GB/T 23456—2025《磷石膏》标准解读

张　威[1]，郑建国[1]，崔荣政[2]，刘永川[1]

（1. 河南建筑材料研究设计院有限责任公司，河南 郑州　450002；
2. 中国磷复肥工业协会，北京　100013）

［摘　要］为推动GB/T 23456—2025《磷石膏》国家标准的准确实施，促进磷石膏资源化利用与产业绿色转型，在系统梳理我国磷石膏产排现状、利用瓶颈及政策导向的基础上，对新版标准的核心内容进行解读。该标准明确了适用范围，覆盖二水法、半水法及半水-二水法等湿法磷酸工艺产生的多物相磷石膏；优化了分类分级体系，按二水硫酸钙或混合磷石膏含量划分为3个等级，适配建材、化工、农业等多领域需求；收紧了水溶性磷、氟、镁、钠、氯等有害杂质限值，新增有机质与重金属（汞、砷、镉、铅、铬、铊）限量指标，完善了放射性核素控制要求；同步更新了试验方法与检验规则，新增有机质（重铬酸钾容量法）与重金属（微波消解/电感耦合等离子发射光谱）检测方法。新版标准通过技术指标的精准调控与方法标准化，有效降低了磷石膏利用过程的环境与安全风险，为磷化工行业高质量发展提供了科学依据与技术支撑。

［关键词］GB/T 23456—2025；磷石膏；标准解读；技术要求；试验方法；资源化利用；重金属限量
［中图分类号］X781　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）06-0008-06

Interpretation of GB/T 23456—2025 “Phosphogypsum”

ZHANG Wei[1], ZHENG Jianguo[1], CUI Rongzheng[2], LIU Yongchuan[1]

（1. *Henan Building Materials Research and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou* 450002, *China*;
2. *China Phosphate and Compound Fertilizer Industry Association*, *Beijing* 100013, *China*）

Abstract: In order to promote the accurate implementation of the national standard GB/T 23456—2025 “Phosphogypsum”, promote the resource utilization of phosphogypsum and the green transformation of the industry, the current situation of phosphogypsum production and discharge, utilization bottlenecks and policy guidance in China are systematically sorted out, and the core content of the new version of the standard is interpreted. The standard specifies the scope of application, covering multi-phase phosphogypsum produced by wet phosphoric acid processes such as dihydrate, hemihydrate, and hemihydrate-dihydrate; Optimizes the classification and grading system, dividing into three levels based on the content of calcium sulfate dihydrate or mixed phosphogypsum, to meet the needs of multiple fields such as building materials, chemical industry, agriculture, etc; Tightens the limits for harmful impurities such as water-soluble phosphorus, fluorine, magnesium, sodium, and chlorine, adds limits for organic matter and heavy metals (mercury, arsenic, cadmium, lead, chromium, thallium), and improves the requirements for radioactive nuclide control; The experimental methods and inspection rules have been updated synchronously, adding the potassium dichromate volumetric method for organic matter and the microwave digestion/ICP-OES detection method for heavy metals. The new version of the standard effectively reduces the environmental and safety risks in the utilization process of phosphogypsum through precise regulation of technical indicators and standardization of methods, providing scientific basis and technical support for the high-quality development of the phosphorus chemical industry.

Key words: GB/T 23456—2025; phosphogypsum; standard interpretation; technical requirements; experimental method; resource utilization; heavy metal limit

收稿日期:2026-01-28
作者简介:张　威(1986—　),男,河南沈丘人,高级工程师,研究方向为石膏及新型建筑材料。
基金项目:河南省科学院基本科研业务费项目（220609098）；河南省科学院创新团队项目（20250110）

0　引言

磷石膏是湿法磷酸生产的副产品，主要成分为硫酸钙。2024年我国磷石膏产生量为8 600万t，集中分布于磷矿资源丰富的湖北、云南、贵州、四川和安徽等省，累计堆存量已超过8亿t[1]。其长期堆存不仅占用大量土地资源，也给生态环境保护带来严峻挑战，成为制约磷化工行业绿色可持续发展的关键难题。国务院印发《固体废物综合治理行动计划》（国发〔2025〕14号），要求深入推进磷石膏综合治理，加强磷石膏贮存、运输、利用等环节环境管理。国家部委与地方政府高度重视磷石膏综合利用，多次组织召开工作会议，相继发布《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）、《推进磷资源高效高值利用实施方案》（工信部联原〔2023〕259号）和《磷石膏综合利用行动方案》（工信部联节〔2024〕58号）等文件，要求深入推动磷石膏减量化、无害化、资源化。磷化工领域专家、学者及相关企业积极推进磷石膏综合利用，采取水洗、浮选、焙烧、中和等预处理工艺，降低磷石膏中杂质及有害物质含量，使处理后的磷石膏满足多种综合利用途径的要求[2-5]。在建材领域，磷石膏用于生产水泥缓凝剂、制成建筑石膏进而生产石膏砌块、石膏砂浆和纸面石膏板等；制备Ⅱ型无水石膏、α型高强石膏等得到实践和验证；磷石膏经改性后用于生态修复、矿井（坑）充填、道路材料在多个省份得到应用和推广[6-8]。在化工领域，磷石膏主要用于制备硫酸联产水泥等[9]。在农业领域，磷石膏用于生产肥料、土壤调理剂等，提高土壤肥力[10-11]。因此，基于过往生产和应用实践编制的GB/T 23456—2018《磷石膏》已难以适配当前产业发展需求。

1　编制依据

为进一步规范磷石膏的生产和应用，2024年3月国家标准化管理委员会下达GB/T 23456—2018《磷石膏》的修订计划（计划号：20240518-T-609），由河南建筑材料研究设计院有限责任公司等负责起草。GB/T 23456—2025《磷石膏》于2025年12月2日发布，2026年7月1日实施。作为磷石膏产品质量控制的核心国家标准，该标准内容突出产品特性、指标设置先进可行，契合行业发展实际。

2　主要内容

标准主要内容包括：范围、规范性引用文件、术语和定义、分类与标记、技术要求、试验方法、检验规则、包装、标志、运输和贮存等。该标准结合我国磷石膏的生产和应用现状，通过验证试验和风险评价识别得出有关的影响因素，规定了磷石膏的技术指标，在结构优化和技术指标上实现了多维度升级。

2.1　范围

更改了范围。湿法磷酸生产是磷化工行业磷矿资源转化的重要环节，生产工艺主要有二水法、半水法和半水-二水法等[12-14]，全球应用最广泛的是二水法。我国磷化工行业绿色发展压力较大，一方面，近90%的磷矿资源为中低品位，普遍需经富集处理方能满足二水法的要求，磷矿综合利用水平偏低[15-18]；另一方面，二水法的磷石膏产生量大、杂质含量高，高值化利用不足、利用场景受限，其堆存、消纳问题成为可持续发展的瓶颈。为实现磷资源高效高值利用和磷石膏源头减量，贵州川恒化工股份有限公司（简称川恒股份）、湖北三宁化工股份有限公司等开发磷矿清洁加工利用新技术，采用可直接利用中低品位磷矿生产浓磷酸的半水法[19]；湖北兴发化工集团股份有限公司（简称湖北兴发）、四川宏达股份有限公司和昆明川金诺化工股份有限公司等采用半水-二水法生产浓磷酸[20-22]。对应不同湿法磷酸生产工艺，磷石膏的结晶有二水硫酸钙、半水硫酸钙和无水硫酸钙等形态，磷石膏的晶体形态直接影响胶凝性能及后续利用途径[23-25]。因此本标准将范围修订为“本文件适用于以磷矿石为原料，湿法制取磷酸时产生的以二水硫酸钙（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）和/或半水硫酸钙（$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$）、无水硫酸钙（$CaSO_4$）为主要成分的副产品。”

2.2　规范性引用文件

引用GB/T 5484《石膏化学分析方法》、GB 6566《建筑材料放射性核素限量》和JC/T 2073《磷石膏中磷、氟的测定方法》作为磷石膏二水硫酸钙（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）或混合磷石膏、放射性核素限量和水溶性五氧化二磷等项目的检验方法依据。

增加引用GB/T 6682—2008《分析实验室用水规格和试验方法》作为有机质含量测定方法中试验用水的依据；GB/T 12805—2011《实验室玻璃仪器 滴定管》、GB/T 12808—2015《实验室玻璃仪器 单标线吸量管》作为实验仪器的依据；GB 18599《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》、AQ 2059《磷石膏库安全技术规程》作为磷石膏贮存、填埋处置的充填及回填利用环境保护要

求依据；HJ 702《固体废物　汞、砷、硒、铋、锑的测定　微波消解/原子荧光法》、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》作为重金属限量的检测方法依据。

2.3 术语与定义

增加了术语和定义。混合磷石膏：湿法制取磷酸时产生的含有二水硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$）、半水硫酸钙（$CaSO_4·1/2H_2O$）和无水硫酸钙（$CaSO_4$）两种或两种以上物相成分的磷石膏。考虑二水法、半水法和半水–二水法等多种湿法磷酸生产工艺特点，解决不同工艺产品分类模糊的行业痛点，明确适用边界，描述更加严谨。

2.4 分类与标记

产品按二水硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$）或混合磷石膏含量由高到低分为一级、二级、三级。考虑硫酸钙、杂质等的影响，分为3个等级以满足不同利用途径的需要。磷石膏组分相对复杂，杂质分离难度较大，批次成分不稳定，二、三级可用于生态、化工、道路和农业等领域；经充分处理的一级磷石膏组分接近甚至部分优于天然石膏，可作为替代天然石膏的资源用于相关领域。

2.5 技术要求

磷石膏利用场景不断拓展，从传统建材延伸至多个领域。因此，与GB/T 23456—2018《磷石膏》相比，本标准删除了“用于石膏建材时应满足一级或二级指标的要求”的规定；优化了核心指标，适配生产与应用需求。新旧标准的技术要求对比见表1。

表1　新旧标准的技术要求对比

Table 1　Comparison of technical requirements between new and old standards

项目	GB/T 23456—2025			GB/T 23456—2018		
	一级	二级	三级	一级	二级	三级
二水硫酸钙或混合磷石膏质量分数/%	≥90.0	≥85.0	≥75.0	≥90	≥80	≥65
附着水质量分数/%	≤15.0	≤20.0	≤25.0	≤15	≤20	≤25
水溶性五氧化二磷质量分数/%	≤0.10	≤0.20	≤0.30	≤0.20	≤0.30	≤0.50
水溶性氟离子质量分数/%	≤0.05	≤0.10	≤0.20	≤0.10	≤0.20	≤0.30
水溶性氧化镁质量分数/%	≤0.05	≤0.10	—	≤0.10	≤0.30	—
水溶性氧化钠质量分数/%	≤0.05	≤0.10	—	≤0.06	≤0.10	—
氯离子质量分数/%	≤0.01	≤0.02	—	≤0.02	≤0.04	—
有机质质量分数/%	≤0.20	≤0.30	—		—	
pH	≥5	≥3	≥3		双方商定	
放射性核素限量	内照射指数I_{Ra}≤1.0，外照射指数I_r≤1.0			符合GB 6566中A类装饰装修材料的要求		
总汞质量分数限量/(mg·kg^{-1})	≤5.0					
总砷质量分数限量/(mg·kg^{-1})	≤50.0					
总镉质量分数限量/(mg·kg^{-1})	≤10.0					
总铅质量分数限量/(mg·kg^{-1})	≤200.0					
总铬质量分数限量/(mg·kg^{-1})	≤500.0					
总铊质量分数限量/(mg·kg^{-1})	≤2.5					

更改了二水硫酸钙（$CaSO_4·2H_2O$）或混合磷石膏含量指标。二水硫酸钙或混合磷石膏，是磷石膏综合利用所需的有效组分。二水法或半水–二水法以二水硫酸钙计，半水法以混合磷石膏计。随着磷矿开采洗选工艺优化，磷酸生产过程管理强化，磷石膏水洗、浮选等净化预处理技术加强，磷石膏品质有所提高。为使磷石膏生产企业不断加强技术装备的更新与投入，推进磷石膏综合利用量效齐增，本标准二水硫酸钙或混合磷石膏含量二级、三级指标适当提高。

更改了水溶性五氧化二磷（P_2O_5）、水溶性氟离子（F^-）、水溶性氧化镁（MgO）、水溶性氧化钠（Na_2O）、氯离子（Cl^-）含量指标。水溶性五氧化二磷、水溶性氟离子是磷石膏的主要有害杂质，就石膏建材而言水溶性五氧化二磷使石膏晶体粗化、强度降低；水溶性氟离子显著加快凝结速度，同时过量的氟离子将对人身和环境造成损害。镁、钠等碱金属离子随水分蒸发沿石膏建材产品孔隙迁移至表面，造成泛霜、返碱、结晶等。氯离子在产品表面与钙离子结合生成氯化钙，导致石膏建材产品无法完全干燥，并且影响纸面石膏板面纸与石膏芯材的黏结强度，腐蚀生产设备。如不加以必要的预处

理而直接利用，将给下游产品带来一定的不良影响，必须对这些杂质含量加以限制。经反复水洗、中和等预处理可去除大部分水溶性杂质，尤其是水溶性磷、氟，有效降低磷石膏的酸性。因此本标准水溶性五氧化二磷含量、水溶性氟离子含量要求大幅度提高，水溶性氧化镁、水溶性氧化钠和氯离子含量一级、二级指标相应提高。磷石膏的有害杂质指标收紧，可有效降低应用过程中的不良影响。

更改了pH指标。pH较低是磷石膏存在的普遍问题，其pH≤2.0时将被列为危险废物，且腐蚀生产、运输设备。作为原材料其pH要求过高并不现实，本标准规定一级pH≥5，二级、三级指标pH≥3，一方面促使磷石膏在生产环节解决其酸性过低问题，另一方面有助于后续产品的直接生产和磷石膏的推广应用。更改了放射性核素限量指标，来源于磷矿石的铀、镭等放射性元素，使得磷石膏带有一定的放射性。本着对人身健康负责的态度，本标准对放射性核素限量指标提高限制，内照射指数I_{Ra}≤1.0不变，外照射指数I_r由≤1.3提高至≤1.0。

增加了有机质含量指标。磷石膏中的有机物主要来源于磷矿石中的腐殖质和伴生的胡敏素类等，以及磷矿浮选和湿法磷酸工艺加入的药剂等。有机质在磷酸生产过程中以物理吸附形式分布在磷石膏晶体颗粒表面，降低磷石膏白度，削弱石膏晶体间的结合力，使磷建筑石膏的凝结时间延长，硬化体结构疏松，强度降低，也是造成磷石膏制品发霉、长苔的主要因素。但在农业领域磷石膏用于土壤改良等，含有的有机质可提高土壤肥力。通过水洗、正反浮选或高温煅烧可有效去除有机质。针对磷石膏在石膏建材领域的应用需求，将有机质质量分数定为一级≤0.20%，二级≤0.30%。

增加了重金属限量要求。磷石膏中的重金属与磷矿的来源、组成以及生产磷酸的工艺条件有密切关系，常见的重金属有汞、砷、镉、铅、铬和铊等。重金属暴露在自然界中不断富集，通过生物作用、界面反应而改变存在形态，对食物链上的生物造成不可避免的危害。为避免由重金属对公众健康和生态环境造成的潜在威胁，需要对其进行处理与控制。在开采阶段优先选择高品位磷矿，从源头上减少重金属引入风险。针对中低品位磷矿，采用先进、高效、环保的选矿技术，识别重金属的赋存状态，精准地分离磷矿与伴生矿物，从而降低副产磷石膏中的重金属含量。参照GB 38400—2019《肥料中有毒有害物质的限量要求》等磷石膏及综合利用的相关标准和土壤、水体等环境标准中的规定，选择残留可能性大的重金属元素进行限定。由于总汞、砷、镉、铅、铬和铊等重金属危害性较大、受关注性较强、检出率较高，结合磷石膏在建材和生态修复、充填回填、道路基层材料等方面的具体应用，本标准对磷石膏中总汞、砷、镉、铅、铬、铊限量进行了规定。首次在磷石国家标准中明确膏重金属限量要求，既是响应《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》《中华人民共和国土壤污染防治法》等的刚性要求，也消除长期以来磷石膏资源化应用中重金属污染风险隐患，为跨行业资源化利用提供参考依据。

本标准根据行业技术进步和应用反馈，调整关键成分指标，优化了二水硫酸钙或混合磷石膏含量分级，既保留了高品位产品质量门槛，又为中低品位的合理利用预留空间。同时收紧水溶性五氧化二磷、氟离子、氯离子等有害杂质指标，降低应用过程中对设备、环境的负面影响。pH指标优化后贴合实际生产情况，放射性核素限量确保应用安全。有机质含量、重金属限量等指标的完善，将有效破除磷石膏资源化应用的环保制约瓶颈。

2.6　试验方法

试验方法在现行有效标准中可引用的尽量引用，保证标准的一致性、科学性和合理性。按GB/T 5484《石膏化学分析方法》检测二水硫酸钙（$CaSO_4\cdot 2H_2O$）、附着水（H_2O）、水溶性氧化镁（MgO）、水溶性氧化钠（Na_2O）、氯离子（Cl^-）、pH；按GB 6566《建筑材料放射性核素限量》检测放射性核素限量；按JC/T 2073《磷石膏中磷、氟的测定方法》检测水溶性五氧化二磷（P_2O_5）、水溶性氟离子（F^-）含量，与GB/T 23456—2018《磷石膏》中保持一致。

完善了二水硫酸钙或混合磷石膏的检测方法。二水法的磷石膏主要成分为二水硫酸钙，以式4.778 5×w（结晶水）表征。半水–二水法的磷石膏主要成分为二水硫酸钙，所含少量半水硫酸钙或无水硫酸钙在附着水存在时将逐步转化为二水硫酸钙。通过对湖北兴发、中化重庆涪陵化工有限责任公司和甘肃瓮福化工有限责任公司等企业半水–二水法的磷石膏进行验证试验，以4.778 5×w（结晶水）表征二水硫酸钙含量接近实际样品状态。

研究发现半水法的磷石膏主要化学组成为CaO和SO_3，属于介稳晶体，在自然环境中可缓慢发生相转化，胶凝性能差。如图1所示，川恒股份半水

法的磷石膏呈片状与短柱状，片状晶体尺寸较大、长径比较小；短柱状晶体长径比明显提高，呈相对规则的棱柱状，晶型结构杂乱。片状和短柱状晶体相互团聚为不规则球状，球状晶形由不同取向的晶体构成，晶形间相互搭接较少、间隙较大。晶体表面覆盖少量形状不规则的细小颗粒，为磷、氟和酸不溶物等杂质。半水法的磷石膏晶型与板片状的二水硫酸钙、六方短柱状α型半水硫酸钙、片状β型半水硫酸钙在晶型、形貌上均存在明显差异。XRD 分析表明，半水法的磷石膏中存在二水硫酸钙、二氧化硅和单斜晶系的半水硫酸钙或六方晶系的无水硫酸钙。半水硫酸钙与无水硫酸钙衍射峰严重重叠，无水硫酸钙水化极慢，因此会显示出有半水硫酸钙的存在。

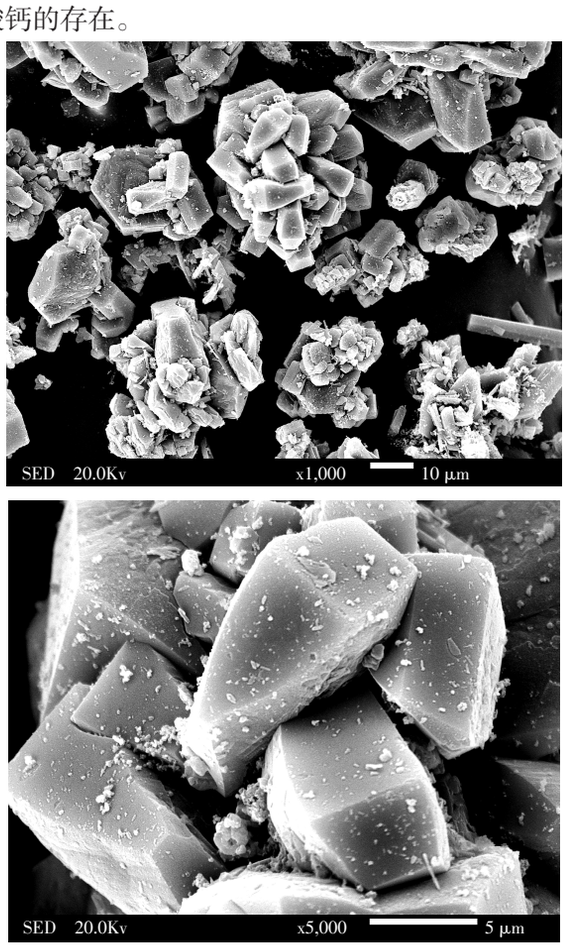


图 1 川恒股份半水法磷石膏 SEM 图

Fig. 1 SEM images of hemihydrate phosphogypsum form Chuanheng Co., Ltd.

按 GB/T 5484《石膏化学分析方法》测定川恒股份不同状态磷石膏样品（原状、少量水化、部分水化和水化较完全）的结晶水、三氧化硫含量，分别以 4.778 5×*w*（结晶水）、1.700 5×*w*（三氧化硫）+*w*（结晶水）表征硫酸钙含量，与充分水化并烘干至恒质量测定结晶水含量表征二水硫酸钙含量进行比较，结果见表 2。结果表明以 1.700 5×*w*（三氧化硫）+*w*（结晶水）表征混合磷石膏中硫酸钙含量误差较小，方法具有科学性、合理性和可操作性。

表 2 川恒股份半水法的磷石膏中硫酸钙表征

Table 2 Characterization of calcium sulfate in hemihydrate phosphogypsum from Chuanheng Co., Ltd.

样品状态	不同表征方式下 *w*（硫酸钙）/%		
	4.778 5×*w*（结晶水）	1.700 5×*w*（三氧化硫）+*w*（结晶水）	*w*（二水硫酸钙）
原状	27.33	96.95	20.50
少量水化（6 h）	44.34	94.70	40.01
部分水化（24 h）	61.64	96.36	66.25
水化较完全（72 h）	94.61	95.35	93.66

增加了附录 A 有机质含量测定方法。参考 T/CBMF 262—2024《磷石膏中有机质含量测定方法》，本标准提出重铬酸钾容量法检测有机质，满足生产和应用企业的迫切需要。加热条件下，过量的重铬酸钾–硫酸溶液与磷石膏中有机碳发生氧化反应，生成二氧化碳、硫酸铬、硫酸钾及水，未反应的重铬酸钾用硫酸亚铁标准溶液滴定。根据氧化前后重铬酸钾量的变化，计算有机碳的含量，以此来表示磷石膏中有机质含量。

增加了 HJ 702《固体废物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法》作为磷石膏中总汞（Hg）、总砷（As）的检测方法依据；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》作为磷石膏中总镉（Cd）、总铅（Pb）、总铬（Cr）、总铊（Tl）的检测方法依据。

本标准完善了试验方法，增加了有机质含量和重金属限量的专项测定方法，方法成熟、可操作性强，以确保检测结果的准确性和重复性。

2.7 检验规则

出厂检验和型式检验项目与 GB/T 23456—2018《磷石膏》保持一致。因技术要求中项目的增加，从堆场抽样时样品量由 10 kg 更改为 12 kg，混合后用四分法缩分至 3 kg。对于半水法的磷石膏，自然状态下会转化为二水硫酸钙，取样后应及时脱除附着水，再密封保存。

2.8 包装、标志、运输和贮存

包装、标志、运输与 GB/T 23456—2018《磷石膏》保持一致。贮存时产品堆放场地应采取必要的防渗和抑尘措施，从源头防范磷石膏贮存过程中的土壤污染、扬尘污染，并应符合 GB 18599 和 AQ 2059 的有关规定。当前条件下，安全堆存仍是

磷石膏处理处置的重要方式之一。为确保磷石膏堆存的安全性和环保性，磷石膏堆放场地必须严格按照相关技术规范进行设计、建设和运营，确保堆存不会对地下水和土壤造成污染。按照GB 18599和AQ 2059可评估在受到地表水或地下水浸沥时磷石膏中污染物的浸出风险。

3　结语

GB/T 23456—2025《磷石膏》充分考虑了我国国情，结合湿法磷酸生产工艺的技术创新、磷石膏综合利用产品的要求和预处理技术及装备的应用，重新界定了磷石膏，规范了术语定义，优化了产品指标，明确了试验方法。

本标准的发布实施，将为磷石膏行业提供统一、科学的质量评价依据，有效提升磷石膏综合利用率，助力磷化工产业高质量发展。

［参考文献］

［1］ 崔荣政，修学峰，王臣.我国磷石膏综合利用现状及“十五五”发展思考和建议[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(11)：1-6.
CUI R Z，XIU X F，WANG C. Current situation of comprehensive utilization of phosphogypsum in China and thoughts and suggestions for its development during the “15th Five-Year Plan” period[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40(11)：1-6.

［2］ 张华丽，贾振林，王潇峰，等.磷石膏资源化利用过程中预处理进展[J].磷肥与复肥，2023，38(12)：25-29.
ZHANG H L，JIA Z L，WANG X F，et al. Pretreatment progress of phosphogypsum in the process of resource utilization [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38(12)：25-29.

［3］ 朱桂华，何宾宾，杨文娟，等.磷石膏净化技术研究进展[J].磷肥与复肥，2023，38(4)：25-30.
ZHU G H，HE B B，YANG W J，et al. Research progress of phosphogypsum purification technology [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38(4)：25-30.

［4］ 李恒，郭旭东，钟晋，等.磷石膏杂质及净化研究现状[J].磷肥与复肥，2022，37(5)：22-26.
LI H，GUO X D，ZHONG J，et al. Research status of phosphogypsum impurities and purification [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2022，37(5)：22-26.

［5］ 严超，彭秋桂，朱淼，等.磷石膏综合利用及除杂方法综述[J].磷肥与复肥，2023，38(2)：27-33.
YAN C，PENG Q G，ZHU M，et al. Comprehensive utilization and impurity removal methods of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38(2)：27-33.

［6］ 张峻，解维闵，董雄波，等.磷石膏材料化综合利用研究进展[J].材料导报，2023，37(16)：163-174.
ZHANG J，XIE W M，DONG X B，et al. Research Progress on Comprehensive Utilization of Phosphogypsum for Materials：A Review[J].Materials Reports，2023，37(16)：167-178.

［7］ 杨靖娴，马丽萍，何宾宾，等.磷石膏基固废碱激发胶凝材料研究进展[J].硅酸盐通报，2025，44(11)：3934-3946.
YANG J X，MA L P，HE B B，et al. Research Progress on Phosphogypsum-Based Solid Waste Alkali-Activated Cementitious Materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2025，44(11)：3934-3946.

［8］ 李剑秋，李子军，王佳才，等.磷石膏充填材料与技术发展现状及展望[J].现代矿业，2018(10)：1-4，8.
LI J Q，LI Z J，WANG J C，et al. Development Status and Prospect of Phosphogypsum Filling Material and Technique[J]. Modern Mine，2018(10)：1-4，8.

［9］ 高强.“双碳”背景下磷石膏制硫酸联产水泥技术面临的机遇与挑战及发展建议[J].磷肥与复肥，2023，38(3)：25-28.
GAO Q. Opportunities，challenges and development suggestions of co-production of sulfuric acid and cement from phosphogypsum under the background of “double carbon”[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38(3)：25-28.

［10］ 杨花，齐佳敏，李彬.磷石膏改良土壤研究进展[J].磷肥与复肥，2023，38(5)：40-44.
YANG H，QI J M，LI B. Research progress of phosphogypsum in soil improvement [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38(5)：40-44.

［11］ 杨雪娇，钟晋，刘磊，等.磷石膏无害化处理技术及其在土壤调理中的应用研究进展[J].化工矿物与加工，2025，54(3)：57-64.
YANG X J，ZHONG J，LIU L，et al. Research progress on harmless treatment technology of phosphogypsum and its application in soil conditioning [J]. Industrial Minerals & Processing，2025，54(3)：57-64.

［12］ 杨培发，陈军民，陈志华.我国湿法磷酸生产技术对比[J].磷肥与复肥，2020，35(1)：24-26.
YANG P F，CHEN J M，CHEN Z H. Comparison of WPA production technology in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35(1)：24-26.

［13］ 操能，杨哲，左义兵，等.湿法磷酸生产工艺对比及其副产磷石膏资源化利用现状[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(12)：82-90.
CAO N，YANG Z，ZUO Y B，et al. Comparative analysis of wet-process phosphoric acid production processes and current status of phosphogypsum resource utilization[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40(12)：82-90.

［14］ 何宾宾，魏立军，谢德龙，等.中国湿法磷酸加工产业现状与可持续发展[J].无机盐工业，2020，52(1)：1-4，16.
HE B B，WEI L J，XIE D L，et al. Current situation and sustainable development of wet process phosphorus processing industry in China[J]. Inorganic Chemicals Industry，2020，52(1)：1-4，16.

［15］ 苗俊艳，齐帅亮，侯翠红，等.磷矿资源绿色全量利用技术研究现状及突破思路[J].化学与生物工程，2024，41(5)：1-8.
MIAO J Y，QI S L，HOU C H，et al. Research status and breakthrough ideas of green full utilization technology of phosphate ore resources[J].Chemistry & Bioengineering，2024，41(5)：1-8.

（下转第34页）