

何秉顺 付永祥 著

磷化工固体废弃物 安全环保堆存技术

学工业出版社

磷化工固体废弃物 安全环保堆存技术

何秉顺 付永祥 著



化学工业出版社

前言

磷化工固体废弃物是指与磷化工工业有关的固体废弃物，主要包括磷石膏、磷尾矿、黄磷渣等。磷石膏是硫酸萃取磷矿制磷酸的副产物，生产 1t 磷酸副产磷石膏 5~7t。磷尾矿是磷矿石选矿后的废料，随着磷原矿品位的下降，磷尾矿产量也越来越大。黄磷渣是电炉法生产黄磷过程中排放的工业废渣，生产 1t 黄磷，约产生 9t 黄磷渣。在 2010 年度，全国磷石膏排放量约为 5000 万吨，磷尾矿和黄磷渣的产量也分别在 1000 万吨左右。与磷固体废弃物产量逐年加大相比，磷固废的综合利用率一直不高，中国磷肥工业协会提出“十一五”期间磷石膏综合利用率的目标为 20%，未对磷尾矿和黄磷渣有明确要求，这意味着当前 80% 以上磷石膏及其他固体废弃物需要在地面堆放。

磷固废堆存的方法有湿排湿堆、湿排干堆、干堆三种。其中，大型磷肥厂在早期多采用湿排湿堆方法，采用上游法排放磷化工固体废弃物，与金属非金属矿山尾矿库十分类似。20 世纪 90 年代初，江西贵溪建成了国内第一个湿式磷石膏堆场。之后，湖北、贵州、云南等省亦相继建成了大型湿式磷石膏堆场。

近年来，尾矿干堆方案比传统湿堆以其安全、节水、环保等特点正逐渐受到重视，国家安监总局将尾矿干堆列入了“先进适用技术”目录。在磷石膏方面，也有向干式堆存转变的趋势，湖北宜昌地区在建或已在运行的各种规模的干式磷石膏堆场达到 20 多座。从输送和堆存方式来讲，磷石膏干堆有湿排干堆和直接干堆两种方式。管道输送、压滤脱水后采用传送带或汽车运输的堆放方式简称为湿排干堆；直接采用传送带或汽车运输的堆放方式简称为干堆。湿排干堆既充分利用管道输送的经济性，避免了传动带或汽车运输途中的遗撒污染问题，因而更适合于大型磷肥厂。就在堆场内堆存来讲，湿排干堆和直接干堆没有任何区别。我国目前仅磷石膏一项，湿排湿堆、湿排干堆、干堆三者的堆存总量达 2 亿多吨。

磷化工固体废弃物堆场不仅占用大量土地，而且易造成环境污染，越来越受到有关监管部门的关注，搞好磷化工固体废弃物的综合利用和安全环保堆存成为磷肥工业可持续发展的关键。新中国成立以来，磷化工固体废弃物堆场虽然没有发生重大的环保与安全事故，但是与磷固废堆场类似的金属矿山尾矿库却事故频发，尤其

以 2008 年襄汾新塔铁矿尾矿库溃坝事故为甚，造成了 277 人死亡的惨剧，是世界上迄今为止死亡人数最多的尾矿库事故。金属矿山尾矿库的事故为磷化工固废堆场安全、环保管理敲响了警钟。磷固废与金属尾矿类似，但性质又有明显的差异，特别是磷石膏呈酸性，而且氟离子含量高，使堆存磷石膏在环保方面比常规金属矿山尾矿等环保要求更为严格。如何安全、环保堆存磷固废，是每一个磷肥工业设计者、管理者都需要面对的问题。

磷石膏湿排湿堆技术是从国外引进的，目前还没有具体的设计规范。磷固废堆场设计与管理涉及岩土力学、水利工程等多种学科，具体到化工行业设计院中从事磷化工固体废弃物堆场设计专业人才十分稀缺，有关磷化工固废处置的文献也较为少见。本书结合作者对磷化工固废堆场的设计实践，介绍了磷化工固体废弃物堆场的设计思路与理念，提出了作者的研究成果和见解。希望此书能够为磷化工固体废弃物处置及金属非金属矿山尾矿库设计管理人员提供參考。

本书由何秉顺、付永祥著，北京交通大学田亚护、承德龙兴矿业工程设计有限责任公司黄超、李克中等人提供了部分资料，全书由尾矿库专家徐宏达、滕志国审定，北京中寰工程项目管理公司张平虎，宜都兴发化工有限公司罗宝瑞总经理、吴保全副总经理、江志平经理等人为本书撰写提供了很大帮助，在此深表感谢。

本书共分九章，第一章介绍了磷化工固体废弃物综合利用及处置现状；第二章讲述了两种最主要的磷固废中磷石膏与磷尾矿的物理力学性质和浸出物毒性测试结果；第三章为堆场设计概述；第四章介绍了磷固废堆场水文计算与排洪构筑物设计；第五章介绍了堆场各种构筑物的设计方法与原则；第六章介绍了磷固废堆场的稳定性分析方法；第七章讲述了磷固废堆场防渗设计方法；第八章提出了磷固废堆场环境与安全方面的监测方法。第九章介绍了磷固废堆场扩容、回采与封场注意事项。

书中借鉴和参考了很多技术文献及论文，在此向原著者表示感谢。

由于编写人员水平所限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

何秉顺 付永祥
于北京

目 录

绪论

1

第一章 我国磷化工固体废物利用与处置

3

第一节 我国磷化工工业概况	3
第二节 磷化工固体废物基本概念	4
第三节 磷化工固体废弃物的利用情况	5
一、国际国内磷固废的利用情况	5
二、磷固废的主要利用途径	5
第四节 磷化工固体废弃物的处置	8
一、国际国内磷固体废弃物的处置基本情况	8
二、地表堆存	8
三、地下充填	9
参考文献	11

第二章 磷化工固体废物的基本性质

12

第一节 磷石膏的基本性质	12
一、磷石膏的基本成分	12
二、磷石膏定性	13
三、磷石膏物理力学性质	16
四、磷石膏的性质总结	23
第二节 磷尾矿的基本性质	23
一、磷尾矿的基本成分	23
二、磷尾矿的浸出液毒性测试	24
三、磷尾矿的物理力学性质	25
四、磷尾矿的性质总结	30

参考文献	30
------------	----

第三章 磷固废堆场设计综述

32

第一节 磷固废堆场基本概念与设计标准	32
一、磷固废堆场基本概念和分类	32
二、磷固废堆场设计规范	34
三、磷固废堆场分级和防洪标准	35
第二节 磷固废堆场选址与资料收集	38
一、场址选择	38
二、基本资料的收集	39
第三节 堆存方案选择	40
一、磷固废干堆的适用条件	40
二、两种堆存方案比较	40
三、磷固废干堆场的优势	41
第四节 磷固废堆场地质勘察	41
一、建设前期地质勘察	42
二、运行期地质勘察	42
参考文献	43

第四章 磷固废堆场水的控制

44

第一节 防洪标准	44
第二节 水文计算	45
一、水文计算的原则	45
二、设计暴雨计算	45
三、设计洪峰流量	46
四、设计洪水总量	48
五、设计洪水过程线	49
六、输沙量计算	50
七、水文计算的讨论	50
第三节 排洪构筑物	52
一、排洪构筑物的类型	52
二、排洪构筑物荷载与结构计算	53
三、排洪系统线路布置	55
四、排洪构筑物泄流能力计算	57
第四节 蓄洪与调洪	63
一、调洪演算基本方法	64

二、不同类型堆场的调洪方法	66
第五节 清污分流	67
一、场外分洪	67
二、回水	68
三、渗沥液收集与处理	68
参考文献	69

第五章 磷固废堆场构筑物设计

71

第一节 湿式堆场类型	71
一、平地型分块堆放	71
二、平地型中心式堆放	72
三、山谷型上游式堆放	72
第二节 湿式堆场构筑物	73
一、初期坝	73
二、堆积坝	76
三、调节池	78
第三节 干式堆场工程布置	80
一、干式堆场布局	80
二、干式堆场堆放方式	80
第四节 干式堆场构筑物	82
一、拦渣坝与调节池	82
二、堆积体	83
三、排水、排渗设施	84
参考文献	85

第六章 磷固废堆场稳定分析

86

第一节 基础条件	86
一、计算剖面概化	86
二、运用条件	89
第二节 渗流分析与控制	90
一、渗流控制方程与边界条件	90
二、湿式堆场渗流分析与控制	92
三、干式堆场渗流分析	100
第三节 抗滑稳定分析	101
一、抗滑稳定分析方法	101
二、允许安全系数	103

三、筑坝不同阶段的分析方法	104
四、抗滑稳定分析中一些问题的讨论	107
第四节 堆场地震稳定性分析方法	110
一、拟静力法	110
二、动力反应方法	111
三、液化判别方法	112
参考文献	113

第七章 磷固废堆场防渗设计

115

第一节 堆场防渗措施	115
一、防渗设施工程布置	115
二、垂直防渗设施	117
三、水平防渗设施	119
第二节 土工膜复合防渗衬垫	121
一、复合防渗衬垫的结构型式	121
二、复合衬垫设计有关参数的讨论	122
三、复合防渗衬垫施工要点	125
参考文献	128

第八章 磷固废堆场监测

129

第一节 堆场安全监测	129
一、安全监测有关要求	129
二、安全监测项目	131
三、在线监测	137
第二节 堆场环境监测	139
一、渣场污染物	139
二、环境监测内容	140
参考文献	144

第九章 堆场扩容、回采与封场

145

第一节 堆场增高扩容	145
一、扩容安全论证	145
二、增高扩容工程措施	147
第二节 堆场回采	148
一、回采方法与优缺点	148

二、回采施工方案	150
第三节 封场与复垦	151
一、堆场退役后的安全度	151
二、封场设计中应注意的问题	152
参考文献	153



《绪论

——给尾矿库年轻设计工作者的几句话

按照《尾矿库安全技术规程》关于尾矿库的定义“筑坝拦截谷口或围地构成的、用以贮存金属非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿或工业废渣的场所”，磷固废堆场也属于尾矿库。笔者在几年时间，主持或参加了几十座金属非金属矿山尾矿库的新建、增高扩容、回采利用、闭库设计，还从事了一些相关的研究工作，取得了一些经验，也有很多教训。近年来，随着矿业的蓬勃发展，尾矿库大量建设，而老一辈的尾矿库设计人员多年事已高，年轻的设计人员成为尾矿库设计的主体。借着本书出版的机会，笔者愿意把自己的体会与尾矿库年轻的设计工作者共同分享，也希望这段文字能够得到同行的共鸣和讨论。

一、要正确认识尾矿库设计的重要地位

矿山建设多把尾矿库设计作为选矿厂设计的一部分。事实上，尾矿库专业与选矿、采矿专业地位同等重要，甚至在某种程度上，应该得到比选矿、采矿专业更多的重视。尾矿库建设事关下游群众生命财产安全，事关周边环境与生态，决定矿山企业能否正常生产运行，国家安监部门目前把尾矿库建设与矿山建设视为同等地位，尾矿库单独采取“三同时”原则。尾矿库安全、国家重视、社会关注、群众关切、企业需要，从这几方面考虑，我们设计的尾矿库并不单纯是为矿山企业服务。尾矿库设计工作者，一定要正确认识尾矿库设计的重要地位，遵循尾矿库运行的客观规律，提供“安全第一、利于环保、技术先进、经济合理”的设计方案。

二、要坚持原则，注意规避风险

笔者认为，我国尾矿库设计存在以下“三难”。

（一）尾矿库事故率高。鉴于上游式尾矿库在浸润线和地震作用下的所表现的脆弱性，Carrier 甚至建议，岩土工程师应避开上游式尾矿库。我国在役的尾矿库有一万多座，其中 90% 以上是上游式。曾有文献指出，我国上游法筑坝水平世界领先。但上游式尾矿库总体上遵循一定的事故概率。Davis 指出，上游式尾矿库年事故概率为千分之一（水库坝约为万分之一），这意味着我国每年应有十座以上的尾矿库出现事故。

（二）尾矿库设计服务期长。与水利工程土石坝建设不同的是，尾矿库设计要提供初期建设和后期筑坝的全部图纸，贯穿尾矿库的全生命周期，有的长达几十

年。在设计责任终身制的今天，一旦出现事故，往往要追究设计者的责任。

(三) 部分尾矿库建设质量与运行管理水平偏低。我国目前中小型尾矿库占绝大部分。一些矿山企业对尾矿库的重要性和危险性认识不足，加之缺乏专业的施工队伍和专业技术人员，使得部分尾矿库工程建设质量和运行管理不能满足设计和规程、规范的要求。

基于以上“三难”，笔者建议尾矿库年轻设计工作者应抱着慎之又慎的态度，严格执行规程、规范，精心设计，坚守职业道德。对于施工、运行中有碍尾矿库安全的行为，应坚持原则，注意规避风险。

三、要勤于思考、注重创新

目前，国内院校中还没有开设尾矿库这门专业，事实上，尾矿库专业是水利工程与岩土工程两个学科的结合，核心课程有水力学、水文学、土力学、钢筋混凝土结构学等。尾矿库专业属于复合专业，在设计院一个尾矿库工程往往由一个人完成全部设计任务，这给年轻的尾矿库设计工作者带来了极大的挑战。要想尽快熟悉和掌握尾矿库设计的专业知识和技术技能，笔者建议年轻的尾矿库设计工作者应做到以下三点：

(一) 要多实践。要勇于承担项目，多接触各类工程，多调研已建项目，多做项目是年轻人成长的基础。

(二) 要多总结。学而不思则罔，思而不学则殆。在实践中积累经验。我国水利工程无论从设计施工还是从运行管理上都建立了较为完整的体系，筑坝水平世界领先。要潜心研究尾矿库工程与水利工程相同点和不同点，注重将尾矿坝与土石坝对比。

(三) 要多看名家之书。当前关于尾矿库安全的文献很多，质量良莠不齐，甚至有一些错误的观点。笔者建议多读名家之书，以正视听。尾矿库设计要读《尾矿设施设计参考资料》《Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams》，规范方面应精读《碾压式土石坝设计规范》，渗流控制读刘杰之书，渗流计算读速宝玉之书，抗滑稳定分析读陈祖煜之书，抗震读徐志英、沈珠江等人之书（或文章）。

尾矿库设计也在发展。近年来，尾矿膏体及干堆地表充填迅速发展，国外已经出版了浓缩和膏体尾矿设计的指导手册。另外，尾矿库设计方面还有很多未解的难题，如高尾矿堆积坝下埋管土压力计算的问题、溃坝泥沙流量及尾矿坝安全距离确定问题等，都需要年轻的尾矿库设计工作者利用智慧创新加以解决。

总而言之，尾矿库设计地位重要，挑战也较大，要抱着谨慎的态度认真对待，重视新技术、新材料、新工艺的应用，从土力学、水力学等基础理论出发去解决设计中出现的问题。我国尾矿库数量庞大，从事尾矿库设计人员相对较少，愿每位年轻的设计工作者都有光明的发展前景和空间。

第一章

我国磷化工固体废物 利用与处置

第一节 我国磷化工业概况

磷是生物的关键元素，磷化工的广义功能是为生物提供养分。我国企业具有低成本资源和能源的两大优势，是国际上最主要的磷化工产品供应国。广义的磷化工产业，包括了从磷矿石到下游磷肥和含磷各类化学品的整条产业链，以产量来说，磷肥是最大的品种，占比例达到 80%；而以品种来说，下游的精细磷化工应用广泛，以黄磷和磷酸为基础，包括磷酸氢钙、三聚磷酸钠、五氧化二磷、六偏磷酸钠和其他磷酸盐。目前中国磷化工企业达到 500 家，磷化工产品生产能力在 600 万吨/年以上，实际年产量约 400 万吨，成为世界第一大磷酸盐生产国。磷化工产品已经占到全球总量的 50% 以上，其中黄磷、磷酸和三聚磷酸钠的生产能力均居世界第一位。随着我国产品结构的不断调整，磷化工也逐渐由粗放型向精细化发展，已开发出牙膏级、电子级和专用级的磷化工新产品。图 1.1 所示为磷化工产业链。

在最主要的产品磷肥生产领域，我国磷肥工业经历了从无到有、从小到大、从低浓度单一养分到高浓度磷复肥的发展历程。2005 年磷肥产量 1125 万吨 (P_2O_5 ，下同)，超过美国，居世界第一位。2006 年产量 1210 万吨，基本实现了自给。2007 年磷肥产量 1351 万吨，达到了自给有余，国产磷肥自给率 118%。进口磷肥大幅减少，出口量大幅增加，全年净出口磷肥 209 万吨。磷肥产品结构显著改善，1990 年我国高浓度磷复肥产量占磷肥总产量的比例不到 5%，2007 年达到 73.4%。自主创新能力不断增强，技术装备的大型化、国产化取得了突

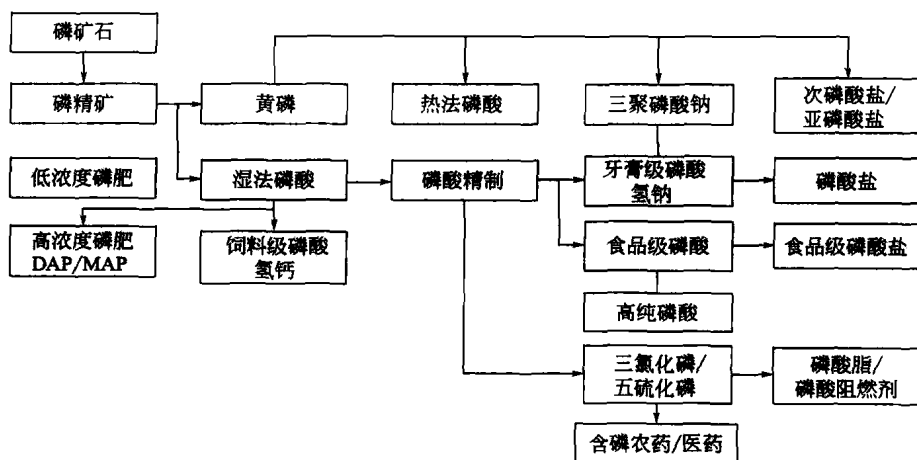


图 1.1 磷化工产业链

破性进展^[1]。

磷化工行业的迅猛发展，带来了重大经济效益的同时，也产生了大量的磷化工固体废弃物，堆存这些磷化工固体废弃物不仅占用大量土地，而且易造成环境污染，成为重大危险源、污染源，因而越来越受到环保部门、安监部门的关注，特别是江、河、湖、海沿岸，旅游点等环境敏感地区的企业，环保压力越来越大。如何尽量综合利用磷固废，如何安全、环保堆存磷固废，已成为影响磷肥工业健康有序发展的最为核心的问题之一。

第二节 磷化工固体废弃物基本概念

磷化工固体废弃物是指与磷化工工业有关的固体废弃物，主要包括磷石膏、磷尾矿、黄磷渣等。

磷石膏是硫酸萃取磷矿制磷酸的副产物，生产 1t 磷酸副产磷石膏 5~7t。磷石膏呈酸性，主要成分与天然石膏一样，主要由 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 组成，并含有少量的氟化合物、酸不溶物、磷酸残液等杂质。我国磷矿中重金属和放射性元素含量很少，因此，磷石膏中重金属和放射性物质很低。磷矿中重金属含量比美国佛罗里达、摩洛哥、约旦等磷矿低 7~10 倍。随着高浓度磷复肥产量的提高，我国磷石膏的排放量也相应大幅度增加，2000 年全国磷石膏产量约 1100 万吨，在 2007 年就超过了 4000 万吨，2010 年，全行业磷石膏产量约为 5000 万吨。一些重点磷肥企业的排放量都在 100 万吨/年以上，瓮福、开磷、云南三环、富瑞等企业超过了 300 万吨/年。

磷尾矿是磷原矿石选矿后的废弃物。磷尾矿的产量与磷矿石的品位有关。例如贵州开磷磷矿不需要选矿就可以直接生产磷肥。但是国内其他大多数矿山随着磷矿

资源的开发, 品味越来越低, 因而尾矿产量也越来越大。早期磷矿选矿多采用擦洗除泥工艺, 粒径极细, 平均粒径 d_p 在 $8\sim 10\mu\text{m}$ 。近年来, 磷矿浮选选矿工艺得到了广泛采用, 尾矿颗粒要比擦洗工艺粗。2010 年, 全行业磷尾矿产量约为 1000 万吨/年。

黄磷渣是电炉法生产黄磷过程中排放的工业废渣, 我国目前黄磷产量 90 万吨/年, 黄磷渣总量约为 810 万吨, 黄磷渣的主要成分以二氧化硅和氧化钙为主, 综合利用以生产水泥和作为混凝土的掺合料为主。

第三节 磷化工固体废弃物的利用情况

磷化工固体废物(下文简称磷固废)综合利用主要集中在磷石膏上, 对磷尾矿和黄磷渣的关注远低于磷石膏。磷石膏主要用于联产硫酸制水泥、做水泥缓凝剂、做建筑材料, 黄磷渣可用于制备水泥、微晶玻璃、超流态微晶粉等。

一、国际国内磷固废的利用情况

国际上, 日本没有磷资源, 磷复肥能力很小, 天然石膏储量也少, 因此日本副产磷石膏几乎全部得到利用, 是世界上磷石膏综合利用率最高的国家。德国、法国、芬兰等国利用磷石膏做新型建材也有较好的业绩。

20 世纪 80 年代开始, 我国把高浓度磷复肥定为磷肥发展的方向, 与此同时, 为探讨搞好磷石膏的处置, 原化学工业部对磷石膏的综合利用做了大量的试验研究工作, 并取得了一定的成绩。许多磷复肥企业对磷石膏的综合利用也都做了很多工作, 并取得了一定的成果。

中国磷肥工业协会把磷石膏综合利用列为行业“十一五”发展规划中的重点工作, 要求各有关磷肥企业做好磷石膏综合利用规划, 通过全行业的共同努力, 抓住国家取消黏土砖的历史机遇, 争取国家、各级政府和有关部门的政策支持。按照“减量化、再利用、资源化”的原则, 提高磷石膏作为资源的意识, 实现磷肥工业与磷石膏综合利用同步发展, 促进磷肥行业的可持续发展。2011 年, 工业与信息化产业部公布了《磷铵行业准入条件》(中华人民共和国工业和信息化部公告 2011 年第 31 号), 要求磷石膏利用率在三年内必须达到年生产量的 15%, 达不到以上要求的企业必须关停。

二、磷固废的主要利用途径

(一) 制硫酸联产水泥

利用磷石膏做水泥原料, 与焦炭、砂岩等辅料在烘干机中烘干, 然后送入球磨机混磨。均化后生料送入回转窑中烧制熟料, 入窑生料和窑气逆流接触, 形成

水泥熟料，经冷却后送熟料库，将熟料、石膏、混合材料按一定比例输入球磨机混磨为水泥。回转窑排出的炉气经干法除尘、温泡、温水洗净化，入干燥塔用浓硫酸干燥， SO_2 气体干燥后送转化工序，作为制造硫酸的原料气。该工艺是我国自主开发的重点科技攻关技术，已成功地在我国上百套磷铵装置上推广。优点是**没有废气排放**，缺点是生产设备效率低、投资大、能耗高^[2]。流程示意图见图 1.2。

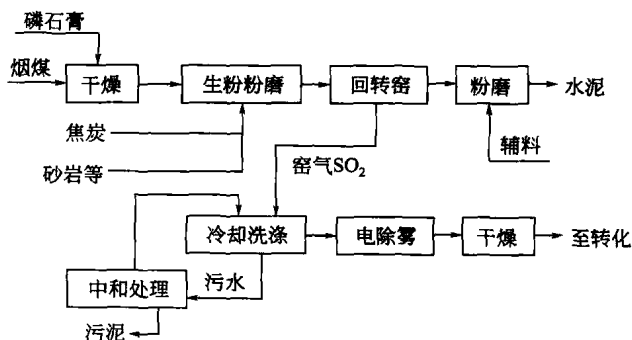


图 1.2 磷石膏制硫酸联产水泥工艺流程图

山东鲁北企业集团于 1990 年建设了一套年产 3 万吨磷铵、4 万吨硫酸联产 6 万吨的水泥装置（简称 3-4-6 工程），成功后，1999 年又建设了一套 15-20-30 工程，现能力已翻番到 30-40-60，是世界上最大的磷石膏制硫酸联产水泥工业装置，不仅完全吃掉了自产的磷石膏、盐石膏，还到附近磷肥厂收购一部分磷石膏。由于硫资源得到了循环利用，基本无三废排放，被国家评为“环境友好企业”。此外，我国于 20 世纪末还在四川、山东、河北、辽宁等地推广建设了 6 套年产 4 万吨硫酸联产 6 万吨水泥的装置。但由于磷矿石供应紧张、磷矿石成分各异，产生的磷石膏较难配到要求的水泥生料组分，加上能耗较高等原因，磷石膏制硫酸联产水泥技术没有继续推广。近年来，硫磺、硫酸价格大涨，加上环境压力的增长，又激发起人们利用磷石膏制硫酸的兴趣，一些企业在建设磷石膏制硫酸装置，一些单位在研发窑外分解技术。我国硫资源短缺，2007 年进口硫磺 965 万吨，硫资源进口依存度达 60%，用磷石膏制硫酸有很大的潜力^[1]。

黄磷渣在水泥工业中的应用主要包括以下几个方面：做水泥原料，磷渣水泥掺合料，制低熟料磷渣水泥和无熟料水泥。黄磷渣做水泥原料，主要是代替萤石做矿化剂来锻造水泥熟料，改善生料的易烧性，降低水泥成本^[3]。

（二）做水泥缓凝剂

水泥中掺加石膏的主要作用是石膏中的三氧化硫在水泥水化过程中控制水泥的凝结时间，用量为 3%~5%，现在越来越多的水泥企业采用磷石膏代替天然石膏用做缓凝剂。但磷石膏中含有微量的磷、氟等有害杂质，且含水率高，颗粒细，需

经过有效改性处理。常用的处理方法有水洗法、石灰中和法、煅烧法及碱性物质中和再造粒法等。现已有安徽铜化集团、江西贵溪、江苏瑞和、重庆涪陵等十余家企业建设了磷石膏制水泥缓凝剂装置，总产量约 200 万吨，有几十家水泥厂使用。2007 年我国水泥产量 13.6 亿吨，最少需掺用石膏 4000 万吨。用磷石膏替代天然石膏做水泥缓凝剂具有较大的潜力。

黄磷渣作为混凝土掺合料，可以降低水化热，提高混凝土构件的极限拉伸值。这种混凝土的后期强度高，强度增长率大，能有效地提高大体积混凝土抗温度裂缝的能力，可以满足大体积混凝土施工的需要，在水利工程大体积混凝土工程中得到了较好的应用。

（三）建筑石膏

磷石膏作为胶凝建材原料，经适当净化处理后脱水成半水硫酸钙，可生产各种石膏墙体材料，如粉刷石膏、抹灰石膏、石膏砂浆、熟石膏粉、纸面石膏板、建筑标准砖、烧结节能砖、免烧砖和装饰吸声板等。它们普遍具有质轻、隔热、隔音、防火加工性能好、生产能耗低、利于环保等优点。

目前，秦皇岛华瀛磷酸有限公司及山东奥宝分别与山东泰和公司合作建成了年产 2000 万平方米和 3000 万平方米的纸面石膏板装置，还有一些企业也在建设中。石膏砌块、石膏板等产品也在小批量生产。2007 年 5 月贵州开磷集团建成了以磷石膏为主要原料的 1 亿块/年标准砖装置，可代替黏土砖使用。2010 年，我国开始着手编制行业标准《蒸压磷石膏砖》，该行业标准的制定和实施，不仅能规范磷石膏砖的生产，促进产品质量的稳定和提高，同时对于该项产品的市场培育和推广都将产生积极的作用。

高质量的建筑石膏粉有较高的附加值，市场前景广阔。目前国内多以天然石膏为原料。针对磷石膏含有少量杂质的特点，寻求高质量、规模化、能耗低、以磷石膏为原料的建筑石膏粉生产技术，为许多磷复肥企业所关注。一些磷肥企业已经和国内有关单位合作生产产品。澳大利亚 RBS 速成建筑系统有限公司的 RFC 石膏焙烧炉技术，能生产出高质量的建筑石膏粉，用该石膏粉制成的石膏大板能承重和防水，为大量综合利用工业石膏提供了新途径，一些磷肥企业正在与该公司接触、商谈合作。

（四）做土壤改良剂

磷石膏呈酸性，因此可以直接用作土壤改良剂改善碱性地，提高土壤的渗水性，同时磷石膏含有植物生长所需磷、钙、硅等各种营养元素，可将磷石膏作为盐碱地土壤改良剂。20 世纪 90 年代初期，原化工部委托有关单位在内蒙古、江苏等地做了用磷石膏改良盐碱地的大量试验工作，效果显著。江苏省农科院在黄淮海地区的试验还通过了正式验收。目前辽宁黑山等地区仍在使用的辽宁西洋集团的磷石膏改良土壤。

第四节 磷化工固体废弃物的处置

一、国际国内磷固体废弃物的处置基本情况

我国目前磷石膏利用率达到了 20%，磷尾矿和黄磷渣利用率则更低，这意味着绝大部分的磷固废都要堆存。国际上曾有过将磷石膏直接排入海洋的先例，随着环境保护的增强，该方法越来越受到限制，堆存是当前磷化工工业固体废物主流的处置方法。

世界主要磷肥生产国美国、俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等国家均采用堆存处理的办法。美国主要采用湿法排渣、分块堆存，在平地建堆场，设回水收集回收管道，磷石膏堆场的设计、建设有国家统一标准，仅佛罗里达州就有 20 个磷石膏堆场，到 2000 年堆存量已约有 9 亿吨。俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等国采用干法排渣，在平地建渣场堆放，不设回水收集回收系统。而另外一些磷肥生产大国摩洛哥、突尼斯、约旦、埃及等则直接将磷石膏渣排入大海。对磷石膏开展综合利用的国家主要为磷石膏产量小、土地资源少、经济较发达的国家，如日本、英国、法国、芬兰等国家。放眼世界，绝大部分磷石膏（约 90% 以上）采用陆地堆存处理，有些磷石膏生产企业附近有沙坑、废坑、采石场的则就地用来作磷石膏堆场。

我国磷石膏堆存方法是伴随着磷酸装置的进口同时引进的。小型磷肥厂采用干法堆存，大型磷肥厂则效仿金属非金属尾矿库的湿排湿堆方法。20 世纪 90 年代初，江西贵溪建成了国内第一个湿堆磷石膏堆场。之后，湖北大峪口、湖北黄麦岭、广西鹿寨、贵州翁福、云南富瑞、云南云峰、贵州息烽等亦相继建成了大型湿法磷石膏堆场^[4]。

近年来，在磷固废堆存处置方面，有从湿堆向干式堆存转变的趋势，湖北宜昌地区在建或已经运行的各种规模的干堆磷石膏堆场达到 20 多座。干式堆存节水、环保（主要指地下水保护）、安全，容易封场（闭库），但也有初期建设费用高和粉尘及运输遗撒问题。

二、地表堆存

磷固废地表堆存的方法有湿排湿堆、湿排干堆、干堆 3 种。湿排湿堆是指用管道输送磷固废至堆场，水力冲填排放的方法。这种方法与金属非金属尾矿库的填筑方法非常类似，与国外多是平地型四面筑坝方式不同，我国的湿排湿堆磷石膏渣场多是山谷型。传统的湿堆尾矿库堆存方式有上游式、中线式、下游式三种，我国的湿堆磷石膏堆场均采用上游式堆存方法，见图 1.3。制备磷酸过程中，产生的磷石膏呈固态，为了湿法堆存磷石膏，首先要将磷石膏调湿，经再浆池将磷石膏调湿成