

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.018

废弃混凝土再生微粉物理化学联合活化研究

熊科兴^{1,2,3,4}, 詹炳根^{1,2,3,4}, 王存^{1,2,3,4},
卞朋飞^{1,2,3,4}, 周耀宗^{1,2,3,4}, 余其俊^{1,2,3,4}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 水泥基材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009;
3. 安徽省水泥基材料低碳技术工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 4. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对再生微粉活性低、不能高效利用的问题,在物理研磨和化学激发2种单一活化方式的研究基础上,文章探究物理化学联合活化方式对再生微粉活性的影响效果。结果表明,物理化学联合活化活性指数可提升14.7%,较单一活化方式活性提升效果显著,再生微粉经过机械研磨后,结构表面缺陷增多,促进了活性成分的溶出,进一步增加了化学激发剂与再生微粉发生反应的效率,促进试样中生成较多能够提高试件强度的C-S-H和C-A-S-H等凝胶物相。

关键词:再生微粉;活性指数;联合活化;活化原理

中图分类号:TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)09-1275-07

Study on combined physical and chemical activation of recycled powder from waste concrete

XIONG Kexing^{1,2,3,4}, ZHAN Binggen^{1,2,3,4}, WANG Cun^{1,2,3,4},
BIAN Pengfei^{1,2,3,4}, ZHOU Yaorong^{1,2,3,4}, YU Qijun^{1,2,3,4}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials of Ministry of Education, Hefei 230009, China; 3. Anhui Province Engineering Research Center of Low-carbon Technology for Cement-based Materials, Hefei 230009, China; 4. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the low activity of recycled powder and its inefficient utilization, this paper explores the effect of combined physical and chemical activation on the activity of recycled powder based on the study of physical grinding and chemical activation. The results showed that the activity index of combined physical and chemical activation could be increased by 14.7%, which was significantly more effective than the single activation method. After mechanical grinding, the structure surface defects of the recycled powder increased, which promoted the dissolution of the active ingredients, further increased the efficiency of the reaction between the chemical activator and the recycled powder, and promoted the formation of more gel phases such as C-S-H and C-A-S-H in the sample that could improve the strength of the sample.

Key words: recycled powder; activity index; combined activation; activation principle

我国城市化发展,建筑行业蓬勃发展大量
既有的建筑物需要进行拆除和改造,随之而来的

是逐年递增的城市建筑垃圾。近年来,我国建筑
垃圾年平均产生量超过 20×10^8 t,其中 32%~

收稿日期:2023-02-10;修回日期:2023-03-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909902)

作者简介:熊科兴(1998—),男,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

詹炳根(1964—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail: bgzhan@hfut.edu.cn;

余其俊(1963—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

69%为废弃混凝土^[1],需要进行再生资源化利用。目前主要是进行再生骨料的回收利用,而废弃混凝土破碎后取出骨料后得到的大量再生微粉,占废弃混凝土总量的 5%~20%^[2],并未得到高效利用。再生微粉在化学成分方面与粉煤灰相似,具有潜在的火山灰活性^[3],将再生微粉进行活化处理后,可作为矿物填充料用于混凝土制品中,实现再生微粉的高值化利用。

再生微粉化学成分主要有 CaO、SiO₂、Al₂O₃,这与水泥的成分类似,具有潜在的活性,但是其活性低。近年来,针对提高再生微粉活性受到关注,物理活化和化学活化是 2 种最常见的处理方式。在物理活化方面,主要是通过机械力研磨来改变再生微粉的粒径,提升再生微粉表面积,从而释放再生微粉的活性。再生微粉的比表面积增大^[4]对水化反应和火山灰反应有积极影响^[5],并且由于机械力的作用,研磨还会使得 α-SiO₂ 的四面体结构发生畸变并发生无定型转变,从而增加再生微粉的活性。文献^[6]研究振动球磨对再生微粉性能的影响,粉磨后的再生微粉活性提高,利用率也有所提升,但是能耗大,再生微粉易团聚。

而化学活化是通过在再生微粉中加入酸、碱、盐来增强活性,以提升其水硬化能力^[7-8],文献^[9]通过再生砂浆的抗压强度、孔隙率和微观形貌表征 5 种不同激发剂对再生微粉活性的影响,结果表明激发效果依次为 CaCl₂、CaSO₄·H₂O、NaOH、Ca(OH)₂ 和 Na₂SO₄、未激发,这主要是由于激发剂激发再生微粉,生成大量的凝胶物和一定量的钙矾石等,使得砂浆内微观孔隙率降低、平均孔径减小,结构致密,宏观抗压强度显著提高。化学活化的机理主要是通过提升再生微粉浆体中

OH⁻ 浓度,使得更多不饱和键位的形成^[10],促进活性组分在浆体中的反应生成更多凝胶物质^[11];或者在 Ca²⁺ 的作用下,与体系中的 SO₄²⁻ 和铝相反应生成钙矾石^[12]。虽然学者们对再生微粉单一活化方式的研究已经有了一系列的成效,单一活化方式对再生微粉的活性都有一定的提升效果,但是单一的方式活性激发效果有限,存在能耗大、耐久性隐患等一系列问题,采用联合活化方式可以有效地避免单一活化方式的弊端,降低再生微粉活化的成本。

本文针对再生微粉低活性的问题,研究将物理研磨和化学激发 2 种活化方式联合对再生微粉活性的影响效果,并从再生微粉离子溶出和水化产物层面,对再生微粉物理化学联合活化激发再生微粉的原理开展了进一步探究,为后续再生微粉的高效利用提供借鉴与指导。

1 原材料及实验方法

1.1 原材料

1) 再生微粉。将实验室中的自制净浆试块经颚式破碎机破碎后收集粉末材料,用 0.16 mm 的标准筛筛分得到,命名为 RP1,通过取样利用 X 射线荧光光谱仪测定其化学成分,见表 1 所列。

2) 水泥。海螺集团的 P. O. 42.5R 级水泥,28 d 抗压强度不低于 42.5 MPa,化学成分见表 1 所列。

3) 水。实验室自来水。

4) 砂。厦门艾思欧国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO) 标准砂。

5) 化学激发剂。氢氧化钙(纯度≥95.0%),上海麦克林生化科技有限公司生产。

表 1 原材料化学成分及其质量分数

| 原材料 | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ |
|------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|-----------------|
| 水泥 | 50.10 | 16.31 | 6.85 | 2.95 | 0.73 | 0.82 | 1.23 | |
| 再生微粉 | 40.54 | 32.17 | 8.92 | 4.31 | 8.82 | 0.21 | 1.42 | 2.27 |

1.2 实验方法

1.2.1 再生微粉细度测定

对再生微粉 RP1 采用行星式球磨机进行研磨处理。保持转速为 45 r/min,改变研磨时间,分别为 10、20 min,研磨后的再生微粉命名为 RP2、RP3。

采用 MS 2000 激光粒度分析仪测定了不同

研磨参数处理下的再生微粉的粒径分布,3 种微粉的粒径分布用来表征机械研磨对再生微粉细度的影响。

1.2.2 再生微粉胶砂试件的制备与养护

胶砂试件严格按照 GB/T 17671—1999 配制,标准恒温恒湿养护箱内养护至 3、28 d,分别测试其抗压强度。

1.2.3 再生微粉活性指数测定

再生微粉活性指数评价采用活性指数大小来表征。再生微粉活性指数按照 JG/T 573—2020《混凝土和砂浆用再生微粉》对试件 28 d 的抗压强度比来计算得出,计算公式为:

$$A = (R/R_0) \times 100\% \quad (1)$$

其中: A 为再生微粉活性指数; R 为受检胶砂 28 d 抗压强度; R_0 为对照胶砂 28 d 抗压强度。

1.2.4 再生微粉中 Si^{4+} 、 Al^{3+} 溶出

为了表征化学激发剂的掺入对再生微粉中活性成分的激发效果,采用离子溶出方法检测再生微粉在碱性环境下 Si^{4+} 和 Al^{3+} 的溶出。具体操作步骤为:首先利用 NaOH 和去离子水配置 0.2 mol/L 的 NaOH 溶液,然后将再生微粉 RP1、RP3 分别按 1:20 的质量比与聚乙烯瓶中的 NaOH 溶液或去纯离子水混合(具体为 150 g 的再生微粉和 3 000 g 的 NaOH 溶液或纯去离子水),用磁力搅拌器搅拌,按照设定的时间间隔每次将上清液 25 mL 取样到离心管中,去除溶液中的再生微粉。在上层清液中加入 2 mL 3 mol/L 的 HCl 溶液,得到待测的 Si^{4+} 、 Al^{3+} 溶液。用紫外可见分光光度计法测定上述溶液的离子浓度,其中 Si^{4+} 和 Al^{3+} 对应的波长分别为 810、550 nm。

1.2.5 热分析

将再生微粉按照水灰质量比为 0.5 制成净浆试块,在标准条件下养护 28 d,将试件破碎并取出靠近中心的小块样品,将样品放入无水乙醇终止水化,每隔 2 d 换 1 次无水乙醇,1 周后取出试样,放入干燥箱中 55 °C 烘干 1 d,将烘干后的样品通过研钵研磨成粉状,装入密封袋采用美国珀金埃尔默公司生产的 TGA8000 型热分析仪进行热分析,设定热重分析仪升温速率为 10 °C/min,最高测试温度为 1 000 °C,实验气氛选择氩气。

1.3 实验设计

为凸显单一活化方式和联合活化方式活化效果的差异,本文对 RP1 通过不同研磨处理得到 2 种不同粒径的再生微粉,分别为 RP2 和 RP3。选用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为化学激发剂,分别对 RP1、RP2 和 RP3 进行激发,激发剂掺量为 0、2%、4%、6%,水均为 225 g,ISO 砂均为 1 350 g,具体配合比设计见表 2 所列。其中:A-0、B-0、C-0 为单一物理活化实验组;A-1、A-2、A-3 为单一化学活化实验组;B-1、B-2、B-3、C-1、C-2、C-3 为物理化学联合活化实验组。

表 2 再生胶砂配合比

| 试样编号 | 微粉种类 | 再生微粉/g | 水泥/g | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量/% |
|------|------|--------|------|-------------------------------|
| 对照组 | | 0 | 450 | 0 |
| A-0 | RP1 | 135 | 315 | 0 |
| A-1 | RP1 | 135 | 315 | 2 |
| A-2 | RP1 | 135 | 315 | 4 |
| A-3 | RP1 | 135 | 315 | 6 |
| B-0 | RP2 | 135 | 315 | 0 |
| B-1 | RP2 | 135 | 315 | 2 |
| B-2 | RP2 | 135 | 315 | 4 |
| B-3 | RP2 | 135 | 315 | 6 |
| C-0 | RP3 | 135 | 315 | 0 |
| C-1 | RP3 | 135 | 315 | 2 |
| C-2 | RP3 | 135 | 315 | 4 |
| C-3 | RP3 | 135 | 315 | 6 |

2 实验结果与分析

2.1 物理活化

采用单一物理研磨的活化方式处理再生微粉制备的再生胶砂抗压强度如图 1 所示。

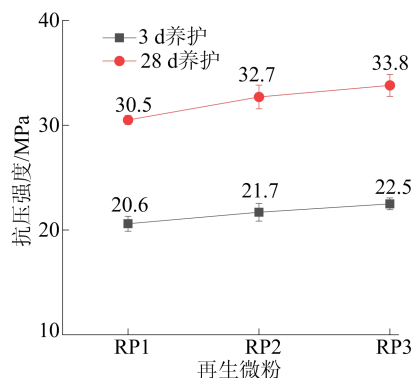


图 1 物理活化对抗压强度的影响

由图 1 可知,当通过物理研磨,再生胶砂的抗压强度均高于未激发的 A-0 组。随着研磨时间的增长,砂浆的抗压强度逐渐增高。经过 20 min 研磨的 RP1 再生微粉 3、28 d 抗压强度相比于未研磨的 RP1 分别提高了 30.1%、10.8%。这是由于行星式球磨机粉磨过程中再生微粉受力均匀,活化后的再生微粉粒度分布均匀,微粉表面不规则部分被钝化,掺入到砂浆中表现出良好的填充效应^[13],使得砂浆更密实,砂浆强度提高。再生微粉在机械力研磨过程中,内部的正四面体 α - SiO_2 会发生结构畸变^[14],从而转变为无定形态的活性 SiO_2 ,促进体系中生成更多水化产物^[15]。

通过激光粒度分布结果得到的再生微粉不同研磨参数下比表面积等参数见表 3 所列,由此绘

制粒度分布曲线,如图 2 所示。

表 3 再生微粉不同研磨参数下比表面积等参数

| 种类 | 研磨时间/min | 比表面积/(m ² /kg) | D ₁₀ /μm | D ₅₀ /μm | D ₉₀ /μm |
|-----|----------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| RP1 | 0 | 553 | 4.013 | 38.407 | 121.111 |
| RP2 | 10 | 850 | 2.416 | 19.538 | 74.633 |
| RP3 | 20 | 1500 | 1.744 | 5.862 | 21.357 |

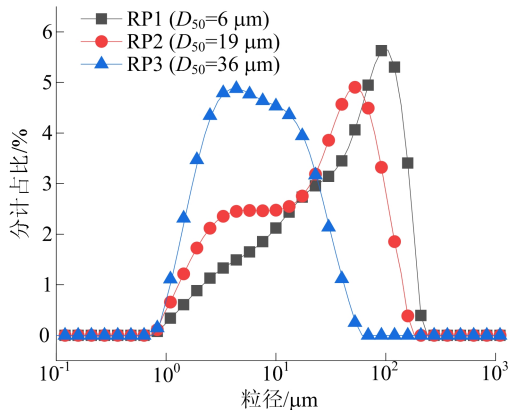


图 2 不同研磨参数下再生微粉的粒径分布

由表 3 可知,机械研磨改变了再生微粉的比表面积等参数,随着研磨时间增长,再生微粉比表面积逐渐增大,中值粒径从 36 μm 逐渐降低到 6 μm,再生微粉中的大颗粒逐渐转变为小颗粒。从图 2 可以看出,3 种自制再生微粉粒径分布相差较大,随着研磨时间的增加,再生微粉的粒径分布逐渐变窄,再生微粉小颗粒逐渐增多,粒径分布变均匀。

2.2 化学活化

采用 Ca(OH)₂ 作为化学激发剂的活化方式处理再生微粉制备的再生胶砂强度如图 3 所示。

从图 3 可以看出,对于未处理的再生微粉 RP1, Ca(OH)₂ 的掺入可以提高再生胶砂抗压强度,掺入质量分数为 4% 时效果最好,此时砂浆 28 d 抗压强度达到 33.6 MPa,比未参加时提升了 10.2%。一方面,这主要是由于 Ca(OH)₂ 提供了 OH⁻,增加了体系的碱度,发挥着碱激发的作用。在碱性环境下,再生微粉表面形成不饱和活性键更为简单,使得再生微粉表面 SiO₂、Al₂O₃ 形成的网络聚合体聚合度降低,促进体系内 C-S-H 等凝胶产物的生成^[16]。另一方面, Ca(OH)₂ 为体系提供了 Ca²⁺,促进 C-S-H 等水化产物的生成。但是在掺加 6% 时砂浆各龄期抗压强度均有不同程度的下降,这主要是由于水泥基体系中过高的碱度会抑制水化反应的进程^[17],从而产生负面作用。

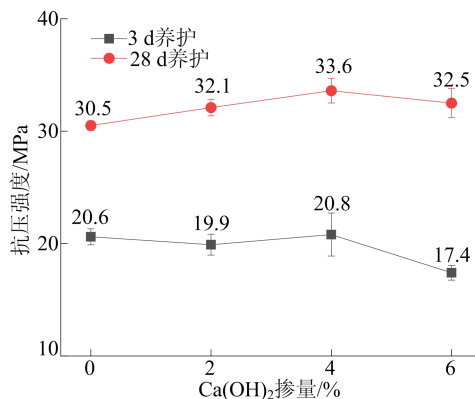


图 3 化学活化对抗压强度的影响

2.3 再生微粉物理化学联合活化

再生微粉物理化学联合活化处理后的抗压强度如图 4 所示。

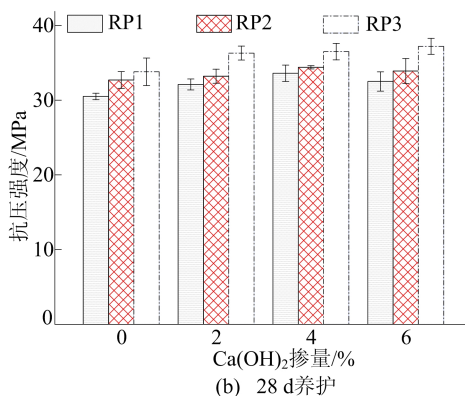
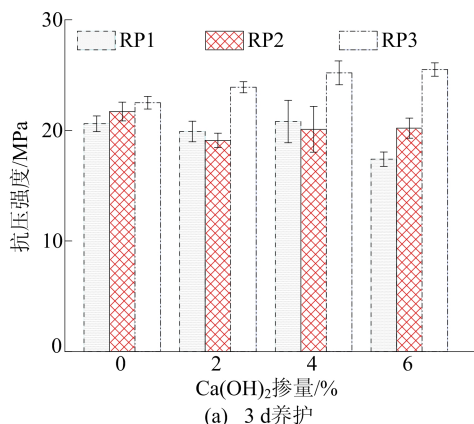


图 4 3 种再生微粉经过不同掺量 Ca(OH)₂ 激发的胶砂抗压强度

从图 4 可以看出,与对照组对比,再生微粉的

掺入会降低胶砂的抗压强度。这主要是由于再生

微粉的活性成分较水泥低,其掺入会稀释体系中的活性成分,生成凝胶等水化产物变少;另外未经处理的再生微粉颗粒粒度较大,颗粒不规则,具有较多的不规则裂缝^[18],掺入后增加了砂浆体系中的孔隙率。

但是在研磨后的再生微粉 RP2、RP3 制备胶砂的过程中加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,再生胶砂抗压强度均明显高于 RP1,降低了再生微粉的掺入带来的负面效应。RP3 微粉通过掺加质量分数为 6% 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发制备的再生胶砂 28 d 抗压强度高到 37.2 MPa,较未进行物理或化学处理时提高了 21.9%,比采用单一物理研磨激发的 RP3 提高了 10.1%,比 RP1 单一采用化学激发剂激发提升了 14.5%,这充分体现了物理化学联合激发的显著效果。

不同掺量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作用下 RP1 早期强度提升较快,如相比于未掺加激发剂,掺加质量分数为 4% 时试件 3 d 抗压强度从 22.5 MPa 增长到

25.7 MPa,提升了 14.2%,表明在早期更多的活性成分得到激发,发挥的作用更快。在后期,3 种微粉抗压强度差距随着龄期的增长得到缩小。并且经过机械研磨的再生微粉 RP3 在激发剂掺量从 4% 增加到 6% 过程中 28 d 抗压强度仍在增加,RP2 在激发剂掺量从 4% 增加到 6% 过程中 28 d 抗压强度下降较少,这表明随着粒径的细化,再生微粉的活性成分被剥离出来,更多的活性成分需要的激发剂掺量在增加。这验证了机械力研磨将再生微粉包裹的活性组分剥离出来,更多的活性组分与化学激发剂进行接触,所需要的激发剂掺量增多,物理活化和化学活化存在着协同作用。

2.4 不同活化方法激发效果对比

为对比物理化学联合活化和单一物理或化学活化在活性上的区别,计算掺加质量分数为 4% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和机械研磨 20 min 时的胶砂活性指数,结果见表 4 所列,其中,对照组纯水泥胶砂试件 28 d 抗压强度测定结果为 45.5 MPa。

表 4 不同激发制度对比下再生微粉活性对比

| 试件编号 | 激发制度 | 研磨时间/min | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量/% | 28 d 抗压强度/MPa | 活性指数/% |
|------|------------------------------------|----------|-------------------------------|---------------|--------|
| A-0 | | 0 | 0 | 30.5 | 67.0 |
| C-0 | 机械研磨 | 20 | 0 | 33.8 | 74.3 |
| A-2 | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发 | 0 | 4 | 33.6 | 73.8 |
| C-2 | 机械研磨 + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发 | 20 | 4 | 36.5 | 80.2 |

从表 4 可以看出,从活化效果来看,从大到小依次为机械研磨与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 联合激发 C-2 组、物理激发 C-0 组、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 化学激发 A-2 组、未激发 A-0 组。未激发组活性指数达到 67.0%;单一物理活化最优组活性达到 74.3%,提升了 7.3%;单一化学激发组活性达到 73.8%,提升了 6.8%;物理化学联合活化激发最优组的活性指数达到 80.2%,相比于未处理活性指数提升了 13.2%,相比于单一物理活化最优组提升了 11.0%,相比于单一化学激发最优组提升了 11.5%。联合活化效果提升程度都大于单一物理活化或者单一化学活化组。

这主要是由于机械研磨带来的颗粒填充作用以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发挥着碱激发作用和为体系补充 Ca^{2+} 促进胶凝物质的生成;另外,机械力的作用和化学激发存在协同作用,即机械力作用使得再生微粉内部被包裹的未水化活性组分被剥离出来,从而为化学激发剂提供了更多的激发组分和激发点。

2.5 物理化学联合活化原理分析

2.5.1 再生微粉离子溶出

再生微粉 RP1 和 RP3 分别在水和 0.2 mol/L NaOH 溶液中的 Si^{4+} 和 Al^{3+} 溶出量随时间的变化分别如图 5、图 6 所示。

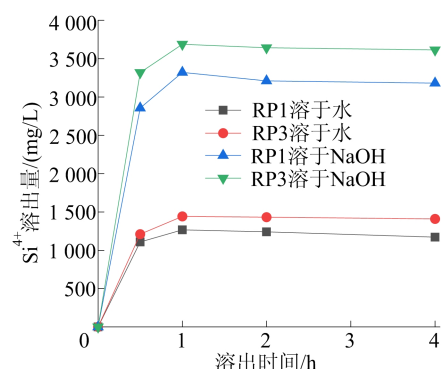


图 5 不同处理方式下 Si^{4+} 溶出量

由图 5、图 6 可知,随着溶出时间的延长,再生微粉中 Si^{4+} 和 Al^{3+} 的释放量逐渐增加,随后有小幅度的下降,而后趋于平缓。 Al^{3+} 和 Si^{4+} 的溶

出趋势高度一致,溶出量从大到小依次为 RP3 溶于 NaOH、RP1 溶于 NaOH、RP3 溶于水、RP1 溶于 NaOH。单位时间内,再生微粉在碱性溶液中的 Si^{4+} 溶出量是水中的 3 倍以上, Al^{3+} 更是达到 6 倍以上,并且经过研磨处理的 RP3 溶出量也大于未处理的 RP1,这表明再生微粉在研磨过程中结构表面缺陷增多,降低了 Si—O—Si、Al—O—Al 等化学键断裂能,从而促进了其在 OH^- 的侵蚀下断裂。更多活性组分的溶出,为联合活化过程中化学激发剂发挥作用提供了理论支持。

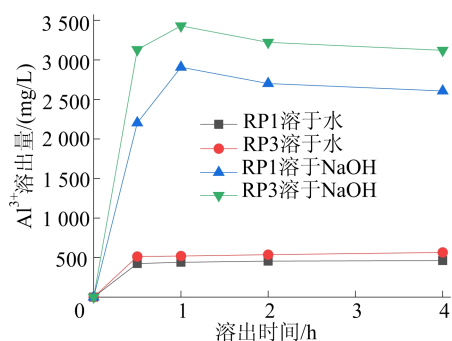


图 6 不同处理方式下 Al^{3+} 溶出量

2.5.2 热分析

28 d 的再生微粉净浆试样 TG-DTG 曲线如图 7 所示。

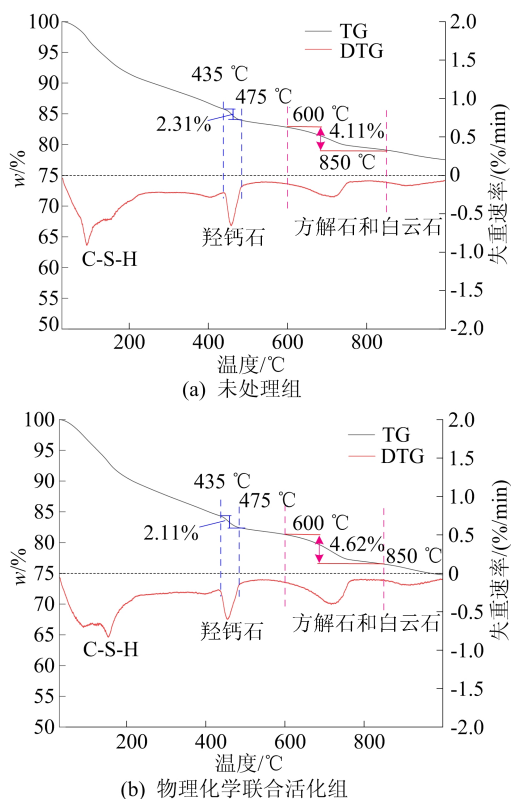


图 7 再生微粉净浆试样 TG-DTG 曲线

其中,采用 RP1 微粉制备的未激发组净浆试样 TG-DTG 曲线如图 7a 所示,采用经物理研磨后的 RP3 微粉掺入质量分数为 4% 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发制备的物理化学联合活化组净浆试样 TG-DTG 曲线如图 7b 所示。从图 7 可以看出,图 7b 的 TG 曲线在 120 °C 处的吸收峰比图 7a 中的强,这对应的是钙矾石的吸热峰^[19],并且在 0~400 °C 之间图 7b 的整体质量损失远远大于图 7a,可以得出经过物理化学方式联合活化的再生微粉浆体中的活性成分与激发剂反应,生成了更多的 C-S-H 凝胶、钙矾石等水化产物,这与抗压强度结果一致。

3 结 论

1) 相较于单一活化方式,物理化学联合活化激发再生微粉的活性更高。单一物理研磨和化学激发活性分别提升 10.8% 和 10.2%,采用物理化学联合活化方式时,活性指数提升了 14.7%,28 d 抗压强度与未激发相比较而言,最佳激发组提高了 21.9%。

2) 采用物理化学联合活化激发再生微粉的活性时,再生微粉所需的最佳激发剂掺量与研磨参数相关。未研磨处理的再生微粉抗压强度在激发剂掺量为 4% 时达到最高,而经过研磨处理的再生微粉达到的强度峰值需要的激发剂掺量增加。

3) 机械研磨和化学活化在激发再生微粉活性时存在协同作用。机械力作用将再生微粉内部被包裹的未水化活性组分剥离出来,此外研磨使再生微粉体系中 Si—O—Si、Al—O—Al 等化学键被断开,使颗粒内部可溶性 SiO_2 、 Al_2O_3 溶出,进一步增加了化学激发剂与再生微粉发生反应的效率,促进试样中生成较多能够提高试件抗压强度的 C-S-H 和 C-A-S-H 等凝胶物相。

[参 考 文 献]

- [1] 彭术,陈浩,水中和,等. 废弃混凝土再生粉制备超高性能混凝土基体的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2125-2130.
- [2] 侯景鹏,史巍,宋玉普. 再生混凝土技术的研究开发与应用推广[J]. 建筑技术, 2002(1): 15-17.
- [3] 毛新奇,屈文俊,朱鹏. 建筑垃圾再生微粉的研究现状[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(8): 89-93.
- [4] KEMAL A, SINAN E, MUSTAFA T. Effect of particle size on early heat evolution of interground natural pozzolan blended cements[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 210-218.

(下转第 1287 页)

- od of spatial prioritization for urban flood management based on source tracking[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135:108565.
- [5] LI C, LIU M, HU Y, et al. Spatial distribution patterns and potential exposure risks of urban floods in Chinese megacities[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610:127838.
- [6] QI W, MA C, XU H, et al. Urban flood response analysis for designed rainstorms with different characteristics based on a tracer-aided modeling simulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 355:131797.
- [7] WANG Y, LIU Z, WANG G, et al. Cellular automata based framework for evaluating mitigation strategies of sponge city [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796:148991.
- [8] BAEK S S, LIGARAY M, PYO J, et al. A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586:124886.
- [9] GUPTHA G C, SWAIN S, ALANSARI N, et al. Assessing the role of SuDS in resilience enhancement of urban drainage system: a case study of Gurugram City, India [J]. *Urban Climate*, 2022, 41:16.
- [10] 辛雨.《中国气候变化蓝皮书(2021)》发布 [N]. *中国科学报*, 2021-08-05.
- [11] TABARI H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):13768.
- [12] CANN K F, THOMAS D R, SALMON R L, et al. Extreme water-related weather events and waterborne disease [J]. *Epidemiology and Infection*, 2013, 141 (4): 671-686.
- [13] GAO Z, ZHANG Q H, XIE Y D, et al. A novel multi-objective optimization framework for urban green-gray infrastructure implementation under impacts of climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825:153954.
- [14] QIN H P, LI Z X, FU G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129:577-585.
- [15] LUO Z, TIAN J, ZENG J, et al. Resilient landscape pattern for reducing coastal flood susceptibility[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856:159087.
- [16] LI J, BORTOLOTTI Z J. Quantifying the impacts of land cover change on catchment-scale urban flooding by classifying aerial images [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 344:130992.
- [17] LIU L, LI X, XIA G, et al. Spatial fuzzy clustering approach to characterize flood risk in urban storm water drainage systems [J]. *Natural Hazards*, 2016, 83: 1469-1483.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1280 页)

- [5] PATEL D, TIWARI R P, SHRIVASTAVA R, et al. Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199:406-415.
- [6] 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.
- [7] ZHI G, GAO Z, SUN R, et al. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 289-293.
- [8] 翟梦怡, 赵计辉, 王栋民. 锂渣粉作为辅助胶凝材料在水泥基材料的研究进[J]. *材料导报*, 2017, 31(5):139-144.
- [9] 张圣彩, 耿欧, 赵桂云. 再生微粉混凝土的抗压强度及其活性激发[J]. *混凝土*, 2015(11):49-52.
- [10] SHI C, DAY R L. Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends [J]. *Advances in Cement Research*, 1999, 11(4):189-196.
- [11] SZEREMENT J, SZATANILKLOC A, JAROSE R, et al. Contemporary applications of natural and synthetic zeolites from fly ash in agriculture and environmental protection[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311(2014):127461.
- [12] YANG Y, KANG Z, ZHAN B, et al. Short review of recycled powder in cement-based materials: preparation, performance and activity excitation [J]. *Buildings*, 2022, 12:1568.
- [13] ALENA S, PAK M. The effect of a high amount of microfillers on the long-term properties of concrete[J]. *Materials*, 2019, 12(20):3421.
- [14] 杨南如. 机械力化学过程及效应(I): 机械力化学效应[J]. *建筑材料学报*, 2000, 3(1):19-26.
- [15] YUAN C, WANG D, SETIAWAN H, et al. Effect and mechanism of different excitation modes on the activities of the recycled brick micropowder[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2021, 28(1):676-688.
- [16] FLOREA M, NING Z, BROUWERS H. Activation of liberated concrete fines and their application in mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50:1-12.
- [17] 刘聪. 碱激发再生微粉胶凝材料制备及其应用研究[D]. 扬州:扬州大学, 2021.
- [18] 田青, 屈孟娇, 张苗, 等. 废弃混凝土再生微粉激活方式研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(8):2476-2485.
- [19] 马保国, 高立, 蹇守卫, 等. 激发剂对废弃加气混凝土活性的影响及其机理研究 [J]. *材料导报*, 2011, 25 (8): 111-114.

(责任编辑 吴 亮)