



中华人民共和国国家标准

GB/T 45015—2024

钛石膏综合利用技术规范

Technical specifications for comprehensive utilization of titanium gypsum



2024-11-28 发布

2025-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 3

4 总体要求 4

5 技术要求与证实方法 4

 5.1 钛石膏建材利用 4

 5.2 钛石膏土地利用 6

 5.3 钛石膏生态修复 7

 5.4 钛石膏道路利用 9

 5.5 钛石膏充填 11

 5.6 钛石膏回填 12

 5.7 钛石膏土壤固化 14

 5.8 钛石膏制硫酸(副产水泥) 16

6 污染物排放 17

7 包装、标识、贮存和运输 17

 7.1 包装 17

 7.2 标识 17

 7.3 贮存 18

 7.4 运输 18

8 监测与频次 18

附录 A (资料性) 钛石膏作为水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂生产水泥或作为主要原料生产特种水泥的作用机理 19

 A.1 水泥缓凝剂 19

 A.2 水泥矿化剂 19

 A.3 水泥结构调制剂 19

 A.4 生产特种水泥 19

附录 B (规范性) 二水硫酸钙含量的测定 20

 B.1 附着水含量的测定 20

 B.2 结晶水含量的测定 20

 B.3 二水硫酸钙含量计算 20

参考文献 21

图 1 钛石膏作为水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂生产水泥或作为主要原料生产特种水泥的
工艺流程示意图 5

图 2 钛石膏制备石膏制品的工艺流程示意图 6

图 3 钛石膏土地利用的工艺流程示意图 7

图 4 钛石膏生态修复的工艺流程示意图 8

图 5 钛石膏道路利用的工艺流程示意图 9

图 6 钛石膏充填工艺流程示意图 11

图 7 钛石膏回填工艺流程示意图 12

图 8 钛石膏土壤固化工艺流程示意图 14

图 9 钛石膏制硫酸(副产水泥)工艺流程示意图 16

表 1 路基材料用钛石膏性能指标及分析方法 9

表 2 路基材料产品等级划分、性能及分析方法 10

表 3 压滤后钛石膏性能指标及分析方法 11

表 4 充填用钛石膏浸出液中有害成分限值及分析方法 11

表 5 钛石膏基土壤固化剂用钛石膏的性能指标及分析方法 15

表 6 钛石膏基土壤固化剂性能指标及分析方法 15

表 7 固化土的性能指标及分析方法 16

表 8 制硫酸(副产水泥)用钛石膏性能指标及分析方法 17

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钒钛磁铁矿综合利用标准化技术委员会(SAC/TC 579)归口。

本文件起草单位：生态环境部固体废物与化学品管理技术中心、山东鲁北化工股份有限公司、宁波新福钛白粉有限公司、龙佰集团股份有限公司、生态环境部南京环境科学研究所、四川省生态环境科学研究院、攀西钒钛检验检测院、广西蓝星大华化工有限责任公司、潜江方圆钛白有限公司、攀钢集团重庆钛业有限公司、内蒙古国城资源综合利用有限公司、广西金茂钛业股份有限公司、广东惠云钛业股份有限公司、安徽金星钛白(集团)有限公司、山东东佳集团股份有限公司、山东道恩钛业股份有限公司、美联新材料(四川)有限公司、生态环境部环境规划院、山东省固体废物和危险化学品污染防治中心、中国涂料工业协会、中国硫酸工业协会、四川省钒钛钢铁产业协会、北新集团建材股份有限公司、南京工业大学、济南裕兴化工有限责任公司、攀枝花市钒钛产业协会、攀枝花学院、北京化工大学、江苏镇江建筑科学研究院集团股份有限公司、成都千砾金科技创新有限公司、攀钢集团研究院有限公司。

本文件主要起草人：何艺、吕天宝、陆祥芳、马兵、朱义、和奔流、雍毅、张浩、周晓东、齐祥昭、张东琦、李力、冯祥义、邵国雄、吴彭森、李子敬、郭卫广、周昊、韩春辉、李天宝、黎承健、何明川、张本发、孙鹏、李建立、曾小林、李晓亮、仲利、肖尚周、王臻、唐仕钧、郭海强、张大伟、王嘉雍、敖林、吴浩、陈金国、陆缪、陈建立、韦康、李峙、李崇、陈新红、马宪国、周宇、黄建文、陈红霞、华苏东、张邦绪、杨绍利、孙立科、陈钢、唐明亮、蒙海宁、张修臻、张晓锋、崔艳、蒋贤均、郑洋、张后虎、罗贵玉、贾真、赵康、张玉荣、武健民、陆洋、刘力维、杨保祥、林爱军、龚家竹、周明勇、陆小军、庞志俭、陈静。



钛石膏综合利用技术规范

1 范围

本文件规定了钛石膏综合利用的总体要求,技术要求与证实方法,污染物排放,包装、标识、贮存和运输,监测与频次。

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 规范性引用文件

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

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 5085.3 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别
GB/T 5484—2024 石膏化学分析方法
GB 6566 建筑材料放射性核素限量
GB/T 7484 水质 氟化物的测定 离子选择电极法
GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法
GB 8978 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 13078 饲料卫生标准
GB/T 14848 地下水质量标准
GB/T 15555.1 固体废物 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法
GB/T 15555.4 固体废物 六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光光度法
GB/T 15555.7 固体废物 六价铬的测定 硫酸亚铁铵滴定法
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 16489 水质 硫化物的测定 亚甲基蓝分光光度法

- 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 21010 土地利用现状分类
- 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 水泥窑协同处置固体废物技术规范
- GB/T 30760—2024 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 50137 城市用地分类与规划建设用地标准
- 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 299 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法
- HJ/T 393 防治城市扬尘污染技术规范
- HJ 84 水质 无机阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-})的测定 离子色谱法
- HJ 484 水质 氰化物的测定 容量法和分光光度法
- 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 687 固体废物 六价铬的测定 碱消解/火焰原子吸收分光光度法
- 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 750 固体废物 总铬的测定 石墨炉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 752 固体废物 铍 镍 铜和钼的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- HJ 766 固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法
- HJ 781 固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法
- 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 787 固体废物 铅和镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- 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 水质 pH 值的测定 电极法
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 α 型高强石膏
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 1121.1 土壤检测 第 1 部分:土壤样品的采集、处理和贮存
NY/T 1121.2 土壤检测 第 2 部分:土壤 pH 的测定
NY/T 1121.3 土壤检测 第 3 部分:土壤机械组成的测定
NY/T 1121.4 土壤检测 第 4 部分:土壤容重的测定
NY/T 1121.6 土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定
NY/T 3034 土壤调理剂 通用要求
TD/T 1036 土地复垦质量控制标准
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 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钛石膏 titanium gypsum

硫酸法钛白生产过程中,废酸及酸性废水经石灰石、石灰、电石渣等钙基碱性物质中和后,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。

[来源:GB/T 42346—2023,5.4.6,有修改]

3.2

钛石膏综合利用 comprehensive utilization of titanium gypsum

钛石膏(3.1)经预处理后,用于建材利用、土地利用、生态修复、道路利用、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。

3.3

钛石膏建材利用 utilization of titanium gypsum in building materials

钛石膏(3.1)作为添加剂或原料生产水泥助剂及水泥,或部分替代天然石膏生产石膏制品。

注:钛石膏建材利用的主要用途有生产水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂、特种水泥、石膏制品等。

3.4

钛石膏土地利用 application of titanium gypsum to land use

利用富含钙(Ca)、硫(S)等土壤所需营养元素的钛石膏(3.1)生产土壤调理剂或人造土。

3.5

钛石膏生态修复 ecological remediation by titanium gypsum

利用钛石膏(3.1)作为基底材料或以其为原料生产的土壤调理剂、人造土,对遭到退化、损伤或破坏的土地生态系统进行修复。

3.6

钛石膏道路利用 utilization of titanium gypsum in roads

钛石膏(3.1)与素土等一种或多种辅料按比例掺混后,用于公路道路路基施工。

3.7

钛石膏充填 mining with backfilling using titanium gypsum

利用钛石膏(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,改善、修复采矿采空区的地形地貌。

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(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。

3.9

钛石膏土壤固化 titanium gypsum soil solidification

利用钛石膏(3.1)制备得到的土壤固化剂与土壤加水搅拌,产生交错的增强土壤粒子连接作用的片状、纤维状或针状晶体,改善土壤孔隙结构,提高土壤强度。

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(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。

4 总体要求

4.1 钛石膏综合利用应确保全过程环境安全与人体健康。

4.2 钛石膏综合利用应明确钛石膏来源,化学组分、附着水含量等理化指标及潜在的污染风险。

4.3 钛石膏综合利用建设项目的选址应符合国土空间规划与生态环境保护规划的要求。

4.4 钛石膏综合利用企业应建立完善的环境管理制度,包括环境影响评价、环境管理计划、环境保护责任、排污许可、监测、信息公开、环境应急预案和环境保护档案管理。

4.5 钛石膏综合利用污染防治应符合 GB 18599、HJ 1091 的要求。

5 技术要求与证实方法

5.1 钛石膏建材利用

5.1.1 工艺流程简述及示意图

5.1.1.1 钛石膏作为水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂生产水泥或作为主要原料生产特种水泥的工艺流程示意图见图 1,其作用机理见附录 A。生产过程宜按以下步骤进行:

a) 破碎混合:将陈化钛石膏和其他原料破碎混合,制成均质混合料(生料);

注:此阶段加入配伍的钛石膏用做水泥助剂(矿化剂、结构调制剂)或水泥原料。

b) 预处理:将均质混合料(生料)送入窑尾预热,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(约 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。

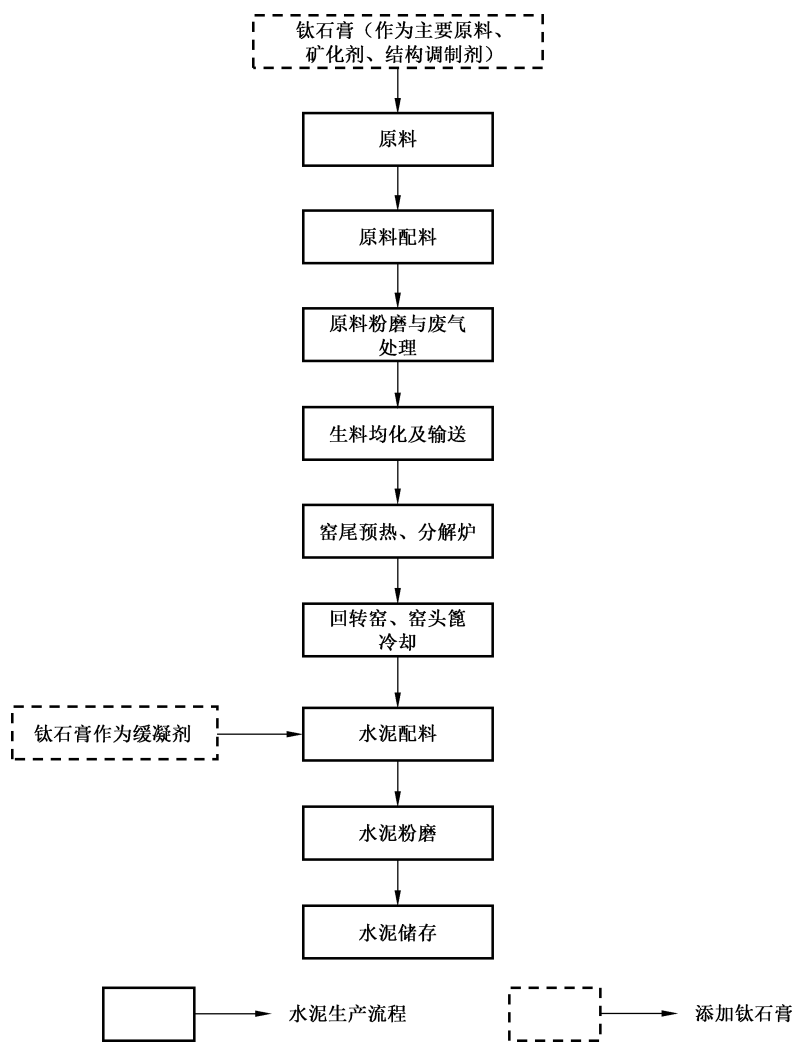


图 1 钛石膏作为水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂生产水泥或作为主要原料生产特种水泥的
工艺流程示意图

5.1.1.2 钛石膏经干燥、除杂、煅烧、水热等，制备得到 α 半水石膏 ($\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) 和 β 半水石膏 ($\beta\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)，掺入原状钛石膏、纤维(增强材料)、集料、不同功能外加剂，经混合、搅拌、成型、养护制成纸面石膏板、石膏砌块、抹灰石膏、蒸压加气混凝土砌块等。钛石膏制备石膏制品的工艺流程示意图见图 2。

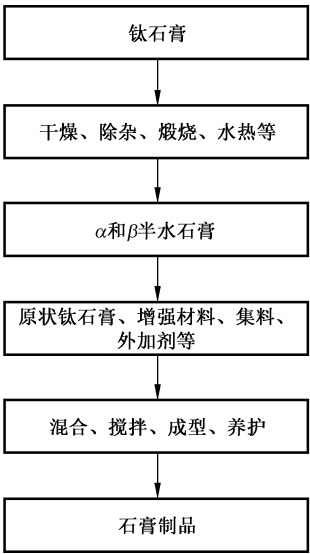


图 2 钛石膏制备石膏制品的工艺流程示意图

5.1.2 原料

- 5.1.2.1 钛石膏用做水泥缓凝剂时,性能指标应符合 GB/T 21371 的要求。
- 5.1.2.2 钛石膏用做通用硅酸盐水泥熟料和硫铝酸盐水泥等特种水泥的矿化剂、结构调制剂时,应按 GB 175 和 GB/T 20472 中关于性能验证方法的要求进行验证,证明其加入对水泥性能无害。
- 5.1.2.3 钛石膏制备石膏制品时,应根据制品需求对铁等物质含量进行控制。

5.1.3 产品性能

- 5.1.3.1 利用钛石膏生产的通用硅酸盐水泥,产品性能及对应的验证方法应符合 GB 175 的要求。
- 5.1.3.2 利用钛石膏生产的硫铝酸盐水泥,产品性能及对应的验证方法应符合 GB/T 20472 的要求。
- 5.1.3.3 利用钛石膏生产的建筑石膏,产品性能及对应的验证方法应符合 GB/T 9776 的要求。白度等由供需双方商定。
- 5.1.3.4 利用钛石膏生产的高强石膏,产品性能及对应的验证方法应符合 JC/T 2038 的要求。
- 5.1.3.5 利用钛石膏生产的纸面石膏板,产品性能及对应的验证方法应符合 GB/T 9775 的要求。
- 5.1.3.6 利用钛石膏生产的石膏砌块,产品性能及对应的验证方法应符合 JC/T 698 的要求。
- 5.1.3.7 利用钛石膏生产的抹灰石膏,产品性能及对应的验证方法应符合 GB/T 28627 的要求。
- 5.1.3.8 利用钛石膏生产的蒸压加气混凝土砌块,产品性能及对应的验证方法应符合 GB/T 11968 的要求。

5.1.4 有害成分控制

钛石膏建材利用过程中生产的产品,其有害物质含量及对应的验证方法应符合 GB/T 30760 的规定。

5.2 钛石膏土地利用

5.2.1 工艺流程简述及示意图

钛石膏粉碎(如有需要加入石灰混匀调节 pH 值)制成土壤调理剂,或粉碎后与有机质、沙土等按比例混合均化制备人造土。钛石膏土地利用的工艺流程示意图见图 3。

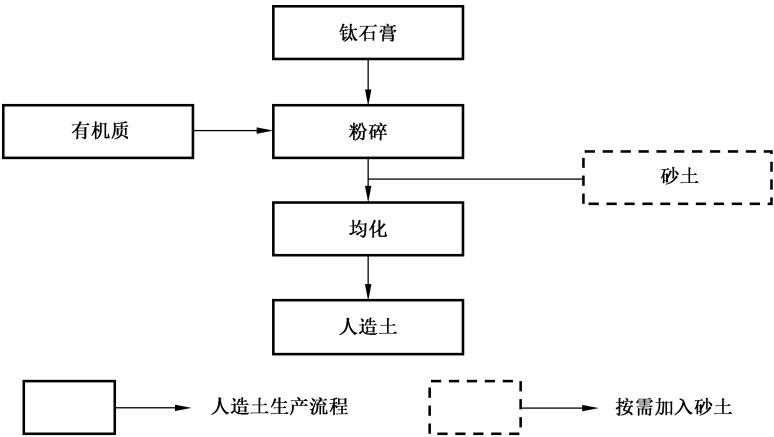


图 3 钛石膏土地利用的工艺流程示意图

5.2.2 原料

5.2.2.1 钛石膏制备土壤调理剂时,粒径、pH 值及相应的配施方案应根据被调理土地的土壤特性确定。

5.2.2.2 钛石膏制备人造土时,原料 pH 值范围为 6.0~9.0,与之对应的风险管制值及验证方法应符合 GB 15618 的要求。

5.2.3 产品性能

5.2.3.1 利用钛石膏制备的土壤调理剂,指标要求、限量要求、毒性试验、效果试验应符合 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,用于耕地的土地质量等级按 GB/T 33469 确定。

5.2.3.2 利用钛石膏制备的人造土,施用后土地利用现状分类和与之对应用途分别按 GB/T 21010、TD/T 1036 的要求确定;施用后土地宜用于培植喜铁植物。

5.2.4 有害成分控制

5.2.4.1 利用钛石膏制备的土壤调理剂,污染物含量及对应的验证方法应符合 GB 15618 风险筛选值和 NY 1110 的要求。

5.2.4.2 利用钛石膏制备的人造土,用于种植农产品时,污染物含量及对应的验证方法应符合 GB 15618 风险筛选值的要求;用于其他用途时,污染物含量及对应的验证方法应符合 GB 15618 风险管制值的要求。

5.3 钛石膏生态修复

5.3.1 工艺流程简述及示意图

根据土地规划及修复后的用途,利用钛石膏配合原有表土、人造土,选择耕作层修复或表面铺填,对修复区域(存量采矿用地、盐碱地、沙化土地、损毁土地等)进行平整,使其达到复垦或种植植被的条件。钛石膏生态修复的工艺流程示意图见图 4。

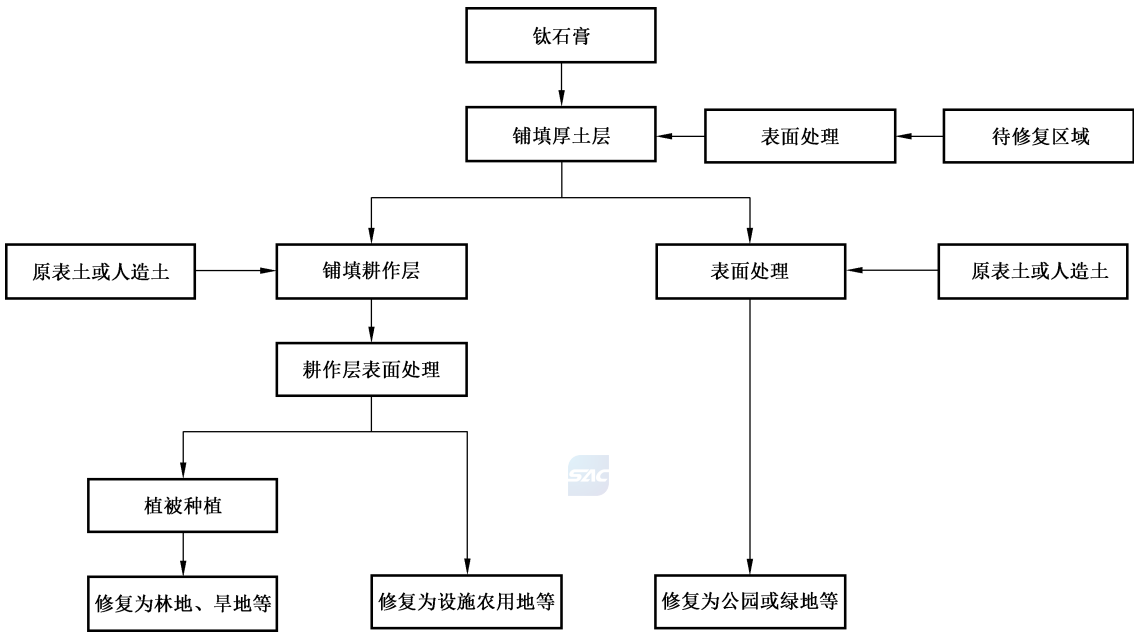


图 4 钛石膏生态修复的工艺流程示意图

5.3.2 原料

5.3.2.1 用于生态修复的钛石膏,应符合 GB 18599 对一般工业固体废物第 I 类的要求,其中用于林地、旱地、设施农用地等的钛石膏,污染物含量及对应的验证方法应满足 GB 15618 风险筛选值的要求;永久用于公园与绿地的钛石膏,污染物含量及对应的验证方法应满足 GB 36600 风险筛选值的要求。

5.3.2.2 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—2024 中第 9 章的规定执行。

5.3.2.3 钛石膏的 pH 值范围为 7.5~9.0,pH 值的测定按 GB/T 5484—2024 中第 25 章的规定执行。

5.3.3 生态修复

5.3.3.1 利用钛石膏生态修复应符合农产品质量安全、人居环境安全和人体健康安全有关法律法规的要求。

5.3.3.2 根据修复区域土地原使用性质,因地制宜地开展钛石膏生态修复。

5.3.3.3 钛石膏生态修复项目施工前,应按照 TD/T 1068 的要求编制工程项目实施方案,并报政府部门批准(含具有批准性质的报备程序)。

5.3.3.4 修复区域用于农用地时,土地复垦质量控制标准应符合 TD/T 1036—2013 中附录 D 的要求,其中土壤样品的采集、处理按 NY/T 1121.1 的规定执行,土壤 pH 值的测定按 NY/T 1121.2 的规定执行,土壤质地、砾石含量的测定按 NY/T 1121.3 的规定执行,土壤容量的测定按 NY/T 1121.4 的规定执行,土壤有机质的测定按 NY/T 1121.6 的规定执行。

5.3.3.5 修复区域用于公园与绿地时,栽植土壤有效土层厚度及对应的验证方法应符合 CJJ 82—2012 中表 4.1.1 的要求。

5.3.4 生态修复施工

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

5.3.4.2 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。

- 5.3.4.3 修复区域用于林地、旱地、公园与绿地时,铺填厚土层和耕作层应使用原表土或人造土;用于设施农用地时,表面应按项目建设要求进行压实处理。
- 5.3.4.4 生态修复项目完工后,宜尽快交由需方使用。

5.3.5 有害成分控制

- 5.3.5.1 修复区域地下水水质应不低于原地下水水质,地下水质量判定按 GB/T 14848 的规定执行。
- 5.3.5.2 修复区域污染物含量及对应的验证方法应符合 GB 15618 风险筛选值的要求。种植收获的粮食、果实等农产品及作物中有害成分及对应的验证方法应符合 GB 2762 的要求,牧草中有害成分及对应的验证方法应符合 GB 13078 的要求;修复区域用于公园与绿地的污染物含量及对应的验证方法应符合 GB 36600 风险筛选值的要求。

5.4 钛石膏道路利用

5.4.1 工艺流程简述及示意图

钛石膏与素土、胶结料(如水泥、石灰、矿粉、粉煤灰、固化剂……)等中的一种或多种辅料按比例掺混、破碎、搅拌均匀,配制成混合料,经摊铺、压实后用于道路的路基。钛石膏道路利用的工艺流程示意图见图 5。

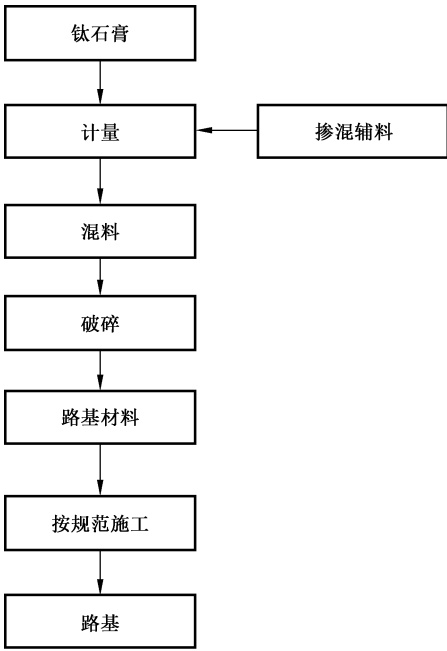


图 5 钛石膏道路利用的工艺流程示意图

5.4.2 原料

路基材料用钛石膏性能指标及分析方法见表 1。

表 1 路基材料用钛石膏性能指标及分析方法

项目	限值	分析方法
三氧化二铁(Fe ₂ O ₃)含量	≤20%	GB/T 5484—2024 第 15 章
水溶性氧化镁(MgO)含量(干基)	≤2%	GB/T 5484—2024 第 27 章

表 1 路基材料用钛石膏性能指标及分析方法（续）

项目	限值	分析方法
水溶性氧化钾(K ₂ O)含量(干基)	≤0.3%	GB/T 5484—2024 第 28 章
pH 值	6~9	GB/T 5484—2024 第 25 章
内照射指数(I _{Ra})	≤1.0	GB 6566
外照射指数(I _r)	≤1.0	
附着水(H ₂ O)含量(湿基)	≤40%	GB/T 5484—2024 第 9 章
二水硫酸钙(CaSO ₄ ·2H ₂ O)含量(干基)	≥75%	按附录 B 执行
路基材料中钛石膏添加比例	5%~10%	—

5.4.3 产品性能

钛石膏制备的路基材料,其抗压强度应符合 JTG/T F20 的要求,产品等级划分、性能及分析方法见表 2,施工路面安定性、抗折强度等其他性能指标由生产单位与使用单位根据道路施工质量规范商定。

表 2 路基材料产品等级划分、性能及分析方法

路基部位	项目	限值			分析方法
		一级品 ^a	二级品 ^b	三级品 ^c	
上堤路	液限	≤50%			JTG 3430—2020 第 9 章
	塑限	≤26%			JTG 3430—2020 第 9 章
上堤路	承载比	≥8%	6%~<8%	5%~<6%	JTG 3430—2020 第 18 章
	压实度	≥94%		93%~<94%	JTG 3430—2020 第 16 章
	自由膨胀率	≤40%	>40%~60%		JTG 3430—2020 第 29 章
下堤路	液限	≤50%			JTG 3430—2020 第 9 章
	塑限	≤26%			JTG 3430—2020 第 9 章
	承载比	≥5%	4%~<5%	3%~<4%	JTG 3430—2020 第 18 章
	压实度	≥93%	92%~<93%	90%~<92%	JTG 3430—2020 第 16 章
	自由膨胀率	≤60%			JTG 3430—2020 第 29 章
^a 一级品宜用于高速公路、一级公路。					
^b 二级品宜用于二级公路。					
^c 三级品宜用于三、四级公路。					

5.4.4 产品使用

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。

5.4.5 有害成分控制

钛石膏制备的路基材料,依据 HJ/T 299 对样品进行浸出实验,其重金属含量限值及对应的验证方

法、可浸出重金属含量限值及对应的验证方法应分别满足 GB/T 30760—2024 中表 2、表 3 的要求。

5.5 钛石膏充填

5.5.1 工艺流程简述及示意图

经过滤、压滤后的钛石膏运输至充填场地进行充填作业，充填服务期满，对充填场地进行封场。钛石膏充填工艺流程示意图见图 6。

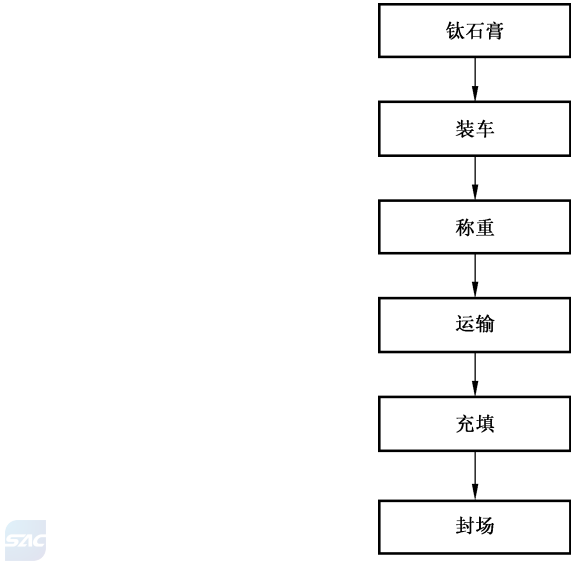


图 6 钛石膏充填工艺流程示意图

5.5.2 原料

压滤后钛石膏性能指标及分析方法见表 3。

表 3 压滤后钛石膏性能指标及分析方法

序号	项目	限值	分析方法
1	含水率	≤45 %	GB/T 5484—2024 第 9 章
2	pH 值	6~9	HJ 1147

5.5.3 有害成分限值

充填用钛石膏浸出液按 HJ 557 的方法获取，浸出液中有害成分限值及分析方法见表 4。浸出液中其他有害成分限值应符合 GB 18599 对一般工业固体废物第 I 类的要求。

表 4 充填用钛石膏浸出液中有害成分限值及分析方法

序号	项目	浸出液中污染物浓度限值 mg/L	分析方法
1	总汞	≤0.05	GB/T 15555.1、HJ 702
2	总镉	≤0.1	HJ 766、HJ 781、HJ 786、HJ 787
3	总铬	≤1.5	HJ 749、HJ 750

表 4 充填用钛石膏浸出液中有害成分限值及分析方法（续）

序号	项目	浸出液中污染物浓度限值 mg/L	分析方法
4	六价铬	≤0.5	GB/T 15555.4、GB/T 15555.7、HJ 687
5	总砷	≤0.5	HJ 702、HJ 766
6	总铅	≤1.0	HJ 766、HJ 781、HJ 786、HJ 787
7	总镍	≤1.0	HJ 751、HJ 752、HJ 766、HJ 781
8	总铜	≤2.0	HJ 751、HJ 752、HJ 766、HJ 781
9	总锌	≤5.0	HJ 766、HJ 781、HJ 786
10	总锰	≤5.0	GB/T 11911、HJ 766、HJ 781
11	总氰化物	≤0.5	GB 5085.3、HJ 484
12	硫化物	≤1.0	GB 5085.3、GB/T 16489
13	氟化物	≤20	GB/T 7484、HJ 84
同一项目，不同检测分析方法的检出值不同时，以检出值最大的分析方法为准			

5.5.4 充填施工

- 5.5.4.1 钛石膏用于充填应根据当地政府总体发展规划、环境保护规划和生态建设规划的要求，确定充填场地范围、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。
- 5.5.4.2 充填场地应定期检查维护防渗工程、监测地下水水质。发现异常应立即采取补救措施。
- 5.5.4.3 充填场地服务期满，应启动封场作业（可分期实施）。

5.6 钛石膏回填

5.6.1 工艺流程简述及示意图

钛石膏装车运输至完成了环境本底调查与风险评估、工程设计、场地建设的回填区域，以粉块状压实和胶凝固化等方式开展回填作业，使回填区域达到复垦、景观恢复、建设施工等用地要求，并监测其生态环境。钛石膏回填工艺流程示意图见图 7。

注：粉块状压实回填是钛石膏破碎后，分层压实填筑到作业区域；胶凝固化回填是钛石膏与胶凝材料浇筑固化到作业区域。

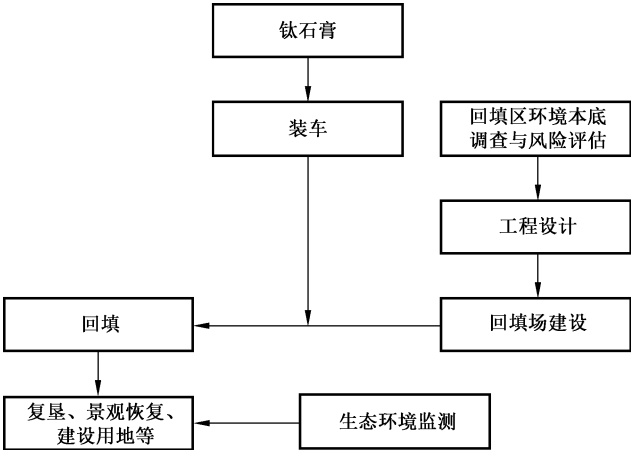


图 7 钛石膏回填工艺流程示意图

5.6.2 原料

5.6.2.1 钛石膏作为回填材料应符合 GB 18599 中第 I 类一般工业固体废物的要求。

5.6.2.2 附着水含量根据工程设计要求由供需双方商定。

5.6.3 项目及施工管理

5.6.3.1 回填项目要求

5.6.3.1.1 回填场地应符合国家和当地生态保护及污染防治等要求,并与当地城市总体规划和国土空间规划协调一致。

5.6.3.1.2 回填项目应制定回填方案,方案内容包括但不限于:钛石膏指标要求、回填场地范围、回填区环境本底调查与风险评估、回填材料、回填工程设计、生态恢复要求、后期管理等。

5.6.3.1.3 回填区域环境本地调查,应按 HJ 2.3、HJ 610、HJ 25.3、HJ 964 的要求重点评估使用钛石膏对其地下水、地表水及周边土壤的环境污染风险。

5.6.3.1.4 回填区域工程设计,应在作业施工前根据回填区域实际情况拟定,内容包括场地平整、安全与环保有关管控措施等。

5.6.3.1.5 回填修复露天开采地表挖掘区、地下开采塌陷区等矿山区时,恢复治理方案(规划)的编制、治理技术内容、安全规范应分别符合 HJ 652、HJ 651、GB 39496 的要求。

5.6.3.1.6 回填区域用于城市建设用地时,回填后的土地应符合 GB 50137 的要求。

5.6.3.2 污染防治要求

5.6.3.2.1 环境风险评估对地下水有潜在影响的,应首先对回填用钛石膏进行预处理。预处理后仍不符合环境风险评估预期要求的,应在回填作业区与基础层之间设置符合环境风险评估要求的隔水层。

5.6.3.2.2 回填用钛石膏临时堆存和填埋时的污染控制应符合 GB 18599 的要求。

5.6.3.2.3 回填区域宜根据周边地形修建截洪沟,防止回填区域外的雨水大量流入回填区冲走回填的钛石膏。

5.6.3.2.4 回填区域宜在底部铺设导排系统、修建收集池,集中处理并监测渗滤液。

5.6.3.2.5 回填区域的渗滤液排放应按 GB 8978 的规定执行,回填区域周边收纳水体对污水排放要求高,制定了地方标准的应一并执行。

5.6.3.2.6 回填作业区的扬尘防治及道路积尘负荷的监测方法应符合 HJ/T 393 的要求。

5.6.3.3 回填施工要求

5.6.3.3.1 回填施工应避开雨天,并在作业现场做好防雨应急措施。

5.6.3.3.2 采用粉块状压实回填应根据场地实际情况,采取立体分层、倾斜卸料、分层碾压的方式分层、分区回填压实。逐层压实度宜不低于 90%。

5.6.3.3.3 采用胶凝固化回填应将按比例拌混的浆体从下至上梯级浇筑,经振捣、养护、凝固成型,确保单轴抗压强度等满足工程设计要求。同时,集中收集处理施工期产生的滤出水。

5.6.3.3.4 回填体顶面与周围原基面应设置坡度(坡向四周排水沟),便于回填区雨水经排水沟、截洪沟顺利排走。

5.6.3.4 回填工程管理要求

5.6.3.4.1 回填工程责任单位应建立工程管理档案,详细记录工程建设及管理情况,档案内容包括但不限于:钛石膏种类、数量及来源,钛石膏性状指标,回填位置、深度及质量控制,抑尘措施,防渗层检验情

况(建有防渗工程时),管理制度建设及实施情况等。

5.6.3.4.2 回填工程质量监督管理应符合 GB/T 50326 的要求,并设专职安全质量现场监督员,监督作业过程中的安全、环保及质量。

5.6.3.4.3 建有防渗工程的回填场地,应定期检查维护防渗工程、监测地下水水质。发现防渗功能下降,应立即采取补救措施。

5.6.3.5 后期管理要求

5.6.3.5.1 回填工程完工后,应在醒目位置设标识牌,注明完工时间、土地使用注意事项,并定期对覆盖层进行维护。

5.6.3.5.2 回填工程完工后,应保证渗滤液处理系统、废水排放监测系统持续正常运行,并按 GB 18599 污染监测要求长期监测填埋区的污染物情况。

5.6.3.5.3 回填工程完工后,宜根据地形条件、水资源及表土资源等自然环境条件和社会发展需求对回填区域进行土地修复,修复土地用于复垦时,其土地质量控制应符合 TD/T 1036 的要求。

5.6.3.5.4 回填工程完工后,需对回填钛石膏进行再利用的,应进行环境影响评价。

5.6.4 有害成分控制

5.6.4.1 回填用钛石膏重金属含量限值及对应的验证方法应符合 GB/T 30760—2024 中表 2 的要求,浸出液特征污染物排放值及对应的验证方法应符合 GB 8978 中第一类污染物最高允许排放浓度的要求。

5.6.4.2 回填区域用做建设用地时,回填用钛石膏污染物含量及对应的验证方法应符合 GB 36600 污染风险筛选值的要求;用做农用地时,回填用钛石膏中污染物含量及对应的验证方法应符合 GB 15618 污染风险筛选值的要求。

5.7 钛石膏土壤固化

5.7.1 工艺流程简述及示意图

钛石膏经预处理后,与水泥、粉煤灰等无机胶结料按比例混合制成土壤固化剂,用于固化土壤、改善土壤工程性能。钛石膏土壤固化工艺流程示意图见图 8。

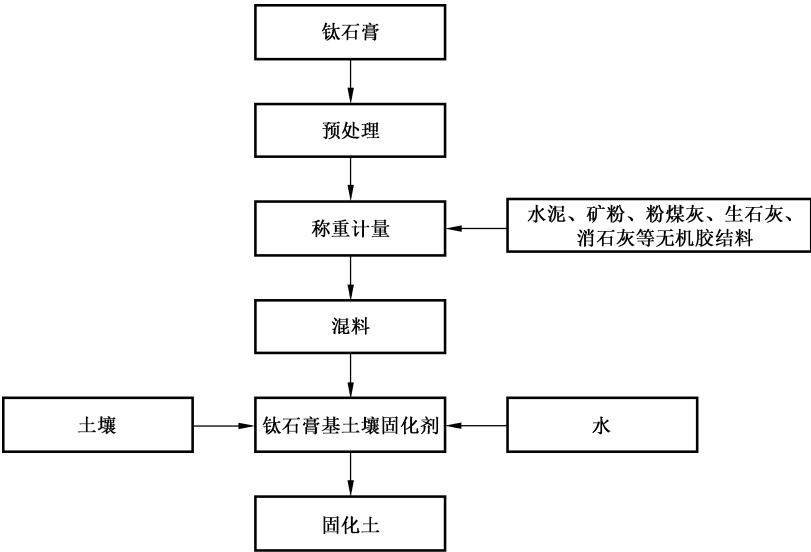


图 8 钛石膏土壤固化工艺流程示意图

5.7.2 原料

- 5.7.2.1 水泥应选用符合 GB 175 规定的普通硅酸盐水泥。
- 5.7.2.2 生石灰应符合 JC/T 479 的要求。
- 5.7.2.3 消石灰应符合 JC/T 481 的要求。
- 5.7.2.4 粉煤灰应符合 GB/T 1596 的要求。
- 5.7.2.5 矿粉(高炉矿渣粉)应符合 GB/T 18046 的要求。
- 5.7.2.6 钛石膏基土壤固化剂用钛石膏的性能指标及分析方法见表 5。

表 5 钛石膏基土壤固化剂用钛石膏的性能指标及分析方法

序号	项目	限值	分析方法
1	气味	无异味	HJ 1262
2	二水硫酸钙(CaSO ₄ ·2H ₂ O)(干基)	≥65%	按附录 B 执行
3	附着水(湿基)	≤40%	GB/T 5484—2024 第 9 章
4	三氧化二铁(Fe ₂ O ₃)(干基)	≤10%	GB/T 5484—2024 第 15 章
5	水溶性氧化镁(MgO)(干基)	≤0.3%	GB/T 5484—2024 第 27 章
6	水溶性氧化钾(K ₂ O)(干基)	≤0.3%	GB/T 5484—2024 第 28 章
7	水溶性氧化钠(Na ₂ O)(干基)	≤0.3%	GB/T 5484—2024 第 28 章
8	氯离子(Cl ⁻)(干基)	≤0.04%	GB/T 5484—2024 第 21 章、第 37 章、第 38 章
9	二氧化钛(TiO ₂)(干基)	≤3.5%	GB/T 5484—2024 第 19 章
10	pH 值	6~9	GB/T 5484—2024 第 25 章
11	外照射指数(I _r)	≤2.8	GB 6566
同一项目,不同检测分析方法的检出值不同时,以检出值最大的分析方法为准			

5.7.3 产品性能

- 5.7.3.1 钛石膏基土壤固化剂的性能指标及分析方法见表 6。

表 6 钛石膏基土壤固化剂性能指标及分析方法

序号	项目	指标	分析方法
1	外观	均匀一致,不应有结块	目测
2	含水率	($W\pm2.0$)%	GB/T 8077
3	密度	($D\pm0.03$)g/cm ³	GB/T 208
4	细度	80 μm 方孔筛,筛余应不大于 15%	GB/T 1345
5	初凝时间	≥2 h	GB/T 1346
6	终凝时间	3 h~24 h	
注: W、D 分别为含水率、密度的生产厂控制值。			

- 5.7.3.2 固化土的性能指标及分析方法见表 7。



表 7 固化土的性能指标及分析方法

项目	限值			分析方法
	一级	二级	三级	
7 d 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
4 h 凝结时间影响系数	$\geq 90\%$			CJ/T 486
水稳系数	$\geq 80\%$			CJ/T 486
28 d 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。				

5.7.4 有害成分控制

固化土 28 d 浸出液中重金属含量及对应的验证方法应符合 GB/T 25499 的要求。

5.8 钛石膏制硫酸(副产水泥)

5.8.1 工艺流程简述及示意图

钛石膏在高温还原气氛下生成氧化钙(CaO)和二氧化硫(SO₂)，二氧化硫(SO₂)经除尘净化后，在钒触媒催化作用下氧化成三氧化硫(SO₃)，吸收制得工业硫酸(H₂SO₄)；氧化钙(CaO)作为副产品可用于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 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃等)矿化生产硅酸盐水泥熟料。钛石膏制硫酸(副产水泥)工艺流程示意图见图 9。

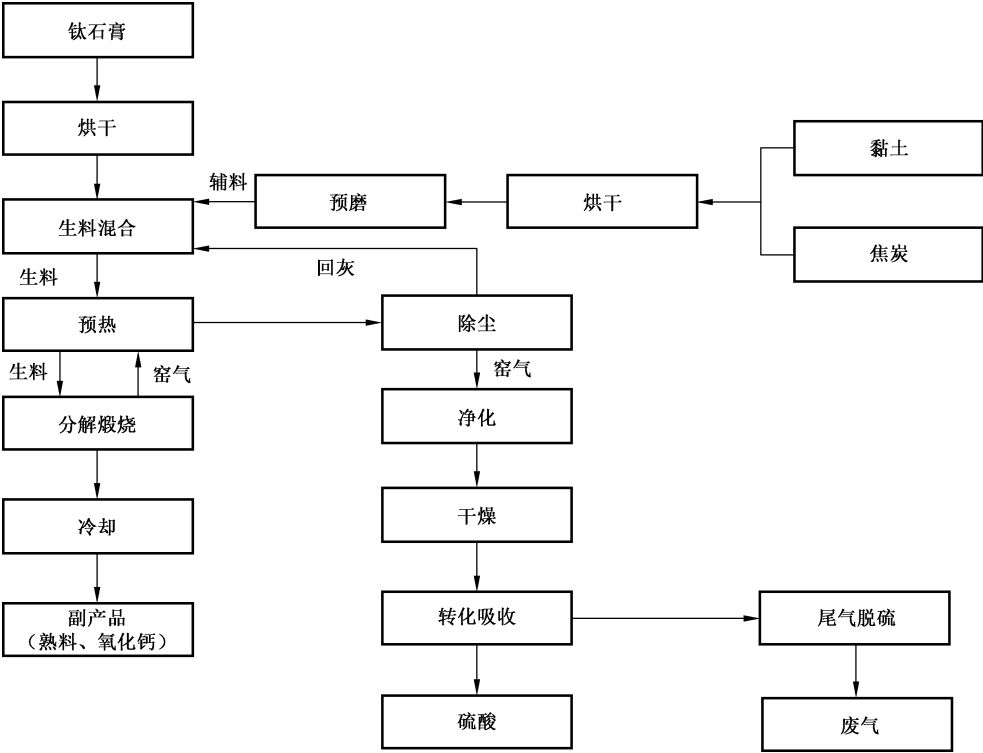


图 9 钛石膏制硫酸(副产水泥)工艺流程示意图

5.8.2 原料

制硫酸(副产水泥)用钛石膏性能指标及分析方法见表 8。

表 8 制硫酸(副产水泥)用钛石膏性能指标及分析方法

项目	限值	分析方法
三氧化硫(SO ₃)(干基)	≥37.2%	GB/T 5484—2024 第 11 章
二氧化硅(SiO ₂)(干基)	≤8.0%	GB/T 5484—2024 第 13 章
氧化镁(MgO)(干基)	≤2%	GB/T 5484—2024 第 18 章
三氧化二铝(Al ₂ O ₃)(干基)	≤1.5%	GB/T 5484—2024 第 16 章
三氧化二铁(Fe ₂ O ₃)(干基)	≤1.5%	GB/T 5484—2024 第 15 章

5.8.3 产品性能

5.8.3.1 水泥熟料产品性能及对应的验证方法应符合 GB/T 21372 的要求。

5.8.3.2 工业硫酸产品性能及对应的验证方法应符合 GB/T 534 的要求。

5.8.3.3 工业氧化钙产品性能及对应的验证方法应符合 JC/T 479 的要求。

6 污染物排放

- 6.1 钛石膏产生、收集、贮存、运输、利用、处置的单位或个人,应采取降低钛石膏污染环境的防治措施。
- 6.2 钛石膏贮存过程的污染物控制及对应的验证方法应符合 GB 18599 的要求。
- 6.3 钛石膏综合利用过程中应采取防扬散、防流失、防渗漏等防护措施。装卸、转运、投加等易产生粉尘的环节应配备除尘装置。除尘装置收集的钛石膏应返回贮存或利用。
- 6.4 根据钛石膏综合利用不同场景的需要设置废水、废气、废渣及噪声污染防治设施。
- 6.5 利用钛石膏生产水泥时,大气污染物排放及对应的验证方法应符合 GB 30485 及 HJ 662 的要求。
- 6.6 利用钛石膏生产石膏制品、路基材料等产品时,污水排放及对应的验证方法、大气污染物排放及对应的验证方法应分别符合 GB 8978、GB 16297 的要求。
- 6.7 利用钛石膏制硫酸时,原料烘干、生料制备、分解煅烧、硫酸制取等过程产生的废气、废水,经处理后废水、废气的排放及对应的验证方法应符合 GB 26132 的要求;副产水泥,粉磨过程产生的废气,经处理后废气排放及对应的验证方法应符合 GB 4915 的要求。

7 包装、标识、贮存和运输

7.1 包装

根据钛石膏综合利用不同场景,由供需双方商定,采用散装或袋装形式供货。

7.2 标识

用于综合利用的钛石膏产品应有产品说明,说明包括但不限于:生产单位名称、生产单位地址、产品名称、产品用途/用法、执行标准、出厂日期、批次、出厂检验报告。

7.3 贮存

用于综合利用的钛石膏产品不应与其他物料混堆。贮存场地应采取防雨、防扬尘、防渗措施。

7.4 运输

用于综合利用的钛石膏产品运输过程中不应与其他物料混装,途中无散落、滴漏等现象。运输方式及运输路线由供需双方协商确定,运输工具应保持清洁、有防雨淋设施。

8 监测与频次

8.1 钛石膏综合利用项目实施过程中应按照 HJ 1091 的要求对钛石膏产品及周边环境特征污染物进行采样监测。监测频次应符合以下要求:

- a) 开始监测时,采样监测频次为每周至少 3 次;
- b) 按 a) 的要求连续 2 周监测结果均符合环境风险评价要求,且钛石膏来源及产量稳定,采样监测频次调整为每月至少 1 次;
- c) 按 b) 的要求连续 3 个月监测结果均符合环境风险评价要求,采样监测频次调整为每年至少 1 次;
- d) 当监测结果异常、钛石膏来源及产量发生变化或综合利用项目中断超过 6 个月,采样监测频次按 a)~c) 的要求重新执行。

8.2 钛石膏综合利用单位在项目完工后应定期对场所和设施周边的大气、土壤、地表水、地下水等进行采样监测,评估钛石膏综合利用项目对大气、土壤、地表水、地下水的环境污染风险。

附录 A
(资料性)

钛石膏作为水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂生产水泥或作为主要原料生产特种水泥的作用机理

A.1 水泥缓凝剂

铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)在钛石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、熟石灰 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 的饱和溶液中生成溶解度极低的钙矾石($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)，该物质封闭水泥组分表面，阻滞水分子及离子扩散，延缓水泥颗粒特别是铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)水化。

A.2 水泥矿化剂

钛石膏作为含硫矿化剂加入熟料中，三氧化硫(SO_3)降低熟料液相黏度，增加液相量，利于硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)的形成。

A.3 水泥结构调制剂

在生产硅酸盐水泥熟料时，钛石膏中三氧化硫(SO_3)与生料中氧化镁(MgO)固溶进入阿利特结构，致使阿利特晶格发生畸变，促进 M3 型结构向水化活性优的 M1 型转化，提升熟料性能。



注：阿利特(Alite)又称 A 矿，是含少量氧化镁(MgO)、氧化铝(Al_2O_3)、氧化铁(Fe_2O_3)等的硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)固溶体。M1 型阿利特的熟料强度比 M3 型熟料高约 10%。

A.4 生产特种水泥

铝质、钙质原料与钛石膏等按比例配制煅烧：1 100 °C 时，氧化钙(CaO)与氧化铝(Al_2O_3)形成大量铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)；1 200 °C 时，部分铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)与硫酸钙(CaSO_4)生成硫铝酸钙($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$)。

附 录 B
(规范性)
二水硫酸钙含量的测定

B.1 附着水含量的测定

按 GB/T 5484—2024 中第 9 章的规定进行。

B.2 结晶水含量的测定

附着水(H_2O)测定后的试样,按 GB/T 5484—2024 中第 10 章的规定测定结晶水含量,以百分率(%)表示。

B.3 二水硫酸钙含量计算

二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)含量按式(B.1)计算,计算结果精确至 0.01%。

$$G = 4.778\ 5 \times H \quad \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

式中:

G ——二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)含量,%;

4.778 5 ——以结晶水含量换算为二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)含量的系数;

H ——二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)结晶水含量,%。

参 考 文 献

[1] GB/T 42346—2023 钒钛磁铁矿综合利用 术语和定义
[2] JC/T 2625—2021 钛石膏
[3] JTG/T 3610—2019 公路路基施工技术规范
[4] JTG D30—2015 公路路基设计规范
[5] NY/T 3936—2021 土壤调理剂及使用规程 烟气脱硫石膏原料
[6] 国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南(自然资源部 自然资发〔2023〕234 号)

