

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.12.019

基于 Hertz-Mindlin 模型的 稻草秸秆参数标定及显著性分析

龚凤, 胡嫚, 鲍安红, 李丹, 高涛, 王春龙

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 稻草秸秆具有环保无污染、绿色可再生、丰富易获得等优点, 近年来逐渐发展为一种环保建筑材料, 如稻草—混凝土复合砌块. 为了准确获取制作稻草—混凝土复合砌块过程中稻草秸秆在钢模具内的接触参数大小, 本文设计了稻草秸秆堆积室内试验, 在此基础上采用 Hertz-Mindlin(no slip)接触模型建立了稻草秸秆离散元模型, 实现了稻草秸秆堆积过程与形态的模拟仿真. 进一步通过设计 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验、Box-Behnken 试验对接触参数进行显著性分析, 建立了休止角与显著性接触参数的二次多项式回归模型, 并以物理试验测定的休止角作为响应目标, 对显著性接触参数寻优标定. 研究表明: 稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数为 0.43, 滚动摩擦系数为 0.24, 碰撞恢复系数为 0.28; 稻草秸秆与钢板的静摩擦系数为 0.20, 滚动摩擦系数为 0.15, 碰撞恢复系数为 0.30. 其中, 稻草秸秆与钢板的静摩擦系数、稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数、稻草秸秆与稻草秸秆的滚动摩擦系数对休止角影响最显著, 而其余接触参数对休止角无显著性影响. 结合物理试验将优化标定的接触参数进行仿真对比, 表明仿真休止角与实测休止角无显著性差异, 其相对误差仅为 0.75%, 验证了接触参数标定的准确性. 研究成果可为进一步探究稻草秸秆在钢模具中的分布成型特征提供重要参考.

关键词: 稻草秸秆; 复合砌块; 堆积试验; 离散元; 参数标定

中图分类号: TP391.9; S210.3 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2022)12-0186-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Parameter Calibration and Significance Analysis of Rice Straw based on Hertz-Mindlin Model

GONG Feng, HU Man, BAO Anhong,
LI Dan, GAO Tao, WANG Chunlong

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Rice straw has the advantages of being environmentally friendly, non-polluting, green and renewable, abundant and easy to obtain. In recent years, it has gradually developed into an environmentally friendly building material, such as straw-concrete composite blocks. In order to accurately obtain the con-

tact parameters of rice straw in the steel mold during the process of making rice straw-concrete composite blocks, this paper is based on the rice straw stacking test, using image processing technology, combining physical experiments and discrete element simulation to optimize the contact parameters. Firstly, the discrete element model of straw was established by using Hertz-Mindlin (no slip) contact model, and the simulation of straw stacking process and morphology were realized. Then, the Plackett-Burman test, the steepest climbing test and the Box-Behnken test were designed to analyze the significance of contact parameters, and a quadratic polynomial regression model was established for the angle of repose and significant contact parameters. Finally, the angle of repose determined by physical test was used as the response target, and the significant contact parameters were optimized and calibrated. The results show that the static friction coefficient between rice straws is 0.43, the rolling friction coefficient is 0.24, and the collision recovery coefficient is 0.28. The static friction coefficient between rice straw and steel plate is 0.20, the rolling friction coefficient is 0.15, and the collision recovery coefficient is 0.30. The static friction coefficient between rice straw and steel plate, the static friction coefficient between rice straw and rice straw, and the rolling friction coefficient between rice straw and rice straw have the most significant effects on the angle of repose, while the other contact parameters have no significant effects on the angle of repose. Combined with physical experiments, the optimized calibrated contact parameters are simulated and compared. It shows that there is no significant difference between the simulated angle of repose and the measured angle of repose, and the relative error is only 0.75%, which verifies the accuracy of contact parameter calibration. The research results can provide important reference value for further exploring the distribution and forming characteristics of rice straw in steel molds.

Key words: rice straw; composite block; stacking experiment; discrete element; parameter calibration

我国是农业生产大国,也是秸秆生产大国.在我国西南地区,水稻作为主要的粮食作物之一,每年都有大量稻草伴随水稻收割产生,稻草是农作物重要的副产品,具有资源丰富、环保无污染、可再生等特点,是工业、农业生产的宝贵资源^[1-3].稻草不仅可当作燃料、饲料、肥料^[4],在建筑工程领域稻草还可作为建筑材料,具有重要的应用价值.

稻草—混凝土复合砌块具有低成本、保温优良、绿色环保的优点,它由稻草秸秆压缩成稻草块后填充至混凝土空心砌块孔洞内形成,使砌筑的墙体兼有保温与承重的功能^[5].稻草块的制备是生产这种新型自保温砌块的重要步骤,需将稻草秸秆置入钢模具中经振荡后压实成型,其稻草块成型装置如图 1 所示.稻草块的密实度与稻草秸秆在钢模具中的分布均匀度密不可分,对复合砌块的特性和功能具有显著影响.因此研究稻草秸秆在钢模具内的接触参数,对分析稻草秸秆在钢模具中的分布成型特征有极其重要意义.目前,众多学者针对稻草秸秆的受力变形特性、保温性能等方面进行了研究.赵吉坤等^[6]对稻草秸秆进行了剪切、径向压缩、拉升的物理试验与模拟仿真,分析对比了稻草秸秆模型的力学特性并验证了模型的有效性.刘新柱等^[7]通过稻草捆压缩试验,探究了在压缩密度相同的情况下,稻草秸秆长度、压缩速度、压力大小之间的关系并建立了数学模型.黎梭君等^[8]采用有限元数值模拟方法,研究了稻草秸秆填充率、稻草块长宽比对混凝土空心砌块保温性的影响.Maraldi 等^[9]分析了打捆密度、打捆方向、加载率对稻草秸秆捆力学性能的影响,确定了稻草捆的力学性能与其几何形状和密度之间的关系.然而,国内外关于稻草秸秆接触参数方面的研究较少,所以研究稻草秸秆的接触参数十分有必要.

离散元方法经过数十年的发展已成为散体力学分析的一种有效工具^[10-12],借助离散元方法能够快速、准确地数值模拟和分析散体颗粒材料的行为特征,反映出颗粒材料的实际物理特性,当今越来越多的国内外专家、学者选择离散元方法对散体颗粒物的接触参数进行最优化标定.马彦华等^[13]将物理试验和仿真优化设计相结合,对苜蓿秸秆离散元仿真接触参数进行标定,并验证了最优参数组合的可靠性.Grima 等^[14]根据崩塌试验中颗粒堆休止角在离散元仿真中分别标定了干、湿颗粒的滚动摩擦系数.向伟等^[15]基于堆积

试验完成对中国南方地区黏壤土参数标定,进一步通过穴孔成型装置的模拟仿真与土槽试验的对比分析,验证了黏壤土物理力学特性的准确性。于庆旭等^[16]采用逆向工程技术,基于粘结颗粒模型,在 EDEM 软件中建立了三七种子离散元模型且完成接触参数标定。吴佳胜等^[17]提出了一种基于响应面优化法,结合图像处理技术和空心圆筒堆积试验对前胡种子物性参数进行了标定。

休止角是散体颗粒材料在堆积过程中运动状态和摩擦特性的宏观表现,与接触材料和材料本身特性相关^[18-21]。本文在稻草秸秆堆积试验的基础上,通过建立稻草秸秆离散元模型和漏斗模型,利用 EDEM 软件完成稻草秸秆下落堆积过程模拟仿真。综合物理试验和模拟仿真结果,以休止角为响应值,依次设计 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验,筛选出显著影响休止角的离散元模型接触参数,建立了休止角与显著性接触参数的二次多项式回归模型,完成了稻草秸秆在钢模具内的接触参数最优化标定。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文选用的试验材料为重庆市北碚区歇马镇农田生长的稻草,经过自然风干、晾晒后进行筛分,选择粗细均匀、截面呈圆形状的稻草备用。试验前,将备用稻草去除叶鞘、茎节、尖端部分后,用切割刀将其切割成平均长度为 4.1 mm 的稻草秸秆。本文以 35.0 g 稻草秸秆为例,进行稻草秸秆堆积试验,并测定其休止角。

1.2 物理试验休止角测定

为确保稻草秸秆能够自由下落,试验选择下口直径为 2.8 cm,上口直径为 14.0 cm,下管长为 5.0 cm,总高为 13.5 cm 的漏斗进行稻草秸秆下落堆积物理试验。试验中,水平接料平板为钢板,调整漏斗下口距接料平板距离为 12.0 cm,如图 2 所示。将称取的 35.0 g 稻草秸秆沿着漏斗上口平面均匀缓慢的倒入漏斗中,直至所有稻草秸秆落下并在接料平板上静止。随后,记录稻草秸秆在接料平板上堆积的半侧形态图像,以测定稻草秸秆堆休止角。为使侧向轮廓图像更加清晰,休止角的测定更加精确,依次对图像进行了灰度处理、二值化处理、边缘线提取和边缘线拟合,如图 3 所示。最终,拟合线段的斜率值即为稻草秸秆堆休止角的正切值。本试验在相同的测试条件下共进行了 5 组,取 5 组试验测定的稻草秸秆堆休止角平均值作为最终试验结果,即稻草秸秆堆的休止角为 37.31°。

1.3 稻草秸秆本征参数确定

建立散体颗粒离散元模型进行模拟仿真,其可靠性关键在于模拟参数的准确性,模拟参数主要包括本征参数和接触参数^[22]。材料的本征参数较为固定,可通过物理试验或查阅文献得到。在稻草秸秆离散元模型参数确定部分,稻草秸秆的本征参数通过室内物理试验测得,密度为 237 kg/m³,剪切模量为 1.0×10⁶ Pa。接料钢板的本征参数依据相关文献^[23-25],取泊松比为 0.3,密度为 8.0×10³ kg/m³,剪切模量为 7.0×10¹⁰ Pa。



图 1 稻草块成型装置



图 2 休止角测定装置

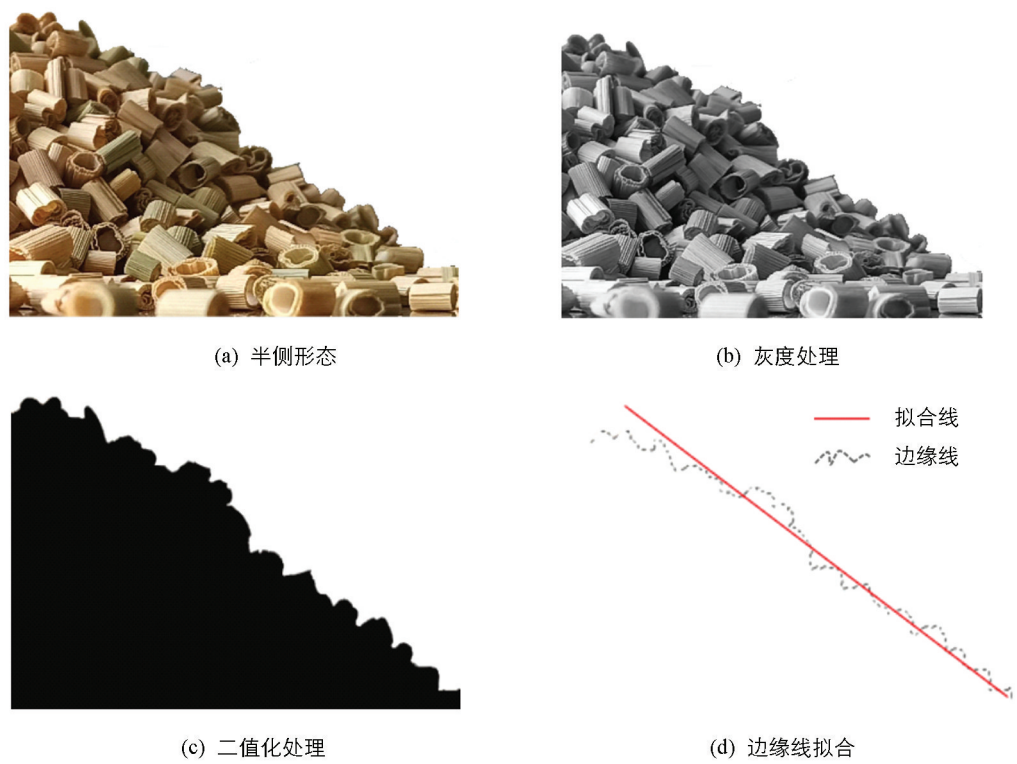


图 3 休止角图像处理

1.4 稻草秸秆接触参数确定

1.4.1 静摩擦系数测定

稻草秸秆与稻草秸秆、稻草秸秆与钢板间的静摩擦系数利用 MS120-A 斜面摩擦计测定, 试验装置如图 4 所示. 测定前, 用细线将钢板固定在木板上, 保持钢板中心点与木板自由端距离为 24.0 cm. 钢板随木板缓慢转动过程中保持相对静止状态. 测定时, 首先将稻草秸秆放置在钢板中央, 秸秆中心轴沿着下滑方向放置, 然后缓慢转动木板自

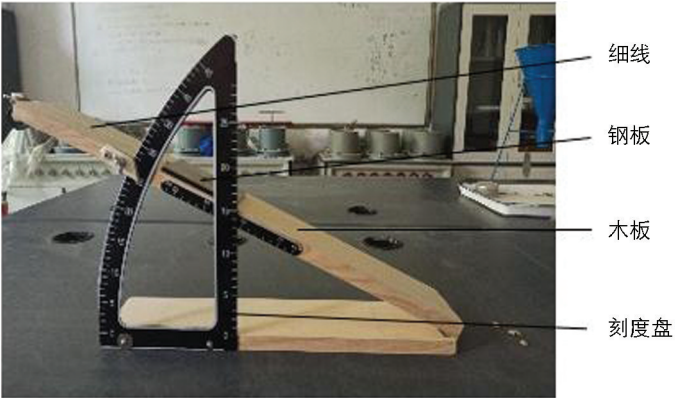


图 4 静摩擦系数测定装置

由端, 当稻草秸秆开始滑移时, 记录下此时木板倾斜角度, 由式(1)可算得静摩擦系数. 经多组试验, 测得稻草秸秆与钢板的静摩擦系数保持在 0.10~0.35 的范围. 同理, 在钢板面上粘结稻草外表皮, 经多组试验, 测得稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数范围为 0.20~0.50.

$$\mu = \tan \theta$$

(1)

上式中 μ 为静摩擦系数, θ 为木板倾斜角度.

1.4.2 滚动摩擦系数测定

同静摩擦系数测定方法一致, 稻草秸秆与稻草秸秆、稻草秸秆与钢板间的滚动摩擦系数可通过试验测定得到. 经多组试验, 稻草秸秆与钢板的滚动摩擦系数范围为 0.05~0.25, 稻草秸秆与稻草秸秆的滚动摩擦系数范围为 0.10~0.40.

1.4.3 碰撞恢复系数测定

碰撞恢复系数是反映物体在碰撞时变形恢复能力的参数, 其结果为测量物体在碰撞分离后的法向速度

向速度, m/s.

经多组试验, 由式(9)计算得出稻草秸秆与钢板的碰撞恢复系数范围为 0.10~0.50, 稻草秸秆与稻草秸秆的碰撞恢复系数范围为 0.15~0.40.

2 仿真模型与软件参数

2.1 稻草秸秆模型的建立

稻草秸秆堆积试验仿真模型的建立与计算通过软件 EDEM 完成, 在 EDEM 软件中 Hertz-Mindlin(no slip)模型作为一种基本的接触模型, 其能够较好地表现出颗粒物料之间的接触效果, 因此, 本文根据稻草秸秆的物理特性, 选用 Hertz-Mindlin(no slip)接触模型建立了其离散元仿真模型. 在软件中, 每颗稻草秸秆单元由 330 个半径为 0.35 mm 的球形颗粒线性排列而成, 形成的空心稻草秸秆模型长度为 4.10 mm, 直径为 4.20 mm, 如图 6 所示.

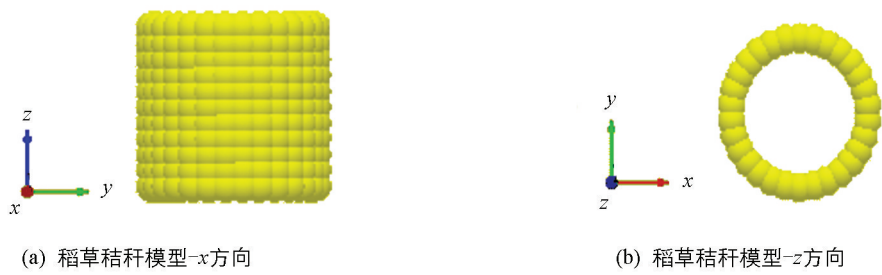


图 6 稻草秸秆离散元模型

2.2 仿真软件参数设置

漏斗模型采用 SOLIDWORKS 软件建立, 模型尺寸与物理试验漏斗保持一致, 已建成的漏斗模型可导入 EDEM 软件仿真使用. 漏斗模型下口至接料平板中心距离为 12.0 cm, 接料平板尺寸为 20.0 cm×20.0 cm. 在漏斗上口表面创建半径为 7.0 cm 的动态颗粒生成平面, 共生成 35.0 g 稻草秸秆. 稻草秸秆在重力作用下以初速度为 1.5 m/s 竖直向下运动, 模拟仿真总时间为 7 s, 时间步长为 $3.594\ 6\times10^{-6}$ s, 网格尺寸为 $3R_{\min}$.

3 稻草秸秆接触参数的优化标定

3.1 稻草秸秆参数水平编码

Plackett-Burman 试验是基于目标响应与各因素间的关系, 比较每个因素两水平间的差异来确定各因素对响应值的影响显著性^[27]. 为了快速有效地筛选出对休止角影响显著的参数, 本文以物理试验测定的接触参数范围值为依据, 将每个试验因素取两水平来进行分析, 分别取最小值为低水平(−1), 最大值为高水平(+1), 各参数水平编码如表 1 所示.

表 1 稻草秸秆参数水平编码表

参数	低水平(−1)	高水平(+1)
稻草秸秆泊松比(N_1)	0.30	0.50
稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数(N_2)	0.20	0.50
稻草秸秆与稻草秸秆的滚动摩擦系数(N_3)	0.10	0.40
稻草秸秆与稻草秸秆的碰撞恢复系数(N_4)	0.15	0.40
稻草秸秆与钢板的静摩擦系数(N_5)	0.10	0.35
稻草秸秆与钢板的滚动摩擦系数(N_6)	0.05	0.25
稻草秸秆与钢板的碰撞恢复系数(N_7)	0.10	0.50

3.2 Plackett-Burman 试验

本文应用 Design Expert 软件进行 Plackett-Burman 试验方案设计, Plackett-Burman 试验设计因素共有 11 个, 其中 $N_1 \sim N_7$ 延用表 1 各参数水平设置, $N_8 \sim N_{11}$ 为空白列用于误差分析. 基于 Plackett-Burman 试验方案, 共进行 12 组试验, 每组试验重复 3 次, 取其平均值作为单组试验结果, 试验方案及结果如表 2 所示.

表 2 Plackett-Burman 试验方案设计与结果

序号	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	休止角(θ)/°
1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	31.81
2	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	37.56
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	11.05
4	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	34.22
5	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	51.69
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10.27
7	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	16.63
8	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	29.83
9	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	40.94
10	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	37.96
11	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	10.35
12	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	37.19

对 Plackett-Burman 试验结果进行显著性分析, 分别得到了 7 个试验参数的效应、均方和、影响率以及显著性排序, 如表 3 所示. 由表 3 可知, 稻草秸秆与钢板的静摩擦系数(N_5)、稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数(N_2)、稻草秸秆与稻草秸秆的滚动摩擦系数(N_3)对稻草秸秆休止角影响显著, 合计影响率为 95.18%. 其中, 稻草秸秆与钢板的静摩擦系数(N_5)影响率最高, 其余接触参数对稻草秸秆休止角合计影响率为 4.82%, 无显著性影响.

表 3 Plackett-Burman 试验结果显著性分析

参数	效应	均方和	影响率/%	显著性排序
N_1	-3.43	35.23	1.69	4
N_2	12.83	494.08	23.67	2
N_3	9.59	275.90	13.22	3
N_4	-1.01	3.08	0.15	6
N_5	20.14	1216.86	58.29	1
N_6	-3.17	30.15	1.44	5
N_7	0.31	0.28	0.01	7

3.3 最陡爬坡试验

将 Plackett-Burman 试验分析得到的 3 个显著性参数进行最陡爬坡试验, 共进行 6 组试验, 每组试验重复 3 次, 取其平均值作为单组试验结果. 为了实现快速接近参数最优值, 在范围值内将各显著性接触参数分别以 0.06, 0.06, 0.05 的步长依次递增设置, 如表 4 所示. 随着显著性参数值的增加, 仿真休止角逐步增大, 相对误差先减小后增大. 在第 4 组试验时, 仿真休止角最接近物理试验休止角, 相对误差最小, 可知各显著性参数最优值在第 4 组试验附近. 在模拟仿真时其他参数取值: 稻草泊松比为 0.40, 稻草秸秆与稻草秸秆的碰撞恢复系数为 0.28、稻草秸秆与钢板的滚动摩擦系数为 0.15、稻草秸秆与钢板的碰撞恢复系数为 0.30.

表 4 最陡爬坡试验方案设计与结果

序号	N_2	N_3	N_5	休止角 $\theta/^{\circ}$	相对误差/%
1	0.20	0.10	0.10	10.26	72.50
2	0.26	0.16	0.15	21.52	42.32
3	0.32	0.22	0.20	33.63	9.86
4	0.38	0.28	0.25	39.15	4.93
5	0.44	0.34	0.30	47.17	26.43
6	0.50	0.40	0.35	53.41	43.15

3.4 显著性参数水平编码

以最陡爬坡试验方案设计中第 3,4,5 组试验参数组合为依据,对显著性接触参数进行水平编码,将第 3 组试验参数设置为低水平(−1),第 4 组试验参数设置为中水平(0),第 5 组试验参数设置为高水平(+1). 显著性参数水平编码如表 5 所示.

表 5 显著性参数水平编码表

水平	N_2	N_3	N_5
低水平(−1)	0.32	0.22	0.20
中水平(0)	0.38	0.28	0.25
高水平(+1)	0.44	0.34	0.30

3.5 Box-Behnken 试验

为了寻求最优参数值,依照表 5 显著性参数水平编码应用 Design Expert 软件进行 Box-Behnken 试验方案设计. 在模拟仿真时其他非显著性接触参数同 Plackett-Burman 试验取值,共进行 17 组试验,每组试验重复 3 次,取其平均值作为单组试验结果,Box-Behnken 试验方案设计及结果如表 6 所示.

表 6 Box-Behnken 试验方案设计与结果

序号	N_2	N_3	N_5	休止角 $\theta/^{\circ}$
1	1	−1	0	41.59
2	1	0	−1	39.13
3	0	0	0	40.61
4	0	1	−1	37.47
5	1	1	0	45.18
6	0	0	0	41.14
7	0	1	1	46.23
8	0	−1	1	41.55
9	1	0	1	44.32
10	−1	−1	0	38.17
11	0	−1	−1	36.46
12	−1	0	−1	33.06
13	0	0	0	41.46
14	−1	0	1	39.61
15	−1	1	0	38.94
16	0	0	0	41.40
17	0	0	0	40.58

根据表 6 中 Box-Behnken 试验结果进行多元回归拟合分析,可以得到稻草秸秆堆体止角与 3 个显著性接触参数的二次多项式方程为

$$\theta = 41.04 + 2.55N_2 + 1.26N_3 + 3.20N_5 + 0.71N_2N_3 - 0.34N_2N_5 + 0.92N_3N_5 - 0.73N_2^2 + 0.66N_3^2 - 1.28N_5^2$$

(10)

针对 Box-Behnken 试验结果进行方差分析,结果如表 7 所示.从表中方差分析结果可知,回归方程的 p 值小于 0.000 1,呈现休止角回归模型极显著性,可以运用此二次多项式方程进行目标休止角推算.变异系数 $C.V.=1.2\%$,精密度(Adeq Precision)为 34.5786,失拟项 $p=0.2953$,表明回归方程具有极高的精确度.决定系数 $R^2=0.990\,0$,校正决定系数 $R^2_{\text{adj}}=0.977\,2$,两者都非常接近于 1,表明相关性好,可靠度高,该拟合方程有意义.稻草秸秆与钢板的静摩擦系数(N_5)、稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数(N_2)对休止角影响极其显著;交互作用项(N_3N_5)、二次项(N_5^2)、稻草秸秆与稻草秸秆的滚动摩擦系数(N_3)对休止角影响显著;其余交互作用项和二次项对休止角影响不显著.

表 7 回归模型方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
模型	163.37	9	18.15	77.15	<0.000 1
N_2	52.22	1	52.22	221.97	<0.000 1
N_3	12.63	1	12.63	53.66	0.000 2
N_5	81.86	1	81.86	347.92	<0.000 1
N_2N_3	1.99	1	1.99	8.45	0.022 8
N_2N_5	0.46	1	0.46	1.97	0.203 7
N_3N_5	3.37	1	3.37	14.31	0.006 9
N_2^2	2.26	1	2.26	9.61	0.017 3
N_3^2	1.86	1	1.86	7.91	0.026 1
N_5^2	6.85	1	6.85	29.10	0.001 0
残差	1.65	7	0.235 3		
失拟项	0.934 4	3	0.311 5	1.75	0.295 3
纯误差	0.712 5	4	0.178 1		
总和	165.02	16			

$$R^2=0.990\,0; R^2_{\text{adj}}=0.977\,2; C.V.=1.2\%; \text{Adeq Precision 为 } 34.578\,6$$

3.6 最优参数组合数值模拟与实际验证

以物理实验测定的休止角 37.31° 为目标值,对回归模型进行优化求解,在求出的多种组合解中,逐一地选择每组解进行模拟仿真,仿真时其余接触参数同 Plackett-Burman 试验取值.经过多次与物理试验结果验证对比,最终筛选出与物理试验休止角最为接近的接触参数值如下:稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数为 0.43,稻草秸秆与稻草秸秆的滚动摩擦系数为 0.24,稻草秸秆与钢板的静摩擦系数为 0.20.将上述优化标定的接触参数用于离散元模型仿真,经 3 次重复试验,仿真结果分别为 $37.33^\circ, 37.74^\circ, 37.70^\circ$,平均值为 37.59° ,与物理试验休止角的相对误差为 0.75%,结果表明,仿真休止角与物理试验休止角基本一致,如图 7 所示.



图 7 模拟仿真结果与物理试验结果对比

4 结论

本文根据碰撞恢复系数测定原理和利用 MS120-A 斜面摩擦计对稻草秸秆接触参数范围值进行测定. 综合运用离散元方法、三维建模技术、图像处理技术实现稻草秸秆堆积仿真及休止角测定, 并借助 Design Expert 软件开展参数优化方案设计, 最终对制作稻草—混凝土复合砌块过程中稻草秸秆在钢模具中的接触参数进行最优化标定, 得出下列结论:

- 1) 通过物理试验测出稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数范围为 0.20~0.50, 滚动摩擦系数范围为 0.10~0.40, 碰撞恢复系数范围为 0.15~0.40; 稻草秸秆与钢板的静摩擦系数范围为 0.10~0.35, 滚动摩擦系数范围为 0.05~0.25, 碰撞恢复系数范围为 0.10~0.50.
- 2) 结合物理试验和模拟仿真, 以物理试验休止角为目标值, 对回归模型进行优化求解, 得到接触参数标定结果为: 稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数为 0.43, 滚动摩擦系数为 0.24, 碰撞恢复系数为 0.28; 稻草秸秆与钢板的静摩擦系数为 0.20, 滚动摩擦系数为 0.15, 碰撞恢复系数为 0.30. 以标定的接触参数进行模拟仿真, 结果表明, 仿真休止角与物理试验休止角无显著性差异, 相对误差为 0.75%, 试验结果在允许误差范围内.
- 3) 应用 Plackett-Burman 试验, 筛选出对稻草秸秆休止角影响最显著的 3 个接触参数, 其显著性排序依次为: 稻草秸秆与钢板的静摩擦系数(N_5)、稻草秸秆与稻草秸秆的静摩擦系数(N_2)、稻草秸秆与稻草秸秆的滚动摩擦系数(N_3), 其他接触参数对稻草秸秆休止角无显著性影响.

参考文献:

[1] 李胜男, 纪雄辉, 邓凯, 等. 区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 221-228.

[2] 毕于运, 王红彦, 王道龙, 等. 中国稻草资源量估算及其开发利用 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 137-143.

[3] 卫洪建, 杨晴, 李佳硕, 等. 中国农作物秸秆资源时空分布及其产率变化分析 [J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1265-1273.

[4] 张露, 郭晴. 秸秆资源化利用的大气污染物排放机理、时空规律与减排策略研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(7): 143-153.

[5] 余亚琳, 鲍安红, 孟二从, 等. 内嵌草砖混凝土复合砌块使用性能试验研究 [J]. 混凝土, 2020(4): 125-127, 137.

[6] 赵吉坤, 宋武斌, 李晶晶. 基于 EDEM 的水稻秸秆建模及力学性能分析 [J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1086-1093.

[7] 刘新柱, 王玉花, 韩平, 等. 稻草秸秆压缩特性研究 [J]. 农机化研究, 2016, 38(6): 225-229.

[8] 黎桢君, 鲍安红, 饶凯, 等. 自保温混凝土—秸秆复合砌块热工性能研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(12): 85-90.

[9] MARALDI M, MOLARI L, REGAZZI N, et al. Analysis of the Parameters Affecting the Mechanical Behaviour of Straw Bales Under Compression [J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 179-193.

[10] MARTIN C L, BOUVARD D, SHIMA S. Study of Particle Rearrangement During Powder Compaction by the Discrete

- Element Method [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003, 51(4): 667-693.
- [11] SWEIJEN T, HASSANIZADEH S M, ASLANNEJAD H, et al. The Effect of Particle Shape on Porosity of Swelling Granular Materials: Discrete Element Method and The Multi-sphere Approximation [J]. Powder Technology, 2020, 360: 1295-1304.
- [12] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展 [J]. 力学进展, 2003, 33(2): 251-260.
- [13] 马彦华, 宋春东, 宣传忠, 等. 苜蓿秸秆压缩仿真离散元模型参数标定 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 22-30.
- [14] GRIMA A P, WYPYCH P W. Development and Validation of Calibration Methods for Discrete Element Modelling [J]. Granular Matter, 2011, 13(2): 127-132.
- [15] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116-123.
- [16] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123-132.
- [17] 吴佳胜, 曹成茂, 谢承健, 等. 前胡种子物性参数测定及其离散元仿真模型参数标定 [J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(4): 180-189.
- [18] 刘军, 于刚, 赵长兵, 等. 不同尺度分布散粒材料砂堆形成过程的二维离散元模拟 [J]. 计算力学学报, 2008, 25(4): 568-573.
- [19] 贾旭光, 陈曦, 李鑫. 不同粒度和堆载形态下散体瞬时自然安息角的实验研究 [J]. 现代矿业, 2015, 31(1): 25-27, 45.
- [20] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42.
- [21] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115-122.
- [22] 邢洁洁, 张锐, 吴鹏, 等. 海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 158-166.
- [23] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-Dimensional Discrete Element Modelling (DEM) of Tillage: Accounting for Soil Cohesion and Adhesion [J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.
- [24] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定 [J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 86-92.
- [25] 彭才望, 许道军, 贺喜, 等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 212-218.
- [26] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125-135, 142.
- [27] 王韦韦, 蔡丹艳, 谢进杰, 等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 127-134.

责任编辑 汤振金