segmented moisture conditioning method [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 271–278. (in Chinese)