

# 磷建筑石膏细度变化对其性能的影响研究

王再骞<sup>1</sup>, 彭超<sup>1,2</sup>, 李国海<sup>1,2</sup>, 张威<sup>1,2</sup>

(1. 新洋丰农业科技股份有限公司, 湖北 荆门 448000; 2. 湖北新洋丰新型建材科技有限公司, 湖北 荆门 448000)

**[摘要]** 为探明磷建筑石膏粉比表面积对其净浆及自流平砂浆性能的影响, 通过改变石膏粉比表面积, 测试其强度、凝结时间、粒径分布及其制备的自流平砂浆的流动度、保水率、抗裂性等性能。结果表明: 比表面积主要通过改变颗粒粒径分布影响性能; 净浆2h抗折强度、抗压强度均先增后减, 凝结时间先延长后缩短; 自流平砂浆24h强度峰值出现在比表面积500 m<sup>2</sup>/kg附近, 流动度在比表面积400 m<sup>2</sup>/kg时最优, 抗裂性随比表面积增大显著改善。综合而言, 比表面积控制在400 m<sup>2</sup>/kg附近时, 磷建筑石膏粉及自流平砂浆综合性能最优。

**[关键词]** 磷建筑石膏; 比表面积; 强度; 粒径分布; 自流平砂浆; 抗开裂

**[中图分类号]** TU526 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 11-0028-05

## Study on the influence of fineness change of phosphorus building gypsum on its properties

WANG Zaiqian<sup>1</sup>, PENG Chao<sup>1,2</sup>, LI Guohai<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>

(1. Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China;

2. Hubei Xinyangfeng New Building Materials Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of the specific surface area of phosphorus building gypsum powder on the properties of its paste and self-leveling mortar, The strength, setting time, particle size distribution of the paste, flow ability, water retention rate and crack resistance of self-leveling mortar are tested by changing the specific surface area of the gypsum powder. The results show that the specific surface area mainly affects the performance by changing the particle size distribution; The 2-hour flexural/compressive strength of the paste first increases and then decreases, and the setting time first increases and then decreases; The 24-hour strength peak of the self-leveling mortar appears near 500 m<sup>2</sup>/kg, the flow ability is optimal at 400 m<sup>2</sup>/kg, and the crack resistance significantly improves with the increase of the specific surface area. In conclusion, when the specific surface area is controlled near 400 m<sup>2</sup>/kg, the comprehensive performance of phosphorus building gypsum powder and self-leveling mortar is optimal.

**Key words:** phosphorus building gypsum; specific surface area; strength; particle size distribution; self-leveling mortar; resistance to cracking

## 0 引言

磷石膏是湿法磷酸工艺过程中产生的工业副产物, 2023年我国磷石膏综合利用率55.6%<sup>[1]</sup>。磷建筑石膏是指以磷石膏为原料经过一定温度煅烧后, 以 $\beta$ -半水石膏为主要成分的胶凝材料<sup>[2]</sup>。煅烧制备 $\beta$ 型半水石膏工艺简单经济, 是实现磷石膏规模化应用的重要途径之一<sup>[3]</sup>。

磷建筑石膏粉的质量是影响下游产品质量的关键因素。影响磷建筑石膏粉质量的因素除三相组成外, 还包括石膏粉体细度。有研究发现, 在比表面积200~500 m<sup>2</sup>/kg范围内, 随着脱硫石膏细度增加, 力学性能呈明显下降趋势<sup>[4]</sup>。但是另有研究发现球磨时间延长可显著降低磷石膏的标准稠度需水量, 从而使强度提高<sup>[5]</sup>。也有研究认为随着粉磨时

间的延长, 磷建筑石膏的绝对干抗压强度和绝对干抗折强度先增大后减小<sup>[6]</sup>。这些研究都是通过球磨时间作为研究变量, 进一步研究磷建筑石膏比表面积变化对其基本性能的影响。

同时, 目前对石膏基自流平性能影响因素研究主要集中在各种外加剂的影响, 且主要关注自流平砂浆强度、流动性、凝结时间等指标<sup>[7-8]</sup>。自流平砂浆通常大面积施工, 大面积的蒸发作用和剧烈的水化反应会引起收缩应变使其开裂<sup>[9]</sup>, 制约着石膏自流平砂浆的发展与推广。石膏粉比表面积变化对自流平砂浆抗开裂性能的影响, 有待进一步研究。

**[收稿日期]** 2023-12-21; **[修回日期]** 2025-07-10

**[作者简介]** 王再骞(1997-), 男, 湖北恩施人, 硕士, 从事固体废物处置与资源化研究。

基于以上问题,结合湖北新洋丰新型建材科技有限公司煅烧的磷建筑石膏粉,通过球磨改变其比表面积,重点研究比表面积变化后在标稠用水量下对石膏净浆力学性能的影响及自流平砂浆性能变化趋势,揭示比表面积影响规律,促进不同后端应用场景的高质量磷石膏粉的生产。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 原材料

本研究采用提纯磷石膏经生产线煅烧后未球磨的3种不同三相组成的磷石膏粉(PBG),其pH、三相组成、初始比表面积如表1所示。

表1 原料磷石膏粉初始比表面积及三相组成

Table 1 Initial specific surface area and three-phase composition of phosphogypsum raw materials

磷石膏粉	pH	初始比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	三相质量比/%		
			二水	半水	无水
PBG-1	4.49	124	4.20	78.72	3.36
PBG-2	4.66	117	3.14	68.29	10.27
PBG-3	4.47	127	3.23	75.55	3.32

自流平砂浆外加剂:水泥(PO),中国葛洲坝集团水泥有限公司生产的P.O42.5普通硅酸盐水泥;聚羧酸高效减水剂(PC)、蛋白类石膏用缓凝剂(SG)、改性聚醚类高效能粉体消泡剂(SA)、悬浮稳定剂(ST),均为市售。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 不同细度磷石膏粉制备

石膏粉细度通过比表面积表征。在工业煅烧的磷石膏粉进球磨机之前取粉,改变球磨时间制备出不同比表面积的磷石膏粉,待用。比表面积设计范围:200~700  $\text{m}^2/\text{kg}$ 。

#### 1.2.2 磷石膏粉物理性能及强度测试

将制得的磷石膏粉制备净浆并浇筑条块,参考GB/T 17669.3—1999《建筑石膏力学性能测定》与GB/T 17669.4—1999《建筑石膏净浆物理性能的测定》方法检测磷石膏粉净浆标稠及标稠用水量下水化过程的初凝时间、终凝时间、抗折强度、抗压强度。

#### 1.2.3 自流平砂浆产品制备及性能检测

按表2所示的配比配制自流平砂浆。

表2 自流平砂浆配比

Table 2 Mix proportion of self-leveling mortar g

$m(\text{PBG})$	$m(\text{PO})$	$m(\text{PC})$	$m(\text{SG})$	$m(\text{SA})$	$m(\text{ST})$	$m(\text{水})$
950	50	1.5	0.8	0.6	0.4	480

先称取一定量的水加入搅拌锅内,再将配制的

石膏砂浆粉料在5 s内匀速加入搅拌锅,慢速搅拌2 min,制备均匀的料浆。石膏基自流平砂浆的制备及流动度与强度检测参照JC/T 1023—2021《石膏基自流平砂浆》进行。

#### 1.2.4 表征方法

采用山东耐克特NKT5100-H全自动激光粒度分析仪对粉料比表面积及粒径分布进行测试。

将球磨后的石膏粉样品,用上海听瑞WSB-2白度仪进行白度测试。

砂浆保水率:将标准扩散度用水量的石膏浆料倒入布氏漏斗,使浆料厚度保持在 $(10.0 \pm 0.5)$  mm范围内称量后,将负压调至54 kPa抽滤20 min,取下布氏漏斗,用滤纸将下口残余的水擦净后称量。

砂浆开裂性能:面积 $1 \times 0.5 \text{ m}^2$ 的成型框放在混凝土成型板上,将按表2配制的自流平砂浆料浆均匀倒入成型框中抹平,制备厚10 mm的自流平试样,自然条件放置养护24 h,观察其开裂状况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 比表面积对磷石膏粉白度的影响

比表面积对磷石膏粉白度的影响见图1。由图1可以发现,各石膏粉白度随比表面积的增大而增大,白度从初始52%~55%增至62%~66%,特别是在原始比表面积由120  $\text{m}^2/\text{kg}$ 增大到200~300  $\text{m}^2/\text{kg}$ 区间时白度增长较快。白度随比表面积增加而增大,主要原因是磨细后粉体的反射率变大,并且粉体颗粒表面的孔隙减少,使白度提高<sup>[10]</sup>。

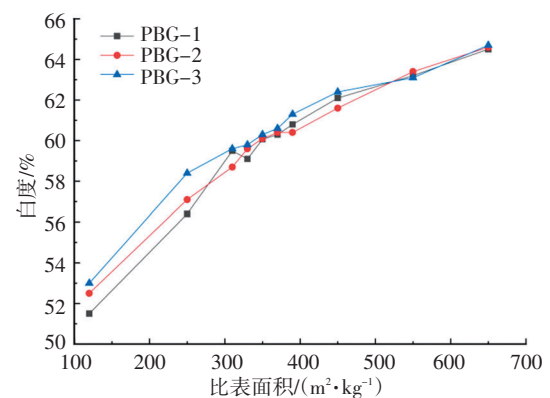


图1 磷石膏粉白度随比表面积的变化

Fig. 1 Changes in whiteness of phosphogypsum powder with specific surface area

### 2.2 比表面积对磷石膏粉粒径分布的影响

表3为各比表面积磷石膏粉粒径分布情况。由表3可知, $D_{20}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$ 随磷石膏粉比表面积增大呈减小的趋势。细颗粒占比逐渐增多,颗粒逐渐细化,是比表面积增大的主要原因。

表3 各比表面积粒径分布  
Table 3 Particle size distribution of each specific surface area

surface area							
比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	D <sub>20</sub> / μm	D <sub>50</sub> / μm	D <sub>90</sub> / μm	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	D <sub>20</sub> / μm	D <sub>50</sub> / μm	D <sub>90</sub> / μm
200~300	10.57	31.10	93.87	500~550	4.63	16.16	62.2
300~350	8.24	23.59	72.88	550~600	5.21	20.31	69.42
350~400	6.52	22.86	74.39	600~650	3.55	13.78	63.13
400~450	6.05	22.91	87.35	650~700	3.17	12.54	51.49
450~500	5.05	21.69	69.18				

### 2.3 比表面积对磷石膏粉凝结时间的影响

3种石膏粉凝结时间变化如图2所示。由图2可知，初凝时间与终凝时间变化具有一致性，在磷石膏粉比表面积增大到300 m<sup>2</sup>/kg左右时出现时间小峰值，增大至400 m<sup>2</sup>/kg左右凝结时间逐渐缩短。磷石膏粉比表面积继续增大至450 m<sup>2</sup>/kg左右凝结时间最长，然后逐渐回落。总体呈现先延长后缩短的规律。

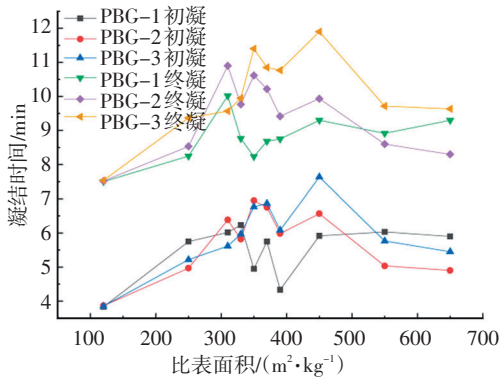


图2 石膏粉凝结时间随磷石膏粉比表面积的变化

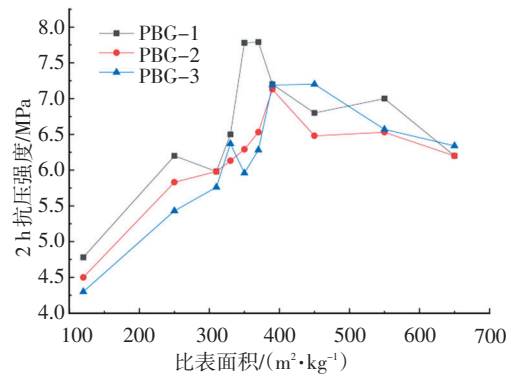
Fig. 2 The setting time of phospho gypsum powder varies with specific surface area

### 2.4 比表面积对磷石膏粉及自流平砂浆力学性能的影响

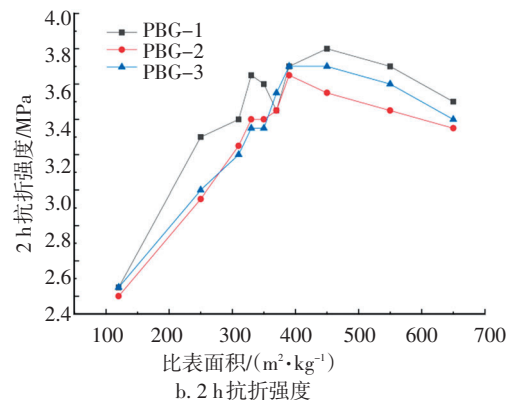
图3为石膏粉2 h抗折、抗压强度随比表面积变化趋势。由图3可知，随着磷石膏粉比表面积增大，2 h抗压强度先增大后减小。比表面积小于360~400 m<sup>2</sup>/kg时，随着比表面积增大，2 h抗压强度逐渐增大；比表面积大于400 m<sup>2</sup>/kg后抗压强度缓慢降低。抗折强度与抗压强度呈现相同变化规律，比表面积在400~450 m<sup>2</sup>/kg左右时，2 h抗折强度达到最大值。

图4反映了不同磷石膏粉配制的自流平砂浆强度随比表面积变化趋势。由图4可知，3种自流平砂浆的24 h强度均随比表面积增大呈现“先上升、后下降”的趋势，且峰值出现在比表面积500 m<sup>2</sup>/kg附近。

磷石膏粉比表面积增大至400~500 m<sup>2</sup>/kg，强

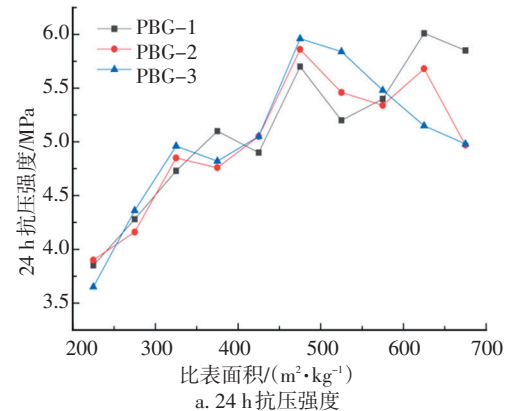


a. 2 h抗压强度

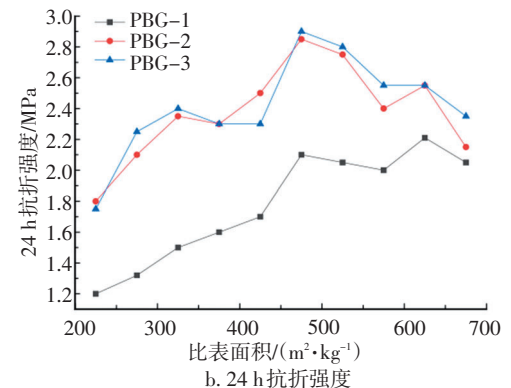


b. 2 h抗折强度

图3 磷石膏粉2 h抗折强度、抗压强度随比表面积变化  
Fig. 3 Changes in 2-hour flexural/compressive strength of gypsum powder with specific surface area



a. 24 h抗压强度



b. 24 h抗折强度

图4 自流平砂浆24 h抗折强度、抗压强度随比表面积变化  
Fig. 4 Changes in 24-hour flexural/compressive strength of self-leveling mortar with specific surface area

度增大是因为石膏颗粒细化,单位质量的石膏与水的接触面积增大,反应界面越多,溶解速率加快,参与水化颗粒增多,标稠用水量降低,强度越高;但比表面积过大后,细颗粒占比更多,水化后结构疏松、缺陷增多,抵消界面效应,颗粒在液体中团聚程度加剧,颗粒在水中分散困难,导致标稠用水量增加,硬化体孔隙增多,石膏硬化体强度随之下降<sup>[11]</sup>。

### 2.5 磷石膏粉比表面积对自流平砂浆流动性的影响

图5与图6显示了磷石膏粉比表面积对自流平砂浆流动度及流动度损失率的影响。由图5可知,随着石膏粉比表面积增大,自流平砂浆流动度均呈现先增大后减少的趋势,不同砂浆流动度在400 m<sup>2</sup>/kg附近时达到最大。

由图6可知,初始比表面积条件下30 min流动度损失率平均为20%,比表面积逐渐增大至450~500 m<sup>2</sup>/kg时,流动度损失率降至最低,平均为

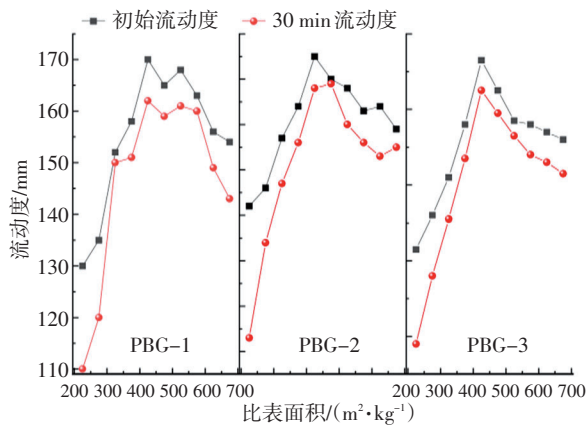


图5 不同比表面积石膏粉制自流平砂浆流动度

Fig. 5 Flowability of self-leveling mortar with different specific surface areas gypsum powder

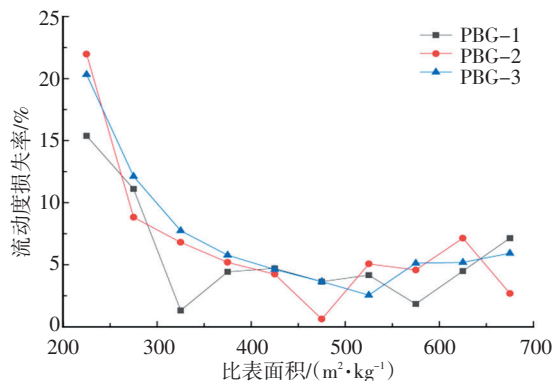


图6 不同比表面积石膏粉制自流平砂浆流动度损失变化

Fig. 6 Changes in flowability loss of self-leveling mortar with different specific surface areas gypsum powder

2.6%,比表面积继续增大流动度损失小幅度增大,磷石膏粉比表面积达到650~700 m<sup>2</sup>/kg时,平均损失率为5.3%。适当提高石膏粉比表面积有利于砂浆流动度损失的改善。主要原因是石膏粉颗粒细化有利于其分散性增加,有助于砂浆流动与均匀水化;颗粒继续细化又会导致微小颗粒易水化团聚,流动度降低,同时流动度损失增大<sup>[12]</sup>。

图7反映了不同比表面积自流平砂浆黏度变化。如图7所示,自流平砂浆黏度随石膏粉比表面积增大表现出逐渐降低的趋势,这也是流动度损失减小的主要原因之一。

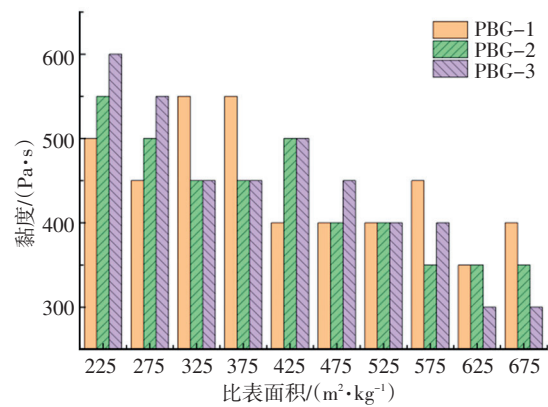


图7 不同比表面积自流平砂浆黏度变化

Fig. 7 Changes in viscosity of different self-leveling mortars

### 2.6 石膏粉比表面积对自流平砂浆保水率的影响

保证自流平砂浆有一定的保水性,不使骨料等产生分离、泌水离析。自流平砂浆保水率的变化与磷石膏粉颗粒的表面特性、孔隙结构密切相关。不同自流平砂浆保水率见图8。由图8可知,随磷石膏粉比表面积增大,石膏基自流平砂浆的保水率整体呈先显著上升、后趋于稳定的变化规律。低比表面积225~425 m<sup>2</sup>/kg范围内,保水率随比表面积增大快速提升(从保水率64%~66%提升至82%~

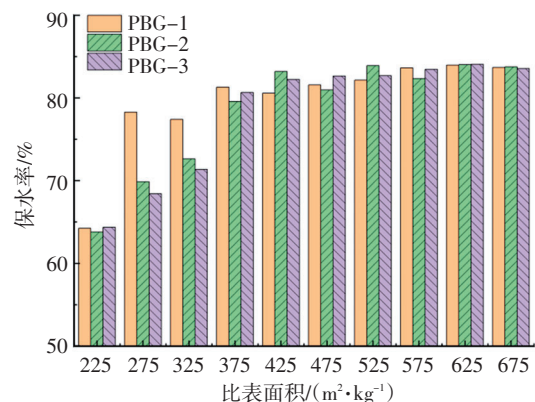


图8 不同自流平砂浆保水率

Fig. 8 Water retention rate of different self-leveling mortars

84%)。磷石膏粉比表面积大于 425 m<sup>2</sup>/kg, 保水率提升幅度收窄, 逐渐趋于稳定。比表面积越大, 石膏颗粒越细小, 表面能越高, 对水分子的吸附能力越强, 比表面积超过一定值, 因磷石膏粉吸附饱和而进入稳定阶段。

### 2.7 石膏粉比表面积对自流平开裂性能的影响

图9显示了不同比表面积石膏粉制备的自流平砂浆 24 h 开裂情况。从图9可见, 随石膏粉比表面积增大, 在不改变配方的前提下, 石膏基自流平表面的裂缝呈现“数量逐渐减少后逐渐稳定、裂缝宽度逐渐变窄”的变化趋势。随石膏粉比表面积增大, 石膏基自流平表面的裂缝呈现形态细化、危害降低的规律。比表面积 200 ~ 350 m<sup>2</sup>/kg 区间裂缝粗、长、贯通性强; 300 ~ 350 m<sup>2</sup>/kg 区间裂缝数量增多但仍较宽。400 ~ 450 m<sup>2</sup>/kg 后, 裂缝宽度显著

收窄, 多为细碎纹路, 无明显贯通大裂缝; 400 ~ 700 m<sup>2</sup>/kg 裂缝整体细、短而且分散。

低比表面积时收缩应力集中, 形成大裂缝; 高比表面积时应力分散、收缩平缓, 裂缝更细微。低比表面积时石膏粉强度低, 发展慢, 应力持续积累, 易形成大裂缝, 细颗粒水化反应更快, 早期强度发展迅速, 抵抗收缩应力, 抑制裂缝的扩展。同时比表面积越大, 保水能力越强, 水分蒸发更缓慢, 干缩过程更均匀, 避免因局部快速失水而收缩不均导致宽长裂缝。

### 3 结论

(1) 比表面积变化主要改变了磷石膏颗粒粒径分布即细颗粒占比, 从而影响了磷石膏粉各项性能。

(2) 比表面积变化对磷建筑石膏粉性能有较大影响。净浆 2 h 抗折和抗压强度都先增大后减小, 在 400 m<sup>2</sup>/kg 左右时达到最大, 凝结时间呈现先延长后缩短的趋势。

(3) 磷石膏粉比表面积逐渐增大, 自流平砂浆流动度损失和保水率都可以得到改善。24 h 抗压强度峰值在 500 m<sup>2</sup>/kg 附近, 400 ~ 700 m<sup>2</sup>/kg 时抗裂性显著改善。

(4) 磷石膏粉细度变化, 通过优化砂浆保水率、加速强度发展、整体微观结构致密, 一定程度改善了石膏基自流平的抗裂性能。

### [参考文献]

[1] 崔荣政, 王臣, 修学峰. 2023 年我国磷石膏综合利用情况及产业发展现状分析[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2024, 39(11): 1-6.  
CUI R Z, WANG C, XIU X F. Analysis of comprehensive utilization and industrial development status of phosphogypsum in China in 2023[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(11): 1-6.

[2] 孙世杰, 周贵云. 磷石膏制备β-半水建筑石膏技术研究[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(7): 18-19, 49.  
SUN S J, ZHOU G Y. Study on production technology of β-hemihydrate building gypsum made from phosphogypsum [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(7): 18-19, 49.

[3] 周伟, 荣喜才, 徐瑞, 等. 磷石膏制备β型建筑石膏及其应用[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(5): 8-10, 32.  
ZHOU W, RONG X C, XU R, et al. Preparation of β-type building gypsum from phosphogypsum and its application [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(5): 8-10, 32.

[4] 权刘权, 张菁燕, 李东旭, 等. 煅烧脱硫石膏细度对其性能的影响[J]. 非金属矿, 2016, 39(1): 21-23.  
QUAN L Q, ZHANG J Y, LI D X, et al. Effect of fineness on the

(下转第 83 页)

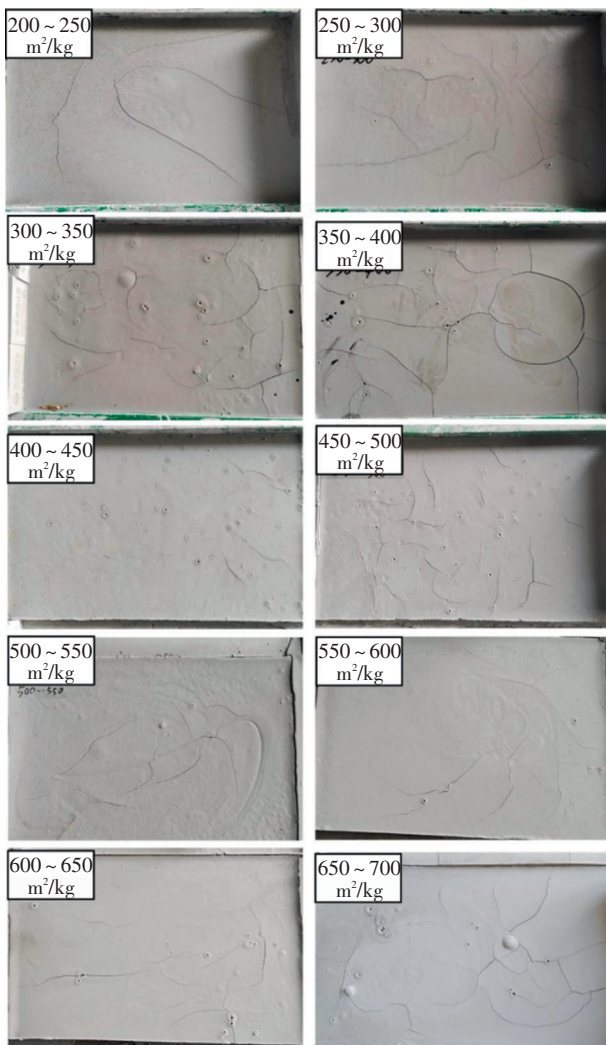


图9 不同比表面积石膏粉制自流平砂浆开裂情况

Fig. 9 Cracking situation of gypsum powder self-leveling mortar with different specific surface areas