

文章编号:1671-6833(2022)06-0097-07

# 激发方式对再生砖微粉活性的影响与机理研究

元成方<sup>1</sup>, 陈阳<sup>1</sup>, 王世博<sup>2</sup>, 魏逸然<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南城建土木结构工程研究中心有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 废弃黏土砖经破碎、球磨后形成的再生微粉具有潜在活性, 通过活性激发可部分取代水泥制备混凝土, 以实现废弃资源再利用。研究分析了机械激发、化学激发和高温激发 3 种方式对再生微粉活性的激发效果, 利用 SEM 和 XRD 技术分析揭示了材料微观结构和作用机理。结果表明: 采用机械激发、化学激发和高温激发对再生微粉进行活性激发后, 材料的活性指数均有不同程度提高。其中, 球磨 45 min 机械激发和 800 °C 高温激发效果较好, 活性指数最高, 均达到了 71%, 化学激发方式下活性指数最高为 65%。综合考虑激发效果、能耗、经济性与实际操作的可行性, 建议选用球磨 45 min 作为再生砖微粉的最佳活性激发方式。

**关键词:** 再生砖微粉; 活性激发; 微观分析; 机理; 活性指数

**中图分类号:** TU528.1; X798

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.06.005

## 0 引言

随着我国城市化进程不断加快, 新建筑施工和既有建筑拆除过程中产生大量的建筑垃圾<sup>[1]</sup>。中国每年建筑垃圾产量已超过 35 亿吨, 其中拆除建筑垃圾有 15 亿吨, 建筑垃圾数量巨大, 种类繁多。对建筑垃圾采用传统粗放式堆放与填埋不仅大量占用土地, 同时带来粉尘、灰沙飞扬以及碱性废渣令土壤“失活”等一系列问题, 严重破坏生态环境, 影响社会经济生活<sup>[2-4]</sup>。烧结黏土砖含有大量  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 以及少量  $\text{CaO}$ , 利用废弃烧结黏土砖制备的再生微粉具有潜在的火山灰活性, 且活性随着水化龄期的增加而增强<sup>[5-8]</sup>。

为了更好地发挥再生微粉的潜在活性, 实现建筑垃圾资源化利用, 近年来研究人员对再生微粉进行了活性激发, 探究不同激发方式对再生微粉活性的影响。李炜等<sup>[9]</sup>、李述俊等<sup>[10]</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。张平等<sup>[11]</sup>通过机械球磨和化学激发剂双重激发方式, 研究了球磨时间、激发

剂用量对再生微粉活性的影响。李琴等<sup>[12]</sup>、刘栋等<sup>[13]</sup>研究了不同的激发剂, 在相同的条件下激发再生微粉的活性。康晓明等<sup>[14]</sup>、何健恒等<sup>[15]</sup>研究了化学激发或热处理等方式对再生微粉活性的激发效果。

从现有研究来看, 尽管机械细化、热处理和化学活化 3 种活化处理方法均有相关研究报道, 但是尚缺乏系统的比对性试验研究, 且上述方法的作用效果与机理也值得进一步探索。本文分别采用机械激发、化学激发和高温激发 3 种方式对再生微粉进行活性激发, 根据活性指数对激发效果进行评价, 采用 SEM 和 XRD 测试技术探明不同激发方式的作用机理, 在此基础上提出再生砖粉最优激发方式。

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

采用河南孟电集团水泥有限公司生产的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥, 主要技术指标见表 1。采用郑州市城中村拆迁所得废弃黏土砖, 主要矿物组成为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  以及少量的游离  $\text{CaO}$ , 其化学成分见表 2。用废弃砖制备再生砖

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178258); 河南省重点研发与推广专项项目(202102310255)

作者简介: 元成方(1983—), 男, 河南郑州人, 郑州大学高级工程师, 博士, 主要研究方向为高性能水泥基复合材料, E-mail: chengfang1102@126.com。

表 1 水泥主要技术指标

Table 1 The main technical index of cement

| 水泥种类    | 安定性 | 比表面积/<br>( $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | $w$ (三氧化<br>硫)/% | $w$ (掺合<br>料)/% | $w$ (烧失<br>量)/% | 凝结时间/min |     | 28 d 强度/MPa |      |
|---------|-----|--|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----|-------------|------|
|         |     |  |                  |                 |                 | 初凝       | 终凝  | 抗折          | 抗压   |
| P·O42.5 | 合格  | 355  | 2.53             | 10.5            | 2.73            | 180      | 270 | 7.4         | 48.5 |

表 2 再生砖粉的主要成分

Table 2 The main components of recycled  
brick powder

| $w(\text{SiO}_2)$ | $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ | $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ | $w(\text{CaO})$ | $w(\text{MgO})$ | $w(\text{Na}_2\text{O})$ |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| 67.83             | 16.20                      | 7.55                       | 1.67            | 0.94            | 0.65                     |

粉,先将废砖用颚式破碎机破碎,然后筛分得到粒径小于 0.16 mm 的再生砖粉;试验所用砂为厦门艾思欧标准砂有限公司生产的标准砂;试验用水为符合国家标准普通自来水的。

1.2 试验设计

分别采用机械激发、化学激发和高温激发 3 种激发方式,依据《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)对激发后的再生微粉进行活性测试,以活性指数为评价指标,试验设计如表 3 所示。

表 3 中,A 组为不掺再生微粉的纯水泥胶砂组;B 组为将未激发的再生微粉以 30%(质量分数,下同)的掺量取代水泥制备的胶砂组;C 组为机械激发组,用 SM500×500 型球磨机对再生微粉

进行球磨,球磨时间分别为 15、30、45、60 min,然后以 30%的掺量取代水泥制备胶砂试件,用比表面积表征球磨后的再生微粉细度。球磨前称量砖粉(粒径≤7 mm),然后把称量好的砖粉倒入球磨机内进行研磨,速率为 48 转/min,达到研磨时间后停止,静待 5 min,待粉体基本沉降后取出;D、E 组为化学激发组,在再生微粉中分别加入再生微粉质量分数 2.5%~4.5%的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  或 3.5%~5.5%的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,然后以 30%的掺量取代水泥制备胶砂试件;F 组为高温激发组,考虑到能耗问题,高温激发组最高温度设置为 800℃,将再生微粉放入 SRJX-4-13 型箱式电阻炉中分别加热至 200~800℃并保持 2 h,自然冷却后取出。

1.3 试验方法

每组各制作 3 个 40 mm×40 mm×160 mm 的试块,共 20 组 60 块。试块成型方法参照规范《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999)。放入标准养护箱 24 h 后脱模,脱模后放入标准养护箱养护至 28 d 龄期。

表 3 不同激发方式下再生砖微粉活性试验配合比

Table 3 Mixing ratio of recycled brick micropowder activity test in different excitation methods

| 组别 | 粉磨时间/min | 温度/℃ | 质量/g                |   |      |     |       |     |
|----|----------|------|---------------------|---|------|-----|-------|-----|
|    |          |      | Ca(OH) <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O | 再生微粉 | 水泥  | 标准砂   | 水   |
| A  |          |      |                     |   |      | 450 | 1 350 | 225 |
| B  |          |      |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| C1 | 15       |      |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| C2 | 30       |      |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| C3 | 45       |      |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| C4 | 60       |      |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| D1 |          |      | 3. 375              |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| D2 |          |      | 4. 050              |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| D3 |          |      | 4. 725              |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| D4 |          |      | 5. 400              |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| D5 |          |      | 6. 075              |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| E1 |          |      |                     | 4. 725  | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| E2 |          |      |                     | 5. 400  | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| E3 |          |      |                     | 6. 075  | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| E4 |          |      |                     | 6. 750  | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| E5 |          |      |                     | 7. 425  | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| F1 |          | 200  |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| F2 |          | 400  |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| F3 |          | 600  |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |
| F4 |          | 800  |                     |   | 135  | 315 | 1 350 | 225 |

材料活性指数计算方法参照《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)。试件抗压、抗折强度试验按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999)进行。试验设备采用 YAW-300C 型水泥抗折抗压一体试验机。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 机械激发对再生微粉活性的影响

机械球磨后再生微粉的活性指数试验结果如表 4 所示。由表 4 可知,再生微粉 30% 掺量取代水泥的胶砂组(B、C1、C2、C3、C4 组),其活性指数均较 A 组大幅下降,再生微粉的活性低于水泥。随着球磨时间的延长,再生微粉的活性指数不断提高,C1、C2、C3、C4 组活性指数分别较 B 组提高了 13.6%、18.6%、20.3% 和 20.3%,球磨有效激发了再生微粉的活性。当球磨时间为 45 min 时,再生微粉活性指数达到 C 组最大值,胶砂试件 28 d 抗折强度也达到最大值为 6.2 MPa,达到 A 组的 92.5%。随后活性指数随球磨时间的延长不再增大,球磨 60 min 时的再生微粉活性指数与 45 min 基本持平。

表 4 球磨对再生微粉活性指数的影响

| Table 4 The influence of ball milling on the activity index of regenerated micropowder |          |   |                   |                   |            |
|--|----------|---|-------------------|-------------------|------------|
| 组别   | 球磨时间/min | 比表面积/<br>( m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 28 d 抗折<br>强度/MPa | 28 d 抗压<br>强度/MPa | 活性指<br>数/% |
| A  |          | 355   | 6.7               | 43.4              | 100        |
| B  | 0        | 262   | 4.6               | 25.4              | 59         |
| C1   | 15       | 290   | 5.2               | 29.1              | 67         |
| C2   | 30       | 308   | 5.6               | 30.3              | 70         |
| C3   | 45       | 326   | 6.2               | 31.0              | 71         |
| C4   | 60       | 334   | 6.0               | 30.9              | 71         |

在本试验研究条件下再生砖微粉的最佳球磨时间为 45 min。分析原因,一方面,随着球磨时间的延长,再生砖粉的粒径不断减小,当再生砖粉的粒径小于胶砂试件中的气孔直径时,能够对孔隙进行物理填充,使材料微观结构更加密实,从而提高了胶砂试件的强度。当球磨达到一定时间后,再生砖粉的粒径基本不再变化,对孔隙的填充作用无法进一步加强。另一方面,球磨时间较短时,再生砖粉比表面积较小,再生微粉与水泥水化产物接触面积也较小。再生微粉经过活性激发后会存在一定数量的活性二氧化硅、活性氧化铝等活性组分,这些活性组分与水泥水化产物氢氧化钙会发生火山灰反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙或水化硫铝酸钙等反应产物,化学表达式为  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}$ 。当再生微粉与水泥水化产物接触面积较小时,火山灰反应会相对较弱,生成的 C—S—H、 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  和钙矾石较少,大部分的再生微粉只起到了物理填充的作用,对胶砂试件的强度提升作用有限,故活性指数较低。随着球磨时间的延长,再生微粉的粒径减小,比表面积增大,与水泥水化产物接触面积增大,火山灰反应程度提高,生成更多 C—S—H、 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  和钙矾石,对胶砂试件的强度提升较为明显。但随着球磨时间的延长,再生微粉的粒径减小,比表面积增大,吸水性也会逐渐增强,导致胶砂拌合物的流动性降低。流动性降低较少时对胶砂试件强度的影响不明显,当流动度降低较多时会导致胶砂试件结构不密实,使强度降低。因此,在多个因素的综合影响下,活性指数随球磨时间的延长而提高,最后保持不变。

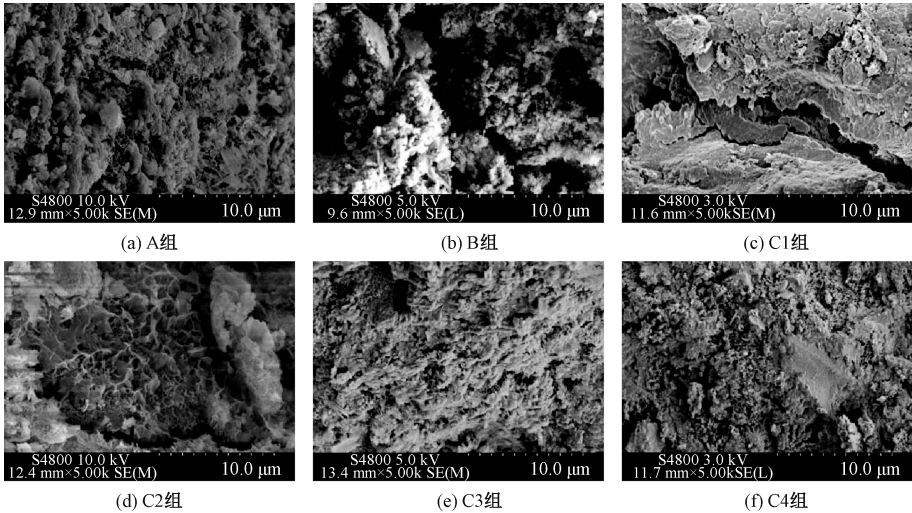


图 1 胶砂试样微观形貌

Figure 1 Microstructure of mortar sample

各组胶砂试样的微观形貌如图 1 所示。由图 1 可知,A 组试样结构最为致密,B 组试样中存在较多孔洞,结构较疏松;经过球磨后的 C1、C2 组试样中孔洞较少,结构致密;C3、C4 组试样的结构更加致密。可知球磨使再生微粉的颗粒尺寸变小,充分地填充结构孔隙,使结构更加密实。水化产物以  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体及 C—S—H 凝胶为主, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体呈片层状分布,C—S—H 凝胶呈网状分布,与 A 组相比,掺入再生微粉的胶砂试样中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体明显减少。经球磨后,再生微粉中硅氧四面体的聚合度不断减小,转变成单体,可与水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生反应,进一步生成 C—S—H 凝胶。

各组胶砂试样的 XRD 测试结果如图 2 所示。由图 2 可知,试样主要由  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  和 C—S—H 4 种物质组成,只在 B 组中发现

$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  晶体的衍射峰,可能是由于 B 组再生微粉未经球磨,含有部分水泥砂浆, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  晶体可能是二次水化产物。比较各组再生微粉胶砂试样的测试结果不难发现,球磨时间不同时,胶砂试样的衍射图谱区别不大,所含晶体无明显的差异。C3、C4 组衍射结果十分接近。B、C1、C2、C3、C4 组的衍射图中都有很明显的  $\text{SiO}_2$  衍射峰,其中 B 组  $\text{SiO}_2$  衍射峰最强,C1 组次之,A 组最弱。A 组中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  衍射峰最强,B 组次之,C3 组最弱。这是因为,A 组中未掺加再生微粉,而球磨组胶砂试样中的  $\text{SiO}_2$  主要来自骨料中的砂和再生微粉, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  主要源于水泥水化。这表明经过机械球磨激发后,部分再生微粉中的  $\text{SiO}_2$  被活化,与水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生了火山灰反应,生成了 C—S—H。

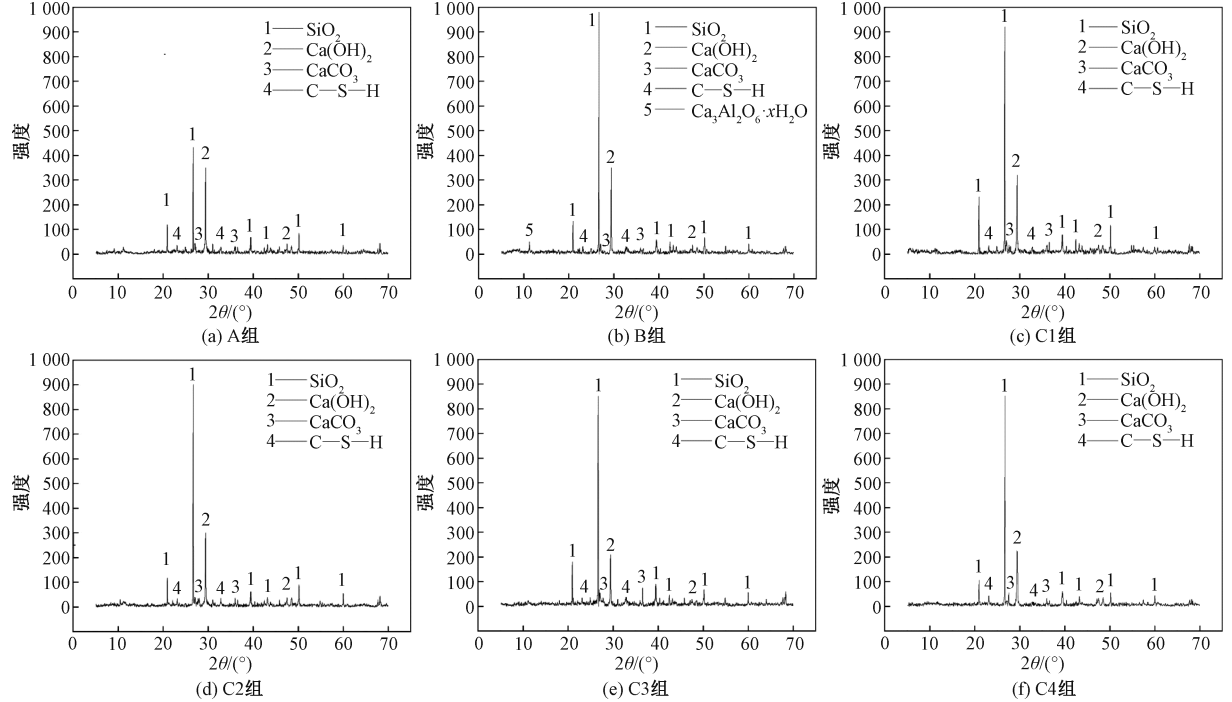


图 2 胶砂试样 XRD 衍射图谱

Figure 2 XRD diffraction pattern of mortar sample

2.2 化学激发剂对再生微粉活性的影响

化学激发后再生微粉的活性指数试验结果如表 5 所示。由表 5 可知,再生微粉 30% 掺量取代水泥后,材料活性指数(52%~65%)均比 A 组大幅下降,说明再生微粉的活性低于水泥。加入适量  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  或  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  激发剂后,再生微粉的活性指数均有提高,D1~D5 组活性指数分别较 B 组提高了 6.8%、10.2%、5.1%、3.4% 和 3.4%,E1~E3 组活性指数分别较 B 组提高了 3.4%、8.5% 和 1.7%,说明激发剂有效激发了再

生微粉的活性。然而,E4 和 E5 组活性指数分别较 B 组下降了 5.1% 和 11.9%,说明加入过量的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  会导致再生微粉活性下降。当  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量为 3.0% 时,再生微粉活性指数达到 D 组最大值,胶砂试件 28 d 抗折强度达到 8.1 MPa,相比 A 组与 B 组分别提高了 20.9%、76.1%。随再生微粉的活性指数随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量的增加而减小。 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  掺量为 4.0% 时,再生微粉活性指数达到 E 组最大值,此时,胶砂试件 28 d 抗折强度达到 8.3 MPa,相比 A 组与



B 组分别提高了 23.9%、80.4%。随后再生微粉的活性指数随  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  掺量的增加而减小。本文试验条件下再生微粉的最佳化学激发剂及掺量为 3.0% 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。

表 5 化学激发剂对再生微粉活性指数的影响

Table 5 The influence of chemical activator on the activity index of regenerated micropowder

| 组别 | 激发剂   | 激发剂掺量/% | 28 d 抗折强度/MPa | 28 d 抗压强度/MPa | 活性指数/% |
|----|---|---------|---------------|---------------|--------|
| A  |   |         | 6.7           | 43.4          | 100    |
| B  |   |         | 4.6           | 25.4          | 59     |
| D1 | $\text{Ca}(\text{OH})_2$                            | 2.5     | 6.0           | 27.4          | 63     |
| D2 | $\text{Ca}(\text{OH})_2$                            | 3.0     | 8.1           | 28.1          | 65     |
| D3 | $\text{Ca}(\text{OH})_2$                            | 3.5     | 7.7           | 26.9          | 62     |
| D4 | $\text{Ca}(\text{OH})_2$                            | 4.0     | 6.3           | 26.6          | 61     |
| D5 | $\text{Ca}(\text{OH})_2$                            | 4.5     | 5.4           | 26.5          | 61     |
| E1 | $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | 3.5     | 5.5           | 26.3          | 61     |
| E2 | $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | 4.0     | 8.3           | 27.9          | 64     |
| E3 | $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | 4.5     | 7.0           | 25.8          | 60     |
| E4 | $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | 5.0     | 6.8           | 24.3          | 56     |
| E5 | $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | 5.5     | 5.0           | 22.6          | 52     |

分析原因,加入碱性激发剂能够提高材料的液相碱度,使液相 pH 值保持在适宜的范围内。液相碱度的提高会促使再生微粉表面  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的化学键断裂,更容易与活性成分发生反应,例如水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生火山灰反应,提高 C—S—H、 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  和钙矾石等水化产物的生成量,最终提高胶凝材料的早期水化反应速率,达到激发再生微粉活性的目的。虽然  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  化学键的断裂程度和碱度直接相关,但过量的强碱可能会导致骨料中的活性成分(如  $\text{SiO}_2$ )发生化学反应,并在骨料表面生成碱-硅酸凝胶,即碱-骨料反应。吸水后的碱-硅酸凝胶体积远大于反应前固体体积,大量碱-硅酸凝胶在骨料界面区积聚、膨胀,导致胶砂试样内部不均匀膨胀,内部结构密实性下降,影响胶砂试件的强度。因此,在使用碱激发时应当控制激发剂的用量。采用  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  作为激发剂时, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  在材料体系中充当了骨架网络,再生微粉水化生成的 C—S—H 和  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  等凝胶在  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  构建的骨架网络中起到镶嵌和填充作用,微观上使得材料体系在结构上更加密实,宏观上表现为胶砂试件强度得到提高。但是过量的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  在材料体系中充当骨架网络,可能会减小再生微粉与水泥熟料的接触面积,影响两者之间的火山灰反应,就会减少 C—S—H,

$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  和钙矾石等水化产物的生成量,间接影响了水化反应速率,最终导致胶砂强度降低。

D2、E2 试样的微观形貌如图 3 所示。由图 3 可知,B 组、D2 组和 E2 组均有钙矾石(柱状晶体)生成,B 组试验中存在大量孔洞,结构疏松。经过化学激发剂激发后的 E2 组试样中孔洞较少,微观结构较 B 组更为致密。D2 组试样微观结构相较 E2 组更加致密,说明 D2 组再生微粉的活性激发效果在化学激发组中的效果最好。

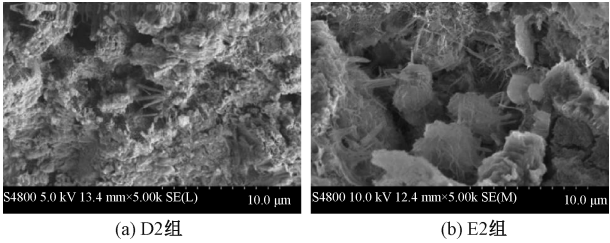


图 3 D2、E2 组 SEM 图

Figure 3 SEM image of group D2 and E2

D2、E2 组试样的 XRD 衍射谱图如图 4 所示。由图 4 可知,试样主要由  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  和 C—S—H 四种物质组成。结合图 2(b)可知,D2 组中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的衍射峰最强,B 组次之,E2 组最弱。B 组中  $\text{SiO}_2$  衍射峰最强,D2 组与 E2 组中  $\text{SiO}_2$  衍射峰几乎相同。这是因为 D2 组胶砂试

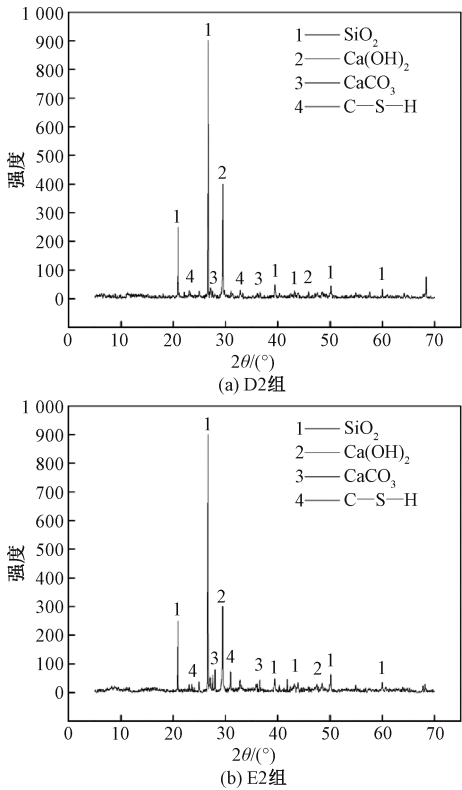


图 4 D2、E2 组 XRD 衍射谱图

Figure 4 XRD diffraction pattern of group D2 and E2

件从外部掺入了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 其余组试件中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  主要源于水泥水化,  $\text{SiO}_2$  主要来自骨料中的砂和再生砖微粉。说明经过化学激发后, 部分再生微粉中的  $\text{SiO}_2$  被活化, 与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生了火山灰反应, 生成了  $\text{C—S—H}$ 。

2.3 高温对再生微粉活性的影响

高温激发后再生微粉的活性指数试验结果如表 6 所示。由表 6 可知, 再生微粉 30% 取代水泥的胶砂组(B、F1、F2 组) 活性指数较 A 组大幅下降, 分别为 A 组活性指数的 59%、62% 和 65%。随着温度的升高, 再生微粉的活性指数提高, F3、F4 组活性指数分别较 B 组提高了 13.6%、20.3%。当高温为 800 ℃ 时, 再生微粉活性指数达到最大值, 胶砂试件 28 d 抗折强度达到 7.7 MPa, 分别较 A 组、B 组提高了 14.9%、67.4%。因此, 本文试验条件下再生微粉的最佳高温激发温度为 800 ℃。这是因为高温能使再生微粉中原有的水化产物发生分解, “还原” 为活性较高的原始材料, 特别是当温度达到 800 ℃ 时, 不稳定状态的水化产物彻底分解。有研究<sup>[14]</sup>指出, 高温还使再生微粉中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等氧化物含量增大, 而这些也正是水泥的主要成分。

表 6 高温对再生微粉活性指数的影响

| Table 6 The effect of high temperature on the activity index of regenerated micropowder |      |               |               |        |
|---|------|---------------|---------------|--------|
| 组别  | 温度/℃ | 28 d 抗折强度/MPa | 28 d 抗压强度/MPa | 活性指数/% |
| A   |      | 6.7           | 43.4          | 100    |
| B   |      | 4.6           | 25.4          | 59     |
| F1  | 200  | 5.1           | 26.7          | 62     |
| F2  | 400  | 5.9           | 28.0          | 65     |
| F3  | 600  | 6.6           | 30.0          | 67     |
| F4  | 800  | 7.7           | 30.7          | 71     |

F1、F2 组试样的微观形貌如图 5 所示。由图 5 可知, 经过高温激发, 胶砂试件内部有少量的孔洞和微裂缝, 但在孔洞中存在交错的网状与针棒状水化产物, 其微观结构较为致密。高温激发能使再生微粉中的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等活性组分的化学键位发生断裂, 使一部分原本不参与水化的再生微粉发生反应并生成大量网状  $\text{C—S—H}$  凝胶, 且随着高温温度的提高, 再生微粉中的活性组分被进一步激发, 也生成了更多的  $\text{C—S—H}$  凝胶。高温后再生微粉中原有的水化产物分解, 然而新生成的水化产物有效填补了孔洞与微裂缝, 使得胶砂试样的微观结构变得致密, 提高了胶砂试件

的抗压强度。

F1、F2 组试样的 XRD 衍射谱图如图 6 所示。由图 6 可知, 材料主要由  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  和  $\text{C—S—H}$  4 种物质组成。结合图 2(b) 中 B 组 XRD 衍射谱图, 可以看出, B 组中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{SiO}_2$  的衍射峰最强, F1 组次之, F2 组最弱。而在高温胶砂试件中,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  主要源于水泥水化,  $\text{SiO}_2$  主要来自骨料中的砂和再生砖微粉。说明经过高温激发后, 部分再生微粉中的  $\text{SiO}_2$  被活化, 与水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生了火山灰反应, 生成了  $\text{C—S—H}$ 。图 6(b) 中的  $\text{C—S—H}$  峰值高于图 6(a) 也印证了这一点。

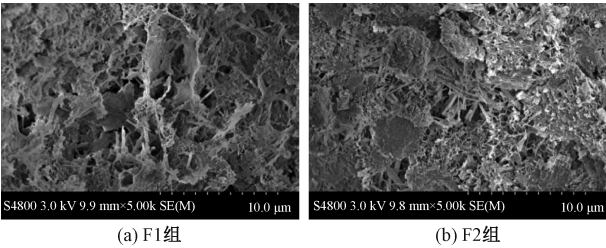


图 5 F1、F2 组 SEM 图片

Figure 5 SEM image of group F1 and F2

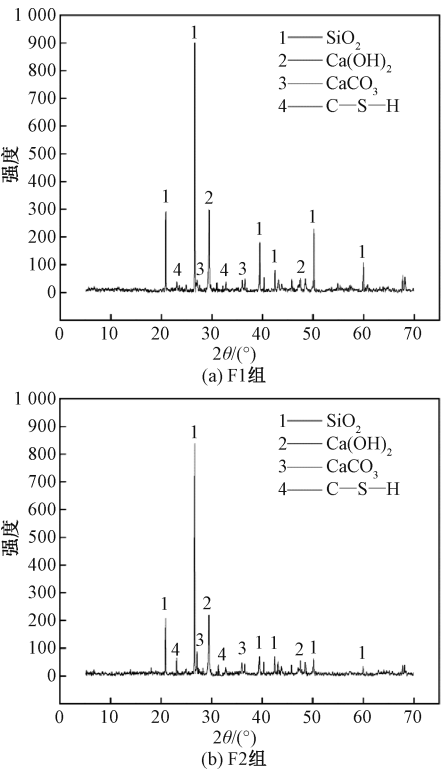


图 6 F1、F2 组 XRD 衍射谱图

Figure 6 XRD diffraction pattern of group F1 and F2

3 结论

(1) 采用机械激发后, 再生砖微粉活性指数随球磨时间的增加呈现先上升后持平的趋势。球

磨时间 45 min 时,再生砖微粉活性指数达到该组最大值 71%。

(2)采用化学激发后,再生砖微粉活性指数随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  掺量的增加均呈现先上升后下降的趋势,均小于纯水泥胶砂组(A组)。当  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量为 3.0% 时,再生砖微粉活性指数达到该组最大值 65%。

(3)采用高温激发后,再生砖微粉活性指数随高温温度的增加呈现上升的趋势。高温温度为 800 ℃ 时,再生砖微粉活性指数达到该组最大值 71%。

(4)根据各组试验结果分析得出,800 ℃ 高温激发效果与球磨 45 min 机械激发效果最优,工程中考虑到激发效果、能耗、经济与实际操作难度,可优先选用球磨 45 min 激发方式。

## 参考文献:

- [1] 元成方,魏逸然,李爽. 聚丙烯纤维混合再生骨料混凝土力学性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(2): 49-53.  
YUAN C F, WEI Y R, LI S. Study on mechanical properties of polypropylene fiber mixed recycled aggregate concrete [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2021, 42(2): 49-53.
- [2] 高嵩,郭远新,吴本清,等. 再生细骨料品质的分形学特征研究[J]. 混凝土, 2019(6): 78-83.  
GAO S, GUO Y X, WU B Q, et al. Research on fractal characteristic of recycled fine aggregate [J]. Concrete, 2019(6): 78-83.
- [3] YAN K Z, LI G K, YOU L Y, et al. Performance assessments of open-graded cement stabilized macadam containing recycled aggregate [J]. Construction and building materials, 2020, 233: 117326.
- [4] WANG J G, ZHANG J X, CAO D D, et al. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete [J]. Construction and building materials, 2020, 234: 117366.
- [5] 张璐,李海洲,任蛟龙. 100%再生黏土砖骨料混凝土抗压强度的试验研究[J]. 混凝土, 2020(11): 79-82, 88.  
ZHANG L, LI H Z, REN J L. Experimental study on compressive strength of the concrete with 100% recycled clay brick aggregates [J]. Concrete, 2020(11): 79-82, 88.
- [6] SHAO J H, GAO J M, ZHAO Y S, et al. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes [J]. Construction and building materials, 2019, 213: 209-215.
- [7] LIN K L, CHEN B Y, CHIOU C S, et al. Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement [J]. Waste management & research: the journal for a sustainable circular economy, 2010, 28(7): 647-652.
- [8] KARTINI, ROHAIDAH, ZURAINI, et al. Performance of ground clay bricks as partial cement replacement in grade 30 concrete [J]. International journal of environmental monitoring and analysis, 2012, 6: 569-572.
- [9] 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.  
LI W, SUN N P, HE J H. Experimental study on the basic properties of cement mortar added some recycled brick powder [J]. Block-brick-tile, 2014(2): 3-6.
- [10] 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.  
LI S J, ZHAO X L, LI Q Y, et al. Experimental study on basic properties and activity of recycled fine powder [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(10): 3314-3319, 3325.
- [11] 张平,古龙龙,王琴,等. 激发再生微粉活性的方法研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(2): 90-93.  
ZHANG P, GU L L, WANG Q, et al. Study on the method of stimulating the activity of regenerated micro powder [J]. Bulletin of the chinese ceramic society, 2019(2): 90-93.
- [12] 李琴,张春红,孙可伟. 不同激发剂激发建筑垃圾再生微粉活性研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7): 2187-2192, 2197.  
LI Q, ZHANG C H, SUN K W. Preliminary study on micronized active regeneration experiment with different activator excitation construction waste [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(7): 2187-2192, 2197.
- [13] 刘栋,张鹏宇,刘彤,等. 建筑垃圾中再生微粉材性表征及潜在活性的激发[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2635-2641.  
LIU D, ZHANG P Y, LIU T, et al. Material properties characterization and the excitation of potential activity on construction waste recycled powder [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(8): 2635-2641.
- [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.  
KANG X M, LI Y, FAN Y H. Effect of different excitation methods on the properties of recycled concrete powder [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(4): 1135-1139.
- [15] 何健恒. 废弃混凝土中砂浆组分的性能及利用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.  
HE J H. Study on the properties of the mortar components and use in waste concrete [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.

Research on Restoring Force Modeling of Concrete-filled Steel Tubular  
Special-shaped Column-steel Beam Nodes

ZHAO Yi<sup>1</sup>, DUAN Songfu<sup>1</sup>, NIU Zhonghao<sup>1,2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China; 2. Department of Civil & Environmental Engineering, Brunel University London, London UB8 3PH, the United Kingdom)

**Abstract:** In order to achieve the seismic performance and overall aesthetic feature of special-shaped concrete-filled steel tubular column joints, a new side plate connecting T-shaped steel tubular special-shaped column-steel beam node was proposed. The experimental study of seven T-shaped concrete-filled steel tubular column-steel beam joints with side plates under low cyclic loading was carried out. The influencing factors such as the presence or absence of side plates, the length of side plates, the presence or absence of restrained tie rods, and the axial compression ratio were examined. The failure process of the node was observed, the hysteresis curve and skeleton curve of specimens were recorded. The experimental results showed that the failure modes of specimens were divided into beam hinge failure with side plates connection specimens and column hinge failure without side plates connection specimens. The hysteretic curve of the new type of concrete-filled steel tubular column and steel beam joints connected by side plates were full and the seismic performance was well. Based on experimental results, the limit load and its corresponding displacement for dimensionless processing was used to obtain the three fold skeleton curve model, all the specimens' stiffness degradation law and hysteresis curve paths were analyzed, and the restoring force model of the new T-shaped concrete-filled steel tubular column-steel beam joint was established, contrast experimental results verified the correctness of the proposed restoring force model. The finding of this study a foundation for the in-depth study of the seismic performance of such joints.

**Keywords:** special-shaped; concrete-filled steel tubular (CFST); node; hysteresis curve; restoring force model

(上接第 103 页)

Study on the Effect and Mechanism of Excitation Modes on the  
Activity of Recycled Brick Micropowder

YUAN Chengfang<sup>1</sup>, CHEN Yang<sup>1</sup>, WANG Shibo<sup>2</sup>, WEI Yiran<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Urban Construction Civil Structure Engineering Research Center Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The recycled micropowder formed by crushing and ball milling waste clay bricks has potential activity. It can partially replace cement to prepare concrete through activation excitation, so as to realize the reuse of waste resources. This study explored the excitation effect of mechanical excitation, chemical excitation and high temperature excitation on the activity of recycled brick micropowder, and SEM and XRD technology analysis were used to reveal the material microstructure and mechanism of action. The results showed that after using mechanical excitation, chemical excitation, and high temperature excitation to activate the regenerated micropowder, the activity index of the material was improved to varying degrees, and there was a good correlation between different excitation methods and the activity index. Among them, the 45 min mechanical excitation of ball milling and the high temperature excitation of 800 °C had better effects, with the highest activity index reaching 71%, and the highest activity index in the chemical excitation mode was 65%. Considering the excitation effect, energy consumption, economy and practical operation feasibility, it is recommended to use ball milling for 45 min as the best activation method for recycled brick micropowder.

**Keywords:** recycled brick micropowder; activation excitation; microanalysis; mechanism; activity index