

◆ 提质增效产品创制技术 ◆

转鼓-挤压造粒机生产低氮高钾作物专用肥研究

钟 振, 高璐阳, 张汉卿, 曾 锐, 张 建, 马红菊, 蔡园园

(新洋丰农业科技股份有限公司, 湖北 荆门 448000)

[摘要] 针对沙性原料(氯化铵、氯化钾)造粒过程中成球率低、颗粒强度不足及结块粉化等问题, 开发了尿基转鼓设备与对辊挤压机并联的生产工艺。通过优化原料细度配比、混料水含量控制、返料量控制等关键指标, 显著提升了成球率与工艺稳定性。实验表明: 在氯化钾细度控制在0.3~0.4 mm、混料 $w(\text{H}_2\text{O})$ 控制在1.4%~1.6%的条件下单台挤压机成球率达75%~85%; 系统返料量控制在12~16 t/h, 台时产量稳定, 设备故障率低; 另外, 成球率和颗粒强度直接相关, 各工段颗粒破损率(一次筛分10%、烘干20%、冷却5%)是限制产量的主要因素。建议通过优化烘干、冷却工段扬料板结构, 物料输送方式及筛分工艺降低破损率, 预计产量可提升15%。

[关键词] 低氮高钾作物专用肥; 转鼓造粒; 对辊挤压; 成球率; 颗粒强度; 防结块

[中图分类号] TQ444.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 09-0048-05

Study on producing of low nitrogen and high potassium special fertilizer for crops with rotary drum-extrusion granulation

ZHONG Zhen, GAO Luyang, ZHANG Hanqing, ZENG Rui, ZHANG Jian, MA Hongju, CAI Yuanyuan
(Xinyangfeng Agricultural Science & Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

Abstract: Due to the challenges of low ball forming rate, insufficient granule strength, and caking/pulverization issues during the granulation process of sandy raw materials (ammonium chloride and potassium chloride), a parallel production system combining urea-based rotary drum equipment and double-roller extruders is developed. Through optimization of key parameters including raw material fineness ratio, moisture content of mixed slurry, and return material quantity, significant improvements are achieved in pelletizing efficiency and process stability. Experimental results demonstrate: When the fineness of potassium chloride is 0.3 - 0.4 mm and moisture content of mixed slurry is 1.4% - 1.6%, the single extruder ball forming rates are 75% - 85%. System return material control at 12-16 t/h ensures stable hourly production capacity with low equipment failure rates. The direct correlation between ball forming rate and granule strength is confirmed, with granule breakage rates at different stages (primary screening 10%, drying 20%, cooling 5%) identified as main production constraints. It is recommended to optimize lifting plate structures in drying/cooling sections, material conveying methods and screening processes to reduce breakage rates, which is projected to increase production by 15%.

Key words: low nitrogen and high potassium special fertilizer for crops; rotary drum granulation; roll extrusion; ball forming rate; particle strength; anti caking

0 引言

氮钾复合肥作为作物追肥的关键品种, 其高效制备技术对提升养分利用率、降低农业生产成本具有重要意义^[1-5]。然而, 以氯化铵(氮源)与氯化钾(钾源)为代表的沙性物料因缺乏黏结性, 难以通过传统转鼓造粒或高塔熔融造粒工艺实现稳定成粒: 转鼓造粒依赖液相黏结作用, 而氮钾追肥(低氮高钾作物专用肥)配方中缺乏尿素等黏性组分, 导致颗粒成型率低、强度不足; 高塔熔融造粒工艺需依赖尿素熔融形成液相的特性, 但氯化铵与氯化钾高

温下无法熔融, 限制了该工艺的适用^[6]。尽管挤压造粒技术可通过机械压力强制成型, 规避物料黏结性不足的缺陷, 但是单一挤压工艺存在显著短板: 一方面, 原料细度与水含量控制不当易导致产品结块、粉化, 储存与运输稳定性差; 另一方面, 挤压

[收稿日期] 2025-06-24

[作者简介] 钟 振(1985-), 男, 湖北荆门人, 助理工程师, 主要从事新型肥料生产研发及市场推广应用工作。

[基金项目] “十四五”国家重点研发计划项目“北方典型作物精准智能化施肥装备与配套肥料研制及应用”(2023YFD1701003)

生产线需独立配置烘干、冷却、筛分等后处理设备,投资成本高昂且返料循环效率低^[7-12]。

针对上述问题,本研究提出一种转鼓-挤压造粒并联协同生产的工艺,通过设备联用与流程优化实现氮钾追肥的低成本高效生产。其创新性体现在:(1)利用转鼓造粒系统完成原料预润湿与返料循环,改善沙性物料的挤压成型均匀性;(2)通过转鼓段湿度调控与挤压段压力协同优化,抑制氯化铵-氯化钾颗粒的吸湿结块倾向;(3)整合转鼓系统的烘干、冷却及包膜模块,突破单一挤压工艺后处理能力不足的瓶颈。研究进一步揭示了原料细度(≤ 0.5 mm)、混料水含量($w(\text{H}_2\text{O})$ 1.5%~2.2%)与烘干温度(150~180 °C)对颗粒抗压强度与结块率的调控规律,最终实现生产线连续稳定运行,产品指标符合GB/T 15063—2020标准。该技术为沙性物料基复合肥的低能耗制备提供了新思路,对推动资源型肥料产业升级具有实践意义。

1 材料与方法

1.1 配方设计

配方:6-0-42。该型产品为低氮高钾型产品,配方应用方向为作物追肥,采用以氯化铵和氯化钾为代表的沙性原料。产品配方中因缺少黏性物质,利用传统尿基转鼓造粒和高塔熔融造粒工艺难以

生产。

1.2 原料与设备

原料:氯化铵、氯化钾(来自青海盐湖工业股份有限公司)、钾肥(来自白俄罗斯)等。

设备:尿基转鼓造粒机(容积5 m³,转速10.7 r/min);10万t/a对辊挤压机组(辊径200 mm,间隙1.25~1.30 mm,功率15 kW);筒式干燥机;逆流冷却筒(冷却风速10 m/s);包膜机(包膜剂用量0.5%~0.6%)。

1.3 工艺流程

氯化铵、氯化钾经计量秤精准投料至转鼓造粒机;转鼓造粒机内喷水控制混料 $w(\text{H}_2\text{O})$ 为1.4%~1.6%;混合料经对辊挤压机组进行挤压造粒,单台挤压机成品率为75%~85%;对挤压机下料进行筛分(孔径2.8 mm),筛除未成型颗粒;筛分后的颗粒经筒式干燥机(炉膛温度320~360 °C,进口温度150~180 °C)烘干至 $w(\text{H}_2\text{O})$ 0.5%~0.6%;物料进入冷却筒前进行筛分预处理,提升冷却效率;筛分后的物料经逆流冷却筒降温,颗粒表面温度 ≤ 20 °C;冷却后的颗粒料经振动筛分后用包膜机包膜防结块,包装。

转鼓-挤压造料制低氮高钾型作物专用肥产品工艺流程见图1。

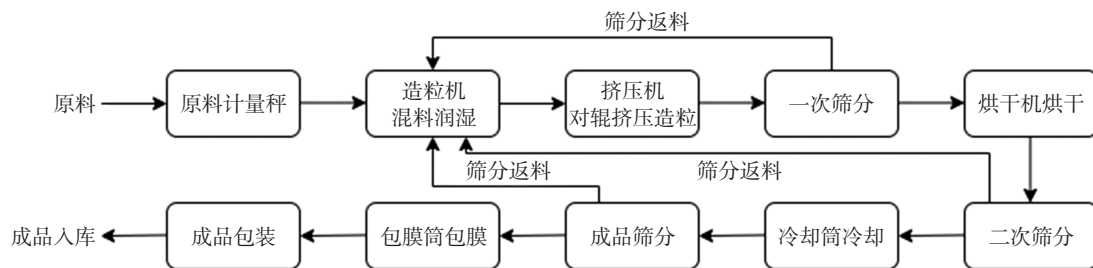


图1 转鼓-挤压造粒制低氮高钾作物专用肥工艺流程

Fig. 1 Process flow of rotary drum-extrusion granulation to produce low nitrogen and high potassium special fertilizer for crops

1.4 实验方法

原料细度梯度实验:主要关注不同细度的原料(氯化铵与氯化钾的混配物)对挤压成球率的影响。

混料水分控制实验:氯化铵与氯化钾的混配原料在造粒机内加水润湿与预混,通过水量调节控制混料的水分,分析混料水分对挤压机成球率的影响。

返料量对系统稳定性的影响:对全系统返料组成及流量进行分析,并结合挤压机运行工况与成品产量,分析返料量与系统稳定性的相互作用。

后工段破损率对产量的影响实验:对挤压后工段的物料进行破损率实验,分析破损率对产量的

影响。

烘干冷却工艺对氮钾肥产品颗粒强度及抗结块性能的影响实验:设置两个处理,处理组(烘干冷却),对照组(未处理);通过产品水分、强度、30 d结块率3个指标来对比两个处理的差异。

2 结果与讨论

2.1 尿基转鼓设备与挤压机并联的协同效应

基于工艺流程设计(见图1)与多组实验数据综合分析,原料经转鼓造粒机预混润湿,通过水分控制指标确定混料最佳水分,提升沙性物料表面黏性,为挤压造粒提供均匀塑性基质。年产10万t对

辊挤压机组连续造粒，原料最优细度选择、混料水分控制及返料量的精准控制与对辊挤压机组的运行工况相匹配。中细度原料挤压时颗粒间接触面积合适，机械啮合力与塑性变形能力平衡；此外最佳混料水分在保证挤压强度的同时能形成连续稳定的料幕，降低挤压机电流波动和故障率；而稳定的返料组成、流量与新鲜原料协同互补，避免物料塑性破坏和给料不均。并联转鼓烘干、冷却系统对挤压颗粒进行后处理，大幅度提高成品颗粒强度的同时也进一步降低了产品水分，降低了产品后期结块、粉化的风险。

2.2 原料细度对挤压机成球率、颗粒强度的影响

原料细度对挤压机成球率、颗粒强度的影响见表1。由表1可知，中细度组合（氯化铵 $d_{50} = 0.5 \sim 0.6$ mm，氯化钾 $d_{50} = 0.3 \sim 0.4$ mm）成球率最高（达75%~85%），并且兼顾颗粒强度与工艺稳定性。氯化钾 $d_{50} \geq 0.5$ mm时，成球率下降至 $\leq 60\%$ ；氯化钾 $d_{50} < 0.3$ mm时，成球率和颗粒强度显著下降，成球率 $\leq 50\%$ ，颗粒强度降到8 N以下。通过实验分析，混料中钾肥的细度是影响成球率和颗粒强度的关键因素，故在配方选择时，尽可能选用细

度适配的原料。

表1 原料细度对挤压机成球率、颗粒强度的影响

Table 1 The influence of raw material fineness on the ball forming rate and particle strength of extruders

原料细度 梯度	干氯化铵粒径 范围(d_{50})/mm	氯化钾粒径 范围(d_{50})/mm	成球率/ %	颗粒 强度/N
低细度组合 (粗颗粒)	0.5 ~ 0.6	0.5 ~ 0.6	55 ~ 60	≤ 10
中细度组合 (适中)	0.5 ~ 0.6	0.3 ~ 0.4	75 ~ 85	12 ~ 18
高细度组合 (细粉)	0.5 ~ 0.6	0.2 ~ 0.3	45 ~ 50	≤ 8

2.3 混料水分对挤压机成球率及故障率的影响

混料水分属于挤压造粒工艺的核心控制指标。通过对多个班次不同工况下混料水分的取样分析，结合系统运行工况，确定了混料水分的最佳值。混料水分对挤压机成球率及故障率的影响见表2。当混料 $w(H_2O)$ 在1.4%~1.6%时，挤压机电流波动幅度由 ± 1.5 mA降至 ± 0.5 mA，挤压料幕连续，不断裂。混料 $w(H_2O)$ 超过2.0%时，颗粒黏性过高，挤压机对辊黏连，料幕不连续，碎料机筛网堵塞，挤压机堵塞风险增加50%； $w(H_2O)$ 低于1.0%时，颗粒松散易碎，成品率下降至50%。

表2 混料水分对挤压机成球率及故障率的影响

Table 2 The influence of moisture in mixed slurry on the ball forming rate and failure rate of extruders

$w(H_2O)/\%$	挤压机电流 波动幅度/A	挤压机对辊 间隙/mm	挤压机料幕 状态	筛网通过 率/%	挤压机成球 率/%	挤压颗粒 强度/N	设备运行 状况	工艺 稳定性
1.4~1.6(最佳)	10.5 ± 0.5	1.3~1.5	连续稳定	95	65~73	15~18	正常	最优
>2.0(偏高)	8.5~18	>1.5	断裂不连续	70	60~65	<10	碎料机黏连引起堵塞	高风险
<1.0(偏低)	10 ± 2	>1.5	断裂不连续	80	50~60	13~15	筛分效率低且引起堵塞	低效

2.4 不同返料工况对挤压成球率及系统稳定性的影响

通过对全系统返料组成、流量、细度的分析，并结合挤压机在不同返料量下的运行工况，得出3种典型工况（正常工况、瞬时返料突增及总返料量超载）返料量对成球率及系统稳定性的影响，结果见表3。由表3可知，返料组成与系统运行状态具

有关联性。进入造粒系统的返料大致分为两种：一是系统筛分返料，二是环保除尘设施系统的回收物料。正常工况下（返料总量12~16 t/h，分筛返料占比85%、除尘返料占比15%），返料均匀输入能够维持物料塑性，成球率稳定在75%~85%，系统运行状态平稳。然而，当除尘器返料瞬时异常增加（返料总量15~20 t/h，除尘返料占比40%），超细

表3 不同返料工况对挤压机成球率及系统稳定性的影响

Table 3 The influence of different return conditions on the ball forming rate and system stability of extruders

工况类型	返料组成	返料总量/($t \cdot h^{-1}$)	成球率/%	系统稳定性
正常工况	分筛85% + 除尘15%	12~16	75~85	稳定
瞬时返料突增	分筛60% + 除尘40%	15~20	50~60	中度波动
总返料量 > 30 t/h		> 30	30	严重恶化

注：①基准参数，新鲜进料量15~16 t/h，总处理量（含返料循环）32 t/h；超细粉定义为粒径 ≤ 0.15 mm(100目以上)。②除尘器故障时返料总量可能短暂超出正常范围，但主要风险来自返料组成突变。③恢复机制：关闭除尘器返料后，系统通过物料重组在2~4 h内恢复至正常成球率的80%~90%。

粉(粒径 ≤ 0.15 mm(100目以上)的除尘器回收物料)的集中输入会破坏物料塑性结构,导致单位时间段内成球率下降至50%~60%,同时引发系统出现周期性不稳定现象。若总返料量超过30 t/h,证明系统已经恶化,表现为:挤压机给料圆盘满仓,新料无法进入系统,配方做停料处理,挤压机组设备故障频发,成球率降至30%以下。结果表明,合理控制返料组成比例及总量阈值是保障挤压造粒高效稳定运行的关键。

2.5 挤压后工段破损率对产量的影响

在转鼓-挤压造粒生产低氮高钾产品的生产流程中,工段间机械操作对颗粒完整性的动态损耗是制约最终产量的关键因素。基于对辊挤压机的实时运行数据(单台成球率75%~85%),通过对挤压机后处理工段的物料成品率、破损率数据进行取样分析(见表4),量化了工段间机械作用对颗粒完整性的累积破坏效应。结果表明,颗粒在筛分、烘干、冷却等环节的物理冲击与摩擦导致总成品率从初始89.97%骤降至45.20%,其中烘干工段贡献了55.3%的产量损失,其出口因烘干机内部7字形扬料板的高强度冲击导致单工段破损率达22.39%。冷却工段虽整体损耗较低(累计破损率5.5%),但二次冲击仍加剧了颗粒结构劣化。研究进一步通过敏感性分析提出:优化烘干、冷却扬料板结构及优化物料输送路径可使总成品率提升15%。本分析为多工段协同降低颗粒破损率提供了量化依据。

表4 各工段颗粒破损率

Table 4 Particle damage rate for each section

取样点	平均成品率/%	破损率/%	主要破损原因
一次筛分	89.97	10.03	一次筛分转筛机械摩擦
烘干出口	77.61	22.39	烘干过程中7字形扬料板冲击
冷却进口	98.46	1.54	物料提升与振动筛分损耗
冷却出口	96.04	3.96	冷却过程中7字形扬料板二次冲击

2.6 烘干、冷却工艺对产品颗粒强度及抗结块性能的影响

烘干、冷却工艺对产品、水分、结块率的影响见表5。实验结果表明,烘干、冷却工艺显著改善了氮钾肥颗粒的物理性能与储存稳定性。处理组(经烘干、冷却工艺)的产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 由对照组的0.8%~1.2%降至0.2%~0.3%,表明烘干工艺通过逆流热风(烘干进口温度150~180℃)能有效降低挤压颗粒表面及内部的游离水分,减少了因水分迁移导致的晶桥形成和结块风险。抗压强度方面,

处理组颗粒的抗压强度范围为32~38 N,较对照组(18~20 N)提升77.8%~90.0%,其强度增强机制可能与烘干过程中颗粒孔隙率降低及冷却阶段热应力均匀释放形成的致密微观结构相关。进一步地,动态筛分法结果(30 d储存实验)显示,处理组结块率为1.5%~2.0%,显著低于对照组的15%~20%。这一差异归因于烘干、冷却后低水含量($\leq 0.3\%$)抑制了氯化铵与氯化钾的吸湿潮解。此外,颗粒强度的提升也增强了其在运输与堆存过程中的抗机械破碎能力。综上,烘干、冷却工艺并联合挤压设备,能有效降低挤压颗粒水分,提升其强度和防结块性能,为其工业化生产与长期储存提供可靠的技术支持。

表5 烘干、冷却工艺对产品水分、强度、结块率的影响

Table 5 Effects of drying and cooling process on product moisture, strength and agglomeration rate

处理	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	抗压强度/N	结块率(30 d)/%
处理组(烘干、冷却)	0.2~0.3	32~38	1.5~2.0
对照组(未处理)	0.8~1.2	18~20	15.0~20.0

注:实验组样品均经过筛分包膜,包膜量一致,采用包装封装至仓库储存;产品水分采用GB/T 15063—2020方法测定;抗压强度采用数显式颗粒强度仪测定;结块率采用动态筛分法测定。

3 结论

本研究提出的转鼓-挤压造粒机生产工艺,实现了低氮高钾肥干法造粒的高效生产,兼具环保性与经济性优势。工艺通过优化原料细度(氯化钾 $d_{50}\leq 0.4$ mm)和混料水分(1.4%~1.6%),合理控制系统返料量(返料量 ≤ 16 t/h),使成球率稳定于75%~85%,台时产量达15~16 t;通过并联尿基转鼓烘干冷却设备提升了产品的防结块性能。其核心优势在于:(1)并联工艺集成烘干、冷却、包膜功能,产品 $w(\text{H}_2\text{O})\leq 1\%$ 、强度达30 N以上,外观接近团粒法产品;(2)可灵活生产单质肥(硫酸铵/氯化铵)与高浓度NPK复合肥;(3)能耗低且无“三废”排放。当前主要问题为工段破损率偏高,通过扬料板结构优化、筛网升级、低落差物料输送,预计可使破损率降低15%,产量提升至17 t/h。硫酸铵的适配性添加可增强颗粒内聚力,具体配比需结合工程实践进一步验证。该工艺为沙性原料生产低氮高钾产品提供了创新解决方案,兼具工业化推广潜力。

4 未来展望

针对尿基转鼓-挤压造粒机并联生产低氮高钾肥工艺进行了探索和尝试,在确保产品颗粒质量达

标的基础上,重点解决台时产量提升受限问题。研究表明,采用转鼓与挤压设备联用方案,可显著降低生产线投资成本,同时有效提升产品防结块与防粉化性能。然而,生产过程中颗粒破损率偏高成为制约产能提升的关键因素,其根源主要在于烘干系统设计及物料行进方式的适配性不足。基于上述问题,本研究提出三方面优化策略:首先,改进烘干机扬料板结构参数,通过优化曲面形态与导流角度提升抛撒均匀性;其次,调整物料行进路径设计,构建低冲击输送系统以降低机械损伤(如多采用皮带传动替代部分提升机传动);最后,对配方进行优化,通过添加适量硫酸铵提升成球率及颗粒强度。优化后工艺在保证产品质量稳定的前提下,可有效降低颗粒破损率,提高台时产量。

[参考文献]

- [1] 李志欣,胡明明,唐源,等.氮钾肥适宜配比促进机直播水稻干物质和养分的积累转运及增产[J].植物营养与肥料学报,2025,31(2):267-281.
LI Z X, HU M M, TANG Y, et al. Suitable partition ratios of nitrogen and potassium fertilizers increase the accumulation and translocation of dry matter and nutrient and the yield of mechanically direct-seeded rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(2): 267-281.
- [2] 张乐,王庆芬,宋振启,等.氮钾肥施用量对番茄品质的影响[J].中国果菜,2024,44(7):49-53.
ZHANG L, WANG Q F, SONG Z Q, et al. The Influence of Nitrogen and Potassium Fertilizer on Vegetable Quality[J]. China Fruit & Vegetable, 2024, 44(7): 49-53.
- [3] 夏亚辉.氮、钾肥对色素辣椒生长及品质的影响[D].石河子:石河子大学,2024.
XIA Y H. Effects of nitrogen and potassium fertilizers on the growth and quality of pigment peppers [D]. Shihezi: Shihezi University, 2024.
- [4] 杨明华,李永东,林力,等.氮钾肥配施对烤烟生长及养分利用的影响[J].江苏农业科学,2024,52(8):73-80.
YANG M H, LI Y D, LIN L, et al. Effects of combined application of nitrogen and potassium fertilizer on growth and nutrient utilization of flue-cured tobacco[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(8): 73-80.
- [5] 宋雪微,商靖雯,杨晓彤,等.加工型马铃薯品质对氮钾肥供应的响应[J].中国马铃薯,2023,37(3):227-235.
SONG X W, SHANG J W, YANG X T, et al. Quality of Processing Potatoes in Response to Nitrogen and Potassium Fertilizer Supply [J]. Chinese Potato Journal, 2023, 37(3): 227-235.
- [6] 王维.转鼓工艺及其包膜肥料控释性能的研究[D].广州:华南农业大学,2019.
WANG W. Study on Drum Coating Technique and its Effect on Nutrients Release Characteristics of Coated Fertilizer [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019.
- [7] 马丽.稳定性肥料不同生产工艺对氮肥增效剂稳定性的影响[D].重庆:西南大学,2024.
MA L. Effects of different production processes of stability fertilizer on the stability of nitrogen fertilizer synergist [D]. Chongqing: Southwest University, 2024.
- [8] 冯元琦,阮玲珑.复混肥料的挤压造粒[J].磷肥与复肥,1994(3):65-69.
FENG Y Q, RUAN L L. Extrusion granulation of compound fertilizer[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 1994(3): 65-69.
- [9] 马镜波.挤压造粒复混肥料之配方及其评价[J].上海化工,1992(3):30-31.
MA J B. Formulation and Evaluation of Extrusion Granulated Compound Fertilizer [J]. Shanghai Chemical Industry, 1992(3): 30-31.
- [10] 冯元琦.碳铵复混肥料造粒趋向[J].小氮肥,1994(11):15-16.
FENG Y Q. Granulation trend of ammonium bicarbonate compound fertilizer[J]. Nitrogenous Fertilizer & Syngas, 1994(11): 15-16.
- [11] 姜华.挤压造粒工艺在复合肥生产中的应用[J].有色金属设计,2007(4):5-8.
JIANG H. Application of Squeezing-granulating Process in Compound Fertilizer Production [J]. Nonferrous Metals Design, 2007(4): 5-8.
- [12] 李现才,田汉民,王峰,等.高氮复合肥产品结块与粉化问题的应对措施[J].河南化工,2009,26(12):42-44.
LI X C, TIAN H M, WANG F, et al. Countermeasures for the problem of caking and pulverization of high nitrogen compound fertilizer products [J]. Henan Chemical Industry, 2009, 26(12): 42-44.
- [13] 杨胜科,王文科,李翔,等.沸石去除地下水中氨氮的影响因素分析及作用机理探讨[J].西安工程学院学报,2000,22(3):69-72.
YANG S K, WANG W K, LI X, et al. The study of action and mechanism of treating ammoniacal nitrogen with activated zeolite in groundwater [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2000, 22(3): 69-72.
- [14] 段利中.湿法磷酸制饲料级磷酸氢钙清除氟工艺的研究[D].武汉:武汉科技大学,2011:25-27.
DUAN L Z. Clean defluorination technology for making feed-grade dicalcium phosphate with wet-process phosphoric acid [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011: 25-27.
- [15] 胡艳海,王继库,邵淑华.活性沸石对重金属离子的吸附及再生性研究[J].无机盐工业,1997(2):5-6.
HU Y H, WANG J K, SHAO S H. Study on the Adsorption and Regeneration of Heavy Metal Ions by Activated Zeolite [J]. Inorganic Chemicals Industry, 1997(2): 5-6.

(上接第26页)