



基于微米CT的磨介对产物三维形貌影响实验设计

谢卫宁, 林生茂, 王 帅, 冯芝勇

Experimental Design of Effect of Grinding Media on Three-Dimensional Morphology of Products Based on Micro-CT

XIE Weining, LIN Shengmao, WANG Shuai, and FENG Zhiyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.182>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于三维X射线显微镜的孔隙性砂岩中变形带微观结构解析

Microstructure Analysis of Deformation Band in Porous Sandstone Based on Three-dimensional X-ray Microscope
CT理论与应用研究. 2019, 28(2): 167–174

三维CT与X线片检查跟骨骨折中的应用价值分析

Analysis of the Value of Three-dimensional CT and X-ray Examination in Calcaneal Fractures
CT理论与应用研究. 2019, 28(3): 371–376

弹性波CT技术在大足石刻岩体破碎带探测中的应用

Application of Elastic Wave CT Technique on Detection of Fracture Zone in the Rock Mass of Dazhu Stone Carvings
CT理论与应用研究. 2018, 27(1): 35–44

珠江三角洲地区断层构造岩三维微观结构特征初步研究

A Preliminary Study on the Three-dimensional Microstructures of Fault Tectonite in the Pearl River Delta Region
CT理论与应用研究. 2020, 29(3): 257–272

基于微焦点CT与数据约束模型的古代家猪牙齿显微结构研究

Study on the Microstructure of Ancient Pig Teeth Based on Micro-CT and Data-constrained Modeling
CT理论与应用研究. 2020, 29(6): 677–685

基于二次场的海洋可控源电磁法三维有限元正演

Three-dimensional Marine Controlled-source Electromagnetic Modeling by Finite Element Method Based on Secondary Field
CT理论与应用研究. 2018, 27(5): 561–571



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谢卫宁, 林生茂, 王帅, 等. 基于微米 CT 的磨介对产物三维形貌影响实验设计[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2024, 33(3): 299–308. DOI:10.15953/j.ctta.2023.182.
XIE W N, LIN S M, WANG S, et al. Experimental Design of Effect of Grinding Media on Three-Dimensional Morphology of Products Based on Micro-CT[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(3): 299–308. DOI:10.15953/j.ctta.2023.182. (in Chinese).

基于微米 CT 的磨介对产物三维形貌影响实验设计

谢卫宁^{1,2✉}, 林生茂², 王帅¹, 冯芝勇³

1. 中国矿业大学现代分析与计算中心, 江苏 徐州 221116

2. 中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州 221116

3. JTRI-浩通新材料联创中心, 江苏 徐州 221116

摘要: 本文设计研究球形和六棱柱形研磨介质对煤炭破碎产物三维形貌特征影响的实验, 具体过程包括不同时间批次煤炭破碎和筛分, 基于高分辨三维 X 射线显微成像系统的粗粒级煤炭无损检测以及基于 Dragonfly 三维数据分析软件的完整颗粒分割提取和三维形貌特征参数计算等环节。结果显示: 在球磨机转速率较低的前提下, 钢球和钢锻的总表面积或总质量相同时, 钢球作用下物料的初始粒级破碎速率略高于钢锻, 且-1mm 细粒级产率最高。研磨作用促使粗粒级物料的体积和表面积降低, 3 种研磨条件下表面积最大的钢锻对样品的“磨剥”作用最为明显, 颗粒球形度最高。

关键词: 微米 CT; 三维数据分析; 破碎; 实验设计

DOI:10.15953/j.ctta.2023.182

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A

我国资源的禀赋特征存在“贫、细、杂”的特点, 从矿石到合格工业产品需经历破碎、磨矿、磁选、浮选等长流程, 其中可实现物料粒度减小和伴生矿物解离的磨矿作业是关键环节^[1–4]。球磨机是广泛应用在铁矿或有色金属矿山的细磨设备, 主要借助磨剥和冲击作用处理物料, 其运行过程和工作效率受磨机转速、介质材质、球径配比等多种参数的综合影响^[5–7]。矿物研磨能耗在选矿厂整体能耗中占比较高(部分超过 70%), 提升球磨机运行效率并降低能耗成为球磨机研究的热点^[8–10]; 而当前针对球磨过程物料性质变化等现象的关注相对较少。考虑到矿物经球磨处理后还需浮选分离, 球磨产物的表面或三维形貌差异将会对不同组分的分离效率产生影响, 因此基于现代分析检测方法开展不同球磨条件下颗粒的三维形貌特征势在必行。

介质种类对矿物研磨过程影响的研究目前主要集中在产物细度和能耗方面^[11]。钢球作为最传统的研磨介质应用广泛, 但近年来钢锻或六棱柱等其他形状研磨介质使用场景日趋增多; 而陶瓷材质的球形介质已取代钢球并应用在某些矿物的细磨工艺^[12–17]。Shi^[18]发现在输入能量相同前提下, 钢锻研磨产物中粗粒级含量较球磨少, 但细粒级产率较为接近。Ipek^[19–20]通过对比实验证实钢锻研磨物料的破碎速率要快于钢球。徐今冬等^[21]在考察陶瓷球和钢球对细粒磁铁矿研磨效果后发现在最佳磨矿条件下, 以陶瓷球为介质的研磨能耗、噪声、效率和产物细度等指标全方面优于钢球球磨; 而在钨矿石细磨研究中也取得相同的实验效果。童佳琪等^[22]在钨矿石细磨研究中证实以面接触为主的六棱柱介质对细粒级物料的研磨效果优于以线接触为主的钢锻, 且前者可有效保护矿物避免过粉碎现象。各形状介质对矿物研磨效果差异主要归因于冲击或磨剥作用下颗粒内部缺陷扩展和碎裂机制不同^[23–27], 而除颗粒粒度组成差异外还主要表现为多样化的颗粒三维形貌特征。

研磨是各类矿山有用矿物分选处置的重要过程, 也是矿物加工工程学科专业知识体系的有机组成部分。然而当前研磨实验设计较为传统, 仅关注介质种类、处理时间等对产物粒度和矿物解离度

收稿日期: 2023–09–18。

基金项目: 国家自然科学基金(基于物相识别定量的中速磨煤机煤炭混合破碎机理研究(51904295)); 中国矿业大学集萃研究生教育教学改革专项(基于分析技术与工程引领融合的工科研究生实践创新能力培养机制研究(2023JCJG009))。

等指标参数的影响。而在不同类型介质的冲击、挤压和磨剥作用下,颗粒的径向断裂、整体碎化以及逐层剥离所引发的三维形貌差异研究相对较少。

针对此问题,本文选用 $-4+2.8\text{mm}$ 超纯无烟煤为实验对象,分别利用相同质量和比表面积的钢球和钢锻对窄粒级无烟煤开展多时间批次研磨实验;利用高分辨三维X射线显微成像系统和Dragonfly分析软件开展粗粒级产物的无损检测和三维体数据分析,明确不同形状研磨介质在处理煤样时所产生的颗粒体积、比表面积和球形度等三维形貌特征参数的差异。

1 实验设计与目标

1.1 实验步骤

本文所涉及的实验内容主要包括材料准备、研磨实验、微米CT无损检测、三维体数据分析和实验现象分析等5部分。

(1) 材料准备。完成无烟煤样品制样,准备等直径的钢球和短圆柱钢锻,计算相同介质体积和表面积装载条件下所需的介质质量。

(2) 研磨实验。开展固定磨机转速,相同介质体积和表面积的钢球和短圆柱钢锻对等质量无烟煤不同时间批次的干法研磨实验,完成各条件研磨产物粒度分析。

(3) 微米CT无损检测。利用微米CT对两种研磨介质相同粒级的产物进行相同测试参数和体素条件下的二维和三维成像,并确保分析区域内颗粒数量满足数据统计要求。

(4) 三维体数据分析。利用Dragonfly三维分析软件的分水岭算法,分割提取不同研磨条件下的产物颗粒,并计算各颗粒体积、表面积和球形度。

(5) 实验现象分析。综合运用Dragonfly统计数据和微米CT的二维和三维图像,揭示在相同介质体积和表面积条件下,介质形状对颗粒破碎行为的影响。

1.2 实验准备

采自宁夏太西无烟煤选煤厂的重介精煤粒度粗且分布较宽,为满足本实验要求对其进行破碎处理。为获得尽可能多的目标粒度物料,采用破碎+筛分闭路循环方法获取实验样品。具体过程为:首先借助颚式破碎机处理重介精煤,使用 4mm 和 2.8mm 筛子截取破碎产物中 $-4+2.8\text{mm}$ 粒级物料, $+4\text{mm}$ 颗粒返回颚式破碎机再破后重复该过程, -2.8mm 样品收集。因实验室颚式破碎机的出料粒度仍较粗,重复破碎+筛分实验后仍剩余部分粗颗粒。选用锤式破碎机处理此部分物料,并采用破碎+筛分闭路循环方法,直至将重介精煤全部粉碎至尽快搞定 -4mm 。

研磨实验选用实验室小型球磨机,磨机筒体内直径 12cm ,使用等直径(1.4cm)钢锻和钢球作为研磨介质。研磨实验条件为:磨机转速率 60% (以磨剥作用为主),物料质量 40g ,干法研磨,时间 10 、 20 、 30 、 40 、 60 、 90 和 120s 。选用 3kg 钢球作为参照项,分别与等质量和等比表面积的钢锻进行对比实验,合计开展3组共计21个研磨实验。

2 实验仪器与步骤

2.1 实验仪器

实验材料: $-4+2.8\text{mm}$ 无烟煤、钢锻、钢球

实验装置:球磨机、振筛机、 6 、 4 、 2.8 和 1mm 套筛、电子秤

分析仪器:高分辨三维X射线显微成像系统(蔡司Xradia 510 Versa)、Dragonfly三维体数据分析软件

本实验流程如图1所示。

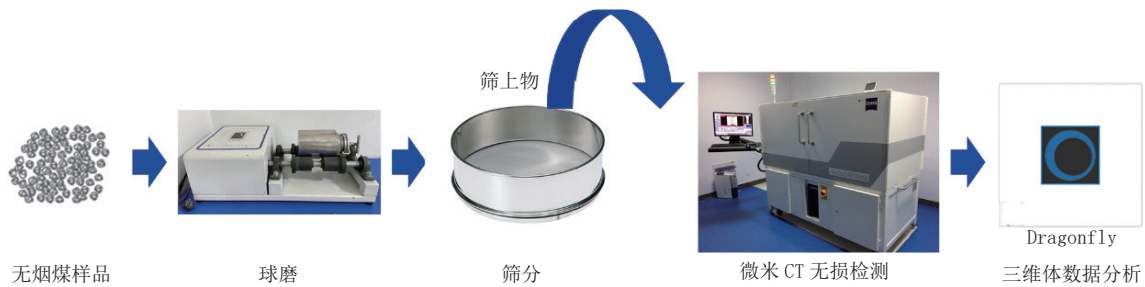


图 1 本实验流程

Fig.1 Flowsheet of the experimental study

2.2 实验步骤

2.2.1 颗粒研磨及产物粒度分析实验

设定不同研磨介质实验的固定条件为磨机转速率 60% 和无烟煤样品质量 40 g。同质量对比实验中，分别称取 3 kg 钢球和钢锻，与 40 g 无烟煤样品混匀后置于球磨机筒体。打开球磨机控制开关，按照设计依次进行 10~120 s 的 7 次研磨实验。每次实验结束后，将研磨介质和物料倒入 6 mm 筛网上，用毛刷将因静电吸附在介质表面的细颗粒刷下后手动筛分分离介质与研磨产物。同比表面积研磨介质的对比实验过程同上。

本实验主要对比粗粒级研磨产物的三维形貌，因此在粒度分析时仅选用 2.8 mm 和 1 mm 两个孔径筛子；在振动筛筛分后分别获取 -4 + 2.8 mm、-2.8 + 1 mm 和 -1 mm 粒级物料并称重。其中 -4 + 2.8 mm 将用于后续无损检测实验。

2.2.2 粗粒级产物无损检测

本文无损检测实验所用设备为蔡司 Xradia 510 Versa，其空间分辨率为 0.5~50 μm。考虑到不同研磨介质产物的三维形貌差异较大，仅对单一颗粒进行无损检测和体数据分析所得的三维特征参数不具备代表性。因此在无损检测实验环节，将 -4 + 2.8 mm 颗粒群填充到内径 26 mm 塑料管后开展空间分辨率为 26 μm 的全视场扫描。在直径和高度均为 26 mm 的圆柱形空间中具有一定数量的待检颗粒，进而可确保三维形貌特征参数的代表性与准确性。填充颗粒群的塑料管，在微米 CT 内部的装载情况如图 2 所示。

无损检测实验条件：加载电压 70 kV，功率 6 W，滤镜 LE-1，投影次数 1601，射线源（左侧）与样品中心距离 83.01 mm，接收器（右侧）与样品中心距离 135.01 mm，曝光时间 3 s。

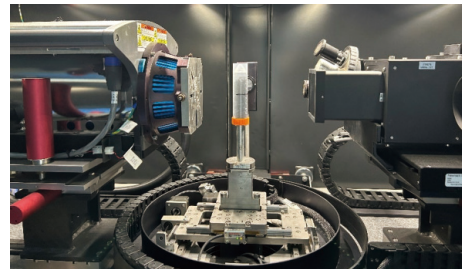


图 2 实验样品置于蔡司 Xradia 510 Versa 系统内部情况

Fig.2 Placement of experimental samples inside the Xradia 510 Versa system

3 实验数据处理与结果分析

3.1 研磨介质对样品破碎速率和细粒级产率影响

将各时间批次研磨产物收集后置于套筛，使用振筛机和手动筛分各 5 min 后分离各粒级物料并称重，获得不同研磨介质在各时间条件下产物的粒度组成。-4 + 2.8 mm、-2.8 + 1 mm 和 -1 mm 粒级物料质量标记为 m_1 ， m_2 和 m_3 ，各粒级物料产率计算如下：

$$y_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^3 m_i}, \quad (1)$$

式中: y_i 为第 i 粒级产率(%), m_i 为第 i 粒级质量(g)。

在计算各粒级产率后, 绘制相同质量或比表面积钢球与钢锻研磨产物中初始粒级(即 $-4 + 2.8 \text{ mm}$ 粒级)和细粒级(即 -1 mm 粒级)产率同研磨时间的关系曲线。

本实验中球磨机转速相对较低, 研磨介质运动速度较慢且难以到达筒体顶部。当其上升速度降为零后转而向下滑落, 位于不同运动方向或速度的介质间的物料将受到磨剥作用而被剥离并产生细颗粒, 与冲击破碎相比, 磨剥力与颗粒夹角较小故作用强度和颗粒破碎程度也小于前者。不同研磨介质条件下初始粒级物料产率随时间变化情况如图 3。

在钢球和钢锻等直径前提下, 总表面积或总质量相同时, 钢球对煤炭的破碎速率略高于钢锻。此差异在研磨时间 60 s 时达到最大, 后随时间延长而逐渐降低。钢球曲率半径相对较小, 与样品属于点点接触, 而钢锻与样品则属于面点接触。当破碎力作用相同时, 前者与物料作用点的压力大于后者, 有助于颗粒破碎。需补充说明的是 $-4 + 2.8 \text{ mm}$ 粒级仍相对较宽, 存在部分颗粒因所受到的研磨作用较弱而仍处于该粒级的情况。

除初始粒级破碎速率外, 本文还考察 -1 mm 细粒级物料产率变化情况(图 4)。各研磨时间下, 钢球较同质量或表面积钢锻的细粒级物料产率高且差异明显, 表明在钢球的点点接触式磨剥作用下, 样品因剪切或挫裂而被破碎的效果更佳。与钢球具有相同质量和表面积的钢锻研磨产生的细粒级物料产率差异在 40 s 前很小, 但在研磨时间增长后同质量钢锻作用下的细粒级产率升高明显。

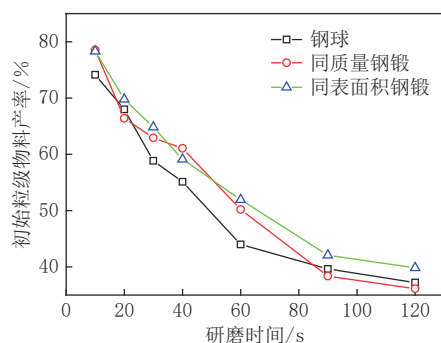


图 3 不同研磨条件下初始粒级物料产率随时间变化

Fig. 3 Changes in the breakage rate of initial particles over time under various grinding conditions

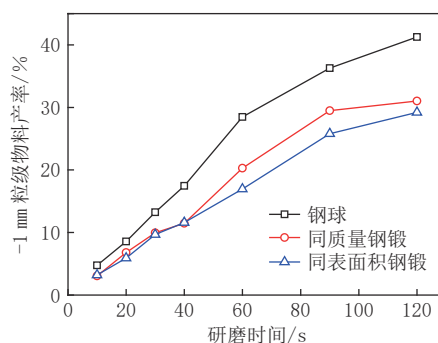


图 4 不同研磨条件下 -1 mm 粒级物料产率随时间变化

Fig. 4 Changes in the yield of -1 mm particles over time under various grinding conditions

实验中与钢球等质量的钢锻为 206 个, 而等表面积的钢锻个数降低至 159 个。综合对比图 5 和图 6 结果, 与钢球具有相同质量和表面积的钢锻在数量上的差异直接影响到样品的研磨效果。较多数量钢锻作用下样品的初始粒级产率略低而细粒级略高, 而等表面积时的结果呈相反规律。

3.2 粗粒级产物三维形貌数据提取

三维体数据分析包括切片 mean shift 平滑处理、分水岭算法颗粒分割提取、布尔运算获取完整颗粒、完整颗粒的三维形貌定量数据分析^[28-29]等步骤。数据分析时, 首先将微米 CT 测试无烟煤颗粒群的原始切片导入到三维分析软件 Dragonfly。本文采用分水岭算法分割提取分析区域内的完整颗粒, 该算法基于地理形态分析图像。微米 CT 测试时, 颗粒与空气因密度不同而在其边缘呈现较明显的灰度值差异。在分水岭算法分割提取颗粒过程中, 该灰度值差异边界可作为物相生长的分水岭线将颗粒和周边空气区分。

微米 CT 在进行直径较大样品的低分辨率测试时, 射线源与接收器的位置调节是以控制锥角大小为依据。通常低分辨率测试的锥角在 9° 左右。受锥角影响, 样品顶部和底部各有约 50 张切片亮度不均匀而影响数据分析效果, 因此在导入阶段舍弃前后各 50 张切片。

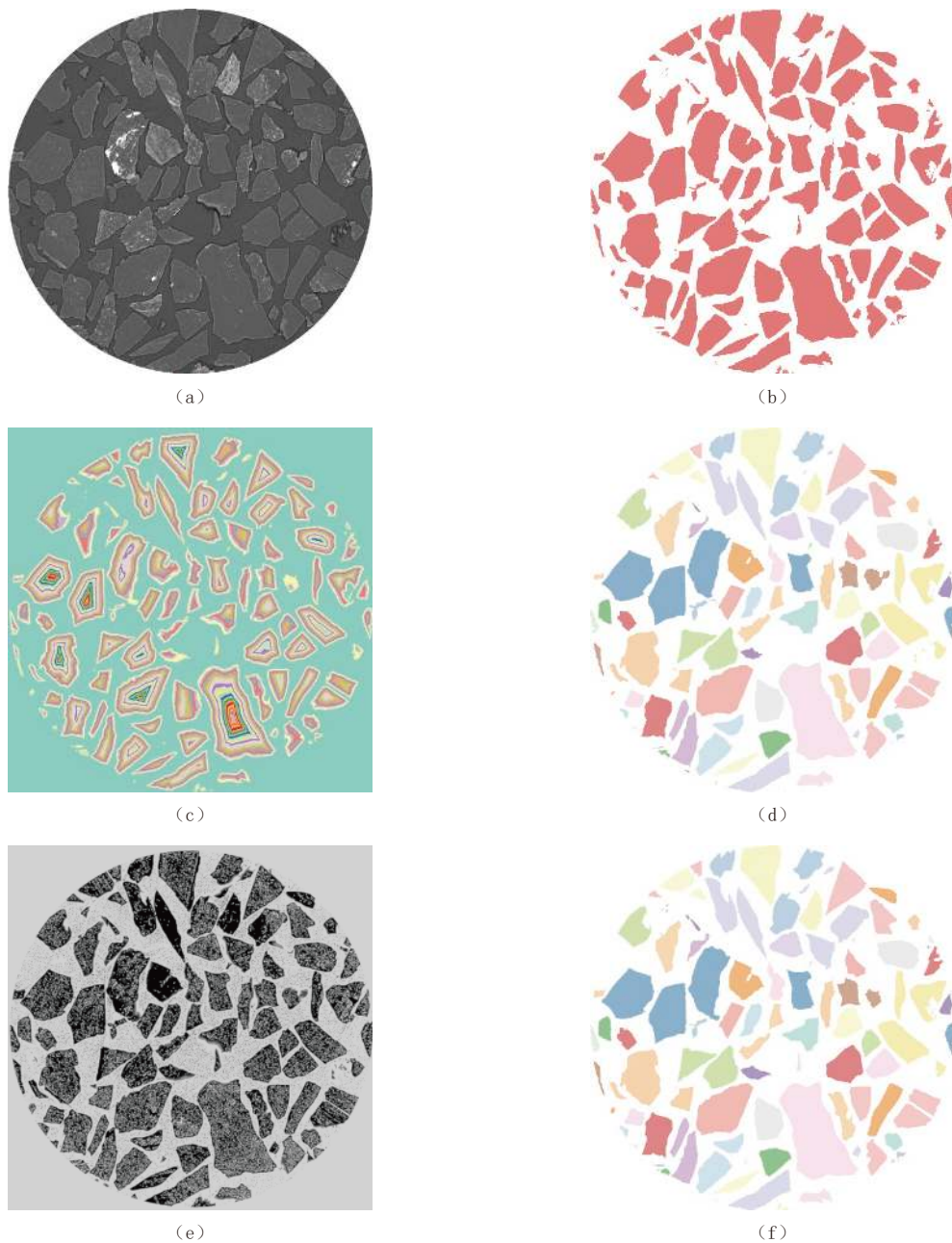


图 5 利用 Dragonfly 中分水岭算法处理颗粒群 CT 图像过程

Fig.5 Treatment on micro-CT images using the watershed algorithm in Dragonfly

虽然无损检测及数据分析的对象为破碎产物中的粗颗粒 ($-4+2.8\text{mm}$), 但粗颗粒表面会静电吸附微细颗粒。在三维图像分析软件的常规阈值分割方法提取颗粒时, 难以确定合适的临界阈值分割点。临界阈值偏高, 易产生颗粒不完整的情形; 临界阈值偏低, 容易因相邻粗颗粒间的微细颗粒的黏连效应, 而将颗粒群提取为一个大颗粒。因此本文选用分水岭算法提取各颗粒, 首先使用平滑处理功能对数据集进行 mean shift 操作, 增强切片中各物相间灰度差异 (图 5(a)), 然后利用 Dragonfly 三维分析软件的分水岭模块提取各颗粒。主要包括以下操作:

阈值分割并生成颗粒群的感兴趣区域 (ROI-1) (图 5(b)) → 颗粒 ROI-1 数值反转并生成距离图 (图 5(c)) → 对距离图进行阈值分割并转化为 Multi-ROI-1 (图 5(d)) → 距离图数值反转并生成 ROI-2 (图 5(e)) → 对 Multi-ROI-1 进行分水岭变换 (分别选择 ROI-2 和 ROI-1 为地形图和面罩) (图 5(f))。

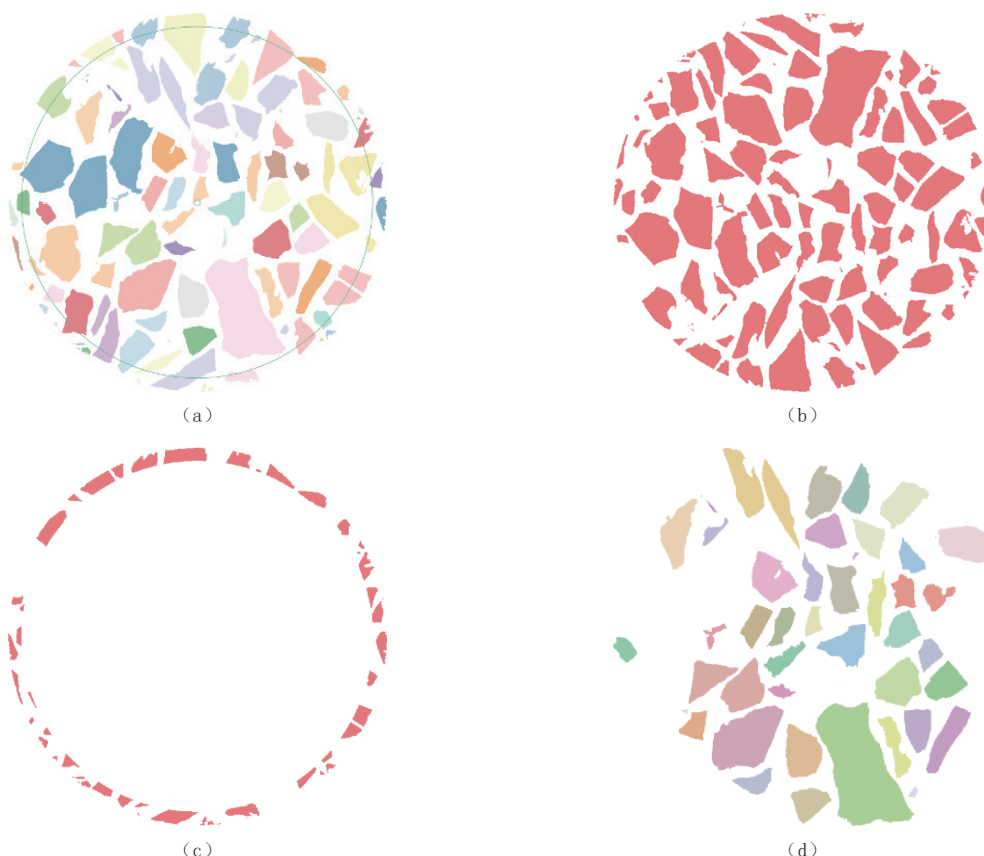


图 6 利用 Dragonfly 去除 CT 图像中非完整颗粒过程

Fig.6 Removal of incomplete particles in micro-CT images using Dragonfly

需要说明的是,作为分水岭算法的第 1 步,通过阈值分割初步分离各颗粒时的临界阈值选择较为重要。临界阈值偏低,会致使第 5 步颗粒由内向外生长的停止边界向外延伸,仍无法避免相邻颗粒接触。此外颗粒内矿物与煤基体间的密度差异,在使用较高分割阈值时会被分裂为具有不同密度值的子颗粒,而颗粒生长时无法跨越高临界阈值分割颗粒所形成的边界而面临颗粒内部不完整的情形。

无损检测过程中粒群边界的部分颗粒未完全进入分析区域,特别是顶部和底部,而不完整颗粒会影响三维形貌分析统计的准确性,需将其剔除出定量分析范围。分析区域内不完整颗粒去除的布尔运算操作如下。

添加圆柱体边框并将其边界扩展至分析区域边缘(图 6(a))→建立分析区域的 ROI(图 6(b))→圆柱体内部 ROI 清除(图 6(c))→依次选择分水岭算法分割颗粒的 Multi-ROI(A)和分析区域内圆柱体外部 ROI(B)→从 A 中去除与 B 接触部分获得完整颗粒(图 6(d))。在获取 ROI 格式的完整颗粒后,勾选 Dragonfly 软件分析界面的颗粒体积、表面积选项,并利用公式(2)进行球形度计算。

$$d = 4\pi \times \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{2}{3}} / S, \quad (2)$$

式中: d 为颗粒球形度; V 为颗粒体积; S 为颗粒表面积。

3.3 研磨介质作用下粗粒级三维形貌参数演变

为对比不同研磨介质和时间作用下无烟煤颗粒群的三维形貌特征参数变化,针对原煤($-4+2.8\text{mm}$)以及 3 类介质作用 60 s 和 120 s 的研磨产物($-4+2.8\text{mm}$)等 7 组物料进行无损检测实验。在微米 CT 测试区域的顶部和底部存在少量不完整颗粒,经布尔运算处理后完整颗粒数量约为 50 粒。代表性颗粒三维结构如图 7 所示,各颗粒的体积、比表面和球形度结果如表 1。

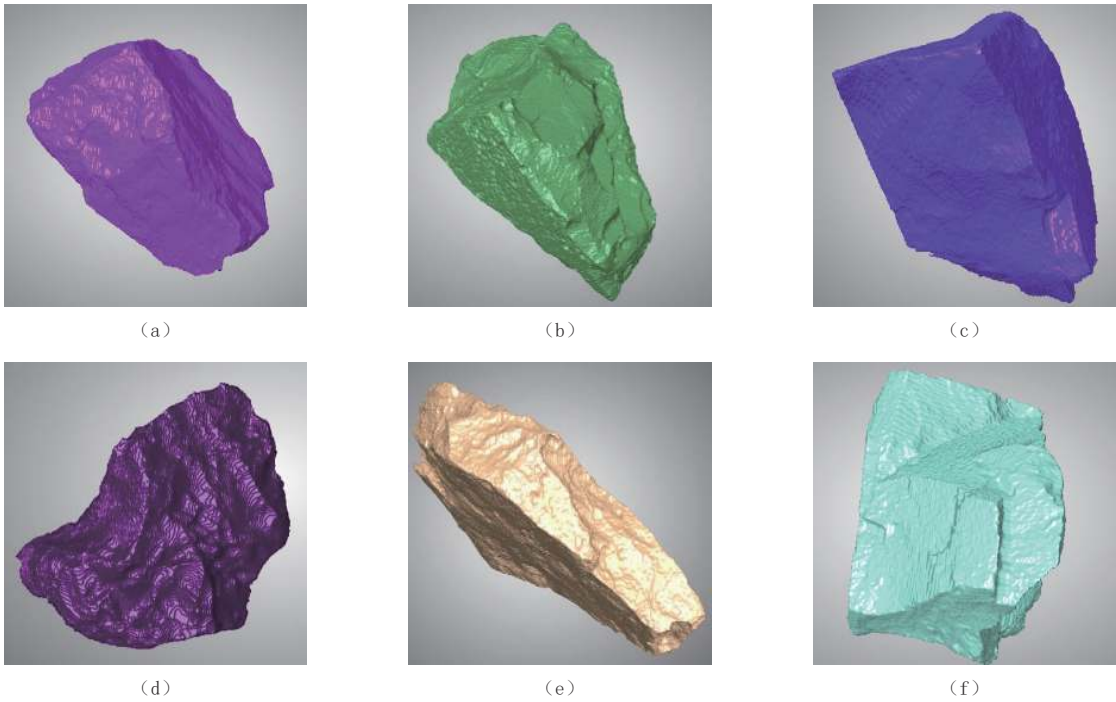


图 7 Dragonfly 软件提取的代表性颗粒三维图

Fig.7 3D images of representative particles extracted using Dragonfly

表 1 原煤及不同破碎条件下颗粒的体积、表面积和球形度

Table 1 Volume, surface area, and degree of sphericity of raw coal and particles under various grinding conditions

样品	代表性颗粒编号	体积/mm ³	表面积/mm ²	球形度
原煤		50.20	18.00	0.6029
钢球 60 s	a	45.27	14.15	0.6268
钢球 120 s	b	35.73	12.26	0.7205
等质量钢锻 60 s	c	43.58	13.79	0.6408
等质量钢锻 120 s	d	31.73	11.26	0.7546
等表面积钢锻 60 s	e	47.58	15.13	0.6304
等表面积钢锻 120 s	f	38.73	13.05	0.6973

注：体积、表面积和球形度均为统计后的平均数据。

表 1 显示：原煤的体积和表面积最大，但球形度最低. 经研磨处理后初始粒级颗粒群体积和表面积下降，但颗粒球形度均有所提高，表明研磨介质的磨剥作用使颗粒产生类似“逐层”破碎的效果。在研磨时间相同时，等质量钢锻因其表面积更大导致破碎产物的球形度较钢球为研磨介质时更高。而等表面积条件下钢锻质量小于钢球，颗粒研磨作用被削弱，致使等表面积钢锻研磨产物的球形度是 3 种条件下最低的。

4 结语

本文将无损检测与三维图像分析引入到不同研磨介质对煤炭破碎行为影响研究中，在分析初始粒级破碎速率以及细粒级产率后，借助微米 CT 和 Dragonfly 软件完成粗粒级破碎产物的无损检测与三维特征参数计算。具体结论如下：

(1) 在球磨机转速率较低的前提下，相同质量或表面积的钢球和钢锻对煤炭的破碎均以研磨作用为主，颗粒破碎速率较低，其中钢球作用下的初始粒级破碎速率最快。在钢球点点接触式磨剥作

用下, 样品受剪切或挫裂作用而破碎的效果更佳, 细粒级产率更高。

(2) 采用分水岭算法和布尔运算, 准确提取分割分析区域内的完整颗粒并计算各颗粒体积、表面积和球形度。3 种研磨条件下表面积最大的钢锻, 因其在研磨物料过程中兼具点点接触和面点接触两种形式, 颗粒所受“磨剥”作用更为显著。虽然钢锻作用下初始粒级破碎速率较低, 但显著的“磨剥”作用使颗粒的球形度最高。

参考文献

- [1] 张宇新, 谢卫宁, 姜海迪, 等. 可磨性指数对煤炭混合破碎过程影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 2088–2095.
ZHANG Y X, XIE W N, JIANG H D, et al. Experimental investigation on the influence of hardgrove grindability index on the heterogeneous grinding of coal mixture[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 2088–2095. (in Chinese).
- [2] 袁程方, 徐涛, 吴江岳恩, 等. 纳米复合瓷球在钨矿石细磨中磨矿特性研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2022, 4: 86–91.
YUAN C F, XU T, WUJIANG Y E, et al. Study on grinding characteristics of nano-composite ceramic in fine grinding of tungsten ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022, 4: 86–91. (in Chinese).
- [3] 王润花, 王海鹏, 李建莉, 等. 基于同步辐射 X 射线 CT 的无烟煤样孔隙分布特征[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(6): 691–700. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.06.04.
WANG R H, WANG H P, LI J L, et al. Characterization of pore distribution of the anthracite coal sample based on synchrotron radiation X-ray CT[J]. CT Theory and applications, 2021, 30(6): 691–700. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.06.04. (in Chinese).
- [4] 谢广元, 张文军, 彭耀丽, 等. 科研成果转化实验对创新能力培养的探索[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(12): 174–178. DOI:10.3969/j.issn.1006-7167.2015.12.043.
XIE G Y, ZHANG W J, PENG Y L, et al. Exploration and practice of the cultivation of innovative ability by experiments of transferring scientific research achievements[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(12): 174–178. DOI:10.3969/j.issn.1006-7167.2015.12.043. (in Chinese).
- [5] 胡慧敏, 张其武. 球磨调控非金属矿物反应活性实现重金属环境净化及资源再生利用[J]. 金属矿山, 2020, 10: 82–91.
HU H M, ZHANG Q W. Research on ball-milling regulating the reactivity of non-metallic minerals to realize environmental purification of heavy metals and resource recycling[J]. Metal Mine, 2020, 10: 82–91. (in Chinese).
- [6] 陆哲, 夏柳荫, BRIAN H, 等. 球磨介质及尺寸对铜锌矿矿浆化学性质及矿物表面化学性质的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(8): 1701–1707.
LU Z, XIA L Y, BRIAN H, et al. Influence of ball mill medium and size on properties of copper-zinc ore pulp and mineral surface[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(8): 1701–1707. (in Chinese).
- [7] 吕鹏飞, 赵文杰, 刘锋. 基于微焦点 CT 技术的孔隙尺度多相渗流实验系统开发[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(6): 11–15.
LV P F, ZHAO W J, LIU F. Development of pore-scale multiphase flow experiment system in porous media based on micro-CT imaging technique[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(6): 11–15. (in Chinese).
- [8] 王旭东, 肖庆飞, 张谦, 等. 球磨机细磨阶段钢锻与钢球磨矿效果对比[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(5): 771–777.
WANG X D, XIAO Q F, ZHANG Q, et al. Comparison of grinding effect between steel section and steelball during fine grinding stage of ball mill[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(5): 771–777. (in Chinese).
- [9] 马帅, 肖庆飞, 张谦, 等. 钢球配比及充填率的对比试验研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2022, 5: 64–68.
MA S, XIAO Q F, ZHANG Q, et al. Comparative experimental study on the ratio and filling rate of steel ball[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022, 5: 64–68. (in Chinese).
- [10] 聂梦宇, 韩跃新, 李艳军. 磨矿介质对闪锌矿浮选行为的影响研究[J]. 金属矿山, 2019, 2: 163–167.
NIE M Y, HAN Y X, LI Y J. Effects of grinding media on the flotation behaviors of sphalerite[J]. Metal Mine, 2019, 2: 163–167. (in Chinese).
- [11] XIE W N, HE Y Q, SHI F N, et al. Comparison of energy efficiency between E and MPS type vertical

- spindle pulverizer based on the experimental and industrial sampling tests[J]. *Fuel*, 2017, 130: 174–181.
- [12] 秦芹, 吴时国. 南海北部白云凹陷深水油气区的重-震数据处理与分析[J]. *CT 理论与应用研究*, 2017, 26(6): 695–706. DOI:10.15953/j.1004-4140.2017.26.06.05.
- QIN Q, WU S G. The analysis and gravity-seismic imaging in the Baiyun sag deep-water hydrocarbon area in the Northern South China Sea[J]. *CT Theory and Applications*, 2017, 26(6): 695–706. DOI:10.15953/j.1004-4140.2017.26.06.05. (in Chinese).
- [13] ZHANG K Z, WANG S L, WANG L, et al. 3D visualization of tectonic coal microstructure and quantitative characterization on topological connectivity of pore-fracture networks by micro-CT[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109675. DOI:10.1016/j.petrol.2021.109675.
- [14] JIA Q F, LIU D M, CAI Y D, et al. Nano-CT measurement of pore-fracture evolution and diffusion transport induced by fracturing in medium-high rank coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 106: 104769. DOI:10.1016/j.jngse.2022.104769.
- [15] 乔鹏刚, 魏交统, 潘晋孝. 基于多能谱 CT 与 NC-POCS 重建算法的泡沫铝孔隙率计算[J]. *CT 理论与应用研究*, 2021, 30(1): 71–80. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.01.07.
- QIAO P G, WEI J T, PAN J X. Calculation of aluminum foam porosity based on multi-spectrum CT and NC-POCS reconstruction algorithm[J]. *CT Theory and Applications*, 2021, 30(1): 71–80. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.01.07. (in Chinese).
- [16] LIN Y B, QIN Y, MA D M, et al. Pore structure, adsorptivity and influencing factors of high-volatile bituminous coal rich in inertinite[J]. *Fuel*, 2021, 293: 120418. DOI:10.1016/j.fuel.2021.120418.
- [17] YOSHIYA M K, YUSUKE N K, NUMAZAWA Y, et al. Migration of inert materials during coking of molded coal[J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2023, 16: 100526. DOI:10.1016/j.ceja.2023.100526.
- [18] SHI F N. Comparison of grinding media- cylpebs versus balls[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(11/12): 1259–1268.
- [19] IPEK H. The effects of grinding media shape on breakage rate[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(1): 91–93. DOI:10.1016/j.mineng.2005.05.009.
- [20] IPEK H. Effect of grinding media shapes on breakage parameters[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2007, 24(24): 229–235.
- [21] 徐今冬, 余超, 陈晓锋, 等. 不同磨矿介质对细粒磁铁矿磨矿效果的影响[J/OL]. *有色金属科学与工程*, 2023, 14(4): 561–568.
- XU J D, YU C, CHEN X F, et al. Influence of different grinding media on grinding effect of fine-grained magnetite[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2023, 14(4): 561–568. (in Chinese).
- [22] 童佳琪, 方鑫, 吴志强, 等. 六棱柱作细磨介质下磨矿能耗与粒度分布特征[J]. *有色金属科学与工程*, 2019, 10(3): 86–91.
- TONG J Q, FANG X, WU Z Q, et al. Grinding energy consumption and particle size distribution characteristics of Hexagon as a fine grinding medium[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2019, 10(3): 86–91. (in Chinese).
- [23] SUN L L, ZHANG C, WANG G, et al. Research on the evolution of pore and fracture structures during spontaneous combustion of coal based on CT 3D reconstruction[J]. *Energy*, 2022, 260: 125033.
- [24] LIU P, NIE B S, ZHAO Z D, et al. Characterization of ultrasonic induced damage on multi-scale pore/fracture in coal using gas sorption and μ -CT 3D reconstruction[J]. *Fuel*, 2023, 332(2): 126178.
- [25] 朱凯然, 王波, 武晓朦, 等. 原位岩土 CT 及其关键技术探讨[J]. *CT 理论与应用研究*, 2019, 28(6): 641–652. DOI:10.15953/j.1004-4140.2019.28.06.01.
- ZHU K R, WANG B, WU X M, et al. In-situ geotechnical CT and its key technologies[J]. *CT Theory and Applications*, 2019, 28(6): 641–652. DOI:10.15953/j.1004-4140.2019.28.06.01. (in Chinese).
- [26] 徐宏祥, 卓启明, 王建兵, 等. 矿物选浮中颗粒与气泡黏附效率实验观测装置开发与教学应用[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(1): 103–107.
- XU H X, ZHUO Q M, WANG J B, et al. Development and teaching application of experimental observation device for particle and bubble adhesion efficiency in mineral flotation[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(1): 103–107. (in Chinese).
- [27] 朱学帅, 张晨瑜, 杨小娟, 等. 退役动力锂离子电池正、负极材料浮选回收实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(3): 66–69.
- ZHU X S, ZHANG C Y, YANG X J, et al. Experimental design on flotation recovery of cathode and anode materials from spent power lithium-ion batteries[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(3): 66–69. (in Chinese).
- [28] 张开仲. 构造煤微观结构精细定量表征及瓦斯分形输运特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.

- [29] ZANG J, LIU J L, HE J B, et al. Characterization of the pore structure in Chinese anthracite coal using FIB-SEM tomography and deep learning-based segmentation[J]. *Energy*, 2023, 282: 128686. DOI:10.1016/j.energy.2023.128686.

Experimental Design of Effect of Grinding Media on Three-Dimensional Morphology of Products Based on Micro-CT

XIE Weining^{1,2✉}, LIN Shengmao², WANG Shuai¹, FENG Zhiyong³

1. Advanced Analysis & Computation Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
2. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
3. JTRI Haotong New Materials Joint Innovation Center, Xuzhou 221116, China

Abstract: Grinding experiments of coal are designed to study the influence of spherical and cylindrical media on the three-dimensional morphology characteristics of grinding products. Details of experiments consist of coal grinding, screening of grinding products, non-destructive testing of coarse-grained coal based on high-resolution three-dimensional X-ray microscopic imaging system, and particle segmentation extraction and three-dimensional morphology feature parameter calculation based on the Dragonfly software. For the low rotation rate condition of the ball mill, if the total surface area or total mass of grinding media is the same, breakage rate of the top size particles ground by the grinding ball is higher than that of the cylindrical media. Moreover, the yield of -1 mm fines yielded by the ball is the highest. The grinding effect reduces the volume and surface area of coarse materials. For the three grinding conditions, the steel cylindrical media with the largest surface area has a more significant “grinding and stripping” effect on coal and the highest particle sphericity.

Keywords: micro-CT; analysis of three-dimensional data; grinding; experimental design



作者简介: 谢卫宁[✉], 男, 博士, 中国矿业大学现代分析与计算中心高级实验师、硕士生导师, 主要从事无损检测与三维体数据分析, 以及痕量元素定量分析等方面研究, E-mail: 5718@cumt.edu.cn。