

# JC/T 2649—2022《柠檬酸石膏》标准解析

赵 娇<sup>1</sup>, 杨冬蕾<sup>1</sup>, 陈嘉宇<sup>2</sup>, 李 楠<sup>2</sup>

(1. 建筑材料工业技术情报研究所, 北京 100024; 2. 建筑材料工业技术监督研究中心, 北京 100024)

**[摘要]** 柠檬酸石膏是以生物质为原料、利用微生物发酵技术和钙盐沉淀法制取柠檬酸工艺过程中的副产品。当前, 大量柠檬酸石膏采取渣场堆放的方式处理, 这不仅导致柠檬酸生产企业每年需承担高额的堆场建设和维护成本, 而且还存在污染环境的风险。为了将柠檬酸石膏有效地转化为符合优质建筑石膏质量的石膏原料, JC/T 2649—2022《柠檬酸石膏》于2023年4月1日实施。从分类和标记、技术要求、主要试验方法及指标确定等方面对JC/T 2649—2022《柠檬酸石膏》的主要内容进行解读, 重点分析柠檬酸石膏的主要技术要求。该标准的发布实施对促进柠檬酸石膏的应用和推广, 推动固废资源综合利用和提升有机酸产业的可持续发展能力具有重要意义。

**[关键词]** 柠檬酸石膏; 标准; 分析; 技术要求

**[中图分类号]** X781 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 04-0006-05

## Analysis on standard of JC/T 2649—2022 “Citric acid gypsum”

ZHAO Jiao<sup>1</sup>, YANG Donglei<sup>1</sup>, CHEN Jiayu<sup>2</sup>, LI Nan<sup>2</sup>

(1. Technical Information Institute of Building Materials Industry, Beijing 100024, China;

2. Technical Supervision and Research Center of Building Materials Industry, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Citric acid gypsum is a byproduct of the citric acid production process using biomass as raw material, and produced by microbial fermentation technology and calcium salt precipitation method. At present, large amount of citric acid gypsum is mainly treated by stacking in the slag yards, which not only leads to the high construction and maintenance costs for citric acid production enterprises every year, but also poses a risk of environmental pollution. In order to effectively convert citric acid gypsum into gypsum raw materials that meet the quality standards of high-quality building gypsum, JC/T 2649—2022 “Citric acid gypsum” is implemented from April 1, 2023. The main contents of JC/T 2649—2022 “Citric acid gypsum” are interpreted from aspects such as classification and marking, technical requirements, main test methods and indicators determination, with a focus on analyzing the main technical requirements of citric acid gypsum. The publication and implementation of this standard have great significance for promoting the application and promotion of citric acid gypsum, advancing the comprehensive utilization of solid waste resources, and enhancing the sustainable development capability of the organic acid industry.

**Key words:** citric acid gypsum; standard; analysis; technical requirements

## 0 引言

柠檬酸石膏是以生物质为原料、利用微生物发酵技术和钙盐沉淀法制取柠檬酸工艺过程中的副产品。我国在柠檬酸生产领域占据全球领先地位, 柠檬酸年产量约占全球总产量的65%, 稳居世界第一<sup>[1]</sup>。每生产柠檬酸1 t约产生含水分的柠檬酸石膏渣2.5 t, 其化学成分与天然石膏相近。柠檬酸石膏一般呈现潮湿松散的细小颗粒状, 颗粒粒径分布在16~45 μm, 石膏白度可达到80%左右, 堆积密度约为550 g/L (其值略低于天然石膏), 附着水的pH一般为1~2, 残余柠檬酸与二水硫酸钙的质量比为0.2%左右, 同时还含有柠檬酸生产过程

中带来的微量蛋白质、油脂、色素等杂质成分。实践表明, 这些由柠檬酸生产过程中带来的杂质, 对以柠檬酸石膏为原料制成的建筑石膏和水泥的结晶凝固有很强的阻碍作用。因此应该对柠檬酸石膏的杂质成分进行科学的限制。

JC/T 2649—2022《柠檬酸石膏》由中国建筑材料联合会提出并归口管理, 由建筑材料工业技术

**[收稿日期]** 2024-12-27

**[作者简介]** 赵 娇(1990-), 女, 福建莆田人, 工程师, 主要从事建筑材料信息研究工作。

**[通信作者]** 杨冬蕾, 女, 建筑材料工业技术情报研究所生态与节能材料中心副主任。

情报研究所、蚌埠华东石膏有限公司、安徽蕴德工程技术咨询有限公司等单位负责起草,标准规定了柠檬酸石膏的等级和标记、一般要求、技术要求、试验方法、检验规则,以及包装、标志、运输和贮存。该标准补充完善了标准体系,填补了工业副产柠檬酸石膏标准的空白,对提升我国大宗工业固废综合利用率具有积极的推动作用,为规范柠檬酸石膏产品的设计、生产、仲裁检验以及用户使用等方面提供了可靠的科学依据和技术支撑。该标准的发布和实施有助于规范我国柠檬酸石膏原材料的排放,提高我国工业副产柠檬酸石膏的综合利用率,推进石膏建筑材料绿色、节能、低碳化发展,对保护我国生态环境具有重要意义。该标准为推荐性产品标准,于2022年9月30日发布,2023年4月1日实施。

## 1 标准制定背景

我国柠檬酸石膏的排放量约为230万t/a。由于柠檬酸石膏综合利用率约为90%,我国累积的柠檬酸石膏堆存量约为200万t。大量柠檬酸石膏通过渣场堆放的方式进行处理,导致柠檬酸生产企业每年需承担高额的堆场建设和维护成本,而且还存在污染环境的风险。由于前期柠檬酸石膏标准缺失,各企业排放的柠檬酸石膏品质和成分参差不齐,很难将柠檬酸石膏有效地转化为符合优质建筑石膏质量要求的石膏原料。

2021年3月18日,国家发展和改革委员会联合九部门印发《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》(发改环资〔2021〕381号),意见中明确提出“到2025年,煤矸石、粉煤灰、尾矿(共伴生矿)、冶炼渣、工业副产石膏、建筑垃圾、农作物秸秆等大宗固废综合利用能力显著提升,利用规模不断扩大,新增大宗固废综合利用率达到60%,存量大宗固废有序减少”的主要目标<sup>[2]</sup>。因此,柠檬酸行业若要提升柠檬酸石膏的综合利用率,迫切需要制定符合行业发展要求的原材料标准。柠檬酸石膏标准的制定,对促进柠檬酸石膏综合利用、推动大宗固废综合利用标准体系建设、推动行业绿色发展、促进有机酸产业在世界范围可持续发展等方面具有极大的现实意义。

## 2 标准技术分析

### 2.1 等级和标记

按照柠檬酸石膏中的二水硫酸钙含量,由高到低分为一级和二级两个级别。考虑到柠檬酸石膏品位、杂质含量对应用有可能造成的影响,同时结合

国内柠檬酸石膏产生企业工艺技术及设备现状,参考我国天然石膏、脱硫石膏、磷石膏等标准要求,将柠檬酸石膏分为两个级别,使柠檬酸石膏满足不同应用需要,扩大其应用范围。

### 2.2 一般要求

柠檬酸石膏作为一种石膏原料,其产品中不得含有活性炭等杂质,不应对人体、生物和环境造成有害的影响。这些杂质会间接影响石膏制品的工艺加工,而且会对柠檬酸石膏的各项技术指标产生较大的影响。

### 2.3 技术要求

参照现行标准,通过对产品的实际应用调研、标准工作会议讨论、验证试验分析等多方面的工作,确定了柠檬酸石膏的各项技术指标。主要指标包括附着水含量、二水硫酸钙含量、水溶性氧化镁(MgO)含量、游离酸(以无水柠檬酸C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>计)含量、易分解杂质含量及pH。对主要指标的编制分析如下:

(1) 柠檬酸石膏含有一定量的水分,是其区别于天然石膏的一个特点。水含量高的柠檬酸石膏,不但在运输、利用过程中会出现黏结、堵塞设备等问题,而且在煅烧过程中能源消耗量大,给下游应用单位的利用造成极大的不便,因此需要对柠檬酸石膏中附着水含量加以控制。根据我国柠檬酸石膏生产实际和应用情况,标准规定附着水指标分为两级,一级要求 $w(\text{H}_2\text{O})$ 不大于15%,二级要求 $w(\text{H}_2\text{O})$ 不大于20%,与磷石膏标准中的一级和二级附着水含量要求一致。

(2) 石膏中二水硫酸钙的含量,即其纯度,是衡量石膏质量的关键指标。只有当二水硫酸钙的含量达到规定的标准时,副产石膏才能被有效地应用于建筑材料和作为水泥的缓凝剂,这是其使用的基本前提和必要条件<sup>[3]</sup>。为了使柠檬酸石膏产生企业不断提升工艺技术水平,提高柠檬酸石膏的品位,使不同等级的柠檬酸石膏能够被应用,标准将柠檬酸石膏的二水硫酸钙含量分为两个等级,一级指标要求 $w(\text{二水硫酸钙})$ 不小于90%,二级指标要求 $w(\text{二水硫酸钙})$ 不小于80%,与磷石膏标准中的一级和二级二水硫酸钙含量要求一致,略低于烟气脱硫石膏标准要求。

(3) 水溶性氧化镁会降低石膏的脱水性能,在用于制造建筑材料时,对产品的黏结强度产生显著影响<sup>[3]</sup>,且镁离子随着水分蒸发而迁移至石膏制品表面,导致出现“泛霜”现象。因此需要对水溶性

氧化镁的含量做出限定,以保证柠檬酸石膏制品的质量。标准规定水溶性氧化镁含量分为两个等级,一级指标要求 $w(\text{MgO}_{\text{水溶}})$ 不大于0.10%,与磷石膏和烟气脱硫石膏标准中一级指标一致;二级指标要求 $w(\text{MgO}_{\text{水溶}})$ 不大于0.20%,略高于磷石膏标准中二级指标要求。

(4) 游离酸是有机酸类石膏中重要的限制指标,柠檬酸石膏中游离酸含量过高,不仅会缩短生产设备的使用期限,而且会对建筑石膏粉的凝结特性产生负面影响,导致其凝结性能减弱甚至无法凝结。此外,游离酸含量过高还会导致石膏粉强度下降、吸湿性增强,制品软化、严重变形以及颜色发黄等问题<sup>[4]</sup>。因此,需要对柠檬酸石膏中的游离酸含量(以无水柠檬酸 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 计)进行限定。根据柠檬酸石膏排放企业生产现状,以及标准验证试验结果,将游离酸含量指标分为两个等级,一级指标要求 $w(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7)$ 不大于0.05%,二级指标要求 $w(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7)$ 不大于0.10%。

(5) 易分解杂质主要包括菌丝体、脂肪、蛋白质、色素以及其他无机盐等物质。由于柠檬酸生产工艺不同,所产生的柠檬酸石膏中易分解杂质的种类及含量也不尽相同。易分解杂质可能使柠檬酸石膏产生发霉、发黄等现象,而且会对柠檬酸石膏制品的强度产生不良影响。标准将易分解杂质含量分为两个等级,一级指标要求易分解杂质质量分数不大于0.10%,二级指标要求易分解杂质质量分数不大于0.15%。

(6) 由于柠檬酸石膏是柠檬酸生产过程中产生的副产物,柠檬酸石膏中含有少量杂酸,普遍呈酸性。在应用过程中,柠檬酸石膏的酸性特性可能会对生产设备产生腐蚀作用,影响设备的使用寿命。此外,酸性的建材成品在与其他材料接触时,容易发生酸碱中和反应,这可能导致建筑物结构的损坏<sup>[3]</sup>。因此,需要通过工艺除酸,调整柠檬酸石膏的pH不低于5.0,与烟气脱硫石膏标准中对pH的要求基本一致。

### 3 验证试验及指标确定

#### 3.1 样品收集

在制定《柠檬酸石膏》建材行业标准的过程中,为确保样品的广泛性和代表性,编制组在全国范围内选择了6个不同的生产厂家的共15组柠檬酸石膏样品(见图1)。这些厂家在生产柠檬酸的工艺上各具特色,所产生的柠檬酸石膏能够代表行业内的多样性。



图1 柠檬酸石膏原料

Fig. 1 Citric acid gypsum raw material

#### 3.2 试验结果及指标确定

验证试验检验项目包括物理性能、化学性能等标准所涉及的各项指标,其试验结果见表1。

表1 柠檬酸石膏验证试验结果

Table 1 Validation test results of citric acid gypsum

样品 编号	$w(\text{附着水})$ %	$w(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ (干基)/%	$w(\text{MgO}_{\text{水溶}})$ (干基)/%	$w(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7)$ (干基)/ %	$w(\text{易分解杂质})$ (干基)/ %	pH
1#	0.68	87.74	0.07	0.06	0.09	6.2
2#	11.83	89.61	0.09	0.11	0.09	6.5
3#	28.01	84.26	0.12	0.04	0.14	6.6
4#	12.08	90.65	0.10	0.08	0.12	6.2
5#	29.36	78.41	0.15	0.12	0.12	6.1
6#	24.64	82.57	0.08	0.05	0.16	6.1
7#	24.48	88.06	未检出	0.08	0.11	6.9
8#	20.00	96.00	未检出	0.01	0.14	6.5
9#	20.60	82.33	0.03	0.10	0.15	6.5
10#	31.20	96.09	0.10	0.09	0.10	6.0
11#	28.00	87.45	0.03	0.08	0.06	6.6
12#	23.20	95.01	0.09	0.10	0.11	6.8
13#	30.10	83.32	0.48	0.08	0.10	6.6
14#	23.20	80.60	0.13	0.08	0.15	6.2
15#	26.30	88.40	未检出	0.10	0.14	6.5

附着水( $\text{H}_2\text{O}$ )含量按照GB/T 5484—2012第9章规定的方法测定,结果精确至0.01%。

二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )含量按照GB/T 5484—2012第10章规定的方法测定。

水溶性氧化镁( $\text{MgO}$ )含量按照GB/T 5484—2012中第18章或第36章规定的方法测定,结果精确至0.01%,当对结果有争议时,以GB/T 5484—2012中第18章基准法为准。

游离酸(以无水柠檬酸 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 计)含量按照

GB 1886.235—2016中A.4规定的无水柠檬酸中柠檬酸含量的测定方法进行测定,其中柠檬酸石膏试样量应为10 g,精确至0.000 1 g,游离酸质量分数精确至0.01%。

易分解杂质的测定:将测定结晶水含量后质量为 $m_1$ 的试样置于已灼烧至恒质量的瓷坩埚中,将盖斜置于坩埚上,放在高温炉内,在850℃下灼烧1 h或达到恒质量,取出坩埚置于干燥器中,冷却至室温,称得质量 $m_2$ 。按照式(1)计算易分解杂质质量分数,结果精确至0.01%。

$$w_1 = \frac{(m_1 - m_2)}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $w_1$ ——易分解杂质质量分数, %;

$m_1$ ——测定结晶水含量后试样的质量, g;

$m_2$ ——灼烧后试样的质量, g;

$m_0$ ——用于测定结晶水含量的柠檬酸石膏试样的质量, g。

pH按照GB/T 5484—2012第25章规定的方法测定。

通过科学的样品收集和验证试验,编制组对柠檬酸石膏的物理性能和化学性能进行了全面评估。在样品检验的基础上,结合实际生产应用和相关的参照标准,合理设定了各项指标要求。同时,编制组对这些技术指标的合理性进行了严格的验证和评估,最终形成了一套严谨且系统的技术指标体系。

这些指标不仅反映了柠檬酸石膏的基本性能和质量水平,还充分考虑了在实际应用过程中的安全性和可靠性。这确保了所制定的标准能够真实、准确地反映柠檬酸石膏的性能和质量水平,满足当前技术水平发展的需要,体现技术进步的原则,保持标准的先进性和实用性。

### 3.3 其他指标及其说明

(1) 为确保标准指标规定科学、合理、全面,编制组还参照GB/T 5484—2012《石膏化学分析方法》、SN/T 2297.7—2015《石膏及石膏制品分析方法 第7部分:砷、汞含量的测定 原子荧光光谱法》和SN/T 2297.9—2015《进出口石膏及石膏制品分析方法 第9部分:铅、镉、铬、砷、汞、铜、锌、锰、镍、钴的测定 电感耦合等离子体质谱法》的试验方法对柠檬酸石膏样品中氧化钾( $K_2O$ )、氧化钠( $Na_2O$ )、五氧化二磷( $P_2O_5$ )、氯离子( $Cl^-$ )、氟离子( $F^-$ )、砷(As)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)等杂质的含量进行了检测。通过试验检测,同时参照其他现行国家和行业标准文本内容,发现柠檬酸石膏样品中上述杂质的含量较低,且对后端综合利用的影响不大,故在标

准中不对上述成分作限制要求。

(2) 检测项目中,柠檬酸石膏样品白度的检测结果均在70%以上,基本满足石膏制品的需求。白度指标的高低对柠檬酸石膏的性能方面并没有影响,如对白度有特殊要求,可以由供需双方协商确定,因此不在标准技术指标中明确要求。

(3) 试验过程中发现,脂肪含量的测定采用的是食品中脂肪含量的测定方法,食品中一般脂肪含量较高,对柠檬酸石膏产品中脂肪含量较低的情况不适用。蛋白质含量的测定亦是如此。因此在技术指标中不对脂肪含量和蛋白质含量进行特殊要求,而将这两项内容合并并在易分解杂质中,对易分解杂质的含量进行规定。

(4) 柠檬酸石膏中含有少量的三氧化二铁,三氧化二铁来源于石灰石和工艺水中,主要对柠檬酸石膏的白度产生影响,对柠檬酸石膏制品的性能无影响。经过验证试验发现,大部分柠檬酸石膏样品中未检出三氧化二铁含量,个别检出三氧化二铁含量的柠檬酸石膏 $w(Fe_2O_3)$ 不超过0.7%。因此,标准不对三氧化二铁的含量进行约束。

(5) 柠檬酸石膏是食品化工行业在利用石灰法生产柠檬酸过程中产生的化学沉淀副产品<sup>[5]</sup>,从柠檬酸生产工艺全过程而言,不存在放射性元素,全部符合GB 6566—2010《建筑材料放射性核素限量》中A类装饰装修材料的要求。因此,标准不对放射性元素进行约束。

## 4 柠檬酸石膏的综合应用

### 4.1 制备水泥缓凝剂和建筑石膏粉

在柠檬酸的生产过程中,副产品柠檬酸石膏具有较高的 $CaSO_4$ 含量,但其中也含有少量的柠檬酸以及其他无机杂质。由于柠檬酸类物质具有天然的缓凝特性,经过适当的处理后,这些副产品不仅可以作为水泥缓凝剂,还能用于生产建筑石膏粉<sup>[6]</sup>。

在水泥熟料中掺入石膏,不仅能发挥缓凝效果,还能增强水泥的早期强度,减少干缩和变形,提升其耐腐蚀性、抗冻性和抗渗性等性能,对于水泥生产而言,天然石膏中 $w(SO_3)$ 需达到35%以上,柠檬酸石膏的 $w(SO_3)$ 稳定在45%左右,完全符合水泥制造的标准<sup>[7]</sup>。柠檬酸石膏因其优越的性能,在水泥行业中已经得到了广泛的应用<sup>[8]</sup>。

### 4.2 生产 $\alpha$ 高强石膏

段庆奎等<sup>[9]</sup>采用副产品柠檬酸石膏作为原料,先在蒸压釜中进行蒸压处理,促使其转化为 $\alpha$ 型结晶形态。随后,将这些结晶体通过加热实现脱

水,最终制得 $\alpha$ 型半水石膏粉。该工艺先预处理石膏废渣,调整其 $w(\text{H}_2\text{O})$ 至8%~30%。在蒸压釜中,通过维持105~130℃的温度和1.3~2.0 MPa的压力,持续6~10 h,促使晶体结晶。结晶后的物料先经过粉碎、加热脱水处理,再经过粉磨工序后,即可获得 $\alpha$ 型半水石膏粉<sup>[8]</sup>。

#### 4.3 制备硫酸钙晶须

经过净化处理,柠檬酸石膏转变成高纯度的二水硫酸钙悬浮液。在陈化阶段之后,可以利用水热合成技术生产硫酸钙晶须。这种硫酸钙晶须以纤维形态存在,是造纸工业中一种优质的填充材料。

相较于其他填料,硫酸钙晶须由于其较高的水溶性,导致其在造纸过程中的留存率相对较低。为了使硫酸钙晶须能够在水环境中保持其纤维结构,并提升其留存率,需要对硫酸钙晶须进行改性处理,以减少其在水中的溶解度。通过这种改性处理,可以有效地提高硫酸钙晶须的留存率,进而节约宝贵的植物纤维资源<sup>[8]</sup>。

#### 5 结语

经检测和试用证明,柠檬酸石膏完全可以替代天然石膏作水泥缓凝剂,煅烧制备建筑石膏,以及作为生产 $\alpha$ 高强石膏、石膏砌块、硫酸钙晶须和石膏板的原料,并可用于配制石膏砂浆等。利用柠檬酸石膏替代天然石膏符合国家产业政策,可以达到减排、利废的目的,既有利于环境保护,同时可创造一定的经济效益<sup>[5]</sup>。

(1) 有利于实现提升大宗固废综合利用率、减少大宗固废存量量的发展目标,符合生态文明建设绿色发展要求。通过制定柠檬酸石膏行业标准,有利于规范柠檬酸生产企业的产品排放,促进下游石膏制品的综合利用,推动柠檬酸生产企业的健康发展,助力柠檬酸石膏产业链的建设,形成绿色、健康、良性发展的石膏建材产业。

(2) 符合国家生态文明建设绿色发展的要求,柠檬酸石膏渣经过净化处理后,可将对环境带来污染风险的原料变为宝贵的建筑原材料,应用于石膏

制品的制备。食品级柠檬酸副产品不含放射性元素、重金属等危害人类身体健康的物质,因其安全性可被广泛应用于建筑石膏行业,对实现资源的可持续发展具有积极意义。

(3) JC/T 2649—2022《柠檬酸石膏》的发布及实施进一步提升了我国工业副产石膏行业的整体科技水平,促进了柠檬酸等有机酸行业的可持续发展,推动工业转型升级。该标准作为一项资源再利用的原料标准,进一步规范有机酸(含柠檬酸、乳酸等)副产硫酸钙的质量要求,有利于有机酸产业链的延伸。

#### [参考文献]

- [1] 张辉,贾敬敦,王文月,等.国内食品添加剂研究进展及发展趋势[J].食品与生物技术学报,2016,35(3):225-233.  
ZHANG H, JIA J D, WANG W Y, et al. Current Status and Future Trends of Food Additives Research in China[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(3):225-233.
- [2] 白雪.“十四五”聚焦七类大宗固废 推动大宗固废综合利用高质量发展[EB/OL].(2021-03-30)[2024-12-26]. [https://www.sohu.com/a/458013513\\_1000/1043](https://www.sohu.com/a/458013513_1000/1043).
- [3] 李逸晨. JC/T 2625—2021《钛石膏》标准分析[J].硫酸工业, 2022(4):7-11.  
LI Y C. Standard analysis of JC/T 2625—2021 Titanium gypsum [J]. Sulphuric Acid Industry, 2022(4):7-11.
- [4] 张绪庆,马德金,陶玉贵,等.柠檬酸石膏的回收技术及应用[J].科技创新导报,2015,12(34):4-5.
- [5] 胡会军,邓华.喜华东石膏利用柠檬酸渣效益明显 忧水泥厂大量掺用质量差后患无穷[N].中国建材报,2013-07-05(003).
- [6] 范开明,于海彬.浅谈柠檬酸石膏的综合利用[J].化学工程师, 2020,34(6):69-70.  
FAN K M, YU H B. Comprehensive utilization of citric acid gypsum[J]. Chemical Engineer, 2020,34(6):69-70.
- [7] 董秀芹,赵建华,王文忠.利用柠檬酸石膏液相法生产高强度 $\alpha$ -石膏的研究[J].中国非金属矿工业导刊,2010(5):10-13.
- [8] 郭永平.柠檬酸石膏制备硫酸钙晶须及其在造纸中的应用研究[D].自贡:四川轻化工大学,2021.  
GUO Y P. Study on the Preparation of Calcium Sulfate Whiskers from Citrate Gypsum and Its Application in Papermaking [D]. Zigong:Sichuan University of Science & Engineering, 2021.
- [9] 段庆奎,董文亮,王惠琴,等.利用柠檬酸石膏废渣生产 $\alpha$ 型半水石膏粉工艺方法:CN1245788[P].2000-03-01.