不同激发方法对钢渣胶凝材料活性提高及机理研究

袁 啸，赵慧玲
（上海大学 力学与工程科学学院，上海 200444）

摘要：钢渣作为一种绿色、可回收利用的胶凝材料，因活性较低而限制了其应用价值。本文旨在研究不同的激发方法对钢渣胶凝活性的影响和作用机理，通过试验验证了碱激发、酸改性 + 碱激发、超声空化 + 碱激发 3 种方法对钢渣的活性提高效果，并探究了酸改性和超声空化对钢渣强度的影响机理。结果表明，酸改性主要提高前期强度，但甲酸钙的生成会消耗 $Ca(OH)_2$ 并导致环境的碱性降低，从而使得后期强度较为薄弱。相比之下，超声空化能够清除钢渣表面的惰性成分，促进 C_3S、C_2S 等活性物质的溶出和反应，从而加速水化反应和 C—S—H 胶凝物质形成，可更好地提高胶凝体系的强度。本文所采用的方法和研究结果可为钢渣处理和利用提供一些新的思路和方向。

关键词：钢渣粉；活性激发；微观机理；空化作用；酸改性；碱激发
中图分类号：X757；TU528 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2024)04 - 0107 - 07
doi：10. 13403/j. sjqt. 2024. 04. 065

Study on the enhancement and mechanisms of steel slag cementitious material activity by different activation methods

YUAN Xiao ZHAO Huiling
(School of Mechanics and Engineering Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Steel slag is a green and recyclable cementitious material with limited application value due to its low activity. This paper aims to investigate the effects and mechanisms of different activation methods on the activity of steel slag, and to experimentally verify the effectiveness of three methods: alkaline activation, acid modification + alkaline activation, and ultrasonic cavitation + alkaline activation. This study also explores the effects of acid modification and ultrasonic cavitation on the strength development of steel slag. The results showed that acid modification mainly improves the early strength, but the generation of calcium formate consumes $Ca(OH)_2$ and reduces the alkalinity of the environment, resulting in weaker later strength. In contrast, ultrasonic cavitation can remove the inert components on the surface of steel slag, promote the dissolution and reaction of active substances such as C_3S and C_2S, and accelerate the hydration reaction and formation of C—S—H gelling materia, thereby improving the strength of the cementitious system. The methods and results presented in this paper can provide new ideas and directions for the treatment and utilization of steel slag.

Key words: steel slag powder; activation; microscopic mechanism; cavitation effect; acid modification; alkali activation

2022 年 6 月，《“十四五”可再生能源发展规划》正式发布，进一步强调了落实“双碳”目标，推动各方面的能源绿色转型的重要性。在我国高碳排放行业中，电力、水泥、钢铁一直高居榜首，钢渣作为钢铁行业固废材料，具备潜在的胶凝性能，可作为辅助胶凝材料替代水泥发挥作用[1-2]，

收稿日期：2023 - 04 - 12；**修回日期**：2023 - 07 - 11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42277163)
作者简介：袁 啸(1999—)，男，硕士研究生，从事固废材料资源化利用研究。
通信作者：赵慧玲(1982—)，女，博士，副教授，从事固废基地聚合物研究。

是推动水泥与钢铁行业减碳的重要环节。

然而，钢渣水化活性较低且安定性差[3]，掺入水泥中置换率通常在10%时达到最优效果[4]，利用率较低，因此钢渣胶凝活性的激发问题引起了研究者的关注。目前的激发方法主要有物理和化学两种，前者采用机械粉磨将钢渣物料磨细，增大钢渣的比表面积，以提高其活性[5]；后者通过添加碱金属盐、石膏等外加剂来提高钢渣的活性。碱激发是应用最多的胶凝活性激发方法，碱性环境可有效促进钙离子浸出，提高水化反应的程度[6-7]。然而，已有研究更侧重于采用碱性激发剂与其他外加剂激发钢渣胶凝活性后制成钢渣胶凝材料[8-9]，其中钢渣本身的胶凝活性作用难以量化。因此，有必要进一步系统地研究单独钢渣的胶凝活性激发方法。HUO等[10]采用酸改性剂预处理钢渣，钢渣颗粒表面受酸性侵蚀后孔洞增多，从而比表面积增大，但酸改性剂可能参与钢渣水化反应产生附加影响，需要深入研究。水化反应前期，钢渣加水的液相混合物若在高频振动下会产生空化作用，其中的空化气泡迅速生长和破裂产生的激波与高速喷射会显著增大非均相反应界面，实现非均相反应物间的均匀混合，加速反应物和产物的扩散[11-12]。空化作用曾被应用于提高水泥胶凝材料强度[13-14]，其对钢渣中有效成分水化反应的催化作用值得探索。

本文针对单独钢渣的胶凝活性激发方法开展研究，采用碱激发剂、酸改性+碱激发剂、超声空化+碱激发剂3种不同方法制备单组分钢渣胶凝材料试样，并基于不同龄期试样的无侧限抗压强度试验、热重分析(TG)、X射线衍射分析(XRD)和电镜扫描-能谱仪分析(SEM-EDS)，对比研究这些激发方法对钢渣有效成分水化反应的作用机制，从而提出可有效激发钢渣胶凝活性以形成后期硬化强度的优化方法。

1 钢渣活性激发试验

1.1 原材料

试验所用钢渣样品来源于山西某钢铁厂，该钢渣经过热焖和磁选工艺处理后得到。采用高能球磨机对处理后的钢渣进行粉磨，并对粉磨后的钢渣粉进行粒度分析。其粒径分布曲线如图1所示。由图1可知，该样本小于75 μm粒度占比为87.6%。

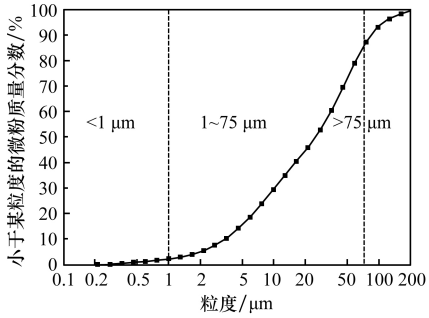


图1 钢渣粉粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of steel slag powde

通过对钢渣粉进行X射线荧光光谱(XRF)和XRD分析，得到了表1和图2所示的结果。由表1与图2可以看出，钢渣粉主要由CaO、Fe_2O_3、SiO_2等化学成分组成，其中CaO含量最高。同时，其主要矿物为Ca_2SiO_4(C_2S)、Ca_3SiO_5(C_3S)和$Ca(OH)_2$及*f*-CaO。这些成分说明钢渣粉具有一定的胶凝性能潜力。C_2S和C_3S是两种重要的硅酸盐水泥矿物相，在水化过程中会产生大量胶凝强度较高的产物。因此，在适当条件下激发钢渣活性后可形成类似于硅酸盐胶凝材料的结构。

试验采用的碱性激发剂为氢氧化钠+硅酸钠二元复合激发剂，其中氢氧化钠纯度达到99%，呈片状；硅酸钠采用固体硅酸钠，模数为2，呈粉末状。酸改性剂采用甲酸-无水乙醇溶液，甲酸与无水乙醇掺入比例为4∶1，甲酸浓度为88%，无水乙醇浓度为99%。

表1 钢渣粉的主要化学成分(质量分数)

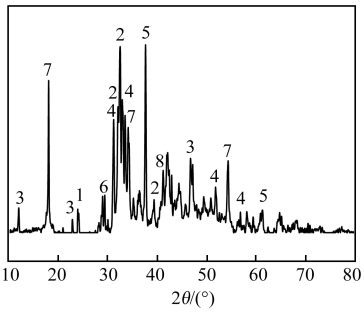
Table 1 Main chemical compositions of steel slag powder **%**

CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	TiO_2	P_2O_5	K_2O
53.07	10.27	4.22	3.34	21.01	0.13	1.10	0.88	0.06

1.2 试样方案

1.2.1 试样制备

试样采用单组分钢渣胶凝材料制备方法，制备了4组试样，包括直接水化钢渣组、碱激发组(A)、酸改性+碱激发组(AA)和超声空化+碱激发组(AU)，各组的水胶比均为0.5。直接水化钢渣组即按照0.5水胶比加水与钢渣进行搅拌制样。



1—$Ca_2AlSi_2O_7$；2—Ca_2SiO_4；3—Ca_2F；4—Ca_3SiO_5；5—*f*-CaO；6—$CaCO_3$；7—$Ca(OH)_2$；8—RO 相。

图 2　钢渣粉 XRD 谱图

Fig. 2　XRD pattern of steel slag powder

后 3 组采用相同的碱激发剂浓度。参考文献[8]确定碱激发剂模数为 1.5。本文通过预试验测试碱激发剂浓度分别为 2、4、6、8 mol/L。结果表明，在其浓度为 6 mol/L 时，钢渣活性激发效果最佳。具体配比如表 2 所示。A 试样即按照这一配比将钢渣粉与激发剂混合并充分搅拌后，将得到的钢渣浆料填入∅39 mm×80 mm 的亚克力模具中。在 25 ℃下常温养护 24 h 后脱模，并放入标准养护箱中继续养护至相应龄期[箱内条件：温度为(20±2) ℃；湿度为>95%]。之后进行试验以评估其性能。

表 2　复合碱激发剂各组分分析

Table 2　Analysis of each component in the complex alkali activator

目标浓度/($mol\cdot L^{-1}$)	目标模数	质量分数/%			
		钢渣	NaOH	SiO_2	H_2O
6	1.5	48.04	3.23	24.71	24.02

AA 试样是使用甲酸－无水乙醇溶液对钢渣进行改性处理，处理方式参考文献[10]，处理后采用与 A 组试样相同的方法制样。而 AU 试样则是在碱激发后将浆料倒入超声波反应器中进行超声空化反应制样。超声波反应器的功率密度为 0.37 W/cm^2，超声频率为 40 kHz，超声时间为 5 min。

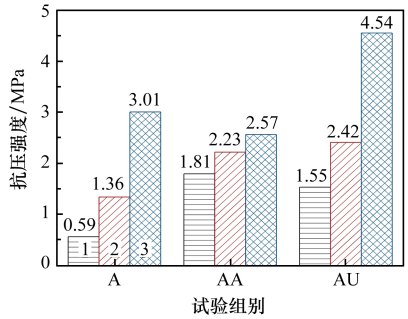
1.2.2　*微观试验方法*

微观试验所使用的试样取自强度测试后破碎试样的中间部分，并经过酒精浸泡 24 h、烘干处理。TG 试验保护气体为氮气，升温范围为 100～1 000 ℃，升温速率为 10 ℃/min。XRD 试验使用 Cu-Kα 辐射，发生器功率为 3 kW，扫描范围为 10°～80°，扫描速度为 10 °/min。

2　结果与讨论

2.1　无侧限抗压强度

图 3 展示了 3 组不同激发方法下钢渣胶凝材料试样标准养护箱中养护 3、7、14 d 的无侧限抗压强度。需要注意的是，在养护 3 d 时，直接水化钢渣组试样未形成结实的胶凝体系，因此不存在抗压强度。由图 3 可知，A 试样在养护 3 d 时的强度仅为 0.59 MPa，这表明碱激发能够激发钢渣的活性，但是水化活性较低，前期反应较为缓慢。随着养护时间的增长，钢渣胶凝材料的强度逐渐提高，超声空化＋碱激发组(AU)在养护 14 d 时的强度最高，达到了 4.54 MPa。AA 组和 AU 组养护 3 d 强度均高于 A 组，可见酸改性和超声空化能够进一步提升碱激发钢渣的前期反应活性，其中 AU 组的强度提升了 163%，AA 组的强度提升了 207%。在养护 14 d 时，AA 组的强度则小于 A 组，这是因为甲酸对 $Ca(OH)_2$ 的消耗导致环境碱性降低，从而削弱了胶凝体系内的水化反应。由于水化产物减少，AA 组后期强度发展缓慢。TG 试验和 XRD 试验将进一步分析这一现象。



养护天数/d：1—3；2—7；3—14。

图 3　不同激发方法钢渣胶凝材料试样的抗压强度

Fig. 3　Compressive strength of steel slag cement samples under different excitation methods

2.2　热重分析

图 4(a)和图 4(b)分别展示了 A 组、AA 组和 AU 组在标准养护箱中养护 3、14 d 试样的热重－热重微分(TG-DTG)曲线。由图 4(a)和图 4(b)可知，钢渣胶凝材料存在 3 种主要水化产物，它们对应于 3 个质量损失区间，分别是 100～300 ℃时 C—S—H 凝胶等凝胶类物质的分解，400～500 ℃

时 $Ca(OH)_2$ 的分解以及 550 ~ 750 ℃时 $CaCO_3$ 的分解。通过计算这 3 个阶段的质量损失，可以得知原钢渣胶凝体系中各种物质含量多少。不同阶段质量损失见图 4(c)和图 4(d)。

图 4(c)和图 4(d)可以看出，在养护 3 d 时，A、AA、AU 3 组钢渣胶凝材料加热至 1 000 ℃后总失重率依次为 9.01%、9.92% 和 10.36%，其中 A 组质量损失最低，表明其水化程度最低。而在养护 14 d 时，这 3 组试样总失重率依次为 11.31%、10.85% 和 13.09%，AA 组具有最小的总质量损失，水化程度最低，且在养护期间质量损失最小，说明 AA 组在养护期间钢渣胶凝材料体系中水化活性较低，后期水化反应活性弱。A 组和 AU 组在养护 14 d 时则具有较高的水化程度。

从图 4(c)、图 4(d)可以观察到 3 组试样在养护 3 、14 d 时的质量损失率，发现 AA 组主要水化产物最少。在养护 3 d 时，尽管 AA 组主要水化产物生成量小于 A 组，但其水化程度与强度均高于 A 组。这是因为甲酸与 $Ca(OH)_2$、$CaCO_3$ 等反应生成甲酸钙提供了前期强度，见公式(1) ~ (3)。此外，$Ca(OH)_2$ 和 SiO_2 或 Al_2O_3 会发生二次水化反应，生成 C—S—H 凝胶或 C—A—H 凝胶，见公式(4) ~ (5)[15-16]，它们也是钢渣胶凝材料强度的主要来源。

由于甲酸对 $Ca(OH)_2$、$CaCO_3$ 消耗以及火山灰反应活性降低导致了 AA 组主要水化产物最少。然而，在初期阶段，由于甲酸钙存在，其强度发展较快。在养护 14 d 时，甲酸对 $Ca(OH)_2$ 的消耗导致环境碱性减弱，C_3S、C_2S 溶出量减少，水化程度降低，新生成的水化产物较少。因此，AA 组后期强度发展缓慢。

$$Ca(OH)_2 + HCOOH \rightarrow (HCOO)_2Ca + H_2O \quad (1)$$

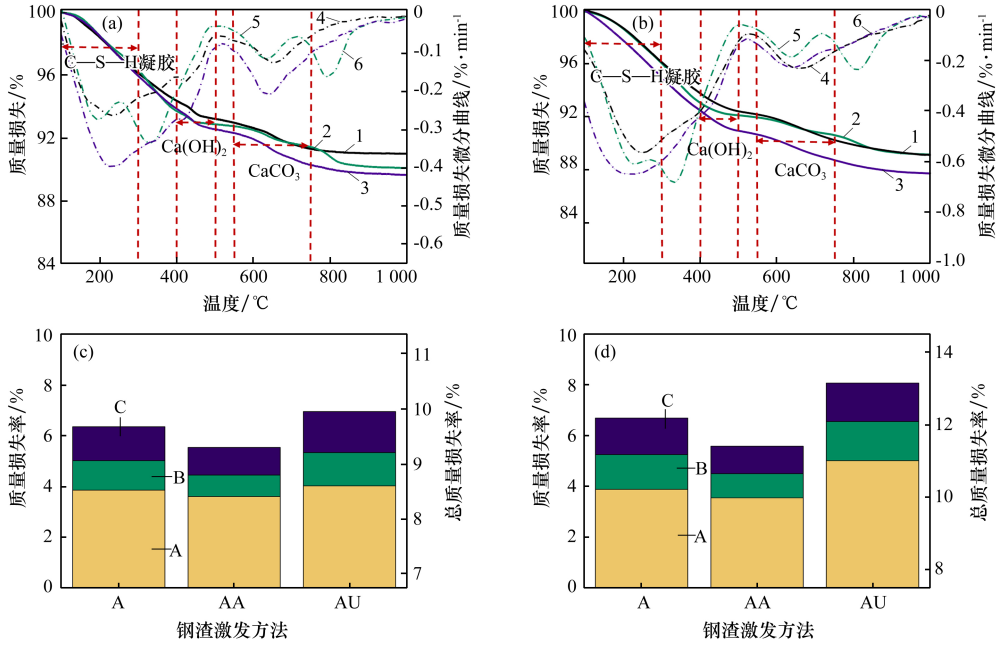
$$CaO + HCOOH \rightarrow (HCOO)_2Ca + H_2O \quad (2)$$

$$CaCO_3 + HCOOH \rightarrow (HCOO)_2Ca + H_2O + CO_2 \quad (3)$$

$$1.1Ca(OH)_2 + SiO_2 + 2.8H_2O \rightarrow 1.1CaO \cdot SiO_2 \cdot 3.9H_2O \quad (4)$$

$$4Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + 9H_2O \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O \quad (5)$$

通过比较 AU 组和 A 组的主要水化产物含量，DTG 曲线显示两组试样失重峰所处的温度范围相



养护 3 d 质量损失曲线：1—A；2—AA；3—AU；

养护 3 d 质量损失微分曲线：4—A；5—AA；6—AU；

生成物：A—C—S—H 凝胶；B—$Ca(OH)_2$；C—$CaCO_3$。

(a) 3 d 试样 TG-DTG 曲线；(b) 14 d 试样 TG-DTG 曲线；(c) 3 d 试样主要水化产物；(d) 14 d 主要水化产物

图 4 不同激发方法下钢渣胶凝材料 TG-DTG 曲线与主要水化产物分析

Fig. 4 TG-DTG curves and main hydration products of steel slag cement under different activation methods

近，这表明两组钢渣试样的水化产物类型相似。但 AU 组在各个阶段下的主要水化产物均高于 A 组试样，说明 AU 组钢渣水化更充分且反应更完全。可见，超声空化能有效地促进钢渣中 C_2S、C_3S 等硅酸盐类物质的溶出，并提高钢渣胶凝材料强度。这是因为空气空化作用对微气泡的振动、膨胀及破裂释放的能量可以有效地清除钢渣表面上惰性成分并暴露活性成分。这样，更多 C_2S、C_3S 等活性成分得以参与反应过程。同时，空化作用使得气泡破裂时引发高压环境，有利于推进水化反应进行和 C—S—H 胶凝物质形成，进而提升钢渣胶凝材料强度。

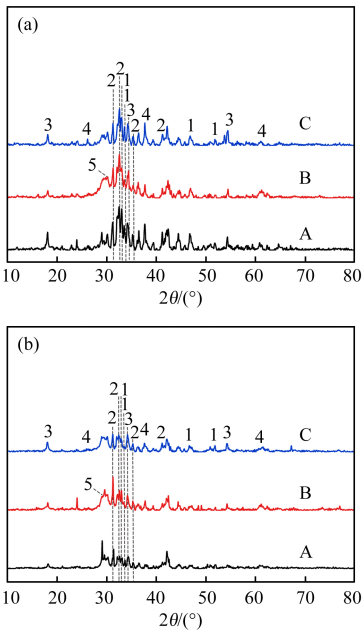
2.3　XRD 分析

3 种激发方法下的钢渣试样养护 3、14 d XRD 结果如图 5 所示，物相分析用 Jade 6 软件确定。由图 5 可知，反应后钢渣胶凝材料的矿物晶相仍以 C_2S、C_3S、$Ca(OH)_2$ 为主。在养护 3 d 时，钢渣胶凝材料的 C_2S 衍射峰较高，说明大部分 C_2S 尚未参与水化反应。AA 组和超 AU 组中的 C_3S 衍射峰明显小于 A 组，这表明酸改性和超声空化在前期对 C_3S 水化具有促进作用。

$Ca(OH)_2$ 衍射峰相比原钢渣明显减小，这说明 $Ca(OH)_2$ 通过火山灰反应生成了更多的 C—S—H等凝胶物质从而提高了强度。AU 组钢渣中 $Ca(OH)_2$ 衍射峰低于 A 组，这意味着 AU 组有更多 $Ca(OH)_2$ 参与到反应过程当中，因此其强度较高。然而，AA 组 $Ca(OH)_2$ 的衍射峰低于 AU 组，这表明除了参与火山灰反应外，$Ca(OH)_2$ 还与甲酸发生反应生成了甲酸钙。

3 组钢渣胶凝材料水化 3 d 后的 *f*-CaO 衍射峰均小于原始钢渣，这说明 3 种激发方法均具备消解 *f*-CaO 的作用，其中 AA 组钢渣胶凝材料的 *f*-CaO衍射峰最弱，这是因为甲酸除了与 $Ca(OH)_2$ 发生反应，还与 *f*-CaO、$CaCO_3$ 发生反应。

在养护 14 d 时，晶相整体峰值均有所减小，同时出现了更多的非晶相。这说明钢渣胶凝体系中矿物含量降低，而生成的凝胶物质增加，从而提高了强度。其中 AU 组非晶相最多、胶凝物质最丰富，因此其强度最高。3 组试样中，C_2S 衍射峰明显降低，表明 C_2S 在此期间参与了反应。然而，在 AA 组仍存在较强的 C_2S 峰，这意味着更少的 C_2S 参与到水化过程当中。这是由于甲酸对 $Ca(OH)_2$ 的消耗导致体系碱性下降，使得钢渣中 C_2S 难以溶出并参与生成凝胶物质的反应，最终影响到 AA 组养护 14 d 龄期时的强度表现。



A—A；B—AA；C—AU；

1—Ca_3SiO_5；2—Ca_2SiO_4；3—$Ca(OH)_2$；

4—*f*-CaO；5—$Ca(HCOO)_2$。

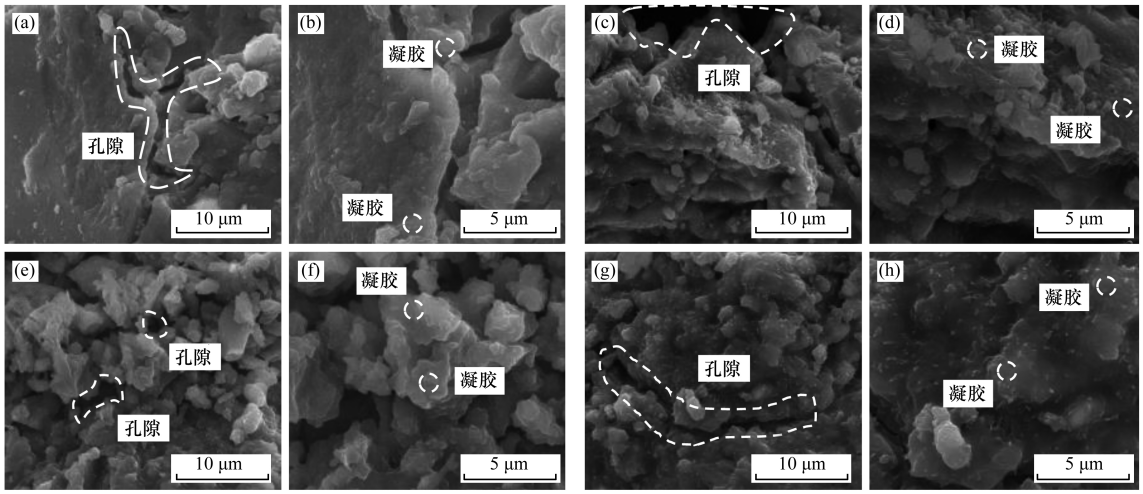
（a）养护 3 d；（b）养护 14 d

图 5　不同激发方法钢渣胶凝材料 XRD 曲线

Fig. 5　XRD curves of steel slag cement under different excitation methods

2.4　扫描电镜分析

C—S—H 等凝胶是决定钢渣胶凝材料体系中对强度性能的主要相，对 AA 组、AU 组进行养护 3、14 d 的 SEM 试验，结果见图 6。由图 6 可知，两组试样在养护 3 d 时已经生成较多的水化产物，但是凝胶物质轮廓不清晰，均为无定型状，未完全成型，当养护至 14 d 时，试样整体的孔隙较少，胶凝产物的成型效果较好，多为颗粒状，是 C—S—H凝胶的常见形态，结合 X 射线能谱仪（EDS）结果，这些颗粒状凝胶中除了 Ca、Si、O 元素外还存在较多的 Na、Al 元素，判断体系中也生成了少量的 C(N)—A—S—H 凝胶。相比之下，AU 组养护 14 d 试样比 AA 组养护 14 d 试样凝胶成型效果好，体系密实度高，这也是AU组试样



(a)、(b) AA 养护 3 d；(c)、(d) AU 养护 3 d；(e)、(f) AA 养护 14 d；(g)、(h) AU 养护 14 d

图 6 AA、AU 组养护 3 d、14 d 试样 SEM-EDS 结果

Fig. 6 SEM-EDS results of 3 day and 14 day samples of AA and AU groups

强度较高的原因。

3 结 论

（1）钢渣活性较低，碱激发、酸改性、超声空化均能够提高钢渣的活性。其中，酸改性主要提高前期强度，而超声空化对钢渣各龄期强度均有提升，超声空化 + 碱激发组钢渣 14 d 的抗压强度达到了 4.54 MPa。

（2）酸改性后的钢渣在碱激发早期会生成甲酸钙，这提供了前期强度。然而，甲酸对$Ca(OH)_2$的消耗导致火山灰反应减弱，同时，钢渣胶凝体系环境碱性变弱，C_3S、C_2S 溶出量减少。这种现象使后期参与反应的 C_2S 较少，主要水化产物生成量减少，从而导致后期强度不足。

（3）超声空化能够清除钢渣表面的惰性成分，促进 C_3S、C_2S 等活性物质的溶出与反应。空化作用下气泡破裂引起的高压环境可以有效促进水化反应和 C—S—H 胶凝物质形成，从而提高胶凝体系的强度。

参考文献：

[1] MARTINS A C P, FRANCO DE CARVALHO J M, COSTA L C B, et al. Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance[J]. Construction and Building Materials, 2021, 291: 123265.

[2] 王强，阎培渝. 大掺量钢渣复合胶凝材料早期水化性能和浆体结构[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(10): 1406 – 1410.
WANG Qiang, YAN Peiyu. Early hydration characteristics and paste structure of complex binding material containing high-volume steel slag[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(10): 1406 – 1410.

[3] 郝帅，罗果萍，卢元元，等. 钢渣改性与固碳研究现状及展望[J]. 烧结球团, 2022, 47(6): 31 – 38.
HAO Shuai, LUO Guoping, LU Yuanyuan, et al. Research status and prospect of slag modification and carbon fixation[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(6): 31 – 38.

[4] PAN Z H, ZHOU J L, JIANG X, et al. Investigating the effects of steel slag powder on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 570 – 577.

[5] LIU Q, LIU J X, QI L Q. Effects of temperature and carbonation curing on the mechanical properties of steel slag-cement binding materials[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 999 – 1006.

[6] YOU N Q, LI B L, CAO R L, et al. The influence of steel slag and ferronickel slag on the properties of alkali-activated slag mortar[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116614.

[7] 张西玲，郭海峰，汤子奇，等. 钢渣微粉 – 粉煤灰基地质聚合物性能研究及微观结构分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 4044 – 4051.
ZHANG Xiling, GUO Haifeng, TANG Ziqi, et al.

Properties and microstructure of steel slag powder-fly ash based geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(12):4044 – 4051.

[8] 邓永锋,赵余,刘倩雯,等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报,2018,31(11):11 – 20.
DENG Yongfeng, ZHAO Yu, LIU Qianwen, et al. Na_2SiO_4-and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization[J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(11):11 – 20.

[9] GUO X L,XIONG G Y. Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials,2021,269:121326.

[10] HUO B B,LI B L,CHEN C,et al. Surface etching and early age hydration mechanisms of steel slag powder with formic acid[J]. Construction and Building Materials,2021,280:122500.

[11] 刘建平,陈林,宇文超,等. 超声波增强炼钢渣中钙的浸出用于 CO_2 矿物封存[J]. 钢铁钒钛,2022,43(1):91 – 98.
LIU Jianping, CHEN Lin, YUWEN Chao, et al. Enhancement of leaching of Ca from steelmaking slag by ultrasonic for CO_2 mineral sequestration[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2022,43(1):91 – 98.

[12] CHEN J, FU C K, MAO T Y, et al. Study on the accelerated carbonation of MSWI fly ash under ultrasonic excitation: CO_2 capture, heavy metals solidification, mechanism and geochemical modelling[J]. Chemical Engineering Journal,2022,450:138418.

[13] 欧阳嵩. 水力空化效应对水泥性能的影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
OUYANG Song. Study on the influence of hydraulic cavitation effect on cement properties[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2018.

[14] MARTINOVIC S, VLAHOVIC M, BOLJANAC T, et al. Cavitation resistance of refractory concrete: Influence of sintering temperature[J]. Journal of the European Ceramic Society,2013,33(1):7 – 14.

[15] BENTZ D P,JENSEN O M,COATS A M,et al. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials I. Experimental and computer modeling studies on cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(6):953 – 962.

[16] PAPADAKIS V G. Effect of fly ash on Portland cement systems Part I. Low-calcium fly ash[J]. Cement and Concrete Research,1999,29(11):1727 – 1736.

(上接第 100 页)

[21] HUANG Z C, ZHONG R H, YI L Y, et al. Reduction enhancement mechanisms of a low-grade iron ore-coal composite by NaCl[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2018,49(1):411 – 422.

[22] 经文波,陈文亮. 提高低品位铁矿球团直接还原金属化率研究[J]. 江西冶金,2016,36(3):1 – 4.
JING Wenbo,CHEN Wenliang. Study on improving direct reduction metallization rate of low-grade iron ore pellet[J]. Jiangxi Metallurgy,2016,36(3):1 – 4.

[23] 陈子罗,张建良,刘征建,等. 含锌粉尘团块脱锌行为研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(7):1704 – 1711.
CHEN Ziluo, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Research on dezincification of zinc-bearing dusts composite briquettes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(7): 1704 – 1711.

[24] CHUN T J,ZHU D Q. New process of pellets-metallized sintering process (PMSP) to treat zinc-bearing dust from iron and steel company[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2015,46(1):1 – 4.