

冷鲜波尔山羊肋骨弯曲破坏离散元参数标定

卫佳^{1,2}, 傅佳翌^{1,2}, 王树才^{1,2}, 刘浩蓬^{1,2*}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对羊胴体自动化屠宰中分割等关键环节离散元仿真缺乏准确模型的问题, 以冷鲜波尔山羊肋骨为研究对象, 基于 EDEM 仿真软件开展羊肋骨弯曲破坏离散元仿真建模和各参数标定的研究。首先通过单轴压缩试验测量确定羊肋骨的基本本征参数, 其中泊松比为 0.34, 剪切模量为 4.52×10^8 Pa, 弹性模量为 1.21×10^9 Pa。基于碰撞、斜面法等摩擦方法及摩擦系数仪分别测定了羊肋骨的骨-骨、骨-钢的碰撞恢复系数、静摩擦系数及滚动摩擦系数。然后结合 EDEM 的 Hertz-Mindlin with bonding (HMB) 接触模型进行了羊肋骨弯曲破坏仿真模型构建。经最陡爬坡试验确定了羊肋骨离散元仿真模型的黏结参数范围, 运用响应曲面法分析得出羊肋骨颗粒包括法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力与临界切向应力等 4 个黏结参数的最优值, 分别为 7.07×10^{13} N/m³、 6.22×10^{12} N/m³、 1.34×10^8 Pa 和 1.87×10^8 Pa。最后针对建立的羊肋骨弯曲破坏离散元仿真模型开展了 5 组不同外形尺寸对比试验验证, 研究结果表明, 仿真破坏力与实测破坏力的相对误差不大于 6.49%, 平均相对误差为 4.19%, 本文标定方法正确可行, 仿真模型的标定参数准确可靠。本研究结果可为分析羊胴体分割刀具的作业机理进而优化分割刀具设计提供理论依据和方法参考。

关键词: 羊肋骨; 离散元; 参数标定; 弯曲破坏; 分割; 模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405082

中图分类号: S233.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0285-10

卫佳, 傅佳翌, 王树才, 等. 冷鲜波尔山羊肋骨弯曲破坏离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 285-294. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405082 <http://www.tcsae.org>

WEI Jia, FU Jiayi, WANG Shucai, et al. Calibration of discrete element parameters for the bending failure on the chilled Boer goat ribs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 285-294. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405082 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着中国经济发展水平的不断提升, 国民饮食观念也在逐步改变, 中国羊肉产量和人均消费量逐年增长。资料显示, 中国羊肉产量长期稳居世界第一^[1], 2020 年羊肉产量达到了 492 万 t^[2], 其中, 波尔山羊是世界公认的优质肉用山羊品种^[3], 其产量, 具有代表性 (后文所指均为波尔山羊)。波尔山羊肉产量形成日益增长的规模经济, 但中国波尔山羊肉加工机械化、自动化水平仍然较低。羊胴体分割是屠宰企业的重要环节之一, 中国普遍为人工辅助加工方式, 相比国外自动化专业化高效率作业, 该方式易受到人工操作经验和主观因素等影响, 导致羊肉产品品质参差不齐, 市场竞争力较低, 同时还存在操作效率低、工作环境差、劳动强度大等问题。由此可见, 羊胴体的自动化分割技术的发展是羊胴体屠宰环节自动化程度大幅提升的关键。

目前, 国内对于羊胴体自动分割研究仍处在样机阶段, 羊胴体分割通常采用旋转刀具, 而羊肋骨作为羊胴体最坚硬的部分, 在分割时会使刀具产生较大阻力, 导

致分割速度降低而引起分割效率低的问题, 此外还可能造成分割损耗^[4]。为改善羊肋骨自动分割效率和功耗等问题, 探究末端旋转刀具与羊肋骨动态分割互作机理, 开展末端刀具参数优化研究显得十分必要, 而羊肋骨的离散元仿真标定是羊肋骨分割刀具优化技术研究的前期基础。

近年来, 随着计算机技术的发展与计算方法的研究成果不断涌现, 计算机模拟仿真技术与设计优化方法受到农业工程研究人员关注和重视^[5-7]。其中, 用于物料或动态过程建模的离散元法 (discrete element method, DEM) 在农业机械领域也得到快速发展, 应用前景好^[8]。目前, 离散元建模中的颗粒模型包含 Hertz-Mindlin (HM) 模型、Hertz-Mindlin with Bonding (HMB) 模型、Johnson-Kendall-Robert (JKR) 模型, 黏弹塑性模型 (Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion, EEPA)/高湿黏弹塑性 (Moist Elasto-Plastic Adhesion, MEPA) 模型等。其中, HM 模型为离散元仿真中颗粒参与的基本接触模型, 能够模拟颗粒间的挤压法向力与接触切向力^[9]。目前, 基于 HM 接触模型的研究主要集中在谷物、蔬菜、玉米种子、油菜籽、茶叶、马铃薯、土壤等其他领域^[10-18]。针对外表成型的颗粒紧密对象, HM 模型不能描述用于破坏过程研究的颗粒黏结对象, 研究学者运用表征颗粒黏结关系的 HMB 模型对玉米秸秆^[19]、莲藕^[20-21]、蚕豆^[22]、饲料油菜^[23-24]、油菜薹^[25]、青菜头^[26]、牛肉^[27]等物料进行了离散元仿真参数标定和破坏过程的模拟。对于高湿

收稿日期: 2024-05-13 修订日期: 2024-09-28

基金项目: 国家重点研发计划子课题 (2018YFD0700804-4)

作者简介: 卫佳, 博士, 讲师, 研究方向为农业电气化及自动化。

Email: weijia@mail.hzau.edu.cn

※通信作者: 刘浩蓬, 中级工程师, 研究方向为农业机械化与自动化。

Email: liuhaopeng@mail.hzau.edu.cn

性固液混合对象, 有研究构建了面向猪粪^[28]、含水黑土^[29]、高湿玉米脱出物^[30]等的带表面能的湿颗粒的 JKR 模型。此外, 针对兼具塑性与黏附特征或塑性变形的特殊土壤, 建立了高湿黏弹塑性 (MEPA) 模型^[31]或塑性接触变形 (EPPA) 离散元模型^[32-33]。根据不同特性农业物料对象进行的离散元参数标定已有许多研究, 然而基于离散元法对骨类 (羊肋骨) 的参数标定鲜有报道。

羊肋骨为外表成型且颗粒紧密黏结的脆硬物料, 其脆硬的物理特性与上述文献所研究的物料具有较大差异, 但从上述文献研究对不同种类物料特性的离散元模型分析推断, 羊肋骨可采用 HMB 仿真模型进行表征。申浩翰等^[34]基于 HMB 接触模型构建了岩石离散元模型, 其中黏结参数通过对黏结键的破坏失效进行标定。由于羊肋骨的脆硬特性与岩石近似, 该文献的离散元模型和标定思路为用于弯曲破坏仿真的羊肋骨模型构建提供了有效参考。因此, 本文针对羊肋骨采用 HMB 模型建模。岩石由于内部各组成成分不均匀, 离散元建模时采用尺寸具有一定随机性的颗粒。羊肋骨表面骨密质较薄, 内部骨松质分布均匀, 无明显髓腔空洞, 考虑到骨密质与骨松质参数很难单独进行测量, 故本文将羊肋骨设为同种属性与尺寸的颗粒进行仿真模拟。

本文以波尔山羊肋骨为研究对象, 基于离散元法对羊肋骨进行仿真建模和参数标定。首先采用排水法、单轴压缩试验、斜面法、摩擦系数仪测量和碰撞试验得到本征参数与接触参数, 进而基于 EDEM 仿真软件对羊肋骨构建 HMB 仿真模型, 结合羊肋骨实际弯曲破坏测试物理试验, 通过最陡爬坡试验和响应曲面试验, 确定法向与切向接触刚度、临界法向与临界切向应力等黏结参数, 最后分析仿真峰值破坏力与试验峰值破坏力的相对误差, 验证所标定的羊肋骨黏结参数的准确性。羊肋骨的离散元模型构建可为探究羊胴体与分割机械的互作机理并优化锯切刀具等研究工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 参数测定

1.1.1 羊肋骨本征参数

为保证羊肉品质优良新鲜, 通常会对羊胴体冷冻处理, 故屠宰过程多为冷鲜羊胴体, 为使试验更加贴近实际情况, 试验样本选用温度为 4℃ 的冷鲜波尔山羊肋骨。由于劈半羊胴体分割作业时, 羊肋排为锯切过程中与刀具接触最多的部位, 因此标定羊肋排部位的肋骨对分割技术的研究具有重要意义。本文试样从羊胴体的羊肋排部位进行选取, 其劈半羊体分割线及分割部位、羊肋骨取样范围如图 1 所示。针对羊肋骨参数标定或参数测量试验的不同, 对其试样的尺寸要求也不尽相同。对于外形无要求的试验, 本文选取长轴范围为 8~12 mm、短轴范围为 3~7 mm 的羊肋骨作为试样; 对于滚动摩擦系数测量试验与单轴压缩试验, 本文选取接近羊肋骨截面较圆的试样, 试样直径范围为 5~7 mm, 滚动摩擦试验试

样长度范围为 30~40 mm, 单轴压缩试验试样长度为 10 mm。对于滑动摩擦试验, 试样选取羊肋骨较为平整的一段, 试样长轴范围为 10~12 mm, 试样短轴为 3~4 mm, 试样长度范围为 30~40 mm。为避免羊肋排中羊肉对羊肋骨参数测定的影响, 本文羊肋骨为表面残余羊肉剔除试样。

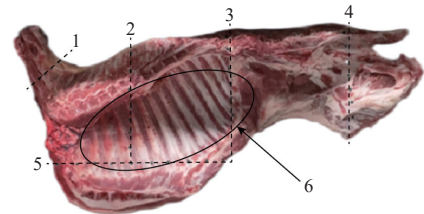


图 1 羊胴体分割部位及羊肋骨取样区
Fig.1 Segmentation site of goat carcass and sampling area of goat ribs

为测定羊肋骨密度, 进行密度测量试验。利用天平测量羊肋骨的质量, 通过量筒用排水法测量羊肋骨的体积确定其密度。进行五组试验, 得到羊肋骨的平均密度为 1.22 g/cm³。

先在羊肋排取样区内选取 5 根羊肋骨, 再对整根羊肋骨的两端进行锯切, 制成 5 节截面呈圆形且高为 10 mm 的羊肋骨试样。测量试样不同高度处的直径, 并标记测量位置, 利用 TMS-Pro 型质构仪进行单轴压缩试验。压缩试验过程如图 2 所示。

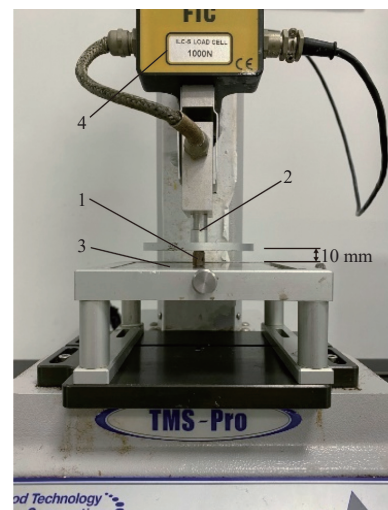


图 2 单轴压缩试验
Fig.2 Uniaxial compression test

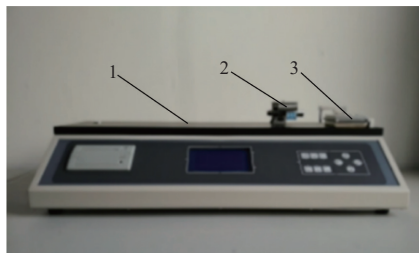
压缩速度设为 10 mm/min, 设定最大压缩距离为 2 mm, 因羊骨为脆硬物料, 弹性模量较大, 当压缩力达到预设极限值时压缩停止。重复进行 5 次试验, 测量相同标记位置的直径变化, 取其平均值作为压缩的横向变

化量, 多次测量试样的高度变化取平均为试样的轴向变化量。参照文献 [21] 中的计算方法求得羊肋骨的泊松比、剪切模量、弹性模量分别为 0.34、 $4.52 \times 10^8 \text{ Pa}$ 和 $1.21 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

1.1.2 羊肋骨接触参数

1) 骨-骨接触系数测定

骨-骨接触系数分为静摩擦系数、滚动摩擦系数以及碰撞恢复系数三种。骨-骨接触系数测量采用 MXD-02 摩擦系数仪, 如图 3 所示。通过该仪器可测得骨-骨动摩擦系数和静摩擦系数。该摩擦系数仪由下压滑块质量与样本质量确定下压力, 通过力传感器与位移传感器测量试样发生滑动与滚动时的摩擦力与位移变化情况, 以此计算出摩擦系数。采用黏结剂将锯切截取的较扁平羊肋骨试样均匀密布地固定在试验台上, 制成试验平面。再将另一羊骨试样黏结在 200 g 的滑块下, 设定驱动滑块相对试验平面以 100 mm/min 的速度做直线运动, 保持牵引方向与摩擦方向平行, 以此模拟羊肋骨之间滑动。同样将截取制得的类圆柱的羊肋骨试样压于滑块下方, 驱动滑块相对试验平面做直线运动, 使得试样在羊骨平面上发生滚动。重复试验 20 次, 测量并计算出羊肋骨间的平均滚动摩擦系数与静摩擦系数。



1. 试验台 2. 拉动装置 3. 滑块
1. Test bench 2. Pulling device 3. Slider

图 3 摩擦系数仪

Fig.3 Friction coefficient instrument

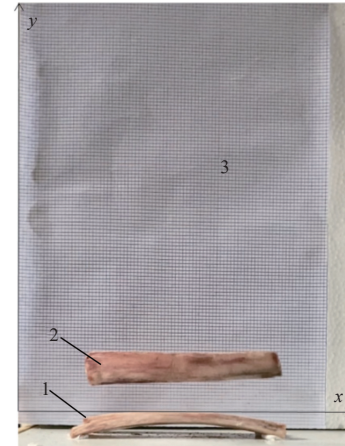
为测定羊肋骨间的碰撞恢复系数, 进行了羊肋骨间的对心碰撞试验。试验时, 先在底部完全固定一根羊肋骨试样, 在纵轴高度 20 cm 处释放第二根羊肋骨, 自由落体至其与下方固定状态羊肋骨试样碰撞, 以下方羊肋骨试样上表面顶点处轴向切线方向为坐标横轴, 垂线方向为坐标纵轴, 建立如图 4 所示坐标系, 试验过程中采用高速摄影仪记录上方羊肋骨碰撞后沿纵坐标方向弹跳的高度, 筛选出 10 次羊肋骨间正面对心碰撞的试验, 计算羊肋骨原位置与弹回高度的比值的平均值, 得到羊肋骨间的碰撞恢复系数^[35]。

2) 骨-钢接触系数测定

骨-钢接触系数分为静摩擦系数、滚动摩擦系数以及碰撞恢复系数三种。

为获取骨-钢摩擦系数, 采用斜面法进行测量。试验前选取符合上文尺寸的羊肋骨的中部制备所需的羊肋骨试样。静摩擦系数测量时, 如图 5a 所示, 为保证试样在斜面上仅能产生滑动, 将两节羊肋骨试样未接触钢板的面使用黏合剂进行粘连, 形成并联结构摆放, 缓慢推动

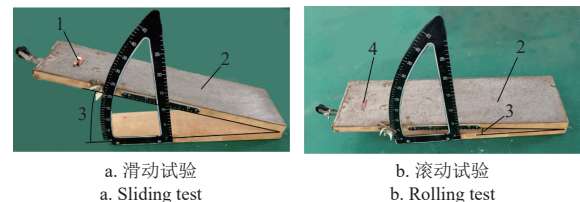
斜面至其发生滑动, 记录该时刻斜面与水平面夹角, 重复 20 次取平均值, 计算得到骨-钢静摩擦系数。在测量羊肋骨和钢的滚动摩擦系数时, 如图 5b 所示, 为方便试样进行滚动, 选取截面较圆的羊肋骨试样进行锯切截取, 再适当剪切与磨制。采用与测定静摩擦系数时一致的试验测量方法, 获取滚动摩擦系数数据, 重复 20 次再取平均值, 可计算得到骨-钢的滚动摩擦系数。



1. 固定羊肋骨试样 2. 下落羊肋骨试样 3. 测量网格
1. Fixed goat rib sample 2. Falling goat rib sample 3. Measuring grid

图 4 羊肋骨对心碰撞试验

Fig.4 Central collision test between a goat rib with another goat rib



a. 滑动试验
a. Sliding test
b. 滚动试验
b. Rolling test
1. 黏结的羊肋骨试样 2. 钢制斜面 3. 倾斜角度 4. 圆柱羊肋骨试样
1. Bonded goat rib sample 2. Steel inclined surface 3. Tilt angle 4. Cylindrical goat rib sample

图 5 骨-钢摩擦系数试验

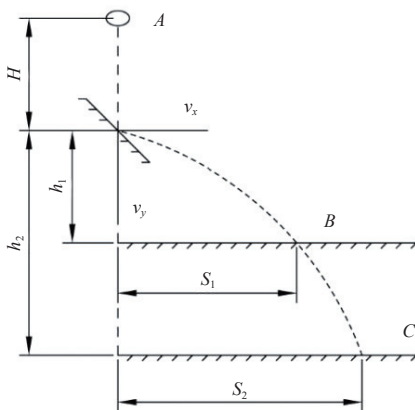
Fig.5 Coefficient of bone-steel friction test

为测定骨-钢碰撞恢复系数, 选取羊肋骨试样, 并在其表面涂上粉末以用于标记试验的碰撞点。试验时如图 6、图 7 所示, 基于单轴压缩试验结果以及预防试验时羊肋骨发生碎裂影响试验结果, 调整台架至高 H 为 20~23 cm, 调整碰撞板与水平面呈 45° 角, 羊肋骨于高度 H 处通过限位环放入, 自由落体直至与碰撞板发生碰撞后做抛物线运动落入沙箱中。对同一羊肋骨进行 10 组重复试验, 并测量得到落点距碰撞点垂直距离 h_1 时的水平距离 S_1 、以及无底座时羊肋骨落入距碰撞点垂直距离 h_2 的沙盘时的水平距离 S_2 , 由此确定羊肋骨在碰撞后的运动轨迹, 按照式 (1)^[36] 重复 10 次试验并取平均, 分别得到羊肋骨碰撞后的水平方向分速度 V_x 和垂直方向分速度 V_y 方向上的分解平均速度。设羊肋骨骨-钢碰撞恢复系数为 e , 按照式 (2)^[36] 进行 10 次重复试验并取平均值, 可得 e 为 0.73。式 (1) 和 (2) 中 g 为重力加速度。



图6 骨-钢碰撞试验

Fig.6 Collision test between bone and steel



注: S_1 为羊肋骨落点距碰撞点垂直距离 h_1 时的水平距离。 S_2 为无底座时羊肋骨落入距碰撞点垂直距离 h_2 的沙盘时的水平距离。 H 为台架高度。羊肋骨碰撞后的水平分速度、垂直分速度分别为 v_x 、 v_y 。

Notes: S_1 is the horizontal distance of the goat rib when it falls at a vertical distance from the collision point. S_2 is the horizontal distance when the goat rib falls into the sandbox at a vertical distance from the collision point in the absence of a base, and H is the height of the stand. The horizontal and vertical components of the velocities after the collision of the goat ribs are v_x and v_y .

图7 骨-钢碰撞模型

Fig.7 Model of collision between bone and steel

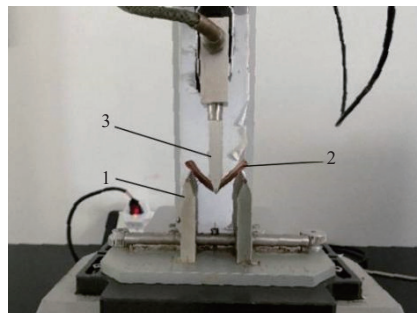
$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gS_1S_2(S_1-S_2)}{2(h_1S_2-h_2S_1)}} \\ v_y = \frac{h_1v_x}{S_1} - \frac{gS_1}{2v_x} \end{cases} \quad (1)$$

$$e = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2} \cdot \cos \left[\arctan \left(\frac{v_y}{v_x} \right) + 45^\circ \right]}{\sqrt{2gH} \cdot \sin 45^\circ} \quad (2)$$

1.1.3 羊肋骨三点弯曲破坏试验与仿真参数

为获取反映黏结模型颗粒间黏结状况的法向与切向刚度、法向与切向应力较为准确的模拟参考数值, 将羊肋骨试样放在有一定距离的两点支撑架上, 在两个支撑点中点上方通过 TMS-Pro 质构仪与下压探头向试样施加载荷, 记录加载过程中的最大弯曲破坏载荷作为后续仿真模拟黏结参数标定试验中的参考与目标值。如图 8 所示, 选取符合上文尺寸的羊肋骨试样, 为适应羊肋骨长度方便固定, 取固定支撑两点间距为 30 mm, 并以 10 mm/min 的速度进行加载。试验材料为 6 根不同尺寸的羊肋骨, 取其中长轴为 9.09 mm, 短轴为 5.61 mm 的羊肋骨为试验样本用于仿真模型参数标定, 其余 5 根羊

肋骨用于验证标定模型的正确性。通过弯曲破坏物理试验, 羊骨受力与位移关系曲线如图 9 所示。试验表明, 在羊肋骨受力小于 450N 时, 羊肋骨的所受力与形变成正比关系, 受力最大时羊肋骨断裂, 随后所受力骤然减小, 得到该试验样本的峰值破坏力大小为 459.75N。



1. 两点支撑架 2. 羊肋骨试样 3. 探头
1. Two point support frame 2. goat rib sample 3. Probe

图8 羊肋骨三点弯曲破坏试验

Fig.8 Three point bending failure test of goat ribs

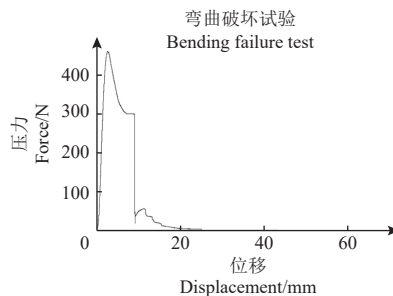


图9 羊肋骨受力与位移曲线图

Fig.9 Force and displacement curve of goat ribs

通过上述各参数测量试验及查阅相关基础数据得到羊肋骨模型的基本本征参数, 如表 1 所示。

表1 羊肋骨弯曲破坏仿真模型本征参数

Table 1 Parameters of goat bone fragmentation simulation model		
参数 Parameter	数值 Value	
羊肋骨泊松比 Poisson's ratio of goat rib ν_1	0.34 ^a	
钢泊松比 Poisson's ratio of steel ν_2	0.30 ^b	
羊肋骨剪切模量	4.52 $\times 10^8$ ^a	
Shear modulus of goat rib G_1 /Pa		
钢剪切模量	7.94 $\times 10^{10}$	
Shear modulus of steel G_2 /Pa		
羊肋骨密度	1 220 ^a	
Density of goat rib ρ_1 /(kg·m ⁻³)		
钢密度	7 850 ^b	
Density of steel ρ_2 /(kg·m ⁻³)		
骨-骨碰撞恢复系数	0.78 ^a	
Coefficient of restitution between goat ribs		
骨-骨静摩擦系数	0.43 ^a	
Coefficient of static friction between goat ribs		
骨-骨滚动摩擦系数	0.07 ^a	
Coefficient of rolling friction between goat ribs		
骨-钢碰撞恢复系数	0.73 ^a	
Coefficient of restitution between goat rib and steel		
骨-钢静摩擦系数	0.65 ^a	
Coefficient of static friction between goat rib and steel		
骨-钢滚动摩擦系数	0.11 ^a	
Coefficient of rolling friction between goat rib and steel		

注: a 表示该项为物理试验测定, b 表示该项为查阅文献获得。

Note: a indicates that the parameter is determined by physical test, and b indicates that the parameter is obtained by consulting literature.

1.2 羊肋骨弯曲破坏仿真模型建立

在 EDEM 软件中, 应用 Hertz-Mindlin 模型进行羊肋骨弯曲破坏试验的仿真与模拟, 因此需要有羊肋骨最基本的物性参数、钢的基础物性参数以及羊肋骨与羊肋骨、羊肋骨与钢之间相互接触碰撞的系数来使模拟更加真实细致。

由于在模拟仿真的过程中涉及到了弯曲变形破坏, 且羊肋骨本身为众多颗粒固结而成的整体, 所以需在 Hertz-Mindlin 模型中表征羊肋骨颗粒间的相互黏结作用, 即采用 Hertz-Mindlin with Bonding 的模型进行模拟与分析。Bonding 键的建立主要由法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力和临界切向应力决定, 这些参数决定了黏结颗粒间所能承受的应力极限及羊肋骨模型的整体脆性与韧性。由于以上参数通过简单试验不能获得, 且无文献记载的骨类物质的黏结参数, 故通过爬坡试验与响应曲面试验确定具体范围与数值。

羊肋骨建模包括三维几何模型建立和弯曲破坏仿真模型构建。首先, 根据弯曲破坏试验环境创建模型, 使用 SolidWorks 进行模拟试验上部下压刀具及用于试验的羊肋骨外壳构建, 模型尺寸外形与真实试验时外形相同, 其三维几何模型如图 10a 所示。其次, 在 EDEM 软件中按照之前得到的本征参数与接触参数创建羊肋骨颗粒模型, 并完成钢的材料定义, 其中由于羊肋骨的尺寸较小, 且切割时为微小粉末, 为了能够得到更加细致的模拟过程并考虑到后续模拟的时间效率, 将羊肋骨颗粒设定为半径 0.5 mm、接触半径 0.6 mm 的球状颗粒。完成设定后将羊肋骨模型导入, 将初始的 virtual 状态变为 physical 状态, 并赋予钢的材质参数, 以该模型为颗粒工厂开始填充颗粒, 填充速度为 20 000 个/s, 用于生成颗粒时间为 0.15 s, 之后静置颗粒至 0.5 s, 使颗粒处于基本静止的稳定状态, 后生成 Bonding 键, 整个羊肋骨模型生成的时间步长为 4.379×10^{-7} s, 羊肋骨离散元模型构建完成, 如图 10b 所示。

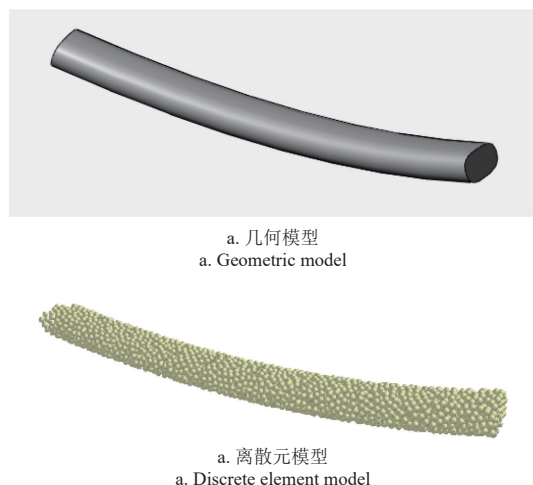


图 10 羊肋骨模型

Fig.10 Model of goat ribs

根据实际试验情况建立下压刀具, 导入 EDEM, 并在 EDEM 中创建两块支撑板, 位置与实际试验时相同,

同样设定为 physical 状态, 并赋予钢的材料参数, 按照实际弯曲破坏试验放置, 由于实际 0.01 m/min 的下压速度过于缓慢导致模拟时间过长, 而通过模拟尝试发现, 适当提升下压速度对获得的峰值破坏力影响极小, 故而为节约模拟时间, 将下压速度设为 0.03 m/s。刀具于 0.7 s 左右接触羊肋骨, 直至羊肋骨被完全切断。切断时间点因不同黏结参数的设置而不同。为得到更精细的模拟过程, 设弯曲破坏过程时间步长为生成模型时间步长的五分之一, 即 8.756×10^{-8} s。整体羊肋骨弯曲破坏仿真模型如图 11 所示。

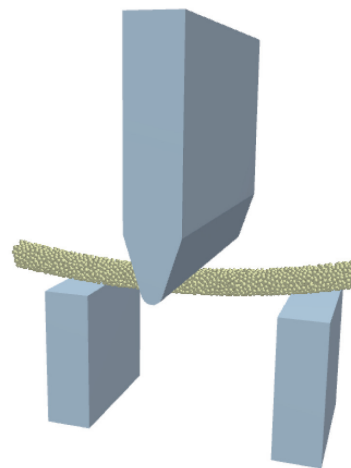


图 11 羊肋骨弯曲破坏仿真模型

Fig.11 Simulation model of goat ribs bending failure

1.3 黏结参数标定试验设计

1.3.1 黏结参数最陡爬坡试验设计

羊肋骨模型整体的承受能力、韧性与脆性由设定的黏结键所决定, 故以弯曲破坏试验得到的断裂状况以及峰值破坏力为模拟试验目标值, 对法向接触刚度 x_1 、切向接触刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 与临界切向应力 x_4 这 4 个影响因素进行分析与标定。

为确定合适的黏结参数标定范围, 先进行最陡爬坡试验, 从一组较小的参数开始试验, 根据每一组最终的弯曲破坏情况与峰值破坏力的大小改变下一组的参数, 不断更改参数直至模拟结果接近并在一定范围内超过实际试验得到的数值, 最终确定较为准确的黏结参数的范围。

由最陡爬坡试验得到了黏结参数的基本范围后, 为保证参数标定过程中参数范围的可靠性, 避免模拟参数最优值超出范围, 选用中心组合设计 (central composite design, CCD) 试验, 选择 4 因素 5 水平, 3 组中心重复试验组, alpha 值选择正交二次型 (orthogonal quadratic) 为 1.547, 共设计 27 组试验。

2 结果与分析

2.1 黏结参数标定

2.1.1 最陡爬坡试验结果

由于没有骨骼类型的黏结参数标定的相关研究, 无法确定黏结参数合理范围以及后续响应曲面试验中心的大致范围, 所以先对这 4 个参数以峰值破坏力以及最终

弯曲破坏情况为目标进行爬坡试验,使参数值不断变化,观察并记录各试验中模拟峰值破坏力的大小与真实值的相对误差。而由于不确定参数具体范围,数值变化范围很大,也会产生数量级的变化,所以每一组试验所选的参数数值的变化量并不相等,且为了使试验更加准确,参数变化的方向也根据前一组试验的结果而变化,最终使目标值逼近真实试验。参数的选择由前一组试验的情况决定,试验过程与结果如表 2 所示。由于骨头弹性模量以及强度远高于藕^[20],其接触刚度以及临界应力也应当远大于藕,因此第一组试验选取大于藕标定得到的黏结参数三个数量级的参数进行尝试。模拟直至第 15 组时羊肋骨模型能够稳定断开,但其峰值过大;因此第 16 组大幅降低临界应力,其峰值过小;在第 17 组时在略微升高临界应力,得到与实际试验结果相近的数值;进一步在第 18 组和第 19 组调整刚度,观察刚度下降对模拟结果的影响,得到刚度下降时峰值应力也会略微下降。由表 2 可知,第 15 组~第 19 组数据对应的羊肋骨模型均为切断状态;而其中第 16 组临界应力下降过多导致峰值相比实际试验破坏力小很多,其峰值大小不符合实际切断情形,故将第 16 组数据进行剔除。最终根据第 15、17、18、19 这 4 组符合实测结果(羊肋骨模型为持续切断状态)的黏结参数数值定出后续标定试验的羊肋骨黏结参数范围,如表 3 所示。

表 2 最陡爬坡试验							
Table 2 Path of steepest ascent method							
序号 No.	法向接 触刚度 x_1 Normal stiffness per unit/ (N m^{-3})	切向接 触刚度 x_2 Shear stiffness per unit area/ (N m^{-3})	临界法向 应力 x_3 Critical normal stress/ Pa	临界切向 应力 x_4 Critical shear stress/ Pa	峰值破 坏力 Peak failure force/N	切断 情况 Cutting situation	相对 误差 Relative error/%
1	5.00×10^{10}	7.00×10^9	5.00×10^9	5.00×10^9	100	未断	78.25
2	5.00×10^{11}	7.00×10^{11}	5.00×10^9	5.00×10^9	600	未断	30.52
3	1.00×10^{11}	1.00×10^{11}	6.00×10^7	6.00×10^7	175	未断	61.93
4	7.00×10^{11}	7.00×10^{11}	1.00×10^7	1.00×10^7	82.5	断	82.05
5	7.00×10^{11}	7.00×10^{11}	6.00×10^7	6.00×10^7	285	断	38.00
6	7.00×10^{11}	7.00×10^{10}	6.00×10^7	6.00×10^6	94	断	79.55
7	7.00×10^{12}	7.00×10^{11}	6.00×10^8	6.00×10^8	450	未断	2.11
8	7.00×10^{12}	7.00×10^{11}	6.00×10^8	6.00×10^7	104	断	77.38
9	4.00×10^{12}	4.00×10^{11}	6.00×10^7	6.00×10^7	73	断	84.12
10	1.00×10^{13}	1.00×10^{12}	6.00×10^8	6.00×10^8	145.3	断	68.39
11	5.00×10^{13}	5.00×10^{12}	2.00×10^8	2.00×10^8	243.3	未断	47.07
12	2.00×10^{13}	2.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^7	107	断	76.72
13	5.00×10^{13}	5.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	360.5	断	21.58
14	2.00×10^{13}	2.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	147	未断	68.02
15	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	2.00×10^8	2.00×10^8	747.4	断	62.58
16	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	6.00×10^7	6.00×10^7	140.8	断	69.37
17	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	478.2	断	4.02
18	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	351	断	23.65
19	6.00×10^{13}	6.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	340.4	断	25.95

由上述仿真模拟试验得到模拟峰值破坏力接近实际峰值破坏力 459.75N 的黏结参数范围后,设置范围上限作为响应曲面的编码 1,范围下限作为响应曲面的编码 -1,范围中值作为编码 0,同时根据 alpha 值扩展最大范围,以保证后续最优值在所选范围之内,编码表如表 4 所示。

表 3 黏结参数范围	
Table 3 Range of bonding parameters	
黏结参数 Bonding parameter	范围 Range
法向接触刚度 x_1 Normal stiffness per unit area/(N m^{-3})	$6 \times 10^{13} \sim 8 \times 10^{13}$
切向接触刚度 x_2 Shear stiffness per unit area/(N m^{-3})	$6 \times 10^{12} \sim 8 \times 10^{12}$
临界法向应力 x_3 Critical normal stress/Pa	$1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8$
临界切向应力 x_4 Critical shear stress/Pa	$1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8$

表 4 黏结参数编码表				
Table 4 Code of bonding parameters				
编码 Coding	黏结参数 Bonding parameter			
	$x_1/(\text{N m}^{-3})$	$x_2/(\text{N m}^{-3})$	x_3/Pa	x_4/Pa
-1.546	6.00×10^{13}	6.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8
-1	6.35×10^{13}	6.35×10^{12}	1.18×10^8	1.18×10^8
0	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8
1	7.65×10^{13}	7.65×10^{12}	1.82×10^8	1.82×10^8
1.546	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	2.00×10^8	2.00×10^8

2.1.2 响应曲面试验结果与分析

利用已测量得到的基本羊肋骨本征参数和爬坡试验确定的黏结参数的合理范围,针对法向接触刚度 x_1 、切向接触刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 以及临界切向应力 x_4 这 4 个黏结参数按照 CCD 原理设计并开展羊肋骨的弯曲破坏仿真试验来进行标定,设置 3 组重复中心水平试验,总共需进行 27 组试验,试验设计及其结果如表 5 所示。

表 5 黏结参数响应曲面试验设计及结果							
Table 5 Response surface test design and results of bonding parameter							
序号 No.	$x_1/(\text{N m}^{-3})$	$x_2/(\text{N m}^{-3})$	x_3/Pa	x_4/Pa	峰值破坏力 Peak failure force/N	误差 Error/N	
1	6.00×10^{13}	6.00×10^{12}	2.00×10^8	2.00×10^8	407	-52.7	
2	6.00×10^{13}	8.00×10^{12}	1.00×10^8	2.00×10^8	487.94	28.24	
3	7.00×10^{13}	8.55×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8	635.1	175.4	
4	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	2.27×10^8	1.50×10^8	675.1	215.4	
5	7.00×10^{13}	5.45×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8	439	-20.7	
6	6.00×10^{13}	6.00×10^{12}	2.00×10^8	1.00×10^8	353.3	-106.4	
7	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	678.9	219.2	
8	6.00×10^{13}	6.00×10^{12}	1.00×10^8	2.00×10^8	347.9	-111.8	
9	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	2.27×10^8	485.2	25.5	
10	8.00×10^{13}	6.00×10^{12}	2.00×10^8	2.00×10^8	524	64.3	
11	6.00×10^{13}	6.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	310.4	-149.3	
12	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	2.00×10^8	2.00×10^8	747.4	287.7	
13	6.00×10^{13}	8.00×10^{12}	2.00×10^8	1.00×10^8	493.59	33.89	
14	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	7.27×10^7	385	-74.7	
15	5.45×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8	480.6	20.9	
16	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	1.00×10^8	2.00×10^8	781.1	321.4	
17	6.00×10^{13}	8.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	357.6	-102.1	
18	6.00×10^{13}	8.00×10^{12}	2.00×10^8	2.00×10^8	583.7	124	
19	8.00×10^{13}	6.00×10^{12}	1.00×10^8	2.00×10^8	374.5	-85.2	
20	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8	557.8	98.1	
21	8.00×10^{13}	6.00×10^{12}	2.00×10^8	1.00×10^8	449.8	-9.9	
22	8.00×10^{13}	8.00×10^{12}	2.00×10^8	1.00×10^8	614.4	154.7	
23	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8	553.5	93.8	
24	8.55×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8	678	218.3	
25	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	7.27×10^7	1.50×10^8	364.6	-95.1	
26	7.00×10^{13}	7.00×10^{12}	1.50×10^8	1.50×10^8	464.9	5.2	
27	8.00×10^{13}	6.00×10^{12}	1.00×10^8	1.00×10^8	385.4	-74.3	

对响应曲面试验结果进行不同形式的拟合分析，拟合效果如表 6 所示。结果表明，运用直线型方程与二次交互型方程拟合时决定系数过低，选用 3 次全模型时模型显著性下降且出现走样（aliased）的情况，所以使用二次全模型方程进行拟合，决定系数 R^2 为 0.901 1。

表 6 四种模型拟合结果
Table 6 Fitting results of four model equation

模型 Model	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	调整决定系数 Adjusted Coefficient of determination	失拟项 Lack of fit P- value (P)	模型 Model P- value (P)
直线型 Linear model	0.773 1	0.731 8	0.419 8	<0.000 1**
二次交互型 Secondary interaction model	0.844 2	0.746 9	0.430 1	<0.000 1**
二次全模型 Quadratic full model	0.901 1	0.795 6	0.476 8	0.000 5**
三次全模型 Cubic full model	0.988 0	0.895 8	0.992 8	0.037 0*

注：**表示极显著 ($P < 0.01$)；*表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)；未标注*表示不显著 ($P > 0.05$)。下同。
Note: ** represents highly significant ($P < 0.01$), * represents significant ($0.01 \leq P < 0.05$), the data with unlabeled * represents non-significant ($P > 0.05$). The same below.

二次全模型的方差分析如表 7 所示。经分析，二次全模型 P 值小于 0.01，且失拟项 P 值大于 0.05；其中法向接触刚度 x_1 、切向接触刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 有极显著影响，临界切向应力 x_4 、法向接触刚度与切向接触刚度的交互项 x_1x_2 以及临界切向应力的平方项 x_4^2 有显著影响。

表 7 峰值破坏力响应曲面二次全模型方差分析

Table 7 Analysis of variance of peak failure force for response surface quadratic model

方差来源 Source	自由度 degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value
模型 Model	14	29 440.75	7.81	0.000 5**
x_1	1	1.11×10^5	29.45	0.000 2**
x_2	1	1.73×10^5	45.83	<0.000 1**
x_3	1	41 502.56	11.00	0.006 1**
x_4	1	28 074.29	7.44	0.018 3*
x_1x_2	1	21 306.80	5.65	0.035 0*
x_1x_3	1	2 971.56	0.787 9	0.392 2
x_1x_4	1	10.81	0.002 9	0.958 2
x_2x_3	1	2 078.27	0.551 0	0.472 2
x_2x_4	1	5 668.28	1.50	0.243 7
x_3x_4	1	527.55	0.139 9	0.714 9
x_1^2	1	3 085.59	0.818 1	0.383 5
x_2^2	1	16.98	0.004 5	0.947 6
x_3^2	1	833.41	0.221 0	0.646 7
x_4^2	1	22 031.39	5.84	0.032 5*
残差 Residual	12	3 771.47		
失拟项 Lack of fit	10	3 975.81	1.45	0.476 8
纯误差 Pure error	2	2 749.81		
总和 Total	26			

因方程影响因子较多，在保证模型显著、失拟项不显著的情况下，剔除不显著项，对二阶回归模型进行优化调整得到方差分析结果如表 8 所示，并得到峰值破坏

力 f 的回归方程如式 (3) 所示。

表 8 峰值破坏力响应曲面优化模型方差分析

Table 8 Analysis of variance of peak failure force for response surface optimization model

方差来源 Source	自由度 degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value
模型 Model	14	66 162.88	21.89	<0.000 1**
x_1	1	1.11×10^5	36.74	<0.000 1**
x_2	1	1.73×10^5	57.18	<0.000 1**
x_3	1	41 538.39	13.74	0.001 4**
x_4	1	28 076.48	9.29	0.006 4**
x_1x_2	1	21 306.80	7.05	0.015 2*
x_4^2	1	22 055.56	7.30	0.013 7*
残差 Residual	12	3 022.54		
失拟项 Lack of fit	10	3 052.85	1.11	0.576 2
纯误差 Pure error	2	2 749.81		
总和 Total	26			

$$f = 535.975 - 1.824 \times 10^{-11} x_1 - 1.643 \times 10^{-10} x_2 + 8.964 \times 10^{-7} x_3 + 6.020 \times 10^{-6} x_4 + 3.649 \times 10^{-24} x_1 x_2 - 1.762 \times 10^{-14} x_4^2 \quad (3)$$

将每一组模拟得到破坏力减去实测破坏力能够得到各组模拟对于实际结果的误差数据，但实际只改变了常数项，对方差分析以及各影响因素显著性无影响，所以直接将模拟峰值破坏力的回归方程减去实测破坏力 459.75N，得到仿真峰值破坏力与试验破坏力之间的误差 Δf 的回归方程，如式 (4) 所示。

$$\Delta f = 76.275 - 1.824 \times 10^{-11} x_1 - 1.643 \times 10^{-10} x_2 + 8.964 \times 10^{-7} x_3 + 6.020 \times 10^{-6} x_4 + 3.649 \times 10^{-24} x_1 x_2 - 1.762 \times 10^{-14} x_4^2 \quad (4)$$

2.2 最优黏结参数组合的确定及试验验证

2.2.1 最优黏结参数组合的确定

为得到最优的黏结参数组合，即模拟试验与真实试验的误差的绝对值最小，求解方程 (4) 中 Δf 最接近于 0 的值。经计算，求得羊肋骨最优黏结参数组合，即法向接触刚度 x_1 为 7.07×10^{13} N/m³、切向接触刚度 x_2 为 6.22×10^{12} N/m³、临界法向应力 x_3 为 1.34×10^8 Pa、临界切向应力 x_4 为 1.87×10^8 Pa。将最优黏结参数代入式 (4) 中得 $\Delta f = -0.873$ ，此时仿真破坏力与实测破坏力的相对误差为 0.19%，表明羊肋骨弯曲破坏模型得到的回归方程可信。

2.2.2 羊肋骨弯曲破坏仿真试验验证

为进一步验证测量得到的本征参数以及标定得到的黏结参数的准确性，并确定以这些测量标定得到的参数建立的羊肋骨弯曲破坏离散元模型对羊肋骨具有普适性，取五组不同外形尺寸的羊肋骨试样，采用模型所得本征参数、接触参数和黏结参数构建离散元模型，以此进行仿真模拟试验得到仿真峰值破坏力。再针对以上五组羊肋骨试样进行弯曲破坏物理试验，再将仿真试验结果与实际试验结果进行对比验证。对比验证试验结果如表 9 所示。研究结果表明，仿真试验和实际物理试验破坏力的相对误差不大于 6.49%，平均相对误差为 4.19%，说明羊肋骨的黏结参数标定准确，模型构建合理。

表 9 五组羊肋骨外形尺寸及对比试验验证结果
Table 9 Five overall dimension of goat rib and results of test verification

标号 No.	截面长轴 Major axis of cross-section/mm	截面短轴 Minor axis of cross-section/mm	试验破坏力 Failure force of test/N	仿真破坏力 Failure force of simulation/N	相对误差 Relative error/%
1	8.96	6.03	398.13	400.76	0.66
2	8.40	5.95	530.01	512.24	3.35
3	6.36	3.42	151.52	160.93	6.21
4	11.88	5.58	522.04	499.74	4.27
5	10.01	6.73	366.97	343.17	6.49

3 结 论

本研究参考了各类离散元参数标定的相关研究,对冷鲜羊肋骨离散元仿真参数进行了测量与标定。测量与标定方法包含:羊肋骨的基本本征参数较易测得,为直接通过排水法试验、单轴压缩试验^[21]以及查阅相关文献得到。而由于羊肋骨试样的形状各异,制作较多相近试样进行接触参数标定过程中的堆积角试验^[8]较为困难,且羊肋骨形状对实际试验中堆积角的影响较大,无法准确得到试验结果,因此考虑基于摩擦系数仪测定骨-骨摩擦系数,通过斜面法测定骨-钢摩擦系数,并通过羊骨对心碰撞试验^[35]及骨钢碰撞试验^[36]分别测定骨-钢与骨-骨碰撞恢复系数。黏结参数的标定则根据实际三点弯曲破坏试验建立离散元模型^[20, 23],通过爬坡试验确定黏结参数范围,按照 CCD 响应曲面设计试验进行仿真模拟弯曲破坏试验,得出有关羊肋骨弯曲峰值破坏力的显著影响因素及回归方程,再求得最优黏结参数。最后,将 5 组不同尺寸羊肋骨试样进行仿真模型构建和弯曲破坏仿真试验,将获取的仿真破坏力与 5 组试样的实际三点弯曲破坏试验的实际破坏力进行对比,通过破坏力相对误差验证了羊肋骨离散元仿真参数的准确性及测量标定方法的合理性。以上羊肋骨的标定方法适用于具有脆硬特性且不易进行堆积角试验的骨类物料的黏结参数标定。

经由上述物理测量与仿真标定过程,获取的羊肋骨各项参数如下:

1) 通过试验法确定了羊肋骨基本本征参数。采用单轴压缩试验并经计算得到羊肋骨泊松比、剪切模量、弹性模量,分别为 0.34、 4.52×10^8 Pa、 1.21×10^9 Pa。通过 MXD-02 摩擦系数仪、斜面法、对心碰撞试验、骨钢碰撞试验测量羊肋骨接触参数,测得羊肋骨静摩擦系数与滚动摩擦系数分别为 0.43、0.07,羊肋骨与钢之间的静摩擦系数为 0.65、滚动摩擦系数为 0.11,骨-骨碰撞恢复系数为 0.78,骨-钢碰撞恢复系数为 0.73。经三点弯曲破坏试验获取了羊肋骨的断裂情况,确定了羊肋骨断裂过程的峰值破坏力为 459.75 N。

2) 运用 HMB 模型建立羊肋骨模型,对其弯曲破坏过程进行了仿真分析。结合爬坡试验与响应面 CCD 试验,确定了黏结参数范围。分别建立峰值破坏力 f 和误差 Δf 的回归方程,进而以实际弯曲破坏试验峰值破坏力为目标,确定了 Δf 为最小的最优黏结参数组合,即羊肋骨法向接触刚度 x_1 、切向接触刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 、临界切向应力 x_4 ,它们分别为 7.07×10^{13} N/m³、 6.22×10^{12} N/m³、 1.34×10^8 Pa 和 1.87×10^8 Pa,此时对应的仿真破坏力与试

验破坏力的相对误差为 0.19%,表明羊肋骨弯曲破坏模型得到的回归方程可信度高。

3) 选取 5 组不同尺寸的羊肋骨进行了试验验证,试验结果表明,仿真模型的破坏力与实际试验的破坏力相对误差不大于 6.49%,平均相对误差为 4.19%,羊肋骨仿真模型与实际试验吻合度高,证明了本文提出的羊肋骨标定方法合理、模型标定参数准确。

本文研究的冷鲜羊肋骨弯曲破坏离散元参数标定工作,可为羊胴体分割刀具的参数优化提供理论参考。

[参 考 文 献]

- [1] 刘瑶. 我国羊肉产业现状及未来发展趋势[J]. 中国饲料, 2019(17): 112-117.
LIU Yao. Present situation and future development trend of mutton industry in China[J]. China Feed, 2019(17): 112-117. (in Chinese with English abstract)
- [2] 国家统计局中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2021-02-28) [2022-01-27]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html.
National Bureau of statistics statistical bulletin of the people's Republic of China on national economic and social development in 2020[EB/OL]. (2021-02-28)[2022-01-27]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html. (in Chinese with English abstract)
- [3] 梁小军, 李颖康, 郑丽霞. 我国引入的国外肉用种羊及其应用效果(续完)[J]. 中国草食动物, 2004, 24(2): 58-59, 37.
LIANG Xiaojun, LI Yingkang, ZHENG Lixia. Foreign meat goat introduced in China and its application effect (the end)[J]. China Herbivore Science, 2004, 24(2): 58-59, 37. (in Chinese with English abstract)
- [4] 周琳, 杨祯妮, 张敏, 等. 肉类全产业链损耗及可食用系数研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3934-3942.
ZHOU Lin, YANG Zhenni, ZHANG Min, et al. Whole-Industry chain loss and edible rate of Chinese meats[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(21): 3934-3942. (in Chinese with English abstract)
- [5] 崔颖贺. 计算机仿真技术在现代农业机械中的应用研究[J]. 机械设计, 2021, 38(12): 164.
CUI Yinghe. Application of computer simulation technology in modern agricultural machinery[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(12): 164. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张国伟. 数字化设计技术及其在农业机械设计中的应用[J]. 农业技术与装备, 2019(4): 14-16, 21.
ZHANG Guowei. Digital design technology and its application in agricultural machinery design[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2019(4): 14-16, 21. (in Chinese with English abstract)
- [7] 师丽娟, 杨敏丽. 基于科学计量的中国农业工程研究热点探析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 430-438.
SHI Lijuan, YANG Minli. Analysis on research hotspots in agricultural engineering in China based on scientometrics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2016, 32(S2): 430-438. (in Chinese with English abstract)
- [8] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1-20. (in Chinese with English abstract)

- [9] ZHAO Z, WU M, JIANG X. A review of contact models' properties for discrete element simulation in agricultural engineering[J]. *Agriculture*, 2024, 14(2): 238.
- [10] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014(101): 24-33.
- [11] LEBLICK T, SMEETS B, RAMON H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016(123): 8-88.
- [12] BYUM J H, NAM J S, CHOE J S, et al. Analysis of the separating performance of a card cleaner for pepper harvester using EDEM software[J]. *Journal of Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 2018, 63(2): 347-354.
- [13] 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.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese with English abstract)
- [14] 丁文波, 朱继平, 陈伟, 等. 基于 EDEM 的青稞接触参数仿真标定[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(9): 114-121.
DING Wenbo, ZHU Jiping, CHEN Wei, et al. Simulation calibration of highland barley contact parameters based on EDEM[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(9): 114-121. (in Chinese with English abstract)
- [15] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 109-114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 109-114. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014: 30-49
WANG Yan. Simulation Analysis of Structure and Effect of The Subsoiler Based on DEM[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014: 30-49. (in Chinese with English abstract)
- [17] 康宏彬, 刘铭, 王雷, 等. 基于 EDEM 的马铃薯收获机分离输送装置仿真分析[J]. *农机化研究*, 2022, 44(5): 1-8, 16.
KANG Hongbin, LIU Ming, WANG Lei, et al. Simulation analysis of separating and conveying device of potato harvester based on EDEM[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(5): 1-8, 16. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李兵, 朱勇, 方赛弟, 等. 基于离散元法的茶叶抖筛机结构参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 337-343.
LI Bing, ZHU Yong, FANG Saidi, et al. Optimization and experiment of the structural parameters of tea vibrating-shifting machine using discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(5): 337-343. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 基于 Plackett-Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(12): 221-231.
ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett-Burman design and response surface methodology[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(12): 221-231. (in Chinese with English abstract)
- [20] 焦俊, 张国忠, 杜俊, 等. 莲藕主藕体弯曲破坏离散元仿真分析[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(5): 217-225.
JIAO Jun, ZHANG Guozhong, DU Jun, et al. Discrete element simulation of bending failure of main lotus root[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(5): 217-225. (in Chinese with English abstract)
- [21] 肖科星, 夏俊芳, 陈子林, 等. 莲藕力学特性的试验研究[J]. *华中农业大学学报*, 2016, 35(5): 125-130.
XIAO Kexing, XIA Junfang, CHEN Zilin, et al. Biomechanics of lotus root[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2016, 35(5): 125-130. (in Chinese with English abstract)
- [22] 文昌俊, 徐云飞, 游达章, 等. 蚕豆物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. *农机化研究*, 2024, 46(8): 159-173.
WEN Changjun, XU Yunfei, YOU Dazhang, et al. Determination of physical parameters of broad bean and calibration of discrete element simulation parameters[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(8): 159-173. (in Chinese with English abstract)
- [23] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 73-82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [24] 万星宇, 廖庆喜, 蒋亚军, 等. 饲用油菜机械化收获切碎过程离散元仿真与试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(11): 2735-2745
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, JIANG Yajun, et al. Discrete element simulation and experiment of stem chopping for fodder rape crop harvest[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(11): 2735-2745 (in Chinese with English abstract)
- [25] 谢伟, 欧阳琛, 蒋蕨, 等. 面向夹持采收的油菜薹夹段茎秆离散元参数标定与优化[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 138-150
XIE Wei, OUYANG Chen, JIANG Ping, et al. Calibrating and optimizing the discrete element parameters for clamping section stems during rape shoot harvesting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(5): 138-150. (in Chinese with English abstract)
- [26] 向旺, 孙玉华, 刘凡一, 等. 青菜头缩短茎滑切刀研制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 266-275.
XIANG Wang, SUN Yuhua, LIU Fanyi, et al. Development of the sliding cutter for the shortened stem of tumorous stem mustard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(16): 266-275. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王笑丹, 王洪美, 韩云秀, 等. 基于离散元法的牛肉咀嚼破碎模型构建[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 228-234.
WANG Xiaodan, WANG Hongmei, HAN Yunxiu, et al. Structure of beef chewing model based on discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(4): 228-234. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王黎明, 范盛远, 程红胜, 等. 基于 EDEM 的猪粪接触参数标定[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 95-102.
WANG Liming, FAN Shengyuan, CHENG Hongsheng, et al. Calibration of contact parameters for pig manure based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(15): 95-102.

- (in Chinese with English abstract)
- [29] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 130-140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(6): 130-140. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘天华, 高湿玉米脱出物表面能研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021: 40-50
LIU Tianhua. Investigation on Surface Energy of High-humidity Maize Mixtures[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021: 40-50. (in Chinese with English abstract)
- [31] 梁喜凤, 胡泽, 郑立文, 等. 滩涂土壤离散元接触模型优化与现场铲削试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(8): 107-115.
LIANG Xifeng, HU Ze, ZHENG Liwen, et al. Optimization of the discrete element contact model for tidal flat soil and field shoveling experiment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(8): 107-115. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘好, 刘羽平, 张拓. 基于离散元与多体动力学的微耕机旋耕刀轴负荷分析[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(11): 79-86.
LIU Yu, LIU Yuping, ZHANG Tuo. Load analysis of rotary cutter shaft for power tiller based on DEM and MBD Theory[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(11): 79-86. (in Chinese with English abstract)
- [33] 谢方平, 吴正阳, 王修善, 等. 基于无侧限抗压强度试验的土壤离散元参数标定[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 39-47.
XIE Fangping, WU Zhengyang, WANG Xiushan, et al. Calibration of discrete element parameters of soils based on unconfined compressive strength test[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(13): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [34] 申浩翰, 张海, 范俊锴, 等. 基于多参数拟合的 EDEM 岩石建模方法[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2298-2320.
SHEN Haohan, ZHANG Hai, FAN Junkai, et al. A rock modeling method of multi-parameters fitting in EDEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2298-2320. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王洪飞. 大豆育种自动清换种排种系统的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020: 18-19
WANG Hongfei. Design and Experiment of Automatic Changing Seeding System for Plot-soybean Breeding[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 18-19. (in Chinese with English abstract)
- [36] 冯斌, 孙伟, 石林榕, 等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 50-57.
FENG Bin, SUN Wei, SHI Linlong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(13): 50-57. (in Chinese with English abstract)

Calibration of discrete element parameters for the bending failure on the chilled Boer goat ribs

WEI Jia^{1,2}, FU Jiayi^{1,2}, WANG Shucan^{1,2}, LIU Haopeng^{1,2*}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Development, Wuhan 430070, China)

Abstract: Large-scale mutton processing is ever-expanding with the increasing demand for meat production. Mechanized carcass segmentation has been one of the key steps to upgrade the mutton industries. Among them, the goat rib has been the main obstacle during segmentation. A scientific and reliable discrete element model of goat rib can be expected to provide both the analysis of mechanized goat carcass segmentation and the optimization of tool parameters. Taking the chilled Boer goat rib as the research object, this study aims to calibrate the discrete element parameters of the bending failure model using EDEM software. Firstly, a series of tests were carried out to determine the profile, density, Poisson's ratio, and shear modulus of the goat rib. Next, the collision, inclined plane friction and friction coefficient measurement tests were conducted to measure the contact parameters, such as static friction coefficient, rolling friction coefficient, and collision recovery coefficient. The bending failure test of the goat rib was carried out on the texture analyzer to obtain the peak failure force and cutting position, which were the target values of the simulation. According to the actual test conditions, the discrete element model of goat rib was established to simulate the bending failure using Hertz-Mindlin with the bonding model in EDEM software. The path of the steepest ascent was used to determine the optimal parameters, including the optimal value of bonding parameters. A quadratic polynomial regression model was then optimized between the peak failure force and the four bonding parameters using response surface analysis. The optimal combination of four significant influencing factors was also obtained to solve the regression equation. The results illustrated that the normal stiffness per unit area was $7.07 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, the shear stiffness per unit area was $6.22 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, the critical normal stress was $1.34 \times 10^8 \text{ Pa}$, and the critical shear stress was $1.87 \times 10^8 \text{ Pa}$. Finally, the bending failure of five goat ribs was simulated to verify the accuracy and reliability of calibration. The maximum relative error between the simulated and the actual values was less than 6.46%, and the average relative error was 4.19%, indicating the credible calibration. This finding can also provide a theoretical basis for parameter optimization in the mechanized segmentation of goat rib during mutton processing.

Keywords: goat rib; discrete element; parameter calibration; bending failure; segmentation; model