

引文格式: 黄伟, 陶琳丽, 杨秀娟, 等. 基于辊式粉碎机的玉米粒度均匀性研究及模型构建[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(2): 358–364. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202106022

基于辊式粉碎机的玉米粒度 均匀性研究及模型构建*

黄伟^{1,2}, 陶琳丽², 杨秀娟², 王静¹, 佟荟全¹, 李美荃¹, 张曦^{2**}

(1. 昆明学院 农学与生命科学学院, 云南 昆明 650214;

2. 云南农业大学 动物科学技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】研究辊式粉碎机快辊表面线速度及辊间隙对玉米粉碎粒度及粒度分布的影响。【方法】采用双因素(辊间隙和快辊线速度)试验设计对玉米进行粉碎, 辊式粉碎机的辊间隙为 0.5、1.0 和 1.5 mm, 快辊线速度为 4、6 和 8 m/s (快辊与慢辊速度比为 2.5 : 1); 粉碎后的样品采用 BT-2900 动态图像颗粒分析系统测定粒度; 采用 SAS 的最小二乘法构建辊式粉碎机工艺参数预测模型。【结果】辊式粉碎机的辊间隙显著影响成品重量几何平均粒径(d_{gw})、重量几何标准差(S_{gw})和目标区间占比($P < 0.05$), 辊间隙增大, d_{gw} 和 S_{gw} 随之增大, 目标区间占比减小。快辊表面线速度、辊间隙及二者交互作用显著影响成品 d_{gw} ($P < 0.05$), 随着快辊表面线速度的增加, d_{gw} 逐渐降低。当辊间隙(X_1)为 0.5、1.0 和 1.5 mm、对应的线速度(X_2)分别为 8、6 和 6 m/s 时, 目标区间占比高, 粉碎效果较好。辊式粉碎机工艺参数计算模型为: $d_{gw} = 701.82X_1 - 62.23X_2 + 1\,000.30$; $S_{gw} = 0.26X_1 - 3.70e^{-17}X_2 + 2.07$ 。【结论】线速度及辊间隙均可影响玉米粉碎粒度及粒度分布, 需根据饲料使用需求合理设置线速度及辊间隙。

关键词: 辊式粉碎机; 辊间隙; 线速度; 粒度分布; 玉米

中图分类号: S513.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2022) 02-0358-07

Study on Corn Particle Size Uniformity and Model Construction Based on Roller Mill

HUANG Wei^{1,2}, TAO Linli², YANG Xiujuan², WANG Jing¹,
TONG Huiquan¹, LI Meiquan¹, ZHANG Xi²

(1. College of Agronomy and Life Sciences, Kunming University, Kunming 650214, China;

2. Faculty of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To study the effect of surface linear velocity and roller gap of the fast roller on the particle size and particle size distribution of corn pulverization. [Methods] Two-factor experiment design was adopted. The roller gap of roller crusher was 0.5, 1.0 and 1.5 mm, and the linear velocity of the fast roller was 4, 6 and 8 m/s (the speed ratio between the fast roller and the slow roller was 2.5:1). The particle size of corn samples was determined by BT-2900 dynamic image particle

收稿日期: 2021-06-24

修回日期: 2022-01-05

网络首发日期: 2022-03-10

*基金项目: 云南省科技厅基础研究专项-青年项目(202101AU070061); 云南省教育厅科学研究教师类项目(2021J0721); 昆明学院人才引进项目(YJL20018)。

作者简介: 黄伟(1987—), 女, 山东单县人, 博士, 讲师, 主要从事饲料加工工艺与动物营养研究。

E-mail: 873609727@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 张曦(1960—), 男, 河北正定人, 学士, 教授, 主要从事饲料工程研究。

E-mail: 943727490@qq.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20220309.0943.001.html>



analysis system. The least square method of SAS was used to construct the model and the process parameter calculation prediction model of roller mill was obtained. [Results] The geometric mean particle size of weight (d_{gw}), geometric standard deviation of weight (S_{gw}) and the ratio of target interval of the finished product were significantly affected by the roll gap of roller crusher ($P<0.05$). With the increase of the roll gap, d_{gw} and S_{gw} increased, and the ratio of target interval decreased. Surface linear velocity, roll gap and their interaction significantly affected the d_{gw} of finished product ($P<0.05$). With the increase of fast roller surface linear velocity, d_{gw} gradually reduced. When the roll gap (X_1) was 0.5, 1.0 and 1.5 mm, and the corresponding linear velocity (X_2) was 8, 6 and 6 m/s, respectively, the ratio of target interval was relatively high, and the crushing effect was better. Process parameter calculation model of roller crusher are: $d_{gw}=701.82X_1-62.23X_2+1\,000.30$; $S_{gw}=0.26X_1-3.70e^{-17}X_2+2.07$. [Conclusion] Both linear velocity and roller gap can affect the particle size and particle size distribution of corn pulverization, suitable linear velocity and roller gap could be set up based on feed requirement.

Keywords: roller crusher; roll gap; linear velocity; particle size distribution; corn

粉碎是饲料生产过程的关键性工段,不仅需要粉碎的物料占比大、粉碎工序耗电量高,而且粉碎质量也是影响成品饲料质量的重要因素。目前,中国饲料工业广泛使用锤片式粉碎机,其具有粉碎效率高和产量高等优点,但也存在能耗高、粉碎粒度不均匀和噪音大等问题^[1]。而辊式粉碎机具有粉碎产品温升小、功耗小、噪音低、粉尘少和粒度均匀等特点^[2]。辊式粉碎机由机架、喂入辊、1对直径相同的圆柱形磨辊、清洁刷及其调节机构和传动机构等组成,其磨辊一般为一上一下,上辊为快辊,下辊为慢辊^[3]。辊间隙和线速度是影响辊式粉碎机工作效果的主要因素。辊间隙影响粉碎产品的粒度,辊间隙小,对物料的挤压作用大,粉碎后的物料粒度小;辊间隙大,对物料的挤压作用小,粉碎后的物料粒度大^[4-5]。磨辊线速度即磨辊的圆周速度,通常指快辊线速度,主要影响粉碎区内物料的运动速度和粉碎效率,研究表明提高磨辊线速度可提高辊式粉碎机的生产能力^[6]。在实际生产中,辊式粉碎机的生产能力并不是随着磨辊线速度的增加而线性提高,且磨辊线速度的提高对辊式粉碎机的性能要求也较高,故不能一味地通过提高磨辊线速度来提高生产量。

本研究针对云南本地玉米的籽粒理化特性与其粉碎工艺特性,探讨辊式粉碎机的辊间隙与快辊线速度对其粉碎粒度分布及粒度均匀性的影响,使粉碎产品粒度相对集中分布在符合特定养

殖对象消化生理特点的粒径范围,以期满足后续工段混合均匀度要求及制粒工段均匀熟化工艺要求,提高生产效率,降低能耗,提高饲料消化率。

1 材料与方法

1.1 试验材料

云南玉米,产地为云南省弥勒市,由昆明西尔南饲料有限公司提供。

1.2 试验设计

采用3×3双因素试验设计,分别研究辊式粉碎机辊间隙和快辊表面线速度对玉米饲料原料粉碎粒度的影响。辊间隙设3个水平,分别为0.5、1.0和1.5 mm;快辊表面线速度设3个水平,分别为4、6和8 m/s;试验共9组处理。

1.3 观测指标及测定方法

玉米取样2 kg,参照《饲料分析及饲料质量检测技术》^[7]的方法测定其含水量、硬度、容重、粗蛋白和总能。

玉米经辊式粉碎机(快辊与慢辊速比为2.5:1,齿数为12齿/英寸)1次粉碎,每个处理采样1 kg,混合均匀后按照四分法取样,采用BT-2900动态图像颗粒分析系统(丹东百特仪器有限公司)测定样品粒度,每个样品重复测定3次;按照十五层筛法^[8]划分样品粒度分布区间为:1~53、>53~75、>75~106、>106~150、>150~212、>212~300、>300~425、>425~600、>600~850、>850~1 180、>1 180~1 700、>1 700~2 360、>2 360~3 350、>3 350~4 750

和 $>4750\ \mu\text{m}$ ；以 15 个区间中分布最大值所在的 3 个区间为粒度分布的目标区间。根据样品在各区间的分布情况计算样品在目标区间的占比；按照以下公式计算重量几何平均粒径 (d_{gw}) 和重量几何标准差 (S_{gw})。其中，粒度大小以 d_{gw} 表示，粒度分布状况以 S_{gw} 表示。 d_{gw} 值越小，表示粉碎粒度越小； S_{gw} 值越小，表示粉碎成品粒度越均匀^[8]。

$$d_{\text{gw}} = 1/\log \left[\frac{\sum W_i \log d_i}{W} \right];$$

$$S_{\text{gw}} = 1/\log \left[\frac{\sum W_i (\log \bar{d}_i - \log d_{\text{gw}})^2}{W} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\bar{d}_i = \sqrt{d_i \times d_{i+1}}.$$

式中： d_i 为第 i 层筛孔尺寸， μm ； d_{i+1} 为比 i 层筛大一号的筛孔尺寸， μm ； $\bar{d}_i$ 为第 i 层筛上物的几何平均直径， μm ； W_i 为第 i 层筛上物比例； W 为粉体试样质量，g。

1.4 玉米粉碎粒度预测模型的构建

玉米粉碎粒度模型的构建采用 SAS 公司的 JMP 软件，使用最小二乘法拟合线性回归方程，以简便地求得未知数据，并使这些数据与实际数据之间误差的平方和为最小。预测值与实际值的拟合置信曲线显示在杠杆图中，可直观地表明所关注的检验在 5% 水平下是否显著。若曲线之间 95% 的置信区间包含表示假设的水平线，则效应不显著；若曲线之间 95% 的置信区间跨越水平线，则效应显著。此外，杠杆图可直观地演示在模型中添加辊间隙或线速度后各点对检验的影响，即水平方向距离图中心较远的点与接近中心的点相比，对辊间隙或线速度检验的影响更大。

1.5 数据统计与分析

试验数据采用 Excel 2010 软件整理，结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示；采用 SPSS 19.0 进行方差分析和显著性检验。单因素方差分析采用 Duncan 氏法进行处理间均值的多重比较，双因素试验采用 S-N-K (Student Newman Keuls) 法进行多重比较，以 $P<0.05$ 作为差异显著性判断标准；各因素对总变异的影响程度用 Eta^2 值表示， Eta^2 值越大，说明各因素对指标的影响程度越大。

2 结果与分析

2.1 饲用玉米理化指标

试验饲用玉米理化指标为：水分含量 11.13%，粗蛋白含量 8.41%，总能 16.49 MJ/kg，硬度 256.87 N，容重 772.68 g/L。

2.2 辊式粉碎机粉碎结果

当辊间隙为 0.5 mm 时，粒度分布的最大值落在 850~1 180 μm ，目标区间为 600~1 700 μm ；当辊间隙为 1.0 mm 时，粒度分布的最大值落在 1 180~1 700 μm ，目标区间为 850~2 360 μm ；当辊间隙为 1.5 mm 时，粒度分布的最大值落在 1 700~2 360 μm ，目标区间为 1 180~3 350 μm 。

由表 1 可知： d_{gw} 以处理 7 最大、处理 3 最小，且与其他处理差异显著 ($P<0.05$)； S_{gw} 以处理 3 最小；目标区间占比以处理 5 最高；即：当辊间隙为 1.5 mm、线速度为 4 m/s 时， d_{gw} 值最大；当辊间隙为 0.5 mm、线速度为 8 m/s 时， d_{gw} 和 S_{gw} 值均最小；当辊间隙为 1.0 mm、线速度为 6 m/s 时，目标区间占比最高。由因子间结果分析可知：辊间隙水平显著影响辊式粉碎机粉碎玉米的 d_{gw} 、 S_{gw} 和目标区间占比 ($P<0.05$)，随着辊间隙的增大， d_{gw} 和 S_{gw} 均增大，目标区间占比降低；线速度水平显著影响辊式粉碎机粉碎玉米的 d_{gw} ($P<0.05$)，随着线速度增加， d_{gw} 减小；辊间隙和线速度的交互作用显著影响 d_{gw} ($P<0.05$)。由 Eta^2 值可知：辊间隙水平对 d_{gw} 的影响程度最大。

2.3 辊式粉碎机粉碎预测模型构建

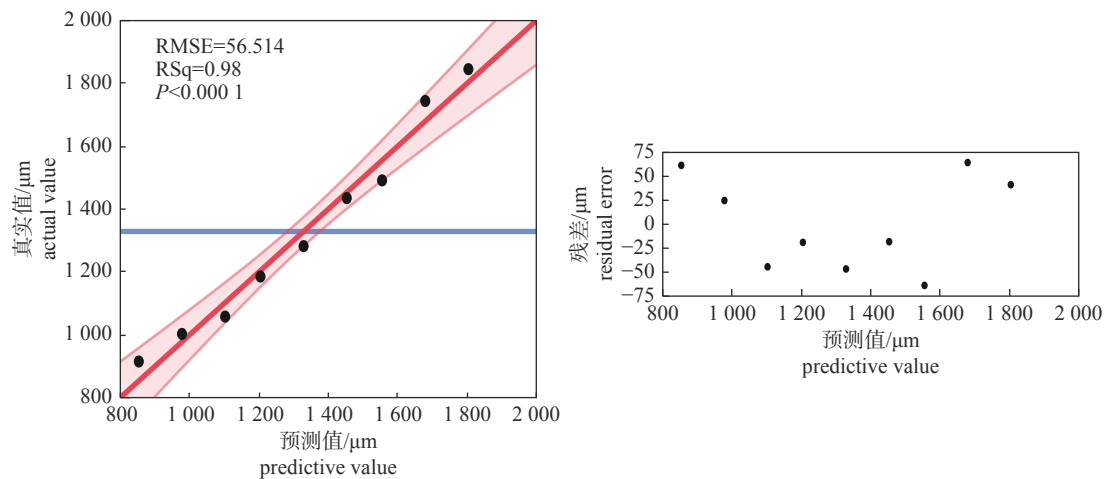
由图 1 可知：辊式粉碎机粉碎工艺参数对 d_{gw} 预测值的均方根误差为 56.514，决定系数为 0.98；预测值的残差多数在 $\pm 50\ \mu\text{m}$ 以内。由图 2 可知：杠杆图曲线置信区间跨越粉碎粒度均值的水平线，说明辊间隙与线速度 2 个因子对 d_{gw} 影响显著 ($P<0.05$)。采用 JMP 软件中的最小二乘法多元线性回归模型拟合得出辊式粉碎机工艺参数的计算粒度模型为： $d_{\text{gw}}=701.82X_1-62.23X_2+1\ 000.30$ (X_1 为辊间隙， X_2 为线速度)。

由图 3 可知：辊式粉碎机粉碎工艺参数对 S_{gw} 预测值的均方根误差为 0.0572，决定系数为 0.84；预测值的残差多数在 $\pm 0.05\ \mu\text{m}$ 以内。由图 4 可知：杠杆图曲线置信区间跨越粉碎粒度均值的水平线，说明辊间隙与线速度 2 个因子对 S_{gw} 影响

表 1 不同粉碎工艺条件对玉米 d_{gw} 、 S_{gw} 和目标区间占比的影响

Tab. 1 Effect of different grinding process conditions on the maize d_{gw} , S_{gw} and target interval proportion					
处理组 treatment group	辊间隙/mm roll gap	线速度/(m·s ⁻¹) linear velocity	$d_{gw}/\mu\text{m}$	$S_{gw}/\mu\text{m}$	目标区间占比/% target range ratio
1	0.5	4	1 057.90±16.87 f	2.24±0.07 cd	41.08±3.20 ab
2	0.5	6	1 002.65±18.36 f	2.20±0.04 d	43.43±1.69 ab
3	0.5	8	914.87±18.81 g	2.19±0.06 d	44.35±1.53 ab
4	1.0	4	1 435.02±68.78 c	2.34±0.08 bc	39.55±6.56 ab
5	1.0	6	1 282.08±26.29 d	2.22±0.04 d	45.80±0.90 a
6	1.0	8	1 185.37±54.05 e	2.40±0.08 ab	40.01±2.80 ab
7	1.5	4	1 845.43±25.96 a	2.47±0.07 a	38.44±5.05 b
8	1.5	6	1 744.07±46.32 b	2.49±0.05 a	38.89±0.78 b
9	1.5	8	1 491.38±16.32 c	2.46±0.03 a	38.14±1.84 b
主效应 main effect					
	0.5		991.81±64.39 c	2.21±0.06 c	42.95±2.45 a
	1.0		1 300.83±118.19 b	2.32±0.10 b	41.79±4.69 a
	1.5		1 693.62±160.33 a	2.47±0.05 a	38.49±2.73 b
		4	1 446.12±343.19 a	2.35±0.12 a	39.69±4.58 a
		6	1 342.93±325.49 b	2.30±0.14 a	42.71±3.21 a
		8	1 197.21±251.56 c	2.35±0.13 a	40.83±3.32 a
P值 P-value					
	辊间隙 roll gap		0.00	0.00	0.03
	线速度 linear velocity		0.00	0.21	0.17
	辊间隙×线速度 roll gap×linear velocity		0.00	0.06	0.37
Eta ² 值 Eta ² value					
	辊间隙 roll gap		0.99	0.82	0.33
	线速度 linear velocity		0.92	0.16	0.18
	辊间隙×线速度 roll gap×linear velocity		0.64	0.38	0.20

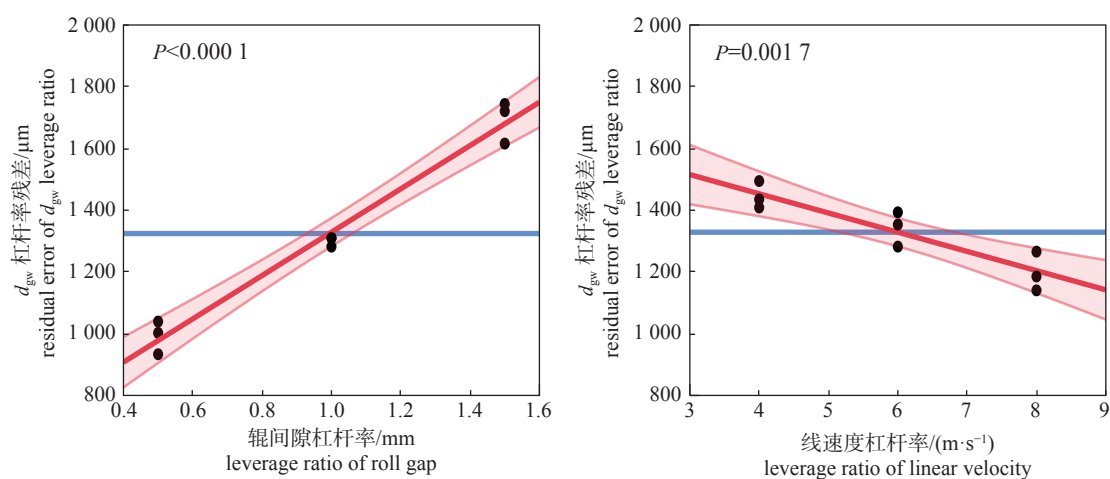
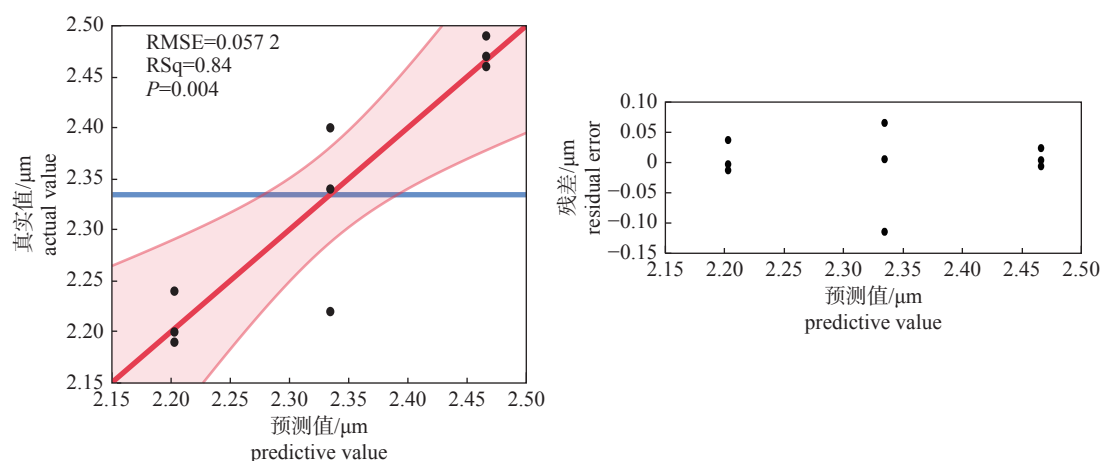
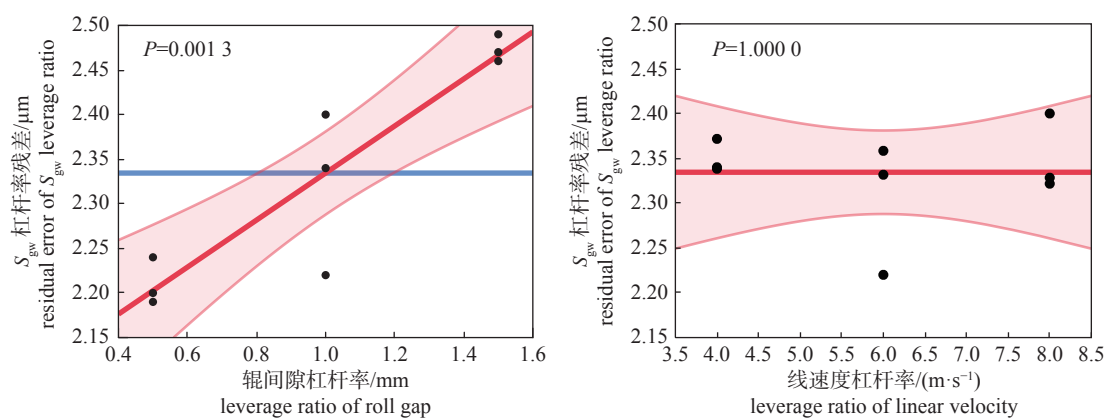
注: 相同因素下, 同列数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$).
Note: Under the same conditions, values with different lowercase letters in the same column mean significant difference ($P<0.05$).



注: 蓝线表示粉碎粒度均值的水平线, 红色实线为拟合线, 红色区域表示 95% 的置信区间; RMSE 为均方根误差, RSq 为决定系数; 下同。
Note: The blue line represents the horizontal line of the mean comminution particle size, the thick solid red line represents the fitting line, and the red area represents the 95% confidence interval; RMSE means root mean square error, RSq means determining factor; the same as below.

图 1 辊式粉碎机粉碎工艺参数对 d_{gw} 的预测

Fig. 1 The prediction of crushing process parameters of roller crusher for d_{gw}

图 2 辊式粉碎机粉碎工艺参数对 d_{gw} 影响的杠杆图Fig. 2 The effect of leverage figure grinding process of roller crusher for d_{gw} 图 3 辊式粉碎机粉碎工艺参数对 S_{gw} 的预测Fig. 3 The prediction of crushing process parameters of roller crusher for S_{gw} 图 4 辊式粉碎机粉碎工艺参数对 S_{gw} 影响的杠杆图Fig. 4 The effect of leverage figure grinding process of roller crusher for S_{gw}

显著 ($P<0.05$)。采用 JMP 软件中的最小二乘法多元线性回归模型拟合得出辊式粉碎机工艺参数的计算粒度模型, $S_{gw}=0.26X_1-3.70e^{-17}X_2+2.07$ (X_1 为辊间隙, X_2 为线速度)。

3 讨论

3.1 辊间隙对粉碎粒度的影响

粉碎是饲料生产中的重要工序之一,是影响饲料质量、产量和生产成本的重要因素。将原料进行粉碎,能增大饲料表面积,增加饲料颗粒和消化酶的接触,有利于营养物质的消化和吸收^[9]。此外,还能改善和提高配料、混合及制粒等后序工段的效率和质量^[10]。在国外,辊式粉碎机是饲料粉碎常用的粉碎机类型^[11]。合理的挤压力和速度差可以使物料在经过研磨区时最大限度地被磨辊之间的间隙磨碎,辊间隙起着类似于锤片式粉碎机筛片的作用,很大程度上决定了被粉碎物料的产品粒度^[12-13]。GEBHARDT 等^[14]指出:辊间隙会显著影响辊式粉碎机的性能,且对成品的粉碎粒度、粒度分布和粉碎效率等有明显影响,通过调节辊间隙,可以得到不同粒度的粉碎成品。本试验中,辊间隙显著影响玉米粉碎成品的 d_{gw} 和 S_{gw} ($P<0.05$),减小辊间隙,增加两辊对原料的磨碾压力,显著减小粉碎粒度。这一结果与 GEBHARDT 等^[14]的观点一致。WONDRA 等^[9]研究发现:成品粒度的均匀性随着原料粉碎粒度的减小有增加的趋势,与本试验结果相同。辊式粉碎机辊间隙的减小,改变了物料在粉碎过程中的受力程度,在降低玉米粉碎粒度的同时产生更多粒度一致的细小颗粒。

3.2 快辊表面线速度对粉碎粒度的影响

辊式粉碎机主动辊的转速不同,施加于喂料的剪切力也不相同,最终影响粉碎成品的粒度及其分布^[15-16]。辊式粉碎机的磨辊以不同的速度相对运转,其转速显著高于破碎机和压片机的辊速^[17]。直径 12 英寸磨辊的圆周速度为 7.62~15.24 m/s 或更高,磨辊的线速度越大,物料在单位时间内通过研磨区的数量越多,磨粉机的产量也越高,产生的细粉越多,成品粉碎粒度越小,粒度的一致性越高^[8]。快辊表面线速度越大,单位时间内有较多物料通过研磨区,磨粉机的产量提高;如饲料流量固定不变,通过研磨区的物流层厚度减小,可加强刮剥作用^[8]。PÉREZ-BONILLA 等^[18]

采用辊式粉碎机在辊间隙 0.6 mm、快辊线速度 16.34 m/s 条件下粉碎玉米,所得成品粒径为 955 μm 。本试验所得粉碎玉米的最适快辊表面线速度与以往报道存在一定差异,这可能是由于原料、磨辊尺寸、磨辊齿型和快慢辊转速比不同等原因所致。NIR 等^[19]研究发现:采用辊式粉碎机所得成品的粒度及其分布因磨辊齿型和齿数不同而存在差异。刘社福^[3]指出:两辊速度相同时,辊筒高强度压缩物料并伴随着较弱的切割。辊筒对物料产生碾磨和剪切作用是因两辊之间的速度差使其对物料产生差动作用,这是获得最大碾压能力和较高破碎效率的必需条件。FANG 等^[20]研究发现:转速比会对成品粒度产生影响,转速比为 2.5:1 时粉碎粒度最小。此外,在本试验各辊间隙条件下,快辊线速度对粉碎成品的 S_{gw} 均没有显著影响 ($P>0.05$),表明辊式粉碎机产品粒度的一致性较高,这与 NIR 等^[19]和 AMERAH 等^[21]的研究结果一致。

4 结论

辊式粉碎机的辊间隙显著影响玉米粉碎后颗粒的 d_{gw} 、 S_{gw} 和目标区间占比,增大辊间隙, d_{gw} 和 S_{gw} 随之增大,目标区间占比减小;快辊辊间隙 (X_1)、表面线速度 (X_2) 及二者交互作用会显著影响成品的 d_{gw} ,辊式粉碎机工艺参数计算模型: $d_{gw}=701.82X_1-62.23X_2+1\,000.30$; $S_{gw}=0.26X_1-3.70e^{-17}X_2+2.07$ 。

[参考文献]

- [1] 杜永强. 饲料粉碎工艺设备参数分析[J]. 信阳农专学报, 1998, 8(1): 35.
- [2] 张克平. 辊式磨粉机理及磨辊磨损特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [3] 刘社福. 辊式粉碎机性能分析[J]. 饲料工业, 1991(10): 27.
- [4] 张进凯, 李寒松, 孔凡祝, 等. 6F-1513型对辊粉碎机的研制[J]. 农业装备与车辆工程, 2014(10): 80. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3142.2014.10.019.
- [5] ARNOLD S L, SCHEPERS J S. A simple roller-mill grinding procedure for plant and soil samples[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(3/4): 541. DOI: 10.1081/CSS-120029730.
- [6] 吴圃锦. 对辊式粉碎机工艺特性的试验研究[J]. 饲料工业, 1989(2): 13.
- [7] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [8] 饶应昌. 饲料加工工艺与设备[M]. 北京: 中国农业出

- 版社, 2010.
- [9] WONDRA K J, HANCOCK J D, BEHNKE K C, et al. Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(3): 760. DOI: [10.1016/0168-1605\(94\)00083-I](https://doi.org/10.1016/0168-1605(94)00083-I).
- [10] 孙启波. 筛孔直径对粉碎粒度、生产效率、电耗和颗粒品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [11] ACOSTA J A, PETRY A L, GOULD S A, et al. Enhancing digestibility of corn fed to pigs at two stages of growth through management of particle size using a hammermill or a roller mill[J]. *Translational Animal Science*, 2020, 4(1): 11. DOI: [10.1093/tas/txz146](https://doi.org/10.1093/tas/txz146).
- [12] 顾尧臣. 辊式磨粉机和胶辊磨谷机差速传动工作原理的研究(一)[J]. *粮食与饲料工业*, 2001, 1(2): 3. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6202.2001.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6202.2001.02.002).
- [13] 刘自然, 李东梁, 武文斌. 辊式磨粉机磨辊的受力计算和强度分析[J]. *粮食与饲料工业*, 2009(12): 9. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6202.2009.12.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6202.2009.12.003).
- [14] GEBHARDT J T, PAULK C B, TOKACH M D, et al. Effect of roller mill configuration on growth performance of nursery and finishing pigs and milling characteristics[J]. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(6): 2285. DOI: [10.1093/jas/sky147](https://doi.org/10.1093/jas/sky147).
- [15] 顾鹏程. 碾压磨粉机的研制及应用前景[J]. *粮食与饲料工业*, 2007(6): 13. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6202.2007.06.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6202.2007.06.006).
- [16] BRAUN M B, WECKER H K, YODER A, et al. Effect of mill type and particle size variation on growth performance and carcass characteristics of finishing pigs[J]. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 2018, 4(9): 43. DOI: [10.4148/2378-5977.7691](https://doi.org/10.4148/2378-5977.7691).
- [17] 范恒彦. 磨粉机磨辊驱动方案设计探讨[J]. *陕西理工学院学报(自然科学版)*, 2006, 22(4): 2. DOI: [10.3969/j.issn.1673-2944.2006.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2944.2006.04.001).
- [18] PÉREZ-BONILLA A, FRIKHA M, LÁZARO R P, et al. Type of grinding of the main cereal of the diet affects production of brown egg-laying hens[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2014, 194: 123. DOI: [10.1016/j.anifeedsci.2014.05.012](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.05.012).
- [19] NIR I, PTICHI I, POEL A, et al. Feed particle size and hardness: influence on performance, nutritional, behavioral and metabolic aspects[C]//*Advances in Nutritional Technology World Feed Conference*, 2001.
- [20] FANG Q, BÖLÖNI I, HAQUE E, et al. Comparison of energy efficiency between a roller mill and a hammer mill[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1997, 13(5): 631. DOI: [10.13031/2013.21636](https://doi.org/10.13031/2013.21636).
- [21] AMERAH A M, RAVINDRAN, LENTLE R G, et al. Influence of feed particle size on the performance, energy utilization, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters fed wheat- and corn-based diets[J]. *Poultry Science*, 2008, 87(11): 2320. DOI: [10.3382/ps.2008-00149](https://doi.org/10.3382/ps.2008-00149).

责任编辑: 何馨成