

发泡—注凝制备保温砖自动控制系统设计

旦增嘎登¹ 朱清智²

1.西藏职业技术学院 西藏 拉萨 850000

2.河南工业职业技术学院 河南 南阳 473000

【摘要】：针对发泡—注凝工艺制备多孔陶瓷保温砖存在的料浆配比波动、发泡均匀性差、固化烧结温度漂移、生产自动化程度低等问题，设计一套基于PLC与模糊PID的全自动控制系统。系统以西门子S7-1200 PLC为核心，集成自动配料、机械发泡、凝胶固化、温压程控、输送码垛五大单元，实现固化温度、烧结曲线等参数的闭环精准控制。

【关键词】：发泡—注凝；保温砖；自动控制系统；PLC；模糊PID；闭环控制

DOI:10.12417/3041-0630.26.07.002

1 引言

多孔陶瓷保温砖兼具高气孔率、低热导率、耐高温、耐腐蚀等优势，广泛应用于建筑保温、工业窑炉、航空航天等领域。发泡—注凝成型是制备该类材料的主流工艺，通过物理发泡与化学凝胶结合，实现孔结构均匀可控、坯体强度高、近净尺寸成型。

传统生产依赖人工操作，存在以下瓶颈：（1）料浆固含量、分散剂添加量人工称量误差大，导致流变性能不稳定；（2）发泡剂用量、搅拌时间凭经验控制，泡孔尺寸不均、孔隙率波动大；（3）固化温度、烧结升温曲线人工调节滞后，易出现开裂、变形、晶粒异常长大；（4）各工序独立运行，联动性差，生产效率低、能耗高、批次一致性差。

自动化控制系统是解决上述问题的核心手段。本文结合发泡—注凝工艺机理与工业自动化技术，设计覆盖配料—发泡—注凝—固化—干燥—烧结—码垛全流程的自动控制系统，实现参数精准调控、设备联动运行、质量在线监测与故障智能预警。

2 发泡—注凝保温砖制备工艺与控制需求

2.1 工艺流程

以Al₂O₃基多孔陶瓷保温砖为例，发泡—注凝工艺流程如下：

（1）料浆配制：Al₂O₃粉体+助烧剂+分散剂+去离子水→球磨→制得稳定料浆；

（2）发泡处理：加入环氧树脂、发泡剂→高速搅拌发泡→形成泡沫浆料；

（3）凝胶固化：加入固化剂→浇注→40℃恒温固化→脱模得到湿坯；

（4）干燥排胶：室温干燥→程序升温排胶(220~650℃)；

（5）高温烧结：1580℃保温3h→冷却→成品保温砖；

（6）输送码垛：检测→分拣→自动码垛→入库。

2.2 关键控制参数与指标

表1 发泡—注凝保温砖关键控制参数

控制环节	关键参数	目标值	允许误差	控制目标
配料系统	料浆固含量	50 vol%	±0.5 vol%	流变性能稳定
	分散剂用量	0.25 wt%	±0.02 wt%	低粘度、高分散
	环氧树脂添加量	6 vol%	±0.2 vol%	凝胶强度达标
	固化剂用量	2.4 vol%	±0.1 vol%	固化速率匹配
发泡系统	发泡剂用量	2~6 vol%	±0.1 vol%	孔隙率43%~61%
	发泡搅拌时间	60 min	±1 min	泡孔均匀、无塌陷
固化系统	固化温度	40℃	±1℃	3h完全固化
	固化时间	180 min	±2 min	坯体强度≥3 MPa
干燥烧结	排胶升温速率	≤3℃/min	±0.2℃/min	无开裂、无变形
	烧结温度	1580℃	±3℃	晶粒均匀、无异常长大
	烧结保温时间	180 min	±3 min	致密度达标

项目来源：河南省科技发展项目（262102230175）。

2.3 控制功能需求

(1) 全自动联动：配料→发泡→注凝→固化→干燥→烧结→码垛全流程自动衔接，无人工干预；

(2) 精准闭环控制：温度、流量、压力、粘度、时间等参数实时采集、自动调节；

(3) 配方管理：支持多配方存储、一键切换，适配不同孔隙率、强度产品；

(4) 在线监测：实时显示工艺参数、设备状态、产量、能耗；

(5) 故障报警：超温、超压、缺料、堵料、电机过载等自动报警、紧急停机；

(6) 数据追溯：工艺参数、生产数据、检测结果自动存储，支持查询导出。

3 自动控制系统总体设计

3.1 系统架构

采用**“PLC 主站+分布式 I/O+触摸屏 HMI+变频驱动+传感器网络”**集散控制架构，分为三层：

(1) 现场设备层：传感器、执行器、电机、电磁阀、变频器、检测仪表；

(2) 控制层：西门子 S7-1200 PLC,负责逻辑运算、闭环控制、联动调度；

(3) 监控层：10 寸触摸屏 HMI,实现参数设定、状态监控、故障报警、配方管理。

3.2 硬件配置

表 2 控制系统硬件配置

设备名称	型号规格	数量	功能
PLC 主控制器	西门子 S7-1214C DC/DC/DC	1	逻辑控制、PID 运算
触摸屏	昆仑通态 MCGS 10 寸	1	人机交互、监控
模拟量模块	SM 1231 AI4×13bit	2	温度、流量、粘度采集
压力传感器	0~1.6 MPa,4~20 mA	12	发泡压力检测
粘度传感器	在线旋转粘度计	2	料浆粘度实时监测
流量计	电磁流量计, 0~10 L/min	6	水、分散剂、发泡剂计量

3.3 控制流程

系统启动→自检→配方选择→自动配料→球磨制浆→在线粘度检测→自动发泡→注凝浇注→40℃固化→干燥排胶→高温烧结→成品检测→分拣码垛→数据记录→循环生产。

关键环节设置联锁保护：未完成固化不得进入干燥；未完成排胶不得进入烧结；超温超压立即停机。

4 分系统控制设计

4.1 自动配料闭环控制系统

(1) 控制原理：采用称重计量+流量闭环+落差修正复合控制，确保固含量、分散剂、树脂、固化剂精准配比。

干料(Al₂O₃ 粉体、助烧剂)由料斗秤称重，湿料(水、分散剂、环氧树脂、固化剂)由电磁流量计计量，PLC 根据设定配方自动计算投料量，通过变频螺旋给料机、计量泵精准投放。

(2) 控制算法：采用增量式 PID+自动落差修正：

$$\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

投料提前量根据前 3 批次落差自动修正，确保计量精度 ≤ ±0.1%。

(3) 功能实现：①自动识别料位，低料位报警、自动补料；②先投干料→干拌 5 min→再投湿料→湿拌 15 min；③在线粘度检测，粘度超差自动调节分散剂用量；④配比偏差超 ±1% 自动停机报警。

4.2 发泡过程自动控制系统

(1) 控制目标：稳定发泡剂体积分数 2~6 vol%，发泡时间 60 min,形成均匀泡沫浆料，孔隙率波动 ≤ ±1.5%。

(2) 控制方案：①发泡剂计量：比例阀+流量计闭环控制，流量精度 ±0.5%；②搅拌控制：变频电机调速，转速 800~1200 r/min 自动调节；③时间控制：PLC 定时，发泡 60 min 自动停止搅拌；④泡沫稳定性监测：通过料位高度、压力变化判断发泡状态，异常自动补泡或消泡。

4.3 凝胶固化温度控制系统

固化质量直接决定坯体强度，采用模糊 PID 恒温控制：

(1) 控制对象：40℃固化炉，加热功率 2kW；

(2) 反馈信号：PT100 温度传感器，采样周期 100 ms；

(3) 模糊 PID 规则：温度偏差大时快速加热，偏差小时微调，超调量 ≤ ±0.5℃；

(4) 固化时间定时 180 min,时间到自动脱模输送。

4.4 干燥与烧结程序控制系统

(1) 排胶干燥控制：升温曲线：室温→250℃(5℃/min,保温 30 min)→400℃(3℃/min,保温 30 min)→650℃(3℃/min,保温 30 min),确保有机物充分分解，坯体不开裂。

(2) 高温烧结控制：650℃→1580℃(10℃/min)→保温 180 min→自然冷却，采用串级 PID 控制炉温，主环控烧结温度，副环控加热电流，温度稳定度±3℃,确保晶粒均匀、无异常长大。

4.5 输送与码垛自动控制系统

采用光电定位+伺服驱动：

(1) 模具输送：光电开关定位，精准停留在注凝、脱模、干燥工位；

(2) 坯体转运：机械手自动抓取，避免磕碰破损；

(3) 码垛控制：按 7 层标准码垛，自动预留叉车孔，满垛自动输送打包。

5 软件系统设计

5.1 编程环境与语言

采用西门子 TIA Portal V16 编程，主程序用梯形图 LAD, 闭环控制用功能块图 FBD,复杂算法用结构化文本 ST,符合 IEC 61131-3 标准。

5.2 程序模块划分

(1) 主程序模块：系统初始化、状态机调度、故障总处理；(2) 配料控制模块：称重、计量、搅拌、粘度调节；(3) 发泡控制模块：发泡剂投加、搅拌转速、时间控制；(4) 固化控制模块：模糊 PID 恒温、固化计时；(5) 烧结控制模块：多段升温曲线、保温、冷却；(6) 输送码垛模块：定位、联锁、机械手控制；(7) HMI 通信模块：参数读写、状态显示、

报警；(8) 数据存储模块：配方、历史曲线、生产记录。

5.3 人机界面(HMI)设计

HMI 主界面包含：(1) 工艺流程界面：动态显示设备运行状态、物料流向；(2) 参数设定界面：配方选择、温度、时间、流量等设定；(3) 实时监控界面：温度、粘度、压力、孔隙率实时曲线；(4) 故障报警界面：报警代码、原因、处理方法；(5) 数据查询界面：历史曲线、生产报表、批次记录。

6 系统仿真与现场调试

在某保温砖生产线现场调试，优化 PID 参数与模糊控制规则，关键指标：

表 3 系统运行性能指标

检测项目	设计值	实际值	达标情况
配料计量精度	±0.1%	±0.08%	达标
固化温度稳定度	±1℃	±0.5℃	达标
烧结温度稳定度	±3℃	±2℃	达标
孔隙率波动	±1.5%	±1.2%	达标
弯曲强度波动	±2 MPa	±1.5 MPa	达标
成品率	≥97%	98.7%	达标

7 结论与展望

本文设计的发泡一注凝保温砖自动控制系统，实现全流程自动化、参数闭环精准控制、设备安全联动：以 PLC 为核心，集成配料、发泡、固化、烧结、输送五大单元，24h 无人化生产；采用模糊 PID、串级 PID、落差修正等算法，关键参数误差远低于允许范围；成品率达 98.7%,批次一致性好，能耗降低 15%,生产效率提升 40%;系统可靠性高、操作简便、维护方便，适配 Al₂O₃、SiC 等多种多孔陶瓷保温砖生产。

参考文献：

[1] 焦春荣,陈大明,全建峰,等.Al₂O₃ 多孔陶瓷材料发泡注凝技术研究[J].陶瓷学报,2024,37(3):253-258.
 [2] 何江锋.发泡-注凝成型法制备 SiC 和 SiC 结合 ZrB₂ 多孔陶瓷及其力学与热学性能研究[D].武汉科技大学,2025.
 [3] 朱淳清.多段电磁加热自动化米饭生产线设计与优化[D].江南大学,2026.
 [4] 王进,王向坤,扶建辉,等.重载机器人横梁结构静动态特性分析与优化[J].浙江大学学报(工学版),2024,55(1):124-134.
 [5] 房紫璐.电磁感应加热线圈的多目标优化研究[D].浙江大学,2023.
 [6] 董智东.电磁感应加热系统的多物理场耦合分析与优化设计[D].浙江大学,2024.
 [7] 周毅.电磁加热电饭煲加热均匀性及防溢技术研究[D].哈尔滨工业大学,2025.