

秦军伟, 张玮玮, 佟瑞栋, 等. 艾草制绒后剩余物粉体综合特性分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(2): 224–230.

QIN Junwei, ZHANG Weiwei, TONG Ruidong, et al. Analysis of comprehensive characteristics of mugwort-residue powder after moxa preparation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 224–230.

艾草制绒后剩余物粉体综合特性分析

秦军伟^{1a}, 张玮玮^{1b}, 佟瑞栋², 任德志³, 宁晓峰³, 王丹阳³, 白雪卫³

(1. 安阳工学院 a. 机械工程学院, b. 工程训练中心, 河南 安阳 455000; 2. 朝阳市第六中学物理组, 辽宁 朝阳 122000;

3. 沈阳农业大学 工程学院, 沈阳 110161)

摘要: 目前, 艾草制绒后的剩余物没有被深度利用而造成了中药材资源的浪费, 而且艾草粉体学性质的研究鲜见文献报道, 在一定程度上阻碍了艾草产业的可持续发展。为粉体的分级、分散、包装以及制粒等处理工艺及相关加工机械提供参考依据, 有必要分析其粉体学特性。以石磨制取艾绒后的艾草剩余物为试验材料, 通过剪切粉碎法制备多尺度粉体, 采用 BT-1000 粉体综合特性测试仪测定休止角、崩溃角、松装密度、振实密度、分散度等粉体学参数, 分析粒度和含水率对流动性、压缩性及喷流性的影响规律。试验分析表明: 粒度和含水率对艾草制绒后剩余物的粉体综合特性影响明显。随粒度增大, 流动性呈现先降后升的趋势, 而压缩性和喷流性则表现出先增后减的特征; 随含水率增加, 流动性和喷流性逐渐降低, 而压缩性逐渐增大。根据休止角 $\theta_r < 45^\circ$ 、崩溃角 $\theta_c < 40^\circ$ 、差角 $\theta_d < 15^\circ$ 、压缩度 $C_p < 20\%$ 、分散度 $D_s < 20\%$, 再结合 Carr 流动性和喷流性指数评价表, 分析认为粉体的流动性、压缩性和喷流性均较弱。以试验结论为参考, 通过粒度或含水率控制某些粉体学特性, 使其满足特定处理工艺要求, 也可为粉体加工机械的结构优化提供设计依据, 促进中药材加工剩余物的再利用。

关键词: 艾叶; 剩余物; 粉体; 流动性; 压缩性; 喷流性

中图分类号: S375

文章编号: 1000-1700(2024)02-0224-07

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Comprehensive Characteristics of Mugwort-residue Powder After Moxa Preparation

QIN Junwei^{1a}, ZHANG Weiwei^{1b}, TONG Ruidong², REN Dezhi³,
NING Xiaofeng³, WANG Danyang³, BAI Xuewei³

(1. a. College of Mechanical Engineering, b. Engineering Training Center, Anyang Institute of Technology, Anyang Henan 455000, China;

2. Physics Group, Chaoyang No.6 Middle School, Chaoyang Liaoning 122000, China;

3. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: At present, the mugwort-residue after the moxa preparation has not been deeply utilized, it is a waste of the resources of Chinese medicinal materials. Moreover, the investigation of micromeritic properties of the mugwort powder is rarely reported. Both of these problems hinder the sustainable development of the mugwort industry. It is necessary to analyze characteristics of the mugwort powder to provide reference for the treatment technology of classification, dispersion, packaging, granulation and related processing machinery. The mugwort-residue after the moxa preparation using the stone

收稿日期: 2023-10-07

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102311099); 安阳市科技发展计划项目(2021C01SF041); 安阳工学院博士科研启动基金项目(BSJ2021056)

第一作者: 秦军伟(1979-), 男, 博士, 讲师, 从事中药材资源高值化利用技术与装备研究, E-mail: qinjunwei2010@163.com

通信作者: 白雪卫(1979-), 男, 博士, 副教授, 从事秸秆资源化利用研究, E-mail: bai-xuewei@syau.edu.cn

mill was used as the experimental material, the multi-scale powder was prepared by the mechanical shear pulverization. The BT-1000 powder comprehensive characteristic tester was employed to measure micromeritics parameters such as the repose angle, the collapse angle, the apparent density, the tap density and the dispersity, and then the influences of the particle size and the moisture content on the flowability, the compressibility and the floodability were analyzed. The experiment analysis revealed that the particle size and the moisture content had obvious influences on the comprehensive properties of the powder. With the increase of the particle size, the flowability decreases first and then increases, while the compressibility and the floodability increase first and then decrease. With the increase of the water content, the flowability and the floodability gradually decrease, but the compressibility gradually increases. Since $\theta_r < 45^\circ$, $\theta_f < 40^\circ$, $\theta_d < 15^\circ$, $C_p < 20\%$, $D_a < 20\%$ and according to the Carr flowability index evaluation table and the Carr floodability index evaluation table, it was identified that the powder had the weaker flowability, compressibility and floodability. Based on the conclusions of this experiment, the particle size or the moisture content can be used to control some micromeritics characteristics of powder to satisfy the requirements of the specific processing technology, and also provide the design basis for the structural optimization of the powder processing machinery, and promote the reuse of Chinese medicinal materials processing residues.

Key words: mugwort; residue; powder; flowability; compressibility; floodability

作为一种传统中药材,艾草的药用历史可追溯至《神农百草经》,目前研究热点集中于艾绒制取^[1]、化学成分提取^[2]等方面。艾叶制绒主要目的是获取软细如棉的用于艾灸疗法的纤维原料,根据国家标准^[3]要求,不允许艾绒中掺杂过多的细碎粉末,故制绒后分离出来的艾叶残渣被艾绒生产企业当作废弃物处理而造成资源浪费。但是,制绒后的叶肉碎末中保留了较多的黄酮、挥发油、鞣质、多糖等化学成分,仍然具有良好的开发利用价值。若利用粉碎技术的物理化学改性优势^[4],对艾草制绒后的剩余物进行微细化处理,可用于加工艾草青团、面条或蛋糕等新型养生保健食品,微粉提取的化学成分也可用于农作物杀虫剂、动物饲料添加剂、纺织物改性材料等领域^[5],从而有效提高艾草资源的利用率和应用范围,促进艾草在饲料、纺织、食品甚至肥料等产业的可持续性发展。而超微粉碎技术应用中,关于粉体的分级、包装、储运或成分提取等加工工艺研究,以及相应的加工机械设计,诸如粒度分布、吸湿性、流动性等粉体学性质是重要的参考依据。但是,目前艾草精深加工研究中,仅仅把粉碎工艺作为前期预处理手段^[4],而关于粉体学性质的分析,笔者查阅到的相关文献较少。

近年来,超微粉碎技术逐渐应用于中药材生产工艺中,通过细胞破壁技术,既能提高中药材的比表面积、有效成分溶出度,又能增强药效、减少用量^[6]。高金玲等^[7]分析认为含水率等工艺参数对粉体分散性具有不同程度的影响,郭艳红等^[8]发现贮存时间影响配方奶粉的喷流性;郭群等^[9]发现不同类型的粉体会表现出不同的分散特征;仝萌等^[10]研究发现随粒度减小而中药材粉体流动性变差;PATHOD等^[11]认为适宜的干燥方法可生产优良流动性的中药粉体;张浩^[12]发现不同干燥工艺对山楂粉粒度指标的影响不同,而樊鹏帅等^[13]则认为加工工艺参数会显著影响桑叶提取物粉体流动性指数;王海波等^[14]分析认为不同干燥方法对中药材粉体的压缩度影响程度不同,而周彩娟等^[15]也发现真空带式干燥比冷冻干燥和喷雾干燥更适合山楂提取物粉体的压缩成型;李婉婷等^[16]研究发现不同药物粉体具有差异明显的压缩行为特征;YOHANNES等^[17]发现机械压缩粉体固结形成堆积结构的致密性受粒度分布宽度的影响显著;杨祺等^[18]则认为松密度是影响中药粉体压缩成型性的关键性粉体学参数。

因此,借鉴上述文献的分析方法,本研究将艾叶制绒后的剩余物进行微细化处理,采用粉体综合性测试仪测定并计算相应指标,分析粒度和含水率对剩余物粉体综合特性的影响规律,以为艾叶制绒后剩余物粉体的处理工艺优化及加工机械设计提供参考,提高其在医药、食品、饲料、肥料等产业中的利用率 and 应用范围。

1 材料与方 法

1.1 材料及仪器设备

鲜艾草,购自安阳市汤阴县艾草种植基地,平均湿基含水率为44.32%。

仪器设备: M35型电动石磨, 深圳市飞鸿发科技有限公司; 101-0A恒温热风干燥箱, 上海阳光实验仪器有限公司; JL-4500A多功能粉碎机, 永康市速锋工贸有限公司; \emptyset 200×50标准筛, 上虞市纱筛厂; DJ-5002电子天平, 0.01 g, 华志科学仪器有限公司; BT-1000粉体综合特性测试仪, 丹东百特仪器有限公司。

1.2 粉体学综合特性测定

表征粉体物理学性质的常规指标包括吸湿性、流动性、压缩性和喷流性等。其中, 流动性表示粉体颗粒之间发生相对移动的难易程度, 即流动阻力^[19], 流动性评价指标主要包括休止角、差角等, 休止角越小或差角越大, 说明粉体流动性越强。压缩性反映了粉体压缩过程中不可逆形变的能力, 一般用压缩度表示, 压缩度越大说明可压缩性越好^[20], 而松装密度和振实密度是衡量粉体可压缩性的重要评价指标^[21]。喷流性主要描述粉体克服重力在空间飞溅现象的强弱, 常用分散度表征, 分散度体现了粉体在空气中扩散的难易程度^[22], 分散度越大, 说明粉体具有更强的飞溅和喷流倾向。

本研究采用流动性、压缩性和喷流性作为粉体学综合特性指标, 分别以差角 θ_d 、压缩度 C_p 和分散度 D_a 表征。试验时, 将艾叶制绒后的剩余物粉体置于BT-1000粉体综合特性测试仪中, 根据操作手册^[23]依次测定休止角 θ_r 和崩溃角 θ_f 、松装密度 ρ_a 和振实密度 ρ_p , 并分别计算 θ_d 和 C_p 和 D_a ^[24-26], 即:

$$\theta_d = \theta_r - \theta_f \quad (1)$$

$$\rho_a = (G_1 - G_0) / V \quad (2)$$

$$\rho_p = (G_2 - G_0) / V \quad (3)$$

$$C_p (\%) = (\rho_p - \rho_a) / \rho_p \times 100 \quad (4)$$

$$D_a (\%) = (10 - G) / 10 \times 100 \quad (5)$$

式中: G_0 、 G_1 、 G_2 分别为容器质量、松装密度测试中容器与粉体总质量、振实密度测试中容器与粉体总质量(g); G 、10分别为接料盘中粉体质量和粉体初始质量(g)。

1.3 试验方法

1.3.1 艾草制绒剩余物粉体样本制备 根据文献^[3]制备艾绒之后, 再将艾草剩余物置于多功能粉碎机中进行微细化处理5 min, 通过筛分处理获得粒度分布为38~550 μm 的艾草制绒剩余物微粉。最后将粉体在40 $^{\circ}\text{C}$ 条件下热风干燥至恒重, 密封备用。

1.3.2 粒度对粉体综合特性影响试验 采用标准筛对上述粉体进行分级处理, 制备不同粒度的粉体。通过BT-1000粉体综合特性测试仪记录相关数据, 计算差角、压缩度和分散度, 绘制粒度与指标的关系曲线并分析影响机理。

1.3.3 含水率对粉体综合特性影响试验 分别称取6份质量均为100 g的未进行粒度分级的干燥粉体, 依据文献^[27]方法进行等温吸湿处理, 通过控制吸湿时间获得湿基含水率分别为1.13%、2.22%、3.23%、4.21%、5.45%和7.17%的粉体。采用BT-1000粉体综合特性测试仪测量不同含水率条件下的相关参数, 计算差角、压缩度和分散度, 绘制含水率与指标的关系曲线并分析影响机理。

2 结果与分析

2.1 粒度对粉体综合特性的影响

2.1.1 粒度对粉体流动性的影响 由图1可知, 粒度对止角、崩溃角和差角的影响存在差异性。随粒度增大, 休止角和崩溃角先增大后减小, 而且休止角相对崩溃角的增减趋势更加平缓, 所以导致差角先减小后增大, 说明流动性呈现先降后增的趋势。75 μm 粒度时, 休止角和崩溃角分别达到最大值 $\theta_{r_{\max}}=37.8^{\circ}$ 和 $\theta_{f_{\max}}=30.1^{\circ}$, 而差角达到最小值 $\theta_{d_{\min}}=7.7^{\circ}$ 。大于75 μm 时, 粒度增大导致微粒比表面积减小, 表面聚合力 and 黏着力降低, 微粒团聚现象逐渐被破坏^[28], 从而改善了粉体的流动特征; 小于75 μm 后, 随粒度增大, 虽然表面聚合力 and 吸附性降

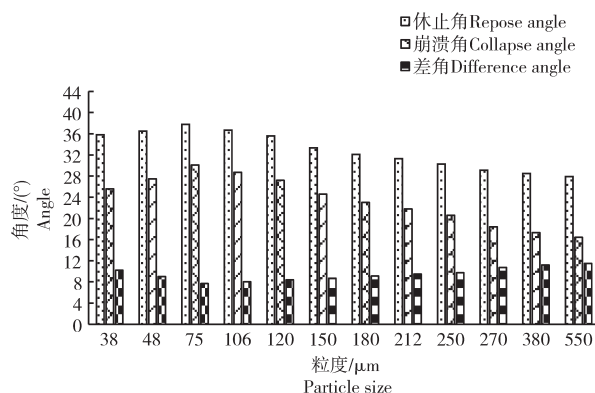


图1 粒度对粉体流动性影响

Figure 1 Effect of particle size on flowability

低,但是微粒由近似光滑的球状向表面粗糙的不规则形状转变,导致粒子间的啮合力有所增加,反而在一定程度上增大了流动阻力,因此流动性降低。

2.1.2 粒度对粉体压缩性的影响 粉体学性质(粒度及其分布、表面形态、比表面积等)是影响粉体压缩性的重要因素之一^[29],其中粒度对压缩性影响显著,一般情况下粒度越大则压缩度越小,即可压缩性越差^[30]。

由图2和图3可知,粒度对松装密度、振实密度和压缩度的影响显著。随粒度增大,松装密度和振实密度逐渐减小,而压缩度则先增大后降低,故压缩性表现出先升后降的趋势。75 μm 粒度时,压缩度达到最大值 $C_{p\text{max}}=11.5\%$ 。粒度增大,更加不规则的形状使得微粒间相互摩擦,使得微粒在容器中的排列更加松散,孔隙率持续增大,容器中容纳的微粒数目减少,故松装密度和振实密度均减小;受外加振动力的影响,微粒在容器中重新排列,部分孔隙被微粒填充而容器中的微粒数目增加,故振实密度要大于松装密度。粒度小于75 μm 时,微粒形貌为近似光滑的球形,承受振动作用时微粒间的静电力、摩擦力被破坏,在容器中重新排列而容纳的微粒数目显著增多,导致振实密度增加值明显大于松装密度增加值,所以压缩度呈增大趋势;粒度大于75 μm 后,微粒排列受外加振动力的影响减弱,振实后容器中微粒数目增加不明显,所以压缩度呈下降趋势。

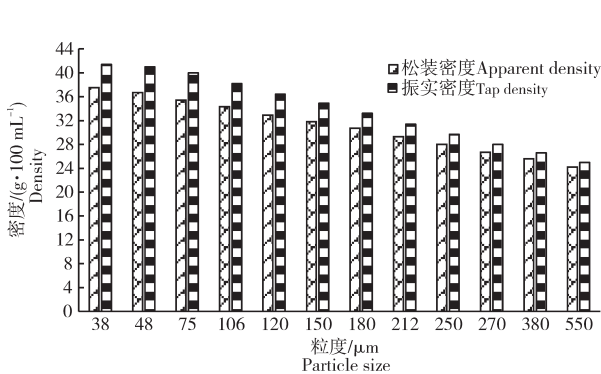


图2 粒度对粉体密度影响

Figure 2 Effect of particle size on densities

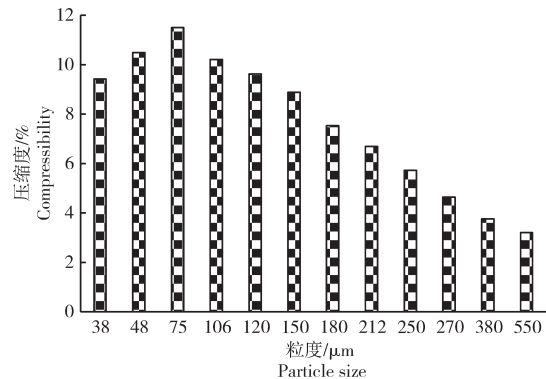


图3 粒度对粉体压缩性影响

Figure 3 Effect of particle size on compressibility

2.1.3 粒度对粉体喷流性的影响 微细化处理过程中,受微粒的量子尺寸效应和表面效应影响,粉体会呈现新的粉体学特性,如分散性、溶解性等^[31]。由图4可知,分散度受粉体粒度的影响显著,粒度增大,分散度先增大后减小,说明粉体的喷流性呈现先升后降的趋势。75 μm 粒度时,分散度达到最大值 $D_{\text{max}}=16.9\%$ 。粉体微粒在空气中自然散落时,同时承受自身重力、空气浮力及颗粒间作用力的综合影响。粒度大,重力大于空气浮力和颗粒间作用力的合力而自由落体速率较快,弥散于空气中的微粒数量较少,所以大于75 μm 时,分散度随粒度增大而持续降低。如果粒度很小,部分微粒间的聚合力急剧增大而形成团聚体,但是粒度小到一定程度,如小于75 μm 时,其重力远远小于空气浮力而导致更多微粒弥散于空气中,分散度反而显著增大。

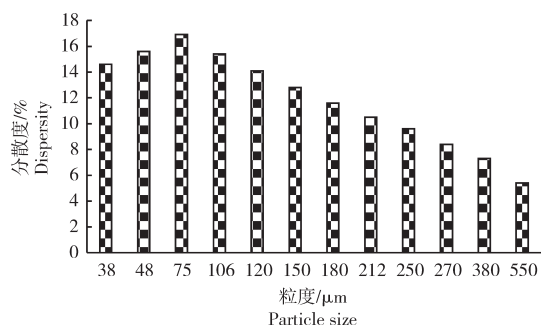


图4 粒度对粉体喷流性影响

Figure 4 Effect of particle size on floodability

2.2 含水率对粉体综合特性的影响

2.2.1 含水率对粉体流动性的影响 由图5可知,含水率对粉体休止角、崩溃角和差角影响明显。随含水率提高,休止角和崩溃角均呈现近似正线性相关趋势,差角却表现出近似负线性相关特征,说明流动性逐渐降低。当含水率为1.13%时,休止角最小而差角最大,分别为 $\theta_{\text{min}}=33.8^\circ$ 和 $\theta_{\text{dmax}}=10.5^\circ$,此时

粉体流动性最高。相关研究^[32-33]认为,粉体吸湿后会在微粒表面形成一层水膜,表面张力、毛细管力及液桥黏性力因此而增大,微粒间的摩擦嵌合作用增强而产生吸附性和黏滞性,造成微粒的散落性减弱,导致部分微粒出现宏观团聚现象,从而降低了粉体的流动性。

2.2.2 含水率对粉体压缩性的影响 由图6和图7可知,含水率对粉体松装密度、振实密度和压缩度影响明显。随含水率增加,松装密度和振实密度增大,但是振实密度增大速率要大于松装密度增大速率,所以压缩度逐渐增大,说明粉体的可压缩性或充填性逐渐提高。当含水率为7.17%时,压缩度最大值为 $C_{pmax}=13.8\%$ 。试验容器在静止状态下,含水率增加会导致微粒之间的胶结作用被削弱,内聚力因此明显减小^[34],促进小尺寸微粒在孔隙中的充填;另外,水分子比空气分子对粉体的亲和性更强,含水率增大,微粒吸附的自由水更多,从而增加了容器中粉体的质量,因此松装密度和振实密度明显增大。本试验对象为38~550 μm的多尺度粉体,微粉与颗粒混合在一起,粉体在容器高频振动过程中,水分子还起到了润滑剂的作用,促使微粒重新排列,更多孔隙被小尺寸微粉填充,所以振实密度增加速率要大于松装密度增加速率,致使压缩度呈增大趋势。

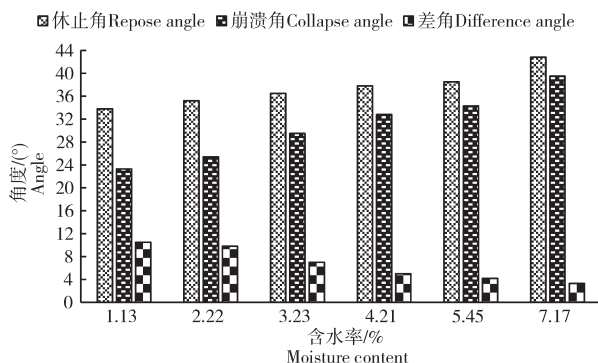


图5 含水率对粉体流动性影响

Figure 5 Effect of moisture content on flowability

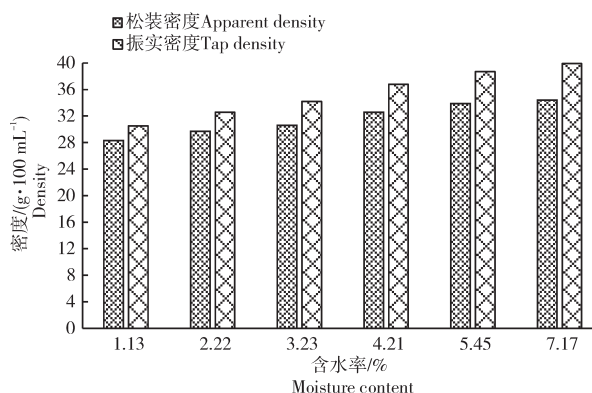


图6 含水率对粉体密度影响

Figure 6 Effect of moisture content on densities

2.2.3 含水率对粉体喷流性的影响 由图8可知,粉体分散度受含水率的影响相对明显。随含水率增加,分散度呈现负线性相关趋势,即喷流性逐渐降低。当含水率为1.13%时,分散度达到最大值为 $D_{amax}=15.2\%$ 。王慧敏等^[35]认为,粉体具有较强的亲水性,微粒在水分子粘附力的作用下相互吸引嵌合,不易随空气流场运动;由于水分子的亲和性,部分小尺寸微粒被大尺寸微粒粘附裹挟而自由落体,在一定程度上抑制了小尺寸微粒的分散,所以分散度随含水率增加而呈现降低趋势。

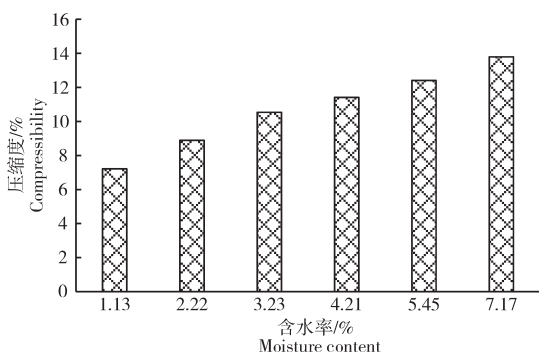


图7 含水率对粉体压缩性影响

Figure 7 Effect of moisture content on compressibility

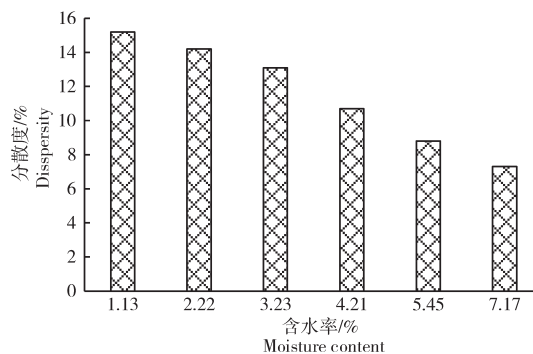


图8 含水率对粉体喷流性影响

Figure 8 Effect of moisture content on floodability

3 讨论与结论

试验分析中发现,粒度和含水率对粉体综合特性的影响规律与陈计远等^[36-37]的研究结果相近,但是与张帅等^[38-39]的研究结论不一致,结合本研究引用的参考文献,初步认为该现象是由研究对象的微

观结构和活性成分种类及含量^[40]的差异性造成的,但是需要通过试验验证这一猜测的科学性。另外,相关研究表明,除了粒度、含水率等自身因素对粉体综合特性产生影响之外,干燥和微细化处理^[41-42]方法与工艺等因素也可能会影响到粉体综合特性,值得进一步研究探索。

本研究结果表明,粒度和含水率对艾叶制绒后剩余物粉体的粉体学综合特性的影响显著。随粒度增大,流动性表现为先减后增的趋势,压缩性和喷流性呈现出先增后减的特征;随含水率增加,流动性和分散性表现为持续降低的规律,而压缩性呈现出逐渐增大的特点。根据粉体的休止角 $27^\circ < \theta_r < 43^\circ$ 、压缩度 $3\% < C_p < 14\%$,对照 Carr 流动性指数评价表^[23],分析认为其具有较弱的流动性和压缩性;根据粉体的分散度 $5\% < D_a < 17\%$ 、崩溃角 $16^\circ < \theta_f < 40^\circ$ 、差角 $3^\circ < \theta_a < 12^\circ$,对照 Carr 喷流性指数评价表^[43],分析认为其具有较弱的喷流性。但是,由于粉体应用场合不同,其加工工艺对粉体学性质的要求差异性较大^[44-45],所以作者认为不能以粉体综合特性参数的强弱简单地评价粉体的优劣与否,而是根据特定加工工艺要求选择粉体综合特性适宜的粉体,以提高成分提取、粉体包装或压片成型等加工工艺效率和资源利用率;同时,在包装、储运等机械设备设计时,也可参考试验数据进行关键机械结构的优化设计。

参考文献:

- [1] 李 军,赵百孝.灸材艾绒的制作工艺研究[J].环球中医药,2011,4(6):423-426.
- [2] 赵淑秀,刘青芝,穆向荣,等.艾草的化学成分及其提取工艺研究[J].药学研究,2021,40(12):803-806,811.
- [3] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.灸用艾绒:GB/T 40976—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [4] 钱珊珊,桂双英,杨满琴,等.中药超微粉碎技术的研究进展[J].陕西中医药大学学报,2019,42(3):136-140.
- [5] 左红娟,曹 辉,张晓申.艾草综合开发利用研究现状、存在问题及发展展望[J].特种经济动植物,2023(3):145-147,173.
- [6] 李艺博,李 娟,刘碧原,等.中药超微粉碎技术应用概况[J].中华中医药杂志,2020,35(9):4568-4570.
- [7] 高金玲,孙洪蕊,孟 悦,等.油莎豆速溶粉挤压熟化工艺优化及冲调性研究[J].粮食与油脂,2023,36(7):43-46,53.
- [8] 郭艳红,苏米亚,刘翠平,等.婴幼儿配方粉保质期内物理性质变化比较[J].食品工业,2015,36(9):176-179.
- [9] 郭 群.对玉米淀粉椰子粉的粉体学研究[J].当代医药论丛,2016,14(12):1-2.
- [10] 仝 萌,于翔羽,李淑坤,等.微粉化对姜黄色素粉体学性质及溶出度的影响研究[J].南京中医药大学学报,2021,37(2):231-236.
- [11] RATHOD P, MORI D, PARMAR R, et al. Co-processing of cefuroxime axetil by spray drying technique for improving compressibility and flow property[J]. Drug Development and Industrial Pharmacy, 2019, 45(5):767-774.
- [12] 张 浩.不同干燥方式对山楂粉食用品质及在面包中应用特性的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [13] 樊鹏帅,杨宗玲,王 俊,等.桑叶提取物压片糖果粉体造粒工艺优化[J].食品与发酵工业,2022,48(9):179-185.
- [14] 王海波,高会芹,李 哲,等.玄麦甘桔含片浸膏粉的粉体学性质与制粒工艺研究[J].中医研究,2020,33(4):55-58.
- [15] 周彩娟,孙 萍,汪月晗,等.基于多指标物理指纹图谱评价不同干燥方式对山楂提取物粉体特性影响研究[J].时珍国医国药,2023,34(5):1102-1104.
- [16] 李婉婷,宿军慧,李文静,等.压力范围对片剂压缩方程拟合结果的影响[J].药学报,2021,56(12):3547-3554.
- [17] YOHANNES B, LIU X, YACOBIAN G, et al. Particle size induced heterogeneity in compacted powders: Effect of large particles[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(12):2978-2986.
- [18] 杨 祺,汪月晗,孙 萍.两种中药提取物粉体学性质与粉末直压成形性研究[J].中国处方药,2023,21(2):31-34.
- [19] KIM E H J, CHEN X D, PEARCE D. Effect of surface composition on the flowability of industrial spray-dried dairy powders[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2005, 46(3):182-187.
- [20] 秦军伟,任德志,白雪卫,等.机械粉碎多尺度艾叶粉体学性质分析[J].沈阳农业大学学报,2023,54(5):586-591.
- [21] 刘 涛,付春梅,唐 玉,等.不同干燥方式对桑枝提取物物理指纹图及其总黄酮含量的影响[J].中国实验方剂学杂志,2019,25(3):34-38.
- [22] 解立斌,韩爱云,于宏伟,等.营养素预混料稀释剂的物性研究[J].中国食品添加剂,2017(8):107-115.
- [23] 丹东百特仪器有限公司. BT-1000 粉体综合特性测试仪用户手册[DB/OL]. https://wenku.baidu.com/view/b31637402f60ddccda38a0af.html?_wks_ =1694502485986.
- [24] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.颗粒材料物理性能测试第2部分:振实密度的测量:GB/T 31057.2—2018[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [25] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.颗粒材料物理性能测试第3部分:流动性指数的测量:GB/T

- 31057.3—2018[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.粉尘物性测试方法:GB/T 16913—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [27] 夏晓霞,薛艾莲,寇福兵,等.冬枣粉吸湿的色泽、热力学特性及糖物质基础分析[J].食品科学,2022,43(11):29-38.
- [28] 谭属琼,马森泉,李耀,等.米糠在超微粉碎下的粉体特性及其对小麦面粉加工特性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(10):139-145.
- [29] 何英蒙,皮超,魏郁梦.粉体粒子的物理性质对片剂压缩成型性的影响[J].中国医药工业杂志,2019,50(5):478-489.
- [30] 王嘉绍,刘朝贤,鲁端峰,等.不同粒径与含水率的烟粉颗粒流动性及影响因素[J].烟草科技,2020,53(4):75-81.
- [31] 杨菲,常金花,薛禾菲,等.不同粒度熟大黄粉体学性质及5种游离蒽醌溶出度研究[J].中成药,2022,44(10):3279-3282.
- [32] 邱述金,李霖霖,崔清亮,等.荞麦籽粒群摩擦力学特性研究[J].中国农机化学报,2021,42(9):90-95.
- [33] 战佳宇,李万民,房桂明,等.水泥粉体流动行为及其与不同材质库壁粘附性研究[J].硅酸盐通报,2021,40(2):401-406.
- [34] 刘铁军.粉煤灰用作路堤填料的力学特性试验研究[J].粉煤灰综合利用,2018,31(6):62-65.
- [35] 王慧敏,汪海波,蔡依彤,等.含水率对铣削木粉尘质量浓度和粒径分布的影响[J].林产工业,2021,58(9):1-6.
- [36] 陈计远,王红英,金楠,等.饲料原料粉体流动特性预测模型[J].农业工程学报,2019,35(21):312-318.
- [37] 孙静鑫,郭玉明,杨作梅,等.荞麦籽粒生物力学性质及内芯黏弹性试验研究[J].农业工程学报,2018,34(23):287-298.
- [38] 张帅,林宝妹,费鹏,等.不同粒度马齿苋粉的物化性质研究[J].饲料研究,2021,44(9):118-121.
- [39] XU G L, LU P, LI M H, et al. Investigation on characterization of powder flowability using different testing methods [J]. Experimental thermal and fluid science, 2018, 92: 390-401.
- [40] 吴森,康建平,刘建,等.杜仲雄花代餐粉冲调特性改良[J].中国食品添加剂,2020,31(1):118-123.
- [41] 金俐延.超微粉碎对寒富苹果渣理化性质的影响及高纤片剂的研制[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [42] 刘玉峰,郭好好.超临界流体萃取在提取分离萜类化合物中的应用[J].辽宁大学学报(自然科学版),2022,49(4):333-342.
- [43] 崔灵,笹边修司,清水健司,等.粉体流动性及喷流性测量方法及其应用[J].中国粉体技术,2012,18(1):72-77.
- [44] 何光华,姜旭,刘少莉,等.婴幼儿配方奶粉粉体流动性研究[J].核农学报,2023,37(6):1218-1226.
- [45] 李良,朱向哲,吴婷婷.基于离散单元法的单螺秆挤出机固体粒子输送特性分析[J].辽宁石油化工大学学报,2022,42(3):68-73.

[责任编辑 亓国]