

## ◆设备、控制与安全生产◆

3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐进出料管线安全仪表系统设置探讨

徐 川

(中石化南京工程有限公司, 江苏 南京 210049)

[摘 要] 黄磷为危险化学品, 其储存过程面临火灾、爆炸、中毒及环境污染等多重风险。以某项目3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐为例, 研究其进料与出料管线的设置对整个储罐安全稳定性的影响。基于现行国家法律规范, 结合黄磷行业生产储存设计特点, 论证该规格黄磷储罐进出料管线设置安全仪表系统(SIS)的必要性, 进而从安全仪表功能确定、安全完整性等级(SIL)评估、系统选型设计、安装调试及运维管理等方面, 详细阐述安全仪表系统的构建方案, 为黄磷储罐进出料管线的安全防护设计提供技术参考与理论支撑。

[关键词] 黄磷储罐; 安全仪表系统; 安全完整性等级; 重大危险源; 危险与可操作性分析; 保护层分析

[中图分类号] TQ126.3<sup>+</sup>1; X937 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2026) 04-0118-06

### Discussion on the configuration of safety instrumented system for inlet and outlet pipelines of 3 000 m<sup>3</sup> yellow phosphorus storage tank

XU Chuan

(Sinopec Nanjing Engineering Co., Ltd., Nanjing 210049, China)

**Abstract:** Yellow phosphorus is a hazardous chemical, and its storage process is confronted with multiple risks such as fire, explosion, poisoning and environmental pollution. Taking a 3 000 m<sup>3</sup> yellow phosphorus storage tank in a project as the research object, the influence of the configuration of its inlet and outlet pipelines on the overall safety and stability of the storage tank is studied. Based on current national laws and regulations, combined with the design characteristics of production and storage in the yellow phosphorus industry, the necessity of configuring the safety instrumented system (SIS) for the inlet and outlet pipelines of this specification of yellow phosphorus storage tank is demonstrated. Furthermore, the construction scheme of the safety instrumented system is elaborated from the aspects of safety instrumented functions determination, safety integrity level (SIL) assessment, system selection and design, installation and commissioning, as well as operation and maintenance management. The research results provide technical reference and theoretical support for the safety protection design of inlet and outlet pipelines of yellow phosphorus storage tanks.

**Key words:** yellow phosphorus storage tank; safety instrumented system (SIS); safety integrity level (SIL); major hazard installations; hazard and operability analysis (HAZOP); layer of protection analysis (LOPA)

## 0 引言

黄磷, 又称白磷, 是一种极为重要的基础化工原料, 在众多领域有着广泛应用。同时, 黄磷具有自燃、剧毒等特性, 其储存过程蕴含着极大的安全风险。黄磷在常温下易与空气接触发生自燃, 产生具有极强毒性的五氧化二磷烟雾, 对人体和生态环境危害极大, 被列入危险化学品目录。依据GB 18218—2018《危险化学品重大危险源辨识》<sup>[1]</sup>标准, 黄磷作为剧毒液体的临界量为50 t, 3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐(黄磷密度约1.82 t/m<sup>3</sup>)的储存量远超临

界量, 经辨识构成一级重大危险源, 须严格遵循安全管控要求。3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐作为大型储存设施, 采用水封的方式, 罐内维持特定的温度和液位环境以保障黄磷的稳定性。进料管线负责将液态黄磷输送至储罐, 出料管线则承担黄磷向外转运的功能, 在输送过程中, 一旦出现流量异常、压力骤变、液位超限等情况, 极易引发泄漏、自燃、中毒等恶性事故。而重大危险源的事故后果具有波及范围广、危害程度深的特点, 因此黄磷储罐进出料管线的安全防护尤为关键。

收稿日期: 2026-01-20

作者简介: 徐 川(1983—), 男, 江苏句容人, 工程师, 注册安全工程师, 主要从事硫磷化工及石油化工安全工程设计工作。

安全仪表系统(SIS)作为过程工业领域的关键安全防护设施,通过实时监测工艺参数、触发联锁控制等方式,能够在危险工况出现时迅速采取应急措施,降低事故风险。当前,黄磷行业安全管理要求不断提高,相关法律法规对重大危险源的安全监测与防护设施配置提出了明确要求。因此,针对3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐进出料管线,深入探讨安全仪表系统的设置必要性与实施路径,对于提升黄磷储存环节安全保障能力、防范重特大事故具有重要现实意义。

## 1 设置安全仪表系统的必要性

### 1.1 法律规范的强制性要求

按相关标准要求,3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐进出料管线必须设置安全仪表系统。如GB 17681—2024《危险化学品重大危险源安全监控技术规范》<sup>[2]</sup>明确:一级、二级重大危险源涉及剧毒液体,应配置独立的安全仪表系统,其安全完整性等级(SIL)不低于SIL1,并设置紧急停车系统,实现事故状态下快速切断。

GB/T 50770—2013《石油化工安全仪表系统设计规范》<sup>[3]</sup>要求:构成重大危险源的单元必须进行安全完整性等级评估,SIL1及以上安全仪表功能必须由安全仪表系统实现,不得在基本过程控制系统(DCS)中执行。

GB/T 21109.1—2022《过程工业领域安全仪表系统的功能安全 第1部分:框架、定义、系统、硬件和应用编程要求》<sup>[4]</sup>为安全仪表系统全生命周期应用提供技术支撑。

黄磷储罐进出料管线是黄磷输送关键通道,为重大危险源风险关键控制点,其安全控制直接影响危险源整体安全水平。在该管线上设置独立安全仪表系统(SIS),既是现行标准强制性要求,也是落实重大危险源风险分级管控、防范泄漏及中毒燃爆事故的核心技术措施。

### 1.2 危险与可操作性分析(HAZOP)、保护层分析(LOPA)、安全完整性等级定级的要求

选取某大型磷化工企业3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐系统进出料管线为分析对象,该系统液体黄磷采用水下进料储存方式,当进料达到储罐有效容积的85%时,黄磷高液位报警。当进料达到储罐有效容积的88%时,进料液位高高联锁,强制切断进料DCS阀门。当进料达到储罐有效容积的90%时,进料液位高高高联锁,强制切断进料安全仪表系统阀门。

出料时,液位高度低至1.5 m时,液位低报

警。液位高度低至1.0 m时,液位低低联锁关停出料泵。

黄磷储运工艺流程如图1所示。

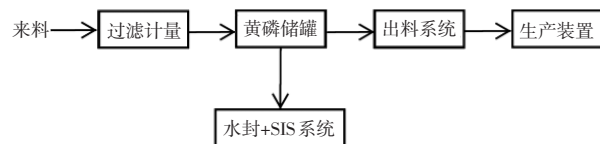


图1 黄磷储运工艺流程简图

Fig. 1 Schematic diagram of yellow phosphorus storage and transportation process flow

本案例分析采用的风险标准是中国石油化工集团公司企业标准《中国石化安全风险矩阵标准》(Q/SH 0560—2023),风险矩阵纵轴“后果严重性等级(A~G,从轻到重)”与横轴“发生可能性等级(1~8,从极低到频繁)”的交叉匹配,将风险量化为1~200的风险值,并以蓝、黄、橙、红四色直观区分低、中、高、极高风险等级,帮助识别分析黄磷储罐的风险程度,进而采取对应管控措施,例如低风险持续监控、高风险立即整改,为风险分级管控提供清晰的决策依据,具体见图2安全风险矩阵。

在生产经营活动中,初始风险决定了需要采取的风险控制措施及其可靠性等级;而剩余风险表征在现有安全措施(安全保护层)下实际存在的风险,判断风险是否可以接受。

《HSE风险矩阵标准》中各级风险的最低安全要求见表1。

全面排查3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐系统进出料管线中存在的安全风险和事故隐患,系统识别进出料过程中高液位、高高液位、低液位、低低液位的危险性及相关工况下是否能够实现顺利操作,分析评估已有的安全措施是否可以有效控制风险,并提出应增加的安全对策措施<sup>[5]</sup>。黄磷储罐危险与可操作性分析记录如表2所示。

综上所述,传统使用的基本过程控制系统(BPCS)已难以实现对上述风险的快速响应与精准控制,需要使用更高的控制系统才能满足要求。安全仪表系统独立于基本过程控制系统,具有更高可靠性,能够实时监测储罐液位参数,在参数超出安全阈值时,迅速触发联锁动作,如关闭进料阀、停止出料泵、启动氮气吹扫等,有效阻断危险链条,避免事故扩大<sup>[6]</sup>。因此,由于黄磷储存工艺的特殊性,设置安全仪表系统是保障进出料管线安全运行的必要手段。

安全风险矩阵		发生的可能性等级——从可能极低到频繁发生							
		1	2	3	4	5	6	7	8
后果严重性等级—从轻到重	后果等级	类似的事件没有在石油石化行业发生过,且发生的可能性极低	类似的事件没有在石油石化行业发生过	类似的事件在石油石化行业发生过	类似的事件在中国石化曾经发生过	类似的事件在本企业相似设备设施(使用寿命内)或相似作业活动中发生过	在设备设施(使用寿命内)或相同作业活动中发生过1次或2次	在设备设施(使用寿命内)或相同作业中发生过多次	在设备设施或相同作业活动中经常发生(至少每年发生)
		$\leq 10^{-6}/a$	$10^{-6} \sim 10^{-5}/a$	$10^{-5} \sim 10^{-4}/a$	$10^{-4} \sim 10^{-3}/a$	$10^{-3} \sim 10^{-2}/a$	$10^{-2} \sim 10^{-1}/a$	$10^{-1} \sim 1/a$	$> 1/a$
	A	1	1	2	3	5	7	10	15
	B	2	2	3	5	7	10	15	23
	C	2	3	5	7	11	16	23	35
	D	5	8	12	17	25	37	55	81
	E	7	10	15	22	32	46	68	100
	F	10	15	20	30	43	64	94	138
G	15	20	29	43	63	93	136	200	

图2 安全风险矩阵

Fig. 2 Security risk matrix

表1 各级风险的最低安全要求

Table 1 Minimum safety requirements for risks at all levels

风险级别	剩余风险值RI	风险水平	最低安全要求	建议的风险控制负责部门
低风险	< 10	广泛可接受的风险	执行现有管理程序、保持现有安全措施完好有效,防止风险进一步升级	基层单位
一般风险	10 ~ < 15	可容忍的风险(ALARP区)	可进一步降低风险,设置可靠的监测报警设施或高质量的管理程序	二级单位
	15 ~ < 20	可容忍的风险(ALARP区)	可进一步降低风险,设置风险降低倍数等同于SIL1的保护层	二级单位
较大风险	20 ~ < 40	高风险,不可容忍的风险	应当进一步降低风险,设置风险降低倍数等同于SIL2或SIL3的保护层 新建装置应当在设计阶段降低风险;在役装置应当采取措施降低风险	企业主管部门
重大风险	40 ~ < 60	非常高的风险,不可容忍风险	必须降低风险,设置风险降低倍数等同于SIL3的保护层 新建装置应当在设计阶段降低风险;在役装置应当立即采取措施降低风险	企业领导层
	$\geq 60$	极其严重的风险,不可容忍的风险	新建装置改变工艺或设计;对在役装置应当立即采取措施降低风险,甚至停车	企业领导层

表2 黄磷储罐危险与可操作性分析记录

Table 2 Hazard and operability analysis record of yellow phosphorus storage tanks

项目	可能的后果	初始风险			类型	现有安全措施		现有风险			建议措施
		S	A	E		措施	失效概率	S	A	E	
储罐液位高	黄磷上部保护水从储罐溢流口溢出,黄磷失去水封遇空气发生燃烧,发生火灾	D7	C7	C7	关键报警和人员响应	液位高报警	$1 \times 10^{-1}$	D3	C3	C3	黄磷储罐液位增加一组阀门,液位高高联锁关闭阀门进入SIS
					BPCS	液位高高联锁关闭DCS阀门	$1 \times 10^{-1}$				
					释放后物理保护	储罐设有围堰	$1 \times 10^{-2}$				
储罐液位低	泵损坏,底部300 mm黄磷遇空气燃烧	C7	C7	C7	关键报警和人员响应	液位低报警	$1 \times 10^{-1}$	C6	C6	C6	建议增加液位低联锁停车

注:S,健康和影响;A,财产损失影响;E,环境影响,非财务和社会影响。下同。

### 1.3 行业事故教训与安全管理的要求

国内外黄磷行业曾多次发生因储罐进出料管线失控导致的安全事故。例如,某黄磷企业进料过程中,因进料过量导致水封溢出,黄磷接触空气后自燃,产生大量有毒烟雾,造成人员中毒和财产损失。事故充分暴露了进出料管线缺乏有效安全防护系统的严重危害<sup>[7]</sup>。

当前,主流黄磷生产储存企业在重大危险源设施的关键管线中均已逐步配置安全仪表系统,并取得了良好的安全管控效果。四川省危险化学品协会团体标准《黄磷生产企业安全风险防控实施指南》<sup>[8]</sup>也明确要求,新建生产装置及储存设施必须装备自动化控制系统,应根据工艺过程危险程度和风险评估分析结果,确定装备安全仪表系统;在役设施须通过危险与可操作性分析等手段评估现有

安全仪表功能,不满足要求的应及时整改。因此,3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐进出料管线设置SIS是行业安全管理实践的普遍共识,也是防范同类事故发生的有效举措。

## 2 安全仪表系统的设置方案

### 2.1 安全完整性等级评估

安全完整性等级是衡量安全仪表系统性能的关键指标,代表系统实现风险降低的能力,分为SIL1至SIL4 4个等级,等级越高,风险降低能力越强。根据GB/T 21109.1—2022要求,安全完整性等级需通过保护层分析(LOPA)确定<sup>[9]</sup>,结合初始风险等级、现有保护层的风险降低效果,确定所需的安全完整性等级。

黄磷储罐保护层分析安全完整性等级定级结果见表3。

表3 黄磷储罐保护层分析记录表

Table 3 Record of protection layer analysis for yellow phosphorus storage tanks

名称	后果 描述	初始风险 等级	初始风险 S A E	独立保护层 IPL		需求的SIF			需求的SIL描述或建议的IPL			减缓后风险		
				描述	PFD	PFD	RRF	SIL等级	描述	IPL类别	S	A	E	
储罐液位高 高联锁关SIS 进料阀	水封水从储罐溢 流口溢出,黄磷失 去水封遇空气发 生燃烧,发生火灾	D	D7 C7 C7	液位高报警	1×10 <sup>-1</sup>	1×10 <sup>-1</sup>	10	SIL1	黄磷储罐液位 高高联锁关SIS 阀	SIS	D2	C2	C2	
				液位高高联 锁关DCS阀门	1×10 <sup>-1</sup>									
				储罐设有围堰	1×10 <sup>-2</sup>									
储罐液位低 低联锁停泵	泵损坏,底部黄磷 遇空气燃烧	C	C7 C7 C7	液位低报警	1×10 <sup>-1</sup>	1×10 <sup>-1</sup>	10	SIL1	黄磷储罐液位 低低联锁停泵	SIS	C4	C4	C4	
				液位低低联 锁停泵	1×10 <sup>-1</sup>									

3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐构成一级重大危险源,初始风险等级高,一旦发生事故易造成大规模人员中毒、火灾蔓延及环境污染。通过保护层分析可知,现有关键报警及人员响应、工艺控制、泄漏后的保护措施等保护层可以有效降低风险,但无法将风险降至可接受水平。依据重大危险源的风险分级管控要求,结合本次LOPA分析结论,进出料管线的安全仪表功能需至少达到SIL1等级要求。

### 2.2 安全仪表功能(SIF)确定

安全仪表功能是安全仪表系统的核心,需通过危险与可操作性分析和保护层分析,结合进出料管线的工艺特点和风险源识别结果确定。针对3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐进出料管线,主要需设置以下安全仪表功能:

一是储罐液位高高联锁功能。通过液位监测装置实时监测罐内液位,当进料达到储罐有效容积的90%时,说明进料已经过量,进料液位高高联锁,强制切断进料安全仪表系统阀门,停止进料相关作业。

二是储罐液位低低联锁功能。出料过程中,若罐内液位降至低阈值,说明水封层可能被破坏,立即联锁停止出料泵,避免黄磷暴露于空气之中,引发安全事故。

### 2.3 系统选型与设计

#### 2.3.1 传感器选型

传感器作为安全仪表系统的信号采集单元,其可靠性直接影响系统性能。针对黄磷储罐进出料管线的工况特点,传感器选型需满足耐腐蚀、耐高温、抗干扰等要求。

液位监测采用顶装式磁致伸缩液位计,该仪表能够同时监测罐内水位和磷位,不受罐内水蒸气、粉尘等干扰,测量精度高。液位计探测杆外表面需包覆耐温耐腐功能层,可承受瞬间灼烧温度300℃以上,浮子选用316L不锈钢材质,内置永久性磁钢,消磁温度高于150℃,确保在黄磷储存工况下稳定运行。

#### 2.3.2 逻辑控制器选型

逻辑控制器是安全仪表系统的核心运算单元,

负责接收传感器信号、进行逻辑判断并触发联锁动作。逻辑控制器需独立于基本过程控制系统，避免与基本过程控制系统共用硬件资源，防止相互干扰。

### 2.3.3 执行机构选型

执行机构包括紧急切断阀、泵等设备，需选用故障安全型产品，即当仪表气源、电源故障时，执行机构应处于工艺系统所需的安全位置。进料和出料管线的紧急切断阀选用气动球阀，配备复位装置，故障时自动关闭，确保管线切断；阀门材质选用碳钢或不锈钢，符合黄磷储存设施的材质要求。出料泵选用具备紧急停车功能的防爆型泵，与安全仪表系统硬线连接，确保联锁信号能够快速传递并停止出料泵。

### 2.3.4 系统独立设计

为满足设计要求，安全仪表系统需完全独立于基本过程控制系统，包括独立的传感器、控制器、执行机构、电源和通讯线路，避免基本过程控制系统故障影响安全仪表系统功能。安全仪表系统可设置独立的操作员站，用于显示系统状态、报警信息和操作记录，操作员站失效时，不影响逻辑控制器的正常运行，且操作员站不具备修改安全仪表系统(SIS)编程软件的权限，防止误操作影响系统安全。

## 2.4 安装调试与联锁逻辑设置

### 2.4.1 安装要求

传感器安装需符合工艺要求和规范标准：液位计安装在储罐顶部中心位置，确保探测杆竖直插入罐内，底部配重锤固定牢固，避免与罐内其他设施碰撞；流量传感器安装在进出力管线的直管段，前后预留足够的直管长度，确保测量精度；压力传感器安装在管线的压力稳定区域，远离阀门、弯头等扰动源。

执行机构安装需便于操作和维护，紧急切断阀安装在进出力管线靠近储罐的位置，确保能够快速切断物料；阀门与管线的连接密封可靠，避免泄漏。仪表线缆采用阻燃、防爆电缆，敷设过程中与动力电缆分开布置，避免电磁干扰，在爆炸危险区域内的仪表设备需符合区域防爆等级要求。

### 2.4.2 调试与联锁逻辑设置

系统调试包括传感器校准、控制器逻辑测试、执行机构动作测试等环节。传感器校准采用标准校准设备，确保测量精度符合要求；控制器逻辑测试通过模拟各种故障工况，验证联锁逻辑的正确性和响应速度；执行机构动作测试检查阀门关闭、泵启

停等动作的可靠性和及时性。

联锁逻辑设置需基于工艺需求及危险与可操作性分析结果，明确各联锁参数的报警阈值和联锁动作。

## 2.5 运维管理

### 2.5.1 日常监测与维护

建立安全仪表系统日常监测与维护制度，安排专业人员定期对系统进行检查和维护：每日检查传感器、控制器、执行机构的运行状态，查看仪表显示数据是否正常，有无报警信息；定期对传感器进行校准，校准周期根据仪表类型和规范要求确定，确保测量精度；定期检查执行机构的动作灵活性，对阀门进行润滑和密封检查，防止卡涩或泄漏。

系统数据记录与存储需严格符合重大危险源的监管要求，控制器应记录所有联锁动作、报警信息和操作记录，数据存储时间不小于1年；可燃和有毒气体检测报警系统的信号数据储存时间不小于30 d，确保监测监控报警数据的可追溯性，实现超限报警和处置过程的全程留痕。同时，安全仪表系统的监测数据须具备远传功能，接入企业重大危险源安全监管信息系统，实时向企业安全管理部门及应急管理部门上传数据，满足重大危险源动态监控的要求。定期对数据进行分析，查找系统运行中的潜在问题，及时优化和改进，持续提升重大危险源的安全管控水平。

### 2.5.2 定期检验与评估

根据《石油化工安全仪表系统设计规范》<sup>[3]</sup>要求，定期对安全仪表系统进行全系统检验，检验周期结合系统运行情况和安全完整性等级确定，一般不超过3年。检验内容包括系统功能测试、冗余性能测试、故障响应时间测试等，确保系统各项性能符合要求。

每3~5年开展一次危险与可操作性分析和保护层分析，重新评估进出力管线的风险等级和安全完整性等级要求，检查现有安全仪表系统是否满足风险降低需求。若工艺条件、设备参数发生变化，需及时调整安全仪表系统的联锁逻辑和参数设置，确保系统始终适应安全管控要求。同时，建立安全仪表系统变更管理流程，任何涉及系统硬件、软件、逻辑的变更，都需经过严格的审批和验证，避免变更引发系统故障。

## 3 结论与展望

3 000 m<sup>3</sup>黄磷储罐进料与出料管线设置安全仪表

系统,是满足现行标准规范、适应黄磷易自燃等特殊储存特性、防范重大安全事故的关键措施。通过科学确定安全仪表功能、合理评估安全完整性等级、精准设备选型、规范安装调试及严格运维管理,能够构建可靠的安全防护体系,有效降低进出料管线泄漏、自燃等风险,保障储罐区安全稳定运行。

未来,可依托工业互联网、大数据与人工智能等智能化技术,结合黄磷水封保护、密闭输送等工艺特点,对安全仪表系统进行优化升级。通过对压力、流量、水封液位等关键参数实时监测与趋势分析,实现设备故障预判、仪表健康状态评估和预测性维护,推动安全管控从被动联锁向主动预警、事前防控转变。同时,运用动态风险评估模型,结合工况变化对重大危险源进行实时研判与分级预警,进一步提升风险管控的精准性与时效性。

后续随着黄磷行业安全仪表系统相关标准与技术规范更新,强化功能安全与智能技术融合应用,推广成熟技术方案与管理经验,持续提升储罐区安全水平和智能化管控能力,为危险化学品储存环节的安全管理提供坚实技术保障。

#### 【参考文献】

[1] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.危险化学品重大危险源辨识:GB 18218—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[2] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.危险化学品重大危险源安全监控技术规范:GB 17681—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局.石油化工安全仪表系统设计规范:GB/T 50770—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[4] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.过程工业领域安全仪表系统的功能安全 第1部分:框架、定义、系统、硬件和应用编程要求:GB/T 21109.1—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

[5] 孙明郁.HAZOP-LOPA分析方法在化学品综合罐区中的应用研究[J].广东化工,2017,44(4):101-102.  
SUN M Y. The Study and Application of HAZOP and LOPA Combined Methods in Chemical Comprehensive Tank Farm[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(4): 101-102.

[6] 齐斌.安全仪表系统的设计与应用[J].石油化工自动化,2021,57(S1):38-41.  
QI B. Design and Application of Safety Instrumented System[J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2021, 57(S1): 38-41.

[7] 陈莉莉,张华.黄磷罐区工艺设计中的安全性研究[J].广东化工,2014,41(12):182,196.  
CHEN L L, ZHANG H. Studies on the Safety of Yellow Phosphorus Tank in Process Design[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(12): 182, 196.

[8] 四川省危险化学品协会.黄磷生产企业安全风险防控实施指南:1/SCSWXHXPH01—2023[S].成都:[出版者不详],2023.

[9] 范咏峰,唐彬.LOPA在石油化工装置中的应用[J].石油化工自动化,2021,57(3):31-34.  
FAN Y F, TANG B. Application of LOPA in Petrochemical Installation [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2021, 57(3): 31-34.

(上接第94页)

YU C. Research and application of technology for preparing soil conditioner from phosphogypsum [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2022.

[28] 余苏,李建锡,马丽萍,等.磷石膏分解特性对磷石膏制硫酸联产水泥新工艺的影响研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2010,35(4):80-84.  
YU S, LI J X, MA L P, et al. Thermal Effects of Phosphogypsum on Co-Production of Acid and Cement[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology Edition), 2010, 35(4): 80-84.

[29] BEN A B, AIT B J, SINA A T, et al. Effective phosphogypsum purification through granulometric screening: In-depth characterization of impurities occurrence state [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(5): 117674.

[30] 刘德智,陈青果,李楷文,等.磷石膏制备Ⅱ型无水石膏工艺研究[J].化工矿物与加工,2023,52(4):56-62.  
LIU D Z, CHEN Q G, LI K W, et al. Study on preparation of type II anhydrite from phosphogypsum [J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(4): 56-62.

[31] 郑玉龙,嵇帅,陆春华,等.基于固废磷石膏制备胶凝材料的工艺与机制[J].复合材料学报,2024,41(3):1436-1446.  
ZHENG Y L, JI S, LU C H, et al. Preparation technology and mechanism of cementitious material based on solid waste phosphogypsum [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1436-1446.

[32] 丁沙.过硫酸磷石膏矿渣水泥混凝土抗海盐侵蚀性能与机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.  
DING S. Research on corrosion resistance and its mechanism of persulfur phosphogypsum-slag cement concrete under sea salt environment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

[33] DOTTO G L, PINTO D, SILVA L F O, et al. Adsorption of rare earth elements (Ce<sup>3+</sup>, La<sup>3+</sup>, and Nd<sup>3+</sup>) and recovery from phosphogypsum leachate using a novel ZSM-5 zeolite [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 698: 134549.

[34] 方佩莹,索崇娴,董晓强,等.工业废渣协同水泥固化高浓度铜污染土的试验研究[J].太原理工大学学报,2021,52(3):450-455.  
FANG P Y, SUO C X, DONG X Q, et al. Experimental Study on the Synergistic Solidification of High-Concentration Copper Contaminated Soil by Industrial Waste Residues and Cement [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(3): 450-455.