

# 《钛石膏综合利用技术规范》国家标准

## 编制说明

（征求意见稿）

生态环境部固体废物与化学品管理技术中心

中国涂料工业协会

2024年1月31日

# 目 录

一、工作简况 .....	2
1 任务来源 .....	2
2 项目制定单位基本情况 .....	2
3 制定背景 .....	4
4 起草过程 .....	4
二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据 .....	6
1 编制原则 .....	6
2 标准主要内容 .....	6
2.1 标准框架结构 .....	6
2.2 标准适用范围 .....	6
2.3 术语和定义 .....	6
2.4 主要技术内容及说明 .....	7
3 国内外标准情况及参考文献 .....	26
3.1 国内外标准情况 .....	26
3.2 参考文献 .....	27
三、钛石膏综合利用综述分析 .....	27
1 钛石膏的产生 .....	27
2 钛石膏基本性质 .....	28
3 钛石膏综合利用现状 .....	37
4 钛石膏主要检测情况 .....	37
5 钛石膏利用主要技术 .....	46
四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况 .....	47
五、未采用国际标准的原因 .....	47
六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系 .....	47
七、重大分歧意见的处理经过和依据 .....	48
八、涉及专利的有关说明 .....	48
九、实施国家标准的要求 .....	48
十、其他应当说明的事项 .....	48

# 《钛石膏综合利用技术规范》国家标准 编制说明 (征求意见稿)

## 一、工作简况

### 1 任务来源

2023年3月21日，国家标准化管理委员会下发《关于下达2023年第一批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发[2023]10号），将《钛石膏综合利用技术规范》列为推荐性国家标准制定计划，计划号：20230107-T-605。本标准主管部门为中国钢铁工业协会，由全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会（TC579）归口，生态环境部固体废物与化学品管理技术中心、中国涂料工业协会牵头起草。

### 2 项目制定单位基本情况

#### 2.1 主要起草单位基本情况

##### 2.1.1 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心

生态环境部直属事业单位，受生态环境部委托，承担固体废物、化学品、重金属等风险防控和污染防治政策、法规、规划、标准、技术规范等研究拟订工作；开展固体废物污染防治和化学品、重金属环境管理相关调查、分析测试、技术鉴别、科学研究，以及相关国际公约履约的技术支持工作；承担危险废物越境转移核准、固体废物进口许可、危险化学品进出口环境管理登记、新化学物质环境管理登记等行政审批事项的技术审核复核工作；协助开展固体废物、化学品、重金属等环境管理的现场检查、日常监督，以及废弃电器电子产品拆解处理审核情况的技术复核。负责“无废城市”建设和尾矿库环境管理相关研究和技术支持工作；承担对地方固体废物与化学品管理机构的技术指导和服务工作；开展固体废物、化学品、重金属等环境管理方面的信息分析、技术服务、国际交流、宣传培训和社会咨询。

##### 2.1.2 中国涂料工业协会

由原国家经济委员会批准，1985年1月成立，在民政部注册登记。由全国涂料、颜料企业及相关企事业单位，按自愿平等的原则组成的跨行业、跨部门、具有社团法人资格的社团组织。2017年被中华人民共和国民政部评为“AAAA”级协会。协会以“为企业服务，为政府服务，为行业振兴发展服务”为宗旨，推动涂料相关行业工作全面发展，在行业政策法规、行业发展战略、行业高质量可持续发展、提升行业国际影响力、行业媒体宣传、涂料博览会等六个方面开展服务行业、服务政府、服务社会、服务群众的工作。并紧紧把握国家大气污染防治、碳达峰碳减排、绿色发展等重点政策，搭建政府与行业、企业之间的桥梁和纽带，助力行业、企业实现生态化、数字化、智能化、国际化、现代化，实现绿色低碳、安全高质量发展。

##### 2.1.3 攀西钒钛检验检测院

攀枝花市市场监督管理局所属公益二类事业单位，是四川省市场监督管理局计量授权、资质认定

(CMA)的法定计量检定机构和质量检验检测机构,同时也是国家市场监督管理总局核准的甲级特种设备检验检测机构,中国合格评定国家认可委员会(CNAS)认可的检测/校准实验室。建有1个国家级质检中心--国家钒钛制品质量检验检测中心,承担2个标准化委员会工作,即:全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会(SAC/TC579)、中国材料与试验团体标准委员会钒钛综合利用领域委员会(CSTM/FC20)。主要承担钒钛制品、工业产(商)品等质量安全监督检验,受理第三方申请的委托检验和仲裁检验;提供社会公正计量服务;承担特种设备安全检验检测及咨询服务;承担全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会秘书处工作,组织制(修)订相关标准;组织钒钛领域学术交流、标准宣贯,开展钒钛领域检测方法研究和仪器设备应用研发;负责研究建立、保存社会公用计量标准,进行量值传递,执行强制和法律规定的其他检定测试任务,为实施计量监督提供技术保证,承办有关法制计量工作;承担能效测试、计量仲裁检定工作。承担全市药品、医疗器械、药品包装材料、消费环节食品、保健食品、化妆品等相关的检验检测工作;承担全市药品不良反应监测和药物质量研究工作。

## 2.2 起草单位及主要成员

序号	姓名	单位
1	何艺、张东琦	生态环境部固体废物与化学品管理技术中心
2	齐祥昭、李力、王臻、陈钢	中国涂料工业协会
3	吕天宝、冯祥义、陈金国、武健民	山东鲁北化工股份有限公司
4	陆祥芳、邵国雄、刘志慧、谢华	宁波新福钛白粉有限公司
5	和奔流、吴彭森、陈建立、张玉荣	龙佰集团股份有限公司
6	朱义、仲利、罗贵玉、李子敬	攀西钒钛检验检测院
7	张浩、韦康	广西蓝星大华化工有限责任公司
8	周晓东、李峙	潜江方圆钛白有限公司
9	马兵、周昊、张后虎	生态环境部南京环境科学研究所
10	雍毅、郭卫广	四川省生态环境科学研究院
11	肖尚周、吴浩	山东省固体废物和危险化学品污染防治中心
12	韩春辉、陈新红	攀钢集团重庆钛业有限公司
13	颜廷智、马宪国	内蒙古国城资源综合利用有限公司
14	黎承健、周宇	广西金茂钛业股份有限公司
15	何明川、黄建文	广东惠云钛业股份有限公司
16	张本发、张修臻、唐仕钧	安徽金星钛白(集团)有限公司
17	孙鹏、张晓锋	山东东佳集团股份有限公司
18	郭海强、庞志俭	济南裕兴化工有限责任公司
19	蒙海宁、敖林	江苏镇江建筑科学研究院集团股份有限公司
20	华苏东、唐明亮	南京工业大学
21	陈红霞	北新集团建材股份有限公司
22	李崇	中国硫酸工业协会
23	张邦绪、周明勇	四川省钒钛钢铁产业协会
24	杨保祥、杨绍利	攀枝花市钒钛产业协会
25	龚家竹	成都千砺金科技创新有限公司

### 3 制定背景

钛白粉（学名二氧化钛，TiO<sub>2</sub>）被认为是世界上性能最好的白色颜料，广泛应用于涂料、塑料、造纸、油墨、化纤、橡胶、医药、电子、食品、化妆品等领域，与主要工业领域密切相关，钛白粉的消费量也成为衡量和评价国家工业化水平和人民生活水平的标志之一。

我国钛白粉生产始于 20 世纪 50 年代。从“十三五”开始，我国钛白粉行业进入快速发展时期，“十四五”期间其规模和质量继续得到全面提升。2015 年到 2022 年末，我国钛白粉产能由 329.6 万吨/年增长到 507.6 万吨/年，年均增速 7.7%；产量由 232.3 万吨/年增长到 392.5 万吨/年，年均增速 9.9%；2022 年我国产能、产量分别占全球钛白粉总产能 957.4 万吨的 53%、总产量 735.8 万吨的 53.3%，超过全球的一半，已成为世界最大的钛白粉产销国。

我国钛白粉生产近 90% 采用硫酸法工艺。除部分浓缩、净化处理后回用外，剩余酸性废水大多采用加入石灰石、石灰、电石渣等碱性物质进行中和处理，产生以二水石膏（CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O）为主要成分的沉淀物，即钛石膏。钛石膏先是灰褐色，再逐渐变成红色偏黄，因此钛石膏又被称为红泥、红石膏或黄石膏。

长期以来，我国钛石膏的综合利用未受到行业和企业的足够重视。调查发现，大多数钛白粉企业产生的钛石膏未达到行业标准《钛石膏》（JC/T 2625-2021）一级品或二级品指标的要求。具体来说，就是钛石膏中硫酸钙颗粒细小、游离水含量高。同时，《钛石膏》仅限于产品，没有具体的钛石膏应用指导，使得应有局限性未得到很好解决，这也是导致我国钛石膏一直未能得到大规模综合利用的主要原因。目前，钛石膏综合利用已经成为制约行业绿色可持续发展的难点。与磷石膏、脱硫石膏相比，钛石膏的综合利用率偏低，仅为 10% 左右，绝大部分钛石膏采用渣场堆存方式处置，存在较大环境风险。

为促进和提升新兴产业升级、推动钛石膏资源化利用、有效防控环境风险和解决行业难点问题，有必要尽快制定发布《钛石膏综合利用技术规范》国家标准。

### 4 起草过程

#### 4.1 立项和起草阶段（2021.05~2023.12）

2021 年 5 月-2023 年 3 月，开展项目前期调研，收集和分析相关资料，制定具体、可行的技术路线，撰写项目立项报告和项目建议书，完成立项申报和立项答辩。

2023 年 3 月 21 日，国家标准化管理委员会下发《关于下达 2023 年第一批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发〔2023〕10 号），由生态环境部固体废物与化学品管理技术中心牵头起草《钛石膏综合利用技术规范》（计划号：20230107-T-605）国家标准。

2023 年 4 月 6 日，召开标准制定工作启动会（线上视频会议），将项目的立项背景以及项目的主要任务和目标进行了说明，对项目工作进度和时间安排进行详细介绍，确定标准编写的总体思路，提出成立标准编制组和初步分工建议，提出样品检测指标清单、检测方法与样品分析调查问卷建议。

2023 年 5 月 6-7 日，召开第一次标准讨论会和实地调研。对标准文本初稿进行讨论，确定钛石膏综合利用的主要七个应用领域以及样品检测指标清单、检测方法与样品分析调查问卷；明确标准分组编写和各组牵头单位和负责人，成立标准编制工作总体组，对标准编制工作进行详细分工，并对下一步工作任务和工作进度作了详细安排。同时，到山东鲁北化工股份有限公司开展钛石膏综合利用现场调研，了

解企业钛石膏处理工艺、综合利用情况等。

2023年7月6-8日,召开第二次标准讨论会和实地调研。标准编制总体组对分组编制情况进行介绍,对标准文本讨论稿初稿进行充分讨论,对样品送检和指标检测情况进行了介绍,提出标准编制说明的编写要求,并对下一步工作任务和工作进度作了详细安排。同时,到宁波新福钛白粉有限公司开展钛石膏综合利用现场调研,了解企业钛石膏处理工艺、综合利用情况等。

2023年9月21日,召开第三次标准讨论会(线上)。标准编制总体组对标准编制说明初稿的编制情况进行介绍,并安排各编制小组就标准文本讨论稿初稿和编制说明初稿进行对照修改完善,明确总体要求,同时对标准编制工作的进展和安排进行了说明。

2023年9-10月,标准编制总体组针对标准修改稿征询业内有关专家的建议和意见,结合专家的建议和意见,对标准讨论稿各章节内容进行修改和完善。

2023年10月27-29日,召开第四次标准讨论会和实地调研。对标准文本讨论稿初稿、标准编制说明初稿进行讨论,计划11月份内完成讨论稿的修改,并建议邀请相关专家对标准文本和编制说明讨论稿进行审核、把关,形成标准文本征求意见稿和编制说明。同时,到龙佰集团股份有限公司开展钛石膏综合利用现场调研,了解企业钛石膏处理工艺、综合利用情况等。

2023年12月7日,召开第五次标准讨论会(线上)。根据参编企业提出的意见,组织有关人员为标准文本中回填等部分内容进行讨论,确定修改意见。

2023年12月9日,在中国涂料工业协会召开专家咨询会。专家对标准(讨论稿)和编制说明(讨论稿)从政策法规、环保、土壤与农业农村生态环境监管、农业资源、建材应用,以及标准格式、文字表述、相关指标要求等内容进行严格审核,并提出了宝贵的修改意见和建议。

2023年12月11-28日,根据专家咨询意见完成标准(草案)和编制说明的修改。

2023年12月31日前,将标准(草案)和编制说明呈报全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会(TC579)。

2023年1月1日-31日,TC579秘书处按照GB/T 1.1和GB/T 20001.5等标准起草文件的要求,修改完善标准(草案)和编制说明,并组织专家讨论,根据专家建议就其中部分有争议的地方与项目牵头单位进行了深入沟通,确保描述的准确性。

## 4.2 征求意见阶段(2024.1~2024.5)

### ① 广泛征求意见

在起草阶段工作基础上,由生态环境部固体废物与化学品管理技术中心提出标准草案征求意见稿,由全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会(TC579)向社会公开征求关于《钛石膏综合利用技术规范(征求意见稿)》国家标准的意见。

### ② 意见的反馈与处理

发送征求意见稿的单位数 个,收到征求意见稿后回函单位数 个,收到征求意见稿后回函并有建议或意见的单位数 个,没有回函的单位数 个。共收到意见 条。编制组对意见进行处理,采纳及原则采纳 条,占 %;未采纳 条,占 %。修改后形成送审稿。并经审议会专家意见修改完善,形成报批稿。

## 二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据

### 1 编制原则

根据《标准编写规则 第5部分：规范标准》（GB/T 20001.5-2017）和《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》（GB/T 1.1-2020）要求；积极采用国际标准和国外先进标准的原则；有利于促进技术进步，提高产品质量的原则；有利于合理利用资源，提高经济效益的原则；符合用户要求，保护消费者利益，促进对外贸易的原则；遵循科学性、先进性、统一性的原则。

### 2 标准主要内容

#### 2.1 标准框架结构

本标准的主要框架结构如下：

- 范围；
- 规范性引用文件；
- 术语和定义；
- 总体要求；
- 技术要求与证实方法；
- 污染物排放要求；
- 包装、标识、贮存和运输要求；
- 监测内容与频次。

#### 2.2 标准适用范围

本文件界定了钛石膏综合利用过程中的术语和定义，规定了钛石膏综合利用的总体要求，技术要求与污染控制、污染物排放要求，以及包装、标识、贮存、运输、监测频次等要求，描述了对应的证实方法。

本文件适用于以硫酸法工艺生产钛白粉时，为处理废酸及酸性废水而产生的，以二水硫酸钙（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）为主要成分的一般工业固体废物的综合利用。

#### 2.3 术语和定义

本节为对执行本标准的专门术语和对容易引起歧义的名词进行定义，主要包括钛石膏、钛石膏综合利用、建材利用、土地利用、生态修复、路基材料、充填、回填、土壤固化剂等10个：

##### 2.3.1 钛石膏 **titanium gypsum**

采用硫酸法工艺生产钛白粉时，以石灰石、石灰、电石渣等钙基碱性物质中和废酸及酸性废水，经过滤压滤处理产生的以二水硫酸钙（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）为主要成分的滤渣。

##### 2.3.2 钛石膏综合利用 **comprehensive utilization of titanium gypsum**

钛石膏（2.3.1）经预处理后，用于建材利用、土地利用、生态修复、路基材料、充填、回填、土壤固化以及制酸（副产水泥）等回收利用和无害化生产的经济技术活动。

##### 2.3.3 钛石膏建材利用 **utilization of titanium gypsum as building materials**

利用钛石膏（部分）替代天然石膏，或将其转化为建筑材料原料生产建材的过程。

注：钛石膏建材利用的主要形式包括水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂、特种水泥、石膏制品等。

### 2.3.4 钛石膏土地利用 **land application of titanium gypsum**

直接或间利用钛石膏（2.3.1）中的钙（Ca）、硫（S）元素调理土壤或生产人造土。

### 2.3.5 钛石膏生态修复 **ecological remediation of titanium gypsum**

利用钛石膏（2.3.1）土壤改良（2.3.4）的性能或作为基底材料，对遭到退化、损伤或破坏的生态系统进行修复，逐步恢复和重建其生态功能。

### 2.3.6 钛石膏路基材料 **titanium gypsum roadbed material**

钛石膏（2.3.1）与素土等一种或多种辅料按比例掺混，配制满足公路道路路基施工要求的混合料。

### 2.3.7 钛石膏充填 **mining with backfilling using titanium gypsum**

利用钛石膏（2.3.1）作为支撑围岩、防止岩石移动、控制地压或改善地貌的充填材料，用以恢复采矿等工程的地貌。

### 2.3.8 钛石膏回填 **backfilling using titanium gypsum**

在复垦、景观恢复、建设用地平整、农业用地平整以及防止地表塌陷的地貌保护等工程中，利用钛石膏（2.3.1）替代土、砂、石等材料填充地下采空空间、露天开采地表挖掘区、取土场、地下开采塌陷区以及天然坑洼区，使之实现复垦的目的。

### 2.3.9 钛石膏土壤固化剂 **titanium gypsum soil solidification admixtures**

将经干燥预处理的钛石膏（2.3.1）与水泥、粉煤灰等无机胶结料混合，制成用于固化土壤、改善基土工程性能的材料。

### 2.3.10 钛石膏制硫酸（副产水泥） **production of sulfuric acid from titanium gypsum (by-product cement)**

利用钛石膏（2.3.1）在高温还原气氛下分解的二氧化硫和氧化钙，生产工业硫酸及水泥熟料。

## 2.4 主要技术内容及说明

### 2.4.1 建材利用

#### 2.4.1.1 方法原理

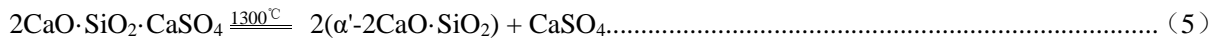
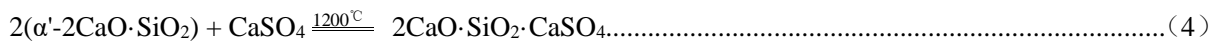
利用钛石膏直接代替天然石膏生产原料，或将其转化为建筑材料生产原料来生产建材的过程。钛石膏建材利用的主要形式包括水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂、特种水泥原料、石膏制品等。

1) 水泥缓凝剂：铝酸三钙（ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ）在钛石膏（ $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）、石灰 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 的饱和溶液中生成溶解度极低的钙矾石（ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ），钙矾石为棱柱状小晶体生长在水泥颗粒表面，形成一层薄膜，封闭水泥组分的表面，阻滞水分子以及离子的扩散，从而延缓水泥颗粒特别是铝酸三钙继续水化。反应方程式为：



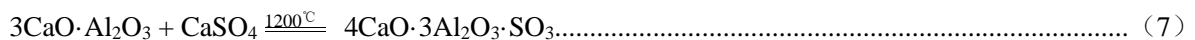
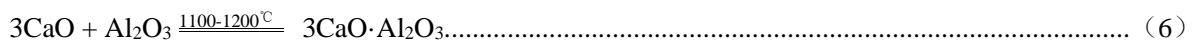


2) 矿化剂: 钛石膏作为含硫矿化剂加入熟料中, 对熟料的形成有强化作用。SO<sub>3</sub>能降低熟料形成时液相的粘度, 增加液相数量, 有利于硅酸三钙(3CaO·SiO<sub>2</sub>)的形成; 还可形成硫硅酸钙(2CaO·SiO<sub>2</sub>·CaSO<sub>4</sub>)及熟料矿物无水硫铝酸钙(4CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SO<sub>3</sub>)。反应方程式为:



3) 结构调制剂: 在硅酸盐水泥熟料中, 硅酸三钙(3CaO·SiO<sub>2</sub>)不以纯物质形式存在, 含有少量其他氧化物, 形成固溶体, 称为阿利特(Alite)或A矿, 常以单斜M3型结构存在。M1型阿利特水化活性优于M3型阿利特, 且含M1型阿利特的熟料强度比含M3型熟料高约10%。通过钛石膏中SO<sub>3</sub>与生料中MgO在熟料烧成过程中固溶进入阿利特结构, 导致阿利特晶格发生畸变, M3型阿利特转变为M1型, 水化活性位点增多, 熟料性能得以提升。

4) 特种水泥原料: 以铝质、钙质材料和钛石膏为主要原料, 按适当比例配置成生料, 煅烧至部分熔融, 固相反应过程中CaO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在1100°C开始大量形成铝酸三钙(3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 温度达到1200°C, 部分铝酸三钙与硫酸钙(CaSO<sub>4</sub>)反应生成无水硫铝酸钙(4CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SO<sub>3</sub>), 经冷却成为特种水泥主要矿物相。反应方程式为:



5) 石膏制品: 以钛石膏为原料, 经干燥、除杂、煅烧、水热等方式制备α-CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O与β-CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O, 然后以原状钛石膏、α-CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O或β-CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O为原料, 掺入适当纤维增强材料、集料、不同功能外加剂经混合、搅拌、成型、养护后形成的纸面石膏板、石膏砌块、抹灰石膏、蒸压加气混凝土等建筑材料。

### 2.4.1.2 工艺流程

钛石膏生产水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂、特种水泥的主要工艺流程见图1。生产过程宜按如下步骤进行:

a) 破碎: 将陈化钛石膏和其他原料破碎混合, 制成均质混合料(生料), 钛石膏用做水泥助剂(矿化剂、结构调制剂)及水泥原料在此阶段加入配伍;

b) 预处理: 将均质混合料(生料)送入预热, 除去水分及有机物;

c) 烧成: 将预热生料送入回转窑烧成, 发生固相反应;

注: 用做矿化剂、结构调制剂的钛石膏, 在此阶段将促进矿相形成及发生晶体结构转变。

d) 粉磨: 将烧成的熟料与石膏(3%~5%)及混合材料按比例粉磨制成水泥, 钛石膏用做缓凝剂在此环节替代天然石膏。

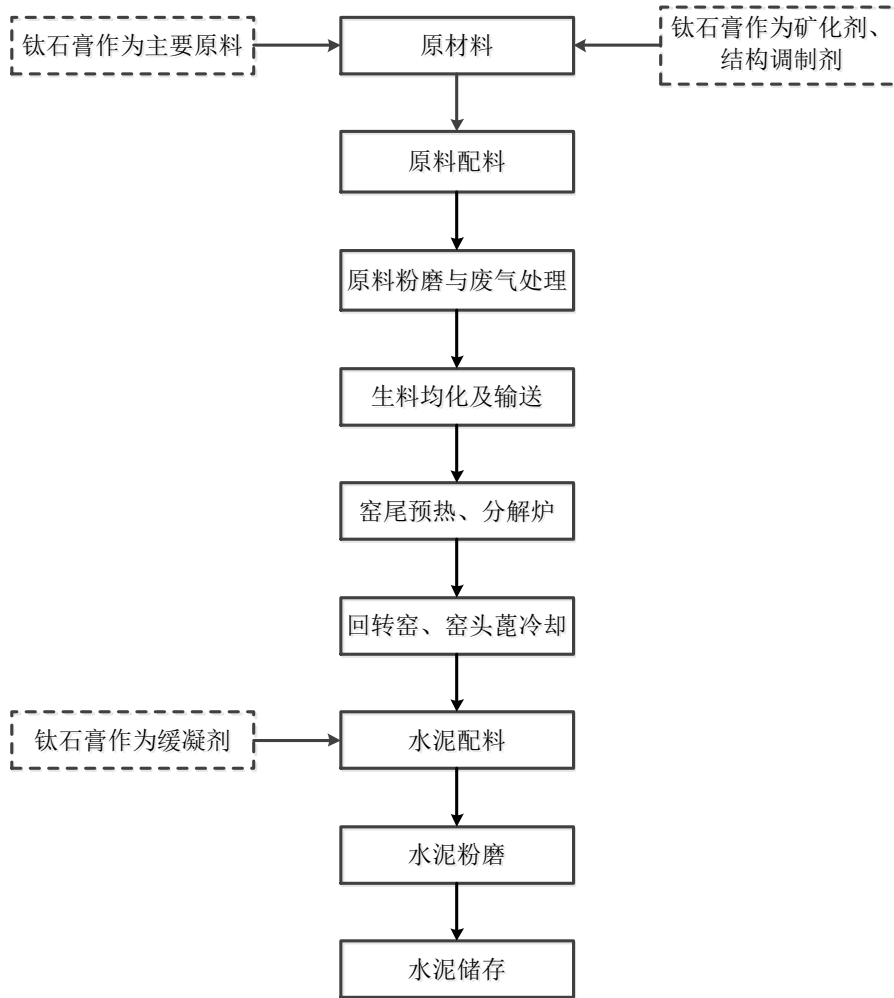


图1 钛石膏建材利用（水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂、特种水泥）工艺流程示意图  
 钛石膏制备石膏制品的主要工艺流程如图2所示。

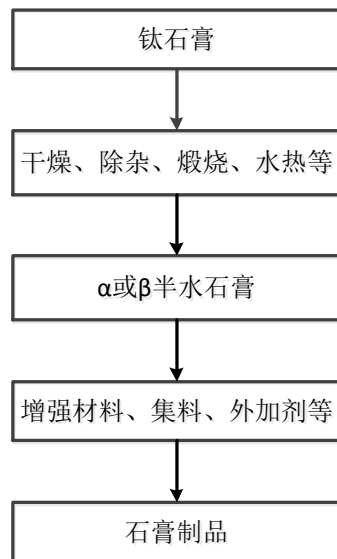


图2 钛石膏制品工艺流程示意图

### 2.4.1.3 材料制备

破碎：将钛石膏和其他原料进行破碎混合，制成均匀混合料（生料），用作原料及助剂（矿化剂、结构调制剂）的钛石膏在此阶段加入并配伍。

预处理：将均质混合料（生料）送入预热器进行预热，使生料的水分及有机物挥发。

烧成：将预热生料送入回转窑进行烧成，生料在烧成过程中发生固相反应，钛石膏作为矿化剂及结构调制剂时，在此阶段发挥作用，促进矿相形成及发生晶体结构转变。

粉磨：将烧成的熟料配合石膏及混合材按一定比例加入水泥磨粉磨，制成水泥，钛石膏作为缓凝剂时，在此环节替代天然石膏，对水泥起到缓凝作用。

包装：将磨制好的水泥装袋包装，质检合格后出厂。

#### 2.4.1.4 原材料要求

钛石膏作为水泥缓凝剂时，应满足GB/T 21371的要求。

钛石膏作为通用硅酸盐水泥熟料以及硫铝酸盐水泥等特种水泥的矿化剂、结构调制剂时，应进行验证，满足GB 175和GB/T 20472的要求，证明对水泥性能无害。

利用钛石膏生产建筑石膏及高强石膏时，宜对钛石膏进行除铁预处理。

#### 2.4.1.5 产品性能要求

利用钛石膏生产的通用硅酸盐水泥，产品性能应满足GB 175的要求。

利用钛石膏生产的硫铝酸盐水泥，产品性能应满足GB 20472的要求。

利用钛石膏生产的建筑石膏，产品性能应满足GB/T 9776的要求。其他性能，如白度等，由双方商定。

利用钛石膏生产的高强石膏，产品性能应满足JC/T 2038的要求。

利用钛石膏生产的纸面石膏板、石膏砌块、抹灰石膏、蒸压加气混凝土砌块，产品性能应分别满足GB/T 9775、JC/T 698、GB/T 28627、GB/T 11968的要求。

#### 2.4.1.6 有害成分控制要求

用钛石膏为原料制成的建材产品中的有害物质含量应满足GB/T 30760要求。

### 2.4.2 土地利用

#### 2.4.2.1 方法原理

钛石膏粉碎（如有需要加入石灰混匀调节pH值）制备成土壤调理剂，或粉碎后与有机质、沙土等按比例混合均化制备人造土。

钛石膏用于土地利用，本质是用钛石膏制备人工土壤产品，对于以植物生产为目的的人工土壤来说，其骨架应以无机物为主，而有机物质主要是提供植物所必需的养分来源，以及作为形成土壤特定有机无机复合体结构所必需的组成分。利用有机和无机固体废物特性，将两者按一定比例混合制造新型人工土壤，可以赋予其某些特殊功能，如作为环境修复材料修复污染土壤等。此类土壤被命名为“技术新成土”，特指所有性质和成土过程均由技术决定的土壤，并于2006年被国际土壤学会正式列为土壤学分类中的一个新土类。石膏类土壤是针对目前土壤失衡或缺乏的问题，利用石膏中的硫元素和钙元素，复配其他的原料，向农作物提供生长必要的中微量元素，对土壤成分进行有效平衡。

本标准所提及的钛石膏配置比例，一般应不低于70%。

#### 2.4.2.2 工艺流程

钛石膏制备人造土的主要工艺流程见图3。

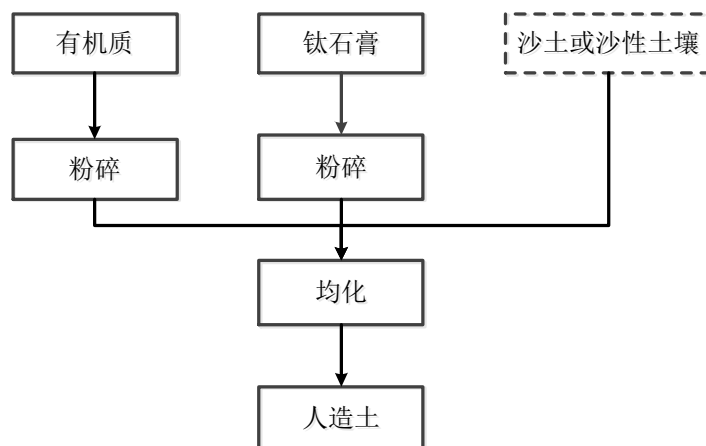


图3 钛石膏制备人造土工艺流程图

有机质和沙土等选择较多，生活污水、牛粪、蚯蚓粪、菌菇渣、有机堆肥等均可用作人工土壤的有机质来源，沙土的主要作用是改善人工土壤结构，石膏类工业固废作为植生材料最大的问题是不具备土壤结构（孔隙度、团聚体稳定性），加入沙土可有效改变其土壤结构，有机质及沙土选择应因地制宜，选择适宜的材料，包括有机质、沙土等，也可以选用原有植被层。由于不同植物对土壤要求不同，相关要求在TD/T 1036及CJJ 82等中有所规定，因此在选择配置比例时，最终产品要满足上述两个标准的规定。

#### 2.4.2.3 原材料要求

1) 用于生产土壤调理剂产品的钛石膏应满足NY/T 3034相关要求，粒径和pH值以及相应的配施措施应根据土地的土壤特性调整。

2) 钛石膏制备人造土时，pH值应大于6，与之对应的风险管制值应满足GB 15618的要求。。

本标准定义钛石膏未限定钛石膏为一般工业固体废物I类，属于一般工业固体废物II类的钛石膏存在pH值过低或过高的问题，同时有部分重金属超标，制成的产品无法满足GB 15618的要求，也会导致地下水指标超过GB/T 14848的要求。

附着水含量需要控制在25%以下，实验发现水分含量过高会导致粉碎困难，同时也不利于成品保存。

用于生产土壤改良（治理）剂、园林绿化用土以及覆盖用土的有机质，镉、汞、砷、铅、铬元素应满足GB 15618风险管制值及CJJ/T 82要求。本条引用GB 15618中第5条和CJJ/T 82中4.1.3条1-4款相关规定。土地利用和生态修复工艺无法在后续去除相关有害成分，同时为保障最终产品满足国家标准，因此限定原料成分及主要污染物。

#### 2.4.2.4 产品性能要求

本部分涉及比例、颗粒大小、厚土层厚度、耕作层厚度等选择，取决于修复后的用途，以及选择种植的植物类型，选择方式已在本标准描述。

#### 2.4.2.5 产品性能指标

##### 1) 土壤调理剂

利用钛石膏制备的土壤调理剂，技术指标应符合NY/T 3034的要求，且施用土壤pH值不小于3；施用后不降低土地等级，土地等级按GB/T 33469确定。

根据锰的浸出特性，在pH小于3时可能存在锰浸出风险。

##### 2) 人造土

利用钛石膏制备的人造土，宜用于培植喜铁或铁含量高、无负面影响的植物，其应用分类与对用途的要求分别按GB/T 21010、TD/T 1036确定。

钛石膏一般含有较高的铁含量，能促进喜铁或铁含量高的植物生产有促进作业，如菠菜、茉莉花等；但同时会阻碍厌铁植物的生长，如水稻等。

#### 2.4.2.6 有害成分控制要求

利用钛石膏制备的土壤调理剂，污染物含量应同时满足GB 15618风险筛选值和NY 1110的要求。

利用钛石膏制备的人造土，用于种植农产品时，污染物含量应满足GB 15618风险筛选值的要求；用于其他时，污染物含量应满足GB 15618风险管制值的要求。

利用钛石膏生态修复以及制备的土地利用产品用于土地后，地下水指标应满足GB/T 14848中IV类相关指标。GB/T 14848中4.1条规定IV类水以农业和工业用水要求为依据。除适用于农业和部分工业用水外，适当处理后可作生活饮用水。钛石膏用于土地利用和生态修复后，主要用于农业生产和工业建筑，因此本标准规定生态修复以及制备的土地产品用于土地后，满足GB/T 14848规定的IV类水。GB/T 14848中4.2条中规定了IV类水各项指标，包括硬度、铁、锰等含量要求。

同时，利用钛石膏制备的土壤调理剂产品，因满足其相应的产品质量标准，即需满足NY 1110的要求。

#### 2.4.3 生态修复

##### 2.4.3.1 方法原理

利用钛石膏本身的物理和化学特性，配合原有表土、人造土等，对存量采矿用地、未利用地、损毁土地等，进行原址场地平整、复垦及植被种植，恢复其生态功能。

利用钛石膏开展生态修复，应满足《土地复垦条例》有关规定及要求。

利用钛石膏开展生态修复，应参照TD/T 1068编制项目实施方案，批复后作为项目实施的依据。

本标准涉及的土地类型依据《中华人民共和国土地管理法》第四条划分，也可参照GB/T 21010中表A.1划分。

##### 2.4.3.2 工艺流程

工艺流程如图4。

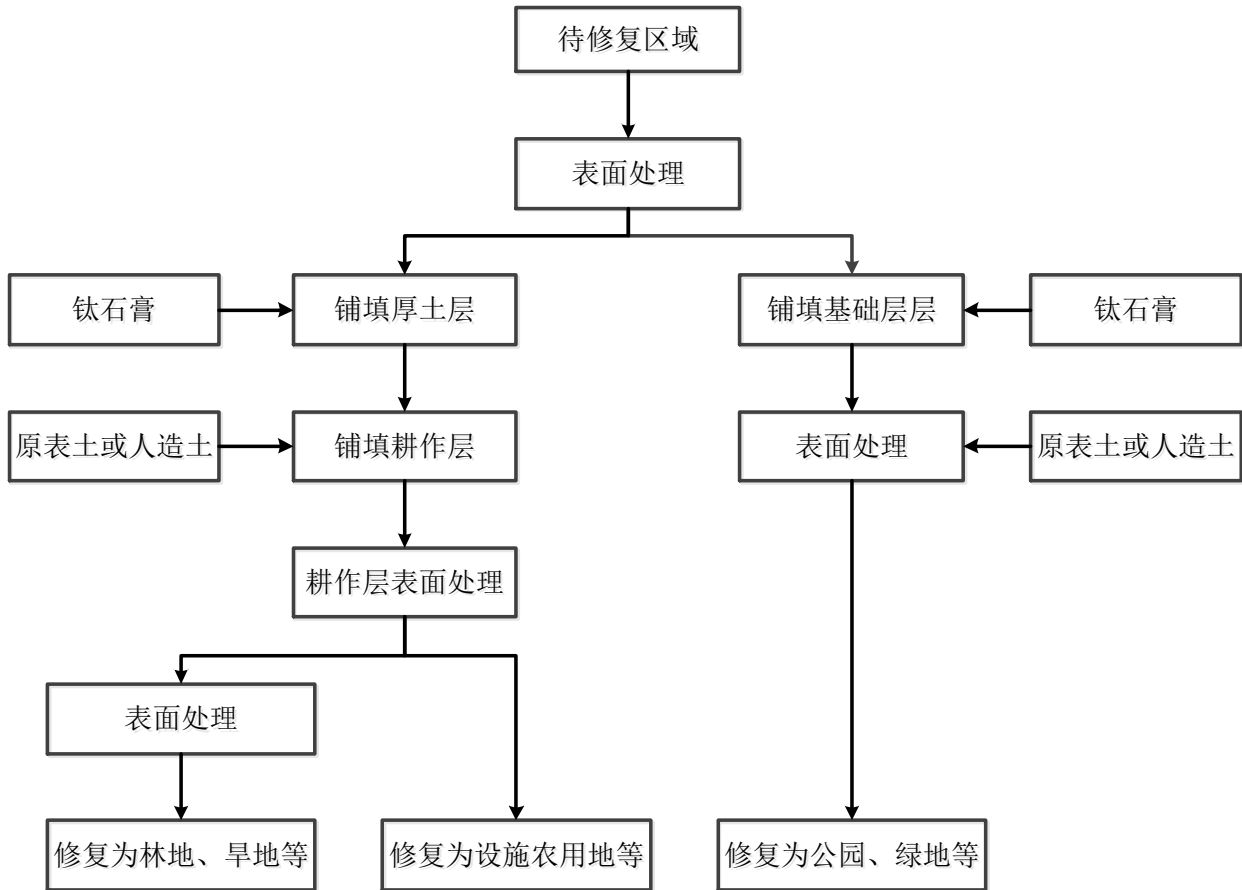


图4 钛石膏用于生态修复工艺流程

#### 2.4.3.3 原料要求

用于生态修复的钛石膏，应满足GB 18599对一般工业固体废物I类的要求，其中用于林地、旱地、设施农用地等的，污染物含量应满足GB 15618中风险筛选值的要求；永久用于公园与绿地的，污染物含量应满足GB 36600中风险筛选值的要求。

钛石膏中附着水含量应不大于44%，附着水含量的测定按GB/T 5484—2012中第9章的规定执行。

钛石膏的pH值应为7.5~9.0，pH值的测定按GB/T 5484—2012中第9章的规定执行。

本条规定pH值主要为了保证生态修复后环境能达到相关标准而设立；附着水控制在44%以下，钛石膏成固态，附着水超过该含量后，钛石膏呈糊状，无法用于生态修复施工。

#### 2.4.3.4 生态修复施工要求

根据原址土地用途，利用钛石膏将存量采矿用地、未利用地、损毁土地等修复为农用地、公园与绿地。

为满足生态修复过程中机械施工及安全的要求，应对待修复区域表面进行处理。

修复区域用于林地、旱地、公园与绿地的，铺填厚土层和耕作层应使用原表土或人造土（2.4.2）；用于设施农用地的，表面应按项目建设要求进行压实处理。

生态修复项目完工后，应尽快交由需方使用。

#### 2.4.3.5 生态修复要求

利用钛石膏生态修复时，农产品质量安全、人居环境安全和人体健康安全应满足法律法规的要求。根据修复区域土地原使用性质和有关政府部门文件要求，因地制宜地开展钛石膏生态修复。

修复区域用于农用地的，土地复垦质量控制标准应满足TD/T 1036—2013中附录D的要求，试验方法按NY/T 1121执行；用于公园与绿地的，栽植基础应满足CJJ 82—2012中4.1的要求。

#### 2.4.3.6 有害成分控制要求

钛石膏用于生态修复，地下水应满足GB/T 14848—2017中规定的IV类水质要求。

钛石膏用于生态修复，污染物含量应同时满足GB 15618和TD/T 1036的要求。修复后种植的粮食、果实、牧草等作物中有害成份含量应满足TD/T 1036中对于不同复垦场地的要求。生态修复后土地用作农用地，土壤污染物含量应满足GB 15618中风险筛选值要求。修复区域用于公园与绿地的污染物含量应满足GB 36600中风险筛选值的要求。

#### 2.4.4 路基材料

##### 2.4.4.1 方法原理

钛石膏与素土、胶结料（如水泥、石灰、矿粉、粉煤灰、固化剂等）等一种或多种辅料按比例掺混，配制成路基材料，经过摊铺、压实后用于道路路基的施工。

钛石膏与素土、胶结料（如水泥/石灰/矿粉/粉煤灰/固化剂等）等一种或多种辅料按比例进行掺混，成品即路基材料，其中钛石膏比例为5%~10%，其膨胀率、塑性指数、液限指数、垫层承载力、压实度等参数指标满足道路路基施工相关要求，经过摊铺、压实后用于道路路基。

掺混工作由生产单位或使用单位协商确定，一是由生产单位在厂内进行掺混；二是由使用单位在道路施工现场进行掺混；三是由生产单位在厂内进行初步掺混，运至道路路基施工现场后由使用单位进行二次掺混。

##### 2.4.4.2 工艺流程

工艺流程如图5。

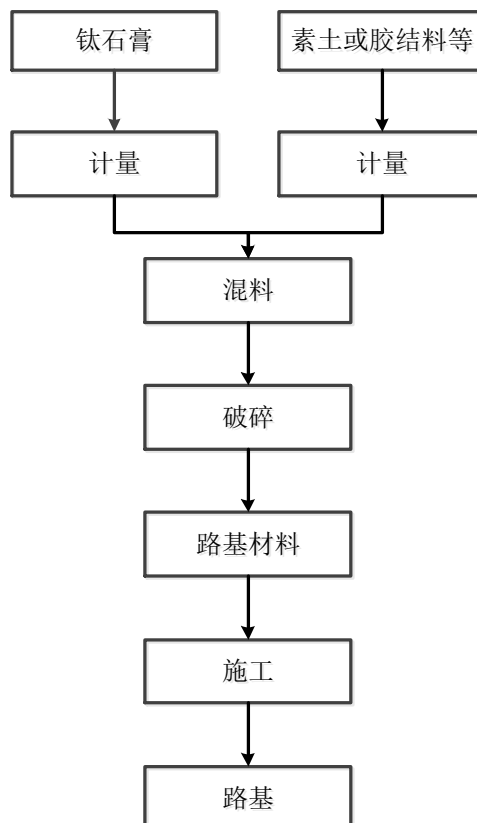


图5 钛石膏用于路基材料施工工艺流程图

## 2.4.4.3 原材料要求

路基材料用钛石膏的质量要求及分析方法按表 2 的规定进行。

表2 路基材料用钛石膏质量要求

项目	指标	分析方法
三氧化二铁 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 含量 w/%	≤15	GB/T 5484—2012 中第 15 章
水溶性氧化镁 (MgO) 含量 (干基) w/%	≤2	GB/T 5484—2012 中第 27 章
水溶性氧化钾 (K <sub>2</sub> O) 含量 (干基) w/%	≤0.3	GB/T 5484—2012 中第 28 章
pH 值	6-9	GB/T 5484—2012 中第 25 章
内照射指数 I <sub>Ra</sub>	≤1	GB 6566
外照射指数 I <sub>r</sub>	≤1	
附着水 (H <sub>2</sub> O) 含量 (湿基) w/%	≤40	GB/T 5484—2012 中第 9 章
二水硫酸钙 (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O) 含量 (干基) w/%	≥75	本文件中附录 A

## 2.4.4.4 产品性能指标

路基材料质量应符合 JTG/T F20 中规定的相应交通等级分类抗压强度要求。不同产品等级的路基材料应用于不同等级的道路，一级品可用于高速公路、一级公路，二级品可用于二级公路，三级品可用于三、四级公路，性能宜满足表 3 要求，使用性能应由生产单位与使用单位商定。

表3 路基材料产品等级指标

路基部位	项目	指标			分析方法
		一级品	二级品	三级品	
上堤路	液限/%	≤50			JTG 3430—2020 中第 9 章
	塑限/%	≤26			JTG 3430—2020 中第 9 章
	承重比/%	≥8	6~8	5~6	JTG 3430—2020 中第 18 章
	压实度/%	≥94		93~94	JTG 3430—2020 中第 16 章
	自有膨胀率/%	≤40	40~60		JTG 3430—2020 中第 16 章
下堤路	液限/%	≤50			JTG 3430—2020 中第 9 章
	塑限/%	≤26			JTG 3430—2020 中第 9 章
	承重比/%	≥5	4~5	3~4	JTG 3430—2020 中第 18 章
	压实度/%	≥93	92~93	90~92	JTG 3430—2020 中第 16 章
	自有膨胀率/%	≤60			JTG 3430—2020 中第 16 章

## 2.4.4.5 产品使用要求

钛石膏制备的路基材料可用于公路路堤填筑、路基垫层填料，不应用于高速公路、一级公路路床和路堤浸水部分。

根据 JTGD30-2015 中工业废渣路堤的要求，须符合国家现行环境保护的有关规定，严禁采用含有有害物质的工业废渣作为路堤填料；工业废渣不应用于浸水地段，以及洪水浸淹部位。

根据 JTG/T3610-2019 的要求，工业废渣可用于公路路堤填筑，不得用于高速公路、一级公路路床和路堤浸水部分。

膨胀土作为路基填料时应符合下列规定：



- 1) 中等膨胀土、弱膨胀土的适用范围应符合表4的规定。膨胀掺拌石灰改良后可用作路基填料，掺灰处置后的膨胀土不宜用于高速公路、一级公路的路床和二级公路的上路床。
- 2) 高填方、陡坡路基不宜采用膨胀土填筑强膨胀土不得作为路基填料。
- 3) 路基浸水部分不得用膨胀土填筑。
- 4) 桥台背、挡土墙背、涵洞背等部位严禁采用膨胀土填筑。

表4 中等膨胀土、弱膨胀土的适用范围

位置	公路等级		
	高速、一级公路	二级公路	三级公路
上床路	-	-	-
下床路	-	-	弱
上路堤	-	中、弱	中、弱
下路堤	中、弱	中、弱	中、弱

#### 2.4.4.6 有害成分控制要求

利用钛石膏生产路基材料时，产品中的砷、铅、镉、铬、铜、镍、锌、锰的含量应满足GB/T 30760—2014中表2的限值要求（见表5），重金属污染物浸出浓度应满足GB/T 30760—2014中表3的限值要求（见表6）。

表5 《水泥窑协同处置固体废物技术规范》（GB 30760-2014）表2要求

指标	标准限值/（mg/kg）	执行排放标准
砷	40	产品中的砷、铅、镉、铬、铜、镍、锌、锰的含量不应超过 GB 30760-2014 中表 2 的限值要求
铅	100	
镉	1.5	
铬	150	
铜	100	
镍	100	
锌	500	
锰	600	

表6 《水泥窑协同处置固体废物技术规范》（GB 30760-2014）表3要求

指标	标准限值（mg/L）	执行排放标准
砷	0.1	产品中的砷、铅、镉、铬、铜、镍、锌、锰的重金属污染物浸出浓度应满足 GB 30760-2014 中表 3 的限值要求。
铅	0.3	
镉	0.03	
铬	0.2	
铜	1	
镍	0.2	
锌	1	
锰	1	

#### 2.4.5 充填

##### 2.4.5.1 方法原理

钛石膏充填，是将含一定含水率的钛石膏，通过运输机械运输至充填场地，进行充填作业，在充填作业过程中根据实际情况，选择合适的充填作业方法，最后进行充填场地的封场及生态修复。

#### 2.4.5.2 工艺流程

工艺流程如图6所示。

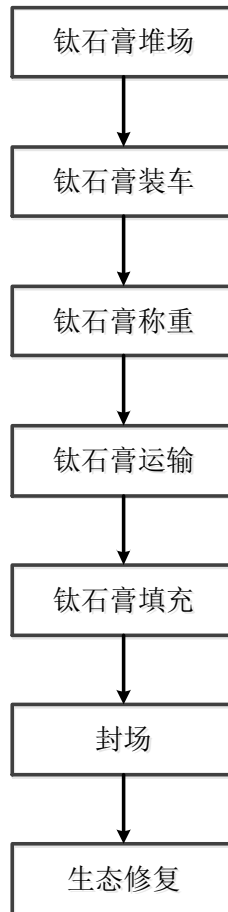


图6 钛石膏充填工艺流程图

#### 2.4.5.3 材料制备

将酸性废水经中和处理后的浆液，通过带式过滤器、板框过滤器或离心机等过滤设备，进行固液分离，制得含一定水分的钛石膏，经皮带等输送设备输送至钛石膏堆场。

#### 2.4.5.4 原材料指标要求

液固分离后的钛石膏，应符合表7的要求。

表7 填充用钛石膏指标

项目	限值	依据	分析方法
含水率 (w) /%	≤45	—	GB/T 5484—2012 中第 9 章
pH 值	6~9	GB 18599-2020 中第 3.6 条	HJ 1147—2020

#### 2.4.5.5 产品性能要求

进行充填的钛石膏，应符合表8的要求。

表8 填充用钛石膏指标

序号	项目	指标	依据	分析方法
1	六价铬/ (mg/L)	≤0.5	GB 8978—1996 中表 1、表 4	HJ 908
2	汞/ (mg/L)	≤0.05		HJ 702
3	铅/ (mg/L)	≤1.0		HJ 786
4	总镉/ (mg/L)	≤0.1		HJ 786
5	铜/ (mg/L)	≤0.5		HJ 751
6	镍/ (mg/L)	≤1.0		HJ 751
7	砷/ (mg/L)	≤0.5		HJ 702
8	总铬/ (mg/L)	≤1.5		HJ 749
9	锰/ (mg/L)	≤2.0		GB/T 11911
10	锌/ (mg/L)	≤2		HJ 786
11	氰化物/ (mg/L)	≤0.5		HJ 823
12	硫化物/ (mg/L)	≤1.0		HJ 1226
13	氟化物/ (mg/L)	≤10		GB/T 7484

#### 2.4.5.6 产品使用要求

钛石膏的充填场地范围确定、充填场地整治方案、充填方案、安全措施方案和生态恢复方案等，应符合当地总体发展规划、环境保护规划和生态建设规划的要求。

运输应利用机械，按指定路线行驶至目的地，运输过程中不得发生扬尘、抛洒、漏液等现象。

充填场地应定期检查维护防渗工程，定期监测地下水水质，发现异常，应及时采取必要措施。

充填场地应定期检查维护，定期监测地下水水质，发现异常应及时采取必要措施。

充填场地服务期满后，应启动封场作业，可分期实施，按照相关规定进行土地修复。

#### 2.4.5.7 有害成分控制要去

填充用钛石膏中有害成分，应满足 HJ 557 和 GB 8978 的要求，且 pH 值应为 6~9。

用于充填的钛石膏的成分控制，按照 HJ557-2010 和 GB 8978-1996 的相关要求，有机物、水溶性盐参照 GB 18599-2022，含量不应超标准限值，其 pH 值为 6~9。

### 2.4.6 回填

#### 2.4.6.1 方法原理

利用钛石膏材料替代土、砂等材料回填露天开采地表挖掘区、取土场以及天然坑洼区等区域。钛石膏回填方式分为粉块状压实回填和胶凝固化回填。粉块状压实回填是将钛石膏破碎后，分层填筑并压实到采坑中的过程；胶凝固化回填是将钛石膏和胶凝材料通过浇筑的方式固化到采坑的过程。

采坑回填一般将原矿中无用的废石、尾矿或传统土、砂、石等重新回填到采坑的活动，因废石、尾矿等原本属于采坑内容物，一般回填过程不会带来新的污染问题。若采用钛石膏或钛石膏基材料替代尾矿或土、砂、石等材料回填到不同性质的采坑中，就需要按照 GB 18599 要求，进行相应的环境风险评估。从国内外回填工程经验来看，回填方式主要分为粉块状压实回填和添加胶凝材料进行的固化回填两种方式。

粉块状回填方式是将钛石膏等工业固废进行脱水、粉碎等预处理后，形成类似土、砂物质（按 GB/T50145-2007 分类后，名称为低液限含砂粉土），其力学性能与一般细粒土基本相似，塑限与最优含水率接近，只要控制好污染物，就可替代传统砂土进行压实回填。胶凝固化回填是类似于混凝土浇筑

回填过程，是在钛石膏中添加一定比例胶凝材料（水泥或建筑石膏粉），并添加一定比例水，将钛石膏固化到采坑的过程。胶凝固化回填过程因添加胶凝材料，对污染物的固化作用较好，但其成本高、施工过程复杂。

#### 2.4.6.2 工艺流程

钛石膏进行回填首先要对含水率、pH 值和特征污染物进行控制，满足环保和工程要求，其次回填场地也需要进行前期本底调查和风险评估，要综合考虑回填场地本身性质、周边环境敏感目标以及钛石膏本身的污染特征，进行综合评估，风险可接受后，方可进行下一步回填工作。回填方案要根据采坑地形、地基条件和周边地下水、地表水和土壤情况制定，必要时要进行防渗工程，在回填工程结束后，还需根据用地规划进行相应的生态恢复或土地复垦，并进行后期维护管理和跟踪环境监测。

工艺流程如图 7 所示。

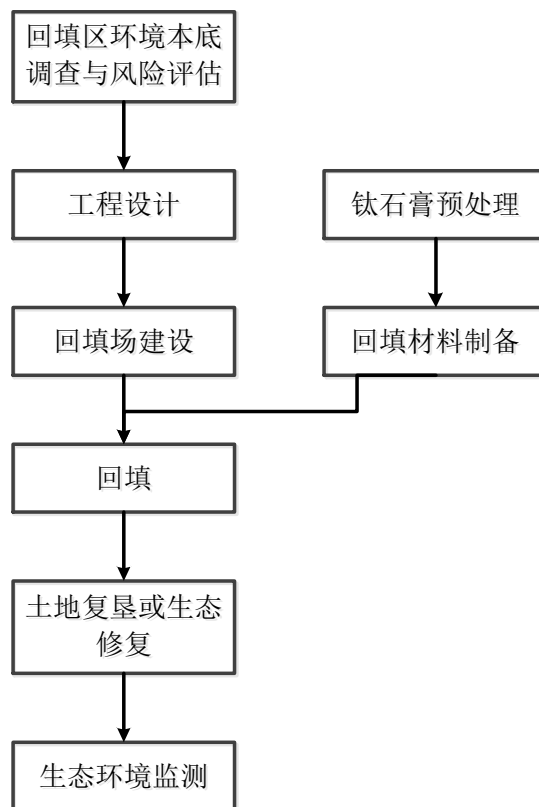


图7 钛石膏回填工艺流程图

#### 2.4.6.3 原材料指标要求

经过全国钛石膏样品采样和测试分析，钛石膏的主要特征污染物为重金属和 pH 值，其有机物含量较低，测试结果显示我国钛石膏大部分为一般工业固体废物 I 类，个别白石膏因 pH 值过低属于一般工业固体废物 II 类，大部分钛石膏符合要求。

钛石膏回填对钛石膏附着水有一定要求，含水率太高或太低，都会影响工程效果，如粉状回填需要在合适的含水率范围内，才能得到更好的压实度，同样胶凝固化回填对钛石膏含水率也有要求，会影响后续胶凝材料和搅拌用水的添加量，本标准建议钛石膏的附着水控制在 40% 以下，具体根据工程经验和实际工程试验来确定。

考虑到钛石膏回填后续用地可能用于建设用地，建议钛石膏放射性核素限值符合 GB 6566 的要求。

#### 2.4.6.4 材料制备

根据实际工程经验，若采用粉块状回填，其回填过程需要分层压实，压实度宜 $\geq 90\%$ ；若采用胶凝固化回填方式，施工过程参照混凝土施工技术规范，一般需将钛石膏中添加适当比例胶凝材料和水进行伴混成浆体，浇筑至采坑中并进行振捣，后期需养护成型和凝固；若采用胶凝固化回填方式，添加的胶凝材料采用建筑石膏粉时应满足 GB/T 9776 相关指标要求；若胶凝材料采用水泥，质量满足 GB175 中 42.5 强度等级的标准要求，重金属污染物含量满足 GB30760 要求；若采用胶凝固化回填方式，回填材料在固化后，室内养护 28d 后，单轴抗压强度至少 $>0.5\text{MPa}$ ，具体强度要求应满足实际工程设计要求。

#### 2.4.6.5 技术指标要求

##### 1) 回填场地要求

综合考虑《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国城乡规划法》《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国土壤污染防治法》《自然保护区条例》《中华人民共和国基本农田保护条例》《饮用水水源保护区污染防治管理规定》《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》（GB18599）等法律法规和标准要求，对钛石膏回填场地选址做出基本要求，同时规定了禁止回填的场地。

##### 2) 污染防治要求

根据不同矿山和矿坑类型以及修复目标，回填方案应满足 HJ 651、HJ 652、GB 18599、AQ 2006 等矿山生态修复、一般工业固体废物堆场污染控制及安全技术相关技术规范的要求，需根据充填区域的实际情况进行设计，内容可包括场地平整、防渗、排水设施、边坡防护和防止滑坡、泥石流等灾害发生的方案。

考虑到钛石膏主要成分为二水硫酸钙，微溶于水，其浸出液中硫酸根浓度超 GB/T 14848 中硫酸根浓度限值，本标准要求回填方案中需增加设置截洪沟、防渗工程、滤出水收集工程以及地下水保护工程等内容。具体如下：1) 回填区周边宜根据地形设置截洪沟，避免回填区外雨水进入回填区；2) 回填场地的防渗方案设计参照 GB 18599 的有关规范要求；3) 滤出水宜通过底部铺设的导排系统收集至收集池，收集池渗透系数小于  $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ；4) 泌出水宜全部收集，定期监测，若滤出水长期稳定达到 GB 5084 标准，可作为农田灌溉水施用；根据周边不同收纳水体要求，若滤出水达到 GB3838 要求，可直接排放；5) 回填工程经环境风险评估可能对地下水有潜在影响的，应首先对回填一般工业固体废物进行预处理，确保其环境风险可以接受，如有需要的可在回填区与基础层之间设置隔水层，其隔水效力应至少相当于渗透系数不大于  $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  且厚度为 0.75 m 的天然基础层。

##### 3) 运输要求

本标准重点对回填作业提出了技术要求，包括钛石膏运输和回填过程技术要求。钛石膏运输要求主要包括：钛石膏装车、运输过程中运输过程需做好封闭、扬尘等措施，防止散落、滴漏；钛石膏运输车辆必须按指定路线行驶至目的地，不得擅自转移、处置。

##### 4) 回填过程要求

考虑到钛石膏微溶于水，回填区域积水后造成粉块状回填体软化，以及胶凝固化回填体强度和防水性能降低，本标准要求回填过程应避免雨天作业，做好雨天的防雨遮盖和应急工作。应设置不小于 1% 的坡度，坡向两侧设置排水沟，以保证平台顶部雨水顺利排至截洪沟。

粉块状钛石膏如果进行回填，不进行压实的话，容易造成整体沉降，为了保证压实效果，需要进行分层压实，若回填区域依据地形需要造坡，总体边坡坡比不应大于 1:3。

胶凝固化回填方式若采用浇筑方式，需要从低到高依次分层支模浇筑，等下层硬化后，再进行上层的支模和浇筑若施工过程中有泌出水产生，泌出水产量不大，但一般污染物浓度比较高，需要收集处理。

整个回填作业过程应参照 HJ/T 393 相关要求，采取如洒水、喷洒抑尘剂等必要措施，防治扬尘。施工期安全措施方案应满足 AQ/T 4256 的相关要求。

##### 5) 回填工程管理要求

整个回填过程，需要回填工程责任单位参照 GB/T 50326 对工程进行管理：应建立档案制度，详细

记录工程建设及管理情况，主要包括钛石膏数量及来源、钛石膏性质、回填位置及深度、回填质量控制、抑尘措施、防渗层检验情况（需要做防渗工程的）、管理制度建设及实施情况等。必要时应采用影像记录方式，长期保存，供随时查阅。回填作业过程中，现场须设有安全、质量专职监督人员，对回填作业过程予以监督，确保作业过程安全、符合环保要求。需要做防渗工程的回填场地应定期检查维护防渗工程，定期监测地下水水质，发现防渗功能下降，应及时采取必要措施，最终保证回填工程质量。

#### 6) 回填管理要求

回填工程后，需要对回填区域进行必要的生态修复或土地复垦、后期维护管理和环境监测监管，主要包括：1) 定期巡检和维护，防止覆盖层不均匀沉降、开裂；2) 回填工程后，可依据当地地形条件、水资源及表土资源等自然环境条件和社会发展需求并按照相关规定进行土地修复；3) 土地修复实施过程应满足 TD/T 1036 规定的相关土地复垦质量控制要求，应根据不同地区、不同复垦方向，确定最大坡度、有效土厚度等相关指标；4) 土地复垦后用作建设用地的，还应满足 GB 36600 的要求；用作农用地的，还应满足 GB 15618 的要求；两个标准根据后期土地利用类型，规定了回填和覆土材料中污染物的筛选值和管控值；5) 回填工程完成后，应设置标志物，注明封场时间以及使用该土地应注意的事项；7) 回填完成工程后，渗滤液处理系统、废水排放监测系统应继续正常运行，污染物监测参照 GB18599 的相关要求执行。回填工程完毕后，如需对填埋钛石膏进行开采再利用，应进行环境影响评价。

### 2.4.6.6 有害成分控制要求

回填用钛石膏重金属含量应满足 GB/T 30760—2014 中表 2 限值要求，浸出液特征污染物应满足 GB 8978—1996 中规定一类限值的要求。

回填所在区域后续用作建设用地的，回填用钛石膏中污染物含量应满足 GB 36600 的要求；作为农用地的，回填用钛石膏中污染物含量还应满足 GB 15618 的相关要求。

对于钛石膏用于回填利用，首先钛石膏或者钛石膏基材料作为回填利用原材料，应满足 GB18599 中第 I 类一般工业固体废弃物标准要求，即回填用钛石膏按照 HJ 557 规定方法获得的浸出液，其特征污染物满足 GB 8978-1996 一类限值要求。其次，回填区域土地复垦后用作建设用地的，还应满足 GB 36600 的要求；作为农用地的，还应满足 GB 15618 的要求，两个标准根据后期土地利用类型，还规定了回填和覆土材料中污染物（特别是重金属）的筛选值和管控值。

### 2.4.7 土壤固化剂

#### 2.4.7.1 方法原理

钛石膏与水泥、粉煤灰等无机胶结料混合制成土壤固化剂，土壤固化剂加水与土壤搅拌后，钛石膏中主要成分  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硫酸钙等凝胶状的水化物，这些水化物与土壤中矿物的活性成分反应生成片状、纤维状或针状晶体，互相交错，增进土壤粒子之间的连接，在土壤中形成稳定网状结构，使固化土体结构更加稳固，生成膨胀性物质能填充网状结构之间的孔隙或者改善土壤中的孔隙结构，提高土壤强度。

#### 2.4.7.2 工艺流程

钛石膏制备土壤固化剂时，应提前进行预处理，干燥后再与其它无机胶结料混合。

固化土的配合比设计参照标准 CJJ/T 286-2018 中的 4.3.1 条款，固化土配合比设计应按下列步骤进行：

- 1) 测定基土的含水率及最佳含水率，当有特殊要求时，增加基土其他相关性能的试验。
- 2) 确定土壤固化剂掺量，当采用 A 类土壤固化剂时，确定无机结合料掺量基准值。
- 3) 计算各材料用量。
- 4) 进行固化土试配。

5) 调整和确定固化土配合比。

工艺流程如图 8 所示。

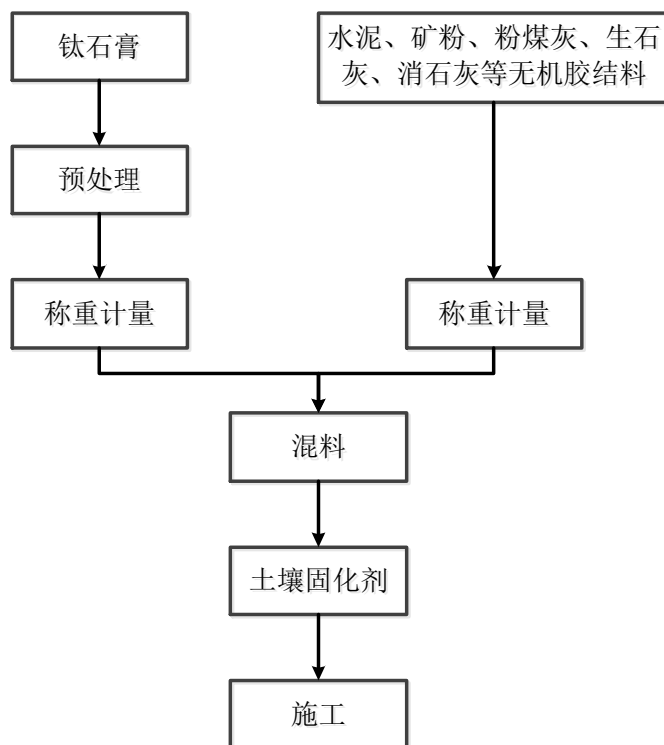


图8 钛石膏基土壤固化工艺流程图

### 2.4.7.3 原材料指标要求

水泥应选用符合GB 175要求的普通硅酸盐水泥，强度等级不应低于42.5级。不同等级、厂牌、品种、出厂日期的水泥不应混用。

生石灰应符合JC/T 479的要求；消石灰应满足JC/T 481的要求。

粉煤灰应符合GB/T 1596的要求。

矿粉（高炉矿渣粉）应符合GB/T 18046的要求。

土壤固化剂用钛石膏的指标及分析方法按表9的规定进行。

表9 土壤固化剂用钛石膏要求

序号	项目	指标	分析方法
1	气味	无异味	HJ 1262
2	二水硫酸钙 (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O) w/%	≥75	本文件中附录 A
3	附着水 (湿基) w/%	≤40	GB/T 5484—2012 中第 9 章
4	三氧化二铁 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (干基) w/%	≤10	GB/T 5484—2012 中第 13 章
5	水溶性氧化镁 (MgO) (干基) w/%	≤0.3	GB/T 5484—2012 中第 27 章
6	水溶性氧化钾 (K <sub>2</sub> O) (干基) w/%	≤0.3	GB/T 5484—2012 中第 28 章
7	水溶性氧化钠 (Na <sub>2</sub> O) (干基) w/%	≤0.3	GB/T 5484—2012 中第 28 章
8	氯离子 (Cl <sup>-</sup> ) (干基) w/%	≤0.04	GB/T 5484—2012 中第 21 章
9	二氧化钛 (TiO <sub>2</sub> ) (干基) w/%	≤3.5	GB/T 5484—2012 中第 19 章
10	pH 值	6~9	GB/T 5484—2012 中第 25 章
11	外照射指数 I <sub>r</sub>	≤2.8	GB 6566

水泥、粉煤灰、生石灰和消石灰应符合标准 CJJ/T 286-2018 的要求，其中标准中：

3.0.4 款规定，水泥应符合 GB 175 的规定。水泥应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，强度等级不应低于 42.5 级，不同等级、厂牌、品种、出厂日期的水泥不得混用。

3.0.5 款规定生石灰应符合 JC/T 479 的规定；消石灰应符合 JC/T 481 的规定。

3.0.6 款规定粉煤灰应符合 GB/T 1596 的规定。

#### 2.4.7.4 产品性能指标

钛石膏基土壤固化剂性能要求及分析方法按表 10 的规定进行。

表10 土壤固化剂要求

序号	项目	指标	指标来源	分析方法
1	外观	均匀一致，不应有结块	CJ/T 486	目测
2	含水率/%	$W \pm 2.0$		GB/T 8077
3	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	$D \pm 0.03$		GB/T 208
4	细度	80 $\mu$ m 方孔筛，筛余应不大于 15%		GB/T 1345
5	初凝时间/h	$\geq 2$	根据现场施工时间确定	GB/T 1346
6	终凝时间/h	$3 \leq T \leq 24$		

注：W、D 分别为含水率、密度的生产厂控制值。

固化土性能要求及分析方法按表 11 的规定进行。

表11 固化土性能要求

项目	指标			分析方法
	一级	二级	三级	
7d 无侧限抗压强度/MPa	$1.5 \leq S < 2.0$	$2.0 \leq S < 2.5$	$S \geq 2.5$	JTG E51
4h 凝结时间影响系数/%	$\geq 90$			CJ/T 486
水稳系数/%	$\geq 80$			CJ/T 486
28d 抗冻性能/%	抗冻指数 $\geq 80$ ，质量损失率 $\leq 5$			JTG E51

注：S 为固化土无侧限抗压强度。

土壤固化剂的性能参照 CJ/T 486 中 5.1 条款匀质性指标的要求。

土壤固化剂的初凝时间需在两小时以上，终凝时间在 3~24 h，以满足工程施工时间的要求。

#### 2.4.7.5 有害成分控制要求

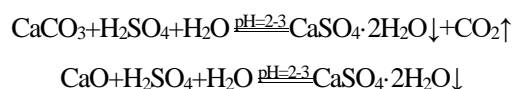
固化土 28 d 浸出液中重金属含量应满足 GB/T 25499 的要求。

用于土壤固化剂的钛石膏的成分控制，按照 CJ/T 486 中 5.4 条款规定，液体土壤固化外加剂及粉体土壤固化外加剂浸出液中镉、砷、汞、铅、铬、镍、铜、锌重金属含量最大值应符合 GB/T25499 的规定。

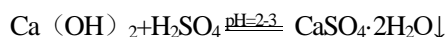
### 2.4.8 钛石膏制硫酸

#### 2.4.8.1 方法原理

为保证分解煅烧窑的稳定运行及熟料质量，该工艺中描述的钛石膏专指白石膏，白石膏是在钛白粉生产过程中产生的废酸及酸性废水与石灰石、生石灰、电石渣等进行中和反应到 pH 值 2~3 左右，经浓密机沉降，沉淀物泵送至离心机甩干后产生的白色钛石膏，其化学化学反应原理如下：

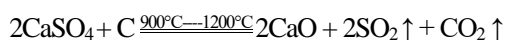






钛石膏在还原气氛下高温分解生成固体氧化钙和气体二氧化硫（还原剂为炭、硫等，目前鲁北化工采用焦炭作为还原剂，有效减少了升华硫对制酸系统的影响）；经过除尘及净化的二氧化硫在钒触媒催化剂作用下氧化成三氧化硫，三氧化硫吸收制得工业硫酸；产生的氧化钙作为副产品（石灰）可用于钛白粉废酸及酸性废水的中和处理；也可在高温条件下加入辅料（主要成分为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等）矿化生产硅酸盐水泥熟料。其反应化学方程式如下：

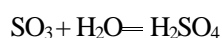
1) 钛石膏(主要成分 CaSO<sub>4</sub>) 与还原剂炭末(C)发生的化学反应原理如下：



2) 二氧化硫经催化氧化转化成三氧化硫的化学反应原理：



3) 三氧化硫与 98% 硫酸中的水化合制成硫酸的化学反应原理：



4) 生产硅酸盐水泥熟料时，辅料中的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等与分解产生的 CaO 发生矿化反应原理：



#### 2.4.8.2 工艺流程

钛石膏制硫酸（副产水泥）主要工艺流程如图9所示。

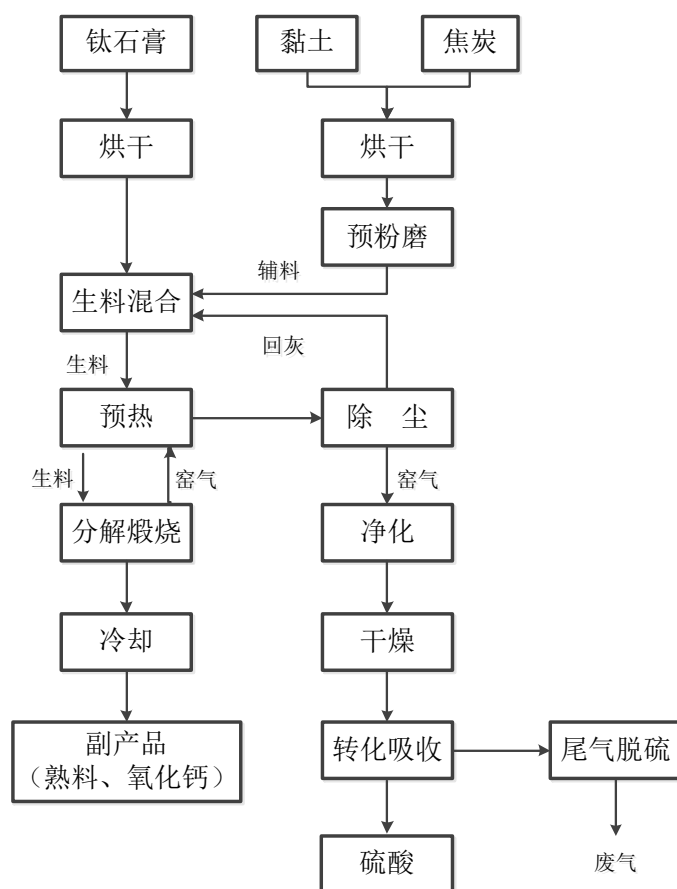


图9 钛石膏制硫酸工艺流程

#### 2.4.8.3 材料制备

#### 1) 白石膏生产

白石膏生产可采用先净化后中和或分段中和的方法生产，其中鲁北化工采用分段中和法。生产工艺如下：钛白粉生产过程中产生的废酸及酸性废水与石灰石、生石灰、电石渣等进行中和反应到pH值2~3左右，经浓密机沉降，沉淀物泵送至离心机甩干后生产白石膏。

#### 2) 原料烘干

钛石膏由烘干机烘干至全水分18%以下存入料库，黏土、焦炭末等辅助材料经烘干机烘干至水分3%以下存入各自料库。

#### 3) 生料制备

烘干后的黏土、焦炭末等辅助材料按比例计量后，由原料预粉磨机研磨，与烘干的磷石膏在混化机内混合均化生产水泥生料，并存入水泥生料库进行均化。

#### 4) 分解煅烧

均化后的水泥生料经多级旋风预热器预热，进入分解煅烧窑内高温煅烧，产生含二氧化硫窑气并副产水泥熟料。水泥熟料由熟料冷却机冷却存入水泥熟料库，窑气经电除尘器除尘后进入硫酸制备装置。

#### 5) 硫酸生产

当前鲁北化工采用两转（3+1）两吸工艺及进行硫酸生产，具体工艺如下：

窑气经电除尘器除尘后进入硫酸净化装置，控制烟气温度 $\leq 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，酸雾浓度 $\leq 30\text{ mg/Nm}^3$ ，再进入干燥塔内，用93%浓硫酸去除窑气中所含水分。

净化干燥后的窑气经换热达到 $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后进入转化器，在钒触媒的作用下，窑气中的二氧化硫转化成三氧化硫，三氧化硫经98%硫酸吸收制得工业硫酸，尾气经脱硫后达标排放。

### 2.4.8.4 原材料指标要求

钛石膏质量应符合表12要求。

表12 制硫酸（副产水泥）用钛石膏质量要求

项目	指标	分析方法
三氧化硫（SO <sub>3</sub> ）（w）/%	$\geq 40$	GB/T 5484—2012 中第 11 章
二氧化硅（SiO <sub>2</sub> ）（w）/%	$\leq 8.0$	GB/T 5484—2012 中第 13 章
氧化镁（MgO）（w）/%	$\leq 2$	GB/T 5484—2012 中第 18 章
三氧化二铝（Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ）（w）/%	$\leq 1.5$	GB/T 5484—2012 中第 16 章
三氧化二铁（Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ）（w）/%	$\leq 1.5$	GB/T 5484—2012 中第 15 章

根据鲁北化工多年的实践证明，为保证窑内SO<sub>2</sub>气浓满足硫酸装置二转二吸的生产需求，钛石膏中的三氧化硫成分大于等于40%（二水基），若钛石膏中的三氧化硫成分小于40%，不适用硫酸二转二吸生产工艺，可考虑湿法制酸等硫酸工艺，鲁北化工与上海科洋合作建设有年产2万吨湿法制酸的中试装置2023年11月试运行，进一步探索石膏制酸副产水泥熟料与湿法制酸工艺的结合。

为生产出合格的高标号水泥熟料，按照硅酸盐的形成需求，钛石膏中其他成分需满足烧成的要求：二氧化硅 $\leq 8.0\%$ ，氧化镁 $\leq 2\%$ ，氧化铝 $\leq 1.5\%$ ，氧化铁 $\leq 1.5\%$ 。鲁北化工钛石膏制酸副产水泥熟料装置多年实践经验表明，该指标要求下可生产出合格的通用硅酸盐水泥熟料，若不满足该指标，会造成水泥熟料的强度下降。

### 2.4.8.5 产品性能指标

水泥熟料产品质量应符合 GB/T 21372 的要求。

工业硫酸产品质量应符合 GB/T 534 中合格品的要求。

氧化钙产品质量应符合 JC/T 479 的技术要求。

### 3 国内外标准情况及参考文献

#### 3.1 国内外标准情况

下列标准中的内容通过文中的规范性引用而构成本标准必不可少的条款。其中，注日期的引用标准，仅该日期对应的版本适用于本标准；不注日期的引用标准，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB/T 208 水泥密度测定方法
- GB/T 534 工业硫酸
- GB/T 1345 水泥细度检验方法 筛析法
- GB/T 1346 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法
- GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- GB 2762 食品安全国家标准 食品中污染物限量
- GB 4915 水泥工业大气污染物排放标准
- GB/T 5484—2012 石膏化学分析方法
- GB 6566 建筑材料放射性核素限量
- GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法
- GB 8978—1996 污水综合排放标准
- GB/T 9775 纸面石膏板
- GB/T 9776 建筑石膏
- GB/T 11911 水质 铁、锰的测定 火焰原子吸收分光光度法
- GB/T 11968 蒸压加气混凝土砌块
- GB/T 14848—2017 地下水质量标准
- GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）
- GB 16297 大气污染物综合排放标准
- GB/T 18046 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
- GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准
- GB/T 20472 硫铝酸盐水泥
- GB/T 21371 用于水泥中的工业副产石膏
- GB/T 21372 硅酸盐水泥熟料
- GB/T 25499 城市污水再生利用 绿地灌溉水质
- GB 26132 硫酸工业污染物排放标准
- GB/T 28627 抹灰石膏
- GB 30485 水泥窑协同处置固体废物污染控制标准
- GB/T 30760—2014 水泥窑协同处置固体废物技术规范
- GB/T 33469 耕地质量等级
- GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）
- GB 39496 尾矿库安全规程
- GB/T 50326 建设工程项目管理规范
- CJJ 82—2012 园林绿化工程施工及验收规范
- CJ/T 486 土壤固化外加剂
- HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境
- HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则
- HJ/T 393 防治城市扬尘污染技术规范

HJ 557 固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法  
HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境  
HJ 651 矿山生态环境保护与恢复治理技术规范（试行）  
HJ 652 矿山生态环境保护与恢复治理方案（规划）编制规范（试行）  
HJ 662 水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范  
HJ 702 固体废物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解原子荧光法  
HJ 749 固体废物 总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法  
HJ 751 固体废物 镍和铜的测定 火焰原子吸收分光光度法  
HJ 786 固体废物 铅、锌和镉的测定 火焰原子吸收分光光度法  
HJ 823 水质 氰化物的测定 流动注射-分光光度法  
HJ 908 水质 六价铬的测定 流动注射-二苯碳酰二肼光度法  
HJ 964 环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）  
HJ 1091 固体废物再生利用污染防治技术导则  
HJ 1147—2020 水质 pH值的测定 电极法  
HJ 1226 水质 硫化物的测定 亚甲基蓝分光光度法  
HJ 1262 环境空气和废气 臭气的测定 三点比较式臭袋法  
JC/T 479 建筑生石灰  
JC/T 481 建筑消石灰  
JC/T 698 石膏砌块  
JC/T 2038  $\alpha$ 型高强石膏  
JC/T 2625—2021 钛石膏  
JTG 3430—2020 公路土工试验规程  
JTG/T F20 公路路面基层施工技术细则  
JTG E51 公路工程无机结合料稳定材料试验规程  
NY 1110 水溶肥料汞、砷、镉、铅、铬的限量要求  
NY/T 1121 土壤检测系列标准  
NY/T 3034 土壤调理剂 通用要求  
TD/T 1036—2013 土地复垦质量控制标准  
TD/T 1068 国土空间生态保护修复工程实施方案编制规程

### 3.2 参考文献

本文件编制过程中，参考了以下文献：  
JTG/T 3610—2019 公路路基施工技术规范  
JTG D30—2015 公路路基设计规范

## 三、钛石膏综合利用综述分析

### 1 钛石膏的产生

在硫酸法生产钛白粉的工艺反应过程中产生的酸性废水一般采用碱性的石灰石或者电石渣进行中和，中和之后会生成大量二水石膏等工业废渣副产物，这类副产物主要是红棕色的，因其内含一些氧化铁沉淀，这类副产物通常被称之为钛石膏，亦叫红石膏或黄石膏。经过编制组调查发现，根据前期钛白粉废酸综合利用率、酸性废水处理工艺差异以及钛石膏脱水工艺的效果，钛石膏产生系数相差较大，一

般每生产 1 吨钛白粉产生 4~15t 钛石膏。编制组经过调研，得到的全国钛石膏近 17 年的钛石膏产生量变化图 10。

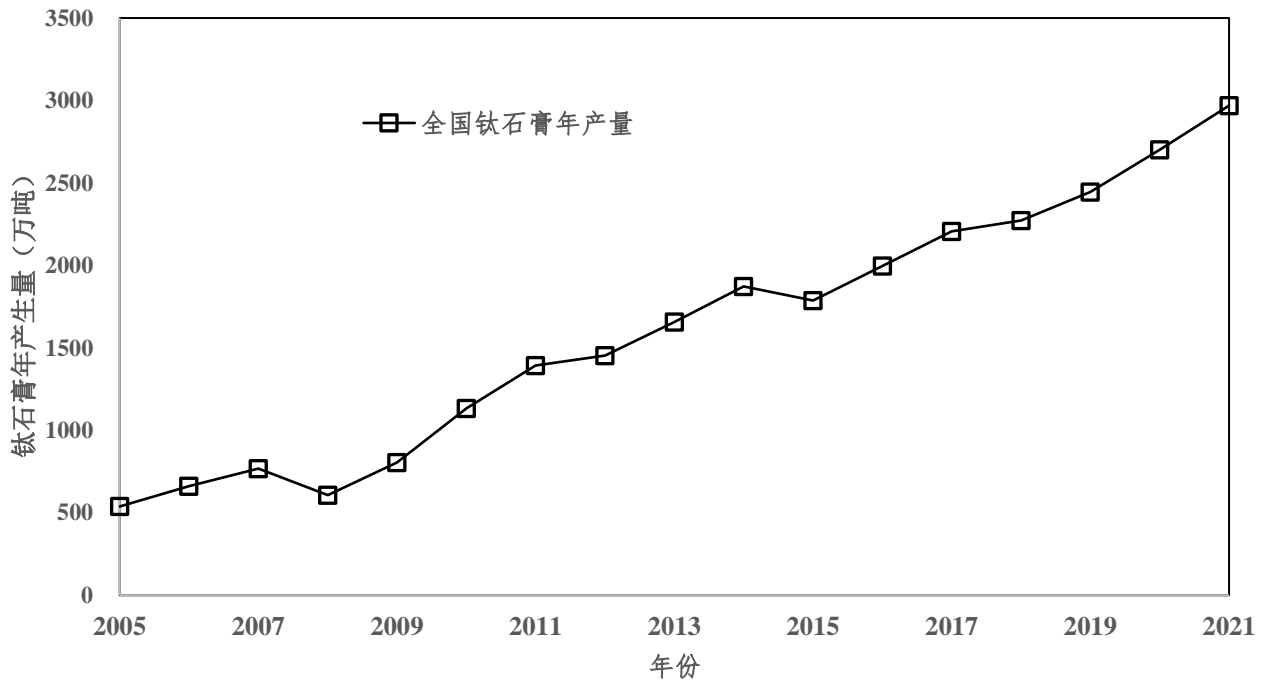


图10 全国钛石膏年产生量变化图

## 2 钛石膏基本性质

钛石膏主要成分为二水硫酸钙 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )，化学结构性质稳定，自然状态不分解，无毒无味，含水量高，黏度大，杂质含量多，颗粒细小。

2023 年 5 月 12 日-6 月 25 日，编制组陆续收到国内 24 家钛白粉企业共计 76 个样品，其中钛石膏样品 30 个，中和剂样品 44 个，综合利用产品样品 2 个。全国 30 种典型钛白粉企业钛石膏样品记录情况如表 13。

表13 全国30种典型钛白粉企业钛石膏样品记录表

编号	样品名称	钛石膏类型	采样时间	采样点位	废水中和剂类型
1	1#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-11	渣库内	白泥+电石渣
2	2#低压压滤钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-11	低压压滤机出口	电石渣
3	2#高压压滤钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-11	高压压滤机出口	电石渣
4	3#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-11	渣库内	石灰石+电石渣
5	4#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-11	渣库内	石灰石+石灰
6	5#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2013-5-9	车间内	石灰石+电石渣+收尘灰
7	6#一厂新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2013-5-11	车间内	石灰石+石灰
8	6#二厂新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2013-5-11	车间内	石灰石+石灰
9	7#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2013-5-13	低压压滤机出口	石灰石+石灰
10	7#堆存钛石膏	堆存钛石膏	2013-5-13	堆场(堆存 1 天)	石灰石+石灰
11	8#堆存钛石膏	堆存钛石膏	2023-5-19	渣库内	石灰石+石灰
12	9#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-17	渣库内	石灰石+石灰

13	9#二段红石膏	红石膏	2023-5-17	渣库内	石灰石+石灰
14	10#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-17	低压压滤机出口	石灰石+石灰
15	11#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-17	低压压滤机出口	石灰石+石灰+电石渣
16	12#白石膏	白石膏	2023-5-15	离心机出口	石灰石+电石渣
17	12#红石膏	红石膏	2023-5-15	压滤机出口	石灰石+电石渣+石灰
18	13#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-5-24	钛石膏贮存间	石灰石+电石渣
19	14#白石膏	白石膏	2023-5-24	压滤机出口	石灰石+石灰
20	14#红石膏	红石膏	2023-5-24	压滤机出口	石灰石+石灰
21	15#钛石膏	堆存钛石膏	2023-5-24	压滤机出口	石灰石+石灰
22	16#钛石膏	新鲜钛石膏	2023-6-14	压滤机出口	石灰石+石灰
23	17#堆存钛石膏	堆存钛石膏	2023-6-14	堆场	电石渣
24	17#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-6-14	压滤机出口	电石渣
25	18#堆存钛石膏	堆存钛石膏	2023-6-14	堆场	石灰石+电石渣
26	19#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-6-14	压滤机出口	石灰石+石灰
27	20#钛石膏	堆存钛石膏	2023-6-15	堆场	石灰石+石灰
28	21#钛石膏	新鲜钛石膏	2023-6-15	压滤机出口	石灰石+石灰
29	22#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	2023-6-15	压滤机出口	石灰石+石灰
30	23#钛石膏	新鲜钛石膏	2023-6-15	压滤机出口	石灰石+石灰

钛石膏的基础指标检测数据如表 14 所示，其中含水率在 4.19%~67.74%之间，pH 值在 4.1~9.83 之间，白度在 10.3%~61.84%之间。钛石膏用于水泥缓凝剂和建筑石膏用途，需满足 pH>5（GB/T21371 和 GB/T 9776），表 14 中有 2 个样品超标（均为白石膏），因此白石膏用于以上用途时，需经过预处理，添加碱性物质进行 pH 值调增。钛石膏用于土地利用、路基材料、回填充填、土壤固化外加剂原料，需满足 pH 值 6~9，表 14 中有 3 个样品超标（2 个白石膏和 1 个高压压滤钛石膏），因此白石膏、高压压滤钛石膏用于以上用途时，需经过预处理。

表14 全国30种典型钛白粉企业钛石膏基本物理性质

编号	样品名称	钛石膏类型	含水率 (%)	pH 值	白度 (%，R457)
1	1#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	37.93	7.22	17.22
2	2#低压压滤钛石膏	新鲜钛石膏	56.04	7.66	13.78
3	2#高压压滤钛石膏	新鲜钛石膏	39.63	9.83	18.01
4	3#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	47.64	7.65	18.82
5	4#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	44.75	7.28	19.86
6	5#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	32.84	7.28	18.13
7	6#一厂新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	38.03	7.3	27.32
8	6#二厂高硫钛石膏	新鲜钛石膏	21.10	7.28	20.18
9	7#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	45.45	7.35	14.58
10	7#堆存钛石膏	堆存钛石膏	39.63	7.32	13.86
11	8#堆存钛石膏	堆存钛石膏	14.28	7.34	16.47
12	9#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	33.48	7.39	15.82
13	9#二段红石膏	红石膏	12.93	7.32	10.3
14	10#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	46.92	7.58	12.78

15	11#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	43.70	7.36	16.94
16	12#白石膏	白石膏	21.76	4.37	61.84
17	12#红石膏	红石膏	60.69	7.55	20.22
18	13#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	41.65	7.62	17.85
19	14#白石膏	白石膏	17.32	4.10	53.24
20	14#红石膏	红石膏	42.68	7.64	18.12
21	15#钛石膏	堆存钛石膏	15.42	8.12	23.42
22	16#钛石膏	新鲜钛石膏	40.85	7.38	14.68
23	17#堆存钛石膏	堆存钛石膏	14.86	7.24	18.56
24	17#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	38.12	7.56	19.27
25	18#堆存钛石膏	堆存钛石膏	33.14	7.48	16.21
26	19#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	36.4	7.84	18.65
27	20#钛石膏	堆存钛石膏	4.19	7.61	19.21
28	21#钛石膏	新鲜钛石膏	37.43	7.35	14.35
29	22#新鲜钛石膏	新鲜钛石膏	67.74	7.49	16.32
30	23#钛石膏	新鲜钛石膏	37.51	7.51	15.12

注：

- 1) 普通钛石膏为硫酸法钛白粉酸性废水经碱性物质中和到 pH=7~9 左右的石膏；
- 2) 新鲜钛石膏为废水处理工艺末端脱水工艺后刚出来的钛石膏；
- 3) 堆存钛石膏为新鲜钛石膏堆存一段时间后的石膏；
- 4) 白石膏为硫酸法钛白粉酸性废水经碱性物质中和到 pH≤4 的石膏，因含铁量低，白度较高，俗称“白石膏”；
- 5) 红石膏是在硫酸法钛白粉酸性废水脱除白石膏后，在 pH4~9 产生的石膏，因含铁量较高，白度较低，呈现红色，俗称“红石膏”；
- 6) 低压压滤钛石膏为经过压力 25kg（2.5MPa）脱水压滤机处理后的钛石膏；
- 7) 高压压滤钛石膏为经过压力 75kg（7.5MPa）脱水压滤机处理后的钛石膏。

编制组通过对全国 30 种钛石膏样品进行采样和分析，得到了钛石膏含水率分布情况（图 11），其中新鲜钛石膏的含水率在 32.84%~67.74%之间，堆存钛石膏的含水率在 4.19%~39.63%之间，二段法产生的红石膏含水率在 12.93%~60.69%之间，白石膏含水率在 17.32%~21.76%之间。钛石膏含水率影响了钛石膏的产排量，采用低压压滤机脱水工艺的钛石膏含水率普遍在 45%以上，高压压滤机或离心机脱水工艺的钛石膏含水率在 40%以下，新鲜钛石膏经堆存（日晒、重力等作用）可显著降低含水率。

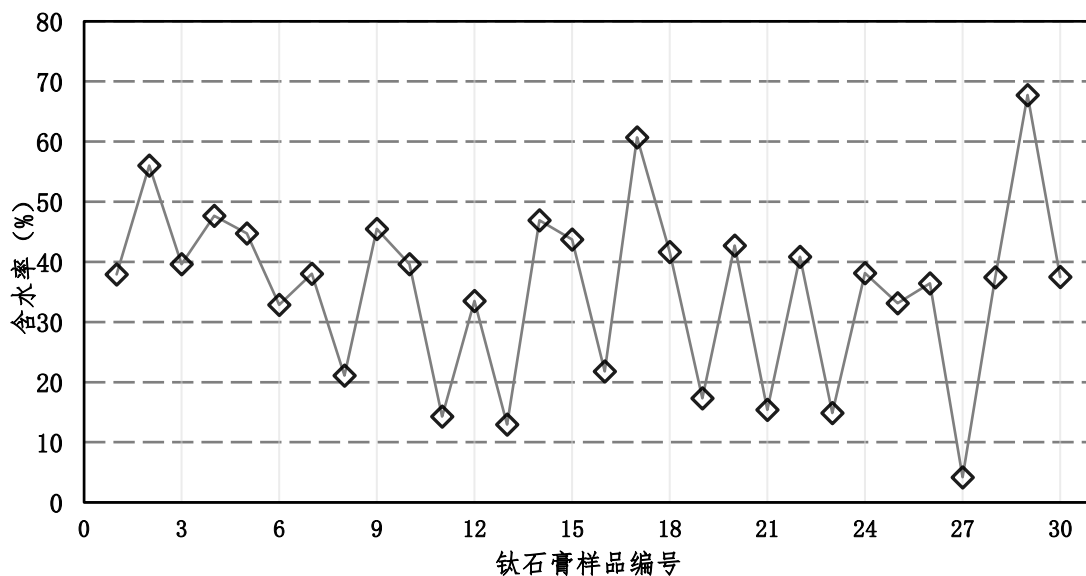


图11 全国主要钛白粉企业30种钛石膏含水率分布图

编制组通过对全国30种钛石膏样品进行采样和分析，得到了钛石膏pH值分布图（图12）。其中，新鲜钛石膏的pH值在7.22~9.83之间，堆存钛石膏的pH值在7.24~8.12之间，二段法产生的红石膏pH值在7.32~7.64之间，二段法产生的白石膏pH值在4.1~4.37之间。单从pH值（腐蚀性）来看，所采集的钛石膏（白石膏除外）在一般工业固体废物I类范围内。

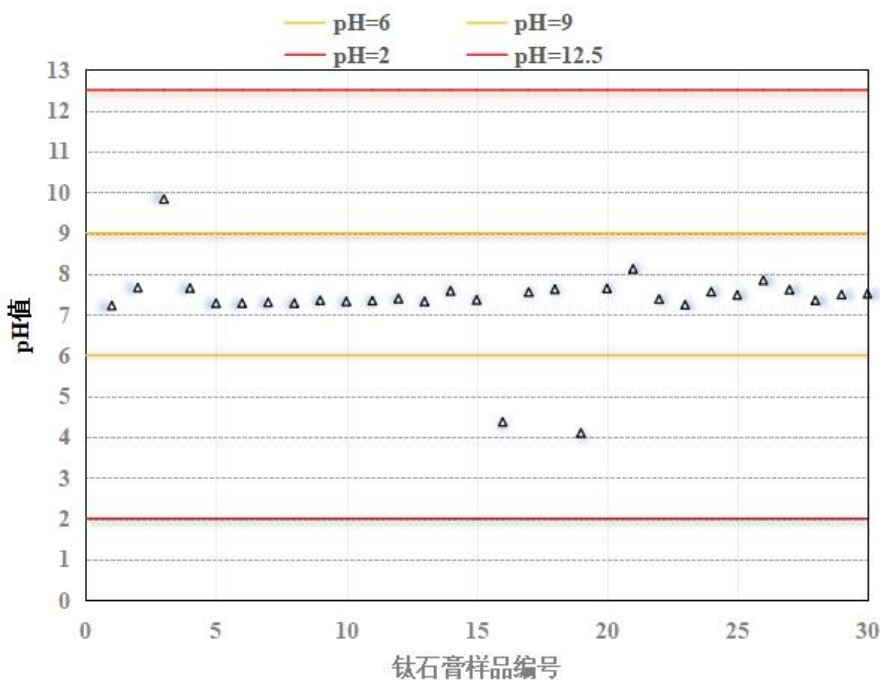


图12 全国30家典型钛白粉企业钛石膏pH值分布图



表15 我国典型钛白粉企业30种钛石膏化学成分组成 (X射线荧光光谱分析, 元素, %)

编号	样品名称	O	Ca	S	Fe	Si	Ti	Mg	Al	Na	Mn	Cl	K	P	Ba	V	Sr	Cr	Cu	Zn	Zr	Ni	Co	As	Ag
1	1#新鲜钛石膏	39.43	25.07	14.89	8.78	1.32	1.26	0.73	0.35	0.24	0.24	0.08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	8.7*10 <sup>-3</sup>	7.7*10 <sup>-3</sup>	7.1*10 <sup>-3</sup>	5.6*10 <sup>-3</sup>	0.4*10 <sup>-3</sup>	/	/
2	2#低压压滤钛石膏	39.52	18.89	13.72	11.57	2.18	1.06	0.99	1.81	0.71	0.59	0.67	0.06	0.39	0.03	0.04	0.02	0.04	8.1*10 <sup>-3</sup>	0.02	0.05	6.6*10 <sup>-3</sup>	/	1.6*10 <sup>-3</sup>	/
3	2#高压压滤钛石膏	40.72	21.27	15.25	8.71	2.42	1.19	0.63	1.16	0.39	0.40	0.37	0.04	0.25	0.01	0.04	0.02	0.02	8.5*10 <sup>-3</sup>	0.02	0.04	7.2*10 <sup>-3</sup>	/	1.8*10 <sup>-3</sup>	/
4	3#新鲜钛石膏	40.39	24.95	16.82	7.21	0.61	0.61	0.65	0.43	0.38	0.25	0.18	0.02	6.2*10 <sup>-3</sup>	/	0.03	0.02	0.01	3.5*10 <sup>-3</sup>	5.5*10 <sup>-3</sup>	2.3*10 <sup>-3</sup>	5.3*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
5	4#新鲜钛石膏	38.98	24.49	13.04	8.51	2.43	2.32	1.56	0.39	0.27	0.38	0.05	0.06	0.06	/	0.03	0.03	7.8*10 <sup>-3</sup>	0.01	10*10 <sup>-3</sup>	0.01	8.1*10 <sup>-3</sup>	0.7*10 <sup>-3</sup>	3.8*10 <sup>-3</sup>	/
6	5#新鲜钛石膏	40.63	21.13	15.34	8.79	1.70	3.07	1.04	0.43	0.56	0.29	0.18	0.14	0.01	1.7*10 <sup>-3</sup>	0.05	0.02	0.01	0.02	0.06	0.03	6.9*10 <sup>-3</sup>	/	0.01	/
7	6#一厂新鲜钛石膏	40.24	26.28	16.98	5.03	0.29	0.40	1.86	0.29	0.02	0.20	0.01	0.02	5.3*10 <sup>-3</sup>	/	0.02	0.01	/	2.9*10 <sup>-3</sup>	7.7*10 <sup>-3</sup>	2.2*10 <sup>-3</sup>	3.7*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
8	6#二厂高硫钛石膏	41.35	24.18	18.10	6.38	0.53	0.71	0.48	0.39	0.08	0.15	0.05	0.01	8.5*10 <sup>-3</sup>	/	0.04	0.01	/	/	0.03	2.4*10 <sup>-3</sup>	5.4*10 <sup>-3</sup>	0.7*10 <sup>-3</sup>	/	/
9	7#新鲜钛石膏	40.34	21.13	15.18	10.56	1.34	2.58	0.96	0.52	0.13	0.47	0.04	0.03	0.01	/	0.06	8.7*10 <sup>-3</sup>	0.03	0.02	0.06	0.02	0.01	6.2*10 <sup>-3</sup>	0.02	6.2*10 <sup>-3</sup>
10	7#堆存钛石膏	40.36	21.23	15.25	10.49	1.34	2.54	0.95	0.57	0.12	0.44	0.04	0.03	0.01	/	0.06	8.7*10 <sup>-3</sup>	0.03	0.02	0.06	0.02	0.01	6.2*10 <sup>-3</sup>	0.02	6.2*10 <sup>-3</sup>
11	8#堆存钛石膏	40.22	24.61	16.60	6.74	0.58	0.88	1.20	0.50	0.06	0.29	0.03	0.05	0.01	/	0.03	0.01	/	2.9*10 <sup>-3</sup>	0.07	5.4*10 <sup>-3</sup>	4.4*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
12	9#新鲜钛石膏	40.68	26.06	17.43	6.57	0.28	0.31	0.49	0.36	0.05	0.32	0.03	0.04	0.01	/	0.05	9.0*10 <sup>-3</sup>	/	2.4*10 <sup>-3</sup>	0.03	2.7*10 <sup>-3</sup>	4.6*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
13	9#二段红石膏	40.10	25.21	16.57	8.13	0.43	0.60	0.55	0.37	0.33	0.04	0.03	0.03	0.01	/	0.01	0.01	8.1*10 <sup>-3</sup>	4.9*10 <sup>-3</sup>	4.6*10 <sup>-3</sup>	4.0*10 <sup>-3</sup>	3.4*10 <sup>-3</sup>	/	2.0*10 <sup>-3</sup>	/
14	10#新鲜钛石膏	39.91	22.04	16.02	10.75	0.69	0.83	1.01	0.39	0.11	0.29	0.51	0.02	/	/	0.03	8.7*10 <sup>-3</sup>	0.01	5.0*10 <sup>-3</sup>	8.7*10 <sup>-3</sup>	7.1*10 <sup>-3</sup>	4.3*10 <sup>-3</sup>	2.6*10 <sup>-3</sup>	0.01	/
15	11#新鲜钛石膏	40.17	24.83	15.57	6.92	1.44	1.70	0.80	0.56	0.14	0.22	0.07	0.08	8.9*10 <sup>-3</sup>	/	0.03	0.03	9.6*10 <sup>-3</sup>	8.0*10 <sup>-3</sup>	0.03	9.7*10 <sup>-3</sup>	4.5*10 <sup>-3</sup>	/	0.01	/
16	12#白石膏	43.15	27.61	20.61	0.29	0.59	0.41	0.05	0.15	0.05	8.4*10 <sup>-3</sup>	/	0.07	/	/	/	0.01	/	/	2.9*10 <sup>-3</sup>	2.6*10 <sup>-3</sup>	/	/	/	/
17	12#红石膏	41.18	24.62	18.08	6.83	0.30	0.35	0.57	0.27	0.04	0.20	0.12	0.01	9.2*10 <sup>-3</sup>	/	0.05	0.01	0.02	/	0.07	1.5*10 <sup>-3</sup>	4.9*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
18	13#新鲜钛石膏	40.29	24.71	16.61	7.62	0.63	0.90	0.60	0.43	0.07	0.44	0.12	0.04	8.6*10 <sup>-3</sup>	0.07	/	0.02	8.9*10 <sup>-3</sup>	2.7*10 <sup>-3</sup>	0.02	/	3.3*10 <sup>-3</sup>	/	1.5*10 <sup>-3</sup>	/
19	14#白石膏	43.27	26.04	19.84	1.26	1.15	1.13	0.24	0.36	0.08	0.10	0.03	0.06	/	/	0.01	0.02	3.5*10 <sup>-3</sup>	3.0*10 <sup>-3</sup>	2.3*10 <sup>-3</sup>	6.8*10 <sup>-3</sup>	3.2*10 <sup>-3</sup>	0.8*10 <sup>-3</sup>	/	/
20	14#红石膏	40.12	23.46	16.47	8.32	0.37	0.67	1.64	0.42	0.17	0.26	0.18	0.04	8.7*10 <sup>-3</sup>	/	0.03	0.01	9.8*10 <sup>-3</sup>	3.0*10 <sup>-3</sup>	0.02	5.5*10 <sup>-3</sup>	/	/	/	/
21	15#钛石膏	36.02	19.82	12.51	8.77	0.95	2.45	0.77	0.53	0.41	0.36	0.06	0.08	1.22	/	0.05	0.01	0.02	9.0*10 <sup>-3</sup>	0.04	0.02	7.2*10 <sup>-3</sup>	0.3*10 <sup>-3</sup>	0.01	/
22	16#钛石膏	35.62	19.08	13.21	13.81	0.34	0.55	1.51	0.31	0.08	0.59	0.02	0.02	0.02	/	0.03	0.01	4.8*10 <sup>-3</sup>	3.7*10 <sup>-3</sup>	0.02	3.5*10 <sup>-3</sup>	7.3*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
23	17#堆存钛石膏	39.01	21.91	15.04	6.69	1.20	2.65	1.17	0.47	0.89	0.36	0.30	0.09	0.03	/	0.05	0.01	0.02	6.5*10 <sup>-3</sup>	0.03	0.03	4.8*10 <sup>-3</sup>	/	5.3*10 <sup>-3</sup>	/
24	17#新鲜钛石膏	36.54	22.33	14.92	6.10	0.56	0.87	1.29	0.38	0.32	0.25	0.09	0.06	0.01	/	/	0.02	8.7*10 <sup>-3</sup>	2.6*10 <sup>-3</sup>	0.02	5.7*10 <sup>-3</sup>	/	/	/	/
25	18#堆存钛石膏	39.16	23.88	15.03	7.06	1.73	1.06	0.77	0.76	0.12	0.25	0.06	0.08	0.04	/	0.03	0.01	8.8*10 <sup>-3</sup>	6.2*10 <sup>-3</sup>	0.02	5.1*10 <sup>-3</sup>	5.4*10 <sup>-3</sup>	/	4.2*10 <sup>-3</sup>	/
26	19#新鲜钛石膏	36.02	19.82	12.51	8.77	0.95	2.45	0.77	0.53	0.41	0.36	0.06	0.08	1.22	/	0.05	0.01	0.02	9.0*10 <sup>-3</sup>	0.04	0.02	7.2*10 <sup>-3</sup>	0.3*10 <sup>-3</sup>	0.01	/

编号	样品名称	O	Ca	S	Fe	Si	Ti	Mg	Al	Na	Mn	Cl	K	P	Ba	V	Sr	Cr	Cu	Zn	Zr	Ni	Co	As	Ag
27	20#钛石膏	37.16	22.06	14.84	5.53	1.56	1.53	0.29	0.61	0.19	0.22	0.07	0.04	0.03	/	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	6.6*10 <sup>-3</sup>	/	0.02	/
28	21#钛石膏	39.88	24.86	16.25	4.90	1.20	1.29	1.09	0.45	0.11	0.16	0.05	0.11	0.03	/	/	/	6.9*10 <sup>-3</sup>	7.3*10 <sup>-3</sup>	/	4.4*10 <sup>-3</sup>	3.3*10 <sup>-3</sup>	/	0.01	/
29	22#新鲜钛石膏	38.67	22.84	16.71	6.67	0.26	1.19	0.30	0.18	0.26	0.15	0.18	0.03	0.03	/	0.04	0.01	/	3.2*10 <sup>-3</sup>	0.02	6.2*10 <sup>-3</sup>	2.4*10 <sup>-3</sup>	/	2.0*10 <sup>-3</sup>	/
30	23#钛石膏	39.34	23.84	15.69	6.15	1.29	1.35	0.85	0.60	0.19	0.27	0.08	0.15	0.03	/	/	0.02	/	0.01	9.8*10 <sup>-3</sup>	/	4.8*10 <sup>-3</sup>	/	8.3*10 <sup>-3</sup>	/

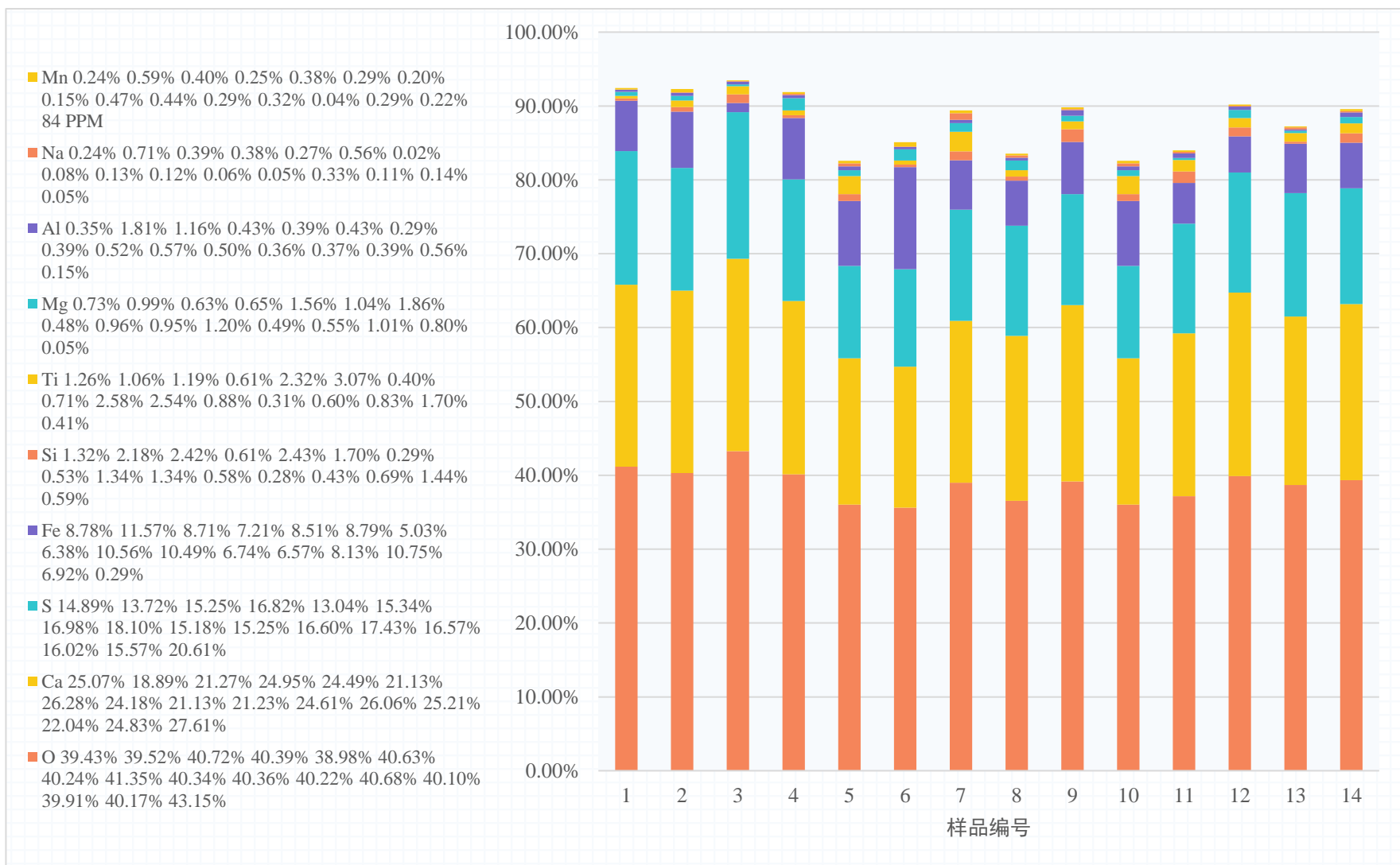


图13 我国典型钛石膏（干基）元素组成图

表16 我国典型钛白粉企业30种钛石膏化学成分组成(X射线荧光光谱分析, 化合物, %)

编号	样品名称	SO <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MnO	Cl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZrO <sub>2</sub>	ZnO	NiO	CoO	BaO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	1#新鲜钛石膏	37.17	35.07	12.56	2.83	2.10	1.20	0.65	0.32	0.31	0.08	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	9.6*10 <sup>-3</sup>	9.6*10 <sup>-3</sup>	7.1*10 <sup>-3</sup>	0.5*10 <sup>-3</sup>	/	/
2	2#低电压滤钛石膏	34.26	26.43	16.54	4.67	1.77	1.64	3.42	0.96	0.76	0.67	0.89	0.07	0.07	0.02	0.05	0.01	0.07	0.02	0.01	/	0.04	/
3	2#高压滤钛石膏	38.08	29.76	12.45	5.18	1.98	1.05	2.20	0.53	0.52	0.37	0.57	0.06	0.05	0.02	0.03	0.01	0.05	0.02	9.6*10 <sup>-3</sup>	/	0.01	/
4	3#新鲜钛石膏	42.00	34.90	10.30	1.30	1.02	1.08	0.81	0.52	0.32	0.18	0.01	0.05	0.02	0.02	0.02	4.3*10 <sup>-3</sup>	3.1*10 <sup>-3</sup>	6.6*10 <sup>-3</sup>	6.7*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
5	4#新鲜钛石膏	34.26	32.56	12.17	5.20	3.87	2.59	0.74	0.36	0.49	0.05	0.13	0.05	0.07	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.9*10 <sup>-3</sup>	/	5.7*10 <sup>-3</sup>
6	5#新鲜钛石膏	38.29	29.57	12.56	5.12	3.64	1.73	0.82	0.76	0.37	0.18	0.03	0.08	0.17	0.02	0.02	0.02	0.04	0.07	8.7*10 <sup>-3</sup>	/	1.9*10 <sup>-3</sup>	0.02
7	6#一厂新鲜钛石膏	42.40	36.78	7.19	0.61	0.67	3.09	0.55	/	0.26	0.01	0.01	0.04	0.03	0.01	/	3.7*10 <sup>-3</sup>	3.0*10 <sup>-3</sup>	9.5*10 <sup>-3</sup>	4.7*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
8	6#二厂高硫钛石膏	45.19	33.83	9.12	1.19	1.13	0.79	0.74	0.11	0.20	0.05	0.02	0.06	0.01	0.02	/	/	3.2*10 <sup>-3</sup>	0.03	6.8*10 <sup>-3</sup>	0.9*10 <sup>-3</sup>	/	/
9	7#新鲜钛石膏	37.90	29.57	15.10	2.87	4.30	1.60	0.98	0.17	0.61	0.04	0.03	0.10	0.04	0.01	0.05	0.03	0.02	0.08	0.02	/	/	0.02
10	7#堆存钛石膏	37.87	29.49	15.13	2.79	4.29	1.62	0.97	0.19	0.62	0.04	0.03	0.10	0.03	0.01	0.05	0.02	0.02	0.08	0.02	/	/	0.02
11	8#堆存钛石膏	41.46	34.43	9.63	1.23	1.46	1.99	0.94	0.08	0.37	0.03	0.02	0.05	0.06	0.01	/	3.6*10 <sup>-3</sup>	7.3*10 <sup>-3</sup>	0.09	5.6*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
12	9#新鲜钛石膏	43.53	36.46	9.40	0.61	0.52	0.81	0.69	0.06	0.41	0.03	0.03	0.09	0.04	0.01	/	3.0*10 <sup>-3</sup>	3.7*10 <sup>-3</sup>	0.03	5.8*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
13	9#二段红石膏	41.37	35.28	11.62	1.01	0.92	0.91	0.70	0.06	0.43	0.01	/	0.06	0.04	0.01	0.01	5.7*10 <sup>-3</sup>	4.6*10 <sup>-3</sup>	0.02	5.1*10 <sup>-3</sup>	/	/	2.7*10 <sup>-3</sup>
14	10#新鲜钛石膏	40.00	30.83	15.36	1.49	1.38	1.68	0.73	0.15	0.37	0.51	/	0.05	0.02	0.01	0.02	6.2*10 <sup>-3</sup>	9.5*10 <sup>-3</sup>	0.01	5.4*10 <sup>-3</sup>	3.3*10 <sup>-3</sup>	/	0.02
15	11#新鲜钛石膏	38.87	34.74	9.90	3.08	2.84	1.32	1.06	0.19	0.28	0.07	0.02	0.05	0.09	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	5.8*10 <sup>-3</sup>	/	/	0.02
16	12#白石膏	51.47	38.63	0.42	1.26	0.69	0.08	0.27	0.06	0.01	/	/	/	0.09	0.02	/	/	3.5*10 <sup>-3</sup>	3.6*10 <sup>-3</sup>	/	/	/	/
17	12#红石膏	45.16	34.45	9.77	0.64	0.58	0.95	0.51	0.06	0.26	0.12	0.02	0.08	0.01	0.02	0.03	/	2.1*10 <sup>-3</sup>	0.09	6.2*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
18	13#新鲜钛石膏	41.48	34.58	10.90	1.35	1.50	0.99	0.82	0.09	0.56	0.12	0.02	/	0.05	0.02	0.01	3.3*10 <sup>-3</sup>	/	0.02	4.2*10 <sup>-3</sup>	/	0.08	2.0*10 <sup>-3</sup>
19	14#白石膏	49.55	36.43	1.80	2.47	1.88	0.40	0.67	0.11	0.12	0.03	/	0.02	0.07	0.02	5.1*10 <sup>-3</sup>	3.7*10 <sup>-3</sup>	9.2*10 <sup>-3</sup>	2.9*10 <sup>-3</sup>	4.0*10 <sup>-3</sup>	1.0*10 <sup>-3</sup>	/	/
20	14#红石膏	41.13	32.83	11.90	2.72	1.12	0.79	0.79	0.33	0.22	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	7.4*10 <sup>-3</sup>	3.7*10 <sup>-3</sup>	/	/	/	/
21	15#钛石膏	42.01	32.66	8.86	1.77	2.97	0.71	0.80	0.13	0.29	0.10	0.09	0.07	0.04	0.02	0.02	0.02	8.1*10 <sup>-3</sup>	0.02	5.0*10 <sup>-3</sup>	/	/	0.01
22	16#钛石膏	32.97	26.70	19.75	0.73	0.92	2.51	0.58	0.10	0.76	0.02	0.06	0.05	0.03	0.01	7.0*10 <sup>-3</sup>	4.7*10 <sup>-3</sup>	4.8*10 <sup>-3</sup>	0.02	9.3*10 <sup>-3</sup>	/	/	/
23	17#堆存钛石膏	37.54	30.65	9.57	2.57	4.43	1.94	0.89	1.20	0.47	0.30	0.07	0.09	0.11	0.02	0.03	8.1*10 <sup>-3</sup>	0.04	0.04	6.1*10 <sup>-3</sup>	7.5*10 <sup>-3</sup>	/	7.0*10 <sup>-3</sup>
24	17#新鲜钛石膏	37.26	31.25	8.73	1.19	1.45	2.14	0.72	0.43	0.33	0.09	0.03	0.06	0.07	0.02	0.01	3.2*10 <sup>-3</sup>	7.7*10 <sup>-3</sup>	0.03	/	/	/	/
25	18#堆存钛石膏	37.54	33.41	10.10	3.70	1.77	1.28	1.44	0.16	0.33	0.06	0.09	0.05	0.10	0.01	0.01	7.8*10 <sup>-3</sup>	6.9*10 <sup>-3</sup>	0.03	6.8*10 <sup>-3</sup>	/	/	5.5*10 <sup>-3</sup>
26	19#新鲜钛石膏	31.23	27.74	12.54	2.03	4.10	1.27	1.00	0.55	0.46	0.06	2.80	0.09	0.10	0.01	0.02	0.01	0.03	0.05	9.2*10 <sup>-3</sup>	0.4*10 <sup>-3</sup>	/	0.02

编号	样品名称	SO <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MnO	Cl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZrO <sub>2</sub>	ZnO	NiO	CoO	BaO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
27	20#钛石膏	37.06	30.86	7.91	3.33	2.55	0.49	1.14	0.26	0.29	0.07	0.07	0.06	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	8.4*10 <sup>-3</sup>	/	/	0.02
28	21#钛石膏	40.56	34.79	7.01	2.57	2.16	1.81	0.85	0.15	0.21	0.05	0.06	/	0.13	0.10	0.01	9.1*10 <sup>-3</sup>	6.0*10 <sup>-3</sup>	0.03	4.1*10 <sup>-3</sup>	/	/	0.01
29	22#新鲜钛石膏	41.72	31.96	9.54	0.56	1.99	0.49	0.34	0.35	0.20	0.18	0.07	0.07	0.04	0.02	/	4.0*10 <sup>-3</sup>	8.4*10 <sup>-3</sup>	0.03	3.0*10 <sup>-3</sup>	/	/	2.6*10 <sup>-3</sup>
30	23#钛石膏	39.18	33.36	8.79	2.76	2.26	1.40	1.13	0.26	0.35	0.08	0.07	/	0.19	0.02	/	0.01	5.9*10 <sup>-3</sup>	0.01	6.1*10 <sup>-3</sup>	/	/	0.01

从主要元素成分来看（图 13），钛石膏（干基）以氧（O）、钙（Ca）、硫元素（S）和铁（Fe）为主要四大元素，均值分别为 39.26%、23.28%、15.84% 和 7.46%，特别注意到铁元素最大值为 13.81%，最小值为 0.29%（主要为白石膏）。钛石膏中次要元素为硅（Si）、钛（Ti）、镁（Mg）、铝（Al）、钠（Na）、锰（Mn）和氯（Cl），均值分别为 1.02%、1.30%、0.86%、0.50%、0.23%、0.29% 和 0.13%，其他元素的含量均不到 0.1%。

从化合物组成来看（表 15~表 16），钛石膏（干基）以三氧化硫（SO<sub>3</sub>）、氧化钙（CaO）、三氧化二铁（Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）为主，均值分别为 39.95%、32.67% 和 10.55%。钛石膏中次要成分为二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）、二氧化钛、氧化镁、三氧化二铝，均值分别为 2.29%、2.08%、1.35% 和 0.93%。

### 3 钛石膏综合利用现状

目前，我国钛石膏大多是露天堆放，一方面占用了大量的土地资源，也加大了企业的负担，另一方面在雨水冲刷的作用下可能将硫酸钙溶出造成地下水、地表水、土壤等污染以及风干后扬尘导致的大气污染等环境问题，威胁人体健康，成为钛白粉企业和所在地生态环境部门的难题。经编制组调研得到，全国 2021 年钛石膏的产量达到 2700 万 t，累计产生量达到 2.73 亿吨，综合利用不到 10%。

2021 年 4 月，国家发展改革委等九部门联合印发《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》，指出 2019 年，我国大宗固体综合利用率达 55%，比 2015 年提高了 5%，其中工业副石膏的综合利用率达到 70%，明确到 2025 年，我国新增大宗固废综合利用率需达到 60%，对工业副产石膏利用规模不断提高，积极探索钛石膏等难用工业副产石膏的资源化利用。2022 年 1 月，工业和信息化部等八部门联合印发《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》，明确提出到 2025 年目标为钢铁、有色、化工等重点行业工业固体废物产生强度下降，大宗工业固体废物的综合利用水平显著提升，工业副产石膏综合利用率达到 73%。2022 年 3 月，工业和信息化部等六部门联合印发《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》，指出推动石化化工与建材、冶金、节能环保等行业耦合发展，提高磷石膏、钛石膏、氟石膏、脱硫石膏等工业副产石膏、电石渣、碱渣、粉煤灰等固体废物综合利用水平。2022 年 4 月，四川省人民政府厅发布《关于推进成渝地区双城经济圈“无废城市”共建的指导意见》，提出实施工业绿色生产和持续激发市场活力都需关注钛石膏等固体废物综合利用。

由此可见，无论从环境污染控制和资源综合利用的角度，开展利用钛石膏资源综合利用技术与标准编制，不仅可以降低钛石膏环境污染的风险，还可以有效提升石膏综合利用率，为钛石膏安全利用提供技术与政策，并为其其他大宗工业固体废物综合利用提供借鉴。

近年来，在相关政策鼓励和行业努力下，钛石膏的综合利用已有起色。2020 年，安徽铜陵市探索钛石膏生态化利用，实施了钛石膏用于废弃露天石料采坑生态修复工程，助力打造“无废城市”新模式。

龙佰四川钛业有限公司利用钛石膏作为土地治理复垦材料，2022 年 7 月-2023 年 2 月间，在绵竹市广济镇祈祥村开展土地整治复垦示范，消纳钛石膏约 40 万吨，新增 130 亩用地，新增用地率 90%，形成了可复制、可推广的实施范例，提高了土地利用的同时，为当地经济发展提供了新的机遇，也改善了当地生态环境。宁波新福钛白粉有限公司投资 1.1 亿元建成了年产 60 万吨水泥缓凝剂项目，以红石膏为原料生产水泥缓凝剂，实现了 80% 左右红石膏的资源化利用，并通过优化参数等措施，实现新产生红石膏 100% 资源化利用。山东鲁北化工股份有限公司已建成石膏制 40 万吨硫酸副产 60 万吨水泥生态循环产业链，年处理石膏达 100 万吨，实现了钛石膏与磷石膏中硫资源循环利用与钙资源替代石灰矿的开采，年综合利用工业副产石膏 100 万吨。

目前，钛石膏综合利用主要技术有：建材利用、土地利用与生态修复、路基材料、充填、回填、土壤固化外加剂、钛石膏制硫酸等。

### 4 钛石膏主要检测情况

钛石膏用于生产水泥缓凝剂、建筑石膏、高强石膏和水泥熟料联产硫酸等用途的原料对于附着水的要求一般是根据买卖双方协商确定。钛石膏用于土地利用、路基材料、充填回填以及土壤固化剂利用用途，要求钛石膏含水率  $\leq 40\%$ ，钛石膏用于生态修复用途含水率要求  $\leq 55\%$ ，建议部分企业将钛石膏预处理（堆存、烘干或高压压滤等），满足含水率要求后再做综合利用。

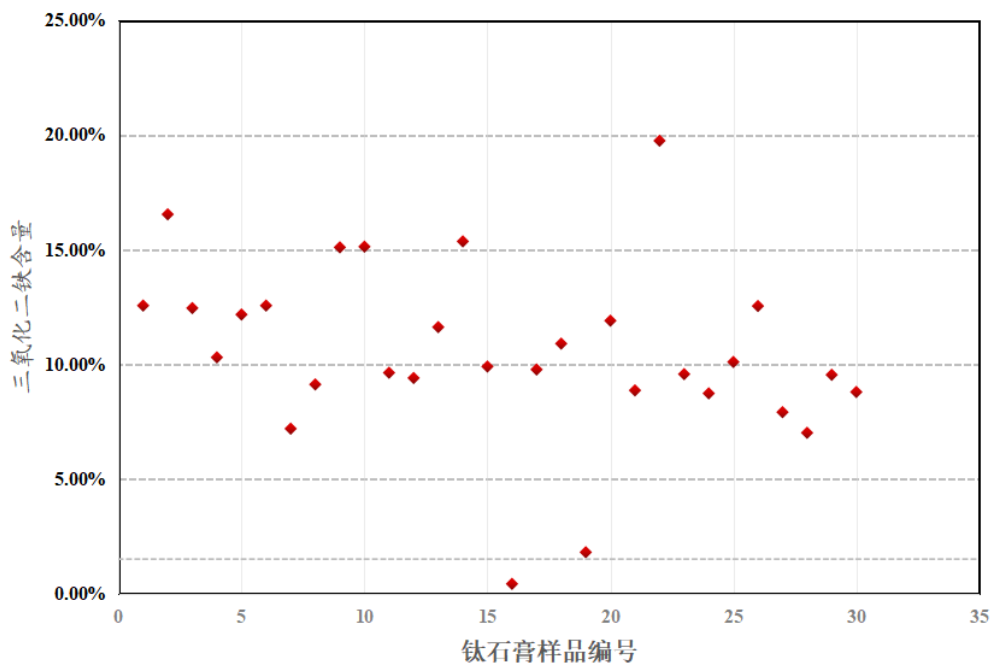


图14 我国典型钛石膏（干基）三氧化二铁含量图

通过进一步分析，我国典型钛石膏三氧化二铁含量如图14所示，30个样品中5个样品三氧化二铁含量超过15%，15个样品三氧化二铁含量超过10%，仅有一个白石膏样品三氧化二铁含量低于1.5%。钛石膏用于路基材料用途要求三氧化二铁含量 $\leq 15\%$ ，用于土壤固化外加剂原料用途要求三氧化二铁含量 $\leq 10\%$ ，用于制水泥熟料和硫酸用途要求三氧化二铁含量 $\leq 1.5\%$ ，其他综合利用技术并未对三氧化二铁有强制要求。对于钛石膏用于土地利用、路基材料、回填充填、土壤固化外加剂等原料，建议在钛石膏生产工艺上增加除铁效果改进，或者将三氧化二铁含量限值标准提高。

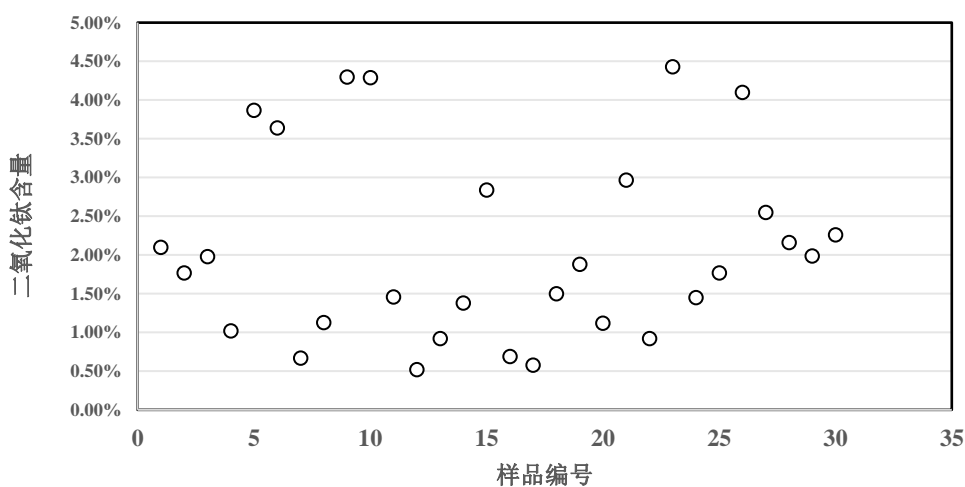


图15 我国典型钛石膏（干基）二氧化钛含量图

同时，我国典型钛石膏二氧化钛含量情况如图15所示，30个样品钛石膏含量均值为2.08%，24个样品二氧化钛含量 $< 3\%$ ，6个样品二氧化钛含量超过3.5%。钛石膏用于土壤固化外加剂用途要求二氧化钛含量 $\leq 3.5\%$ ，建议提高钛白粉回收率，同时降低酸性废水及钛石膏中二氧化钛含量，以满足钛石膏用于土壤固化外加剂要求。编制组通过对全国30种钛石膏样品按照GB 5085.3附录S方法进行前处理，采用GB 5085.3附录A-E、HJ 781-2016等标准方法进行分析，得到了表17的钛石膏主要重金属含量表。若钛石膏作为农用、回填/填充等与土壤接触的综合利用途径，可与国家或地方土壤环境保护相关标准进行对比，如GB 15618—2018、GB 36600—2018、GB 5085.6、GB/T 23486-2009、GB/T 24600-2009、GB 30760-2014等。

30个钛石膏样品中，主要是砷、镍、锌、铬、铜、镉六种重金属超标，所有样品均不满足GB 15618—2018中对重金属总量的要求，建议钛石膏作为农用、回填/填充等与土壤接触的综合利用途径时，对钛石膏项作进一步环境风

险评估和管控措施，确定风险可接受后方可实施项目。12个样品满足GB 36600—2018第一类用地中对重金属总量的要求，其他样品主要为砷超标，建议钛石膏采用用于回填/充填/生态修复后的土地，若后续进行建设用地使用，应进行土壤环境污染风险筛查，必要时采取风险管控措施。根据GB 5085.6中部分重金属指标的含量控制要求，30个钛石膏样品测试结果都未超标。参照生活污水用于园林绿化或毒地改良，仍有部分样品重金属超标，建议钛石膏作为原料用于生产水泥熟料使用时需要预先进行检测分析。



表17 我国典型钛白粉企业30种钛石膏中典型金属元素总量 (mg/kg)

编号	样品名称	砷 As	钡 Ba	锰 Mn	铁 Fe	镍 Ni	锌 Zn	钒 V	铬 Cr	铜 Cu	铅 Pb	镉 Cd	铍 Be	铊 Tl	钛 Ti	汞 Hg
1	1#新鲜钛石膏	<b>27.80</b>	42.36	1986.01	57112.95	45.07	173.36	163.89	103.74	<b>57.75</b>	10.30	<b>1.16</b>	0.61	0.02	10186.42	0.08
2	2#低压压滤钛石膏	18.23	<0.03	592.95	7449.78	36.23	95.19	245.62	45.21	<b>59.79</b>	42.25	<b>2.19</b>	0.46	0.07	2415.21	0.08
3	2#高压压滤钛石膏	13.84	102.04	3390.68	72918.45	39.82	<b>273.72</b>	284.28	<b>252.10</b>	37.84	10.80	<b>0.71</b>	0.04	0.06	10503.85	0.10
4	3#新鲜钛石膏	14.33	35.64	68.96	1612.08	26.13	45.13	209.72	102.68	6.86	33.63	<b>0.64</b>	0.31	0.03	166.41	0.02
5	4#新鲜钛石膏	<b>45.79</b>	70.13	3191.72	56197.22	<b>70.34</b>	135.52	147.56	79.69	<b>92.76</b>	31.23	<b>0.75</b>	0.15	0.07	18321.30	0.04
6	5#新鲜钛石膏	<b>90.46</b>	70.71	2737.55	77487.60	59.72	<b>599.59</b>	323.31	131.30	<b>138.04</b>	37.34	<b>0.63</b>	0.16	0.05	25652.73	0.01
7	6#一厂新鲜钛石膏	8.54	47.13	1703.41	22839.12	15.02	108.56	166.10	30.94	5.45	8.90	<b>2.25</b>	0.31	0.02	3228.62	0.08
8	6#二厂高硫钛石膏	7.83	17.34	1472.21	42221.12	29.92	<b>291.31</b>	302.32	71.09	3.37	9.98	<b>1.06</b>	0.31	0.03	6514.50	0.08
9	7#新鲜钛石膏	<b>123.47</b>	58.68	4021.54	82049.22	<b>124.43</b>	<b>611.86</b>	345.04	<b>279.28</b>	<b>206.49</b>	46.89	<b>0.77</b>	0.29	0.06	21013.97	0.14
10	7#堆存钛石膏	<b>128.59</b>	58.94	3912.46	81901.60	<b>118.51</b>	<b>608.33</b>	328.51	<b>267.20</b>	<b>203.34</b>	56.49	<b>0.92</b>	0.31	0.07	20404.90	0.13
11	8#堆存钛石膏	13.34	81.89	2297.46	47014.38	36.55	<b>525.03</b>	219.19	78.19	13.95	<b>75.56</b>	<b>0.50</b>	1.10	0.03	6617.53	0.03
12	9#新鲜钛石膏	13.51	249.66	2475.61	41440.47	31.56	<b>286.32</b>	350.18	87.82	8.91	60.12	<b>0.46</b>	0.19	0.06	2399.34	0.03
13	9#二段红石膏	<b>22.26</b>	167.31	2481.03	49474.23	31.80	149.48	260.03	88.19	22.61	18.25	<b>0.84</b>	1.02	0.04	4680.74	0.00
14	10#新鲜钛石膏	<b>77.51</b>	277.26	2415.22	75275.76	46.38	55.23	192.67	69.42	37.18	<b>132.84</b>	<b>0.42</b>	0.19	0.04	7152.63	0.00
15	11#新鲜钛石膏	<b>57.83</b>	239.52	1409.20	38209.29	30.68	137.80	142.57	48.09	<b>56.39</b>	11.95	<b>1.10</b>	0.58	0.06	11673.52	<b>0.83</b>
16	12#白石膏	9.15	232.21	71.92	2611.62	5.24	69.62	29.35	34.82	3.74	21.45	<b>0.67</b>	0.33	0.01	3454.59	<b>0.90</b>
17	12#红石膏	10.37	333.96	1740.18	50474.28	48.23	<b>701.07</b>	383.93	<b>160.34</b>	9.66	41.18	<b>1.24</b>	0.90	0.01	3016.72	0.21
18	13#新鲜钛石膏	17.30	440.69	3201.42	50139.43	26.65	41.02	207.16	77.06	12.55	17.86	<b>0.86</b>	0.99	0.17	6069.05	0.20
19	14#白石膏	<b>84.05</b>	4.62	822.70	4475.64	1.03	6.17	7.00	3.31	0.72	0.80	0.06	0.02	0.01	10581.19	0.02
20	14#红石膏	13.69	217.18	2147.71	57962.52	24.72	103.81	240.09	27.19	9.36	6.54	<b>0.72</b>	0.78	0.01	5534.40	0.02
21	15#钛石膏	<b>56.67</b>	46.18	1547.28	30373.98	22.63	96.10	322.11	95.17	<b>117.46</b>	22.46	<b>0.62</b>	0.27	0.05	12880.16	0.01
22	16#钛石膏	<b>21.97</b>	18.09	2176.32	65855.04	51.02	85.33	271.88	<b>183.72</b>	19.50	3.86	0.26	0.19	0.02	36317.64	0.01
23	17#堆存钛石膏	11.78	60.19	57.49	440.35	12.48	96.36	328.27	86.09	4.83	7.70	<b>0.31</b>	0.28	0.05	2935.50	0.05
24	17#新鲜钛石膏	<b>73.34</b>	29.03	1836.10	40867.22	29.38	<b>236.88</b>	527.87	74.95	43.79	9.09	<b>0.38</b>	0.22	0.05	7852.73	0.03
25	18#堆存钛石膏	<b>59.53</b>	59.27	1381.00	31897.82	42.44	<b>279.64</b>	237.07	54.59	<b>82.17</b>	16.78	<b>1.99</b>	0.30	0.12	12837.58	0.02

编号	样品名称	砷 As	钡 Ba	锰 Mn	铁 Fe	镍 Ni	锌 Zn	钒 V	铬 Cr	铜 Cu	铅 Pb	镉 Cd	铍 Be	铊 Tl	钛 Ti	汞 Hg
26	19#新鲜钛石膏	127.65	33.31	1452.36	40213.65	51.80	113.23	451.53	126.07	66.40	28.05	0.54	0.18	0.56	12387.32	0.01
27	20#钛石膏	207.80	31.20	3012.65	63225.12	42.81	102.37	250.91	114.67	124.08	9.11	0.17	0.21	0.13	9865.45	0.05
28	21#钛石膏	125.88	24.35	1365.78	36542.36	20.32	198.63	160.73	60.77	75.02	7.19	0.37	0.17	0.04	6873.32	0.03
29	22#新鲜钛石膏	36.00	21.69	2378.12	48652.32	13.77	96.33	367.05	21.83	11.07	4.89	0.36	0.07	0.02	5632.23	0.02
30	23#钛石膏	92.00	31.32	956.32	41023.65	27.26	132.65	182.33	37.66	71.87	30.34	0.61	0.32	0.13	10689.32	0.01
GB 15618-2018 风险筛选值 最不利情景		20				60	200		150	50	70	0.3				0.5
GB 36600 第一类用地筛选值		20				150				2000	400	20				8
GB 36600 第二类用地筛选值		60				900				18000	800	65				38
GB 5085.6 毒性物质含量				30000									1000	1000		
GB/T 23486-2009 污泥用于绿化要求		75				100	2000		600	800	300	5				5
GB/T 24600-2009 土地改良用泥质要求		75				100	2000		600	800	300	5				5
GB 30760 水泥窑入窑生料要求		28		384		66	361		98	65	67	1				

通过对全国20种钛石膏样品进行前处理，采用HJ/T299预处理，按照GB5085.3-2007浸出毒性标准进行对比分析，得到了表18的钛石膏浸出毒性数据，但从浸出毒性来说，钛石膏不属于危险废物。采用HJ557方法对钛石膏进行预处理，按照GB8978最高允许排放限值进行对比分析，得到了表19的钛石膏浸出数据，从浸出特征污染物来说，大部分钛石膏属于一般工业固体废物I类范畴，但个别企业的钛石膏因锰元素较高，特别是白石膏，属于一般工业固体废物II类范畴，在进行回填和土地利用等综合利用方面需要进行更详细的环境风险评估。

表18 我国典型钛白粉企业20种钛石膏浸出液重金属测试结果 (mg/L, 酸浸 HJ/T299)

编号	样品名称	砷 As	钡 Ba	锰 Mn	镍 Ni	锌 Zn	钒 V	铬 Cr	铜 Cu	铋 Sb	铅 Pb	镉 Cd	银 Ag	硒 Se	铍 Be	铊 Tl
1	1#新鲜钛石膏	0.004	<0.0003	<0.0001	<0.0005	0.05	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.06	<0.001	<0.0001	0.11	<0.004	<0.0001	<0.002

编号	样品名称	砷 As	钡 Ba	锰 Mn	镍 Ni	锌 Zn	钒 V	铬 Cr	铜 Cu	锑 Sb	铅 Pb	镉 Cd	银 Ag	硒 Se	铍 Be	铊 Tl
2	2#低压压滤钛石膏	<0.002	<0.0003	6.53	0.021	0.05	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.09	<0.001	<0.0001	0.02	<0.004	<0.0001	<0.002
3	2#高压压滤钛石膏	<0.002	<0.0003	3.600	0.019	0.04	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.14	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
4	3#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	0.0009	0.03	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.14	<0.001	<0.0001	0.003	<0.004	<0.0001	<0.002
5	4#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	0.65	<0.0005	0.04	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.10	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
6	5#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	0.12	<0.0005	0.03	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.11	<0.001	<0.0001	0.002	<0.004	<0.0001	<0.002
7	6#一厂新鲜钛石膏	<0.002	0.0009	<0.0001	<0.0005	0.07	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.08	<0.001	<0.0001	0.003	<0.004	<0.0001	<0.002
8	6#二厂高硫钛石膏	<0.002	0.0003	23.53	0.0071	0.05	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.098	<0.001	<0.0001	0.002	<0.004	<0.0001	<0.002
9	7#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	0.70	0.009	0.03	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.12	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
10	7#堆存钛石膏	<0.002	<0.0003	0.63	<0.0005	0.01	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.17	<0.001	<0.0001	0.004	<0.004	<0.0001	<0.002
11	8#堆存钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	0.02	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.15	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
12	9#新鲜钛石膏	0.019	<0.0003	0.36	<0.0005	0.06	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.15	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
13	9#二段红石膏	<0.002	<0.0003	1.27	<0.0005	0.70	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.19	0.06	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
14	10#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	0.03	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.19	<0.001	<0.0001	0.002	<0.004	<0.0001	<0.002
15	11#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	2.70	<0.0005	0.04	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.14	0.10	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
16	12#白石膏	<0.002	<0.0003	6.81	0.040	22.42	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.07	0.07	<0.0001	0.11	<0.004	<0.0001	<0.002
17	12#红石膏	<0.002	<0.0003	0.23	<0.0005	0.53	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.10	<0.001	<0.0001	0.02	<0.004	<0.0001	<0.002
18	13#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	0.14	<0.0005	1.22	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.14	<0.001	0.0176	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
19	14#白石膏	0.003	<0.0003	5.95	<0.0005	1.22	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.15	<0.001	<0.0001	0.003	<0.004	<0.0001	<0.002
20	14#红石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	0.53	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.15	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
<b>HJ/T 299 预处理 GB 5085.3-2007 浸出毒性标准</b>		<b>5</b>	<b>100</b>		<b>5</b>	<b>100</b>		<b>15</b>	<b>100</b>		<b>5</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>0.02</b>	

表19 我国典型钛白粉企业20种钛石膏浸出液重金属测试结果 (mg/L, 浸出方法 HJ 557, 测试方法HJ766)

编号	样品名称	砷 As	钡 Ba	锰 Mn	镍 Ni	锌 Zn	钒 V	铬 Cr	铜 Cu	铅 Pb	镉 Cd	银 Ag	硒 Se	铍 Be	铊 Tl
1	1#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	0.04	<0.0005	0.05	<0.0004	0.09	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
2	2#低压压滤钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>8.70</b>	<0.0005	0.07	<0.0005	0.05	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
3	2#高压压滤钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>2.06</b>	<0.0005	0.02	<0.0005	0.04	<0.0004	0.07	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
4	3#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	0.02	<0.0005	0.03	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
5	4#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>0.15</b>	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002

编号	样品名称	砷 As	钡 Ba	锰 Mn	镍 Ni	锌 Zn	钒 V	铬 Cr	铜 Cu	铅 Pb	镉 Cd	银 Ag	硒 Se	铍 Be	铊 Tl
6	5#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
7	6#一厂新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>0.10</b>	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.05	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
8	6#二厂高硫钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>9.59</b>	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
9	7#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>1.06</b>	<0.0005	0.14	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.07	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
10	7#堆存钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>1.06</b>	<0.0005	0.14	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.07	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
11	8#堆存钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	0.08	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.06	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
12	9#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>1.27</b>	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.05	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001 /	<0.002
13	9#二段红石膏	<0.002	<0.0003	<b>0.68</b>	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.05	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
14	10#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.07	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
15	11#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<b>1.00</b>	<0.0005	0.12	<0.0005	<0.0002	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
16	12#白石膏	<0.002	<0.0003	<b>6.46</b>	<0.0005	3.94	<0.0005	<0.0002	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
17	12#红石膏	<0.002	<0.0003	<b>0.18</b>	<0.0005	<0.0002	<0.0005	<0.0002	<0.0004	0.05	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
18	13#新鲜钛石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	<0.0002	<0.0005	0.06	<0.0004	<0.001	0.018	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
19	14#白石膏	<0.002	<0.0003	<b>14.95</b>	<0.0005	0.70	<0.0005	0.06	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
20	14#红石膏	<0.002	<0.0003	<0.0001	<0.0005	<0.0002	<0.0005	0.05	<0.0004	<0.001	<0.0001	<0.0006	<0.004	<0.0001	<0.002
<b>HJ 557 预处理 GB 8978 最高允许排放限值</b>		<b>0.5</b>		<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>1.5</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.5</b>	<b>0.1</b>	<b>0.005</b>	
<b>GB 3838 III 类</b>		<b>0.05</b>				<b>1.0</b>			<b>1.0</b>	<b>0.05</b>	<b>0.005</b>		<b>0.01</b>		

调研组通过对全国30种钛石膏样品按照GB/T 5484进行分析，得到了表20的钛石膏主要化合物成分组成表。建议钛石膏用于生产建材、路基材料、土壤固化外加剂和钛石膏制酸联产石灰/水泥等的综合利用途径，与国家或地方土壤环境保护相关标准进行对比，如GB/T 9776、JC/T 2038、CJ/T 486-2015、GB/T 21371-2019等，在实际综合利用前，应进行检测，检测达标后方可进行综合利用。

表20 我国典型钛白粉企业30种钛石膏主要化学成分组成（《石膏化学分析方法》GB/T 5484，%）

编号	样品名称	三氧化硫	二水硫酸钙	三氧化二铁	氧化镁	水溶性氧化镁	水溶性氧化钠	水溶性氧化钾	氯离子	二氧化钛	二氧化硅	氧化铝
1	1#新鲜钛石膏	39.64	85.31	12.31	1.20	0.20	0.20	0.02	0.07	1.24	1.67	0.36
2	2#低压压滤钛石膏	35.07	75.49	16.25	1.51	1.37	0.31	0.00	0.17	1.07	2.64	2.03
3	2#高压压滤钛石膏	37.06	79.75	12.86	0.95	0.73	0.28	0.05	0.13	1.84	3.02	1.25
4	3#新鲜钛石膏	40.16	86.43	10.41	1.08	0.34	0.13	0.01	0.15	1.01	0.63	0.46
5	4#新鲜钛石膏	36.46	78.46	12.11	2.57	1.08	0.27	0.05	0.02	3.71	2.92	0.38
6	5#新鲜钛石膏	37.07	79.77	12.15	1.73	0.94	0.01	0.01	0.04	3.28	2.95	0.46

编号	样品名称	三氧化硫	二水硫酸钙	三氧化二铁	氧化镁	水溶性氧化镁	水溶性氧化钠	水溶性氧化钾	氯离子	二氧化钛	二氧化硅	氧化铝
7	6#一厂新鲜钛石膏	41.50	89.31	6.92	2.98	2.59	0.23	0.02	0.01	0.16	0.27	0.28
8	6#二厂高硫钛石膏	41.41	89.11	9.17	0.70	0.51	0.10	0.01	0.04	1.01	0.54	0.44
9	7#新鲜钛石膏	36.84	79.28	15.26	1.58	0.55	0.17	0.00	0.01	3.75	1.62	0.50
10	7#堆存钛石膏	36.77	79.14	14.82	1.53	1.12	0.10	0.03	0.02	3.62	1.51	0.48
11	8#堆存钛石膏	39.57	85.15	10.52	1.85	0.61	0.06	0.00	0.02	0.85	0.59	0.56
12	9#新鲜钛石膏	39.75	85.56	9.28	0.76	0.25	0.05	0.02	0.02	0.51	0.18	0.33
13	9#二段红石膏	40.01	86.11	11.81	0.89	0.17	0.04	0.04	0.00	0.78	0.53	0.36
14	10#新鲜钛石膏	38.81	83.53	13.66	1.61	1.51	0.08	0.02	0.19	1.17	0.79	0.35
15	11#新鲜钛石膏	40.45	87.05	9.83	1.21	0.27	0.01	0.01	0.05	2.32	1.78	0.61
16	12#白石膏	44.81	96.43	0.23	0.10	0.02	0.01	0.06	0.01	0.60	0.66	0.12
17	12#红石膏	41.31	88.90	9.84	0.92	0.07	0.03	0.01	0.10	0.17	0.33	0.22
18	13#新鲜钛石膏	41.00	88.23	10.26	0.88	0.62	0.06	0.02	0.08	1.12	0.71	0.44
19	14#白石膏	43.27	93.13	2.11	0.34	0.21	0.01	0.02	0.02	1.84	1.44	0.34
20	14#红石膏	40.21	86.53	12.10	0.72	0.22	0.12	0.00	0.12	1.11	1.44	0.45
21	15#钛石膏	41.07	88.39	8.18	0.62	0.57	0.06	0.01	0.06	2.85	1.05	0.44
22	16#钛石膏	32.26	69.42	19.68	2.50	0.79	0.09	0.01	0.00	0.17	0.27	0.31
23	17#堆存钛石膏	37.26	80.19	9.84	1.81	0.11	0.45	0.07	0.16	3.85	1.49	0.46
24	17#新鲜钛石膏	37.45	80.60	8.89	2.13	0.62	0.27	0.01	0.00	1.09	0.60	0.37
25	18#堆存钛石膏	38.88	83.68	10.21	1.14	1.11	0.09	0.01	0.05	1.01	2.17	0.86
26	19#新鲜钛石膏	31.84	68.53	13.06	1.16	1.10	0.42	0.07	0.05	3.78	1.03	0.59
27	20#钛石膏	37.10	79.85	8.04	0.41	0.25	0.25	0.03	0.04	2.14	1.88	0.64%
28	21#钛石膏	41.47	89.25	6.89	1.67	1.52	0.14	0.10	0.04	1.90	1.37	0.45%
29	22#新鲜钛石膏	40.49	87.13	9.46	0.43	0.17	0.23	0.04	0.00	1.39	0.18	0.16%
30	23#钛石膏	39.82	85.69	8.90	1.37	0.78	0.23	0.03	0.03	1.53	1.59	0.62%
本标准路基材料对钛石膏质量要求			≥75	≤15		≤2		≤0.3				
本标准土壤固化外加剂对钛石膏要求			≥75	≤10		≤0.3	≤0.3	≤0.3	≤0.04	≤3.5		
本标准制酸联产石灰、水泥等对钛石膏要求		≥40%		≤1.5	≤2						≤8	≤1.5

编号	样品名称	三氧化硫	二水硫酸钙	三氧化二铁	氧化镁	水溶性氧化镁	水溶性氧化钠	水溶性氧化钾	氯离子	二氧化钛	二氧化硅	氧化铝
GB/T 9776	建筑石膏粉产品要求		≥80			≤0.1	≤0.05		≤0.05			
JC/T 2038	高强石膏对于石膏原料的要求		≥85									
GB/T 21371-2019	用于水泥中的钛石膏原料要求		≥75						≤0.05			

采用HJ 557方法对钛石膏进行预处理，按照GB 8978最高允许排放限值、GB/T 14848、GB 3838和GB 5084进行对比分析，结果如表21所示，钛石膏的浸出液的硫酸根高于GB/T 14848，建议钛石膏进行综合利用时，要避开地表水和地下水饮用水源区等敏感区域。

表21 我国典型钛白粉企业17种钛石膏浸出液部分阴离子测试指标 (mg/L)

编号	样品名称	水浸			酸浸		
		F <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)
1	1#新鲜钛石膏	ND	56.39	1755.58	ND	52.26	1699.87
2	2#低压压滤钛石膏	ND	262.46	2043.24	ND	257.93	2156.54
3	2#高压压滤钛石膏	ND	215.97	1804.13	ND	208.994	1880.29
4	3#新鲜钛石膏	ND	100.09	1719.68	ND	96.21	1749.48
5	4#新鲜钛石膏	ND	31.78	1950.69	ND	32.22	2067.50
6	5#新鲜钛石膏	ND	101.34	2444.78	ND	115.60	2448.42
7	6#一厂新鲜钛石膏	ND	19.88	1716.93	ND	17.37	1997.79
8	6#二厂高硫钛石膏	ND	51.95	2001.14	ND	45.87	2183.99
9	7#新鲜钛石膏	ND	37.12	1847.17	ND	29.04	1916.60
10	7#堆存钛石膏	ND	33.13	1761.14	ND	34.12	1870.34
11	8#堆存钛石膏	ND	36.86	1879.35	ND	42.85	1949.36
12	9#新鲜钛石膏	ND	44.86	1795.40	ND	43.53	1966.36
13	9#二段红石膏	ND	27.55	1965.70	ND	21.76	2060.66
14	10#新鲜钛石膏	ND	344.59	1559.15	ND	349.67	1570.38
15	11#新鲜钛石膏	ND	61.32	1789.02	0.65	58.19	2029.09
16	12#白石膏	ND	59.52	1955.25	ND	43.37	2018.90
17	12#红石膏	ND	96.30	1747.57	ND	113.45	1853.97
GB 8978		10	/	/			
GB/T 14848		/	250	250			
GB 3838		1	250 (作为饮用水源)	250 (作为饮用水源)			
GB 5084		2	350	/			

根据GB 6566-2010，筛选了全国5种典型钛石膏进行放射性指标检测，结果如表22所示，钛石膏的内照射指数和外照射指数均远小于1，满足标准要求。

表22 钛石膏放射性指数

样品名称	226Ra(Bq/Kg)	232Th(Bq/Kg)	40K(Bq/Kg)	内照射指数 <sub>IR</sub>	外照射指数 <sub>Ir</sub>
15#堆存钛石膏	11.2	18.6	6.2	0.056	0.103
1#新鲜钛石膏	13.9	2.21	8.2	0.069	0.048
11#新鲜钛石膏	11.3	3.22	17.4	0.056	0.047
12#白石膏	4.1	3.79	24.0	0.020	0.031
12#红石膏	8.5	3.64	23.1	0.042	0.036
GB6566-2010				<1	<1

## 5 钛石膏利用主要技术

钛石膏的综合利用是将其进行干燥、煅烧、除杂、调理、预处理等方式，使其作为水泥缓凝剂、水泥原料、石膏制品等建材利用，或进行园林绿化、土壤改良剂等土地利用，或进行道路回填、固化土、充填、生态修复、制酸联产水泥等。如图16所示。

本标准提出的技术内容主要有：建材利用、土地利用、路基材料、充填、回填、生态修复、土壤固化剂、钛石膏制硫酸。

建材利用主要包括：水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂和特种水泥原料。

土地利用主要包括：土壤改良（治理）剂、园林绿化用土以及覆盖用土。

路基材料主要包括：公路路堤填筑及路基垫层填料。

采坑充填主要包括：堆坡法和填坑法

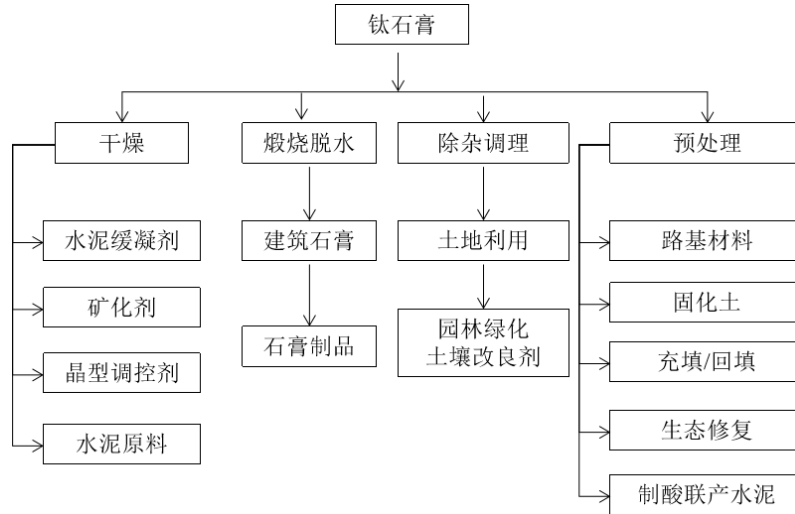


图16 钛石膏主要综合利用方式

## 6 预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

本标准实施后，将为钛石膏在建材利用、土地利用、路基材料、充填、生态修复、土壤固化外加剂等方面的综合利用提供技术与政策，一方面，能有效提升钛石膏综合利用率，推动钛石膏的资源化利用，减少土地利用，有效防控环境风险，同时能减少因钛石膏堆存产生的土地占用，保护土壤资源；另一方面，可推动行业产业升级，创造显著经济效益。

## 四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况

无国际标准或国外先进标准的情况。

## 五、未采用国际标准的原因

无国际标准或国外先进标准的情况。

## 六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。



## 七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在制定过程中，广泛征求了行业相关单位和专家的意见和建议，开展深入探讨并提供有利的论证及数据支撑，最终对标准要求达成一致，无重大分歧意见。

## 八、涉及专利的有关说明

经查，本标准制定过程中所列技术内容未涉及专利和知识产权的情况。

## 九、实施国家标准的要求

1.标准印发实施后，保证标准文本的充足供应，企业、相关机构和地方管理部门都能及时获得标准文本。

2.建议本标准批准发布6个月后实施，标准发布后，及时组织开展宣贯与培训，以更好促进标准应用实施。

3.鼓励行业内相关企业成立标准贯彻实施小组，及时进行标准的贯彻解读，并根据实际情况及时修订，对贯标过程中出现的技术问题协调处理并记录，进行长期监督检查。

## 十、其他应当说明的事项

无。