多重激发钢渣活性制备轻质墙材及其机制研究

张瀚文[1]，彭亚环[2]，石建红[2]，付志群[2]，孙章权[2]，林培芳[2]，雷国元[1]
（1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 广东华欣环保科技有限公司，广东 韶关 512121）

摘要：钢渣作为钢铁工业的典型固废，长期以来难以得到大规模消纳利用。本文以钢渣、粉煤灰为主要原料，采用多重激发技术制备轻质墙材；研究原料配方、钢渣微粉的比表面积、激发剂种类及用量、养护制度等因素对样品抗压强度的影响；通过XRD、SEM分析研究胶凝体系的水化机制。结果表明：适当提高初期养护温度、增大钢渣微粉比表面积和加入激发剂均能提高样品的抗压强度。采用模数为1.2的水玻璃溶液作为碱性激发剂，在钢渣微粉、粉煤灰、熟料粉、石膏粉配比为70∶10∶15∶5，碱性激发剂和硫酸铝用量均为固体混合料的2%，钢渣微粉比表面积为516 m^2/kg条件下，50 ℃初期养护7 d后自然养护，样品的密度为821 kg/m^3，28 d抗压强度可达3.98 MPa，主要指标满足《建筑用轻质隔墙保温条板》（GB/T 23450—2009）规范要求。在多重激发下作用下，产生大量的C-S-H和AFT会联结其它水化产物组成一个致密的整体，大幅度提高胶凝体系的强度。

关键词：钢渣；粉煤灰；激发剂；轻质墙材；强度
中图分类号：TF09；TU526　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－8764(2022)06－0132－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.094

Research on preparation of light wall materials by multiple activation of steel slag and its mechanism

ZHANG Hanwen[1], PENG Yahuan[2], SHI Jianhong[2], FU Zhiqun[2], SUN Zhangquan[2], LIN Peifang[2], LEI Guoyuan[1]
(1. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 2. *Guangdong Huaxin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shaoguan* 512121, *Guangdong, China*)

Abstract: As a typical solid waste in iron and steel industry, steel slag has been difficult to be consumed and utilized on a large scale for a long time. In this paper, steel slag and fly ash are used as main raw materials to prepare light wall materials by multiple excitation technology. The effects of raw material formula, specific surface area of steel slag powder, type and dosage of activator and curing system on the compressive strength of samples are studied. The hydration mechanism of cementitious system is studied by XRD and SEM. The results show that the compressive strength of the samples can be improved by appropriately increasing the initial curing temperature, increasing the specific surface area of steel slag powder and adding activator. The sodium silicate solution with a modulus of 1.2 is used as the alkaline activator, under the condition that the ratio of steel slag powder, fly ash, clinker powder and gypsum powder is 70∶10∶15∶5, the dosage of alkaline activator and aluminum sulfate is 2% of the solid mixture, the specific surface area of steel slag powder is 516 m^2/kg, after initial curing at 50 ℃ for 7 days, the sample density is 821 kg/m^3. The compressive strength of 28 d can reach 3.98 MPa, and the main indicators meet the requirements of

收稿日期：2022－08－16；**修回日期**：2022－08－31
基金项目：国家自然科学基金资助项目(41701624)
作者简介：张瀚文(1998—)，男，硕士研究生，从事固废综合利用及环境工程方面的研究。
通信作者：雷国元(1964—)，男，教授，从事固体废物处理处置与资源化、环境友好材料方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

the specification of "Light Partition Wall Insulation Strips for Buildings" (GB/T 23450—2009). Under the action of multiple excitations, a large amount of C-S-H and AFT will be produced, which will join other hydration products to form a compact whole, greatly improving the strength of the cementitious system.

Key words: steel slag; fly ash; activator; light wall materials; strength

钢渣长期堆放引发的一系列环境问题[1]，已经成为钢铁工业绿色低碳发展的重要难点。钢渣的主要矿物组成为硅酸三钙、硅酸二钙和 RO 相，与水泥相似，因此其多应用于建筑材料。钢渣具有良好的物理和机械性能，其微粉可以用作水泥的混合料，也可用作混凝土骨料[2]，但钢渣的形成温度过高，其内部结构相对稳定，难以水化，所以活性较差，用作水泥掺合料时掺量受到限制；用作混凝土骨料时，本身存在的游离氧化钙可能会导致制品膨胀开裂[3-4]。通过激发剂激发钢渣的活性能够拓展钢渣的应用范围，但由于激发效果有一定限制，且常规建筑材料对胶凝体系的强度要求较高，使得钢渣在结构件材料的高值化再利用存在一定难点[5-6]。研究表明，利用钢渣骨料制备沥青混凝土[7]，但是不能解决体积安定性的问题，存在一定隐患；利用钢渣微粉制备加气混凝土[8]，钢渣微粉的掺量为 40%，对于钢渣的高效消纳也有一定局限性。用钢渣制备装配式建筑行业的轻质墙板，可实现钢渣高值化利用，为规模化消纳创造条件。这类墙板作为非结构件，对材料的强度要求偏低，且市场需求广泛。

本文以钢渣微粉和粉煤灰为主要原料，研究高效的激发技术来提高钢渣微粉的活性，考察激发条件对制品抗压强度的影响，探讨胶凝体系的水化机制，实现钢渣高值化利用。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验用钢渣微粉、粉煤灰取自广东某钢铁厂，其比表面积分别为 339、516 m^2/kg；水泥熟料取自武汉某水泥厂，其比表面积为 408 m^2/kg；石膏采用二水石膏分析纯；外加剂包括激发剂、减水剂、发泡剂。试验原料的主要化学成分如表 1 所示。

激发剂包括碱性、硫酸盐激发剂。碱性激发剂是将 NaOH 粉末与工业水玻璃混合制备成模数为 1.2 的碱性混合液，其 Na_2O 质量分数为 54.64%；硫酸盐激发剂采用硫酸钠、硫酸铝；减水剂为聚羧酸高效减水剂；发泡剂为 FP-180 型动物蛋白质发泡剂，使用中其一般被配制成质量分数为 4%~6% 的水溶液。外加剂用量均以其与固体混合料的质量分数计算。

表 1　试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of raw materials

%

原料名称	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	MnO
钢渣	49.11	18.18	1.05	6.74	21.63	2.79
水泥熟料	58.25	17.72	12.07	3.32	4.95	—
粉煤灰	6.84	49.85	25.74	0.62	4.78	—

1.2　试验方法

将钢渣微粉、水泥熟料、粉煤灰、石膏按照设定比例配料、混合后，加入 25% 的水、1% 的减水剂和定量的激发剂混合均匀；将发泡剂溶液发泡后，按照最终制品干密度为(820 ± 10) kg/m^3 的要求，将一定量的泡沫加入混合料中，搅拌均匀后浇注到模具(30 mm × 30 mm × 30 mm)中。模拟太阳能温室养护条件，在 30 ~ 50 ℃、相对湿度大于 95% 的条件下将试件养护 1 d 后脱模；并在该条件下继续养护 7d 后转入自然养护至 28 d。采用万能压力试验机测试样品的抗压强度，利用 XPert PRO MPD 型 X 射线衍射仪、PHILIPS XL30 TMP 型扫描电子显微镜分析水化产物的物相和微观形貌。

2　结果与讨论

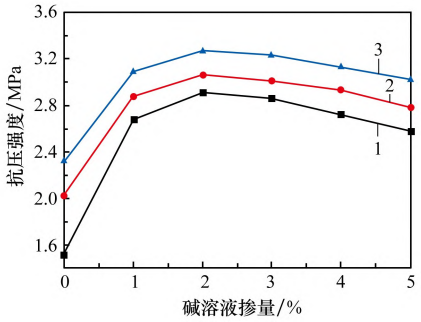
2.1　化学激发剂对抗压强度的影响

2.1.1　碱性激发剂用量的影响

在高掺量条件下，需要高效激发钢渣微粉的活性。水玻璃是比较有效的激发剂，在原料配方中设定钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏配比为 65∶15∶15∶5 的条件下进行试验，得到

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

碱性激发剂用量对样品抗压强度的影响如图 1 所示。



养护周期/d：1—3；2—7；3—28。

图 1 碱溶液掺量对制品抗压强度的影响

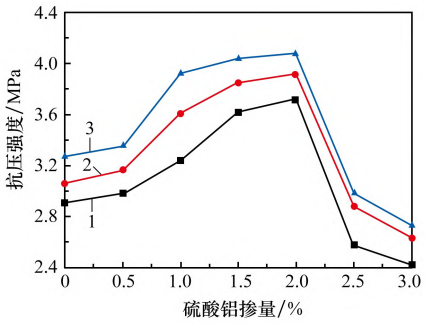
Fig. 1 Effect of alkali solution dosage on the compressive strength of the product

由图 1 可以看出：随着碱溶液用量的增加，抗压强度先增后减，在碱溶液用量为 2% 时，抗压强度最大。钢渣经历了高温骤冷过程，形成含有介稳态的玻璃体，碱激发能促使玻璃体解聚。在适量范围内，碱性激发剂的掺量越大，钢渣微粉中玻璃体的解聚越完全，水解加速，强度增大；一定的碱性环境也能促进钙矾石的生成，钙矾石趋向于形成针棒状晶体，能和水化胶凝物质更好地胶结在一起；但是当碱量过大时，高质量浓度的氢氧根会抑制钢渣和水泥的进一步水化，水化反应消耗的钙离子比钢渣解离放出的钙离子少，液相中大量剩余的钙离子也会抑制钢渣中玻璃体的进一步解离，并且过高的碱溶液容易吸附空气中的二氧化碳，与钙矾石发生碳化反应生成水化碳铝酸钙[9]，从而导致胶凝体系强度的下降。

2.1.2 硫酸铝激发剂用量的影响

碱金属盐是一种有效的激发剂，在原料配方中设定钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏配比为 65∶15∶15∶5，碱性激发剂用量为 2% 的条件下进行试验，得到硫酸铝激发剂用量对样品抗压强度的影响如图 2 所示。

由图 2 可以看出，随着硫酸铝用量的增加，抗压强度先增后减，在硫酸铝用量为 2% 时，抗压强度最大。水泥水化产生的氢氧化钙能与硫酸铝反应生成硫酸钙与氢氧化铝，之后氢氧化铝再与氢氧化钙反应生成铝酸钙，而在碱性环境的作用下，生成的铝酸钙会与硫酸钙反应生成三硫型水化硫铝酸钙(AFT)，促进钙矾石的形成，进一步促进水化反应的进行，提高体系的强度。但随着硫酸铝的不断增加，反应所需的氢氧化钙不足，反应产生的铝酸钙会随之减少，进一步减少了钙矾石的形成，导致钢渣胶凝材料的强度下降。



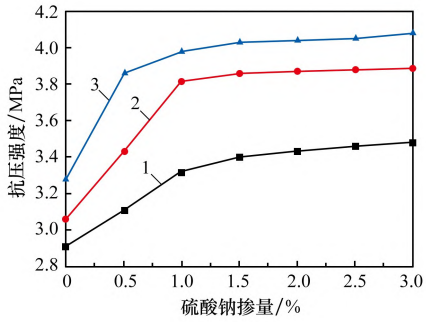
养护周期/d：1—3；2—7；3—28。

图 2 硫酸铝掺量对制品抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of aluminum sulfate dosage on the compressive strength of the product

2.1.3 硫酸钠激发剂用量的影响

在原料配方中设定钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏的配比为 65∶15∶15∶5，碱性激发剂用量为 2% 的条件下进行试验，得到硫酸钠用量对样品抗压强度的影响如图 3 所示。



养护周期/d：1—3；2—7；3—28。

图 3 硫酸钠掺量对制品抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of sodium sulfate dosage on the compressive strength of the product

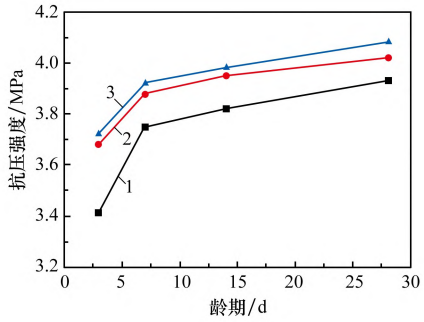
由图 3 可以看出，随着硫酸钠用量的增加，抗压强度逐渐增加并趋于平缓。水泥水化会产生水化硅酸钙和氢氧化钙，硫酸钙的溶解度小于氢氧化钙。随着硫酸钠的加入，氢氧化钙进

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一步反应生成了硫酸钙和氢氧化钠，硫酸钙的增加促进了钙矾石的生成，同时氢氧根与钠离子的结合也增加了反应的碱性，更进一步促进了水化反应的进行，构成了良性循环，起到共同促进强度提升的作用[10]。但是随着硫酸钠的增加，体系反应生成的硫酸钙增多，钢渣水化速度减慢，没有足够的水化胶凝物质及时联结生成钙矾石，导致钢渣胶凝材料的强度走势趋于平缓。

2.2　初期养护温度对抗压强度的影响

模拟华中地区的气候及太阳能养护特点，取 30～50 ℃作为温度范围；并在原料配方中设定钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏配比为 65∶15∶15∶5，碱性激发剂用量为 2%，硫酸铝激发剂用量为 2% 的条件下进行试验，得到初期养护温度对样品抗压强度的影响如图 4 所示。



养护温度/℃：1—30；2—40；3—50。

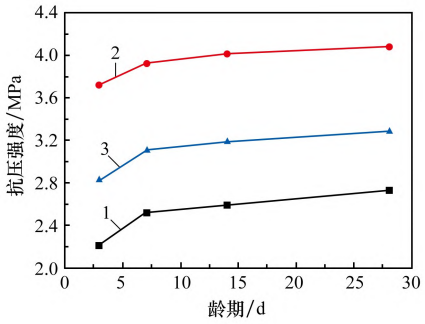
图 4　养护温度对制品抗压强度的影响

Fig. 4　The effect of curing temperature on the compressive strenth of the product

由图 4 可以看出，在 30～50 ℃范围内，随着温度的升高，抗压强度逐渐增大。温度提供了反应所需的热量，使得钢渣微粉中玻璃体的网络结构受热应力的作用，其 Si-O 键和 Al-O 键更容易发生断裂，有利于玻璃体解聚，水化反应的速率加快，使钢渣的活性得到提高，从而提高了胶凝体系的强度[11]。

2.3　钢渣微粉掺量对抗压强度的影响

钢渣掺量直接影响钢渣的消纳。在水泥熟料掺量为 15%、石膏掺量为 5%、碱性激发剂用量为 2%、硫酸铝激发剂用量为 2% 的条件下，控制钢渣微粉与粉煤灰总量不变进行试验，得到钢渣微粉掺量对样品抗压强度的影响如图 5 所示。



钢渣微粉掺量/%：1—60；2—65；3—70。

图 5　钢渣微粉掺量对制品抗压强度的影响

Fig. 5　The effect of steel slag powder mixing on the compressive strength of the product

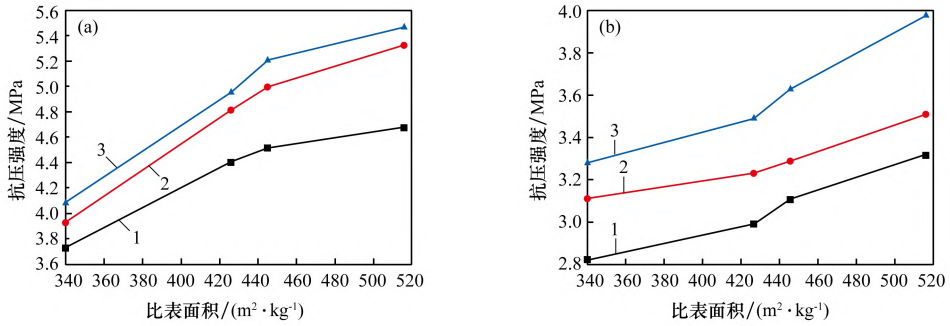
由图 5 可以看出，随着钢渣微粉掺量的增加，粉煤灰掺量的减少，钢渣掺量为 65% 时的抗压强度最大，70% 时次之，60% 时最小。与钢渣微粉掺量为 65% 相比，当钢渣掺量为 60% 时，粉煤灰掺量的增加使得粉煤灰中的 SiO_4^{4-} 和 AlO_4^{5-} 更快速溶出，而激发剂引入了大量的活性硅铝，使得胶凝体系很快达到饱和状态，加速了胶凝相的沉淀，而快速沉淀的胶凝相会附着在未反应的材料表面，阻碍其进一步溶解，从而导致胶凝体系的强度有所下降[12]；当钢渣掺量为 70% 时，粉煤灰掺量下降，胶凝体系中反应所需的活性硅铝减少，水化反应不够充分，导致胶凝体系的强度下降。

2.4　钢渣微粉比表面积对抗压强度的影响

钢渣微粉比表面积大小与钢渣物理激发效果密切相关。在原料配方中钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏配比分别为 65∶15∶15∶5 和 70∶10∶15∶5 两种情况下，设定碱性激发剂用量为 2%、硫酸铝用量为 2% 进行试验，得到钢渣微粉比表面积对样品抗压强度的影响如图 6 所示。

由图 6 可以看出：在钢渣微粉比表面积为 320～520 m^2/kg 时，随着数值的增加，抗压强度也在增加；对比钢渣掺量分别为 65%、70% 时，后者的比表面积对强度的影响效果大于前者。在研磨的过程中，钢渣内部发生了能量转换，有一部分机械能会转化成钢渣颗粒的表面能和内能。颗粒表面生成不稳定的非晶态结构，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏配比：（a）65∶15∶15∶5；（b）70∶10∶15∶5

养护周期/d：1—3；2—7；3—28。

图 6 钢渣微粉比表面积对制品抗压强度的影响

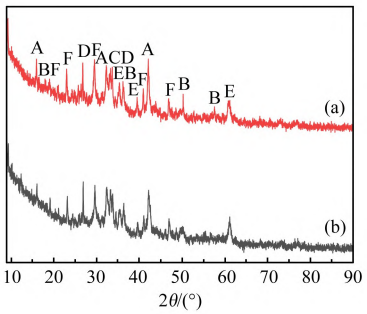
Fig. 6 The effect of the specific surface area of steel slag powder on the compressive strenth of the product

矿物颗粒与水分子间的接触面积增大，矿物晶体的结合键减少，水化反应加剧，因而提高了胶凝体系的强度；比表面积提高了钢渣微粉的活性，但由于钢渣微粉掺量提高，粉煤灰掺量减少，反应所需的活性硅铝不足，导致水化反应减弱，因此比表面积的增加对强度的影响效果降低。

2.5 微观结构分析

2.5.1 XRD 分析

在钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏配比为 65∶15∶15∶5的条件下，取碱性激发剂用量试验(2.1.1 节所述)和碱性激发剂、硫酸铝用量均为 2% 试验[2.4 节图 6(a)所述]中强度最高的样品进行 28 d 胶凝体系的 XRD 对比分析，结果如图 7 所示。



（a）未激发样品；（b）最优激发样品

A—C_3S；B—C_2S；C—C_3A；D—CH；E—C-S-H；F—AFT。

图 7 28 d 胶凝体系 XRD 分析

Fig. 7 XRD analysis of 28 d gelling system

由图 7 可以看出：在复合激发剂的作用下，钢渣中的 C_2S、C_3S 和 C_3A 活性提高，与水泥熟料中的 C_2S、C_3S 和 C_3A 共同参与水化反应；随着激发剂的加入，CH 的衍射峰减弱，C_3A 的衍射峰有所增加，说明在水化过程中 CH 与硫酸铝激发剂发生了反应，生成铝酸钙的同时消耗了部分 CH，该激发剂在 CH 的作用下继续与硫酸钙反应生成了 AFT，促进了胶凝体系的水化反应。水化反应如下所示。

$$6Ca(OH)_2 + Al_2(SO_4)_3 = 3CaSO_4 + 3\,Ca(AlO_2)_2 + 6H_2O \quad (1)$$

$$3Ca(AlO_2)_2 + Ca(OH)_2 + 12H_2O = 4CaO\cdot Al_2O_3\cdot 13H_2O \quad (2)$$

$$4CaO\cdot Al_2O_3\cdot 13H_2O + 3(CaSO_4\cdot 2H_2O) + 14H_2O = 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O + Ca(OH)_2 \quad (3)$$

C_2S 与 C_3S 的衍射峰减弱，说明在激发剂的作用下，钢渣的潜在活性得到激发，充分参与了水化反应，粉煤灰提供的活性硅铝也促进反应生成 C-S-H、C-A-H 和 AFT。反应如下所示。

$$3CaO\cdot SiO_2 + nH_2O = xCaO\cdot SiO_2\cdot yH_2O + (3-x)Ca(OH)_2 \quad (4)$$

$$2CaO\cdot SiO_2 + nH_2O = xCaO\cdot SiO_2\cdot yH_2O + (2-x)Ca(OH)_2 \quad (5)$$

$$3Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + 3H_2O = 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O \quad (6)$$

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O + 3CaSO_4 + 25H_2O = 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 31H_2O \quad (7)$$

AFT 与 C-S-H 的衍射峰增强，也验证了在硫

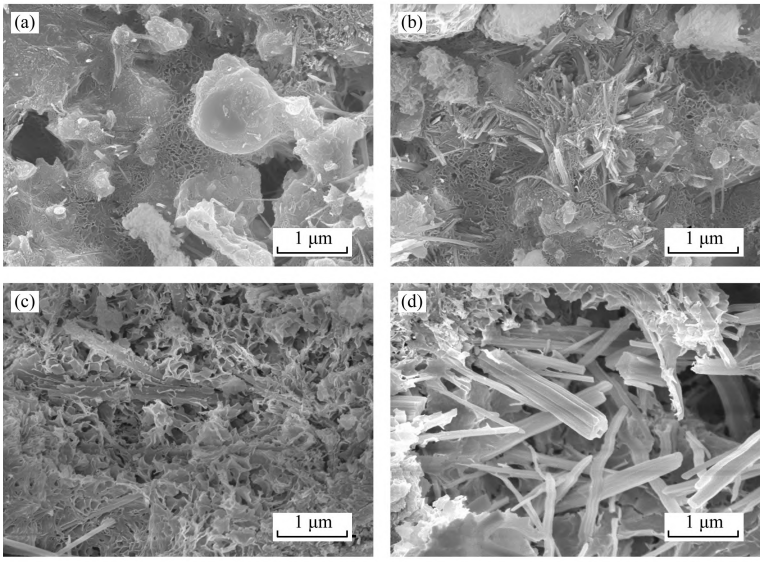
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

酸铝激发下，激发剂与 CH 反应生成的铝酸钙促进了 AFT 的产生。粉煤灰在反应过程中提供了部分的 Al 和 Si，碱性环境也提高了水化程度，生成了大量的 C-S-H。C-S-H 与 AFT 增多，共同作用，提高了胶凝体系的强度。

2.5.2　SEM 电镜分析

同样对上述 2 种样品进行 28 d 水化产物的 SEM 对比分析，结果如图 8 所示。由图 8(a)、(b)可以看出：在没有活性激发的条件下，胶凝体系的水化产物以少量纤维状的 C-S-H、层板状的 C-H 以及针棒状的钙矾石为主，少量的 C-S-H 覆盖在未水化完全的颗粒表面；水化产物之间的联结较为疏松，形成的水化产物之间孔隙较大，水化程度较弱，因此胶凝体系的强度较低。

由图 8(c)、(d)可以看出：采用多种激发手段激发钢渣活性之后，胶凝体系的水化程度得到提升，水化产物明显增多；更密实的钙矾石晶体以及多种形状的 C-S-H 凝胶，纤维状的 C-S-H 与 C-H 紧密的贴合在一起，形成密实的整体，絮凝状的 C-S-H 紧紧包裹住钙矾石晶体；各种水化产物之间相互作用，联结紧密，水化产物中未水化的颗粒大幅度减少，大大提高了胶凝体系的强度。



（a）未激发样品水化产物联结图；（b）未激发样品钙矾石晶体图；
（c）激发效果最优的水化产物联结图；（d）激发效果最优钙矾石晶体图

图 8　28 d 水化产物 SEM 分析

Fig. 8　SEM analysis of 28 d hydration products

3　结　论

（1）以钢渣为主要原料制备轻质墙材时，钢渣微粉的适宜比表面积为 440 ~ 516 m^2/kg；采用水玻璃与硫酸盐复合激发的效果优于单一的水玻璃激发；模数为 1.2 的水玻璃用量为 2%、硫酸铝用量为 2% 时，复合激发效果最佳。

（2）钢渣微粉、粉煤灰、水泥熟料、石膏配比为 70∶10∶15∶5，在最佳激发用量和节能养护条件下，所制成的轻质墙材密度为 821 kg/m^3，28 d 抗压强度可达 3.98 MPa，主要指标均满足 GB/T 23450—2009 规范要求。

（3）多种激发剂协同作用能大幅度提高钢渣活性，促进玻璃体解体，使水化产物增多，产生大量的 C-S-H 和 AFT；它们会联结其它水化产物组成一个致密的整体，大幅度提高胶凝体系的强度。

参考文献：

[1] SONG Q, GUO MZ, WANG L, et al. Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment [J]. Resources, Conservation and Re-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

cycling,2021,173:105740.

[2] SAXENA S,TEMBHURKAR A R. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete[J]. Construction and Building Materials,2018,165:126 - 37.

[3] 赵计辉,阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展[J]. 硅酸盐通报,2017,36(2):477 - 84.
ZHAO Jihui, YAN Peiyu. Domestic research progress on volume stability and stabilization treatment of steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(2):477 - 84.

[4] ZHUANG S,WANG Q. Inhibition mechanisms of steel slag on the early-age hydration of cement[J]. Cement and Concrete Research,2021,140:106283.

[5] 黄伟,邱鹏,唐刚,等. 钢渣混合土基层材料制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(10):37 - 42;65.
HUANG Wei, QIU Peng, TANG Gang, et al. Preparation and properties of steel slag mixed soil base material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2019,38(10):37 - 42;65.

[6] 李超,陈宗武,谢君,等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. 材料导报,2017,31(3):86 - 95;122.
LI Chao,CHEN Zongwu,XIE Jun,et al. Research progress of steel slag asphalt concrete technology and its application[J]. Materials Reports,2017,31(3):86 - 95;122.

[7] 张强,胡力群,刘兴成. 多掺量钢渣开级配沥青混合料性能研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(2):493 - 500.
ZHANG Qiang,HU Liqun,LIU Xingcheng. Study on the properties of open-grade asphalt mixture with multi-content steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramass, 2020, 39(2): 493 - 500.

[8] 刘星,李小华,曾智,等. 新型轻质钢渣加气混凝土的实验研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(9):2782 - 2788.
LIU Xing,LI Xiaohua,ZENG Zhi,et al. Experimental study on new lightweight steel slag aerated concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39(9):2782 - 2788.

[9] 郭家林,赵俊学,黄敏. 钢渣综合利用技术综述及建议[J]. 中国冶金,2009,19(2):35 - 38.
GUO Jialin,ZHAO Junxue,HUANG Min. Review and suggestions on comprehensive utilization technology of steel slag[J]. China Metallurgy,2009,19(2):35 - 38.

[10] 韩天,于佳丽,吴燕开. 硫酸钠激发钢渣粉活性改良水泥土试验研究[J]. 科学技术与工程,2019,19(7):231 - 238.
HAN Tian, YU Jiali, WU Yankai. Experimental study on improved cement soil with active improvement of steel slag powder by sodium sulfate[J]. Science Technology and Engineering,2019,19(7):231 - 238.

[11] 张同生,刘福田,王建伟,等. 钢渣安定性与活性激发的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2007,26(5):980 - 984.
ZHANG Tongsheng, LIU Futian, WANG Jianwei, et al. Research progress on stability and active excitation of steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007, 26(5):980 - 984.

[12] 赵旗. 碱激发粉煤灰/钢渣胶凝材料的制备及其性能研究[D]. 西安:长安大学,2021.
ZHAO Qi. Preparation and properties of alkali-excited fly ash/steel slag cementitiousmaterials[D]. Xi'an:Chang'an University,2021.

(上接第22页)

[15] 白婕. 废塑料配煤炼焦的实验研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2016.
BAI Jie. The study on the yield and performance of products from coking with used plastic and coal blending[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2016.

[16] 侯明. 高炉喷吹废塑料下的废旧塑料综合利用新方法[J]. 资源节约与环保,2021(5):119 - 120.
HOU Ming. A new method for comprehensive utilization of waste plastics under blast furnace injection of waste plastics[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2021(5):119 - 120.

[17] 贾利军,王冰,孟淑敏. 高炉喷吹废塑料工艺技术探讨[J]. 工业炉,2015,37(2):19 - 22.
JIA Lijun, WANG Bing, MENG Shumin. Study on process technology of injecting waste plastic in BF[J]. Industrial Furnace,2015,37(2):19 - 22.

[18] 李冰岩. 水泥熟料回转窑燃烧效率软测量研究[D]. 长春:长春工业大学,2017.
LI Bingyan. Research on soft sensor for rotary kiln combustion efficiency in cement clinker[D]. Changchun:Changchun University of Technology,2017.

[19] 潘料庭. 红土镍矿回转窑直接还原镍铁工艺设计与实践[J]. 铁合金,2015(2):15 - 19.
PAN Liaoting. Process design and practice on direct reduction ferronickel by laterite nickel ore rotary kiln[J]. Ferro Alloys, 2015(2):15 - 19.

[20] 夏盛,童敏,封羽涛. 钢厂协同处置城市固体废弃物的实践与探索[J]. 广州化工,2017,45(18):138 - 140.
XIA Sheng,TONG Min,FENG Yutao. Practice and exploration on co-processing of municipal solid waste by steel mill[J]. Guangzhou Chemical Industry,2017,45(18):138 - 140.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net