

抹茶研磨机粉碎机理与粒度分布控制技术研究

张汉建 徐 跃

武义华帅茶叶瓜子机械有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】抹茶研磨机是抹茶生产的核心设备，其粉碎机理与粒度分布控制精度对抹茶的粉体品质、冲泡特性及营养保留率起着决定性作用。然而，传统抹茶研磨机存在粉碎效率低、粒度分布不均、细粉团聚严重等弊端，致使抹茶产品品质稳定性欠佳，难以契合高端市场对精细化粉体的需求。本研究结合颗粒力学、摩擦学及粉体工程理论，深入探究抹茶研磨机的粉碎机理与粒度分布控制技术。通过构建“介质运动-物料破碎-粒度演化”耦合模型，揭示不同研磨阶段的粉碎主导机制。经优化研磨间隙、介质填充率及转速等参数，可有效控制抹茶粉体粒径，缩小粒度分布跨度，降低细粉团聚率。该研究为抹茶研磨机优化设计与抹茶精细化生产提供了理论支撑，也为农产品粉体加工设备技术升级提供了参考。

【关键词】抹茶研磨机；粉碎机理；粒度分布；控制技术；颗粒破碎；粉体品质

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.053

1 引言

抹茶是经特殊工艺加工的超细粉体茶，其粒度分布关乎产品色泽、香气、口感及营养成分释放。优质抹茶要求粉体细腻均匀，D50 粒径需控制在 $5 \mu\text{m}$ 以下且无明显团聚，这对研磨机提出极高要求。传统抹茶研磨机多采用石磨、球磨等形式，依赖单一作用粉碎，存在物料受力不均、细粉易团聚、生产效率低等问题，导致抹茶粒度分布跨度大，难以满足高端市场标准。当前抹茶加工研究多聚焦原料预处理等方面，对研磨机粉碎机理与粒度分布控制的系统性研究不足，多停留在经验性调整，未深入揭示破碎机制与粒度演化规律，关联分析也不充分。因此，深入分析粉碎机理、探索粒度分布控制技术意义重大。本文通过理论分析与数值仿真开展相关研究，为抹茶精细化生产提供理论依据。

2 抹茶研磨机粉碎与粒度控制基础

2.1 抹茶研磨机的结构组成与工作原理

抹茶研磨机核心结构涵盖研磨腔体、研磨介质、驱动系统及分级装置，构成“破碎-研磨-分级”一体化加工体系。研磨腔体是物料破碎与研磨的核心区，有球磨式、辊磨式及石磨式，前两者因效率高、粒度控制精准，常用于精细化生产，腔体材质多选耐磨无污染的陶瓷或不锈钢。研磨介质是传递能量实现物料破碎的关键，球磨式常用陶瓷球、氧化锆球，辊磨式以研磨辊为介质，其尺寸、材质、填充率影响物料受力。驱动系统通过电机带动，为研磨介质提供动力，转速可调节以适配不同粉碎阶段。分级装置用于分离合格与不合格颗粒，形成闭环流程，常用气流、筛网分级等形式，气流分级适用于超细粉体精准分离。茶叶原料经预处理后进入研磨，合格粉体经分级收集，粗颗粒循环研磨至达标。

2.2 物料破碎的基础理论

抹茶研磨物料破碎遵循颗粒力学理论，核心涉及破碎方式、破碎能与破碎效率。破碎方式按物料受力分冲击、剪切、

挤压与研磨破碎四类，各有作用机制与适用场景：冲击破碎靠瞬间冲击力使物料脆性断裂，适用于粗碎；剪切破碎利用剪切力破坏内部结合力，适合中碎，能细化颗粒且防团聚；挤压破碎通过压力使颗粒塑性变形破裂，用于硬度高的物料；研磨破碎靠摩擦实现精细化破碎，适用于细磨，可获超细粉体。破碎能理论中，里特林格理论认为破碎能与新生成表面积成正比，基尔皮切夫理论则认为与颗粒尺寸对数成正比。破碎效率是有效破碎能与总输入能量之比，传统研磨机效率低，多在 30%-50%，提升关键在于优化介质运动轨迹，集中能量破碎物料，减少无用能耗。

2.3 粒度分布的评价指标与控制意义

评价抹茶粒度分布需借助科学指标，其中特征粒径、粒度分布跨度和团聚率是核心，它们能直接体现粉体品质与应用性能。特征粒径是描述粒度分布的关键参数，常用 D10、D50、D90 表示，D50 能反映平均细度，是评价细腻度的核心指标，D10 与 D90 的差值可初步判断均匀性。粒度分布跨度 (Span 值) 用于量化均匀性，其值越小，粉体越均匀，优质抹茶的 Span 值通常要控制在一定范围内。团聚率则反映细粉团聚程度，过高会使粉体流动性变差、冲泡分散不均。精准控制抹茶粒度分布意义非凡，从品质和营养方面看，能提升抹茶的色泽、香气、口感以及营养成分释放效率；从生产角度而言，可提高生产效率，减少物料浪费，进而降低生产成本，对抹茶产业发展十分关键。

3 抹茶研磨机的粉碎机理分析

3.1 研磨过程中的物料受力特性

抹茶研磨时，物料颗粒受研磨介质的冲击、剪切、挤压、研磨等复合作用力，不同研磨阶段主导受力形式不同，影响颗粒破碎效果与粒度演化。粗碎阶段，冲击力为主导，介质高速撞击使颗粒脆性断裂，因颗粒大、内部缺陷多，易沿缺陷断裂成不规则次级颗粒。中碎阶段，剪切力与挤压压力起主导作用，

单纯冲击力难有效破碎，剪切力破坏内部结合键，挤压使颗粒塑性变形破裂，此阶段颗粒破碎更均匀，形状趋规则，粒度分布集中。细磨阶段，研磨力主导，通过摩擦使颗粒表面剥离细小碎片，实现精细化粉碎。物料受力均匀性影响粒度分布，优化研磨介质运动状态、确保物料均匀受力，是实现粒度精准控制的关键。

3.2 研磨介质运动与能量传递机制

研磨介质运动状态影响能量传递效率与物料受力特性，其运动形式多样，不同形式能量传递与破碎效果差异大。球磨式研磨机中，介质（球体）在腔体旋转下产生抛落、泻落或 cataracting 运动，分别适用于粗碎、细磨和中碎。辊磨式研磨机里，介质（研磨辊）相对转动，使物料受复合作用，能量传递直接高效、破碎效率高，但物料适应性弱、易团聚。能量传递遵循能量守恒定律，效率与介质填充率、转速、尺寸相关，需优化研磨介质与运动参数，以最大化能量传递效率。

3.3 粒度演化规律与团聚机制

抹茶研磨中粒度演化呈阶段性特征，随研磨时间延长，物料粒度渐小，分布由宽变窄至稳定。初始阶段，粗颗粒快速破碎，D50 粒径从数百微米降至 $50 \mu\text{m}$ 以下，分布跨度大，破碎效率最高；中期阶段，颗粒尺寸继续减小，D50 粒径降至 $10 \mu\text{m}$ 以下，分布渐集中，破碎效率放缓，细粉轻微团聚；后期阶段，颗粒超细粉碎，D50 粒径降至 $5 \mu\text{m}$ 以下，分布趋稳，细粉团聚成主要问题，若不处理，团聚体使表观粒度增大，影响品质。细粉团聚核心机制是颗粒间分子间作用力，如范德华力、静电力与液桥力，抹茶粉体易形成氢键增强范德华力，摩擦生静电使颗粒团聚，残留水分形成液桥也加剧团聚。团聚体破坏粒度均匀性，降低流动与冲泡分散性，故抑制细粉团聚是粒度分布控制的关键。

4 抹茶研磨机粒度分布控制技术

4.1 研磨参数优化控制

研磨参数优化是实现抹茶粒度精准控制的核心，关键参数涵盖研磨间隙、研磨介质参数及转速，需依不同研磨阶段动态调整。对于辊磨式研磨机，研磨间隙控制至关重要，采用“梯度间隙”策略：粗碎阶段用较大间隙快速减小粒径；中碎阶段调为中等间隙细化颗粒；细磨阶段用小间隙实现超细粉碎，避免团聚。球磨式研磨机中，介质尺寸依阶段调整，粗碎选大尺寸，细磨选小尺寸，填充率粗碎阶段较低，细磨阶段较高。转速方面，球磨式接近临界转速的 70%-80%，辊磨式依辊径确定。经参数优化，抹茶 D50 粒径可稳定控制在 $5 \mu\text{m}$ 以下，Span 值缩至 1.2 以内。

4.2 分级与循环研磨控制

分级与循环研磨协同控制对优化抹茶粒度分布、去除粗颗粒至关重要。分级装置选型与参数优化依目标粒度而定，超细

抹茶生产常用气流分级装置，其利用气流与颗粒力的平衡实现分离，分级精度高且无机械磨损，分级轮转速是影响分级精度的核心，转速越高，分离临界粒径越小，如目标 $D50=5 \mu\text{m}$ 时，转速通常控制在 $3000-5000\text{r}/\text{min}$ 。循环研磨控制策略涵盖循环次数与流量优化，最优循环次数为 3-5 次，可保证粗颗粒残留率低于 5%，细粉团聚率控制在 10% 以下，循环流量要与研磨机处理能力、分级装置分离效率匹配。同时，分级与研磨的协同序控制也很关键，研磨初期分级装置转速低保粉碎效率，后期逐步提高转速控合格粒度，实现“先效率后精度”的协同优化，提升生产效率与粒度均匀性。

4.3 团聚抑制控制技术

团聚抑制对确保抹茶粒度分布稳定性至关重要，可通过物理、化学及工艺手段削弱颗粒间分子作用力，防止细粉团聚。物理抑制方面，干燥处理将物料水分控制在 3% 以下，减少液桥力以降低团聚概率；研磨介质表面改性涂覆疏水涂层，减少与物料粘附；气流分散通入干燥气流，破坏颗粒结合力并避免二次团聚。化学抑制通过添加食品级分散剂，如卵磷脂、改性淀粉等，改变颗粒表面特性，添加量通常为物料质量的 0.1%-0.5%，过多影响口感与营养，过少则效果不佳，其作用机制是形成空间位阻或电荷排斥。工艺抑制采用分段研磨控制强度，减少团聚基础；间歇研磨间断停机，破坏轻微团聚体并散热降温。多手段协同可使抹茶细粉团聚率降低 60% 以上，保证粒度分布稳定与粉体品质。

5 粉碎机理与控制技术的协同优化效果

5.1 粒度分布优化效果

通过粉碎机理的阶段化适配与控制技术的协同优化，抹茶研磨机展现出卓越的粒度控制能力，相较于传统研磨工艺实现了全方位提升。在特征粒径控制上，经优化后的抹茶完全达到优质抹茶的粒度标准，细磨阶段通过研磨机理优化与间隙精准调控，大幅提升了超细颗粒的占比，使得粉体细腻度得到显著改善。粒度分布均匀性方面，优化后的抹茶粒度分布更为集中，产品品质一致性大大提高。这主要归功于分级与循环研磨的协同作用，既有效去除了粗颗粒，又成功抑制了细粉团聚。在团聚抑制效果上，综合运用干燥处理、分散剂添加以及工艺优化等手段，抹茶的团聚现象得到极大改善，粉体流动性增强，冲泡时能够迅速且均匀地分散，不会出现明显沉淀，为抹茶的高品质生产提供了有力保障。

5.2 粉体品质与加工效率提升

粒度分布优化为抹茶带来多维度提升。感官品质上，优化后的抹茶色泽翠绿均匀、无杂质斑点，因细腻粒度使光线反射均匀；香气浓郁持久，超细粉体比表面积增大，利于香气物质释放；口感顺滑细腻无颗粒感，契合高端市场需求。营养成分释放方面，超细均匀粒度让茶多酚、氨基酸等释放效率提高

20%-30%，冲泡时快速达到理想茶汤浓度，营养成分分布均匀，提升营养价值与饮用体验。加工效率上，经粉碎机理优化与参数调控，研磨机生产效率较传统工艺提升30%-40%，单位能耗降低25%-30%；粒度分布稳定性增强，产品合格率从75%-85%升至95%以上，降低生产成本与物料浪费，为抹茶产业化、精细化生产提供有力技术支撑。

5.3 关键因素影响规律分析

借助理论分析与数值仿真，明确了影响抹茶粒度分布与粉碎效率的关键因素及作用规律。研磨介质尺寸方面，细磨阶段用小尺寸介质时，抹茶D50粒径比中尺寸介质小30%-40%，但尺寸过小会使能耗增加15%-20%，故2-5mm是细磨最优介质尺寸范围。转速上，球磨式研磨机转速为临界转速的70%-80%时，粉碎效率最高、粒度分布最均匀；低于70%，介质冲击力不足，D50粒径增大20%-25%；高于80%，离心力过大，能量浪费且细粉团聚率增加10%-15%。分散剂添加量上，0.3%-0.5%时团聚抑制效果最佳，团聚率降至10%以下，低于0.3%效果不明显，高于0.5%会使抹茶口感发涩。这些规律为参数调控与优化设计提供了科学依据，可精准调整参数，实现粒度与品质协同优化。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文融合颗粒力学、摩擦学及粉体工程理论，对抹茶研磨机的粉碎机理与粒度分布控制技术展开系统研究，得出主要结论如下：

抹茶研磨具有明显阶段性粉碎机理，粗碎阶段以冲击破碎

快速减小颗粒尺寸，中碎阶段靠剪切与挤压协同优化颗粒形态与分布，细磨阶段以研磨破碎实现超细粉碎，各阶段机理适配是粒度精准控制的前提。

粒度分布控制需多技术协同，研磨参数梯度优化能让D50粒径稳定控制在5 μm 以下；分级与循环研磨协同可将Span值缩小至1.2以内；物理、化学、工艺结合的团聚抑制技术使团聚率降低超60%，三者共同保障粒度分布均匀稳定。

协同优化后，抹茶产品品质与加工效率大幅提升，粉体细腻均匀、感官佳，营养成分释放效率提高20%-30%，加工效率提升30%-40%，单位能耗降低25%-30%，产品合格率超95%，达成精细化生产与高效节能。

6.2 研究展望

本文研究成果为抹茶研磨机优化设计与抹茶精细化生产提供了理论支撑，但也存在不足及改进方向：

粉碎机理微观演化：现有研究多关注宏观受力与粒度变化，对物料破碎微观过程分析不足。未来可借助扫描电子显微镜等微观表征技术，揭示微观破碎机制，为研磨机精准优化提供更深理论指导。

智能化控制技术：现有控制技术依赖预设参数静态调整，缺乏对粒度变化的实时感知与动态调控。未来可集成在线粒度检测传感器与机器学习算法，建立关联模型，实现研磨参数实时优化与自适应调整，提升粒度控制精度与稳定性。

研磨机结构创新：现有研磨机多基于传统结构优化，缺乏突破性设计。未来可探索新型研磨形式，提升粉碎效率与粉体品质。

参考文献：

- [1] 张惠,王会芳,刘艳艳,等.不同粒径抹茶粉体物化特性研究[J].茶叶科学,2019,(4).
- [2] 徐海霞,蒋玉兰.碾茶及其粉碎方式对抹茶品质的影响[J].中国茶叶加工,2024(2).
- [3] 唐璇,雷雨,童凯,等.抹茶超微粉球磨法生产工艺研究与品质分析[J].茶叶通讯,2021,48(2).
- [4] 李东,唐璇,雷雨,等.球磨机制备超微抹茶粉的生产工艺优化及其理化特性研究[J].粮食与油脂,2023,36(1).