

# Development and Application of Phosphogypsum in Plasterboard

Yue Lei, Qingwei Zhu\*, Hongxia Chen, Miaomiao Wang

Beijing New Building Materials Public Limited Company, Beijing  
Email: zhuqingwei@bnbm.com.cn

Received: Dec. 29<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jan. 16<sup>th</sup>, 2019; published: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2019

---

## Abstract

Phosphogypsum is a kind of important solid waste in phosphorus chemical industry. The application rate of phosphogypsum is increasing year by year, which has been mainly used in building materials, chemical industry and agriculture. Due to many impurities in phosphogypsum, there have been many troubles in the preparation of plasterboard. For the large-scale utilization of phosphogypsum, the pretreatment technology and improved production process will be the future focus of research.

## Keywords

Phosphogypsum, Pretreatment Technology, Application, Plasterboard

---

# 磷石膏的发展及其在石膏板中的应用

雷月, 朱清玮\*, 陈红霞, 王苗苗

北新集团建材股份有限公司, 北京  
Email: zhuqingwei@bnbm.com.cn

收稿日期: 2018年12月29日; 录用日期: 2019年1月16日; 发布日期: 2019年1月23日

---

## 摘要

磷石膏是一种重要的磷化工固体废弃物, 其处置技术与应用领域等得到了快速的发展。目前国内外在磷石膏的应用率在逐年上升, 主要应用于建材、化工和农业等领域。由于磷石膏中含有多种杂质成分, 在制备纸面石膏板中存在诸多问题。未来对于磷石膏的大规模利用, 其预处理技术与生产工艺改进将是研究重点。

\*通讯作者。

## 关键词

磷石膏, 预处理技术, 应用, 纸面石膏板

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近几年, 建筑行业发展迅猛, 建筑材料需求量不断增加, 对新型建筑材料的开发与利用日益广泛, 纸面石膏板作为木制装饰板取代品, 不仅具有轻质、隔音、隔热、抗震、强度高、加工性能强等特点, 还节约资源、绿色环保、实现可持续发展。由于天然石膏资源有限, 脱硫石膏在建筑行业的应用日趋成熟, 脱硫石膏成为石膏板、水泥促凝剂等建材的主要原料, 随之而来的是脱硫石膏的资源逐渐紧缩。在我国, 磷石膏的堆放量已位居世界第一, 占全球总量的 40%, 主要产自贵州、四川、云南、湖北、安徽, 占全国总量的 87.4% [1]。磷石膏的堆放占地面积巨大, 若不予处置, 不仅浪费资源, 而且污染环境。因此, 开发利用磷石膏对制造行业具有十分重要的意义。本文主要叙述了磷石膏在纸面石膏板中的应用, 其中包括磷石膏在国内外的应用情况、磷石膏的物理化学特性、磷石膏的与处理工艺及其应用邻域等。

## 2. 磷石膏的发展现状

随着磷肥工业的快速发展, 磷肥生产及副产磷石膏, 中国已经位居前列。近几年, 由于国家政策的调整和各方的努力, 我国磷复肥产量增量有所减小, 磷石膏的利用率有所提升, 但全国现有堆存量依然很大, 且仍然以每年超过 5000 万 t 的净增量增长[2] [3]。

### 2.1. 磷石膏在国内的利用现状

在我国除北京、天津、上海、吉林、黑龙江、海南和西藏等省市外, 其余省份均有磷石膏产出, 磷石膏的排放企业相对集中分布在湖北、云南、贵州、山东和安徽等五个产磷省份, 这五个省份的磷石膏排放量约占全国磷石膏总排放量的 76.8% (如图 1 所示[2])。

湿法磷酸是采用硫酸分解磷矿石制取磷酸的重要工艺[4], 我国磷石膏产量每年新增堆存的磷石膏近 50 Mt, 国内已堆存的磷石膏总量超过 5 亿 t。其中, 2016 年磷石膏的堆存量为 76,000 kt, 综合利用量为 27,700 kt, 比 2015 年增长了 4.5%; 由于受国内外化肥市场萎缩、行业大环境变化及深层次问题不断暴露等诸多因素的影响, 2017 年年产量为 75,000 kt, 比 2016 年下降了 1.3 个百分点[5] [6]。如图 2 所示, 我国磷石膏年产生量受国内外市场影响而有所波动, 但利用量、利用率两项指标呈现逐年上升的总体趋势, 但是磷石膏产生量与利用量的差值有所增大, 表明近几年来我国磷石膏的堆存量在不断加大, 磷石膏的利用率急需提升。

### 2.2. 磷石膏在国外的利用现状

磷石膏资源化利用在西方发达国家和日本等国起步较早。20 世纪 50 年代, 德国首先将磷石膏用作水泥工业中作缓凝剂, 利用率达 95%; 法国在 70 年代初用磷石膏制备  $\beta$ -半水石膏, 并研制出相应的生产

工艺,目前磷石膏有效利用率仅占4%~5%;日本磷石膏有效利用位居世界第一,利用率达90%以上,其中75%左右用于生产熟石膏粉和石膏板。表1为5个磷石膏产量大国对磷石膏处理及利用情况[7][8]。

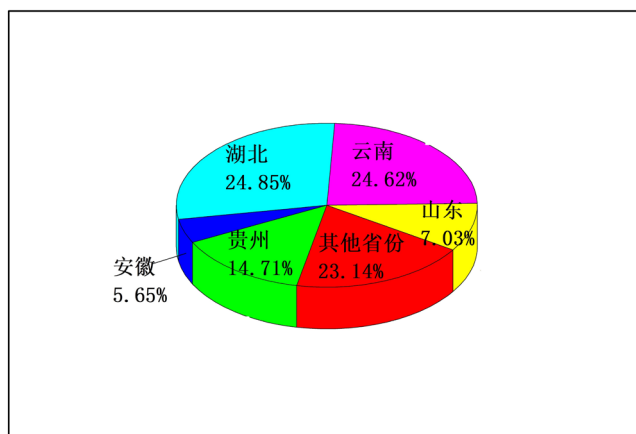


Figure 1. The share of production and discharge of phosphogypsum in China's top five provinces

图 1. 中国前五省磷石膏产排量占全国排放量的比例

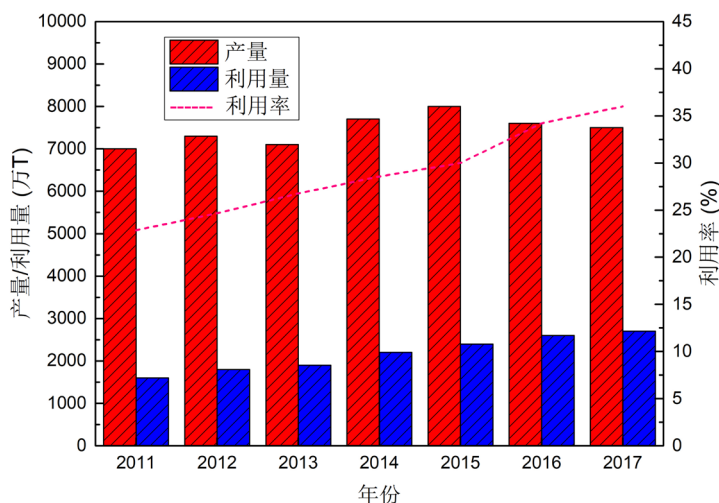


Figure 2. The production and utilization of phosphogypsum from 2011 to 2017 in China

图 2. 2011~2017 年我国磷石膏产生量、利用量及利用率的汇总情况

Table 1. The treatment and application of phosphogypsum in top five countries

表 1. 5 个磷石膏产量大国对磷石膏处理及利用情况

国家	堆存	利用情况
日本	0%	接近 100%, 其中约 60%用于生产石膏粉和石膏建材, 30%用于生产水泥缓凝剂, 其他 10%应用于食品、医疗等行业
巴西	50%	约 50%, 其中约 40%用于农业生产, 10%用于建材生产
美国	100%	少量用于农业, 路基材料的研究
印度	80%	约 20%用于农业生产、建材生产
西班牙	100%	少量用于肥料、土壤改良剂研究

### 2.3. 磷石膏在国内外各领域的资源化应用

磷石膏的资源化利用主要集中在建材、化工和农业等三个方面：

1) 建材类：利用磷石膏为原料，经过陈化、煅烧、活化和加压等工艺制成相应的石膏建材(如：石膏粉、石膏板、石膏砌块、石膏砖等)和水泥缓凝剂等。张朝辉[9]采用脱硫石膏和磷石膏复合煅烧制备的建筑物石膏粉具有强度高，颗粒级配好的特点。

2) 化工类：利用磷石膏为原料，经过一系列的制浆过滤、盐盐反应、蒸发结晶和高温烘干等过程制成硫酸铵、硫酸钾、碳酸钙和氯化钙等。

3) 农业类：利用磷石膏的酸性及含有大量农作物生长需要的养分的特点，可将其用做土壤改良剂，提高土壤的渗水性，还可作为硫肥和钙肥。Xue 等[10]通过添加 2%的磷石膏促进了石榴石和钙霞石的转化以及钠和钙的交换，制备出性能优良的磷石膏改良剂，为铝土矿的土壤改良提供了一种可行的方法。利用来自磷肥工业的废物的磷石膏驱动碱性物质，有效地降低了 pH 值，并使可溶性碱度降低了 92.2%。

如图 3 所示[12]，2017 年我国磷石膏的利用途径主要有生产  $\beta$ -半水石膏、水泥缓凝剂、石膏砌块、道路填充材料、改良土壤、制硫酸和硫酸铵等化工产品等等[11]。其中生产  $\beta$ -半水石膏约 2.8 万 t，生产水泥缓凝剂约 2.5 万 t，可见我国磷石膏的利用率主要用于水泥和制备  $\beta$ -半水石膏等建材行业。

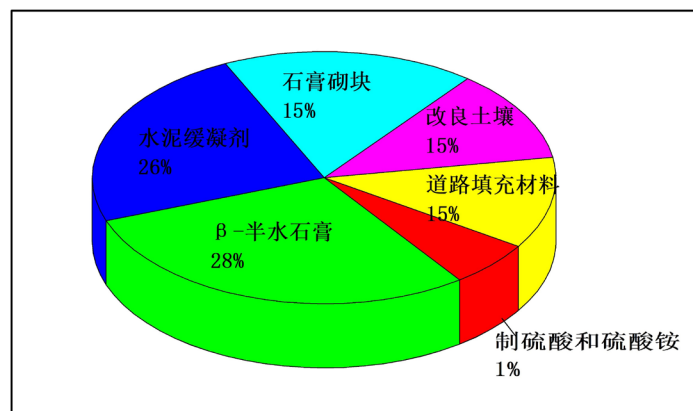


Figure 3. The utilization of phosphogypsum in 2017

图 3. 2017 年磷石膏利用情况

磷石膏循环利用技术路线如图 4 所示[12]。

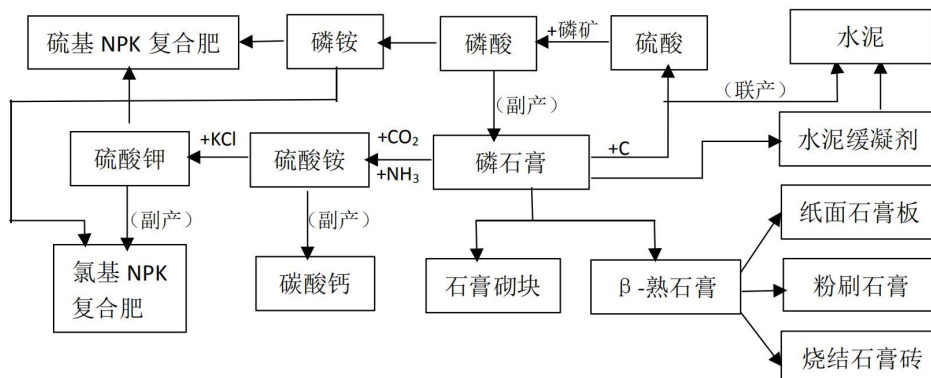


Figure 4. Technical roadmap of phosphogypsum recycling

图 4. 磷石膏循环利用技术路线图

## 2.4. 磷石膏在综合利用中存在的问题

首先, 磷石膏中杂质含量较多, 提高了其利用成本, 同比之下市场竞争力差。磷石膏中含有游离磷酸和可溶性磷酸类盐等酸性物质, 在生产制备时会腐蚀所接触的设备。使用前必须进行净化除杂处理, 除杂处理中还可能会产生二次污染, 增加其投资和运营成本。

其次, 磷石膏堆存区域集中分布在西南区域, 地理位置较偏, 造成其他地区在使用过程中运输费用高, 而堆放区域长期存放受降水影响造成该地区环境污染, 还占用了大面积的土地资源。

最后, 磷石膏在建筑领域应用的标准体系不完善, 缺乏用于生产不同建材的磷石膏标准, 市场占有率低, 难以进行大规模利用。

## 3. 磷石膏在纸面石膏板中的发展及应用

石膏板是一种新型建筑装饰板材, 具有轻质、降噪、隔热、抗震、强度高、易施工等特点。近年来, 纸面石膏板发展迅猛, 国内生产纸面石膏板主要以天然石膏和脱硫石膏为原料, 随着产业转型, 政策的推动, 不少企业开始研发其他材料为原料的纸面石膏板, 如磷石膏为当今研究的潮流。目前, 我国磷石膏制纸面石膏板总产能约  $3.5 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{a}$ , 单系列最大规模为昆明英耀建材有限公司的  $7 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 。据 2016 年统计, 采用磷石膏生产石膏板仅占磷石膏利用总量的 5.7%。

### 3.1. 磷石膏的基本理化特性

磷石膏是湿法磷酸生产过程中排放的工业废渣。磷石膏一般呈粉状, 颗粒较细, 因含有 15%~30% 附着水[13]而呈浆体状, 粒径一般为 5~150  $\mu\text{m}$ , 主要成分是二水硫酸钙含量为 70%~90%, 呈酸性。其中所含的次要成分随矿石来源不同而异, 除此之外还含有少量的磷矿粉, 未洗净的磷酸、磷酸铁、磷酸铝和氟硅酸盐等杂质。其中, 磷是磷石膏中主要杂质, 包括可溶性磷、共晶磷和不溶磷。

磷石膏外观一般为黄白、浅黄、浅灰和浅绿色等多种颜色, 相对密度为 2.22~2.37。磷石膏较天然石膏相比除了有效成分二水石膏含量较高之外, 还含有较高的吸附水, 同时杂质含量也较高。表 2 列出了天然石膏、脱硫石膏以及磷石膏的化学成分。

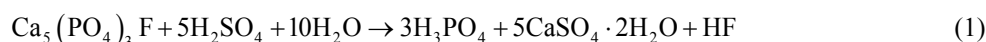
**Table 2.** Chemical constituents of natural gypsum, FGD gypsum and phosphogypsum

**表 2.** 天然石膏、脱硫石膏与磷石膏的化学成分

石膏种类	质量分数(%)							吸附水	结晶水
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO			
天然石膏	27.46	7.45	2.64	39.59	1.14	0.55	0.50	17.63	
脱硫石膏	34.75	1.93	0.40	41.27	0.26	0.26	12.44	17.99	
磷石膏	29.30	8.75	0.60	40.50	0.08	0.05	16.31	18.30	

由表 2 可得出, 磷石膏与天然石膏中 CaO、SiO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> 的含量相近, 磷石膏的结晶水、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量与脱硫石膏相近。因此, 制备纸面石膏板, 理论上磷石膏可代替天然石膏、脱硫石膏。

磷石膏是磷石膏矿(Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F)与硫酸反应制备磷酸的反应所产生的副产物, 如式(1)所示[14]。磷石膏主要含有二水结晶物 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O。与天然石膏相比, 该副产物中 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 的含量在 85%左右, 但含水率高。从微观形貌上看, 磷石膏呈板状结构, 与天然石膏、脱硫石膏微观结构不同。



由于磷石膏中含有大量的杂质, 这些杂质对建筑石膏的性能危害很大, 通常需要通过净化除杂之后

才可使用[15]。磷石膏中的主要杂质成分及相应杂质成分对其产生的影响与天然石膏相似,但存在一定差异,其中含有 Si、水溶性磷酸盐( $P_2O_5$ )、水溶性氟化物( $F^-$ )与有机物等等杂质。 $P_2O_5$ 可在石膏晶格中被取代。有些磷石膏中还含有相当数量的镭,铀和其他铀衰变产物[16]。磷石膏的主要化学元素组成根据所用磷酸工艺的类型不同而存在差异,其中 CaO 的含量可能从 32.2%变化到 36.9%, $SO_3$  含量从 44%到 50.3%。脱水磷石膏的最大粒径从 0.5 mm 到 1 mm。在大多数情况下,干法生产的磷石膏的粒径较半水石膏粒径大。水分含量通常是波动的,从 8%到 30%。磷石膏的最大水分含量从 15%变化到 20% [17]。如表 3 所示,为磷石膏主要杂质成分。

**Table 3.** Major impurities in phosphogypsum  
**表 3.** 磷石膏中主要杂质成分

杂质种类	溶解性	存在形式	影响
磷酸及磷酸盐	可溶	$H_3PO_4$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $HPO_4^{2-}$	使板凝结时间显著增强、强度大幅降低、腐蚀设备
共晶 $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	难溶	$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ 进入 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 晶格形成固溶体	水化时从晶格中析出,阻碍半水石膏水化
氟化物	可溶 难溶	$F^-$ 、 $[SiF_6]^{2-}$ $CaF_2$ 、 $CaSiF_6$	使建筑石膏促凝、二水石膏晶体粗化、强度降低
有机物	难溶	磷矿中夹杂的有机物和生产中添加的有机物	使石膏胶结需水量增大,凝结硬化减慢、削弱二水石膏晶体间的结合,使硬化体结构疏松
氧化物	难溶	$Fe_2O_3$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgO$	以磷石膏制备 II 型无水石膏时有利于胶结材水化、硬化
其他杂质	难溶	砷、铜、锌、铁、锰和铀、镭等重金属和放射物元素[18]	具有一定危害性

根据刘路珍等[19]试验研究表明磷石膏中以  $H_3PO_4$ 、 $H_2PO_4^-$ 、 $HPO_4^{2-}$  形式存在的可溶性磷和  $F^-$ 、 $[SiF_6]^{2-}$  形式存在的可溶性氟对其性能影响较大。杨敏等[20]研究发现难溶的  $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ 、 $CaF_2$  和  $CaSiF_6$  在磷石膏中形成惰性,对其性能影响不大。

### 3.2. 磷石膏的预处理工艺

由于磷石膏中存在许多杂质成分,对其利用产生明显不良影响,对此在应用前进行经济有效的处理以消除对磷石膏性能的有害影响或改变磷石膏的晶粒性质,提高其利用率。

磷石膏的与处理方法有以下几种:

#### 1) 水洗法

水洗法依次采用温水洗涤、漂洗、过滤淋洗、真空脱水四部分。磷石膏中的可溶性  $P_2O_5$  和  $F^-$  易溶于水,有机物在清洗中悬浮于水面。通过水洗可将大部分此类杂质除去。影响洗涤因素包括:用水量、洗涤温度、搅拌时间等。该法用水量大、能耗高、污水排放造成二次污染等问题,不符合小型磷肥厂,在我国磷石膏净化完全用水洗是不合理的。

#### 2) 湿筛旋流工艺

湿筛旋流工艺主要通过筛孔为 300  $\mu m$  的筛子对磷石膏进行湿筛分来进化磷石膏。在湿筛基础上,使用水力旋流器,粒度在 10~15  $\mu m$  的磷石膏被溶解,其富有有机物及晶格中磷酸盐等在随后的进化过程中被洗出来,使磷石膏得到净化。该工艺投资大、增加运营成本、可能造成二次污染。

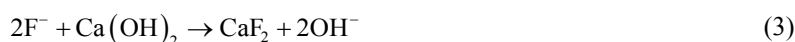
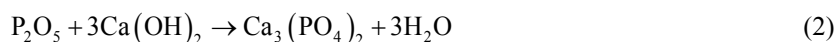
#### 3) 浮选

浮选是利用水洗时将浮在水面上的有机物出去的方法。郝海青[21]等人通过经典分子动力学模拟从微观角度研究浮选现象,深入分析矿物表面及界面相互作用,并为浮选药剂筛选和药剂分子设计提供理论

依据。浮选方法对水洗的依赖性强、洗涤效果不明显、浮选设备易受腐蚀。

#### 4) 石灰中和处理法

石灰中和法可使  $P_2O_5$  磷石膏中残留酸转化为惰性物质，石灰和可溶性  $P_2O_5$ 、氢氟酸发生反应生成了惰性物质  $CaHPO_4$ 、 $Ca(H_2PO_4)_2$  和  $CaF_2$ ，使之成为无害物质。中和反应后的中性水进入循环水池，循环使用。化学反应方程式为：



该工艺无外排水，符合环保要求，易于实现规模化生产，具有很好的推广价值[22]。巴太斌等人采用生石灰对磷石膏进行综合处理，得出石灰中和法处理磷石膏最佳 PH 值为 4~5 [23]。

#### 5) 闪烧法

利用  $P_2O_5$  在高温(200℃~400℃)下分解成气体或部分转变成惰性的、稳定的难溶性磷酸盐化合物的特点，在高温下分解有害物质并使其变成惰性物质。闪烧法采用火焰直接与磷石膏接触，温度在 400℃~600℃，少量有机磷通过高温转变成气体排出，无机磷在高温下与钙结合成为惰性物质。而磷石膏在 800℃ 下煅烧，才能有效地减少共晶磷。这一点在普通与处理中无法实现[24]。此方法工艺简化，不需要水洗，但是会产生少量酸性有害气体。

#### 6) 球磨

将磷石膏输入球磨机球磨，控制其比表面积，可改善磷石膏颗粒形貌和级配，通过球磨的磷石膏颗粒变小，增加流动性，降低标稠的用水量，降低硬化体的空隙率，减少缺陷，从而提高抗折抗弯强度。许春风等[25]采用固相球磨制备的方法，以磷石膏和尿素为原料制备尿素石膏，研究表明在反应温度为 55℃，反应时间为 40 min，球料比为 6:1，转速为 600 r/min 的条件下，转化效率可达 89.38%；且无副产物生成。此方法工艺简单，产量高，能耗低，效果显著等。球磨法一般不单独使用，和其它方法配套使用，使工艺变复杂，投资增大。

**Table 4.** Application techniques of phosphogypsum

**表 4.** 磷石膏几种技术应用情况

项目	水洗	浮选	石灰中和	煅烧	筛分	球磨	陈化
制建筑石膏			√	√			√
制水泥缓凝剂	√		√	√		√	√
制硫酸	√	√					

表 4 所示为磷石膏几种进化技术应用情况。由表可知，磷石膏可以通过不同的方法进行洗涤，例如洗涤。自来水、石灰乳、硫酸、煅烧和硫酸处理后的煅烧[18]；而制备建筑石膏主要通过干法净化除杂；制备水泥缓凝剂和硫酸通过湿法净化除杂。实际上，磷石膏的处理技术有很多种，主要是以上几种原理的基础上发展起来的，如采用水洗加石灰中和法、石灰中和加球磨法、石灰中和加浮选法、石灰中和加煅烧法以及浮选加球磨法等[26]。

### 3.3. 国内外磷石膏在纸面石膏板中的应用

制备纸面石膏板的主要原料是  $\beta$ -半水石膏。目前，生产  $\beta$ -半水石膏的绝大多数企业采用天然石膏或脱硫石膏来制备  $\beta$ -半水石膏，磷石膏制备纸面石膏板的规模较小，且与脱硫石膏混合使用，未实现完全替代天然石膏和脱硫石膏。

日本每年有 2 Mt 磷石膏制成纸面石膏板, 德国和英国每年约有 1 Mt 磷石膏制成纸面石膏板[27]。我国纸面石膏板的开发始于 70 年代, 通过引进、消化和吸收, 中国建材集团杭州设计研究院先后开发了 400 万  $\text{m}^2/\text{a}$ 、200 万  $\text{m}^2/\text{a}$  和 3000 万  $\text{m}^2/\text{a}$  国产化纸面石膏板生产线[28]; 合肥四方磷复肥有限责任公司与合肥鸿鹏商贸有限公司合作开发了磷石膏生产石膏板等装饰材料, 可处理磷石膏 400 t/d; 铜陵化工集团准备建设 1 套  $4 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$  纸面石膏板生产线, 以消耗该厂副产的大量磷石膏。据不完全统计, 2005 年国内以磷石膏为原料生产纸面石膏板  $(5\sim 6) \times 10^7 \text{ m}^2$ , 年消耗磷石膏 400~500 kt。

国内投产的磷石膏制纸面石膏板项目的企业还有昆明英耀建材  $7.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、贵州瓮福集团  $3.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、湖北泰山建材  $3.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、山东奥宝化工  $3.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、江西六国化工  $2.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、云南云天化国际  $2.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、江西华春集团  $1.5 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、河南华泰建材  $1.2 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、山东泰和集团  $1.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、铜化集团  $1.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$  等, 在建的项目有山东红日阿康  $6.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、合肥泰山石膏  $5.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ 、钟祥春祥化工  $3.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$  等[29]。

### 3.4. 磷石膏在制备纸面石膏板中的生产技术

磷石膏是纸面石膏板的主要原料, 掺入适量纤维增强材料 and 外加剂, 与水搅拌后浇注于两层护面纸之间, 经成型、凝固、切断、干燥、切割而成的建筑板材。利用磷石膏制纸面石膏板包括制粉和制板两个工序。如图 5 所示, 以江西贵溪化肥有限公司生产流程为例[30], 磷石膏制备纸面石膏板的生产过程中, 可以得出该生产过程的几大控制要点有: 磷石膏脱水温度的控制、纸芯粘结调控、湿板凝固皮带速度的调控以及磷石膏 PH 值的控制。其中, 生产磷石膏纸面石膏板过程中遇到的最主要的困难就是纸芯粘结调控。

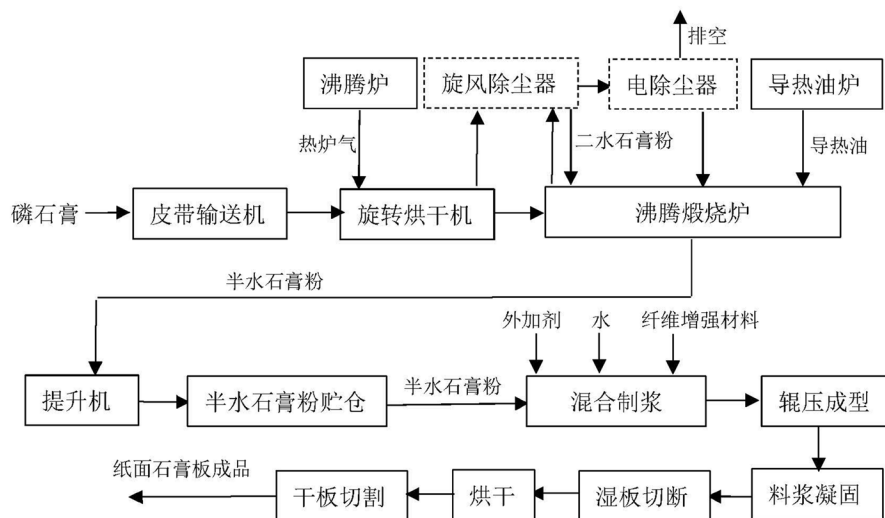


Figure 5. Preparation process of plasterboard using phosphogypsum

图 5. 磷石膏制备纸面石膏板的生产流程

### 3.5. 磷石膏在纸面石膏板中影响纸芯粘结的因素

生产过程中影响纸芯粘结的因素涉及原料、辅料和各工艺控制多方面, 如磷石膏中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等杂质影响, 发泡剂稳定性的影响等, 这些因素都会引起板芯粘接不良的问题。其中采用 X 射线光电子能谱(XPS)与电子显微探针(EMPA)相结合的分析方法[31], 研究了磷石膏中微量含氟物相的主要存在形式和分布规律。结果表明, 磷石膏中微量含氟物相主要包括  $\text{NaF}$ 、 $\text{KF}$ 、 $\text{CaF}_2$ 、 $\text{K}_2\text{SiF}_6$ 、 $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ 、 $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ 、 $\text{K}_3\text{AlF}_6$ 、



$\text{AlF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{AlF}_{2.3}(\text{OH})_{0.7} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 、 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ 。其中,约5%的氟以 $\text{NaF}$ 、 $\text{KF}$ 、 $\text{CaF}_2$ 等氟化物形式存在,8%的氟以氟磷酸盐 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 和 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ 形式存在,将近12%的氟以氟铝酸盐 $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ 和 $\text{K}_3\text{AlF}_6$ 形式存在,40%左右的氟以氟硅酸盐 $\text{K}_2\text{SiF}_6$ 和 $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ 形式存在,30%的氟以带结晶水的氟化铝 $\text{AlF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{AlF}_{2.3}(\text{OH})_{0.7} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 形式存在。

#### 4. 问题与结论

利用磷石膏制备纸面石膏板目前存在很多问题。磷石膏杂质较多,目前在制备纸面石膏板时与脱硫石膏或天然石膏混用,无法达到完全替代二者的目的。磷石膏在使用时必须经过预处理,处理方法仍需改进,预处理成本问题也许解决。总体概括为以下几点:

一是对磷石膏预处理技术的改善。目前国内大多数仍采用传统建材为主,大部分中小型企业无法实现对新型建筑材料的预处理,技术及设备相对落后。在现有技术没有取得重大突破的情况下,磷石膏的综合利用基本在建材领域,而目前全国范围内建材领域全行业又存在极为严重的产能过剩。没有新品种、新技术和高质量产品出现的情况下磷石膏综合利用手段和方式也比较单一。

二是磷石膏产品运输成本问题。对于磷石膏的开发与利用,其运输成本远远高于产品成本,大大提高了生产成本,运营效益降低,使市场竞争力减弱,市场规模萎缩。

三是磷石膏综合利用标准体系不完善。对磷石膏的质量控制,技术要求及应用领域等整个体系没有具体完整的标准。

磷石膏作为主要的工业固废产物,每年产量巨大,耗费大量的存储空间,也对环境造成污染。因此,合理规划对磷石膏的使用以及提高相关技术工艺,完善对磷石膏在线无害化处理技术,提高其利用率等措施十分重要。同时,希望能建立健全磷石膏利用体系标准,规范磷石膏的使用。放眼整个建筑以及农业行业,磷石膏的用途十分广阔。综合利用磷石膏制备纸面石膏板项目投资少,工艺简单,易实施,具有显著的经济效益、社会效益和环境效益,可作为国内同行业磷石膏综合利用的重点推广项目。

#### 参考文献

- [1] 叶学东. “十二五”期间磷石膏利用现状及当前工作重点[J]. 磷酸工业, 2017(1): 40-43.
- [2] 周龙, 马华菊, 曾妍骅, 莫福金, 赵义. 国内磷石膏处理领域研究趋势分析[J]. 磷肥与复肥, 2018, 33(3): 32-34.
- [3] 陈燕, 岳文海, 董若兰. 石膏建筑材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2003: 1-6.
- [4] 巴太斌, 徐亚中, 卢文运, 王利娜, 石志刚. 石灰中和处理磷石膏试验研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(2): 96-99.
- [5] 叶学东. 2017年我国磷石膏利用现状、形势分析及措施[J]. 硫酸工业, 2018(8): 1-4.
- [6] 叶学东. 2016年我国磷石膏利用现状、存在问题及建议[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(7): 1-3.
- [7] 马高飞. 磷石膏综合处理途径分析[J]. 化肥设计, 2018, 56(3): 42-45.
- [8] 李光明, 李霞, 贾磊, 吴金玲. 国内外磷石膏处理和处置概况[J]. 无机盐工业, 2012, 44(10): 11-13.
- [9] 张朝辉, 杨江金, 张菁燕. 利用脱硫石膏磷石膏生产建筑干粉腻子[J]. 应用研究, 2009, 21(5): 26-33.
- [10] Xue, S., Li, M., Jiang, J., Millar, G. J., Li, C. and Kong, X. (2018) Phosphogypsum Stabilization of Bauxite Residue: Conversion of Its Alkaline Characteristics. *Journal of Environmental Sciences*, 77, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.05.016>
- [11] 杨兆娟, 向兰. 磷石膏综合利用现状评述[J]. 无机盐工业, 2017, 39(1): 8-10.
- [12] 廖若博, 徐晓燕, 纪罗军, 周开敏. 我国磷石膏资源化应用的现状及前景[J]. 磷酸工业, 2012(3): 1-7.
- [13] 郑建国. 《磷石膏》国家标准介绍[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(8): 15-17.
- [14] 陈嘉懿. 预处理工艺对磷石膏性能的影响及作用机理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [15] 郭泰民. 工业副产石膏应用技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

- [16] Perez-Moreno, S.M. (2018) Assessment of Natural Radionuclides Mobility in a Phosphogypsum Disposal Area. *Chemosphere*, **211**, 775-783. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.193>
- [17] 徐威, 董兵海, 宋陈杰, 吴雅丹, 吴翠娥, 王世敏. 磷石膏的改性及其在新型建材中的应用[J]. 粉煤灰综合利用, 2016(2): 49-53.
- [18] Rashad, A.M. (2017) Phosphogypsum as a Construction Material. *Journal of Cleaner Production*, **166**, 732-743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.049>
- [19] 刘路珍, 陈德玉, 刘宇浩, 刘元正, 赵敏. 磷石膏预处理及制备建筑石膏的研究[J]. 非金属矿, 2014, 37(3): 30-32.
- [20] 杨敏, 庞英. 化学预处理磷石膏用于水泥缓凝剂的研究[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(6): 58-60.
- [21] 郝海青, 李丽匣, 张晨, 袁致涛. 经典分子动力学模拟在矿物浮选研究中的应用[J]. 2018(3): 9-15.
- [22] 贾同春, 曹志强, 任利. 一种应用于生产纸面石膏板的磷石膏预处理工艺[J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(6): 61-62.
- [23] 巴太斌, 徐亚中, 卢文运, 王利娜, 石志刚. 石灰中和处理磷石膏试验研究[J]. 新建筑材料, 2018, 45(2): 99-102.
- [24] 李美, 彭家惠, 张建新, 张欢. 磷建筑石膏的特性及其改性[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(3): 553-558.
- [25] 许春风, 邓跃全, 董发勤, 解忠雷, 何江洪, 付鹏. 磷石膏固相球磨制备尿素石膏的研究[J]. 非金属矿, 2011, 34(1): 21-24.
- [26] 白有仙, 庞世花, 朱云勤. 对磷石膏不同处理方法脱磷效果的实验研究[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(3): 21-22.
- [27] 王成波. 磷石膏制硫酸新工艺探讨[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2008.
- [28] 方贤根. 磷石膏综合利用状况及对策分析[J]. 安徽化工, 2007, 33(1): 54-55.
- [29] 张欢. 我国石膏建材“十二五”发展情况及“十三五”展望[J]. 硫酸工业, 2017(5): 5-9.
- [30] 陈和全. 磷石膏制备纸面石膏板的生产技术[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(4): 64-65.
- [31] 赵红涛, 李会泉, 包炜军, 王晨晔, 李松庚, 林伟刚. 磷石膏中微量含氟物相的光谱分析[J]. 2015, 35(8): 2333-2338.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)