



中国石化
SINOPEC

磷石膏资源化利用技术及能碳双控优化路径

技术团队：张青、胡佳、李颖、李燕凤、张宝财、焦彤彤、
胡青、张雨晴、赵耀

中石化南京工程有限公司 赵耀
Sinopec NanJing Engineering CO.,Ltd.

目录

CONTENTS

1

公司简介

2

磷石膏资源化背景

3

磷石膏处理技术进展

4

“1468”项目概况

5

能碳双控优化

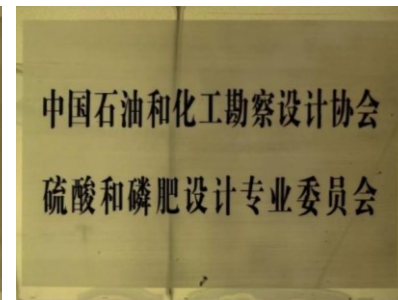
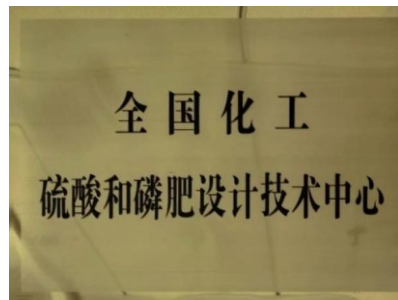
Part 1

公司简介

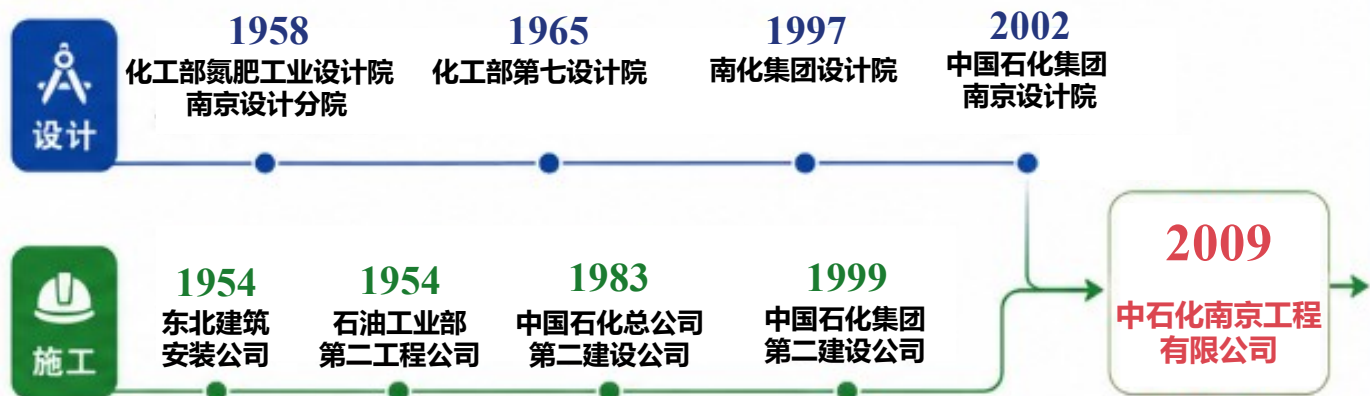


公司基础能力与磷硫无机化工优势

依托设计、采购、施工与开车服务能力，支撑磷石膏资源化工程落地



发展沿革



全周期服务模式



磷硫无机化工核心优势



专业积累

原化工部直属
硫酸、磷肥专业单位



大型化业绩

80万吨/年硫磺制酸、40万吨/年硫铁矿制酸、
40万吨/年磷酸



示范项目

贵州瓮福
140万吨/年磷石膏资源化项目





硫磷化工

- 公司作为原化工部硫酸、磷肥专业设计单位，主要承担国内硫铁矿制酸、硫磺制酸和磷酸、磷肥项目的设计工作。
- 国内硫酸、磷肥行业的大型化发展，其首套规模为公司开发设计
- 磷肥和磷化工是公司的核心优势业务之一
- 单系列最大规模：

制用酸一体化15万吨/年

硫磺制硫酸80万吨/年

硫铁矿制硫酸40万吨/年

湿法制酸6万吨/年

精制磷酸10万吨/年

磷酸40万吨/年

黄磷1.5万吨/年

贵州磷石膏资源利用化项目

全球最大磷石膏制酸循环经济装置，每年可消纳140万吨磷石膏，用于制备65万吨硫酸，并联产60万吨水泥熟料。





中国石化
SINOPEC

1. 公司简介

硫化工典型业绩

2008

广东云浮硫酸厂
40万吨/年
硫铁矿制酸装置

2010 EPC

陕西金堆城钼业公司
20万吨/年硫铁矿制酸

2015

贵州开磷集团矿肥有限
责任公司
2×70万吨/年硫磺制酸及
2×25万吨/年磷酸

2019

中石化荆门分公司
20万吨/年烷基化装置
配套15万吨/年
硫化氢干法制酸装置

2020 联合EPC

中化重庆涪陵化
工有限公司
80万吨/年硫磺制硫
酸装置

2024

哈萨克斯坦
1200吨/天硫酸工
厂设计项目

磷化工典型业绩

2009

宜昌东圣磷复肥
有限责任公司
60万吨/年磷铵工程

2012

云南富瑞化工有限公司
70万吨/年磷酸串级浓
缩改造

2016

利物浦—老街化工化肥有限公
司
30kt/a热法磷酸装置及20kt/a
三聚磷酸钠装置项目

2020

马来西亚磷化工（砂拉越）有
限公司
黄磷装置：7.2万吨/年
湿法磷酸装置：13万吨/年
食品级热法磷酸装置：10万吨/年

2022

云南祥丰金麦化工有
限公司
10万吨/年磷酸净化装
置

2024

湖北宜化楚星
40万吨/年磷铵
20万吨/年硫基复合肥
30万吨/年磷酸装置

2005

中化开磷化肥有限公司
60万吨/年硫基氮磷钾

2009

美丰德阳分公司
30万吨/年尿基复合肥

2015

越南老街DLC有限公司
10万吨/年重钙(重过磷酸
钙)

2017 EPC

内蒙古大地云天化工有限
公司
120万吨/年缓控释肥项目
一期30万吨/年磷酸装置

2022

中化重庆涪陵化工有限公
司
10 万吨/年净化磷酸
5 万吨/年磷酸二氢钾
5 万吨/年高档阻燃材料

2023

湖北宜化磷化工有限公司
40万吨/年湿法磷酸项目

Part 2 磷石膏资源化背景





磷石膏资源化利用背景

副产量大、堆存压力高，资源化路径决定磷化工绿色转型空间



4.5~5t

每生产1吨磷酸副产磷石膏

2.8亿 t/a

全球磷石膏估算排放量

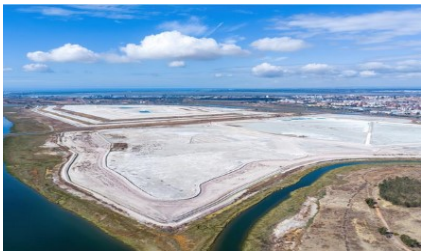
> 8亿 t

我国磷石膏堆存总量

30~45%

我国年综合利用率

磷石膏堆存的危害



1. 占用土地，破化生态

大量堆存占用农田资源、破坏植被。

2. 污染水体，影响水质

P/F/HMs侵入地下水，导致富营养化



3. 扬尘污染，污染大气

扬尘及有害物质扩散，降低空气质量

4. 滑坡跨坝，安全风险

大堆存易造成边坡失稳、垮坝等地质灾害



磷石膏治理政策文件矩阵

国家要求牵引 · 五省一市联动 · 存量治理倒逼

政策硬约束

国务院《固体废物综合治理行动计划》点名

云南

湖北

贵州

四川

安徽

重庆

2027年前或存量磷石膏库整治





磷石膏综合利用路径

副产量大、堆存压力高，资源化路径决定磷化工绿色转型空间



路径判断逻辑



物理法利用

- 硫酸钙化学组成基本不变
- 主要用于缓凝剂、建材、土壤调理等
- 工艺简单、投资较低
- 高值化程度有限

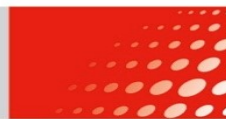
化学法利用

- 利用钙、硫元素制取新产品
- 可联产硫酸、水泥熟料或钙基材料
- 资源循环价值更高
- 更利于规模化与高值化利用

核心判断：磷石膏最终出路在于资源化利用，其中化学法更有利于钙、硫元素循环和规模化高值利用。

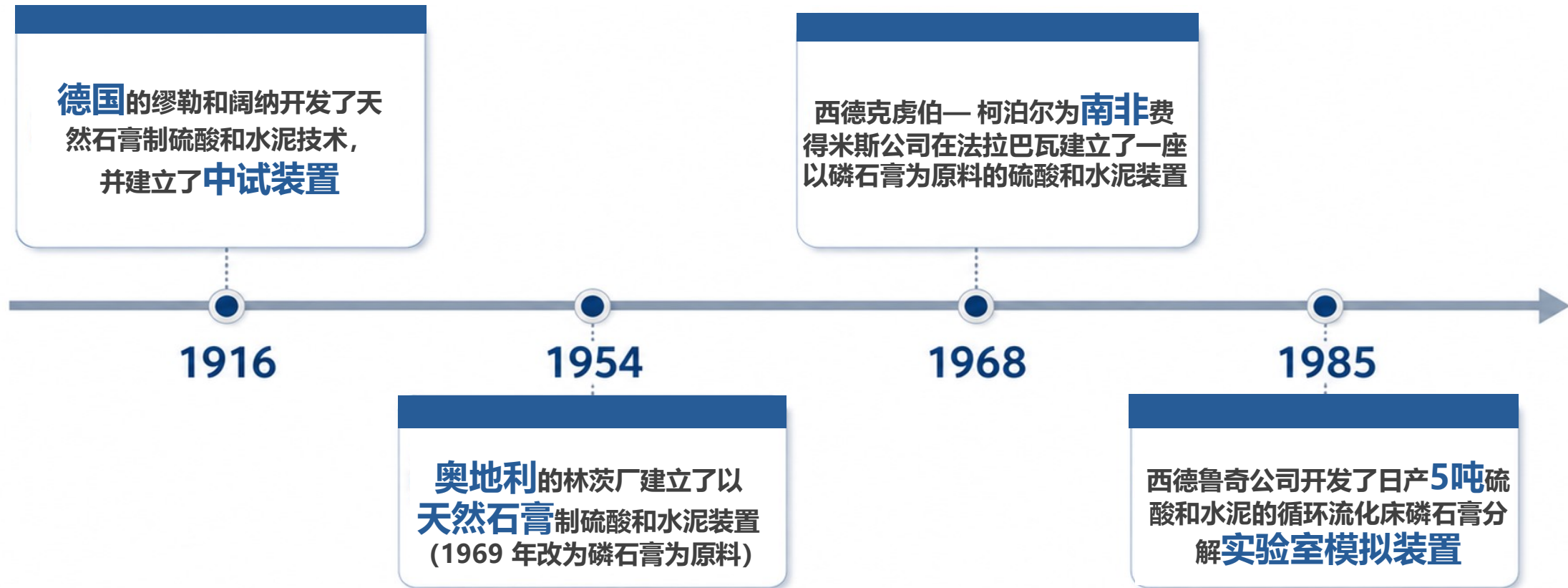
Part 3

磷石膏处理 技术进展





国外工程实践

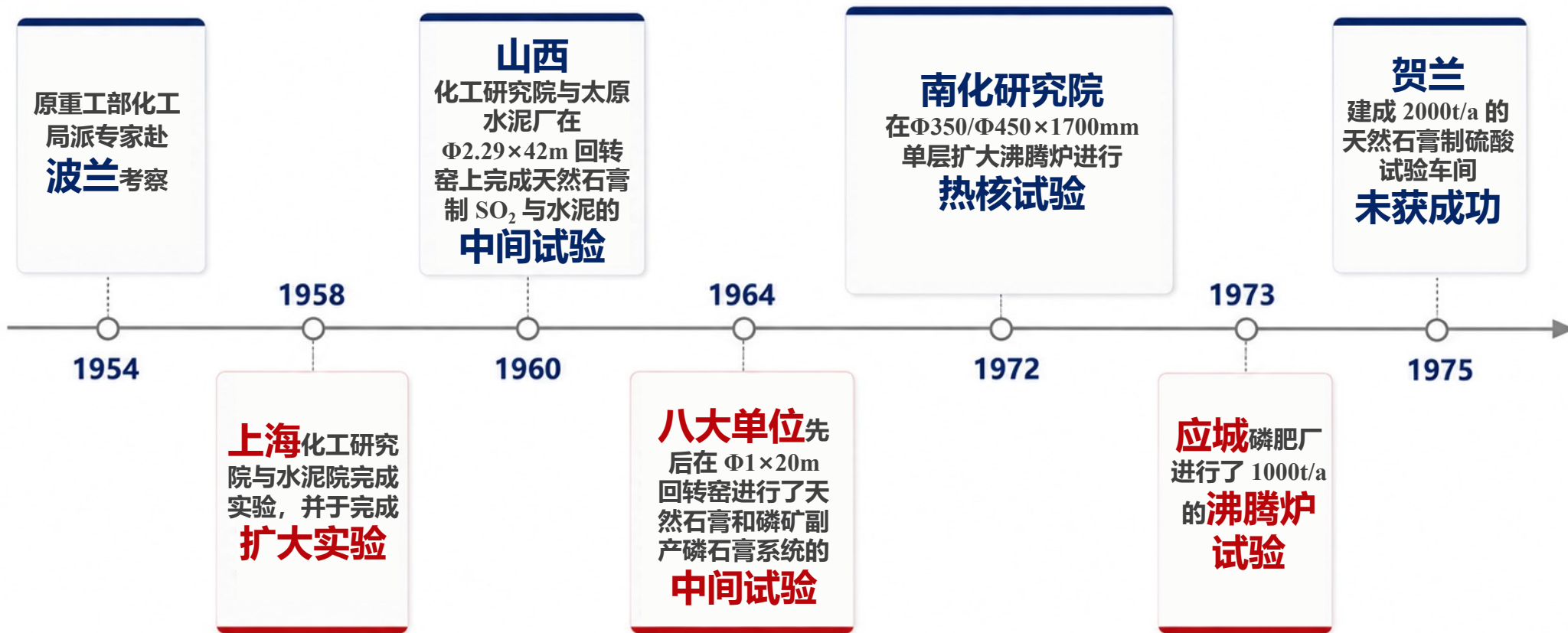


国外曾多次开展工程探索，但受工艺与能耗限制，未形成持续工业化推广





国内工程实践 (早期探索阶段)

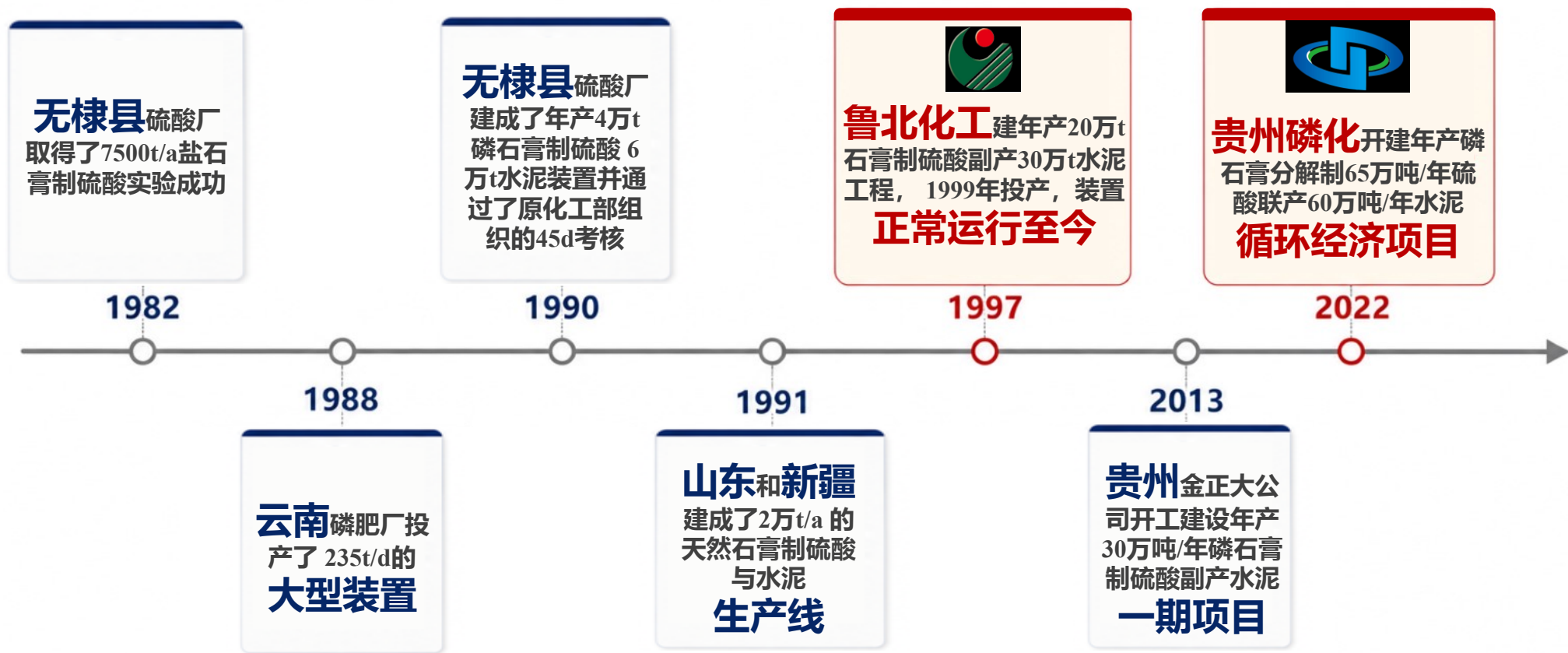


特点：以天然石膏的中试探索为主，工艺路线逐渐从理论段走向系统实中试





国内工程实践 (产业化推进阶段)



贵州磷化“1468”项目为全球规模最大的磷石膏制酸项目

磷石膏化学分解的主要体系



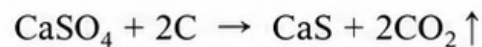
- 硫酸钙在没有还原剂物质的环境下，需要高于 **1400°C** 的温度才能分解。
- 若存在大量还原剂物质如 CO、H₂S 等，硫酸钙的分解温度可大幅下降，分解温度可降至 **1000°C**。
- 利用还原物质降低磷石膏的分解温度，是实现磷石膏有效分解的主要手段。
- 目前较成熟的技术体系是 **碳还原体系** 和 **硫还原体系**。
- 还原剂主要包括 **焦炭、硫磺、高硫煤粉、CO、H₂S** 等。



C

碳还原体系

用碳（C）还原磷石膏，反应机理如下：

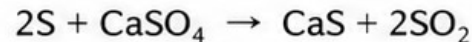


可能伴生副反应，需通过工艺控制抑制副产物形成

S

硫还原体系

用硫（S）还原磷石膏，反应机理如下：



中间产物CaS会进一步与CaSO₄发生固-固反应



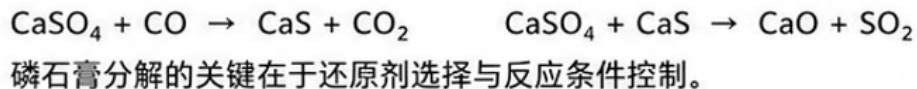
碳还原体系机理与关键认识

基于当前研究认识，**CO** 是碳还原体系中促进磷石膏分解的关键还原气氛，体系反应可概括为脱水与还原分解两个阶段。

机理示意



代表性反应



1

关键还原剂：碳气化反应产生的 **CO** 是决定性还原剂。固相碳与磷石膏的直接固-固反应受限，而 CO 气氛更有利于磷石膏分解。

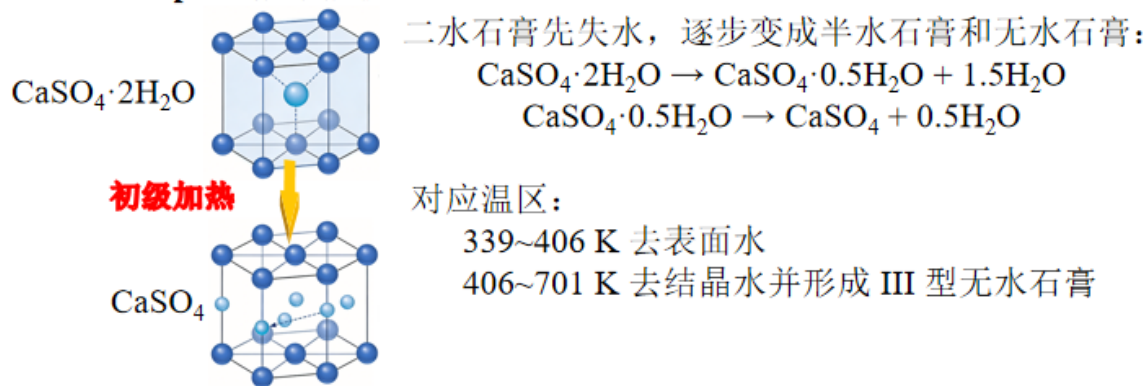
2

反应阶段：磷石膏分解包括**两个阶段**：第一阶段为脱水阶段，第二阶段为还原分解阶段。体系反应以 $\text{CaSO}_4\text{-CO}$ 、 $\text{CaSO}_4\text{-CaS}$ 等耦合反应为主线。

3

工业还原剂：较早应用于磷石膏分解的还原剂主要是**焦炭与煤**。煤/焦炭既提供还原组分，也可提供分解过程所需热量。

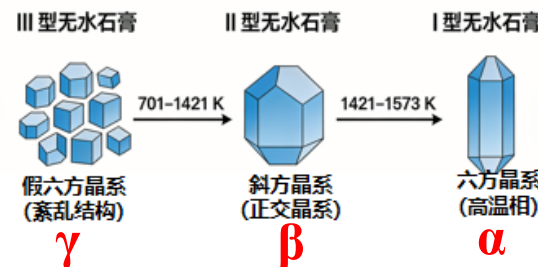
Step 1: 脱水阶段



Step 2: 无水石膏相变阶段

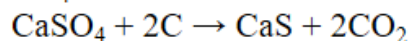
脱水后发生无水石膏内部重排：
III 型无水石膏 → II 型无水石膏 → I 型无水石膏

对应温区：
701~1421 K 为 III 型→II 型，
1421~1573 K 为 II 型→I 型。
本质上是“固相活化和晶型调整”。



Step 3: 还原分解阶段

有还原剂存在下， CaSO_4 会优先走“还原分解”路径，先形成 CaS ：



路线 1

还原剂参与的还原分解可分为四段：

- 353~473 K 去水
- 873~1023 K 碳氧化建气氛
- 1023~1353 K 生成 CaS
- 1353~1573 K 继续生成 CaO 和含硫气体

Step 3: 纯热分解阶段

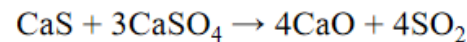
路线 2

如果没有还原剂，最终才走到狭义热分解：



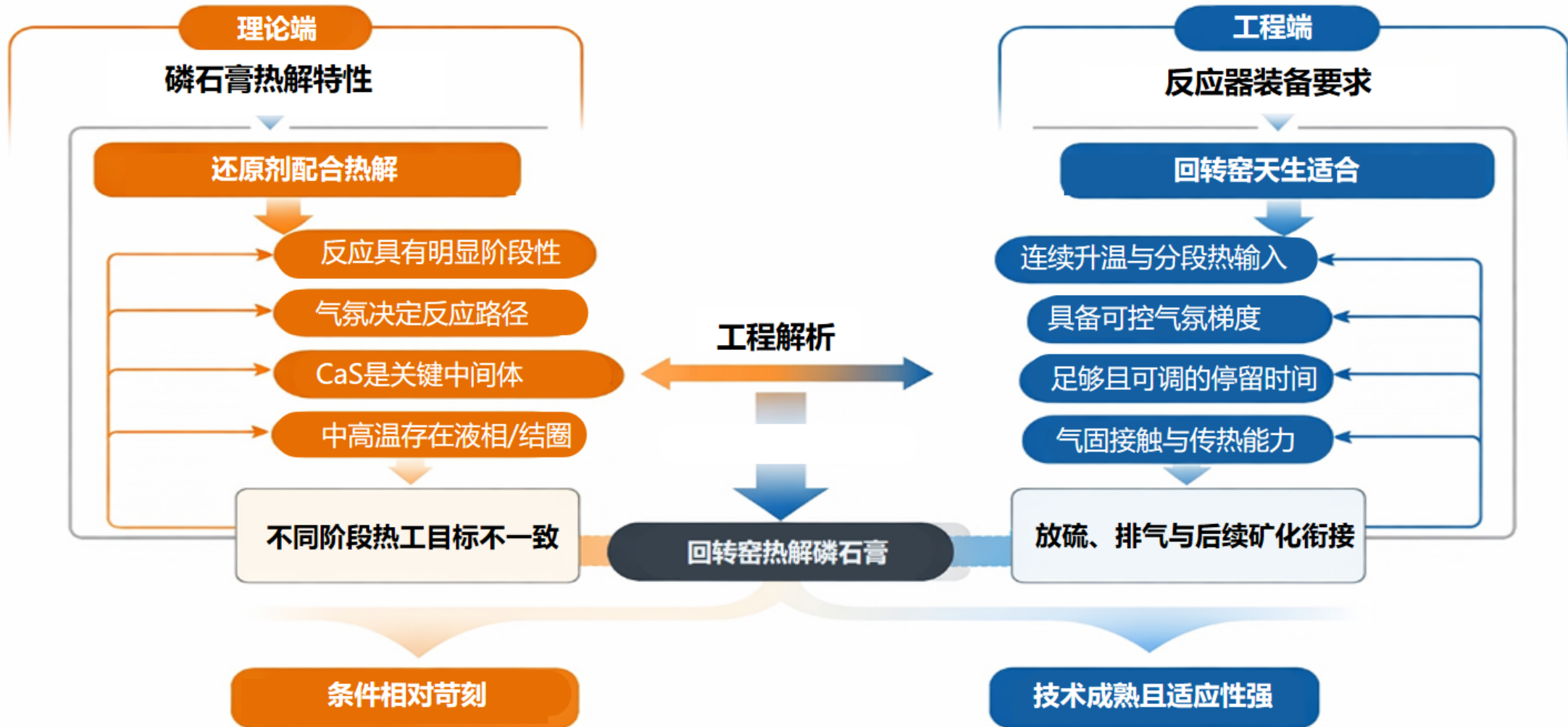
Step 4: 二次放硫/成钙阶段

CaS 不是终产物，而是关键中间体，后续还要继续转走：



强还原气氛更容易得到 CaS ，弱还原气氛更容易得到 CaO
当 CO 分压较高时产物以 CaS 为主，而较低时更容易以 CaO 为主。

还原剂的关键作用





碳还原体系与工业化装置

当前工业化应用以回转窑路线为主，流化床反应器仍处于实验室或工业小规模试验阶段。

反应器应用现状

目前工业化装置应用最多的反应器是**回转窑**。**流化床**反应器的研究主要集中在实验室或工业小规模试验阶段，无工业化装置建成。

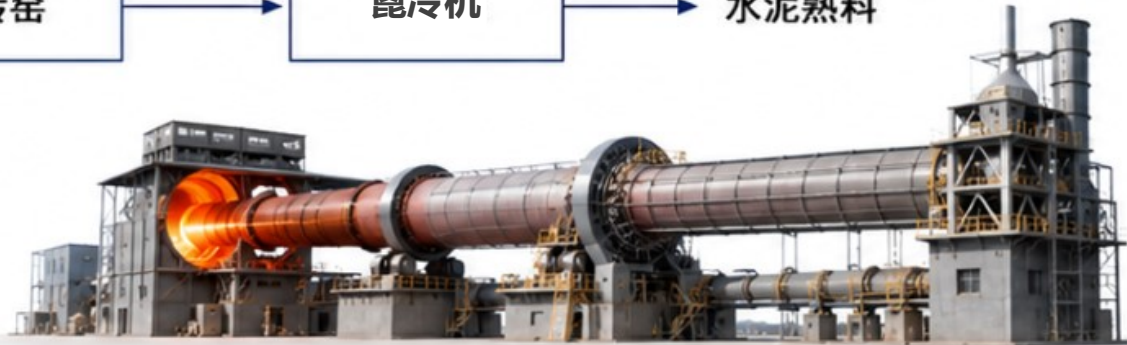
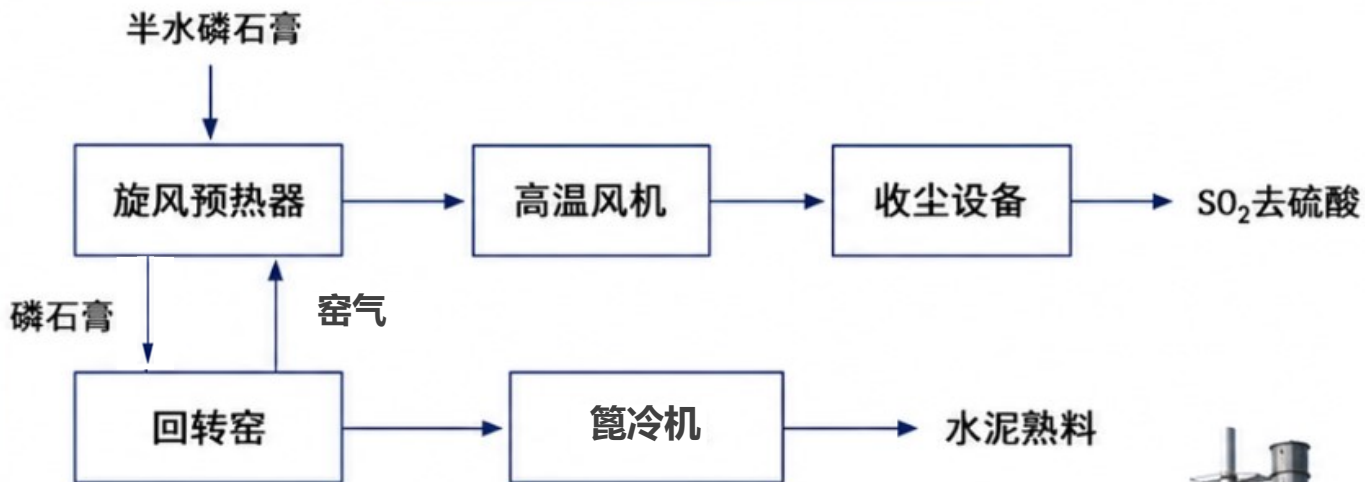
典型工业装置

全球最大规模的碳法还原磷石膏装置采用**110米回转窑**，在**1400℃**温度下分解磷石膏，**联产98%硫酸和水泥熟料**，形成“磷石膏—硫酸—水泥”闭环产业链。该装置以半水磷石膏为原料，经旋风预热后进入回转窑分解、煅烧，生成的CaO与配制好的辅料反应生成水泥熟料；窑尾烟气经换热、收尘与吸收后制成硫酸。



装置全貌

碳法还原磷石膏装置流程示意



硫还原体系关键认识



1

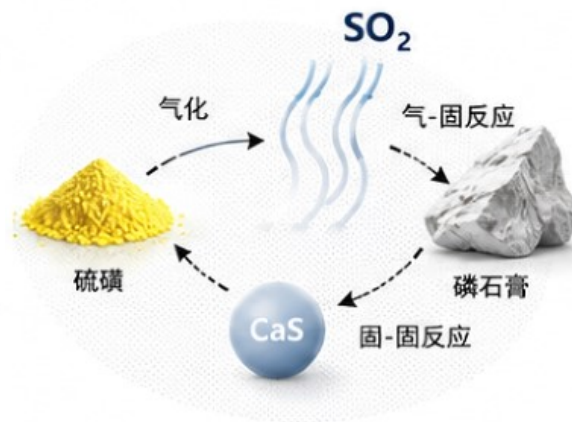
理论上以硫作为还原剂分解磷石膏制硫酸和CaO可以获得比碳还原**更高的SO₂浓度**，且以硫作还原剂其**能耗较碳还原要小**。虽然其反应温度在1000℃以上，但相较于传统碳还原法制备水泥所需的1450℃的分解温度，已有显著降低。

2

在硫磺还原磷石膏的过程中，固态硫经气化变成气态硫，与磷石膏发生**气-固**还原分解反应，生成产物**CaS和SO₂**，中间产物**CaS会进一步**与磷石膏发生**固-固反应**，该反应需要大量的热量输入。

3

国内在**硫磺分解磷石膏技术**方面有较多的研究，组织的硫磺还原磷石膏试验装置(**1万吨/年硫酸产能**)，为规模化消纳磷石膏提供技术储备。

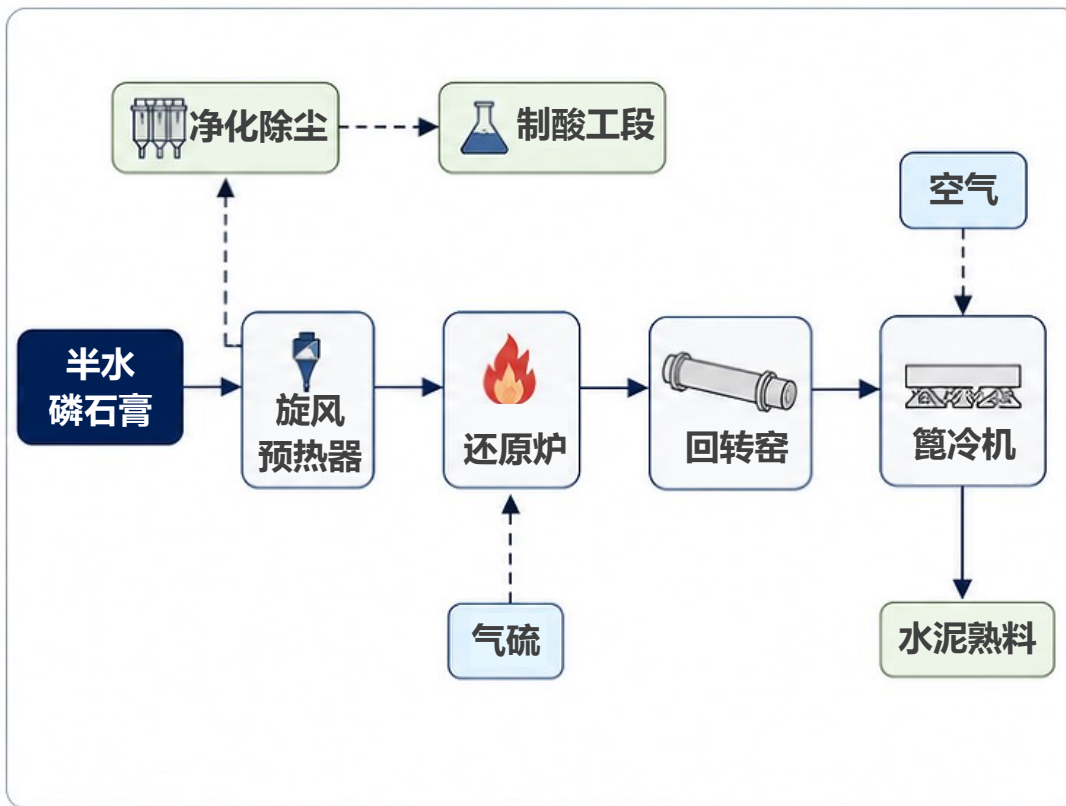


硫还原体系具有较低分解温度与较高SO₂浓度潜力，但反应过程复杂、热需求较高，工程化仍需强化过程控制。

硫还原体系研究进展与流程示意

研究方向与典型路线

- ◆ 当前硫还原研究聚焦于**不同还原剂**的应用与多种工艺路线。
- ◆ 以**硫铁矿或含硫还原剂**分解磷石膏获得 SO_2 以制硫酸，同时得到的固体渣可用于生产水泥。
- ◆ 以**黄铁矿**为还原剂，采用**流化床**分解磷石膏，获得 SO_2 气体制硫酸，固体渣可作为水泥熟料原料。
- ◆ 磷石膏与**硫化氢**反应可提取 CaS ，实现资源化利用。
- ◆ **气体硫磺还原**分解磷石膏等路线亦在持续研究与验证。



过程控制与协同目标

- ✓ 控制磷石膏物料在预分解系统中的**预分解率**
- ✓ 将出预分解系统的物料 ($\text{CaS}+3\text{CaSO}_4$) 送入回转窑，在窑内完成二次还原。
- ✓ 出回转窑物料经冷却后获得**氧化钙**
- ✓ 出预热系统的高温含硫烟气经除尘净化之后进行**转化、吸收**，最终制取**硫酸**。

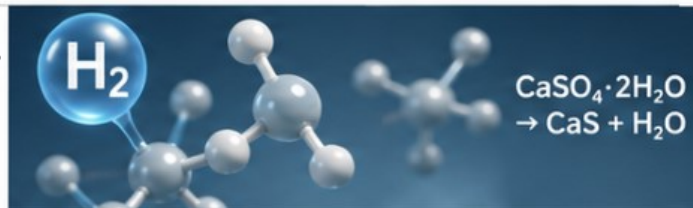
硫还原体系已形成多种技术路线，但工业化关键仍在于还原路径选择、预分解控制及硫酸—熟料协同耦合。

磷石膏化学分解的其他技术

01

氢气还原

H_2 还原磷石膏与CO还原磷石膏十分相似，分解产物同样为CaS；不同的是， H_2 还原过程中不会生成 $CaCO_3$ ，气体产物为 H_2O 。相较于碳还原和硫还原工艺，氢气还原工艺环境友好性更好，且分解温度低于碳法。



02

复分解反应

磷石膏与碳酸氢钠溶液发生复分解反应，可生成硫酸钠(Na_2SO_4)和碳酸钙($CaCO_3$)沉淀。利用双极膜电渗析体系处理磷石膏，可制备硫酸，并联产轻质碳酸钙粉体。



03

磷石膏分解促进剂

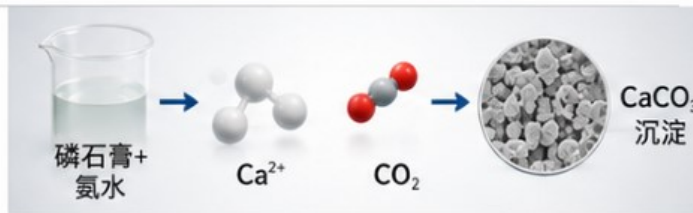
促进剂研究主要聚焦于降低分解温度、提高分解效率及减少杂质影响。研究对象包括金属卤化物、氧化物、非金属氧化物及复合盐类物质，其中铁、铝、钙基促进剂研究较多。



04

氨法捕集二氧化碳
制备碳酸钙

磷石膏在氨水介质中溶解释放 Ca^{2+} ，再与 CO_2 反应形成碳酸钙沉淀。云南某项目采用氨法将磷石膏转化率提升至95%，副产硫酸铵可作为化肥原料，实现磷石膏全元素利用。



Part 4

“1468”项目概况





磷石膏资源化分解制65万吨/年硫酸联产60万吨/年水泥熟料循环经济项目



工程范围



生产设施：磷石膏压滤、磷石膏储库、磷石膏烘干、原煤库、联合储库、生料储存库、配料站、烧成车间、熟料储存库、水泥磨车间、水泥库、窑气净化车间、窑气转化车间、窑气干吸及尾气处理车间等。



辅助生产设施：空压站、循环水站、配电室、机柜间、维修等；生活设施含综合楼（化验、DCS控制室、调度）等。



设计能力

- 年操作时间 7200 h
- 操作弹性 60%–110%



项目鸟瞰



磷石膏资源化分解制65万吨/年硫酸联产60万吨/年水泥熟料循环经济项目



里程碑





磷石膏原料要求



磷石膏配制生料的核心要求

磷石膏配制生料生产硫酸与水泥，要满足石膏分解的需求，分解后的气体满足制酸的要求，分解后的其他物料满足生产合格水泥熟料的要求（以下要求均为二水基）。

01

控制有害成分 P_2O_5 、F的含量

$P_2O_5 \leq 0.75\%$, $F \leq 0.35\%$



02

控制 SO_3 的含量

为保证尾气 SO_2 浓度、降低基建投资，磷石膏中的 $SO_3 \geq 40\%$



03

控制 SiO_2 及金属氧化物的含量

$SiO_2 < 8\%$, $MgO < 2\%$, $Al_2O_3 \leq 1\%$, $Fe_2O_3 \leq 0.5\%$



适用性与
调控措施



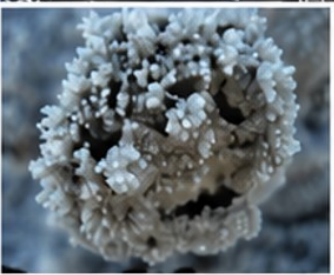
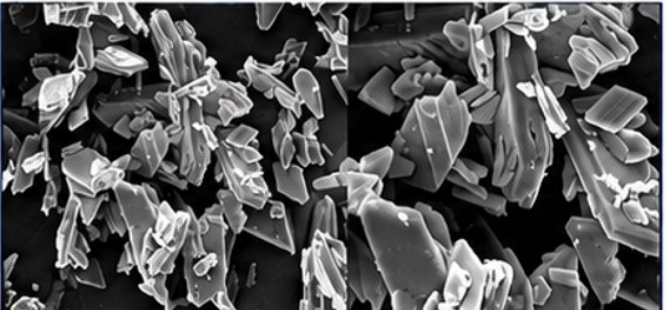
具体操作

本技术对工业副产磷石膏渣的成分范围具有较广泛的适用性：

- 对于有害成分 P_2O_5 、F的含量超标的磷石膏原料，可进行**深度水洗**等方法处理至满足水泥生产要求；
- 可通过**掺加CaO**、**调整辅料比例**等方法控制 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的含量，使之满足后续烧成的组分要求。



磷石膏原料分析情况



试样清单

表-1

试样编号	试样名称	形状描述	粒度(mm)	重量(kg)
D220104-001	磷石膏	粉末、团块	<20	12.5

试样的化学成分(%)

表-2

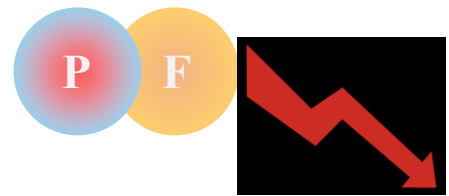
试样名称	Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	可溶性 P ₂ O ₅	总P ₂ O ₅	附着水	结晶水
磷石膏 ^[1]	14.68	4.79	0.25	0.37	31.86	0.11	0.07	0.09	46.89	0.002	2.14	2.76	22.50	9.79
半水石膏 ^[2]	6.05	5.05	0.77	0.38	34.94	1.43	0.07	0.09	51.41	0.002	2.42	3.02	/	/

[1] 除附着水，其余项目均以二水干基计。

[2] 半水石膏为磷石膏在 120℃烘干所得。

磷石膏净化后化学成分 (%)

化学成分	H ₂ O ⁻	H ₂ O ⁺	SiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	F	Cl
百分含量	0.08	19.38	4.26	42.88	31.2	0.16	0.85	0.048	0.013	0.54	0.003





技术路线对比——水泥窑型

表1 截止2000年水泥窑型的发展过程表

序号	发展阶段	出现时间 (年)	窑型名称	发明人/ 国家	终止时间 (年)	窑型名称
1	仓窑	1824	瓶窑	英国	1872	仓窑
2	立窑	1884	普通立窑	德国	20世纪20年代	机立窑
3	干法回转窑	1895	干法中空回转窑	法国	1928	立波尔窑
4	湿法回转窑	1912	普通湿法窑	丹麦	20世纪30年代	湿法长窑
5	新型干法回转窑	1951	悬浮预热器窑	德国	1971	预分解窑

表2 不同规格窑型的能耗情况

规格	项目	能耗 (KJ/t熟料)	烧成标准 煤耗(kg/t)	水泥(熟料) 综合电耗(kWh/t)
4000~5000t/d	最小值	2921.5	99.7	83.3
	最大值	3098.5	104	105
	平均值	3008.6	102.3	94.9
4000~5000t/d	最小值	2947	101.3	54
	最大值	3011	103.0	58.1
	平均值	2984.8	102.4	56.6
2000~3200t/d	最小值	3053	103	93.0
	最大值	3136	107.1	100
	平均值	3095.6	105.6	96.4
新型干法水泥平均		3029.8	103.5	95.2 (56.6, 熟料)
机立窑平均(立式窑)		4290.5	168.6	96

✗ 机立窑平均能耗高：
能耗与煤耗显著偏高

✓ 新型干法窑更优：
能耗、煤耗、电耗
均更优

图1 不同窑型市场占比

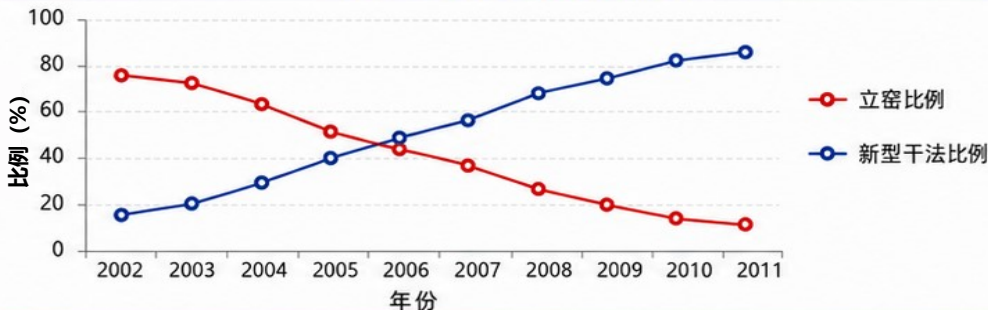
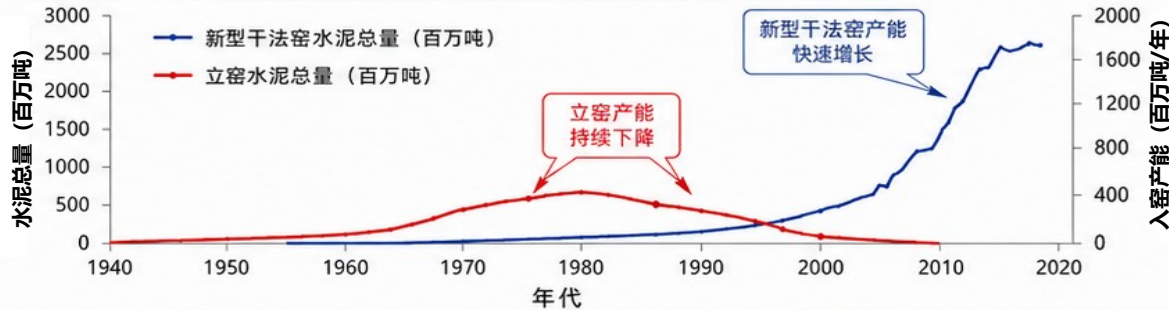


图2 不同窑型产能规模

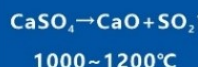


自前在中国，立式窑已全面停建，新型干法窑已成为近年主流水泥窑型



4. 典型项目概况

磷石膏制硫酸联产水泥是以磷酸生产过程中副产的磷石膏为原料，烘干后与符合工艺要求的硅质、铝质原料等进行配料，均化的生料送入熟料烧成预热系统进行预热后进入回转窑内分解、煅烧，反应如下：



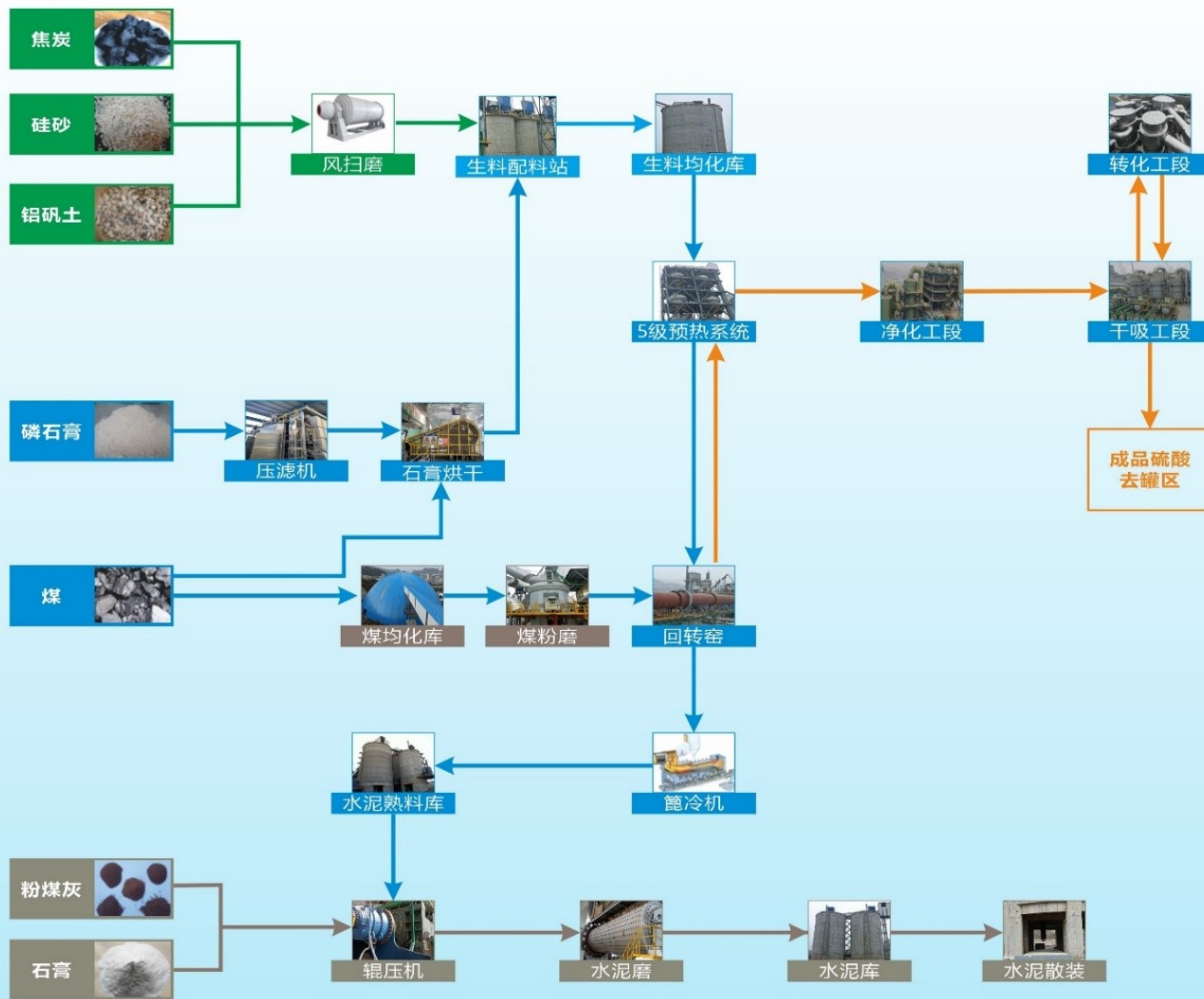
生成的含SO₂窑气
通过窑尾预热器降
温、电收尘器除尘

进入硫酸装置
制取硫酸

生成的CaO与生料中的SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃反应形成水泥熟料的四种主要矿物成分，即硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙，反应如下：



生成的水泥熟料与混合材一起磨制成水泥产品。



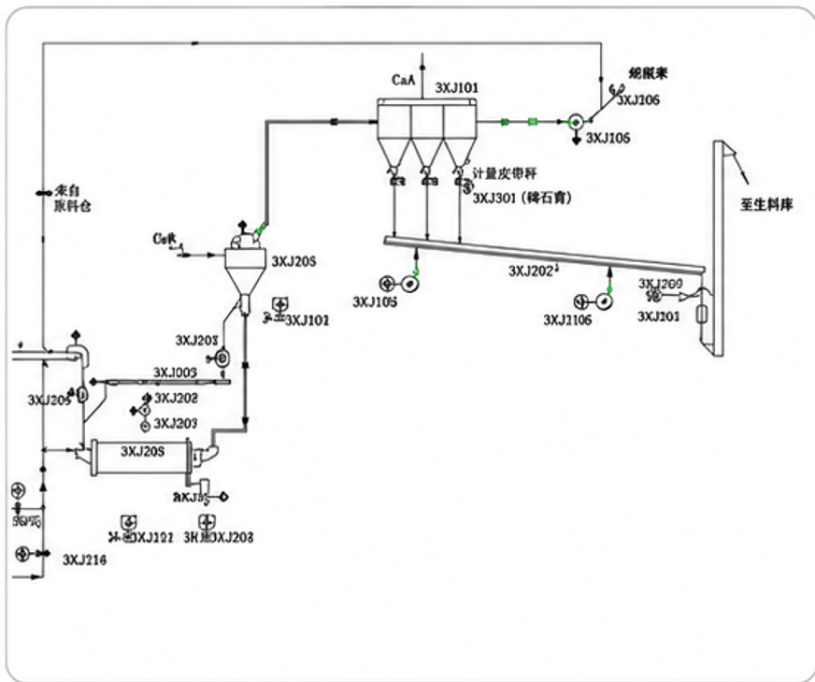
工艺原理



◆ 水泥生产——辅助材料制备 ◆



磷石膏、硅砂岩、铝矾土等辅助配料，配合还原剂焦炭末，采用烟煤作为烧成燃料，采用先进的配料设计理念，调配熟料率值及矿物组成适宜，满足新型干法水泥生产要求，可生产优质硅酸盐水泥熟料。



工艺示意图



配料车间模型



辅助材料制备系统



压滤、烘干工段技术要点

工艺指标

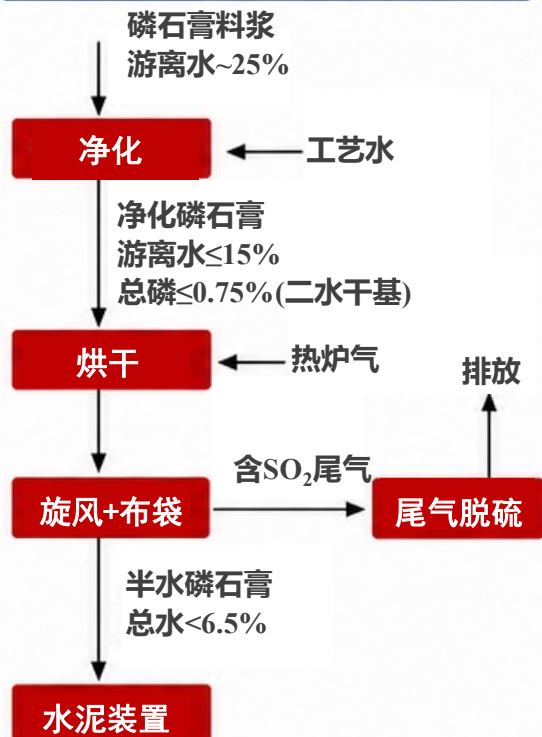
1、磷石膏净化工艺指标

- ◆ 总 $P_2O_5 \leq 0.75\%$
- ◆ 游离水 $\leq 15\%$

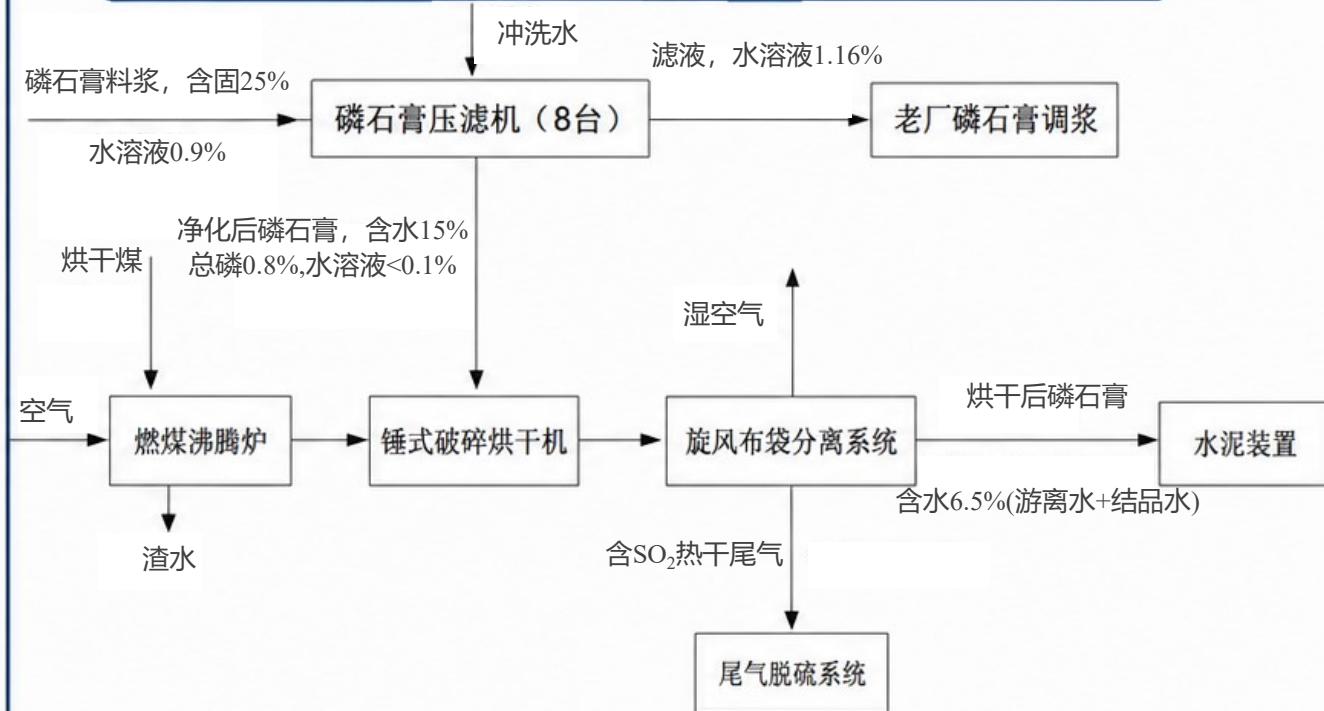
2、磷石膏烘干工艺指标

- ◆ 控制磷石膏含水量
- ◆ 游离水 ~ 0
- ◆ 结晶水 $\leq 6\%$

简化工艺流程



详细工艺流程



技术特点

01 非热力学脱水技术

节省后续烘干的热负荷

02 磷石膏预洗涤

可脱除磷石膏中的 P_2O_5 和F, 提高磷石膏质量

03 水资源重复利用

含磷水返回磷石膏调浆槽作为调浆补水, 多余的含磷水可送肥料装置

04 锤式烘干破碎机和气流干燥管组合

使高温烟气与湿磷石膏充分接触, 提高换热效率

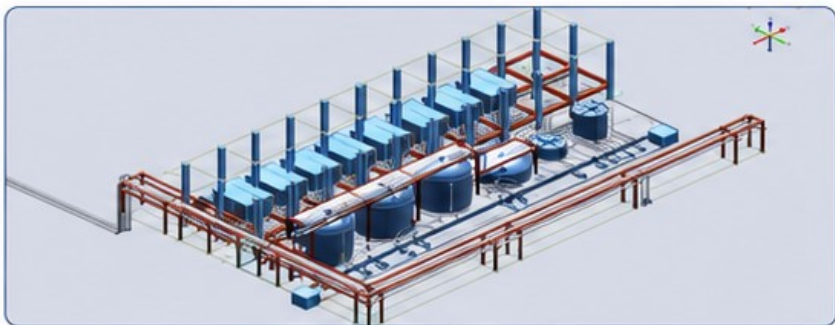
05 系统漏风量少

减少系统漏风, 减轻风机负担, 减少系统热损失

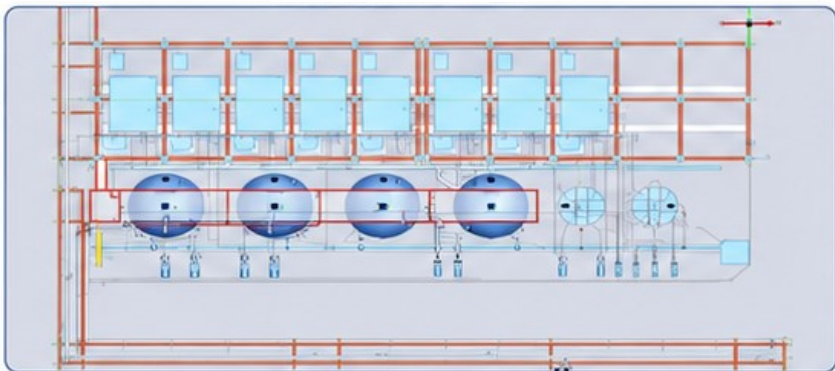


压滤与烘干设备布置

净化压滤设备布置

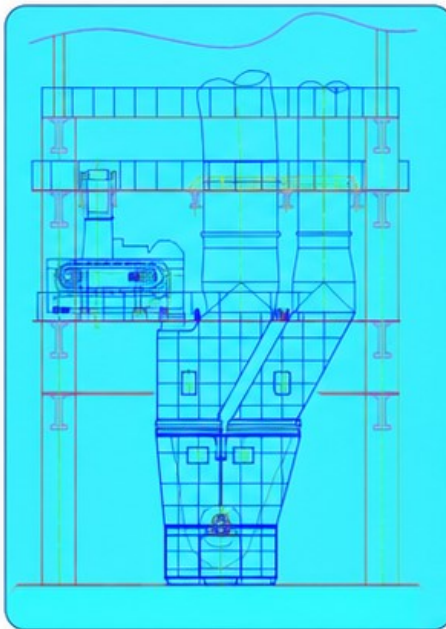


压滤设备三维布置



压滤设备平面布置

烘干设备布置



烘干系统图



烘干塔设备



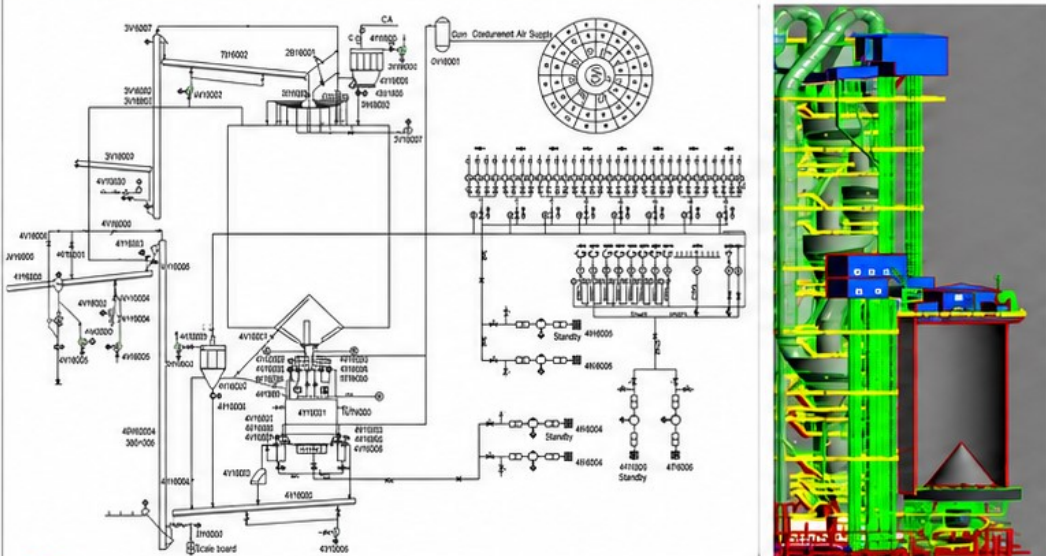
现场安装施工



水泥生产关键单元：生料均质化与烧成窑尾



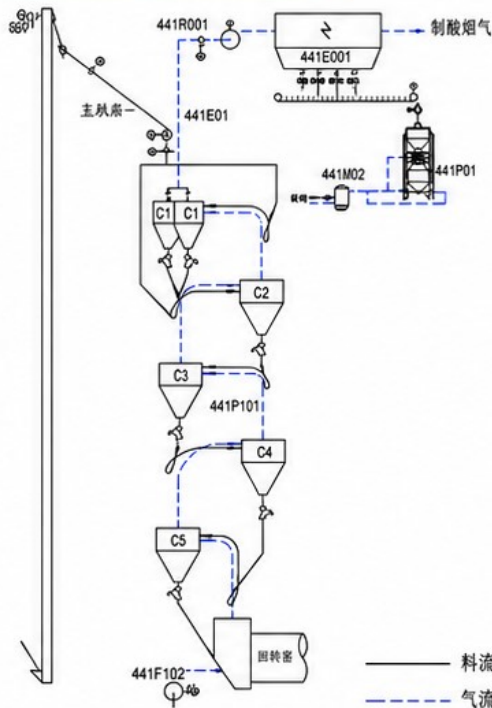
生料均质化和窑炉投料



- 流程说明**
1. 生料均化库设置1座 $\phi 18 \times 60$ m CF库，有效储量10000 t。
 2. 来自原料配料站的生料经库顶生料分配器多点进库。
 3. 库底设开式斜槽，分区多点卸料，经卸料阀定量卸出入窑生料。
 4. 经计量后的生料由斗式提升机、空气输送斜槽送至窑尾预热器分解炉系统。



烧成窑尾



工艺要点

1. 烧成窑尾采用可
四级切换的预热器。
2. 根据系统运行工况，
通过分料阀调节生料
喂入预热器的不同位置。
3. 以控制 C1 出口制酸
烟气温度及生料在
预热器系统中的温度。



均化稳定供料
保障生料质量均一与供料稳定



窑尾温度可控
优化预热器运行，提升热工效率



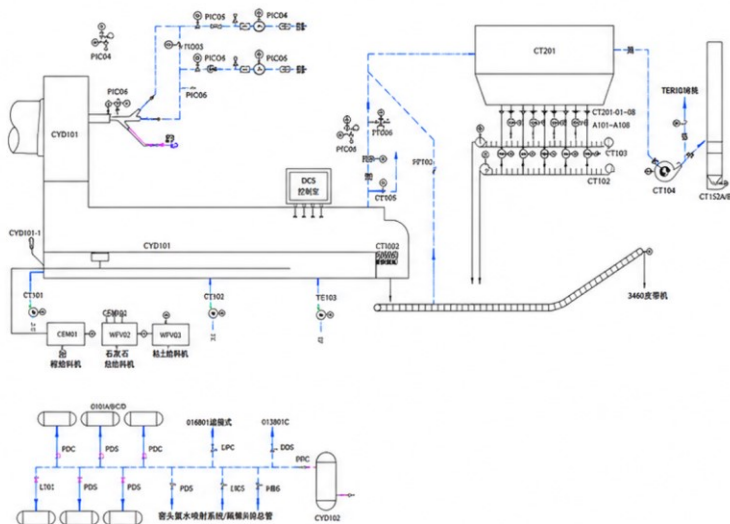
保障后续分解与烧成
确保系统安全稳定、高效运行



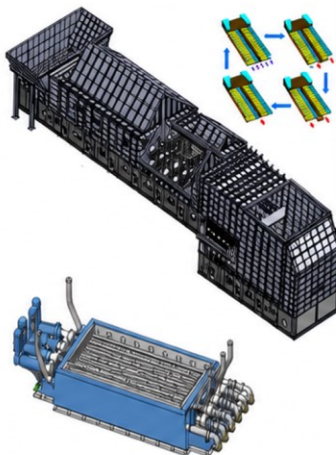
水泥生产——窑头、窑中

烧成窑头

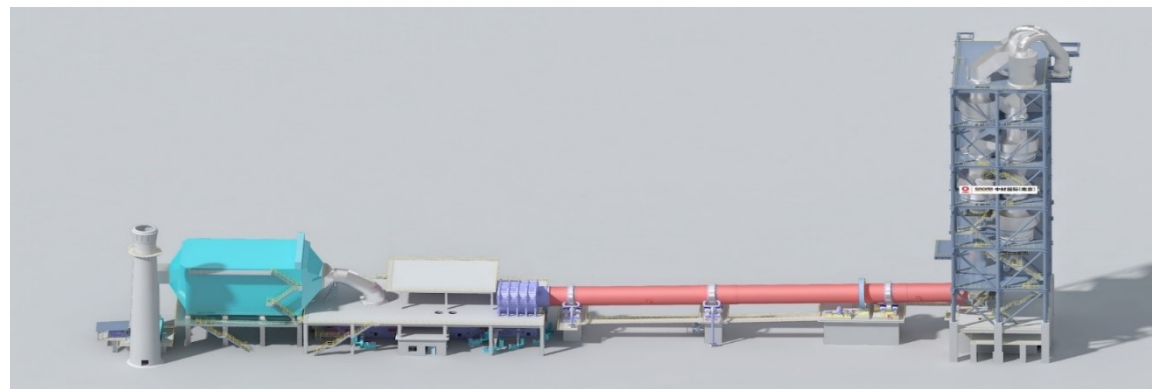
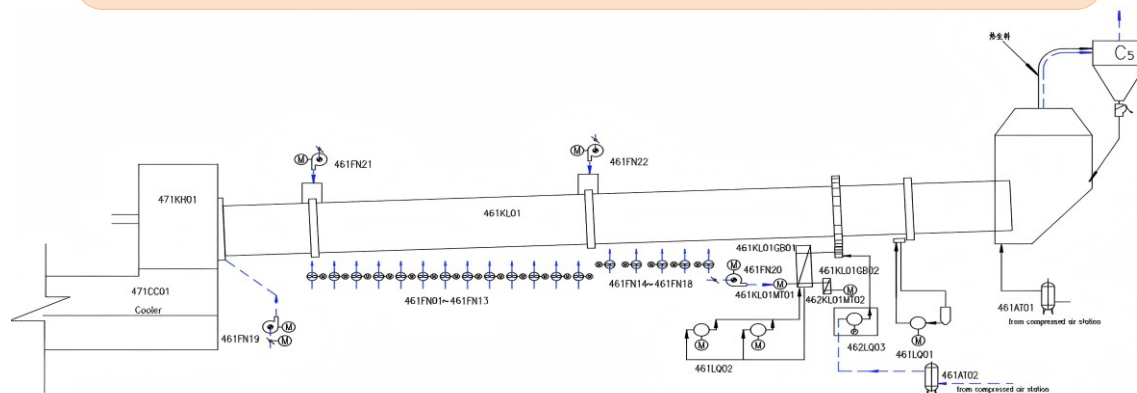
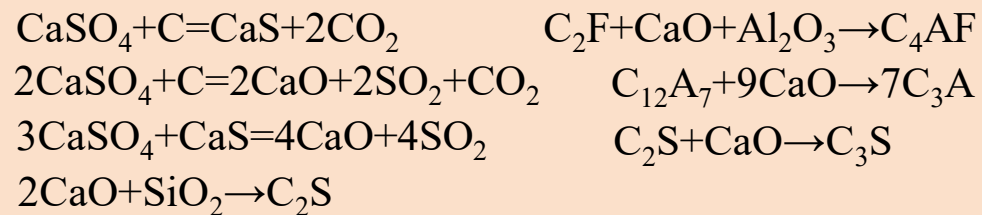
- 热效率 $\geq 75\%$
- 熟料破碎 辊破（尾置）
- 出料温度 $65^{\circ}\text{C} + \text{环境温度}$
- 出料粒度 $< 25\text{mm}(90\%)$
- 运转率 同窑运转率100%



LANE型第四代高效篦冷机



烧成窑中





硫酸——工艺流程

净化工段

- 两级高效增湿器
- 冷却塔+两级电除雾
- 两级斜板+稀酸过滤器

转化工段

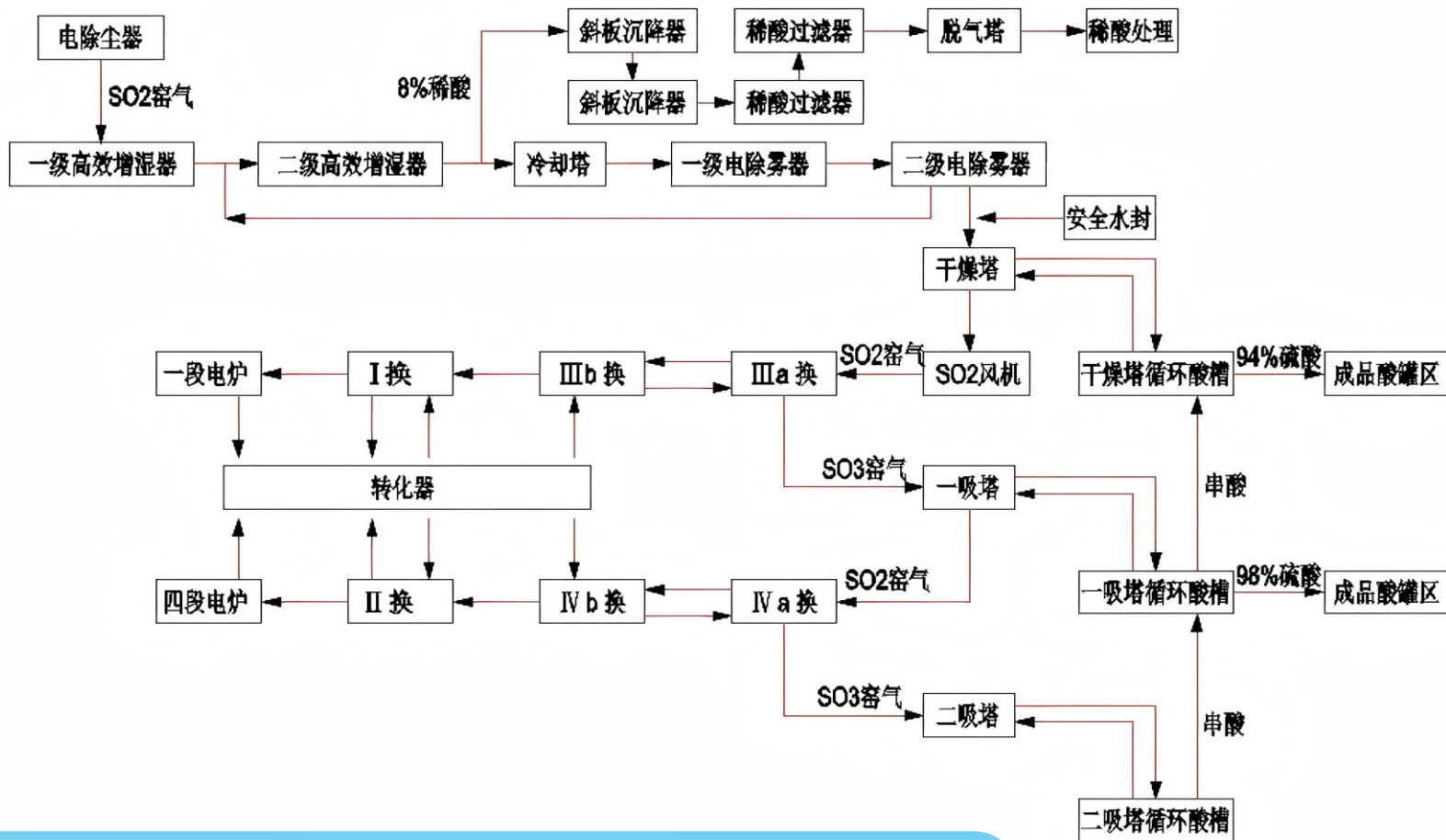
- “3+1” 两转两吸

干吸工段

- 三塔三槽，一吸产酸

尾吸工段

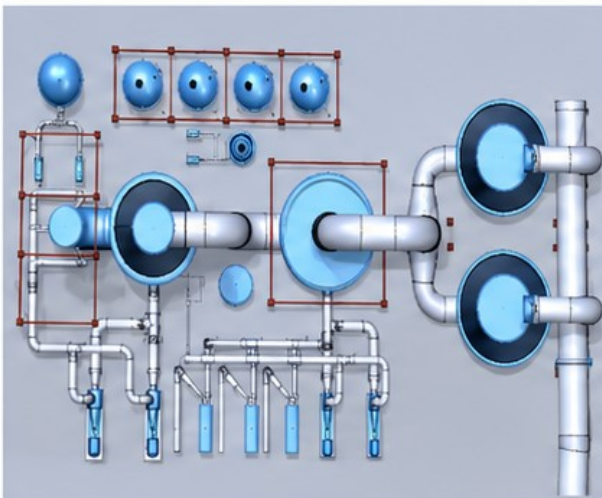
- 双氧水处理系统



流程特点：净化、转化、干吸与尾吸协同配置，满足高浓度SO₂窑烟气制酸需求。

硫酸——净化与转化工段设备布置

净化工段设备布置

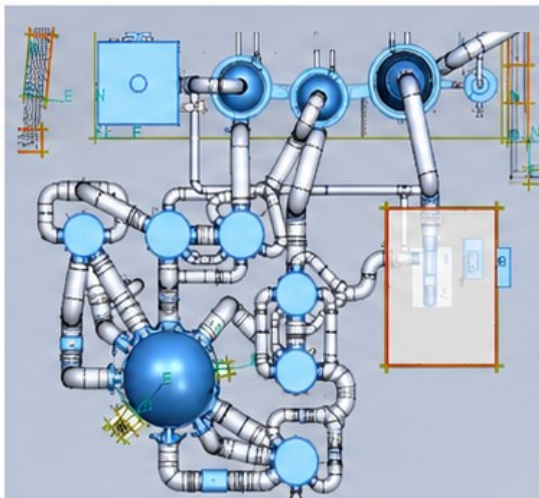


平面布置图（俯视）



三维布置图（轴测）

转化工段设备布置



平面布置图（俯视）



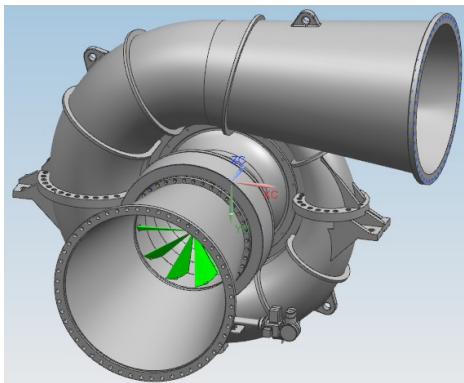
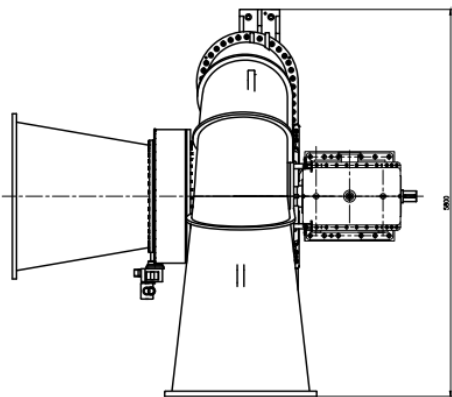
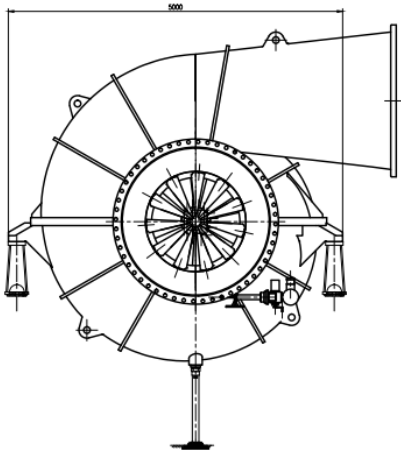
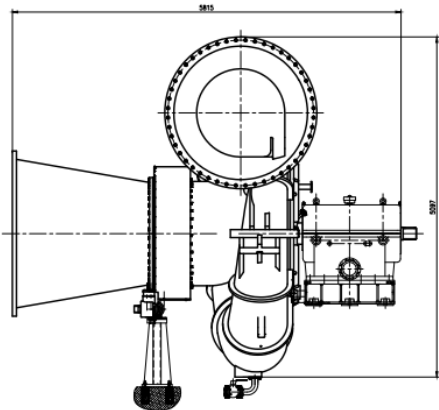
三维布置图（轴测）

- **净化：**增湿、冷却、电除雾、过滤协同
- **转化：**3+1两转两吸，流程紧凑
- **设备布置：**模块化、检修通道清晰、利于安装维护





硫酸——转化工段关键设备



二氧化硫鼓风机

风量：4900Nm³/min

升压：53kPa

功率：7100kW

***为目前规模最大的二氧化硫鼓风机**

工况	单位	Max	Dirty	Clean
介质		SO ₂ 烟气	SO ₂ 烟气	SO ₂ 烟气
标态流量	Nm ³ /h干	294000	267000	267000
进口态流量	m ³ /min	7482	6709	6544
进气温度	℃	48	48	48
进气压力	Bar(a)	0.781	0.791	0.811
排气温度	℃	102	98	94.4
排气压力	Bar(a)	1.311	1.281	1.271
轴功率	kW	6359	5373	4992
转速	r/min	3163	2992	2898
备注		保证点		

工艺技术指标

序号	指标	本技术	中国	国际
1	净化率	98.75%	98.5%	98.5%
2	吸收率	99.99%	99.9%	99.95%
3	转化率	99.85%	99.75%	99.75%
4	产品H ₂ SO ₄ 浓度	>98.50%	98%	98.3%
5	绿色排放	SO ₂ ≤40 mg/Nm ³ 酸雾 < 5 mg/Nm ³	SO ₂ ≤100 mg/Nm ³ 酸雾 < 30 mg/Nm ³	达标
6	水泥	42.5	—	—





南京工程承建贵州“1468”项目成功投产

“1468”项目开车成功

- 1 树立磷化工创新发展的行业标杆
- 2 延长产业链并推动磷化工高质量发展
- 3 为矿产资源可持续利用和生态环境保护提供实践经验
- 4 为全国磷化工绿色转型提供可借鉴示范
- 5 推动富矿精开、新质生产力和现代化化工体系建设



烧成窑火焰检测与集中控制





2023.04

由南向北



由北向南



2023.08

由南向北



由北向南



2023.10



2023.12

由南向北



由北向南





装置效果与数字化管理

水泥装置效果图



硫酸装置效果图



装置效果

水泥与硫酸装置整体布局清晰，工艺分区明确



数字化管理

CeBIM平台支撑设计、采购、施工全过程精细化管控



管理成效

实现进度、质量、安全、环境等多维协同监控

设计、采购、施工一站式数字化管理

通过数字化管理平台(CeBIM)将数字技术与传统工程管理高度融合，
实现工程建设全过程精细化管理

模型进度监控
单日人力投入

形象进度
实景模型
人员定位

里程碑监控
安全质量验收



环境监测
总进度分析

视频监控
工程要闻记录

EPC
月度监控

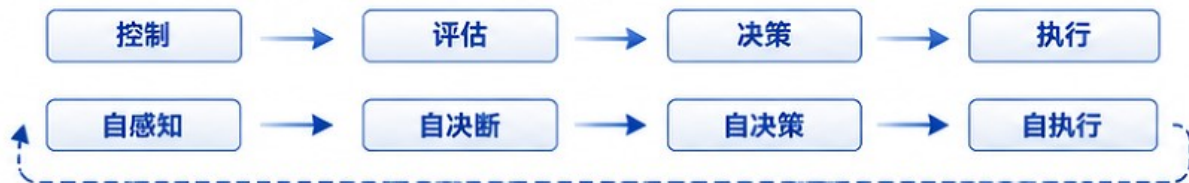


自控技术水平

- 遵循“技术先进、经济合理、运行可靠、操作方便、生产过程实施集中监控”的原则
- 中心控制室(CCR)和现场机柜室(FAR)分离设置方式
- 生产装置，公用工程及辅助设施等控制系统操作站、服务器设置在中心控制室，控制站设置在现场机柜室，现场仪表信号采用冗余光缆散设方式传输
- 操作管理人员在中心控制室完成生产装置的监视、控制、操作及管理
- 控制方式以集中控制为主，主要工艺参数均在DCS系统内进行显示、报警、记录和联锁等

智能工厂——AI驱动——无人值守

- 复杂化工装置存在运行时滞、时变性强、多干扰以及各环节耦合等复杂变化，通过控制手段赋予装置一颗“聪明头脑”
- 以“控制—评估—决策—执行”为路径，通过持续自我学习迭代，实现控制运行的“自感知、自决断、自决策、自执行”闭环，逐步实现无人值守



安全维度

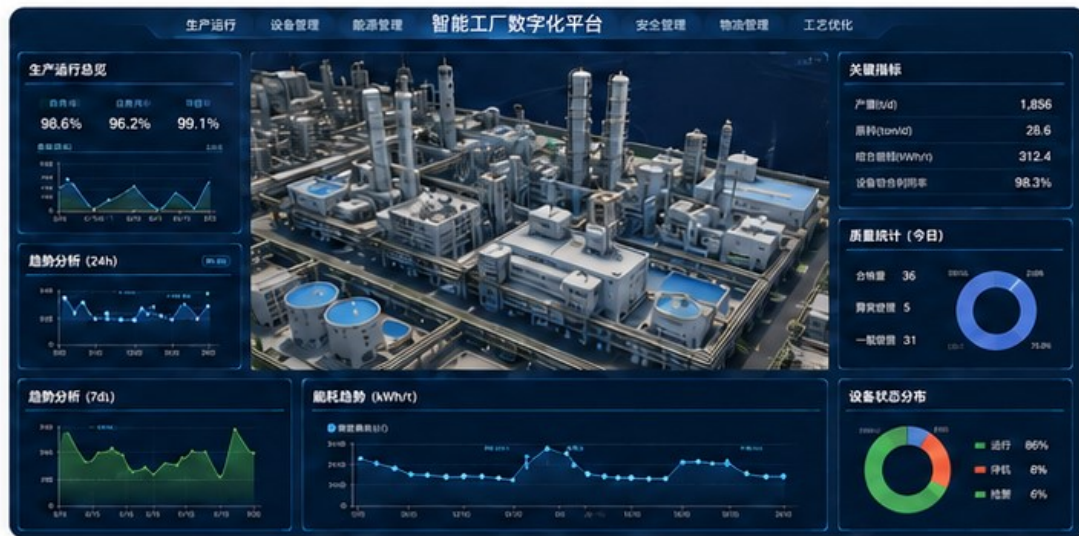
大模型实时监测，系统关键数据指标超前预警，自动调节更改，提升装置工艺耦合稳定性与快速响应能力。

质量维度

AI在可变条件下持续优化，自动适应设备工艺运行周期，推动运行参数自修正，实现产品质量动态稳定控制。

成本效益维度

围绕优化指标、消耗与收率持续优化，提升装置运行效率，降低综合成本，支撑绿色生产工艺指标达成。





项目储备与市场拓展



国内重点推进项目

- **2022.6–2024.4** 瓮福（集团）有限责任公司140万吨/年磷石膏资源化分解制65万吨/年硫酸联产60万吨/年水泥熟料循环经济项目（可研、设计、EPC）
- **2024.6–2024.12** 湖北兴发化工集团股份有限公司宜都兴发化工有限公司磷石膏低温还原分解制硫酸联产低碳钙基材料技术（处理20万吨/年磷石膏，产11.6万吨硫酸、7.8万吨/年氧化钙，可研）
- **2025.1–2026.4** 贵阳开磷化肥有限公司170万吨磷石膏资源化分解制80万吨/年硫酸联产72万吨/年胶凝材料（可研已完成，基础设计正在执行中）
- **2025.4–2026.1** 贵州开磷集团股份有限公司矿肥园区170万吨/年磷石膏资源化分解制80万吨/年硫酸联产72万吨/年胶凝材料循环经济项目（可研、基础设计已完成，正在执行EPC）
- **2025.6–2025.11** 贵州开磷集团股份有限公司双流园区2×170万吨/年磷石膏资源化分解2×80万吨/年硫酸联产2×72万吨/年胶凝材料循环经济项目（可研已完成）
- **2025.7–2025.12** 瓮福紫金化工股份有限公司140万吨/年磷石膏资源化制65万吨/年硫酸联产60万吨/年胶凝材料循环经济项目（可研已完成，配合业主单位进行上级单位评审）
- **2025.10–2026.3** 湖北宜化楚星生态科技有限公司50万吨/年磷石膏制硫酸副产水泥熟料装置（项目建议书）

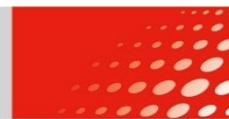


国际合作与潜在市场

- **2024.9–2025.11** INNOV X S.A. Company of OCP Group Project for the decomposition of phosphogypsum to sulfuric acid for the co-production of cement clinker（处理280万吨/年磷石膏，产150万吨硫酸、132万吨/年水泥熟料，可研）
- **2025.4–2025.6** 与瑞士Holcim公司高层进行交流，双方对于磷石膏分解循环经济项目、CCUS项目等进行友好交流，对方意向明确。
- **2025.8** 与沙特Maaden公司业主就该公司磷石膏情况进行交流，Maaden业主预计于2026年根据实验情况逐步开展合作计划

Part 5

能碳双控优化





路径1：工艺侧优化

优化方向

1



硫酸装置

设置低温热回收装置

- 回收回转窑窑气，自产低压蒸汽
- 利用干吸低温位余热，自产低压蒸汽

2



水泥装置

- 富氧烧成技术
- 优化生料化学配比
- 提高入窑物料温度的同时降低焦炭损失
- 优化除尘降尘措施
- 窑外分解技术

3



动力消耗

设置绿电设施

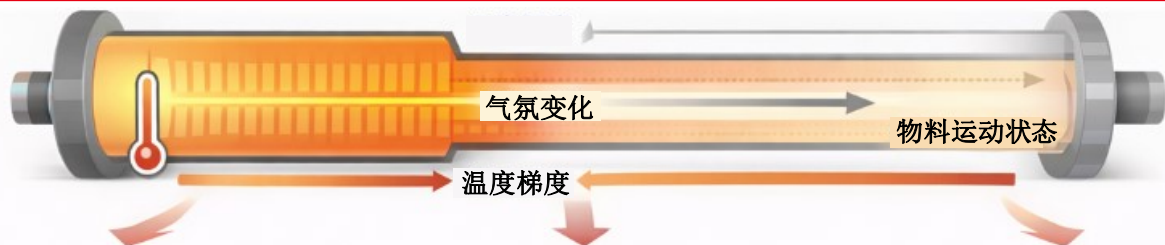
- 为装置提供绿色电力
- 进一步减少CO₂排放



同类型实际工程的工艺指标对比

主要指标	1468	1789	国内1	国内2	国外1	理论值
磷石膏处理规模 (单系列)	湿基160万t/a 干基约140万t/a	湿基199.23万t/a 干基约170万t/a	65万t/a	43万t/a	/	/
组合综合能耗	约为国内1的80%	约为国内1的70%	322.8 kgce/t	395 kgce/t	465.6 kgce/t	/
低温热回收/蒸汽抵扣	/	副产低压蒸汽22万t/a，使硫酸装置综合能耗为负值	/	/	/	/
热解气SO ₂ 浓度	约11%	约11%~13%	约5%~10%	约5%~9%	约9%	6%~10%
硫酸尾气SO ₂ ；酸雾	35mg/m ³ ； 5mg/m ³	35mg/m ³ ； 5mg/m ³	酸雾<5mg/m ³	酸雾<5mg/m ³	SO ₂ 尾气约860~1430 mg/m ³	
碳减排/碳排放	建筑材料 520kg CO ₂ /t； 减少石灰石分解CO ₂ 约 30万t/a	建筑材料 357.86 kg CO ₂ /t； 非碳酸盐替代扣减约 41.49万t CO ₂ /a； 副产蒸 汽减排约 6.40万t CO ₂ /a	932.3 kgCO ₂ (建筑材料)	/	/	/





温度场耦合

- 窑内沿轴向存在显著温度梯度。
- CaSO₄分解与熟料矿物形成**共享同一热工空间**。
- 存在问题**：热量分配**难兼顾“放硫”和“矿化烧成”两目标**，存在折中情况。

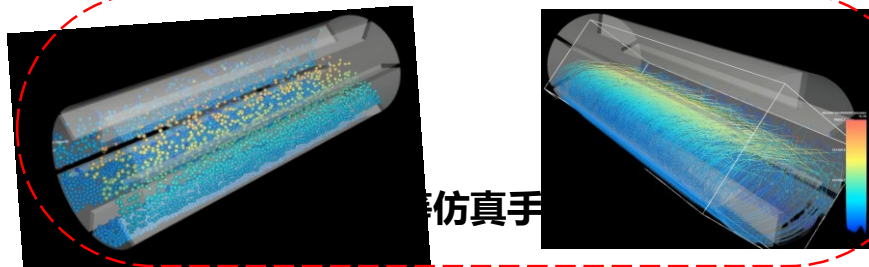
气氛场耦合

- 气氛随物料运动逐步变化，**氧化与还原环境交替**出现。
- 局部可能形成强还原区或富氧区。
- 存在问题**：局部过还原区域易生成 CaS。
- 过氧化区域又可能抑制分解效率。

物料运动状态

- 滚动翻动为主，传质效率受限。
- 物料在同一设备内连续经历不同温度和不同化学环境**。
- 存在问题**：停留时间与局部接触状态不均一。
- 局部强还原、富氧和热点被放大。
- 系统波动和控制难度进一步增加。

“三场解耦”



第一段：还原分解

还原气氛为主
温度围绕分解需求
释放 SO₂

SO₂水汽分离/制酸

氧化气氛为主
更高温度

第二段：矿化烧成

流化床反应器

- 分解/还原/主放硫
- 气固高效接触
- SO₂富集排出

回转窑

- 高温矿化
- 熟料烧成



路径2：理论侧推导 (以磷石膏热解装置为例)

① 配料优化：人工递减法

计算由“逐项试配”转为“同步求解”

本质上提升了计算闭合性与稳定性

机器学习+算法

计算步骤		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
要求熟料组成					
焦炭灰 kg	50.00				
差					
煤灰 kg	100.00				
差					
磷石膏 kg	200.00				
差					
硅石 kg	300.00				
差					
铝矾土 kg	400.00				
差		1	-2	3	-4
焦炭实际用量 kg	500.00				

项目	用量 / kg	CaO / kg	SiO ₂ / kg	Al ₂ O ₃ / kg	Fe ₂ O ₃ / kg
要求熟料组成					
焦炭灰					
差值					
硅石					
差值					
铝矾土					
最终差值	—	0.00	0.00	0.00	-0.00



特点：逐项递减、人工修正、经验参数、前后联动不足

优化意义

1

由人工递减改为联立求解

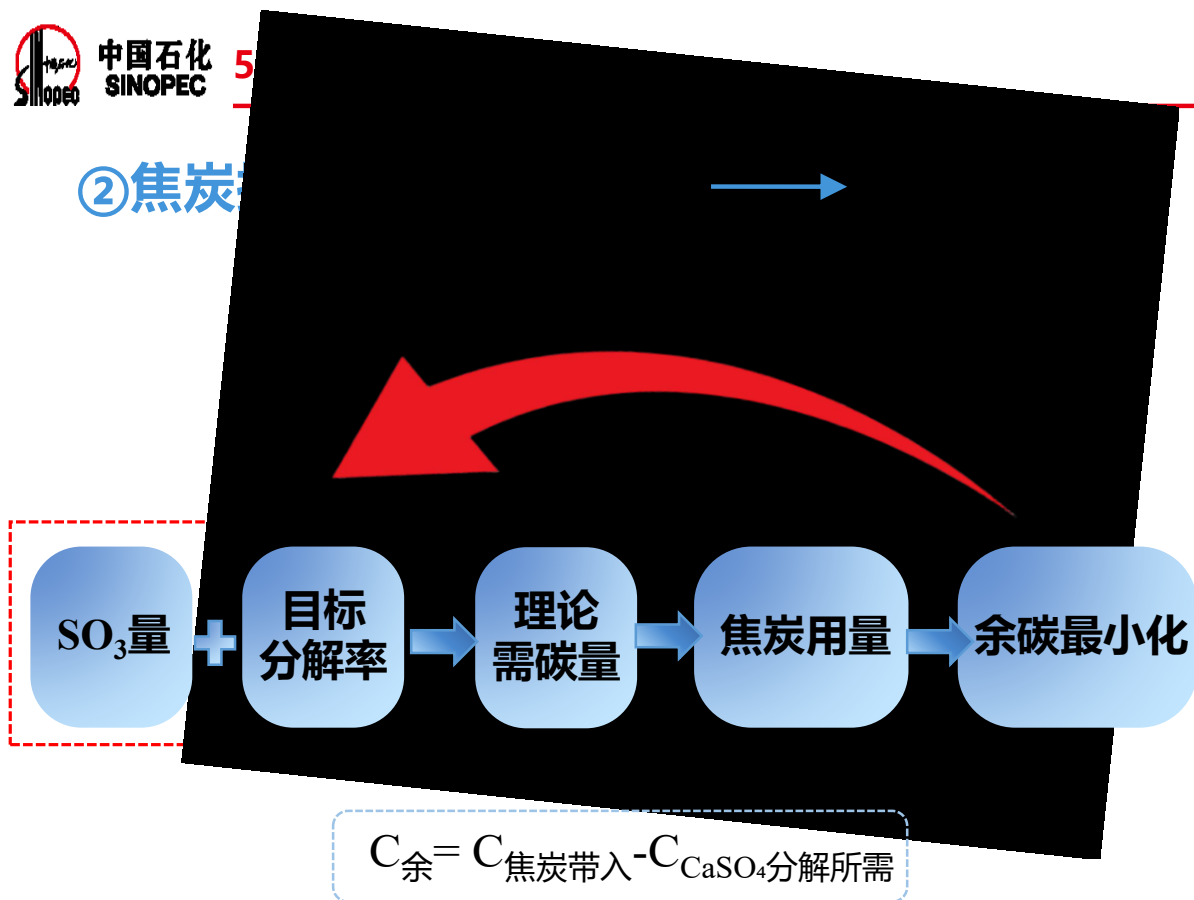
2

残差基本消除
减少后续修正

3

为焦炭、煤灰、
热耗联动计算提供
更稳定基础

②焦炭



优化后占原值比例=优化后÷原值×100%

③烧成热耗：固定经验值——→热平衡反算煤耗



$$m_{煤} = (\Sigma Q_{出} - \text{其他热收入}) \div Q_{net}$$

目标：避免经验热耗保守取值

- 通过将焦炭从“经验投加”改为“理论反算”，可在不改变计算边界条件的前提下消除一部分焦炭冗余。



④CaSO₄分解率：局部与全流程贯通

常规计算链

人为设定分解率
通常(<100%)

理论消耗按照S
全部转化为气体

造成脱硫热耗按
照分解率为
100%计算

造成热耗过大

优化后计算链

分解率
 η

理论料耗

脱水脱硫
分解热

SO₂生成量

残余S

$$\text{理论料耗} \propto 1 - \text{LOI} - \text{SO}_3 \times \eta$$

$$Q \propto \text{SO}_3 \times \eta$$

- 降低理论料耗与分解热计算冗余
- 使后续煤耗、烟气量与熟料热平衡更可信

优化后节碳量

优化项

降低幅度

1. C/SO₃
2. 焦炭用量(kg/100 kg熟料)
3. 理论料耗(kg/kg熟料)
4. Q₅分解热(kJ/kg熟料)
5. 熟料形成热(kJ/kg熟料)
6. 熟料烧成煤耗(kg/t熟料)
7. 煤灰掺入量(kg/100 kg熟料)

5~10%



中国石化
SINOPEC



谢谢

www.sinopec.com

