

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.027

猪粪颗粒粒度、粒形的量化表征方法研究*

葛金怡 黄光群 黄晶 曾剑飞 韩鲁佳
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 以猪粪物料为研究对象,基于去离子水分散、热风干燥-机械振荡、真空冷冻干燥-机械振荡3种分散预处理方法,分别采用激光粒度分析、扫描电镜分析、动态图像分析法测定其粒度分布和特征参数。扫描电镜观察结果表明,猪粪颗粒属于不规则颗粒;热风干燥-机械振荡分散后的样品存在较多团聚体。不同分散预处理的测定结果显示,因猪粪样品部分组分的可溶性和热风干燥-机械振荡过程中的团聚现象,宜优选真空冷冻干燥-机械振荡作为分散预处理方法。3种测量方法所获参数存在差异,其中,动态图像分析法由于采用直接测量原理和动态检测过程,可优选其作为检测畜禽粪便物料粒度分布的方法。基于真空冷冻干燥-机械振荡分散预处理和动态图像分析法,获取猪粪颗粒的纵横比和球形度分别为 0.57 ± 0.01 和 0.61 ± 0.01 ,中值粒径为 $(501 \pm 16) \mu\text{m}$,粒度分布宽度参数为 1.45 ± 0.04 。

关键词: 猪粪颗粒 粒度 粒形 量化表征 真空冷冻干燥 动态图像分析法
中图分类号: S14-33; X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0192-05

Quantitative Characterization of Particle Size and Shape of Pig Manure

Ge Jinyi Huang Guangqun Huang Jing Zeng Jianfei Han Lujia
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Quantitative characterization of particle morphology of manure is one of the key factors for modeling the fluid flow and degradation mechanism during manure management. This study applied three dispersion pretreatments (water dispersion, oven drying – mechanical vibration and vacuum freeze drying – mechanical vibration) and three analysis methods (scanning electron microscopy, dynamic image analysis and laser particle size analysis) to explore the particle size distribution and microscopic properties of pig manure. Scanning electron micrographs showed that manure particles had an irregular shape; the oven dried-mechanically vibrated sample had more aggregates. The comparison between the results of different pretreatments indicated that the vacuum freeze drying – mechanical vibration could be selected as the preferred method because of the soluble components of manure and the aggregates generated during the oven drying process. There were differences in the values of characteristic parameters obtained by three analysis methods, and the dynamic image analysis was suggested as an effective method because of the direct measurement of particle morphology and the high degree of automation. Based on the optimized methods, the median diameter of manure particles was $(501 \pm 16) \mu\text{m}$, the span of particle size distribution was 1.45 ± 0.04 , and the shape factors including the aspect ratio and sphericity were 0.57 ± 0.01 and 0.61 ± 0.01 , respectively.

Key words: Pig manure paticle Particle size Particle shape Quantitative characterization Vacuum freeze drying Dynamic image analysis

收稿日期: 2014-05-14 修回日期: 2014-06-14
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD47B01)、国家自然科学基金资助项目(31201684)和公益性行业(农业)科研专项资金资助项目(201003063)
作者简介: 葛金怡, 博士生, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: gejinyi@cau.edu.cn
通讯作者: 韩鲁佳, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: hanlj@cau.edu.cn

引言

伴随畜牧养殖业的快速发展,畜禽粪便等农业废弃物的污染风险日益加剧。据统计,我国畜禽粪便年增长率约为 2.32%,预计 2020 年其总量将超过 30 亿 t^[1]。目前,畜禽粪便资源化主要转化技术包括生化发酵、热化学转化和压缩成型等^[2],准确量化表征物料的微观参数,例如粒度粒形^[3]、颗粒比表面积^[4]和好氧层厚度^[5]等,对于研究畜禽粪便资源化利用过程中堆体内部流体的流动规律、堆肥物料的降解反应机制具有重要意义。

国内外学者主要采用筛分法进行畜禽粪便粒度分布 (Particle size distribution, PSD) 研究^[3]。由于传统筛分法受筛网孔径、数量的限制,只能对样品的粒度进行粗略分级,获取的 PSD 曲线呈现不连续性,以致在进行有关研究时缺少平均粒径等具体特征参数。另一方面,鉴于其测量原理的局限性,该方法无法实现对颗粒粒形的检测与评估。对此,有报道指出畜禽粪便物料的粒度、粒形的测定分析可以借鉴土壤领域的相关研究成果^[3,6]。

本文以猪粪物料为研究对象,通过优选分散预处理方法和 PSD 测量方法,定量表征猪粪颗粒的粒度、粒形,以期为进一步研究和构建畜禽粪便堆肥机理模型提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

猪粪样品采自北京市昌平区中国农业科学院养殖试验场。样品采回后立即进行相关理化指标的测定及 PSD 测量分析的分散预处理。

1.2 理化指标测定

参照 TMECC 03.09-A 和 TMECC 05.07-A 测定猪粪物料含水率和有机质含量^[7];利用元素分析仪 (Vario EL CHNOS 型,德国)测定分析总碳、总氮含量。每次试验重复 3 次,测量结果取平均值。

1.3 分散预处理方法

猪粪样品中,颗粒由于受到范德华力、液桥力等因素作用,极易产生团聚现象。根据现有研究及土壤学领域 PSD 分析方法,样品往往需要在分散介质中进行预处理,分散介质主要包括空气和液体分散剂^[8]。本研究采用如下分散预处理方法:①选用空气为分散剂,先将其置于 105℃ 下干燥 24 h^[9-10]以消除颗粒间液桥力的影响,然后借鉴分散土壤团聚体时所采用的机械振荡法,将样品与橡胶球混合轻微振荡 10 min^[11],制成热风干燥-机械振荡样品。②鉴于猪粪样品中的有机质易在高温干燥过程中产

生化变化,引入真空冷冻干燥取代热风干燥进行比较分析,猪粪样品于 -80℃ 下预冻 8 h 后利用冷冻干燥仪 (ALPHA 1-2 plus 型,德国)进行冻干处理,干燥条件为 -42℃、10 Pa 和 24 h,冻干完毕后采用相同的机械振荡处理方式制成真空冷冻干燥-机械振荡样品。③选取去离子水为分散剂,猪粪样品经 1:4 (料液质量比)稀释后^[12]磁力搅拌 10 min,制成液态样品。

1.4 扫描电镜分析

本研究采用扫描电镜分析 (Scanning electron microscopy, SEM) 直接观察猪粪的粒度和颗粒形貌特征,并进行量化分析。受测量原理限制,该方法只可针对干燥样品进行测定分析。测量过程中,利用扫描电子显微镜 (S-3400N 型,日本)采集颗粒图像,经 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件进行灰度分割 (ISO 13322-1^[13]),输出样本的数量-粒度相关关系曲线、第 i 粒级粒径 d_i 、该粒级内颗粒个数 n_i 和形状参数,即纵横比和球形度。纵横比表述颗粒的伸长度和不规则程度,该指标越偏离 1,颗粒形状越不规则;球形度则表示颗粒接近球形的程度,该数值越接近 1,颗粒越接近于球体^[14-15]。每个样本至少统计 500 个颗粒信息^[16]。获取的数量-粒度分布可进一步转换为体积分数-粒度分布后与其他测量方法所得结果进行直接比较^[10],公式为

$$V_i = n_i \frac{\pi d_i^3}{6} \tag{1}$$

式中 V_i ——第 i 粒级总体积

体积分数-粒度分布的特征参数包括 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 。其中, D_{10} 为样品的累计体积分数达到 10% 时所对应的粒径数值, D_{50} 和 D_{90} 的物理含义以此类推。现有研究普遍将中值粒径 D_{50} 作为平均粒径指标,用以评价样品整体粒度大小^[8]。基于上述参数,计算 PSD 宽度

$$W_{\text{span}} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \tag{2}$$

该参数数值越大,PSD 范围越宽,试验可重复性越差^[8]。

1.5 动态图像分析

本研究同时采用动态图像分析法 (Dynamic image analysis, DIA) 测定热风干燥-机械振荡样品和真空冷冻干燥-机械振荡样品的 PSD。DIA 作为一种新兴的测试技术,与 SEM 相似,采用直接测量的检测原理。不同之处在于,DIA 检测过程中颗粒呈现动态下落状态,2 个成像镜头分别捕捉小颗粒、大颗粒图像,通过图像软件进行数据处理和分析。试验过程中,取 5~10 g 干燥样本利用动态粒径粒

形分析仪 (Camsizer 型, 德国) 获取其体积分数-粒度分布曲线、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、纵横比和球形度, 并计算 W_{span} 值。2 种样品各测定 3 个平行试样, 测量结果取平均值 (ISO13322-2^[17])。

1.6 激光粒度分析

采用激光粒度分析 (Laser particle size analysis, LPSA) 方法, 是在假定所测颗粒为球体的前提下, 对颗粒与光束所产生的光散射现象进行分析, 从而获得 PSD 数据的测量方法。首先对经去离子水分散的液态样品进行测定, 取 1~2 mL 样品利用激光粒度仪 (Mastersizer 3000 型, 英国) 获取其 PSD 曲线和特征参数 (ISO 13320-1^[18])。参考测量土壤时的仪器工作参数, 设定颗粒和分散介质 (去离子水) 的折射率分别为 1.530 和 1.330^[10]。其次, 分别测定热风干燥-机械振荡样品和真空冷冻干燥-机械振荡样品。各取 5 g 样品利用激光粒度仪进行测定分析, 设定颗粒和分散介质 (空气) 的折射率分别为 1.520 和 1.000^[19]。LPSA 的测量结果包括体积分数-粒度分布曲线、 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} , 并计算 W_{span} 值。由于该法基于球形颗粒的假定条件进行测量分析, 故无法检测颗粒样本的形状参数。3 种样品各测定 3 个平行试样, 测量结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 理化指标测定结果与分析

经测定, 猪粪物料的含水率为 $84.96\% \pm 0.04\%$, 有机质质量分数 (湿基) 为 $10.70\% \pm 0.12\%$, 样本总碳质量分数 (湿基) 为 $6.36\% \pm 0.02\%$, 总氮质量分数 (湿基) 为 $0.64\% \pm 0.00\%$ 。统计资料显示, 我国新鲜猪粪平均含水率为 82%, 有机质质量分数 15.0%, 总氮质量分数 0.56%^[20]。试验获取的理化指标与全国平均含量水平较为一致, 故本试验选取样本具有一定的代表性。

2.2 颗粒形貌及粒形分析结果

图 1 所示为热风干燥-机械振荡样品和真空冷冻干燥-机械振荡样品的扫描电镜图像, 图 2 所示为 2 种样品的粒形参数测定结果。

根据图 1 可清楚地观察到猪粪颗粒的微观形貌。颗粒尺寸介于微米至毫米量级范围内, 其表面较为粗糙并吸附有微小碎屑, 颗粒边缘部分不规整, 整体呈不规则多边形。在对热风干燥-机械振荡样品进行分析时, 可检测到大量如图 1 所示的较大团聚体。与此相反, 真空冷冻干燥-机械振荡样本的颗粒较小、颗粒间很少出现团聚现象, 分散程度较高。这一现象与 Peng 等^[21]通过 SEM 法观测干燥、冻干处理后的纤维素微纤丝样品结果一致, 即热风干燥

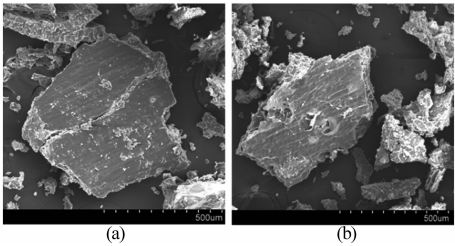


图 1 猪粪颗粒样品的 100 倍扫描电镜图像
Fig.1 SEM images of manure particles(100 ×)
(a) 热风干燥-机械振荡 (b) 真空冷冻干燥-机械振荡

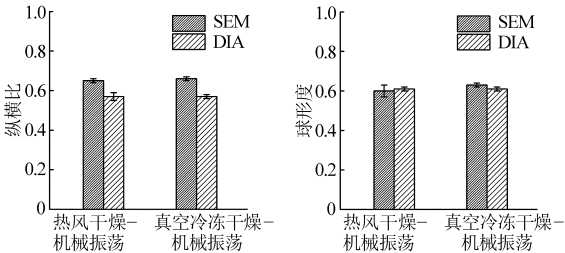


图 2 利用 SEM 法和 DIA 法测定猪粪颗粒的纵横比和球形度结果

Fig.2 Determination of aspect ratio and sphericity of manure particles by SEM and DIA

过程中颗粒间作用力加强, 产生团聚体。究其原因, 可能与机械振荡无法消除热风干燥升温过程中因化学键变化形成的硬团聚体有关^[22]。由图 2 所示, 2 种样本的纵横比和球形度均在 0.60 左右。Cardoso 等^[23]利用 DIA 法获取甘蔗渣、烟草残渣以及大豆皮等生物质物料的球形度在 0.45~0.70 范围内。根据 Coltell 等^[14]凭借粒形参数对颗粒形状的级别划分, 猪粪物料属于不规则颗粒。针对同一样品, SEM 测得的纵横比较 DIA 所测结果大 0.1 左右, 即 SEM 在二维平面内检测到的颗粒形状比颗粒整体形状更为规整, 表示猪粪颗粒可能呈片状。

2.3 不同分散预处理的颗粒粒度分析结果比较

如图 3 所示, 经不同分散预处理方法所得样本的 D_{50} 虽处于同一数量级内, 但测定结果具有明显差异性。

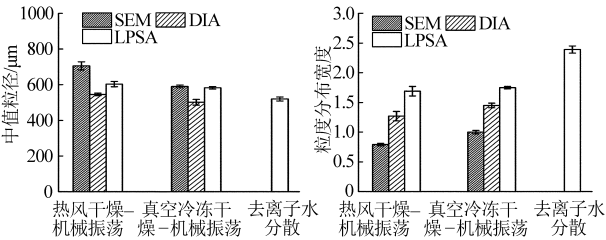


图 3 利用 SEM、DIA 和 LPSA 法测定猪粪颗粒的中值粒径和粒度分布宽度结果

Fig.3 Determination of median diameter of manure particles and span of particle size distribution by SEM, DIA and LPSA

比较图 3 中热风干燥-机械振荡样品和真空冷冻干燥-机械振荡样品的测量结果可以看出, 当采用

同一种检测方法时,热风干燥-机械振荡样品的 D_{50} 偏大,这可能是由于这种分散预处理方式使得样本中仍存留较多的团聚体所致,扫描电镜图像(图 1)可以佐证这一结论。而对于去离子水分散,猪粪样本经稀释后溶液呈深褐色,部分组分具有可溶性,故液态样本的 D_{50} 小于另外 2 种分散样品的测定结果。液态样品的 W_{span} 较大,这表示经去离子水分散后,部分颗粒溶解成为微小颗粒,放大了样本 PSD 宽度,使试验可重复性降低。采用液态介质进行分散预处理后,部分样品溶解,粒度分布 W_{span} 增加,上述情况符合张玉格等^[24]在测定聚合物微球时所观察到的现象。因此,综合考虑加热干燥过程化学键变化导致的团聚现象以及猪粪样品部分组分的可溶性,优选真空冷冻干燥-机械振荡法分散猪粪样品。

2.4 粒度分布测量方法的比较与分析

对于热风干燥-机械振荡样品,本试验中 SEM、DIA 和 LPSA 法的 D_{50} 检测结果为 $(705 \pm 23) \mu\text{m}$ 、 $(545 \pm 7) \mu\text{m}$ 和 $(603 \pm 15) \mu\text{m}$ (图 3)。Barrington 等^[25]利用九层筛网获取了干燥猪粪样本的 PSD 曲线,并可由该曲线估计出猪粪样本的 D_{50} 约为 $500 \mu\text{m}$ 。SEM 法的测定结果与这一数值偏差较大,主要原因有:①SEM 法是以人工方式选择颗粒进行图像采集,无法涵盖全部小颗粒组分,造成 PSD 中这一部分所占比例下降,从而最终导致 D_{50} 估计偏高。②如图 1 所示,颗粒在静态检测过程中普遍处于平置状态,对于片状颗粒,SEM 法所获取的二维图像信息大于筛分法和 DIA 等动态测量法所获得的三维结果。Lautze 等^[26]通过玄武岩火山灰的 PSD 曲线测定,表明 SEM 法获取的 D_{50} 大于 DIA 所测数值,这一规律与本文所观察到的现象一致。本试验利用 DIA 法获取的热风干燥-机械振荡样品的 D_{50} 数值与传统筛分法的测量结果具有较好的一致性,这是因为 DIA 法具有同筛分法相似的动态检测过程,通过分析大量颗粒获取具有一定代表性的三维测量结果,并且该方法属于直接测量法,不受基本假设条件限制;另一方面,DIA 法获取的 D_{50} 比传统筛分法所测结果大 $50 \mu\text{m}$ 左右,这是由于 DIA 的测试结果是基于体积分数,筛分法是基于质量分数,而猪粪样品中大粒级的部分孔隙更多、密度较小所致^[27]。本试验中 LPSA 的检测结果显示,这可能是由于激光法的间接测量原理假设颗粒呈球形所致。该假设将样品中不规则颗粒的激光信号放大,使得最终获取到的 D_{50} 数值偏大^[10]。由此可以看出,对于不规则的猪粪颗粒样本,LPSA 法与传统筛分方法存在一定差异性。图 3

中的 W_{span} 可对上述分析加以辅证:受人工选取颗粒限制,SEM 法的粒径测量范围较小,测量的颗粒粒径趋于一致,故其获取的 W_{span} 异常小;LPSA 针对不规则猪粪颗粒检测到的 W_{span} 较大,试验重复性较差,测量结果可信度不高。

对于液态样品,本研究通过 LPSA 法测得其 D_{50} 为 $(520 \pm 11) \mu\text{m}$ (图 3)。而 Peters 等^[12]利用相同的去离子水分散预处理和 4 组筛网(25 、 250 、 500 、 $1\,000 \mu\text{m}$)测得猪粪样品的 D_{50} 位于 $25 \sim 250 \mu\text{m}$ 范围内。LPSA 法获取的 D_{50} 数值结果超出该范围,这可能是由于其测量原理中的球形颗粒假设所致。

综上,由于 DIA 在不用考虑样品和分散介质折射率的情况下可以利用直接测量法同时满足粒度、粒形的检测要求,并且拥有较高的自动化程度以减小人为误差,优选其作为快速检测猪粪颗粒粒度、粒形的方法。

2.5 猪粪颗粒粒度、粒形的量化表征

如图 2 所示,基于真空冷冻干燥-机械振荡分散预处理和 DIA 测量方法,进行猪粪颗粒粒度、粒形的量化表征,猪粪颗粒纵横比和球形度分别为 0.57 ± 0.01 和 0.61 ± 0.01 ,属于形状不规则颗粒。如图 3 所示, D_{50} 为 $(501 \pm 16) \mu\text{m}$, W_{span} 为 1.45 ± 0.04 。利用优选方法量化表征畜禽粪便物料的粒度、粒形参数对于研究其资源化利用过程中流体流动特性、数值模拟参数和降解反应机制具有重要的参考价值,但该方法对于不同种属畜禽粪便物料的适用性仍需做进一步的研究与分析。

3 结论

(1)扫描电镜微观形貌观察结果表明,猪粪颗粒属于形状不规则颗粒;热风干燥-机械振荡分散处理后的样品存在较多团聚体。

(2)不同分散预处理的颗粒粒度分析结果显示,因猪粪样品部分组分的可溶性和热风干燥-机械振荡过程中存在的团聚现象,宜优选真空冷冻干燥-机械振荡作为猪粪颗粒粒度、粒形分析的分散预处理方法。

(3)SEM、DIA 和 LPSA 对于猪粪颗粒 PSD 的测定结果显示,不同测量方法所获参数存在差异,其中,DIA 由于采用直接测量原理和动态检测过程,获取了与传统筛分结果较为一致的 PSD 参数,可优选其作为检测畜禽粪便物料 PSD 的方法。

(4)基于真空冷冻干燥-机械振荡分散预处理和 DIA 测量方法,获取猪粪颗粒纵横比和球形度为 0.57 ± 0.01 和 0.61 ± 0.01 , D_{50} 为 $(501 \pm 16) \mu\text{m}$, W_{span} 为 1.45 ± 0.04 。

参 考 文 献

- 1 林源,马骥,秦富.中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J].中国农学通报,2012,28(32):1-5.
Lin Yuan, Ma Ji, Qin Fu. The structure distribution and prospect of china manure resource[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 1-5. (in Chinese)
- 2 李文哲,徐名汉,李晶宇.畜禽养殖废弃物资源化利用技术发展分析[J].农业机械学报,2013,44(5):135-142.
Li Wenzhe, Xu Minghan, Li Jingyu. Prospect of resource utilization of animal faeces wastes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 135-142. (in Chinese)
- 3 Agnew J M, Leonard J J. The physical properties of compost[J]. Compost Science & Utilization, 2003, 11(3): 238-264.
- 4 孙辰,刘荣厚,覃国栋.芦笋秸秆预处理与厌氧发酵制取沼气试验[J].农业机械学报,2010,41(8):94-99.
Sun Chen, Liu Ronghou, Qin Guodong. Experiments on pretreatment and anaerobic digestion of asparagus stalk for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 94-99. (in Chinese)
- 5 Ge J, Huang G, Yang Z, et al. Characterization of dynamic thickness of the aerobic layer during pig manure aerobic composting by Fourier transform infrared microspectroscopy[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(9): 5043-5050.
- 6 Agostini F, Sundberg C, Navia R. Is biodegradable waste a porous environment? A review[J]. Waste Management & Research, 2012, 30(10): 1001-1015.
- 7 Thompson W H, Leege P B, Millner P D, et al. Test methods for the examination of composting and compost[M]. Washington: US Composting Council, 2002.
- 8 任俊,沈健,卢寿慈.颗粒分散科学与技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- 9 Lau A K, Liao P H, Lo K V. Evaluation of swine waste composting in vertical reactors[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A, 1993, 28(4): 761-777.
- 10 Pieri L, Bittelli M, Pisa P R. Laser diffraction, transmission electron microscopy and image analysis to evaluate a bimodal Gaussian model for particle size distribution in soils[J]. Geoderma, 2006, 135: 118-132.
- 11 de Gryze S, Six J, Brits C, et al. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(1): 55-66.
- 12 Peters K, Hjorth M, Jensen L S, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus distribution in particle size-fractionated separated pig and cattle slurry[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(1): 224-232.
- 13 ISO 13322-1. Particle size analysis—image analysis methods—part 1: static image analysis methods[S]. 2004.
- 14 Coltelli M, Miraglia L, Scollo S. Characterization of shape and terminal velocity of tephra particles erupted during the 2002 eruption of Etna volcano, Italy[J]. Bulletin of Volcanology, 2008, 70(9): 1103-1112.
- 15 Miller N A, Henderson J J. Quantifying sand particle shape complexity using a dynamic, digital imaging technique[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(5): 1407-1414.
- 16 Pons M N, Vivier H, Delcour V, et al. Morphological analysis of pharmaceutical powders[J]. Powder Technology, 2002, 128(2): 276-286.
- 17 ISO 13322-2. Particle size analysis—image analysis methods—part 2: dynamic image analysis methods[S]. 2006.
- 18 ISO 13320. Particle size analysis—laser diffraction methods[S]. 2009.
- 19 罗轶,冯修军,黄婉霞,等.微米镍粉在太赫兹波段的 Mie 散射特性研究[J].激光与红外,2011,41(3):302-305.
Luo Yi, Feng Xiujun, Huang Wanxia, et al. THz scatterrhg characteristics of micron ni particle based on Mie light scattering theory[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(3): 302-305. (in Chinese)
- 20 李国学,张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M].北京:化学工业出版社,2000.
- 21 Peng Y, Gardner D J, Han Y, et al. Influence of drying method on the surface energy of cellulose nanofibrils determined by inverse gas chromatography[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 405: 85-95.
- 22 程科,王晓冬,兰亚超,等.高倍率性能磷酸亚铁锂/碳正极材料的制备与表征[J].复合材料学报,2013,30(1):135-140.
Cheng Ke, Wang Xiaodong, Lan Yachao, et al. Preparation and characterization of LiFePO₄/C cathode materials with high-rate performance[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1): 135-140. (in Chinese)
- 23 Cardoso C R, Oliveira T J P, Santana Junior J A, et al. Physical characterization of sweet sorghum bagasse, tobacco residue, soy hull and fiber sorghum bagasse particles: density, particle size and shape distributions[J]. Powder Technology, 2013, 245: 105-114.
- 24 张玉格,王补森,陈洪彬,等.改进的微悬浮聚合法制备聚合物微球[J].高等学校化学学报,1992,13(11):1485-1487.
Zhang Yuge, Wang Busen, Chen Hongbin, et al. Preparation of polymeric microparticles by improved microsuspension polymerization[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 1992, 13(11): 1485-1487. (in Chinese)
- 25 Barrington S, Choinière D, Trigui M, et al. Compost convective airflow under passive aeration[J]. Bioresource Technology, 2003, 86(3): 259-266.
- 26 Lautze N C, Taddeucci J, Andronico D, et al. SEM-based methods for the analysis of basaltic ash from weak explosive activity at Etna in 2006 and the 2007 eruptive crisis at stromboli[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2012, 45-46: 113-127.
- 27 王宇,郭正阳,刘萃莲,等.三种聚丙烯粉料粒度分布测试方法比较[J].应用化工,2009,38(8):1222-1224.
Wang Yu, Guo Zhengyang, Liu Cuilian, et al. Comparison of three methods for measuring particle size distribution of polypropylene powder[J]. Applied Chemical Industry, 2009, 38(8): 1222-1224. (in Chinese)
- 28 石惠娴,吕涛,朱洪光,等.猪粪流变特性与表观粘度模型研究[J].农业机械学报,2014,45(2):188-193.
Shi Huixian, Lü Tao, Zhu Hongguang, et al. Rheological properties and apparent viscosity model of pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 188-193. (in Chinese)