江西农业大学学报　2022,44(3)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　DOI:10.13836/j.jjau.2022072

张富嘉,王永健,李骅,等.猪羊筒骨断裂力学特性的试验研究[J].江西农业大学学报,2022,44(3):725-735.
ZHANG F J,WANG Y J,LI H,et al.Experimental study on fracture mechanical properties of pig and sheep tube bone[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(3):725-735.

猪羊筒骨断裂力学特性的试验研究

张富嘉[1,2],王永健[1,2],李　骅[1,2*],丁元庚[1,2],王居飞[1,2],朱雪茹[1,2],罗　伟[3]

(1.南京农业大学 工学院,江苏 南京 210031;2.江苏省智能化农业装备重点实验室,江苏 南京 210031;3.北京京环智慧环保科技有限公司,北京 100101)

摘要:【目的】餐厨垃圾当中的有机物含量较高,容易腐烂变质,滋生霉菌毒素、病原微生物等有害物质,如果处理不当,极易引起环境问题和社会问题。为实现餐厨垃圾无害化与资源化处理,需要先对其进行破碎预处理。然而,餐厨垃圾不可避免地混有较为坚硬的骨头,且骨头含水率因时而变,直接影响其自身的破坏特性,这就给餐厨垃圾破碎预处理设备的研制带来了困难。【方法】以土淮猪和乌珠穆沁羊的筒骨为研究对象,利用万能试验机进行力学试验,获得其抗压强度、弯曲应力以及弹性模量等力学参数,研究其断裂特性,探讨含水率对断裂力学参数的影响规律,为后续骨头破碎过程的仿真分析和设备研制提供数据支撑。首先,通过筒骨、肋骨、肩胛骨等强度较高骨头的三点弯曲试验,确定出强度较大的筒骨为本文研究对象。其次,基于正交各向异性假设,分别对不同含水率下两种筒骨的轴向和径向进行压缩试验,获得其应力-应变曲线,从而获得筒骨断裂的力学参数。再次,对不同含水率的两种筒骨进行三点弯曲试验,获得其载荷-位移曲线,从而为后续仿真模型的验证提供依据。最后,对试验数据进行总结,分析含水率对筒骨断裂性能的影响。【结果】筒骨材料是一种各向异性的材料,压缩试验的加载方向对筒骨的抗压强度及弹性模量等力学参数都有一定的影响,筒骨的径向抗压强度均值大于轴向,轴向弹性模量均值大于径向。在三点弯曲试验中,猪筒骨载荷峰值均值是5 284.84 N,最大峰值为9 385.9 N;羊筒骨载荷峰值均值是2 869.99 N,最大峰值为4 087 N。回归结果显示,筒骨弯曲应力峰值与含水率呈二次负相关关系,且随着含水率的增大,筒骨的弯曲应力峰值减小。【结论】研究结果可为筒骨力学结构仿真建模、餐厨垃圾破碎装备关键部件设计及参数选择提供理论依据。

关键词:餐厨垃圾;筒骨;含水率;压缩试验;三点弯曲试验
中图分类号:S237;S82　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1000-2286(2022)03-0725-11

Experimental Study on Fracture Mechanical Properties of Pig and Sheep Tube Bone

ZHANG Fujia[1,2],WANG Yongjian[1,2],LI Hua[1,2*],DING Yuangeng[1,2],
WANG Jufei[1,2],ZHU Xueru[1,2],LUO Wei[3]

(1.College of Engineering,Nanjing Agricultural University,Nanjing 210031,China;2.Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province,Nanjing 210031,China;3.Beijing Jinghuan Intelligence Environmental Protection Technology Co.Ltd.,Beijing 100101,China)

收稿日期:2021-12-31　　**修回日期:**2022-03-01
基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1906103)和国家自然科学基金项目(11702147)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2019YFC1906103)and the National Natural Science Foundation of China(11702147)
作者简介:张富嘉,orcid.org/0000-0003-0893-1785,zhangfujia1996@163.com;*通信作者:李骅,教授,博士生导师,主要从事生物质转化技术与装备、精准种收技术与智能装备研究,orcid.org/0000-0002-3267-6393,lihua@njau.edu.cn。

Abstract: [**Objective**] The organic content in food waste is high, which is easy to rot and deteriorate aas well as breed mycotoxins, pathogenic microorganisms and other harmful substances. Without a proper treatment, it is extremely easy to cause environmental and social problems. In order to realize the harmless and resourceful treatment of food waste, it is necessary to crushit first. However, food waste is inevitably mixed with hard bones, and the moisture content of bones changes from with time, which directly affects its own destruction characteristics and brings challenges to the design of food waste crushing pretreatment equipment. [**Methods**] This study selected, the tube bones of Tuhuai pig and Wuzhumuqin sheep as the research objects, and the mechanical parameters such as compressive strength, bending stress and elastic modulus were obtained by using the universal testing machine, then the influence of water content on the fracture mechanics parameters was discussed, which provided data support for subsequent simulation analysis and designing bone-crushing equipments. First of all, through the three-point bending test the stronger tube bones such as the tube bones, ribs, shoulder blades, etc., were determined as the research object of the study. Secondly, based on the hypothesis of orthotropic anisotropy, the axial and radial compression tests of the two kinds of tube bones under different water content were implemented to obtain their stress-strain curves, and the mechanical parameters of the tube bone fracture were obtained. Thirdly, a three-point bending test was performed on two kinds of tube bones with different water content, and the load-displacement curve was obtained, thus providing a basis for the subsequent simulation model verification. Finally, this study summarized the test data and analyzed the influence of water content on the fracture performance of the tube bone. [**Results**] The experimental results showed that the tube bone material was an anisotropic material, and the loading direction of the compression test had a certain influence on the mechanical parameters such as the compressive strength and elastic modulus of the tube bone, and the average value of radial compressive strength of the tube bone was higher than that of the axial direction, and the average value of the axial elastic modulus was higher than that of the radial direction. In the three-point bending test, the average peak load of pig tube bone was 5 284.84 N, and the maximum peak load was 9 385.9 N. The mean peak load of sheep tube bone was 2 869.99 N, and the maximum peak load was 4 087 N. The regression results showed that the peak bending stress of the tube bone had a secondary negative correlation with the water content. As the moisture content increased, the peak bending stress of the tube bone decreased. [**Conclusion**] The research results of this paper could provide a theoretical basis for the simulation modeling of the mechanical structure of the tube bone, the design of the key components of the food waste crushing equipment and the selection of parameters.

Keywords: food waste; tube bone; water content; compression test; three-point bending test

【研究意义】随着我国人民生活水平的提高，我国餐厨垃圾的产量正在逐年增长[1]。王小铭等[2]采用政府统计数据采集和中英文文献数据提取等方法，估算2017年我国产生餐厨垃圾约1.58×10^8 t。餐厨垃圾具有含水率高、易腐变质的特点，为实现无害化与资源化处理目标，需要对餐厨垃圾进行破碎预处理。前人试验统计发现，餐厨垃圾组成成分主要包括食物垃圾、纸张、骨头、木头、织物、塑料及油脂等[3]，其中当属骨头较为坚硬。此外，在城镇居民的日常生活过程中，部分家庭的餐厨垃圾并不会及时清理，从餐厨垃圾的产生到破碎预处理的时间不等，这就给骨头的含水率带来了影响，从而影响其力学特性。本文以菜市场常见的骨头为对象，研究其抗压及抗弯等力学特性，为餐厨垃圾破碎机的设计与优化提供依据。【前人研究进展】在动植物组织的力学性能方面，近几十年来，国内外学者进行了不少的研究。魏俊逸等[4]对油菜茎秆进行了径向全压缩和局部压缩试验，对油菜茎秆的径向弹性系数和力学特性进行了测量，并研究了不同曲率半径压头对油菜茎秆局部压缩力学特性的影响。Shah等[5]讨论了植物茎秆的结构，评估了各种测试茎秆结构性能的方法，包括弯曲试验和轴向加载试验。徐鑫等[6]分别对苎麻茎秆、木质部进行了拉伸、压缩、弯曲和扭转试验，对韧皮层进行了拉伸、压缩试验，测定了苎麻茎秆的基本力学

参数,为苎麻剥麻机的设计提供了技术参数和支撑。孙家驹等[7]把人骨组织看作一种粘弹性结构元件,评述了它们的力学性能,还讨论了哈弗氏骨的应力-应变关系。Leblicq等[8]对小麦和大麦茎秆进行了研究,对植物茎秆的弯曲力学特性做了理论分析和力学试验,研究了植物茎秆椭圆化和屈曲对于茎秆弯曲力学特性的影响。陈燕等[9]试验测定了荔枝鲜果的几何特征,对其果实进行了不同加载条件的挤压试验,并对其果壳进行了拉伸试验,研究为荔枝收获、加工和运输等提供了理论依据。李洪波等[10]以‘晋谷21’、‘张杂10’为研究对象,分别对谷子不同节间的茎秆、叶鞘、叶片和叶环各部位进行拉伸力学测试,分析了相关力学参数沿茎秆节间的变化规律,研究结果为谷子收获装置的设计与优化提供了参数依据。Wright等[11]对小麦、大麦及玉米茎秆进行了力学实验,探求更节能的收获方法。尹政等[12]以六安大麻红麻试验站的新鲜红麻茎秆为研究对象,对红麻的茎秆、韧皮部和木质部进行了力学特性研究,为降低生产装备在收割过程中对红麻茎秆韧皮纤维的损伤、提高割茬切口的质量、提升机械收获效率提供了理论研究基础。

【本研究切入点】前人的研究提供了力学研究的试验方法与相关材料的力学特性,但针对骨头的相关断裂力学研究鲜见报道。对餐厨垃圾中较为坚硬的骨头进行压缩、三点弯曲试验,获得其断裂特性参数,为餐厨垃圾破碎设备研制提供数据支撑。【拟解决的关键问题】本文先进行土淮猪筒骨、肋骨和肩胛骨的三点弯曲试验,以确认筒骨是市售骨头中强度较大的,然后分别以土淮猪筒骨、乌珠穆沁羊筒骨为试验材料,研究其断裂力学特性,得到抗压强度、弯曲应力以及弹性模量等力学参数,为骨头结构断裂力学仿真分析及餐厨垃圾破碎装备关键部件设计提供依据。

1　猪骨三点弯曲试验

为确定市售不同部位骨头的强度,选取土淮猪的筒骨、肋骨和肩胛骨为试验对象,骨头材料于2021年4月在南京市浦口区某超市选取购买。骨头都经型号为MC-LHN30A的美的多用途锅煮2.5 h后洗净收集,并密封保存。

最大弯曲应力(弯曲应力峰值)是衡量骨头抗弯能力的重要指标,也能证明骨头强度。本次试验利用南京农业大学力学实验室的DDL100电子万能试验机进行,如图1所示。猪肩胛骨由于是扇形,不利于试验,因此将其加工成长条状。3种骨头分别选5个样本进行试验,将土淮猪的筒骨、肋骨以及肩胛骨样本如图2、图3和图4放置,进行三点弯曲试验,跨距设置为60 mm,设置试验加载速度为5 mm/min。骨头弯曲应力峰值大小按公式(1)计算[13]:

$$\sigma_A = \frac{M_{\max} y}{I_z} \tag{1}$$

式中:σ_A表示骨头最大弯曲应力,MPa;$M_{\max}$表示骨头断裂面上的最大弯矩,N·mm;y表示横截面底边距横截面中心的距离,mm;I_z表示断裂横截面对中性轴的惯性矩,mm^4。

图1　DDL100电子万能试验机

Fig.1　DDL100 electronic universal testing machine

如表1可知,猪肋骨弯曲应力峰值的最大值为61.94 MPa,平均值为49.66 MPa;猪肩胛骨弯曲应力峰值的最大值为26.91 MPa,平均值为24.22 MPa;猪筒骨弯曲应力峰值的最大值为142.43 MPa,平均值为103.41 MPa。3种骨头中筒骨的弯曲应力峰值最大,平均值也是最大的,说明猪筒骨强度最大。因此,本文以筒骨为研究对象,分析其力学特性随含水率的变化规律。

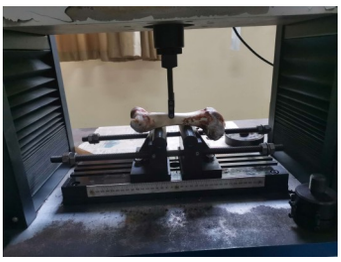

图2 猪筒骨弯曲试验

Fig.2 Bending test of pig tube bone

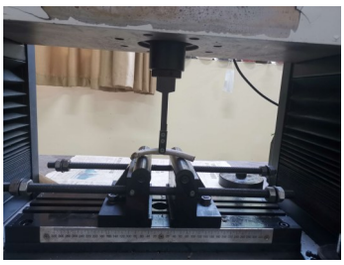

图3 猪肋骨弯曲试验

Fig.3 Bending test of pork rib

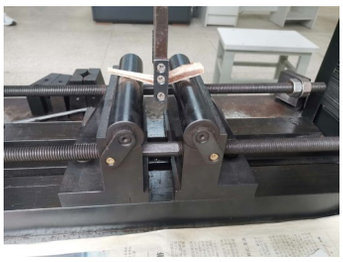

图4 猪肩胛骨弯曲试验

Fig.4 Bending test of pork shoulder blade

表1 猪肋骨、肩胛骨以及筒骨的最大弯曲应力

Tab.1 Maximum bending stress of pig rib, shoulder blade and tube bone

组分 Component	试样号 Test piece number	最大弯曲力/N Maximum bending force	横截面底边距横截面中心的距离/mm The distance from the bottom edge of the cross section to the center of the cross section	横截面对于中性轴的惯性矩/mm^4 Moment of inertia of the cross section with respect to the neutral axis	最大弯曲应力/MPa Maximum bending stress
猪肋骨 Pig rib	1	143.6	2.50	245.44	43.88
	2	183.8	4.00	862.76	25.56
	3	263.0	4.00	522.68	60.38
	4	319.8	3.50	593.76	56.55
	5	269.8	4.50	588.02	61.94
	平均值 Average				49.66
猪肩胛骨 Pig shoulder blade	1	116.4	2.75	356.90	26.91
	2	263.2	3.65	1 200.37	24.01
	3	94.6	2.40	281.99	24.15
	4	203.4	4.85	1 334.84	22.17
	5	186.0	5.62	1 314.21	23.86
	平均值 Average				24.22
猪筒骨 Pig tube bone	1	3 002.2	12.00	13 747.53	78.62
	2	5 692.2	13.25	20 909.52	108.21
	3	3 931.1	12.28	15 952.69	90.78
	4	3 937.7	11.81	14 383.87	96.99
	5	6 718.0	4.80	6 792.16	142.43
	平均值 Average				103.41

2 材料与方法

2.1 试验材料

由于牛筒骨并不属于餐厨垃圾，且市售筒骨较少，本文选取土淮猪和乌珠穆沁羊的筒骨为试验材料。土淮猪筒骨于2021年6月在南京市浦口区某超市选取购买，乌珠穆沁羊筒骨于2021年7月在电商平台购买。骨头都经型号为MC-LHN30A美的多用途锅煮2.5 h，后洗净收集，并密封保存。

筒骨的结构主要包括:骨膜、骨质和骨髓,骨质分为骨密质和骨松质,如图5所示。骨密质是致密而坚硬的骨组织,布于筒骨的表层。骨松质呈现海绵状,由许多不规则的片状或杆状骨组织组成,布于筒骨的内部。骨松质腔隙彼此连通,其中充满小血管和造血组织,称为骨髓。承受力学效应的主要是骨密质。筒骨的两端比较粗大,其主要由骨松质组成,相对于筒骨中间部分比较疏松,因此筒骨中间部分比两端强度更大[14]。本文试样选取筒骨中间部分。

图5　筒骨的结构

Fig.5　The structure of the tube bone

2.2　试验设备

电热恒温鼓风干燥箱(型号101-1A,浙江力辰仪器科技有限公司),精密电子天平,铝盒,游标卡尺(型号DL91300,宁波得力工具有限公司),电子万能试验机(型号DDL100,长春试验机研究所有限公司),锯骨机(型号HX-S21,丽水丝毫精密机械有限公司),砂纸等。

2.3　试验样本制备及含水率测定

城镇居民生活习惯、烹饪方式不尽相同,社区垃圾分类收集时间也不尽相同,餐厨垃圾从产生到破碎预处理的时间差异很大,因此混入餐厨垃圾的骨头含水率也不尽相同,而含水率对骨头的力学性能影响巨大。为了评价含水率对筒骨力学特性的影响,需要不同含水率的筒骨作为试验样本,因此对初始样本进行干燥处理。

对于压缩试验,需要对筒骨样本进行再加工,截除筒骨两端比较粗大且相对疏松的部分,留取强度较大的中间部分,利用锯骨机加工成高度为11.05~18.23 mm的猪筒骨轴向压缩样本、7.32~13.18 mm的羊筒骨轴向压缩样本,以及厚度为1.98~4.76 mm的猪筒骨径向压缩样本、1.76~3.81 mm的羊筒骨径向压缩样本。样本两端用砂纸打磨光滑,并且两端保持平齐,如图6、7所示。所有筒骨样本加工完毕后,全部浸水0.5 h后取出,用密封袋密封保存。将筒骨样本分为5组,每组3个样本,第1组不作处理,直接密封袋密封保存,第2、3、4、5组样本通过在100 ℃干燥箱中分别烘干5,10,20,30 min,达到设定时间后,取出样本,放入密封袋中密封保存。

对于弯曲试验,将筒骨样本分为5组,每组3个样本,第1组不作处理,直接密封袋密封保存,第2、3、4、5组样本通过在100 ℃干燥箱中分别烘干5,10,20,30 min,达到设定时间后,取出样本,放入密封袋中密封保存。筒骨弯曲样本如图8所示。

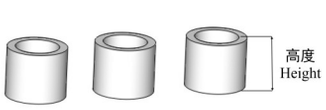

图6　轴向压缩样本

Fig.6　Axial compression sample

图7　径向压缩样本

Fig.7　Radial compression sample

图8　弯曲样本

Fig.8　Bending sample

对测量完力学特性的筒骨样本,立即进行含水率测量。在含水率测量试验中,做完力学试验的筒骨样本取其骨密质的一部分,放入铝盒进行标号与称量,然后放入电热恒温鼓风干燥箱以(105±2) ℃的温度下干燥6 h后,将铝盒取出并盖好盒盖,放入干燥器中冷却30 min,称量。再烘干1 h,冷却,称量,直至相邻2次称量的质量差小于2 mg[15]。

采用湿基法的公式表示筒骨含水率,按下式计算:

$$M_d = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中:M_d为湿基含水率,%;m_w为样本中所含水分,g;m_s为干燥前样本的质量,g;m_1为铝盒的质量,g;m_2为干燥前样本与铝盒总质量,g;m_3为干燥后样本与铝盒总质量,g。

2.4 压缩试验

因为筒骨的拉伸试件较小，与现有万能试验机无法很好的匹配，所以选用筒骨的压缩试验作为获取其应力-应变曲线的主要方式。压缩试验分为轴向、径向压缩试验，如图9、10所示。加载速率为3 mm/min。

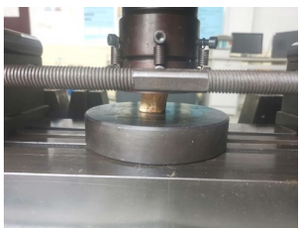

图9 轴向压缩

Fig.9 Axial compression

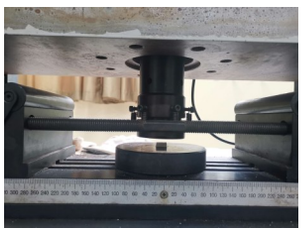

图10 径向压缩

Fig.10 Radial compression

压缩试验测得的是试样压力与位移关系，需要将压力与试样位移的关系转化成应力与应变的关系，以此得到筒骨样本的抗压强度、弹性模量等力学参数。

弹性模量是试验样本在万能试验机压缩载荷下应力-应变关系曲线上的斜率，按公式(3)计算[16]：

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} \tag{3}$$

式中：E为筒骨弹性模量，MPa；F为压力，N；A为样本横截面面积，mm^2；ΔL为试验过程样本压缩变形量，mm；L为试验前样本厚度，mm。

抗压强度为试验样本在万能试验机压缩载荷下产生破坏时的极限应力，其大小按公式(4)计算[16]：

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \tag{4}$$

式中：σ为筒骨抗压强度，MPa；F_{max}为压缩最大破坏力，N；A为样本横截面面积，mm^2。

2.5 三点弯曲试验

将筒骨样本如图11放置，跨距设置为50 mm，设置试验加载速度为5 mm/min，开始进行三点弯曲试验，研究不同含水率的筒骨弯曲力学特性。

图11 三点弯曲试验

Fig.11 Three-point bending test

3 结果与分析

3.1 压缩应力-应变曲线分析

图12和图13为筒骨试样轴向压缩时的应力-应变曲线，可以看出，随着试样应变的增大，应力随之变大，当应变增大到某个数值时，应力达到最大值。随着应变进一步增大，应力减小，此时试样破裂。应力最大值对应的点为筒骨试样的破坏临界点，此应力称为破坏应力，即筒骨材料的抗压强度。随着含水率增加，轴向筒骨偏软，但是强度起伏不定。

图14和图15为筒骨试样径向压缩时的应力-应变曲线，对比轴向压缩实验结果，总的来说，筒骨的径向抗压强度大于轴向。综合各图可知，对于相近含水率筒骨试样，轴向压缩比径向压缩的破坏应力小，即轴向压缩比径向压缩的抗压强度小。随着含水率增加，径向筒骨软硬变化不大，但是强度起伏不定。

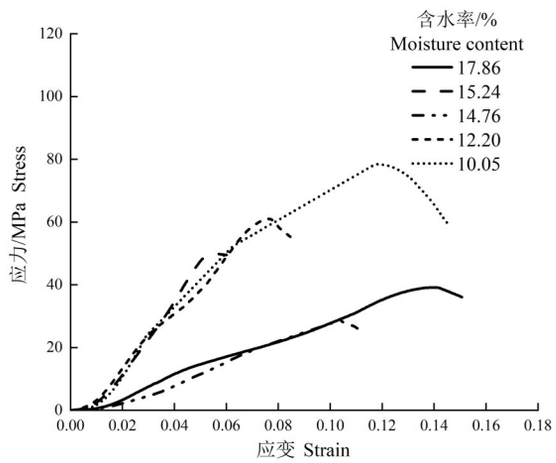

图 12　猪筒骨轴向压缩应力-应变曲线

Fig.12　Axial compression stress-strain curve of pig tube bone

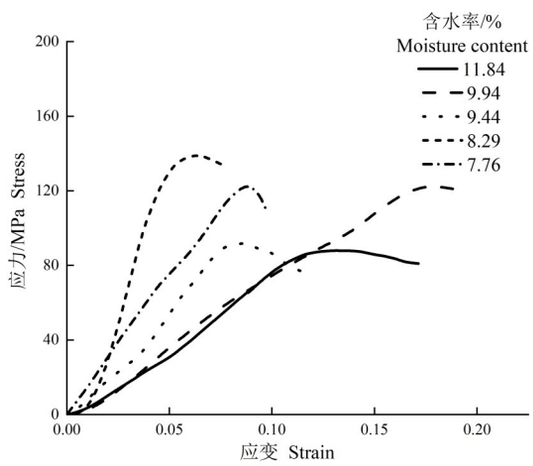

图 13　羊筒骨轴向压缩应力-应变曲线

Fig.13　Axial compression stress-strain curve of sheep tube bone

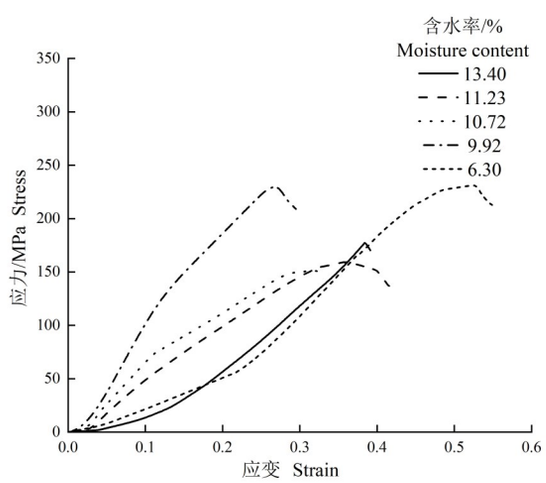

图 14　猪筒骨径向压缩应力-应变曲线

Fig.14　Radial compression stress-strain curve of pig tube bone

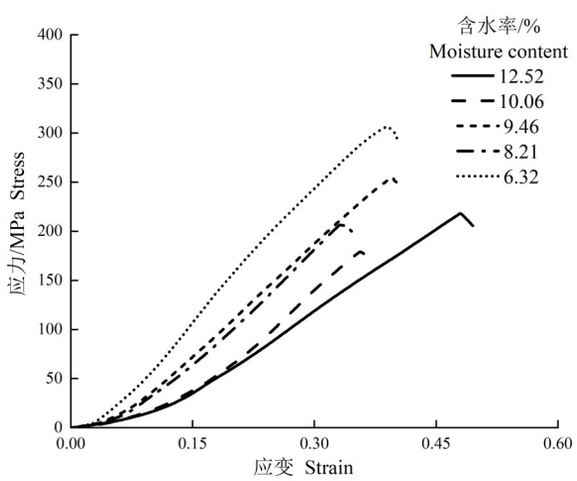

图 15　羊筒骨径向压缩应力-应变曲线

Fig.15　Radial compression stress-strain curve of sheep tube bone

3.2　轴向压缩与径向压缩试验结果分析

由表 2 可知,猪筒骨轴向压缩时的平均弹性模量为 1 204.61 MPa,平均抗压强度为 57.38 MPa;羊筒骨轴向压缩时的平均弹性模量为 1 387.02 MPa,平均抗压强度为 111.27 MPa。轴向压缩试验施加载荷,产生的应力超过筒骨的最大破坏应力时,试件被压裂。羊筒骨的轴向压缩弹性模量和抗压强度平均值均高于猪筒骨的。这表明,猪筒骨与羊筒骨的轴向力学性能有所区别。

由表 3 可知:猪筒骨径向压缩时的平均弹性模量为 708.53 MPa,平均抗压强度为 201.59 MPa;羊筒骨径向压缩时的平均弹性模量为 716.72 MPa,平均抗压强度为 269.63 MPa。径向压缩试验施加载荷,产生的应力超过筒骨的最大破坏应力时,试件被压裂。羊筒骨的径向压缩弹性模量和抗压强度平均值均高于猪筒骨的。这表明,猪筒骨与羊筒骨的径向力学性能也有所区别。而筒骨轴向抗压强度和径向抗压强度、轴向弹性模量和径向弹性模量都相差较大,可以认为筒骨材料是一种各向异性的材料。

3.3　三点弯曲试验过程分析

筒骨样本弯曲试验载荷-位移关系如图 16、图 17 所示。由图分析可得出筒骨样本弯曲试验的大致过程:在弯曲试验开始时,随着弯曲压头不断向下移动,曲线显现正相关关系;当弯曲压头向下移动到某一值时,弯曲压头对筒骨样本施加的载荷达到了最大值,筒骨样本出现瞬间折断,有明显的的脆断性;随着弯曲压头向下再移动,弯曲骨头样本所需的载荷迅速减小;继续加载,筒骨纤维未断部分继续受力,其值出现抬头上升。

表 2 轴向压缩试验结果

Tab.2 Axial compression test results

组分 Component	试样号 Test piece number	横截面面积/mm² Cross-sectional area	高度/mm Height	含水率/% Moisture content	抗压强度/MPa Compressive strength	弹性模量/MPa Elastic modulus
猪筒骨 Pig tube bone	1-1	277.09	18.23	18.07	40.19	848.38
	1-2	315.57	13.21	17.63	27.16	853.42
	1-3	327.43	11.52	17.86	41.29	924.59
	2-1	121.33	15.06	16.25	71.08	1 233.64
	2-2	143.74	15.13	15.80	64.00	1 505.27
	2-3	405.27	14.20	15.24	50.13	1 155.54
	3-1	170.65	17.55	14.76	54.81	858.11
	3-2	298.45	14.41	14.29	60.00	1 865.05
	3-3	280.39	13.53	14.60	74.04	1 368.96
	4-1	255.73	13.21	12.20	61.00	911.07
	4-2	272.69	15.08	13.75	39.52	1 014.09
	4-3	214.04	13.27	12.30	59.82	1 190.71
	5-1	290.60	11.05	11.11	75.74	1 987.32
	5-2	254.66	15.21	10.05	53.09	1 464.00
	5-3	147.95	12.24	10.67	88.77	888.98
	平均值 Average	251.71	14.19	14.31	57.38	1 204.61
羊筒骨 Sheep tube bone	1-1	190.22	7.32	12.02	100.52	1 451.96
	1-2	164.46	9.64	11.33	63.30	1 251.18
	1-3	219.91	11.20	11.84	87.93	756.74
	2-1	144.2	11.12	9.86	103.49	1 203.19
	2-2	177.03	7.33	9.94	122.23	881.05
	2-3	256.89	11.94	9.74	95.28	914.82
	3-1	186.14	9.86	9.26	129.32	2 119.10
	3-2	152.21	10.95	9.50	69.38	946.28
	3-3	151.68	13.18	9.44	91.67	1 021.61
	4-1	160.32	12.44	8.51	159.47	2 268.21
	4-2	164.93	13.17	8.43	123.76	1 310.46
	4-3	125.04	9.64	8.29	138.93	2 145.26
	5-1	231.14	10.62	7.76	122.23	1 578.76
	5-2	157.46	9.48	7.16	94.44	947.72
	5-3	122.68	9.86	7.58	167.11	2 009.00
	平均值 Average	173.62	10.52	9.38	111.27	1 387.02

3.4 筒骨弯曲力峰值分析

由图 18 可以看出，筒骨样本之间的弯曲力峰值差别较大，其主要原因是由于骨骼是一种非均质非弹性的生物材料，受客观因素如温度、湿度、生物体的年龄等影响较大，且不容易控制。从试验数据中得到猪筒骨弯曲力峰值均值是 5 284.84 N，最大弯曲力峰值为 9 385.9 N；羊筒骨弯曲力峰值均值是 2 869.99 N，最大弯曲力峰值为 4 087 N。

表 3　径向压缩试验结果

Tab.3　Radial compression test results

组分 Component	试样号 Test piece number	横截面面积/mm² Cross-sectional area	厚度/mm Thickness	含水率/% Moisture content	抗压强度/MPa Compressive strength	弹性模量/MPa Elastic modulus
猪筒骨 Pig tube bone	1-1	87.84	3.82	13.40	177.27	618.52
	1-2	121.35	2.70	15.45	150.33	418.58
	1-3	80.92	2.14	12.50	215.13	455.80
	2-1	55.43	4.23	11.23	159.11	497.30
	2-2	85.02	4.76	11.18	156.78	538.81
	2-3	92.04	3.27	11.21	191.68	663.16
	3-1	116.62	3.24	10.66	174.10	511.87
	3-2	100.04	3.12	10.04	275.38	990.25
	3-3	76.88	4.35	10.72	151.13	987.67
	4-1	88.44	3.89	9.92	229.48	1 248.17
	4-2	125.70	1.98	9.84	260.35	513.00
	4-3	96.71	3.06	9.47	279.00	1 012.67
	5-1	73.62	2.57	6.67	135.47	460.30
	5-2	73.84	3.60	6.03	237.59	1 137.41
	5-3	86.16	3.12	6.30	231.12	574.42
	平均值 Average	90.71	3.32	10.31	201.59	708.53
羊筒骨 Sheep tube bone	1-1	131.97	2.30	12.52	218.10	545.28
	1-2	92.93	2.12	12.85	240.23	576.80
	1-3	137.05	2.03	11.36	194.52	544.36
	2-1	64.45	2.96	10.48	238.56	862.27
	2-2	102.81	2.78	10.06	179.02	715.01
	2-3	75.85	1.91	10.09	271.61	617.71
	3-1	75.25	2.10	9.59	300.22	810.09
	3-2	72.60	2.53	9.56	255.39	534.20
	3-3	80.23	2.61	9.46	254.17	764.24
	4-1	79.90	1.76	8.21	339.51	713.69
	4-2	121.17	3.81	8.29	224.56	662.07
	4-3	71.88	2.09	8.16	442.78	1 068.58
	5-1	96.00	2.78	7.62	322.18	780.85
	5-2	49.42	2.31	6.32	306.44	930.92
	5-3	84.72	2.01	7.67	257.15	624.73
	平均值 Average	89.08	2.41	9.48	269.63	716.72

3.5　筒骨含水率对弯曲应力峰值的影响

对筒骨弯曲应力峰值与含水率关系进行二次回归拟合,结果如图 19 所示,建立回归方程,猪筒骨:y=618.06x^2−510.23x+164.22,其相关系数 R^2=0.706 5;羊筒骨:y=3 902.7x^2−2 238.9x+412.89,其相关系数 R^2=0.822 9。回归结果显示,筒骨弯曲应力峰值与含水率呈二次负相关关系,且随着含水率的增大,筒骨的弯曲应力峰值减小。

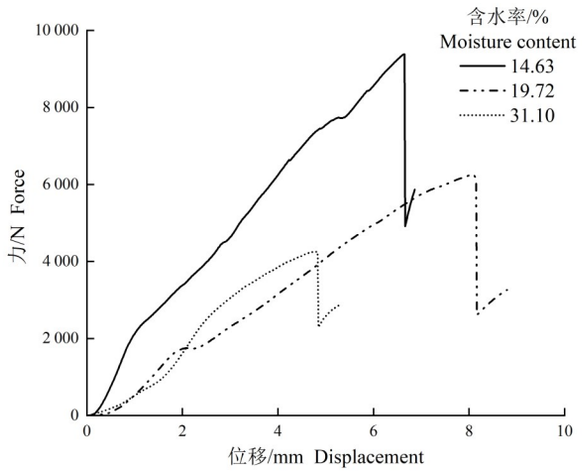

图 16 猪筒骨弯曲试验载荷-位移关系

Fig.16 Load-displacement relationship diagram of pig tube bone bending test

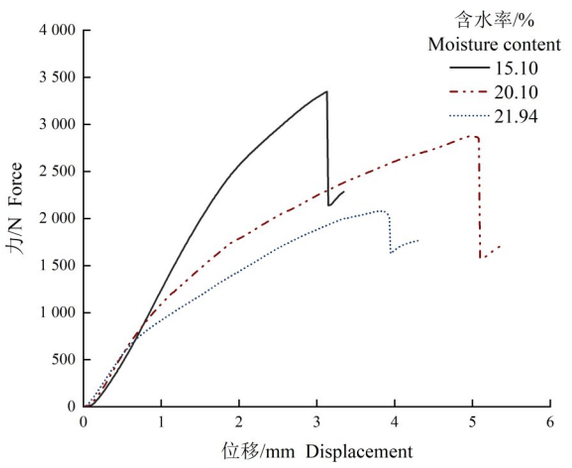

图 17 羊筒骨弯曲试验载荷-位移关系

Fig.17 Load-displacement relationship diagram of sheep tube bending test

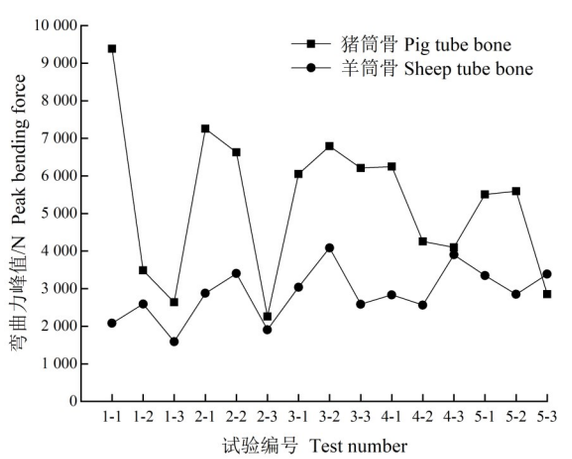

图 18 筒骨弯曲力峰值曲线

Fig.18 Curve of peak bending force of tube bone

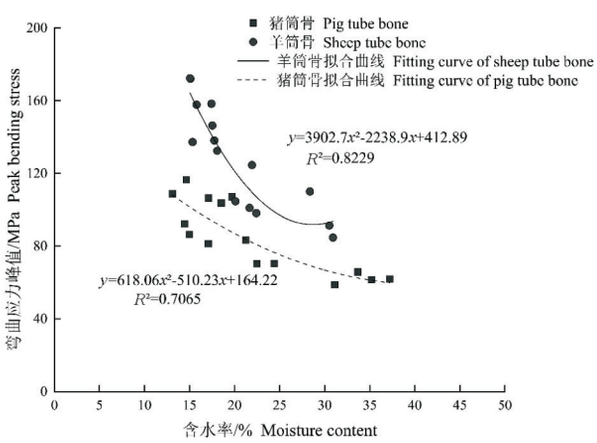

图 19 筒骨弯曲应力峰值与含水率关系曲线

Fig.19 Curve of relationship between peak bending stress and water content of tube bone

4 结 论

本文以土淮猪和乌珠穆沁羊的筒骨为研究对象，通过压缩试验和三点弯曲试验，获得其抗压强度、弯曲应力以及弹性模量等力学参数，为后续破碎过程的仿真分析和设备研制提供数据支撑。

猪筒骨与羊筒骨的轴向压缩和径向压缩试验表明：压缩方向对筒骨样本的抗压强度、弹性模量等力学参数有所影响，轴向压缩的弹性模量较大、抗压强度较小。总体上来看，羊筒骨的抗压强度和弹性模量大于猪筒骨。压缩实验的加载速率为 3 mm/min，猪筒骨轴向压缩的抗压强度为 27.16~88.77 MPa、弹性模量为 848.38~1 987.32 MPa，羊筒骨轴向压缩的抗压强度为 63.30~167.11 MPa、弹性模量为 756.74~2 268.21 MPa；猪筒骨径向压缩的抗压强度为 135.47~279.00 MPa、弹性模量为 418.58~1 248.17 MPa，羊筒骨径向压缩的抗压强度为 179.02~442.78 MPa、弹性模量为 534.20~1 068.58 MPa。

对筒骨的弯曲力峰值和弯曲应力峰值进行了测量与研究，研究表明：总的来说，猪筒骨的弯曲力峰值比羊筒骨大。筒骨弯曲应力峰值与含水率呈二次负相关关系，且随着含水率的增大，筒骨的弯曲应力峰值减小。在含水率相近的情况下，羊筒骨的弯曲应力峰值比猪筒骨大。三点弯曲试验的加载速率是 5 mm/min，猪筒骨弯曲力峰值为 2 257.3~9 385.9 N，羊筒骨弯曲力峰值为 1 591.5~4 087 N。

参考文献 References:

[1] 夏芳芳,谭婧,周洋,等.杭州天子岭餐厨垃圾厌氧消化沼气项目案例研究[J].中国沼气,2018,36(2):76-80.
XIA F F,TAN J,ZHOU Y,et al.Case study of Hangzhou Tianziling food waste anaerobic digestion project[J].China biogas,2018,36(2):76-80.

[2] 王小铭,陈江亮,谷萌,等."无废城市"建设背景下我国餐厨垃圾管理现状、问题与建议[J].环境卫生工程,2019,27(6):1-10.
WANG X M,CHEN J L,GU M,et al.Status quo,problems and countermeasures faced by China's food waste management under the background of "Zero waste city" construction[J].Environmental sanitation engineering,2019,27(6):1-10.

[3] 周俊,王梦瑶,王改红,等.餐厨垃圾资源化利用技术研究现状及展望[J].生物资源,2020,42(1):87-96.
ZHOU J,WANG M Y,WANG G H,et al.Research status and prospect of food waste utilization technology[J].Biotic resources,2020,42(1):87-96.

[4] 魏俊逸,宗望远,詹广超.油菜茎秆径向压缩特性试验研究[J].江西农业大学学报,2021,43(1):198-205.
WEI J Y,ZONG W Y,ZHAN G C.An experimental study of the radial compression characteristics of rape stalks[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2021,43(1):198-205.

[5] SHAH D U,REYNOLDS T P S,RAMAGE M H.The strength of plants:theory and experimental methods to measure the mechanical properties of stems[J].Journal of experimental botany,2017,68(16):4497-4516.

[6] 徐鑫,郭克君,谭新建,等.苎麻茎秆的力学性能研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(4):447-452.
XU X,GUO K J,TAN X J,et al.Research on mechanical properties of ramie stalk[J].Journal of Hunan agricultural university (natural sciences),2018,44(4):447-452.

[7] 孙家驹,耿介.人的密质骨的力学性能[J].力学进展,1987,17(2):200-215.
SUN J J,GENG J.Mechanical properties of human compact bone[J].Advances in mechanics,1987,17(2):200-215.

[8] LEBLICQ T,VANMAERCKE S,RAMON H,et al.Mechanical analysis of the bending behaviour of plant stems[J].Biosystems engineering,2015,129:87-99.

[9] 陈燕,蔡伟亮,邹湘军,等.荔枝鲜果挤压力学特性[J].农业工程学报,2011,27(8):360-364.
CHEN Y,CAI W L,ZOU X J,et al.Extrusion mechanical properties of fresh litchi[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2011,27(8):360-364.

[10] 李红波,薛晋霞,王炳轩,等.谷子茎秆叶鞘叶片及其结合部位的拉伸力学性能[J].农业工程学报,2020,36(18):11-17.
LI H B,XUE J X,WANG B X,et al.Tensile properties of foxtail millet leaf sheath,leaf and leaf collar[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2020,36(18):11-17.

[11] CHRISTOPHER T W,PETER A P,NATHAN A S,et al.Biomechanics of wheat/barley straw and corn stover[J].Applied biochemistry and biotechnology,2005,121(1/2/3):5-19.

[12] 尹政,袁建宁,李显旺,等.红麻茎秆力学特性试验研究[J].农机化研究,2021,43(12):166-173.
YIN Z,YUAN J N,LI X W,et al.Experimental study on mechanical properties of kenaf stalk[J].Journal of agricultural mechanization research,2021,43(12):166-173.

[13] 刘鸿文.材料力学Ⅰ[M].5版.北京:高等教育出版社,2011:137-142.
LIU H W.Mechanics of Materials I[M].5th ed. Beijing:Higher Education Press,2011:137-142.

[14] 崔京浩,王志浩,徐凡力.骨骼在快速受载下的物理力学性能[J].北京生物医学工程,1992,11(3):134-143.
CUI J H,WANG Z H,XU F L.The physical and mechanical properties of bones under rapid loading[J].Beijing biomedical engineering,1992,11(3):134-143.

[15] 叶香美.白莲、红莲物理参数测试与分析[J].安徽农学通报,2006,12(5):69-70.
YE X M.Test and analysis of physical parameters of white lotus and red lotus[J].Anhui agricultural science bulletin,2006,12(5):69-70.

[16] 马秋成,郭耿君,马婕,等.莲仁力学特性参数测定及挤压破碎特性试验[J].农业工程学报,2018,34(6):263-271.
MA Q C,GUO G J,MA J,et al.Determination of mechanical characteristic parameters and extrusion crushing characteristics test for lotus seed kernel[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2018,34(6):263-271.