

碱激发高钛重矿渣胶凝材料研发 及性能研究

刘 蓝¹, 曹知勤², 何 逵^{1*}, 孙新坡¹, 廖映华¹, 杨 星¹,
唐文静¹, 李玉婷¹, 郑涛彬¹

(1. 四川轻化工大学土木工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:碱激发胶凝材料跟传统硅酸盐水泥相比, 具有生产工艺简单、投资少、能耗低、二氧化碳排放量低、矿渣利用率高等优点。通过设计不同水灰比、碱激发剂及其用量, 研发碱激发高钛重矿渣胶凝材料, 分析其力学性能, 获得了最优的材料组成配比; 同时结合 XRD、SEM 分析了其物相组成及微观结构, 揭示了碱激发高钛重矿渣胶凝材料水化产物及水化机理。主要结论如下: 水玻璃激发效果明显优于氢氧化钠, 当水灰比为 0.32 时, 液体水玻璃含量为 6%, 模数为 1 时制备的碱激发高钛重矿渣胶凝材料力学性能最优, 28 d 抗压强度可达 13.5 MPa; 物相及微观形貌分析可知主要胶凝材料的水化产物为水化硅酸钙, 同时生成了少量的水铝钙石晶体。

关键词:高钛重矿渣; 碱激发; 胶凝材料; 水化机理; 强度

中图分类号: TF044

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)02-0097-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Preparation and performance of alkali-activated high-titanium heavy slag cementitious materials

LIU Lan¹, CAO Zhiqin², HE Kui^{1*}, SUN Xinpo¹, LIAO Yinghua¹, YANG Xing¹,
TANG Wenjing¹, LI Yuting¹, ZHENG Taobin¹

(1. College of Architecture and Construction, Sichuan University of Science and Technology, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Compared with traditional silicate cement, alkali-activated cementitious materials have advantages such as simple production processes, low investment, low energy consumption, low carbon dioxide emissions, and high slag utilization rates. This study develops alkali-activated high-titanium heavy slag cementitious materials by designing different water-to-cement ratios, alkali activators, and their dosages, and analyzes their mechanical properties to obtain the optimal material composition ratio. At the same time, through XRD and SEM analysis, the phase composition and microstructure are examined, revealing the hydration products and hydration mechanisms of alkali-activated high-titanium heavy slag cementitious materials. The main conclusions are as follows: Sodium silicate demonstrates significantly better activation effectiveness than sodium hydroxide. The alkali-activated high-titanium heavy slag cementitious material achieves optimal mechanical properties when prepared with a water-to-cement ratio of 0.32, 6% liquid sodium silicate content, and a modulus of 1. with a compressive strength of up to 13.5 MPa after 28 days. Phase and microstructure analyses indicate that the primary hydrated

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 四川轻化工大学校级创新训练计划项目(CX2024160); 四川省科技厅计划项目(2020YJ0360)。

作者简介: 刘蓝, 2002 年出生, 女, 四川资阳人, 本科生, 主要从事固废综合利用研究, E-mail: 2724666354@qq.com;

*通讯作者: 何逵, 1988 年出生, 男, 湖南衡阳人, 博士, 讲师, 主要从事固废综合利用研究, E-mail: 243280330@qq.com。

product of the cementitious material is calcium silicate hydrate, while a small amount of calcium aluminum silicate crystals is also generated.

Key words: High-titanium heavy slag, alkaline activation, cementitious material, hydration mechanism, mechanical strength

0 引言

“十四五”时期,我国全面开展社会主义现代化国家建设,围绕推动高质量发展主题,全面提高资源利用效率^[1]。受资源禀赋、能源结构、发展阶段等因素影响,未来我国大宗固废仍将面临产量与存量、利用不充分、综合利用产品附加值低的严峻挑战^[2-3]。攀西地区为我国最大钒钛磁铁矿基地,据统计,2019 年攀枝花市一般工业固废堆存量为 6 283.7 万 t^[4],位居全国第一,其中以钢渣为主,受制于有价金属提取困难^[5-6],大量的钢渣被堆存于尾矿库中,如何有效利用当前的钢渣是当地企业可持续发展,城市转型路上的一个难题。

碱激发矿渣胶凝材料是指碱性激发剂与具有潜在水硬活性或火山灰活性的硅铝酸盐矿渣材料发生一系列水化反应而形成的一种新型环保胶凝材料,具有快速硬化、强度高、耐化学侵蚀、低水化热、低碳等优点^[7-8]。高钛重矿渣主要为钒钛磁铁矿炼铁副产物,具有高 TiO₂ 含量、多孔特性,而当地某企业产出的高钛重矿渣采用自然冷却方式,渣体内部晶体结构完整,具有典型的非玻相特性,水化活性较低且有价金属元素提取困难等特征,被广泛应用于混凝土骨料研究^[9-10]。有学者采用机械研磨方式有效提高了高钛重矿渣的水化活性^[11],但是采用碱激发提高高钛重矿渣水化活性的研究却较少。为此,笔者采用攀枝花地区大量的高钛重矿渣为主要原料,氢氧化钠与水玻璃为激发剂,优选制备出力学性能优异的低碳胶凝材料,着力提升固废减量化、资源化、无害化水平。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验使用的材料为液体水玻璃、氢氧化钠、减水剂、高钛重矿渣、硅酸盐水泥等。相关成分及性能见表 1~3。采用球磨机对高钛重矿渣进行机械研磨改性预处理,取 500 g 矿渣与 500 mL 自来水加入到 LQM-160×200 智能球磨机中,钢球参数如表 4 所示,钢球配比为 Ø 20 : Ø 25 : Ø 30 = 97 : 62 : 43,球磨机时间为 15 min,球磨产品过滤烘干后,采用 100 目泰勒标准筛进行筛分,取筛下产品,经过激光粒度仪分析可知,磨碎的高钛重矿渣颗粒 D₅₀ 值为

74 μm,比表面积为 2.72 m²/g,相关物相分析如图 1 所示,由图 1 可知,高钛重矿渣的主要物相为钙钛矿、钛辉石与普通辉石等,且从 XRD 图谱可以看出高钛重矿渣的整体峰型较尖锐,呈现明显的结晶相,玻璃相较少,显示出高钛重矿渣水化活性较低的特性。

表 1 液体水玻璃物理化学指标

Table 1 Physical and chemical indexes of liquid sodium silicate

模数	波美度(20 ℃)	密度/(g·mL ⁻¹)	氧化钠/%	二氧化硅/%	透明度/%
3.25	41.0~42.5	1.394~1.415	8.5~10.5	27.5~30.5	85

表 2 减水剂的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of water-reducing agents

掺量/%	减水率/%	含气率/%	pH 值	Cl 含量/%	细度/mm
0.02~0.25	≥45	6	7~9	≤0.3	≤0.315

表 3 高钛重矿渣组成成分

Table 3 Composition of high-titanium heavy slag %

TFe	Cl ⁻	SiO ₂	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃ /CaO	Pb	Cr	MnO
27.05	0.019	11.23	26.95	2.89	7.47	0.50	5.59	0.16	0.01	0.267

表 4 钢球基本参数

Table 4 Basic parameters of the steel ball

介质	型号/mm	密度/(kg·m ⁻³)	质量/g	表面积/mm ²
钢球	Ø20	7 800	32.7	1 256
	Ø25	7 800	63.8	1 962.5
	Ø30	7 800	110.2	2 826

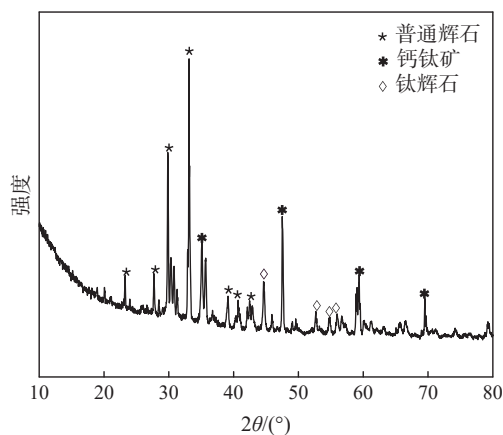


图 1 高钛重矿渣 XRD 图谱分析

Fig. 1 XRD analysis of high-titanium heavy slag

1.2 试验配比

试验过程中设计水灰比为 0.30、0.32、0.34、0.36、0.38、0.40、0.50,水玻璃模数为 1、1.5、2,水

玻璃与氢氧化钠浓度分别为 4%、6%、8%, 相关材料组成配比见表 5~7。

表 5 不同水灰比试验配比
Table 5 Experiments with different water-cement ratios

编号	模数	水玻璃浓度/%	氢氧化钠浓度/%	水/mL	矿渣/g	减水剂/g	水泥/g
Z1	1.5	8	0	30	87	0.3	5
Z2	1.5	8	0	32	87	0.3	5
Z3	1.5	8	0	34	87	0.3	5
Z4	1.5	8	0	36	87	0.3	5
Z5	1.5	8	0	38	87	0.3	5
Z6	1.5	8	0	40	87	0.3	5
Z7	1.5	8	0	50	87	0.3	5
Z8	0	0	8	30	87	0.3	5
Z9	0	0	8	35	87	0.3	5
Z10	0	0	8	40	87	0.3	5

表 6 水玻璃激发高钛重矿渣试验配比
Table 6 Ratio of activated slag of sodium silicate

编号	水玻璃模数	水玻璃浓度/%	水/mL	矿渣/g	减水剂/g	水泥/g
Z1	1	4	32	96	0.3	5
Z2	1	6	32	94	0.3	5
Z3	1	8	32	92	0.3	5
Z4	1.5	4	32	96	0.3	5
Z5	1.5	6	32	94	0.3	5
Z6	1.5	8	32	92	0.3	5
Z7	2.0	4	32	96	0.3	5
Z8	2.0	6	32	94	0.3	5
Z9	2.0	8	32	92	0.3	5

表 7 氢氧化钠激发高钛重矿渣试验配比
Table 7 Sodium hydroxide concentration ratio for alkali-activated high-titanium heavy slag

编号	氢氧化钠/g	矿渣/g	水/mL	减水剂/g	水泥/g
Z1	4	91	30	0.3	5
Z2	6	89	30	0.3	5
Z3	8	87	30	0.3	5

1.3 试验方法

按照上述配比取材料进行混合, 采用搅拌机充分搅拌 10 min, 将搅拌均匀得到的砂浆注入 40 mm×

40 mm×40 mm 的模具内, 振动去除气泡后置于标准养护箱内(湿度>90%, 温度 25 ℃)分别养护 3、7、28 d 后开展抗压强度测试, 利用无水乙醇对抗压强度测试结束后的开裂样品进行浸泡 48 h, 以终止其水化反应。取浸泡后的样品进行研磨, 筛取 75 μm 以下的粉末状样品开展 XRD(X'Pert PRO, PANalytical B.V, Netherlands)测试, 扫描速度为 1.0°/min, 同时取浸泡后块状样品开展 SEM(EVO 18, Carl Zeiss Company, Germany)测试。

2 结果与讨论

2.1 水灰比对碱激发高钛重矿渣胶凝材料力学性能影响

水灰比试验过程中取水玻璃模数与浓度分别为 1.5 与 8%, 氢氧化钠浓度为 8%, 水灰比对胶凝材料的力学性能影响结果如图 2 所示。由图 2(a)可知, 采用水玻璃作碱激发剂, 在不同养护时间下, 随着水灰比的增大, 胶凝材料的抗压强度呈现出先快速增加后快速减小, 随着水灰比的进一步增加, 材料的抗压强度缓慢减小, 当水灰比为 0.5 时, 短期内(3、7 d)的抗压强度几乎为 0, 同时据试验观察可知, 此时的胶凝材料成流体态, 当水灰比为 0.32 时, 胶凝材料的抗压强度值最大。由图 2(b)可知, 采用 NaOH 作碱激发剂, 在不同养护时间下, 随着水灰比的增大, 胶凝材料的抗压强度先缓慢增加后缓慢减小, 当水灰比为 0.35 时, 抗压强度值最大。综上, 采用水玻璃作碱激发剂, 当水灰比为 0.32 时, 制备的胶凝材料力学性能最优; 采用 NaOH 作碱激发剂, 当水灰比为 0.35 时, 制备的胶凝材料力学性能最优, 后续开展的材料制备采取上述 2 个最佳水灰比。

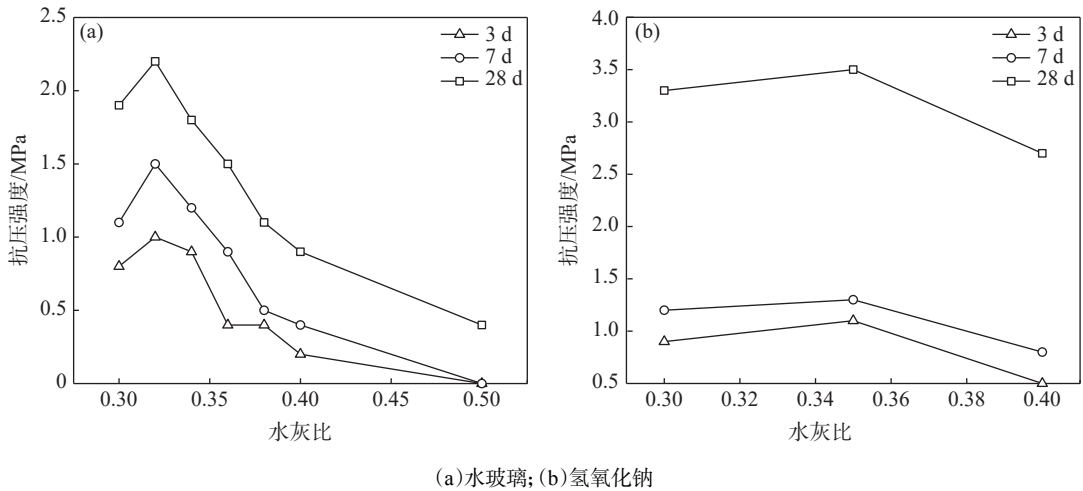


图 2 不同水灰比对胶凝材料力学性能影响
Fig. 2 Effects of water-cement ratio on properties of cementitious materials

2.2 不同碱激发剂对胶凝材料力学性能的影响

1) 水玻璃

水玻璃浓度和模数对胶凝材料力学性能的影响结果见图 3、4。由图 3 可知, 养护时间相同, 随着水玻璃浓度的增加, 不同水玻璃模数下的胶凝材料力学强度值均呈现出先增加后减小的趋势, 当水玻璃浓度为 6% 时, 模数 1 下的抗压强度值最大, 其中 3、7、28 d 的抗压强度值分别达到 2.1、7.4、13.5 MPa, 这表明碱激发矿渣基胶凝材料的力学性能在初期较低, 而随着养护时间的增加, 力学强度增加幅度较大, 这主要是因为高钛重矿渣重钙含量相对较低, 使得胶凝材料初期强度较低, 与众多的研究结果一致^[12]。随着养护时间的增加, 同等浓度下水玻璃材料的力学

性能随之增加, 其中 6% 浓度下的材料抗压强度值增加幅度最大, 这主要是因为在高模数情形下, 水玻璃能够提供足够的 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 与高钛重矿渣中的 Ca^{2+} 发生反应, 形成大量的 C-S-H 凝胶^[13], 当水玻璃浓度低于 6% 时, 砂浆体系中 OH^- 浓度较低, 致使水化反应程度较低, 随着浓度的增加, 砂浆体系中释放大量的 OH^- , 加速了矿渣颗粒玻璃体结构的破坏, 造成 Al-O-Al 与 Si-O-Si 化学键断裂, 从而生成大量的 C-S-H 凝胶^[14], 使得胶凝材料的力学强度增加。当水玻璃浓度超过 6% 时, 过量的 OH^- 造成矿渣矿相结构加速断裂, 水化反应迅速, 形成过量的水化产物凝胶, 在短时间内附着于矿渣颗粒表面, 严重阻碍后续水化反应进程, 致使胶凝材料体系强度下降^[15]。

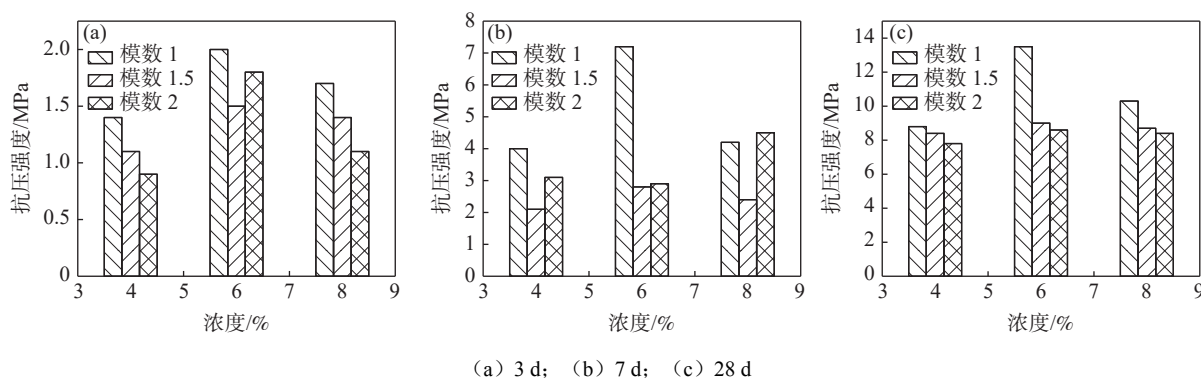


图 3 水玻璃浓度对胶凝材料性能影响

Fig. 3 Effect of sodium silicate concentration on properties of cementitious material

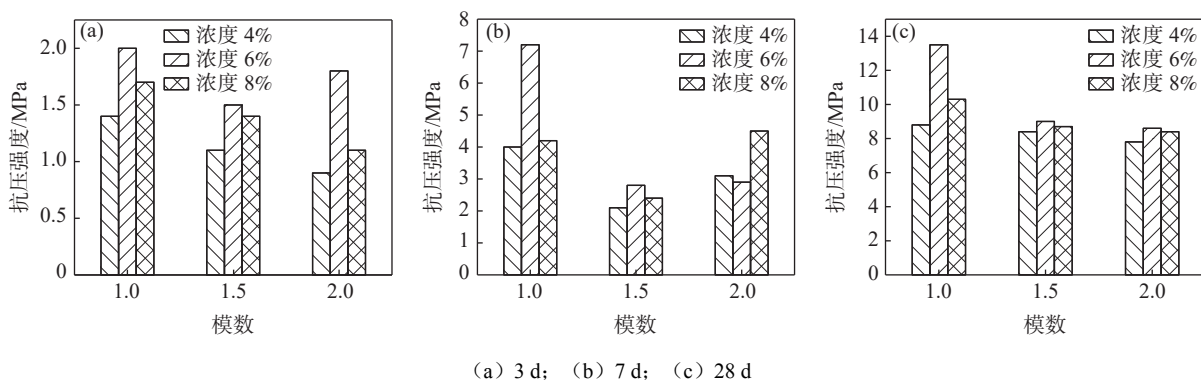


图 4 水玻璃模数对胶凝材料性能影响

Fig. 4 Effect of sodium silicate modulus on properties of cementitious material

由图 4 可知, 养护 3 d 时, 水玻璃浓度为 4% 与 8% 时, 随着水玻璃模数增加, 样品的抗压强度值均呈现减少的趋势, 水玻璃浓度为 6% 时, 随着水玻璃模数增加, 样品的抗压强度值先减小后增大, 但增大的幅度较小, 且样品的力学强度值均较小, 养护 7 d 时, 随着水玻璃模数增加, 样品抗压强度值均呈现出先降低后增大的趋势, 随着养护时间的进一步增加, 样品抗压强度值随着水玻璃模数增加而降低, 由于高钛重矿渣极低的水化活性, 养护初期的胶

凝材料力学性能较低; 当水玻璃模数为 1.0 时, 胶凝材料的抗压强度值最大, 这主要因为溶液中的 OH^- 浓度与模数成反比例关系, 随着水玻璃模数增加, OH^- 浓度降低, 阻碍了矿渣颗粒表面矿相结构的分解, 高浓度的 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 容易发生聚合反应, 致使与 Ca^{2+} 反应程度降低, 水化产物减少, 使得样品的抗压强度降低。

2) 氢氧化钠

不同浓度氢氧化钠激发高钛重矿渣胶凝材料力

学性能变化规律结果如图5所示,养护3、7 d时,随着氢氧化钠浓度的升高,胶凝材料的抗压强度值均呈现出缓慢降低的趋势,养护28 d时,胶凝材料的抗压强度值随着激发剂浓度的增加,呈现出先缓慢增加后降低的趋势,当浓度为6%时,28 d抗压强度值达到最大,但较水玻璃激发剂而言,此时的样品抗压强度值明显较低,这与普遍的研究结果一致,表明氢氧化钠的激发效果要远远低于水玻璃激发剂。碱激发高钛重矿渣胶凝材料中起激发效果的主要为 OH^- 离子,高钛重矿渣颗粒在 OH^- 离子作用下 Al-O-Al 与 Si-O-Si 键被破坏而被激活,之后发生聚合水化反应,而水玻璃在此过程中提供了大量的 $[\text{SiO}_4]^{4-}$,进一步促进了水化产物凝胶的形成,使得水玻璃激发高钛重矿渣反应加快,生成大量的C-S-H凝胶产物,提高了样品的力学性能。

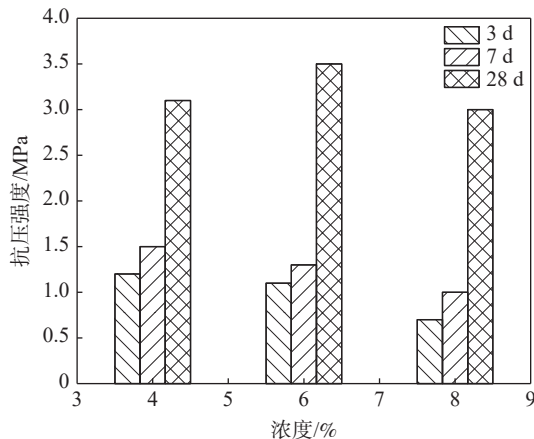


图5 氢氧化钠浓度对胶凝材料力学性能的影响

Fig. 5 Influence of sodium hydroxide concentration on mechanical properties of cementitious materials

2.3 物相与微观形貌分析

1) 物相分析

主要选取水玻璃激发高钛重矿渣胶凝材料,结合Jade6.0软件,相关分析结果如图6所示。由图6可知,水玻璃激发高钛重矿渣胶凝材料初期(3 d)就出现了明显的水化硅酸钙(C-S-H)峰,相关特征峰出现在扫描角度 29.8° 与 50.1° 处,表明该水玻璃激发高钛重矿渣胶凝材料的主要水化产物为C-S-H凝胶,同时伴有少量的水铝钙石晶体生成。随着养护时间的增加,C-S-H峰值衍射强度有明显增加,说明水化反应越彻底,产生的水化产物越多。当 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4.5$ 时,碱激发矿渣基胶凝材料的水化产物主要以C-S-H凝胶为主^[16],且C-S-H凝胶明显提高了碱激发高钛重矿渣胶凝材料的力学强度。

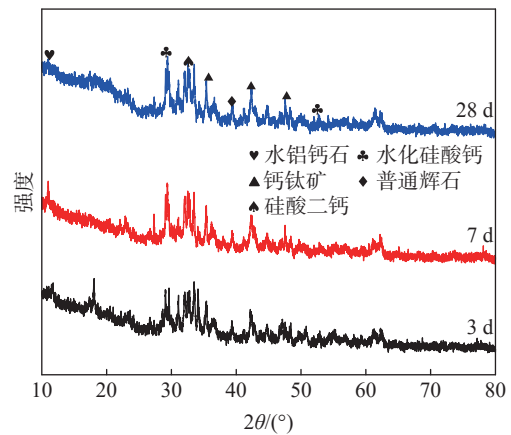
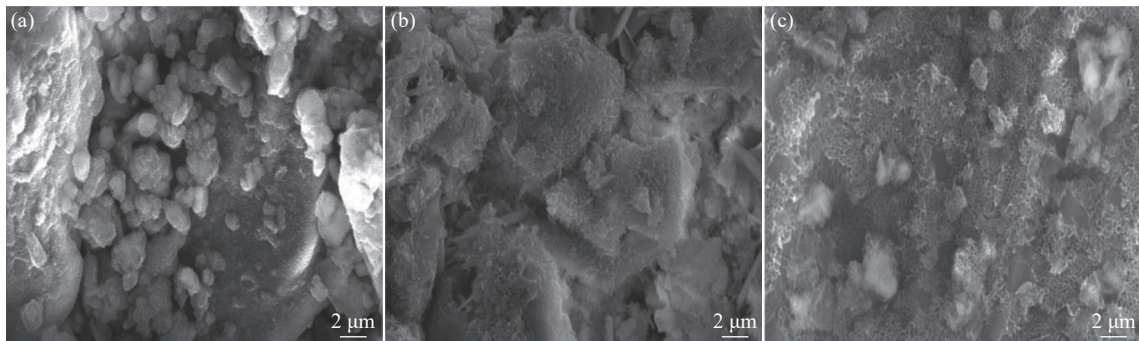


图6 不同养护期水玻璃激发高钛重矿渣胶凝材料 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of high-titanium heavy slag materials activated by sodium silicate during different curing periods

2) 微观形貌

取性能最佳的不同养护期水玻璃激发高钛重矿渣胶凝材料样品开展微观形貌测试分析,相关结果如图7所示。



(a) 3 d; (b) 7 d; (c) 28 d

图7 不同养护期水玻璃激发高钛重矿渣材料微观形貌

Fig. 7 Microscopic morphology of high-titanium slag activated by sodium silicate during different curing periods

如图7(a)所示,养护期3 d时,发现高钛重矿渣颗粒周边有少许的C-S-H凝胶状物质,大量的高钛

重矿渣颗粒并未参与水化反应,因此早期的胶凝材料强度值较低。养护期7 d时,大量的高钛重矿渣颗

粒表面覆盖了较多的 C-S-H 凝胶状物质,同时颗粒之间的孔隙明显减少,大量的 C-S-H 凝胶状物质缠绕着高钛重矿渣颗粒并充填孔隙,形成较致密的基质,使得胶凝材料的抗压强度值明显增大。随着养护时间的进一步增加,几乎看不到单独裸露在外的的高钛重矿渣颗粒,在材料体系内部形成大量的 C-S-H 凝胶状物质,持续充填基质内部孔隙与裂缝,形成致密的胶凝材料体系,使得抗压强度值进一步增加。

3 结论

1) 水玻璃与氢氧化钠激发剂作用下的最佳水

灰比分别为 0.32 与 0.35。

2) 水玻璃的最佳浓度与模数分别为 6% 与 1, 28 d 养护期的碱激发高钛重矿渣胶凝材料抗压强度值可达到 13.5 MPa, 氢氧化钠的最佳浓度为 6%, 28 d 养护期的碱激发高钛重矿渣胶凝材料抗压强度值为 3.5 MPa, 这也说明水玻璃对高钛重矿渣的激发效果要明显优于氢氧化钠, 初期样品的抗压强度值较低, 随着养护时间的增加, 后期样品的抗压强度值增长速度较快。

3) XRD 与 SEM 结果分析可知, 水玻璃激发高钛重矿渣形成的水化产物主要为 C-S-H 凝胶, 同时形成了少量的水铝钙石。

参考文献

- [1] HU Y, YIN S, LI K, *et al.* Comprehensive utilization of solid waste resources: Development of wet shotcrete for mines[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(9): 1692-1704.
- [2] ZAI X. Annual report on the prevention and control of environmental pollution by solid waste in large and medium cities in 2020[J]. Comprehensive utilization of resources in China, 2019, 39(1): 4.
(再协. 2020 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(01): 4.)
- [3] HE K, DENG Y, CAO Z, *et al.* Engineering performance and microscale structure of activated high titanium slag-soil-cement-bentonite (HTS-SCB) slurry backfill[J]. Construction and Building Materials, 2023, 373: 130776.
- [4] WANG H B, SUN Q Z, ZHANG X F, *et al.* Effect of trisodium phosphate on the preparation of microcrystalline foam glass from high-titanium blast furnace slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(4): 57-61.)
(王海波, 孙青竹, 张雪峰, 等. 磷酸三钠对高钛高炉渣制备微晶泡沫玻璃的影响[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(4): 57-61.)
- [5] YANG T Y, SHU B A, QIU W J, *et al.* Internal curing aggregate, shrinkage reducer and expansion agent cooperate to improve the volume stability of UHPC materials[J]. Concrete, 2023(12): 120-125.
(杨腾宇, 舒本安, 邱文俊, 等. 内养护集料、减缩剂与膨胀剂协同提升 UHPC 材料体积稳定性[J]. 混凝土, 2023(12): 120-125.)
- [6] TANG L Y, LI C H, LI W X, *et al.* Comprehensive utilization of solid waste resources in the cement industry in Sichuan Province and its impact on carbon emissions[J]. Sichuan Building Materials, 2024, 50 (4): 11-12+53
(唐丽英, 李春洪, 李文旭, 等. 四川省水泥行业固废资源综合利用情况及其对碳排放的影响[J]. 四川建材, 2024, 50 (4))
- [7] LI J, CHEN D B, YU Q J, *et al.* The reaction process of slag in different concentrations of sodium hydroxide solution[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52 (5): 1508-1519.
(李静, 陈东彬, 余其俊, 等. 矿渣在不同浓度氢氧化钠溶液中的反应过程[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52 (5): 1508-1519.)
- [8] ZHANG S F, NIU D T, LUO D M, *et al.* Activation and mechanism of activator on steel slag cement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(1): 165-172.
(张少峰, 牛荻涛, 罗大明, 等. 激发剂对钢渣水泥的活化及作用机理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(1): 165-172.)
- [9] YANG H, CHEN W, MA S S, *et al.* Experimental study on the mechanical properties of high-titanium heavy slag tunnel shotcrete concrete[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(3): 118-122.
(杨贺, 陈伟, 马双狮, 等. 高钛重矿渣隧道喷射混凝土力学性能试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 118-122.)
- [10] LIANG H Z, CHEN W, YANG H. Experimental study on the durability of high-titanium heavy slag concrete under salt-frost action[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(4): 100-106.
(梁贺之, 陈伟, 杨贺. 盐冻作用下高钛重矿渣混凝土耐久性试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(4): 100-106.)
- [11] CHEN J X, LI H F, CHEN H B, *et al.* Study on ultra-high-strength concrete with addition of ultrafine limestone powder and titanium slag powder[J]. Journal of Building Materials, 2005, (6): 672-676.
(陈剑雄, 李鸿芳, 陈寒斌, 等. 掺超细石灰石粉和钛矿渣粉超高强混凝土研究[J]. 建筑材料学报, 2005, (6): 672-676.)
- [12] OBENAU R, FALAH M, ILLIKAINEN M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications[J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118470.
- [13] CHI M, HUANG R. Effects of dosage and modulus ratio of alkali-activated solution on the properties of slag mortars[J]. Advanced Science Letters, 2012, 16(1): 7-12.
- [14] CHEN T A, CHEN J H, HUANG J S. Effects of activator and aging process on the compressive strengths of alkali-activated glass inorganic binders[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 76: 1-12.
- [15] PROVIS J L. Alkali-activated materials[J]. Cement and concrete research, 2018, 114: 40-48.
- [16] WANG S D, SCRIVENER K L. Hydration products of alkali activated slag cement[J]. Cement and Concrete research, 1995, 25(3): 561-571.