

# 不同激发方式对再生微粉活性的影响研究\*

Study on the Effect of Different Excitation Methods on the Activity of Regenerated Micronized Powder

曾志勇<sup>1</sup>, 马书山<sup>2</sup>, 杨淑娟<sup>2</sup>, 张勇<sup>2</sup>, 杨飞<sup>3</sup>

- (1. 台州学院, 浙江 台州 318000;  
2. 浙江理工大学先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310018;  
3. 浙江宇博新材料有限公司, 浙江 台州 318000)

**摘要:** 为提高建筑垃圾再生微粉的利用率, 通过不同种类的激发剂以及机械研磨处理来激发再生微粉的活性, 制备水泥胶砂试体, 以抗压强度、28 d 活性指数以及微观结构为评价依据, 研究不同种类、不同掺量激发剂对再生微粉活性的激发效果。结果表明: 化学激发剂及机械球磨处理均可提高再生微粉的活性, 在 28 d 龄期时, 化学激发剂中 4%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 激发效果最好, 4%CaCl<sub>2</sub> 的激发效果最差, 机械球磨处理中, 90 min 为最佳处理时间。从微观角度观察到再生微粉经过激发剂和机械球磨处理之后, 其制成的胶砂试体结构变得更加平整和密实。

**关键词:** 再生微粉; 化学激发; 机械球磨; 活性指数

中图分类号: TU521.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 05-0043-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.007

ZENG Zhiyong<sup>1</sup>, MA Shushan<sup>2</sup>, YANG Shujuan<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>, YANG Fei<sup>3</sup>

- (1. Taizhou University, Taizhou 318000, China;  
2. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
3. Zhejiang Yubo New Material Co., Ltd., Taizhou 318000, China)

**Abstract:** In order to improve the utilization rate of recycled construction waste micronized powder, the activity of recycled micronized powder was stimulated by different kinds of excitants and mechanical grinding treatment, and cementitious sand specimens were prepared to study the stimulation effect of different kinds and dosing of excitants on the activity of recycled micronized powder based on compressive strength, 28 d activity index and microstructure. The results showed that both chemical exciter and mechanical ball milling treatment could improve the activity of regenerated micronized powder, and at the age of 28 d, 4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in chemical exciter had the best excitation effect and 4% CaCl<sub>2</sub> had the worst excitation effect, and 90 minutes in mechanical ball milling treatment was the best treatment time. From the microscopic point of view, it was observed that the structure of the colloidal specimens made of recycled micronized powder became more flat and dense after the treatment of exciter and mechanical ball milling.

**Keywords:** regenerated micronized powder; chemical excitation; mechanical ball milling; activity index

\* 基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2021C03160)。

作者简介: 曾志勇 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事先进水泥基材料的制备与性能研究、新型建材与环境材料的研发工作。

收稿日期: 2022-08-08

## 0 引言

近年来, 我国发展较快, 尤其在城市建设方

## 材料科学

面,但与此同时也产生了大量建筑垃圾。目前我国每年的建筑垃圾产生量已超过 30 亿吨,资源化利用率却不足 5%。除少量用于工程回填和再生利用外,大部分仍简单堆放处理,这无疑对环境产生了极大的负面影响<sup>[1-3]</sup>。

建筑垃圾中的砖、石、砂浆、混凝土等废料经破碎处理后制成再生骨料,可取代天然骨料生产混凝土及制品<sup>[4-5]</sup>,这对节约天然资源、降低骨料成本、减少环境污染有着积极作用。而在建筑垃圾制备再生骨料过程中,伴随产生或直接加工而成的粒径 $<0.15\text{ mm}$ 的颗粒,称为再生微粉<sup>[6]</sup>。再生微粉中含有一些具有潜在活性的组分  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,可以作为辅助胶凝材料代替部分水泥使用,发挥其火山灰活性和微集料填充效应,改善水泥基材料的性能<sup>[7]</sup>。

再生微粉活性激发方式主要有物理激发和化学激发,物理激发是通过机械力粉磨使再生微粉比表面积增大,晶型稳定的  $\alpha\text{-SiO}_2$  转变为无定形态的  $\text{SiO}_2$ ,使微粉活性增加;化学激发是通过加入一些化学试剂,提高再生微粉水硬化能力,生成具有较高强度和水硬性的凝胶体系而增加活性<sup>[8]</sup>。余小小等<sup>[9]</sup>通过机械粉磨来激发再生微粉的活性,结果表明粉磨活化的再生微粉活性较高,

在满足一般砌筑砂浆的强度标准下,掺量可达 55%。李炜等<sup>[10]</sup>、李述俊等<sup>[11]</sup>对比了不同细度的再生砖粉对砂浆强度的影响,发现通过球磨得到的细度较高的再生砖粉具有更强的活性。董自修<sup>[12]</sup>在再生微粉中单掺和复掺碱激发剂制备地聚物基再生材料,以再生材料的抗压强度为判断依据,得出不同激发剂的激发效果依次为:  $\text{NaOH} > \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{CO}_3$ 。王海进等<sup>[13]</sup>以  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  为化学激发剂激发再生微粉活性后代替部分水泥,两种激发剂均能有效激发再生微粉活性,提高水泥胶砂试体强度。

本文在前期研究的基础上,通过使用化学激发剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{CaCl}_2$  以及不同球磨时间的物理激发来提高再生微粉的活性,以再生微粉的胶砂强度、活性指数和微观结构作为考察指标,选择出一种较优的激发方式来提高再生微粉的活性,从而提高再生微粉的利用率。

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥:台州恒投工贸有限公司的 P·O 42.5,水泥的物理化学指标见表 1。

表 1 水泥物理化学指标  
Table 1 Physical and chemical indexes of cement

水泥种类	安定性	比表面积 / $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	三氧化硫质量 分数/%	掺合料质量 分数/%	烧矢量质量 分数/%	凝结时间/min		28 d 强度/MPa	
						初凝	终凝	抗折	抗压
P·O42.5	合格	375	2.42	9.8	2.56	175	235	7.6	49.5

再生微粉:由附近拆迁得到的废弃混凝土自加工成再生细骨料后筛选得到,其化学成分见表 2。

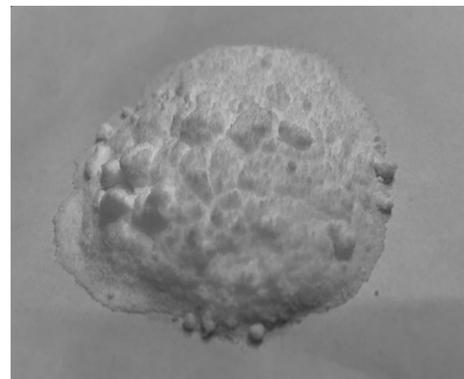
表 2 再生微粉的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of regenerated micropowder/%

化学成分	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	LOSS
百分含量	41.63	9.64	3.03	30.52	1.73	0.51	12.45

化学激发剂:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{CaCl}_2$ ,由图 1 所示,来自于上海的阿拉丁试剂有限公司,且均为分析纯。标准砂:中国 ISO 标准砂,每袋净含量  $(1350 \pm 5)\text{ g}$ 。

水:自来水。



(a)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

(b)  $\text{CaCl}_2$ (c)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 

(d) 再生微粉

图 1 再生微粉和不同激发剂实物图

Fig. 1 Physical map of regenerated micropowder and different activators

## 1.2 试验仪器

球磨机：型号为 XMQ350×160；

水泥胶砂搅拌机：型号为路事达 JJ-5；

水泥胶砂振实台：型号为 ZS-15，成型胶砂试体规格为 40 mm×40 mm×160 mm；

养护箱：BY-10B 型水泥恒温恒湿标准养护箱，HBY-64 型恒温水养护箱；

恒加载水泥抗折抗压试验机：型号为 YZH-300·10 型；

X 射线衍射仪：型号为 Hitachi 日立 S-4800。

## 2 试验设计

通过颚式破碎机将废弃混凝土破碎后，用 0.16 mm 的标准筛过滤得到再生微粉。试验分为四部分，第一部分为对照组 A，分别为未被激发的再生微粉组 A1（以 30% 的掺量取代水泥，下同）和不掺任何掺合料的纯水泥砂浆组 A2；第二部分为化学激发组 B，即在再生微粉中分别掺入 2%、3%、4%、5% 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，然后按 30% 的掺量取代水泥配制胶砂试件；第三部分为化学激发组 C，即在再生微粉中分别掺入 2%、3%、4%、5% 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，然后按 30% 的掺量取代水泥配制胶砂试件；第四部分为化学激发组 D，即在再生微粉中分别掺入 2%、3%、4%、5% 的  $\text{CaCl}_2$ ，然后按 30% 的掺量取代水泥配制胶砂试件；第五部分为机械激发组 E，即将再生微粉通过球磨机分别球磨 30 min、60 min、90 min 后，以 30% 的掺量取代水泥配制胶砂试件。具体试验配比见表 3。

表 3 试验配比设计方案

Table 3 Test proportioning design scheme

类别	水泥用量/g	再生微粉掺量/g	$\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$	$\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{g}$	$\text{CaCl}_2/\text{g}$	球磨时间/min	标准砂/g	水/g
A1	315	135	0	0	0	-	1350	225
A2	450	0	0	0	0	-	1350	225
B1	315	135	2.70	0	0	-	1350	225
B2	315	135	4.05	0	0	-	1350	225
B3	315	135	5.40	0	0	-	1350	225
B4	315	135	6.75	0	0	-	1350	225
C1	315	135	0	2.70	0	-	1350	225
C2	315	135	0	4.05	0	-	1350	225
C3	315	135	0	5.40	0	-	1350	225
C4	315	135	0	6.75	0	-	1350	225

## 材料科学

类别	水泥用量/g	再生微粉掺量/g	Ca(OH) <sub>2</sub> /g	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /g	CaCl <sub>2</sub> /g	球磨时间/min	标准砂/g	水/g
D1	315	135	0	0	2.70	-	1350	225
D2	315	135	0	0	4.05	-	1350	225
D3	315	135	0	0	5.40	-	1350	225
D4	315	135	0	0	6.75	-	1350	225
E1	315	135	0	0	0	30	1350	225
E2	315	135	0	0	0	60	1350	225
E3	315	135	0	0	0	90	1350	225

水泥胶砂试体的成型、养护按照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》进行,将制备好的胶砂试件放置于型号为 BY-10B 的标准恒温恒湿养护箱内养护至 3 d、7 d、28 d,并通过 YZH-300·10 型恒加载水泥抗折抗压试验机分别测试其抗压和抗折强度<sup>[14]</sup>。活性指数的测试则依据 GB/T1596-2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 抗压强度

5 组样品 3 d、7 d、28 d 的强度值和 28 d 活性

指数见表 4,从表中可以看出,加入化学激发剂后,再生微粉 3 d、7 d、28 d 强度值虽然没有纯水泥砂浆组 A2 高,但均高于未加激发剂 A1 组样品,说明本次使用的三种激发剂能有效提高再生微粉的活性。这主要是由于几种激发剂能促进水泥浆体碱度提高,在碱性环境下,硅酸盐和铝酸盐玻璃体网络中的 Si-O 和 Al-O 键发生断裂<sup>[11]</sup>,形成游离态的不饱和活性键,更容易与砂浆中的活性组分发生缩聚反应,形成具有一定强度和水硬性的水化硅酸钙凝胶和水化铝酸钙凝胶,从而提高胶砂试体的强度。

表 4 样品 3 d、7 d、28 d 的强度值和 28 d 活性指数  
Table 4 Intensity value and 28 d activity index of samples 3 d, 7 d and 28 d

组别	3 d 强度值/MPa		7 d 强度值/MPa		28 d 强度值/MPa		28 d 活性指数/%
	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度	
A1	3.6	16.7	4.4	22.4	4.7	28.9	57
A2	5.7	30.5	6.9	38.4	8.2	50.9	—
B1	4.0	18.7	4.9	24.5	5.8	31.0	61
B2	4.4	19.3	5.3	25.1	6.0	31.2	61
B3	4.1	18.9	4.4	24.6	6.0	31.0	61
B4	4.0	18.9	4.6	24.6	5.6	30.7	60
C1	4.0	19.5	4.8	25.3	6.0	31.7	62
C2	4.4	20.5	4.8	26.2	6.0	32.2	63
C3	4.3	20.8	5.1	26.8	6.3	33.3	65
C4	3.9	20.5	4.7	26.0	5.4	33.0	65
D1	3.7	17.3	4.8	24.4	5.3	30.7	60
D2	3.7	16.9	4.7	23.1	5.5	30.5	60
D3	3.4	16.2	4.5	22.7	5.3	29.3	58
D4	3.5	16.0	4.4	22.6	5.7	29.0	57
E1	3.9	19.3	4.7	25.0	5.6	31.3	61
E2	4.1	19.7	4.9	25.2	5.7	31.6	62
E3	4.3	21.5	4.9	26.4	6.1	32.0	63

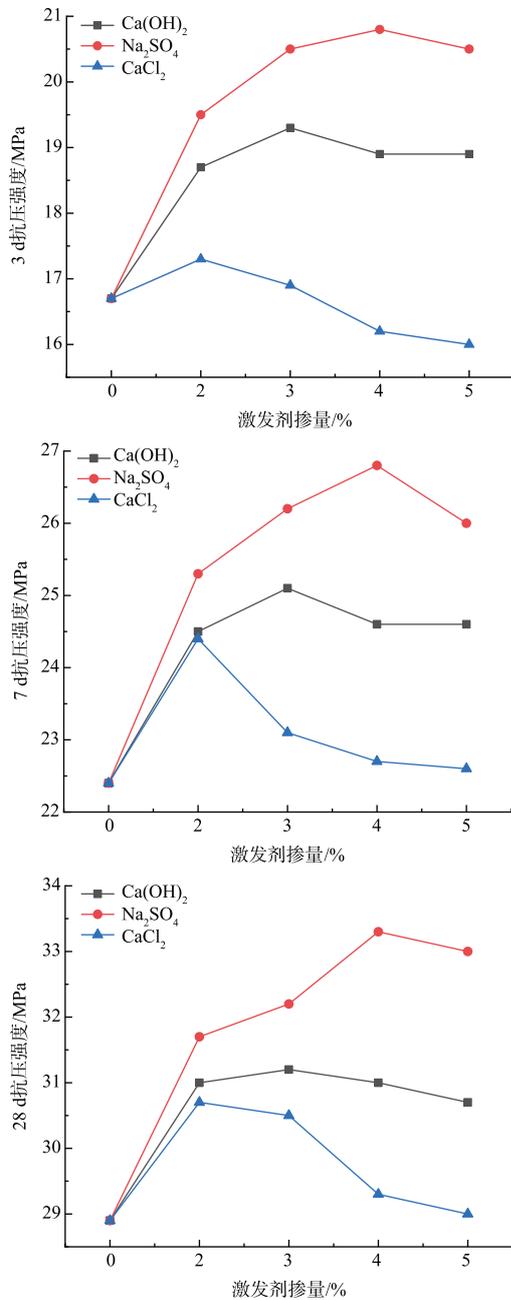


图2 不同种类、不同掺量激发剂对抗压强度激发效果对比折线图

Fig. 2 Comparison line chart of the excitation effect of different types and dosages of stimulants against compressive strength

图2为不同种类、不同掺量激发剂对3 d、7 d、28 d抗压强度激发效果对比图，从中可以看出，不同激发剂对再生微粉活性激发存在最佳掺量。

当加入激发剂Ca(OH)<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、CaCl<sub>2</sub>时，砂浆在不同龄期时的抗压强度都高于未经激发的再生微粉组，说明激发剂对再生微粉的活性能够

起到一定的激发作用。由图中可知，Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>在各龄期的激发效果要强于Ca(OH)<sub>2</sub>和CaCl<sub>2</sub>，且随着掺量的增加，各个龄期的抗压强度呈现先上升后下降的趋势，当掺量达到4%时，激发效果最为明显，分别使砂浆的3 d、7 d、28 d抗压强度提高了24.55%、19.64%、15.22%。

当加入Ca(OH)<sub>2</sub>激发剂时，各个龄期的抗压强度随着掺量的增加呈现先上升后下降的趋势，在3%时达到最佳掺量，胶砂试体3 d、7 d、28 d抗压强度值与不掺激发剂相比分别提高了15.57%、12.05%、7.96%。这是由于Ca(OH)<sub>2</sub>会与活性Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>发生反应，形成C-S-H和C-A-H凝胶，提高再生微粉胶砂试体的强度<sup>[15]</sup>。

随着CaCl<sub>2</sub>掺量的增加其激发效果呈现先上升后下降的趋势，掺量为2%时试件强度达到最大值，3 d、7 d、28 d龄期的抗压强度较未激发组分别增加3.59%、8.93%、6.23%，但激发效果明显要弱于Ca(OH)<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，虽然CaCl<sub>2</sub>能够提供Ca<sup>+</sup>来促进C-S-H凝胶的形成，但由于CaCl<sub>2</sub>不能够提供碱性环境，激发效果比较差<sup>[16]</sup>。

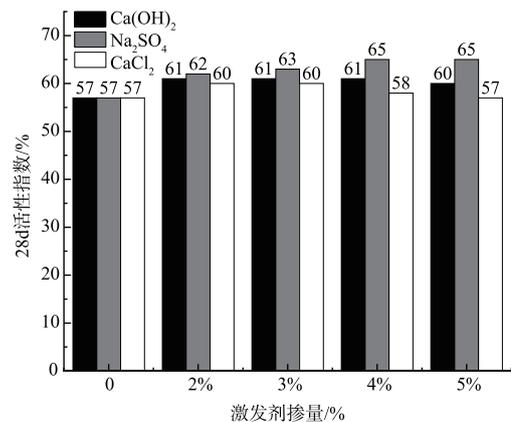


图3 28 d活性指数变化柱状图

Fig. 3 Histogram of 28 d activity index change

### 3.2 活性指数分析

28 d活性指数变化柱状图如图5所示，与不掺激发剂样品28 d活性指数57%相比，经三种激发剂激发之后，再生微粉28 d活性指数均有不同程度的提高，不同激发剂的激发效果依次为：Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>>Ca(OH)<sub>2</sub>>CaCl<sub>2</sub>。三种激发剂中Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>的活性激发效果最好，掺量为4%时，再生微粉

材料科学

28 d活性指数可达到 65%。

表 5 不同机械球磨时间的再生微粉 28 d 活性指数和 45 μm 筛余率表  
Table 5 28 d activity index and 45 μm sieve ratio of regenerated micropowder with different mechanical ball milling time

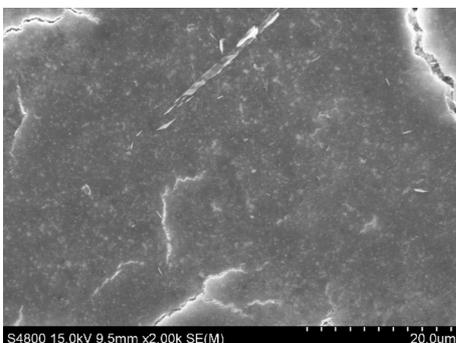
组别	A (对照组)	E1 (30 min)	E2 (60 min)	E3 (90 min)
45μm 筛余率/%	72	67	64	62
活性指数/%	57	61	62	63

不同机械球磨时间的再生微粉 28 d 活性指数如表 5 所示，与不掺激发剂样品 28 d 活性指数相比，经不同时间的机械球磨处理之后，再生微粉 28 d 活性指数均有不同程度的提高。随着球磨时间的增加，活性指数呈现上升的趋势，球磨 90 min 时活性指数达到最高 63%。再生微粉经过一段时间的研磨，其比表面积增大，反应面积相应增加，提高了整体的反应活性。后期反应活性增加缓慢，主要是因为随着研磨时间的增加，再生微粉开始出现团聚现象，导致细小颗粒粘结在一起，对水化反应产生不利影响，影响了再生微粉胶砂强度的提高。

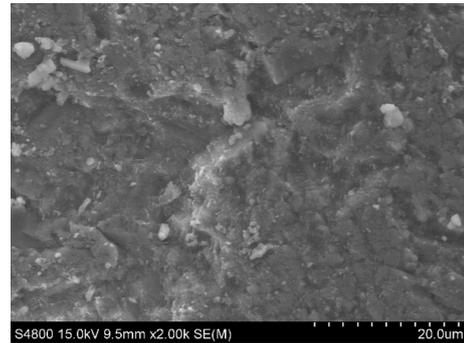
3.3 微观结构



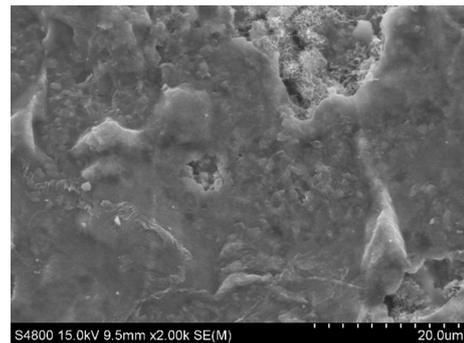
(a) 再生微粉 28 d 胶砂试件 SEM 图



(b) CaCl<sub>2</sub> 激发后 28 d 胶砂试件 SEM 图



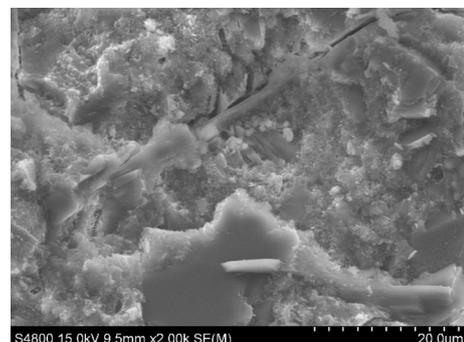
(c) Ca(OH)<sub>2</sub> 激发后 28 d 胶砂试件 SEM 图



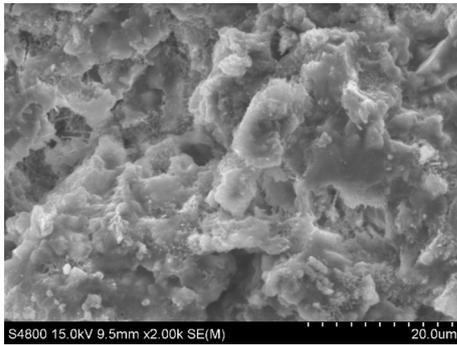
(d) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 激发后 28 d 胶砂试件 SEM 图

图 4 掺量为 3% 时各胶砂试件 28 d 龄期 SEM 图  
Fig. 4 SEM image of each mortar specimen at 28 d age when the content of mortar is 3%

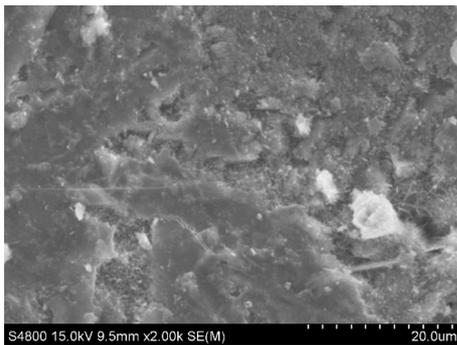
图 4 为未掺加激发剂和掺量为 3% 时不同激发剂下的再生微粉 28 d 胶砂试件 2000 倍 SEM 图。结果表明，未掺入激发剂前，再生微粉胶砂试件结构松散，且有较多裂缝，同时覆盖有参差不齐的水化产物。当掺入激发剂后，再生微粉胶砂试件形成了大量的凝胶产物，使结构变得更加平整密实。



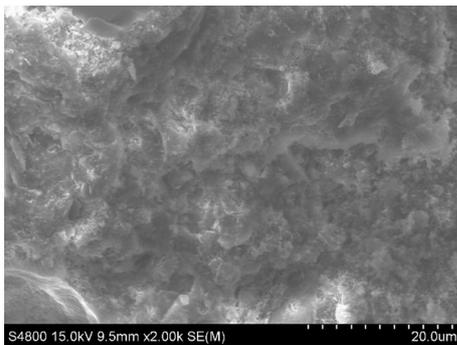
(a) 未球磨处理 28 d 胶砂试件 SEM 图



(b) 球磨 30 min 后 28 d 胶砂试件 SEM 图



(c) 球磨 60 min 后胶砂试件 SEM 图



(d) 球磨 90 min 后 28 d 胶砂 SEM 图

图 5 不同球磨时间的再生微粉胶砂试件 28 d 龄期 SEM 图  
Fig. 5 SEM images of regenerated fine powder mortar specimens at 28 d age with different ball milling time

图 5 为不同球磨时间下的再生微粉 28 d 胶砂试件 2000 倍 SEM 图，(a) 中未激发再生微粉胶砂试样结构最为疏松，孔隙较多。经过球磨后的 (b)、(c)、(d) 试样中孔隙逐渐减少，结构逐渐致密，(d) 中结构最为明显。由此可知球磨使得再生微粉的颗粒尺寸逐渐变小，同时能够更加充分填充结构缝隙，使结构更加密实。未球磨之前，(a) 中以水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为主，C-S-H 凝聚

水化产物较少，球磨之后，水化产物转变为了 C-S-H 凝胶为主，结构也变得更加平整、致密。

#### 4 结论

(1) 三种不同化学激发剂激发效果依次为： $\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{Ca}(\text{OH})_2 > \text{CaCl}_2$ ，经过激发剂激发之后，再生微粉不同龄期的水泥胶砂强度均有了不同程度的提高，且随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{CaCl}_2$  掺量的增加均呈现先上升后下降的趋势，当  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  掺量为 3% 时，再生微粉 28 d 抗压强度达到最大值 33.3 MPa，活性指数达到最大值 65%。

(2) 采用机械球磨后，再生微粉不同龄期的抗压强度均有提高，且随球磨时间的增加呈现上升的趋势，球磨时间为 90 min 时，再生微粉 28 d 抗压强度达到最高 32.0 MPa，活性指数达到最大值 63%。

(3) 根据各组试验结果分析得出， $\text{Na}_2\text{SO}_4$  激发效果与球磨 90 min 机械激发效果最优，实际工程中考虑到激发效果、能耗、经济与实际操作难度，可选用  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  激发剂作为更优的激发方式。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵时勇. 国内建筑垃圾再生资源化利用现状 [J]. 企业科技与发展, 2020, (5): 129-131.
- [2] 陈浩, 王洪黎, 熊宝成, 等. 从目前建筑垃圾资源化现状看我国建筑垃圾再生利用对策 [J]. 农村经济与科技, 2010, 21 (1): 130+116.
- [3] WANG J, ZHANG J, CAO D, et al. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117366.
- [4] SHAO J, GAO J, ZHAO Y, et al. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder inblended cement pastes [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 209-215.
- [5] 李述俊, 赵霄龙, 李秋义. 再生微粉流动性试验研究 [J]. 混凝土, 2020 (8): 84-87.
- [6] JG/T 573-2020, 混凝土和砂浆用再生微粉 [S].
- [7] 於林锋. 再生微粉在水泥中作用机理的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2017, 44 (7): 108-111.

(下转第 125 页)

悬空滑模刚性平台及斜梁式支撑平台, 采用贝雷架结合中心立柱钢桁架平台至少可提高施工效率 20%, 节约施工成本 200 余万元, 在实际工程应用中, 取得了良好的经济效益。

#### 参 考 文 献

- [1] 余监华. 新型筒仓锥壳仓顶施工组合式支撑体系研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [2] 郭呈周, 段锦茹, 庞瑞, 等. 装配式 RC 浅圆仓仓顶结构设计关键技术研究 [J]. 混凝土, 2020, (12): 111-117.
- [3] 郭庆华. 粮食仓储设施建设是实现粮食安全的重要保障 [J]. 粮食问题研究, 2022 (3): 43-46.
- [4] 马仁伟, 夏军武, 陈晓森, 等. 装配式钢桁架筒仓施工支撑平台力学参数优化设计 [J]. 工业建筑, 2018, 48 (7): 166-172.
- [5] 曾涛, 郭宇, 童胤淇. 辐射梁式桁架、格构柱组合平台在筒仓锥顶施工中的应用 [J]. 施工技术, 2017, 46 (S1): 554-557.
- [6] 谢艺. 大直径筒仓模架施工工艺 [J]. 施工技术, 2014, 43 (23): 36-39.
- [7] 赵少伟, 张冬, 郭蓉, 等. 滑模拖带技术在筒仓工程中的应用 [J]. 施工技术, 2013, 42 (22): 98-101.
- [8] 李勤山, 王铁成, 赵海龙. 超大直径筒仓仓顶现浇混凝土施工悬吊支撑桁架安全分析 [J]. 工业建筑, 2015, 45 (1): 143-147.
- [9] 王文星. 筒仓仓顶钢管桁架支撑体系研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] 李东阳. 筒仓新型桁架支撑平台研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [11] 孟文清, 赵鹏, 张亚鹏, 等. 新型筒仓刚性滑模平台模块化设计研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52 (8): 72-76.
- [12] 田旺. 筒仓模块化穹顶式滑模刚性平台设计与施工研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [13] 曹军, 吴赞. 采用贝雷架钢平台施工储煤仓仓顶结构技术 [J]. 煤炭工程, 2019, 51 (10): 54-57.
- [14] 辛酉阳, 李华. 大跨度梁高支撑模板脚手架专项施工方案设计与施工 [J]. 粉煤灰综合利用, 2014, 27 (6): 40-42.
- [8] J PêRA, HUSSON S, GUILHOT B. Influence of finely ground limestone on cement hydration [J]. Cement & Concrete Composites, 1999, 21 (2): 99-105.
- [9] 余小小, 李如燕, 董祥, 等. 机械力粉磨对再生微粉性能的影响 [J]. 人工晶体学报, 2017, 46 (4): 688-692.
- [10] 李炜, 孙南屏, 何健恒. 废砖粉水泥胶砂基本性能试验研究 [J]. 砖瓦, 2014 (2): 3-6.
- [11] 李述俊, 赵霄龙, 李秋义, 等. 再生微粉基本性能及活性试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (10): 3314-3319+3325.
- [12] 董自修. 碱激发制备废弃混凝土地聚物基再生材料 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [13] 王海进, 耿欧, 赵桂云. 再生微粉基本性能及胶砂强度的试验研究 [J]. 混凝土, 2015 (8): 74-77.
- [14] 康晓明, 李滢, 樊耀虎. 不同激发方式对再生微粉性能的影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1135-1139.
- [15] 王朝霞. 化学激发剂对再生微粉活性激发研究 [J]. 建材技术与应用, 2021 (2): 4-7.
- [16] 金彪, 徐卓越, 杨留栓, 等. 建筑垃圾的活性激发及制备蒸养砖 [J]. 环境工程, 2019, 37 (7): 190-193+129.

(上接第 49 页)