

大产能超微粉碎机组串联分级工艺稳定性工业试验分析

谢珊

四川实创微纳科技有限公司 四川省绵阳市 621000

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21190

[摘要] 大产能超微粉碎串联分级工艺是非金属矿、化工粉体等行业制备超细粉体的核心生产工艺,其运行稳定性直接决定产品质量一致性与生产综合效益。本文以某年产20万吨重质碳酸钙超微粉碎生产线为案例,基于连续720小时工业试验的数据,针对存在的难点,从多方面入手展开标准化改进。试验结果表明,标准化改进后,生产线小时产能稳定达25t以上,产品D97粒径波动范围控制在 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内,成品合格率从82.3%提升至97.6%,单位产品电耗下降14.8%,工艺稳定性与生产效益同步提升。

[关键词] 大产能超微粉碎机组; 串联分级工艺; 稳定性工业试验

超微粉碎串联分级工艺通过多台涡轮分级机串联配置,可在大产能条件下实现窄粒度分布产品的连续工业化生产,已成为当前行业主流技术路线。但在实际工业运行中,受进料量波动、设备参数匹配度不足、班组操作不规范等因素影响,国内多数大产能产线普遍存在产能波动大、粒径合格率不稳定、分级效率偏低等问题。本文依托工业化生产线开展连续试验,基于工艺参数匹配与全流程过程管控,形成标准化运行方案,为行业同类产线的稳定性升级提供实践依据。

1、重质碳酸钙超微粉碎串联分级工业试验

1.1 项目概况与试验基础条件

本案例为某大型粉体企业的年产20万吨重质碳酸钙超微粉碎生产线改造试验项目,该生产线是当地典型的大产能通用型粉体产线,改造前采用雷蒙磨预粉碎和球磨机超细粉碎以及单级卧式涡轮分级机的工艺路线,主要生产D97=10 μm 的工业级重钙粉体,广泛应用于涂料、管材等下游领域。改造前生产线长期存在稳定性不足的问题,产能波动大、产品批次一致性差,无法满足高端客户的质量要求,因此企业2023年启动串联分级工艺改造,并开展连续720小时工业试验,全面验证工艺稳定性提升效果。

试验原料为本地出产的方解石制备的400目重质碳酸钙粉,真密度2.7g/cm³,莫氏硬度3,进料D97稳定控制在 $38\pm 2\mu\text{m}$,含水率 $\leq 0.2\%$,原料性状均匀稳定,排除原料波动对试验结果的干扰。试验主体设备为 $\phi 1200$ 型连续式球磨机,配套两台卧式涡轮分级机串联布置,总装机功率1120kW,设计最大处理能力30t/h。试验期间全程采用激光粒度仪检测产品粒径,每2小时取样一次,同步记录进料量、分级转速、系统风压、电耗等全流程参数,确保试验数据完整可追溯。

1.2 原工艺的问题

首先是分级级数不足,单级分级无法同时兼顾产能与粒度分布精度,大产能条件下必然出现粗颗粒夹带问题,同时单个分级轮做工强度大。其次是工艺参数未标准化,不同班组操作人员自行调整转速、进料量,参数差异大,没有统一的执行标准。最后是操作流程不规范,开机、停机、异常处置全凭人员经验,容易引发工艺参数大幅波动。这些问题并非设备硬件不足,而是标准化管控缺失导致,也是本次改进的核心方向。

2、串联分级工艺标准化改进实施路径

2.1 设备配置与分级流程标准化

首先对分级系统进行标准化改造,采用两级串联分级工艺替代原有单级工艺,明确两级分级机的功能定位与匹配标准,从硬件层面筑牢稳定性基础。第一级分级机为粗分级单元,核心功能是分出大颗粒粗料,控制产品最大粒径,分离出的粗料直接返回球磨机再次粉碎。第二级分级机为精分级单元,核心功能是精细化控制粒度分布宽度,分离出的细粉为成品,中料返回第一级分级机重新分级,形成闭环分级流程^[1]。

标准化两级设备的匹配参数:第一级分级轮直径为 $\phi 600\text{mm}$,第二级分级轮直径为 $\phi 550\text{mm}$,两级转速按1:1.2的固定比例匹配,确保两级分级粒度顺畅衔接,避免出现分级盲区或重复分级。同时标准化风网系统配置,两级分级机共用一套主引风系统,两级中间设置稳压缓冲仓,消除前级风压波动对后级分级的影响,稳压仓内风压波动控制在 $\pm 50\text{Pa}$ 以内。风管全部采用标准管径,弯头处设置导流片减少风阻,整套风网漏风率控制在2%以下,从硬件上保障风压稳定。改造后分级系统形成进料—一级粗分—二级细分—成品收集的标准化流程,每个环节的功能与参数边界清晰,为后续参数固

化提供硬件基础。

2.2 核心工艺参数标准化固化

针对进料、分级、风网三大核心环节，全部固化标准化

工艺参数，写入正式作业指导书，作为所有班组必须严格执行的硬标准，彻底消除不同班组的操作差异。为直观呈现参数改进前后的差异，整理形成标准化参数对照表如下。

表 1 串联分级工艺标准化参数对照表

参数类别	具体参数	改进前（单级工艺）	改进后（串联标准化工艺）
进料参数	小时进料量（t/h）	15-21（人工随意调整）	25±0.5（变频固定控制）
	进料粒度 D97（μm）	35-42（无管控）	38±2（预粉碎把关）
分级参数	第一级分级轮转速（r/min）	无（单级配置）	1200（固定值）
	第二级分级轮转速（r/min）	无（单级配置）	1450（固定值）
风网参数	系统负压（Pa）	-2800~-3600（波动大）	-3200±50（稳压控制）
	分级效率（%）	65	82

所有参数均通过多轮正交试验确定最优值，进料环节采用变频螺旋进料机和振动均料器组合，自动稳定进料量。通过参数全面固化，从根源上消除了人为操作带来的参数波动，让工艺始终运行在最优区间。

2.3 全流程操作与质量管控标准化

制定全流程标准化作业规程，覆盖开机、运行、停机、异常处置、质量检测全环节，让每一步操作都有标准可依。开机流程严格执行风-分-料的顺序。先启动主引风机，待风压稳定后启动两级分级机，转速达到设定值并稳定 5 分钟后，再启动进料机逐步提升进料量至标准值，整个开机过程不少于 15 分钟，严禁快速加载导致工艺参数剧烈波动。运行过程执行一小时一记录、两小时一检测的标准：操作人员每小时记录进料量、分级转速、系统负压、轴承温度 6 项核心参数，偏差超出标准范围立即调整；质量员每 2 小时取样检测一次产品 D97 粒径，粒径超出±0.5 μm 允许范围时，按标准流程微调分级转速，严禁大幅改动参数。

停机流程执行料-分-风的逆序，先停止进料，待系统内物料全部排空后，再依次停止分级机、引风机，避免物料堆积堵塞分级轮和风道。质量检测环节同步标准化，采用激光粒度仪检测，检测前用标准粒子校准仪器，检测人员持证上岗，每批次产品留样 48 小时备查，确保检测数据准确可靠。所有操作流程全部制作成可视化看板悬挂在中控室，操作人员随时对照执行，从流程上保障工艺运行的一致性^[2]。

3、工艺稳定性评价方法

3.1 分级精度指数计算

分级精度是衡量分级工艺稳定性的核心指标，直接反映产品粒度分布的均匀程度，采用分级精度指数进行量化计算，数值越小说明粒度分布越窄、分级精度越高、工艺状态越稳定，计算公式如下：

$$K = \frac{D_{97} - D_{10}}{D_{50}} \tag{1}$$

式(1)中：K 为分级精度指数， D_{97} 、 D_{50} 、 D_{10} 分别为粉体累计粒度分布达到 97%、50%、10%时对应的粒径，单位为 μm。

结合试验实测数据计算：改进前单级工艺随机抽取 10 个批次样品，平均 $D_{97}=10.2\text{ }\mu\text{m}$ ， $D_{50}=5.8\text{ }\mu\text{m}$ ， $D_{10}=1.2\text{ }\mu\text{m}$ ，代入公式得 $K = (10.2 - 1.2)/5.8 \approx 1.55$ 。改进后串联标准化工艺抽取同批次数量的样品，平均 $D_{97}=9.8\text{ }\mu\text{m}$ ， $D_{50}=5.6\text{ }\mu\text{m}$ ， $D_{10}=1.8\text{ }\mu\text{m}$ ，代入公式得 $K = (9.8 - 1.8)/5.6 \approx 1.43$ 。分级精度指数下降 0.12，说明产品粒度分布明显收窄，分级精度提升，工艺运行的稳定性更好，能够稳定生产窄分布的高品质粉体。

3.2 产能稳定性变异系数计算

产能稳定性反映生产线连续运行的产能波动程度，是工艺稳定性的重要评价维度，采用统计学中的变异系数（CV）进行量化评价，变异系数越小，说明产能波动越小、工艺稳定性越好，计算公式如下：

$$CV = \frac{S}{\bar{Q}} \times 100 \tag{2}$$

式(2)中：CV 为产能变异系数，单位为%，S 为连续 n 次小时产能测试值的标准偏差，单位为 t/h， $\bar{Q}$ 为 n 次测试的平均小时产能，单位为 t/h。

选取试验期间连续 30 个小时的产能数据计算：改进前单级工艺平均产能 $\bar{Q} = 18.2\text{ t/h}$ ，标准偏差 $S = 1.58\text{ t/h}$ ，代入公式得 $CV = 1.58/18.2 \times 100$ ；改进后串联标准化工艺平均产能 $\bar{Q} = 25.1\text{ t/h}$ ，标准偏差 $S = 0.62\text{ t/h}$ ，代入公式得 $CV = 0.62/25.1 \times 100$ 。变异系数从 8.7%降至

2.5%，下降幅度超七成，说明产能波动大幅收窄，生产线能够长时间稳定在设计产能附近运行，不会出现大幅起伏，标准化管控效果十分显著。

4、工业试验结果与稳定性验证分析

表 2 工艺稳定性指标测试结果对比表

评价指标	单位	改进前数值	改进后数值	变化幅度
平均小时产能	t/h	18.2	25.1	提升 37.9%
产能变异系数	%	8.7	2.5	下降 71.3%
产品 D97 平均值	μ m	10.2	9.8	基本持平
D97 最大波动幅度	μ m	4.3	0.9	下降 79.1%
分级精度指数 K	/	1.55	1.43	下降 7.7%
成品合格率	%	82.3	97.6	提升 15.3 %
单位产品电耗	kWh/t	42.0	35.8	下降 14.8%

从数据可以直观看到，标准化改进不仅实现了产能提升，更核心的是所有稳定性指标均实现大幅优化。

4.2 关键影响因素验证分析

验证结果显示：当进料量波动幅度超过±10%时，产品 D97 粒径波动立即扩大至±1.2 μ m，分级精度指数上升 0.08，说明进料稳定是工艺稳定的首要前提，这也是进料参数必须标准化固化的核心原因。当系统负压波动超过±200Pa 时，分级精度指数上升 0.12，粒度分布明显变宽，甚至会出现粗颗粒夹带问题，因此风网稳压管控必不可少。

针对两级分级机的转速匹配验证表明，当转速比保持在 1:1.15-1:1.25 的区间内时，分级效率稳定在 80%以上，粒径波动最小；转速比偏离该区间后，要么出现粗颗粒逃逸，要么出现细粉重复分级，都会导致分级效率下降、稳定性变差。该验证结果也为标准化转速比例提供了数据支撑，明确了串联工艺的核心匹配参数，避免后续生产中随意调整转速比例破坏工艺稳定性。

5、工艺长效稳定运行的标准化保障措施

5.1 设备日常维护标准化体系

设备状态的稳定是工艺长期稳定的基础，必须建立标准化的设备维护体系，避免设备磨损、劣化引发工艺波动。分级轮维护执行周检月修标准：每周停机检查一次分级轮叶片磨损情况，叶片磨损量超过 2mm 时及时补焊或更换，防止叶片不均引发振动导致粒径波动。每 3 个月对分级轮做一次动平衡校验，动平衡精度达到 G2.5 级，确保运行平稳。轴承润滑执行半月标准，分级机主轴承每半个月加注一次高温锂基润滑脂，加注量严格控制在轴承腔容积的 1/3，避免加注过多

4.1 连续运行核心指标对比

基于 720 小时连续工业试验的全量数据，整理产能、质量、能耗等核心维度的指标，形成稳定性指标对比表，全面验证标准化改进的实际效果。

导致轴承发热，运行中轴承温度超过 75℃立即停机检查。

5.2 人员操作与考核标准化机制

人员是所有标准的执行者，必须通过标准化培训与考核机制，确保所有操作人员严格执行标准流程，杜绝经验式操作。建立标准化岗前培训体系，新员工上岗前必须完成不少于 40 学时的系统培训，内容涵盖工艺原理、参数标准、操作流程、应急处置四大模块，通过理论和实操双重考核合格后方可独立上岗，不合格者继续培训直至达标^[3]。

推行标准化绩效考核机制，将产品合格率、产能稳定性、单位电耗三项核心指标与班组绩效工资直接挂钩，占比不低于绩效总额的 60%，每月评选最优班组进行奖励，对连续不达标的班组开展专项整改培训，激励班组主动严格执行标准。

6、结语

综上，大产能超微粉碎串联分级工艺的稳定性提升，核心不在于高端设备的堆砌，而在于全流程、全要素的标准化管控和参数匹配。未来随着智能监测技术的普及，可进一步引入参数自动调节和在线监测的功能，推动工艺稳定性向更高水平升级，助力粉体行业整体向高质量、精细化方向发展。

[参考文献]

[1]沈美雄. 基于 SPSS 方差分析的饲料超微粉碎机性能试验研究[J]. 机电技术, 2025 (6) :77-83.

[2]杨静, 张争明, 李伯廷, 等. 气流粉碎机超微粉碎鹿茸的研究[J]. 特产研究, 2012 (04) :000016-19.

[3]吴宏富. 密友超微气流粉碎机组被认定为江苏省自主创新产品[J]. 化工进展, 2010 (12) :45-45.