



中华人民共和国国家标准

GB/TXXXXX—XXXX

钛石膏综合利用技术规范

Technical specifications for comprehensive utilization of titanium gypsum

（征求意见稿）

本稿完成日期：2024-1-31

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

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这些专利的责任。

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/TC579）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

钛石膏综合利用技术规范

1 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 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/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 α 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 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

采用硫酸法工艺生产钛白粉时，以石灰石、石灰、电石渣等钙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。

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、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。

3.3

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

利用钛石膏（3.1）作为添加剂或是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 land application of titanium gypsum

直接或间接利用钛石膏（3.1）中的钙（Ca）、硫（S）元素调理土壤或生产人造土。

3.5

钛石膏生态修复 ecological remediation of titanium gypsum

利用钛石膏（3.1）土壤改良（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。

3.6

钛石膏路基材料 titanium gypsum roadbed material

钛石膏（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。

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，用以恢复采矿等工程的地貌。

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，使之实现复垦的目的。

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（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。

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 钛石膏综合利用应遵循“性能稳定、环境安全、低碳高值、技术先进”的原则，并确保全过程中的环境安全与公众人体健康。
- 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 钛石膏综合利用建设项目的的设计、施工、验收和运行应遵守国家现行的有关规定，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等。
- 4.5 钛石膏综合利用污染防治应符合 HJ 1091、GB 18599、GB 15618、GB 36600、GB/T 14848 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 概述

钛石膏建材利用的主要用途如下。

a) 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 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)，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。

b) 矿化剂：钛石膏作为含硫矿化剂加入熟料中， SO_3 降低熟料液相粘度，增加液相数量，利于硅酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) 的形成。

c) 结构调制剂：在生产硅酸盐水泥熟料时，钛石膏中 SO_3 与生料中 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、氧化铝、氧化铁等的硅酸三钙固溶体。M1 型阿利特的熟料强度比 M3 型熟料高约 10%。

d) 特种水泥：铝质、钙质原料与钛石膏等按比例配置煅烧：1100℃ 时， CaO 与 Al_2O_3 形成大量铝酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)；1200℃ 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 ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$)。冷却，即特种水泥主要矿物相。

e) 石膏制品：钛石膏经干燥、除杂、煅烧、水热等，制备得到 $\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ 和 $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ，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。

5.1.2 工艺流程

5.1.2.1 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。

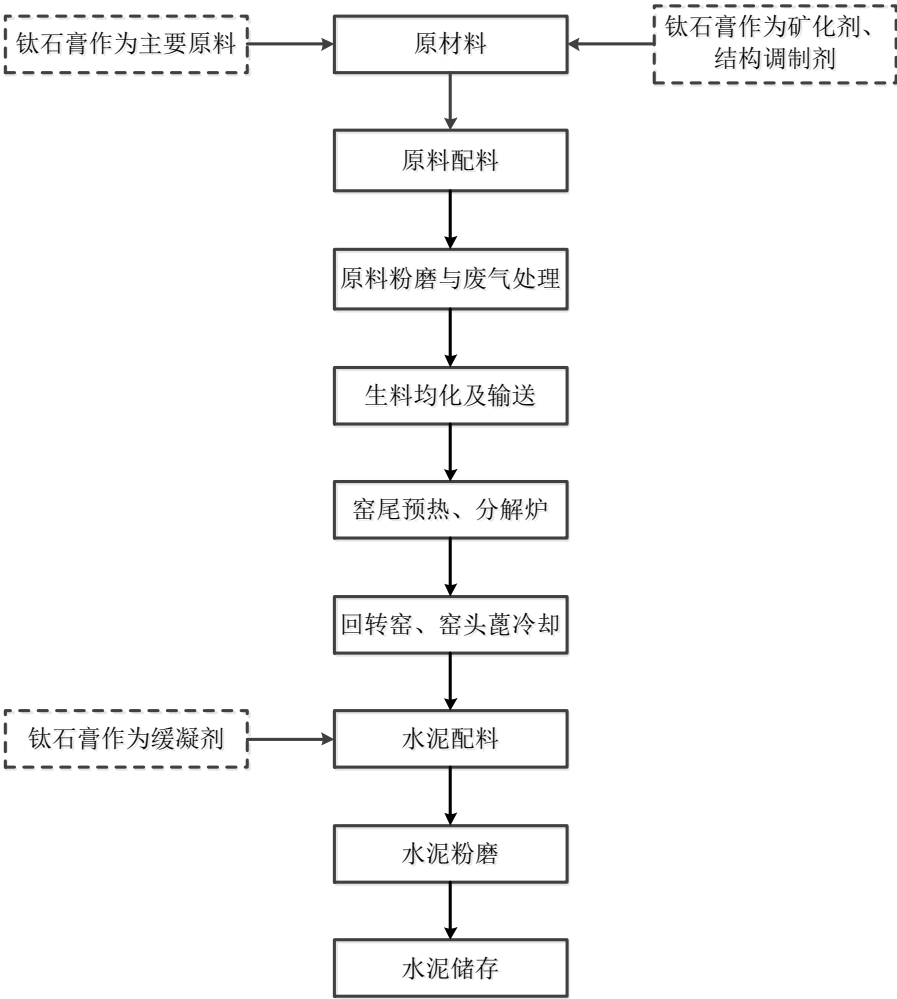


图1 钛石膏生产水泥缓凝剂、矿化剂、结构调制剂、特种水泥的工艺流程示意图

5.1.2.2 钛石膏制备石膏制品的主要工艺流程见图2。

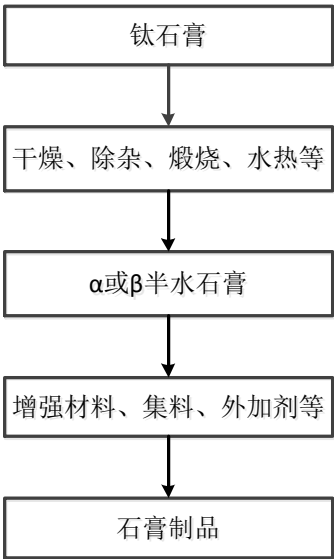


图2 钛石膏制备石膏制品工艺流程示意图

5.1.3 原料要求

- 5.1.3.1 钛石膏用做水泥缓凝剂时，性能指标应满足GB/T 21371的要求。
- 5.1.3.2 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，证明其对水泥性能无害。
- 5.1.3.3 钛石膏制备石膏制品时，宜对其进行除铁预处理。

5.1.4 产品性能要求

- 5.1.4.1 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。
- 5.1.4.2 利用钛石膏生产的硫铝酸盐水泥，产品性能应满足GB/T 20472的要求。
- 5.1.4.3 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。白度等由供需双方商定。
- 5.1.4.4 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。
- 5.1.4.5 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。

5.1.5 有害成分控制要求

钛石膏做为原料生产的建材产品，其有害物质含量应满足GB/T 30760的要求。

5.2 钛石膏土地利用

5.2.1 概述

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。

5.2.2 工艺流程

钛石膏制备人造土的主要工艺流程见图3。

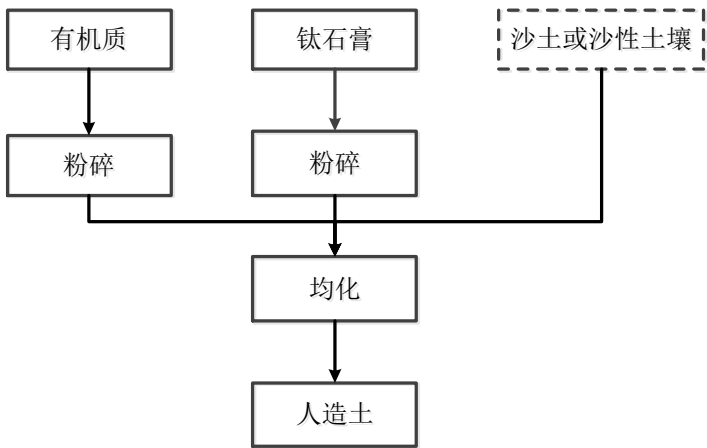


图3 钛石膏制备人造土工艺流程图

5.2.3 原料要求

- 5.2.3.1 钛石膏制备土壤调理剂时，原料应满足NY/T 3034的要求，粒径、pH值及相应的配施措施根据土地的土壤特性调整。
- 5.2.3.2 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。

5.2.4 产品性能要求

5.2.4.1 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。

5.2.4.2 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，其应用分类与对应用途的要求分别按GB/T 21010、TD/T 1036确定。

5.2.5 有害成分控制要求

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

5.2.5.2 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。

5.3 钛石膏生态修复

5.3.1 概述

钛石膏生态修复项目施工前，应参照TD/T 1068的要求编制工程项目实施方案，并报政府部门批准。获批后，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、未利用地、损毁土地等）进行平整，使其达到复垦或种植植被的条件。

5.3.2 工艺流程

钛石膏用于生态修复项目的主要工艺流程见图4。

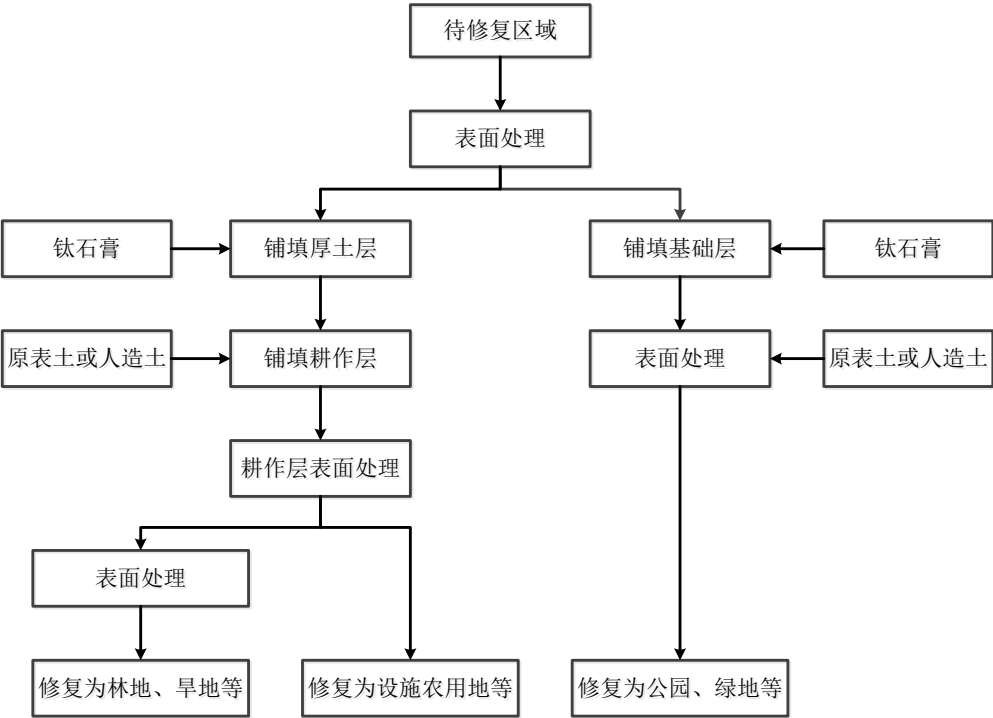


图4 钛石膏用于生态修复的工艺流程

5.3.3 原料要求

5.3.3.1 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。

5.3.3.2 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—2012中第9章的规定执行。

5.3.3.3 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。

5.3.4 生态修复施工要求

5.3.4.1 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。

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、公园与绿地的，铺填厚土层和耕作层应使用原表土或人造土(5.2.4.2)；用于设施农用地的，表面应按项目建设要求进行压实处理。

5.3.4.4 生态修复项目完工后，应尽快交由需方使用。

5.3.5 生态修复要求

5.3.5.1 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。

5.3.5.2 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。

5.3.5.3 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。

5.3.6 有害成分控制要求

5.3.6.1 修复区域地下水水质应满足GB/T 14848—2017中IV类水的水质要求。

5.3.6.2 修复区域污染物含量应满足GB 15618中风险筛选值的要求。种植收获的粮食、果实、牧草等农产品及作物中有害成分应满足GB 2762的要求；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。

5.4 钛石膏路基材料

5.4.1 概述

钛石膏与素土、胶结料（如水泥、石灰、矿粉、粉煤灰、固化剂等）等按比例掺混、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。

5.4.2 工艺流程

主要工艺流程见图 5。

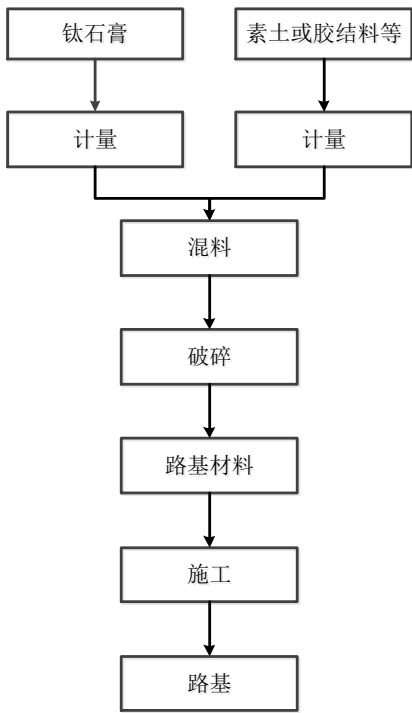


图5 钛石膏配置路基材料用于道路施工的工艺流程图

5.4.3 原料要求

路基材料用钛石膏的质量要求及分析方法见表 1。

表1 路基材料用钛石膏质量要求

项目	限值	分析方法
三氧化二铁 (Fe ₂ O ₃) 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 ₂ 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>I</i> _{Ra}	≤1	GB 6566
外照射指数 <i>I</i> _r	≤1	
附着水 (H ₂ O) 含量 (湿基) w/%	≤40	GB/T 5484—2012 中第 9 章
二水硫酸钙 (CaSO ₄ ·2H ₂ O) 含量 (干基) w/%	≥75	本文件附录 A

5.4.4 产品性能要求

钛石膏制备的路基材料抗压强度应符合 JTG/T F20 的相应要求，不同产品等级性能指标划分见表 2，其他性能要求由生产单位与使用单位商定。

表2 路基材料产品等级指标 单位为%

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 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
^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。					

5.4.5 产品使用要求

钛石膏制备的路基材料用于公路路堤填筑、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。

5.4.6 有害成分控制要求

钛石膏制备的路基材料，砷、铅、镉、铬、铜、镍、锌、锰的含量和重金属污染物浸出浓度应分别满足 GB/T 30760—2014 中表 2、表 3 的限值要求。

5.5 钛石膏充填

5.5.1 概述

将过滤、压滤后的钛石膏运输至充填场地进行充填作业，并在充填场地服务期满后，对充填场地进行封场及生态修复。

5.5.2 工艺流程

利用钛石膏进行填充的主要工艺流程见图6。

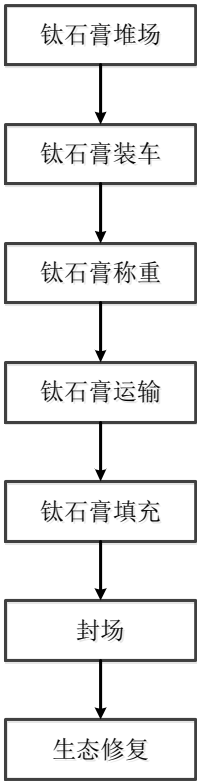


图6 钛石膏充填工艺流程图

5.5.3 原料要求

经压滤后钛石膏含水率及pH值见表3。

表3 压滤后钛石膏的指标要求

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

5.5.4 产品性能要求

充填用钛石膏化学成分及分析方法见表4。

表4 充填用钛石膏化学成分及分析方法

单位为mg/L

序号	项目	限值	依据	分析方法
1	六价铬	≤0.5	GB 8978—1996 中表 1、表 4	HJ 908
2	汞	≤0.05		HJ 702
3	铅	≤1.0		HJ 786
4	总镉	≤0.1		HJ 786
5	铜	≤0.5		HJ 751
6	镍	≤1.0		HJ 751
7	砷	≤0.5		HJ 702
8	总铬	≤1.5		HJ 749
9	锰	≤2.0		GB/T 11911

表4 充填用钛石膏化学成分及分析方法（续）单位为mg/L

序号	项目	限值	依据	分析方法
10	锌	≤2		HJ 786
11	氰化物	≤0.5		HJ 823
12	硫化物	≤1.0		HJ 1226
13	氟化物	≤10		GB/T 7484

5.5.5 产品使用要求

5.5.5.1 钛石膏用于充填应根据充填场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。

5.5.5.2 根据运输目的地确定运输路线，并按指定路线完成运输，运输途中不应发生扬尘、散落、漏液等现象。

5.5.5.3 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。

5.5.5.4 充填场地服务期满，应启动封场作业（可分期实施），并进行生态修复。

5.5.6 有害成分控制要求

充填用钛石膏，有害成分应满足 HJ 557 和 GB 8978 的要求，且 pH 值为 6~9。

5.6 钛石膏回填

5.6.1 概述

钛石膏用做回填材料，主要以粉块状压实和胶凝固化的方式，对露天开采地表挖掘区、取土场以及天然坑洼区等进行回填。回填施工应制定回填方案，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。

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

5.6.2 工艺流程

钛石膏回填的主要工艺流程见图7。

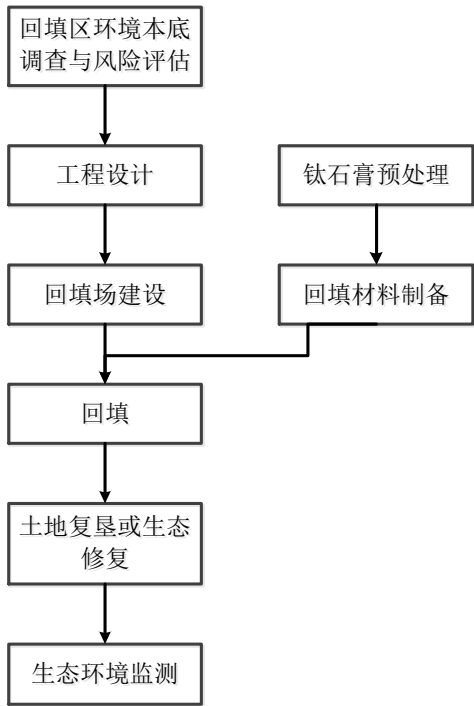


图7 钛石膏回填工艺流程图

5.6.3 原料要求

- 5.6.3.1 钛石膏作为回填材料应满足 JC/T 2625—2021 中二级及以上品级的要求。
- 5.6.3.2 附着水含量根据工程设计要求由供需双方协商确定。

5.6.4 产品使用要求

5.6.4.1 回填项目要求

- 5.6.4.1.1 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。
- 5.6.4.1.2 回填场地应进行环境本底调查，并分别按 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，确保环境风险可控。
- 5.6.4.1.3 在回填作业施工前，应根据回填区域实际情况做回填工程设计，内容包括场地平整、安全与环保有关管控措施等。
- 5.6.4.1.4 利用钛石膏回填修复露天开采地表挖掘区、地下开采塌陷区等矿山区的生态时，恢复治理方案（规划）的编制、治理技术内容、安全规范应分别满足 HJ 652、HJ 651、GB 39496 的要求。

5.6.4.2 污染防治要求

- 5.6.4.2.1 利用钛石膏回填，钛石膏堆场和填埋污染控制应满足 GB 18599 的要求。
- 5.6.4.2.2 为防止回填区外的雨水大量进入回填区，宜根据地形在回填区周边修建截洪沟。
- 5.6.4.2.3 回填区域的渗滤液排放应满足 GB 8978 和地方标准（根据周边收纳水体情况制定）的要求。为便于渗滤液的集中处理和定期监测，宜铺设导排系统、修建收集池。
- 5.6.4.2.4 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。预处理后仍不满足环境风险评估预期要求的，应在回填区与基础层之间设置隔水层。

5.6.4.3 运输要求

5.6.4.3.1 钛石膏装车、运输过程中应做好封闭等措施，防止扬尘、散落、漏液等现象。

5.6.4.3.2 根据运输目的地确定运输路线，并按指定路线完成运输。

5.6.4.4 回填施工要求

5.6.4.4.1 回填过程应做好防雨应急措施，避开雨天作业。

5.6.4.4.2 粉块状压实回填应对钛石膏进行脱水及破碎预处理，并根据场地实际情况，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%。

5.6.4.4.3 胶凝固化回填应将钛石膏与胶凝材料、水按比例拌混成浆体后，从下至上梯级浇筑，经振捣、养护、凝固成型，使单轴抗压强度等满足工程设计要求，并集中收集处理施工期产生的滤出水。

5.6.4.4.4 施工过程中的扬尘防治应按 HJ/T 393 的规定执行。

5.6.4.4.5 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。

5.6.4.5 回填工程管理要求

5.6.4.5.1 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。

5.6.4.5.2 回填工程质量管理监督应满足 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。

5.6.4.5.3 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。

5.6.4.6 后期管理要求

5.6.4.6.1 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。

5.6.4.6.2 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，土地复垦质量应满足 TD/T 1036 的要求。

5.6.4.6.3 需对回填钛石膏进行再利用的，应进行环境影响评价。

5.6.4.6.4 回填工程完工后，填埋区污染控制应按 GB 18599 的规定长期监测，并保证渗滤液处理系统、废水排放监测系统持续正常运行。

5.6.5 有害成分控制要求

5.6.5.1 回填用钛石膏重金属含量应满足 GB/T 30760—2014 中表 2 的要求，浸出液特征污染物排放值应符合 GB 8978—1996 中第一类污染物最高允许排放浓度。

5.6.5.2 回填区域用做建设用地的，回填用钛石膏污染物含量应满足 GB 36600 污染风险筛选值的要求；用做农用地的，回填用钛石膏中污染物含量应满足 GB 15618 污染风险筛选值的要求。

5.7 钛石膏土壤固化剂

5.7.1 概述

钛石膏与水泥、粉煤灰等无机胶结料混合、加水与土壤搅拌，钛石膏中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水化，生成的凝胶状水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硫酸钙等与土壤中的矿物活性成分反应，产生交错的增强土壤粒

子间连接作用的片状、纤维状或针状晶体，在土壤中形成稳定网状结构，使土体结构更加稳固；同时，生成的膨胀性物质能填充网状结构之间的孔隙或改善土壤中的孔隙结构，提高土壤强度。

5.7.2 工艺流程

钛石膏土壤固化剂的主要生产工艺流程见图8。

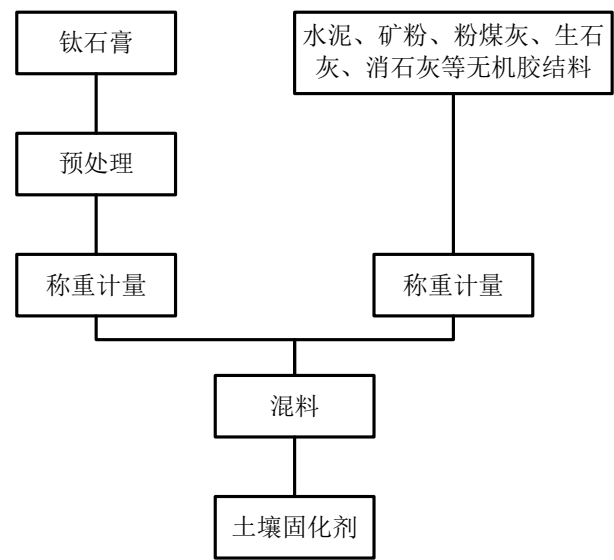


图8 钛石膏土壤固化剂的生产工艺流程图

5.7.3 原料要求

- 5.7.3.1 水泥应选用符合 GB 175 规定的普通硅酸盐水泥。不同强度等级、厂牌、出厂日期的水泥不应混用。
- 5.7.3.2 生石灰应符合 JC/T 479 的要求；消石灰应满足 JC/T 481 的要求。
- 5.7.3.3 粉煤灰应符合 GB/T 1596 的要求。
- 5.7.3.4 矿粉（高炉矿渣粉）应符合 GB/T 18046 的要求。
- 5.7.3.5 土壤固化剂用钛石膏指标及分析方法见表 5。

表5 土壤固化剂用钛石膏指标及分析方法

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) w/%	≥75	本文件附录 A
3	附着水 (湿基) w/%	≤40	GB/T 5484—2012 中第 9 章
4	三氧化二铁 (Fe ₂ O ₃) (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 ₂ O) (干基) w/%	≤0.3	GB/T 5484—2012 中第 28 章
7	水溶性氧化钠 (Na ₂ O) (干基) w/%	≤0.3	GB/T 5484—2012 中第 28 章
8	氯离子 (Cl ⁻) (干基) w/%	≤0.04	GB/T 5484—2012 中第 21 章
9	二氧化钛 (TiO ₂) (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 _r	≤2.8	GB 6566

5.7.4 产品要求

5.7.4.1 钛石膏基土壤固化剂性能要求及分析方法见表6。

表6 土壤固化剂性能要求及分析方法

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/%	$W\pm2.0$		GB/T 8077
3	密度/(g/cm ³)	$D\pm0.03$		GB/T 208
4	细度	80μm 方孔筛，筛余应不大于15%		GB/T 1345
5	初凝时间/h	≥2	根据现场施工时间确定	GB/T 1346
6	终凝时间/h	$3\leq T\leq24$		
注：W、D 分别为含水率、密度的生产厂控制值。				

5.7.4.2 固化土性能要求及分析方法见表7。

表7 固化土性能要求及分析方法

项目	限值			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/%	≥90			CJ/T 486
水稳系数/%	≥80			CJ/T 486
28d 抗冻性能/%	抗冻指数≥80，质量损失率≤5			JTG E51
注：S 为固化土无侧限抗压强度。				

5.7.5 有害成分控制要求

固化土 28d 浸出液中重金属含量应满足 GB/T 25499 的要求。

5.8 钛石膏制硫酸（副产水泥）

5.8.1 概述

钛石膏在高温还原气氛下（还原剂为炭等）生成氧化钙（CaO）和二氧化硫（SO₂），二氧化硫（SO₂）经除尘净化后，在钒触媒催化剂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。

5.8.2 工艺流程

钛石膏制硫酸主要工艺流程见图 9。

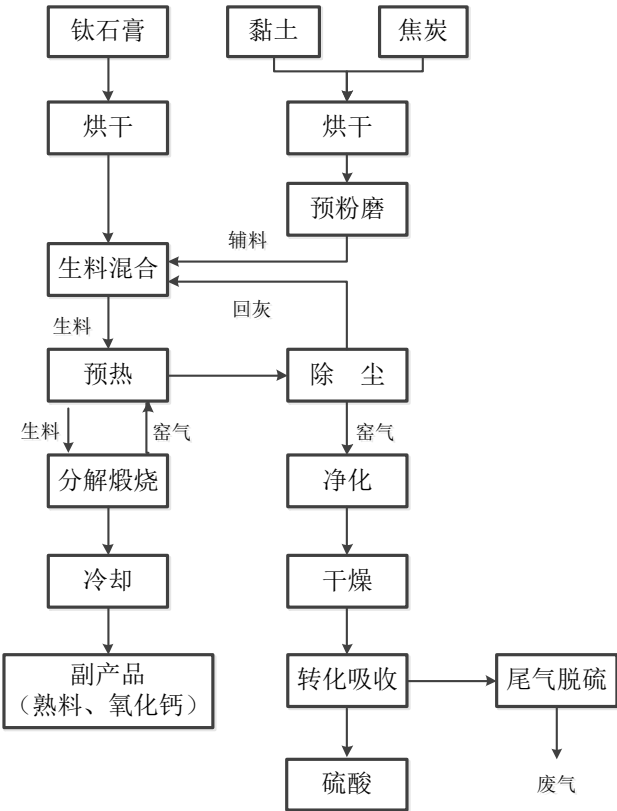


图9 钛石膏制硫酸工艺流程图

5.8.3 原料要求

制硫酸（副产水泥）用钛石膏质量要求及分析方法见表 8。

表8 制硫酸（副产水泥）用钛石膏质量要求 单位为%

项目	限值	分析方法
三氧化硫（SO ₃ ）	≥40	GB/T 5484—2012 中第 11 章
二氧化硅（SiO ₂ ）	≤8.0	GB/T 5484—2012 中第 13 章
氧化镁（MgO）	≤2	GB/T 5484—2012 中第 18 章
三氧化二铝（Al ₂ O ₃ ）	≤1.5	GB/T 5484—2012 中第 16 章
三氧化二铁（Fe ₂ O ₃ ）	≤1.5	GB/T 5484—2012 中第 15 章

5.8.4 产品性能要求

- 5.8.4.1 水泥熟料产品性能应满足 GB/T 21372 的要求。
- 5.8.4.2 工业硫酸产品性能应满足 GB/T 534 的要求。
- 5.8.4.3 工业氧化钙产品性能应满足 JC/T 479 的要求。

6 污染物排放要求

- 6.1 钛石膏产生、收集、贮存、运输、利用、处置的单位和个人，应采取防止或者减少钛石膏污染环境的措施。
- 6.2 钛石膏贮存过程的污染物控制应满足 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 根据钛石膏不同综合利用场景的需要，应设置“三废”及噪声污染防治设施。
- 6.5 利用钛石膏生产水泥时，大气污染物排放应满足 GB 30485 及 HJ 662 的要求。
- 6.6 利用钛石膏生产石膏制品、路基材料等建材利用污染物排放应满足 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，经处理后应满足 GB 26132 的要求；副产水泥，粉磨过程产生的废气，经处理后应满足 GB 4915 的要求。

7 包装、标识、贮存和运输要求

7.1 包装

根据钛石膏不同综合利用场景，由供需双方商定，采用散装或包装袋形式供货。

7.2 标识

用于综合利用的钛石膏产品应有产品合格说明，说明包括但不限于：生产单位名称、生产单位地址、执行标准、出厂日期、批次、出厂检验结果和检验签章等。

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。运输方式由供需双方协商确定，运输工具应保持清洁、防雨。

8 监测内容与频次

8.1 钛石膏综合利用项目实施过程中，实施单位应定期对钛石膏产品及周边环境进行采样监测。监测频次应满足如下要求：

- a) 开始监测时，每周对产品及周边环境特征污染物进行至少3次采样监测；
- b) 连续二周监测结果均满足环境风险评价要求、钛石膏来源及产量稳定时，每月对产品及周边环境特征污染物进行至少1次采样监测；
- c) 连续三个月监测结果均满足环境风险评价要求时，每年对产品及周边特征污染物进行至少1次采样监测；
- 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，产品及周边环境特征污染物采样检测次数按上述a)、b)、c)要求从头执行。

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、地表水和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、地表水和地下水的环境污染风险。

附录 A

(规范性)

二水硫酸钙含量的测定

A.1 附着水含量的测定

按GB/T 5484—2012中第9章的规定进行。

A.2 结晶水含量的测定

附着水（H₂O）测定后的试样，按GB/T 5484—2012第10章的规定测定结晶水含量，以%表示。

A.3 二水硫酸钙含量计算

二水硫酸钙（CaSO₄·2H₂O）含量按式（A.1）计算，计算结果精确至0.01%。

$G=4.7785\times H$ （A.1）

式中：

- G ——二水硫酸钙（CaSO₄·2H₂O）含量，以%表示；
- 4.7785——以结晶水含量换算为二水硫酸钙（CaSO₄·2H₂O）含量的系数；
- H ——二水硫酸钙（CaSO₄·2H₂O）结晶水含量，以%表示。

参考文献

- [1] JTG/T 3610—2019 公路路基施工技术规范
 - [2] JTG D30—2015 公路路基设计规范
-