海水拌合下高流态矿渣-脱硫石膏碱激发充填材料早期性能与水化机理研究*

刘新伟[1],任皎龙[2],赵洪波[2]

(1.山西工程科技职业大学 建筑工程学院, 山西 晋中市 030619;
2.山东理工大学 建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博市 255000)

摘要:以高流态矿渣-脱硫石膏复合碱激发充填材料(HSD-AAM)为研究对象,分析了海水质量浓度对其凝结时间、流动性、强度的影响,进而通过SEM、XRD和TG-DSC试验揭示了HSD-AAM早期水化机理。结果表明:随着海水质量浓度的增加,HSD-AAM凝结时间缩短、流动性降低、抗折强度及抗压强度提高。与纯净水拌合条件相比,100%质量浓度海水拌合下HSD-AAM流动时间降低了约12%,初凝和终凝时间缩短了约28%和27%,养护1 d时抗折强度和抗压强度分别提高了约18%和19%,养护7 d时抗折强度和抗压强度分别提高了约27%和17%。海水能够加速C-(A)-S-H凝胶、AFt和Friedel盐的水化进程,且碱激发剂能够加快前驱体与氯离子之间的水化反应,从而提升HSD-AAM早期强度。

关键词:海水拌合;高流态矿渣-脱硫石膏碱激发充填材料(HSD-AAM);力学性能;水化产物;微观形貌

中图分类号:TD98 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)04-0070-08

Study on the Early Performance and Mechanism of High-Fluidity Slag and Desulfurization Gypsum Alkali-Activated Filling Material Under Seawater Mixing

LIU Xinwei[1], *REN Jiaolong*[2], *ZHAO Hongbo*[2]

(1.College of Architectural Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong, Shanxi 030619, China;
2.School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: Taking high-fluidity slag and desulfurization gypsum alkali-activated filling material (HSD-AAM) as the research object, the influence of seawater mass concentration on its setting time, flowability and strength was analyzed. Furthermore, the early hydration mechanism of HSD-AAM was revealed through SEM, XRD and TG-DSC tests. The results show that with the increase of seawater mass concentration, the setting time of HSD-AAM shortened, the flowability decreased, and the flexural and compressive strength increased. Compared with the mixing conditions of pure water, when mixed with seawater of 100% mass concentration, the flow time of HSD-AAM is decreased by about 12%, the initial and final setting time are shortened by about 28% and 27%, the flexural strength and compressive strength are increased by about 18% and 19% respectively after curing for 1 day, and the flexural strength and compressive strength are increased by about 27% and 17% respectively after curing for 7 days. Seawater can accelerate the hydration process of C-(A)-S-H, AFt and Friedel salt, alkali activator can accelerate the hydration reaction between precursor and chloride ion, thus improving the early strength of HSD-AAM.

Key words: Seawater mixing, High-fluidity slag and desulfurization gypsum alkali-activated filling material (HSD-AAM), Mechanical property, Hydration product, Microstructure

0 引言

碱激发材料是一类新型矿山充填、工程修复材料,由前驱体(粉煤灰、矿渣、赤泥和石膏等工业固体废弃物[1-4])、碱性激发剂(氢氧化钠、氢氧化钾、硅酸钠等)和水化反应制备而成,其具有强度形成早、抗

* **收稿日期**:2024-12-18
基金项目:国家自然科学基金项目(42377174)
作者简介:刘新伟(1988—),女,北京人,硕士,讲师,主要研究方向为碱激发材料水化机理。E-mail:liuxinwei880@163.com
通信作者:任皎龙(1985—),男,山东青岛人,博士,副教授,主要研究方向为新型胶凝材料研发。E-mail:worjl@sdut.edu.cn

酸碱腐蚀性强、渗透性低和耐热性佳等优点[5-8]，且 CO_2 排放量仅为水泥基充填材料的五分之一，环境效益显著。毕颖等[9]研究表明，碱激发充填材料性能优于传统水泥基充填材料，可用于矿山建设。李公成等[10]认为碱激发充填材料具有资源化利用范围广、应用过程能耗低等优势，有潜力成为水泥基充填材料的替代品。

与水泥基充填材料相同，拌合水对碱激发充填材料性能具有重要影响[11]。碱激发充填材料通过水化反应，逐渐凝结硬化，形成具有强度的硬性材料。然而，在实际工程中，由于现场施工条件不足或工程工期限制，施工人员会就地取材，采用非常规水源拌合[12]。海水便是近年来在近海工程中常采用的特殊拌合水，并在水泥基材料的研究中受到持续关注。廖宜顺等[13]分析了海水拌合下铁铝酸盐水泥浆体物理特性，发现海水使得水泥浆体的流动度降低，凝结时间缩短。王传林等[14]研究了海水对硅酸盐水泥水化过程的影响，认为海水作为拌和水能够促进硅酸盐水泥的早期水化反应，并提高水泥石密实度。QU 等[15]、周芬等[16]、吴毅彬等[17]分别就海水拌合下水泥基材料的抗压承载力、抗弯性能和抗剪性能展开了分析，结果表明，海水能不同程度地提升混凝土各项力学性能指标，这主要是由于海水中的氯离子和硫酸盐离子会增加混凝土中 Friedel 盐和钙矾石的含量。WANG 等[18]、LI 等[19]研究发现，海水对水泥浆体的抗压和抗弯强度有早期增强的作用。

上述研究表明，海水有别于传统拌合水源，会对水泥基材料性能和水化机理产生显著影响。碱激发充填材料作为水泥基材料的潜在替代品，在工程应用中也会面临非常规拌合水的挑战。然而，海水拌合对碱激发充填材料物理力学性能的影响及其作用机理在现有研究中尚未涉及，这无疑影响了碱激发充填材料在近海矿业工程中的推广应用。

因此，本文以高流态矿渣-脱硫石膏复合碱激发充填材料（HSD-AAM）为对象，研究了海水质量浓度对该材料早期物理力学性能（流动性、凝结时间、抗折及抗压强度）的影响，并通过扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射仪（XRD）和差示扫描量热仪（TG-DSC）等方法分析了不同养护龄期和海水浓度下 HSD-AAM 水化产物的微观结构变化规律，揭示了海水拌合下 HSD-AAM 的早期水化机理。

1 原材料和方法

1.1 原材料

HSD-AAM 由前驱体、碱激发剂和拌合水通过水化作用制备而成，其配合比见表 1。

前驱体包括 S95 级矿渣粉、粉煤灰、脱硫石膏、氢氧化钙、纳米 SiO_2。其中，纳米 SiO_2 比表面积为 240 m^2/g，粒径为 20 nm；氢氧化钙的密度和纯度分别为 2.24 g/cm^3 和 95%。各材料化学成分组成见表 2。

碱激发剂包括氢氧化钠、水玻璃。其中，水玻璃 SiO_2 和 Na_2O 的质量分数分别为 49.8%和 25.4%，模数为 2.0。本研究所采用碱激发剂的碱掺量为 3.5%，SiO_2 与 Na_2O 的摩尔比为 1.1。

拌合水采用纯净水（海水质量浓度为 0%，记为 SW0）、50%质量浓度的海水（记为 SW0.5）、标准浓度海水（质量浓度为 100%，记为 SW1.0）3 种类型。采用纯净水与化学溶剂按比例配置而成，其化合物组成及含量见表 3。

表 1 HSD-AAM 配合比

Table 1 Mix proportion of HSD-AAM

矿渣粉/g	粉煤灰/g	氢氧化钙/g	脱硫石膏/g	纳米 SiO_2/g	水玻璃/g	氢氧化钠/g	水/g
308.57	35.04	27.00	100.16	4.23	34.65	6.71	225.00

表 2 原材料化学成分组成

Table 2 Chemical composition of raw materials %

材料	CaO	SiO_2	Al_2O_3	SO_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	其他
矿渣粉	34.00	34.50	17.700 0	1.64	1.030	6.01	—	—	—	5.120 0
粉煤灰	10.00	40.00	30.000 0	—	4.200	2.50	1.10	—	—	12.200 0
脱硫石膏	31.12	0.57	0.770 0	44.44	0.220	0.22	0.17	0.07	—	24.420 0
纳米 SiO_2	—	99.90	0.003 1	—	0.002	—	—	—	0.002	0.092 9

表 3 模拟海水的化合物组成

Table 3 Chemical composition of simulated seawater

成分	含量/(g/L)
NaCl	24.530
$MgCl_2$	5.200
Na_2SO_4	4.090
$CaCl_2$	1.160
KCl	0.695
$NaHCO_3$	0.201
KBr	0.101
H_3BO_3	0.027
$SrCl_2$	0.025
NaF	0.003

1.2 试验方法

(1) 物理力学性能试验。按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020),分析 HSD-AAM 的流动时间、凝结时间以及不同养护龄期下(1 d、3 d、7 d)的抗折强度和抗压强度,评价其物理力学性能。

(2) XRD 试验。通过 XRD 试验分析 HSD-AAM 水化产物的种类,试验扫描速度为 10°/min,扫描角度范围为 10°~60°。

(3) TG-DSC 试验。通过 TG-DSC 试验分析 HSD-AAM 中各水化产物含量,试验温度范围为 30~600 ℃,加热速率为 10 ℃/min,气体环境为氮气。

(4) SEM 试验。通过 SEM 试验观测 HSD-AAM 的微观形貌,试验设备超低电压分辨率为 0.9 nm,工作电压为 500 kV。

2 物理力学性能试验

2.1 流动性试验分析

不同海水质量浓度下 HSD-AAM 的流动时间试验结果见表 4。

表 4 海水质量浓度对 HSD-AAM 流动性的影响

Table 4 Effect of seawater mass concentration on fluidity of the HSD-AAM

试样	流动时间/s
SW0	11.17
SW0.5	12.05
SW1.0	12.46

由表 4 可知,HSD-AAM 流动性会随着海水质量浓度的增加而降低。与纯净水拌合相比,使用 100%质量浓度海水拌合的 HSD-AAM 流动时间降低了约 12%。这表明海水中盐类离子会增加浆体黏度,导致 HSD-AAM 流动性降低。

2.2 凝结时间试验分析

不同海水质量浓度下 HSD-AAM 的初凝和终凝时间试验结果如图 1 所示。

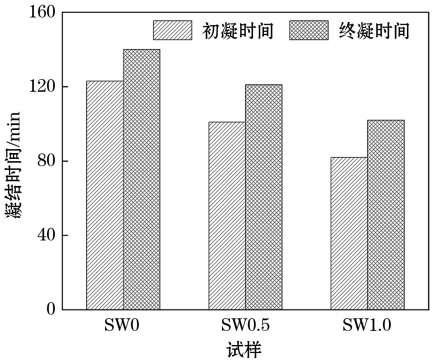


图 1 海水质量浓度对 HSD-AAM 凝结时间的影响

Fig.1 Effect of seawater mass concentration on setting time of the HSD-AAM

由图 1 可知,HSD-AAM 的初凝时间和终凝时间均随海水质量浓度的升高而逐渐缩短。与纯净水拌合相比,使用 100%质量浓度海水拌合的 HSD-AAM 的初凝时间和终凝时间分别缩短了约 28%和 27%。这是由于在碱性环境下,海水中的离子促进了早期水化进程,加快了凝结硬化速率,从而缩短了 HSD-AAM 的凝结时间。

2.3 强度试验分析

不同海水质量浓度下 HSD-AAM 抗折强度和抗压强度试验结果如图 2 所示。

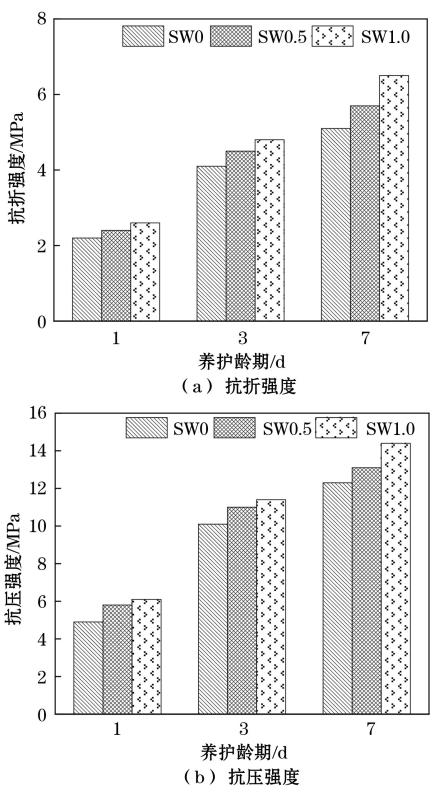


图 2 海水质量浓度对 HSD-AAM 强度的影响

Fig.2 Effect of seawater mass concentration on strength of the HSD-AAM

为直观分析海水质量浓度对 HSD-AAM 强度的影响，计算得到不同海水质量浓度下 HSD-AAM 强度与纯净水拌合条件下基准强度的比值，见表 5。

表 5　不同海水质量浓度下 HSD-AAM 强度比

Table 5　Strength ratio of HSD-AAM under different seawater mass concentrations

试样	抗折强度变化率			抗压强度变化率		
	养护 1 d	养护 3 d	养护 7 d	养护 1 d	养护 3 d	养护 7 d
SW0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
SW0.5	1.09	1.10	1.12	1.13	1.09	1.07
SW1.0	1.18	1.17	1.27	1.19	1.13	1.17

由图 2 和表 5 可知，海水质量浓度的增加可以显著提高 HSD-AAM 的抗折强度和抗压强度，且对抗折强度的影响更为显著。同时，随着养护龄期的增长，海水对抗折强度的提升作用愈加强烈。与纯净水拌合相比，使用 100% 质量浓度海水拌合的 HSD-AAM，在 1 d、3 d、7 d 养护龄期下的抗折强度分别提高了约 18%、17%、27%，而抗压强度分别提高了约 19%、13%、17%。上述强度提升现象与海水中离子参与水化反应相关，具体作用机理将结合微观试验数据进一步分析。

3　水化产物分析

3.1　XRD 试验结果

不同养护龄期和海水质量浓度下的 HSD-AAM 的 XRD 衍射谱如图 3 所示。

由图 3 可知，HSD-AAM 中的主要水化产物有氢氧化钙（$Ca(OH)_2$）、AFt（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$）、AFm（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 12H_2O$）、C-(A)-S-H（$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$）、石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）、Friedel 盐（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$）。各水化产物反应方程式见式(1)至式(6)。

$$CaO+H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \tag{1}$$

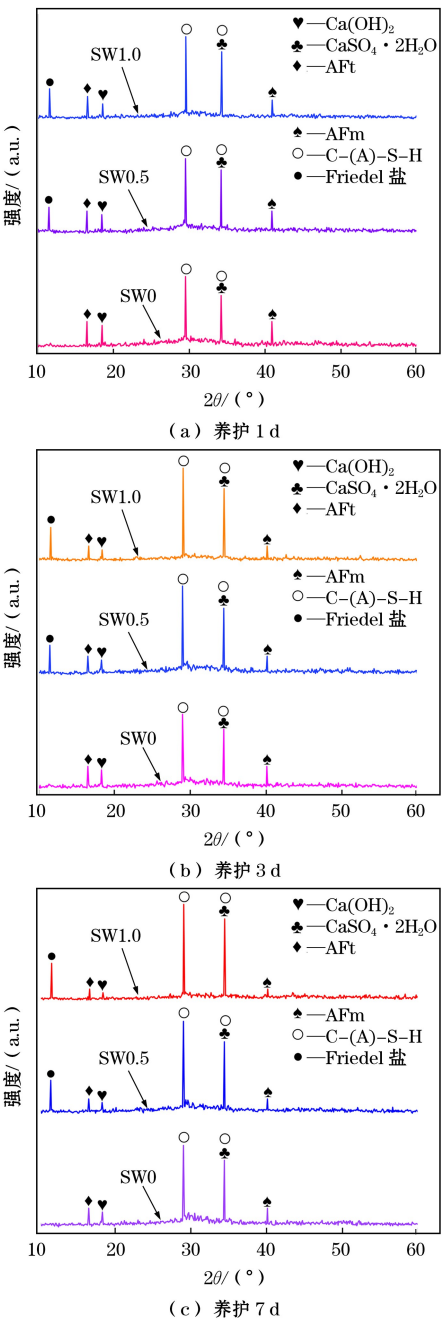
$$3CaO \cdot Al_2O_3+3(CaSO_4 \cdot 2H_2O)+26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \tag{2}$$

$$2(3CaO \cdot Al_2O_3)+3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O+4H_2O \rightarrow 3(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O) \tag{3}$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3+6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O \tag{4}$$

$$3CaO \cdot SiO_2+nH_2O \rightarrow xCaO \cdot SiO_2 \cdot yH_2O+(3-x)Ca(OH)_2 \tag{5}$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3+Ca(OH)_2+2Cl^-+10H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O+2OH^- \tag{6}$$



（a）养护 1 d

（b）养护 3 d

（c）养护 7 d

图 3　HSD-AAM 的 XRD 衍射图谱

Fig.3　XRD patterns of the HSD-AAM

由式(1)、式(2)和式(3)可知，CaO 与水反应生成 $Ca(OH)_2$ 晶体，$3CaO \cdot Al_2O_3$（C_3A）与水和石膏反应生成 AFt，C_3A 和 AFt 反应生成 AFm，这些水化产物为浆体的早期强度提供了积极影响。结合图 3 可知，随着养护龄期的增长，$Ca(OH)_2$、AFt 及 AFm 的衍射峰均呈下降趋势，说明 $Ca(OH)_2$、AFt 及 AFm 随养护龄期的增长持续消耗。相反，C-(A)-S-H

凝胶衍射峰明显增加,即 C_3A 及($3CaO \cdot SiO_2$)C_3S 经水化反应后形成 C-(A)-S-H 凝胶,化学反应过程见式(4)及式(5)。C-S-H 凝胶的出现是 HSD-AAM 强度升高的主要来源,同时借助 C-S-H 骨架还能发育出 C-A-S-H 凝胶。两种凝胶共同作用,使 HSD-AAM 强度逐渐提升,这与强度试验的结果一致。

在 SW0.5 和 SW1.0 试样的 XRD 图谱中观察到,衍射角为 11.5°时出现新的衍射峰。该峰是海水中氯离子与浆体中反应产物($Ca(OH)_2$ 晶体、C_3A 等)发生化学反应,生成 Friedel 盐,化学反应方程式见式(6),这是纯净水拌合与海水拌合条件下 HSD-AAM 中水化产物最明显的区别。现有研究发现,海水拌合水泥基材料中,Friedel 盐通常生成于养护 7 d 后[20],而对于本文研究的碱激发充填材料,Friedel 盐在养护 1 d 时即会出现,这是由于碱激发剂提供的碱性环境能够加快前驱体与氯离子之间的水化反应,使 Friedel 盐的形成时间大幅度提前,这也是碱激发充填材料与传统水泥基材料最显著的不同之处。由此可以推断,碱激发充填材料早期强度发展速度显著高于传统水泥基材料。此外,不同养护龄期下,Friedel 盐的衍射峰均有较高强度,说明 Friedel 盐对于不同养护龄期下的碱激发充填材料强度均具有积极作用。

3.2 TG-DSC 试验结果

在不同养护龄期和海水质量浓度下的 HSD-AAM 的 TG-DSC 曲线如图 4 所示。图中上侧 3 条曲线为质量曲线,下侧 3 条曲线为差热曲线。

在 TG-DSC 曲线中可以观察到几个失重峰,这是由 HSD-AAM 中水化产物脱水分解造成的。第一个失重峰位于 30~200 ℃区间,对应于 C-(A)-S-H 凝胶和 AFt 的脱水分解;第二个失重峰位于 400~500 ℃区间,主要是因为 $Ca(OH)_2$ 分解为 $CaO+H_2O$ 或 $Mg(OH)_2$ 分解为 $MgO+H_2O$;第三个失重峰在 500 ℃以上,主要是由 M-S-H 凝胶脱水分解造成的。

当养护 1 d 时,SW0 试样第一个失重峰强度低于 SW0.5 和 SW1.0 试样,即 SW0 试样中 AFt 含量小于 SW0.5 和 SW1.0 试样,说明海水能够加速 HSD-AAM 中 AFt 的形成。此时,SW0.5 试样和 SW1.0 试样第一个失重峰强度相差不大。当养护龄期为 3 d 和 7 d 时,SW0.5 试样第一个失重峰强度明显低于 SW1.0 试样。这一现象说明海水质量浓度的提升能够促进 C-(A)-S-H 凝胶的形成,使得 SW1.0 试样强度较高。

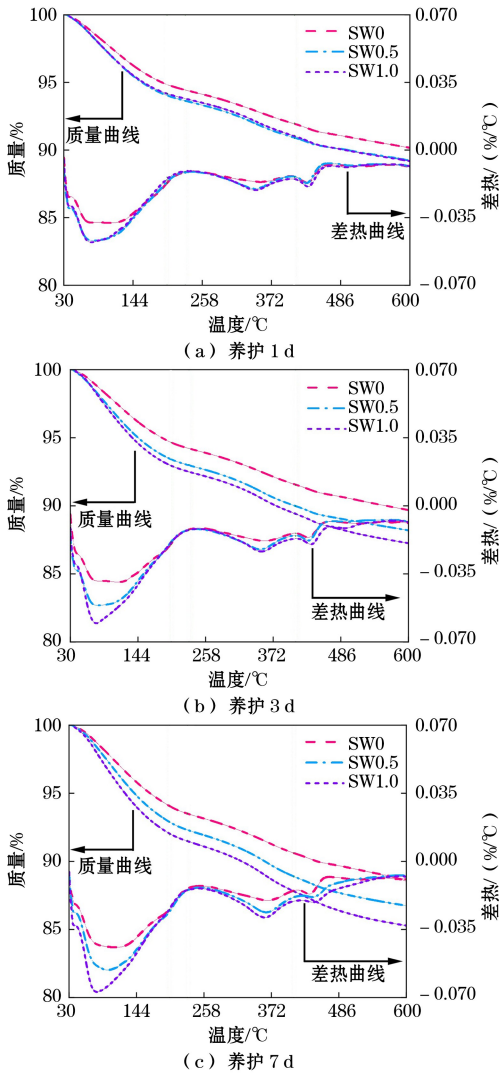


图 4 HSD-AAM 的 TG-DSC 曲线

Fig.4 TG-DSC curves of HSD-AAM

SW0、SW0.5 和 SW1.0 试样的第二个和第三个失重峰在不同养护龄期下的强度差异均不显著,说明海水对 $Ca(OH)_2$ 和 $Mg(OH)_2$ 的水化进程影响不大。

此外,SW0.5 和 SW1.0 试样在 230~400 ℃区间出现了一个新的失重峰,该峰对应于 Friedel 盐的分解。在养护龄期从 1 d 增加到 7 d 的过程中,SW0.5 和 SW1.0 试样的 Friedel 盐失重峰强度逐渐增加,表明 Friedel 盐随着养护龄期的延长会持续生成,为 SW0.5 和 SW1.0 试样提供额外的强度,即与纯净水拌合相比,海水拌合条件下的 HSD-AAM 强度的优势会随养护龄期增长而愈加明显。

根据 TG-DSC 曲线及 Friedel 盐的晶体结构,

得到 Friedel 盐的质量分数计算公式如下。

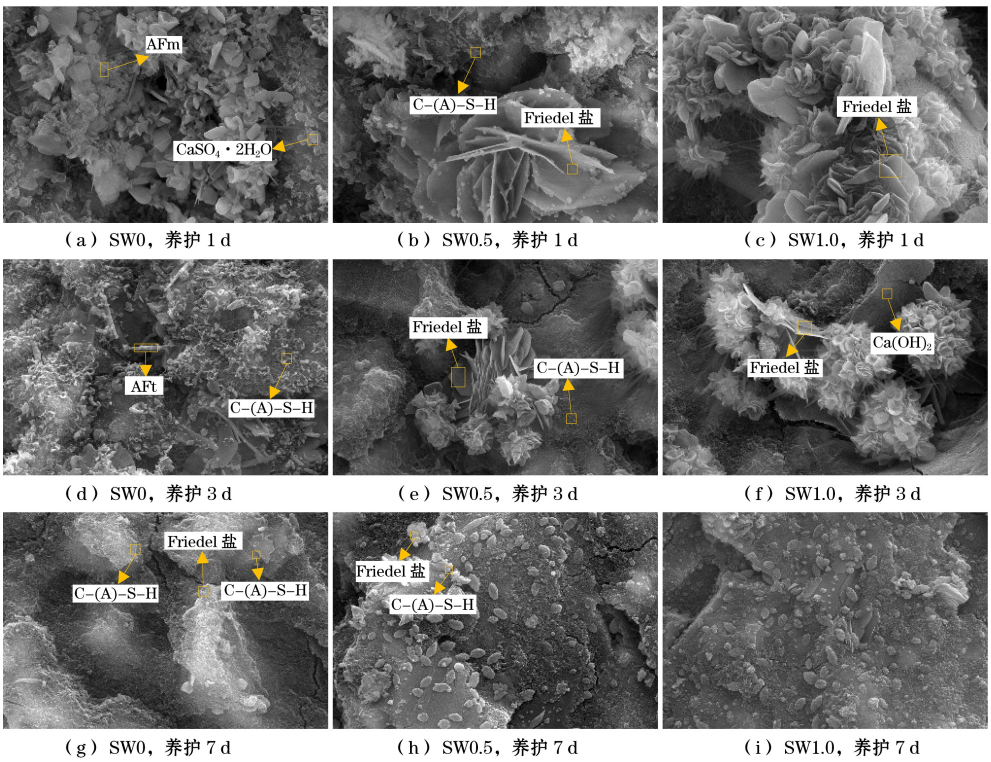
$$m_F = \frac{M_F}{6M_H} m_H \tag{7}$$

式中：m_F 为 Friedel 盐的质量分数，%；M_F 和 M_H 分别为 Friedel 盐和水的摩尔质量，分别取 561.30 g/mol、18.02 g/mol；m_H 为 Friedel 盐中的质量分数，%。

由式(7)计算得出，养护龄期为 7 d 时，SW0.5 试样中 Friedel 盐的质量分数为 8.91%，SW1.0 试样中 Friedel 盐的质量分数为 14.58%。说明海水质量浓度越高，Friedel 盐的生成量越多，表现为 HSD-AAM 强度越高。

4　微观特征分析

在不同养护龄期和海水质量浓度下，HSD-AAM 的微观形貌如图 5 所示。



(a) SW0，养护 1 d　(b) SW0.5，养护 1 d　(c) SW1.0，养护 1 d

(d) SW0，养护 3 d　(e) SW0.5，养护 3 d　(f) SW1.0，养护 3 d

(g) SW0，养护 7 d　(h) SW0.5，养护 7 d　(i) SW1.0，养护 7 d

图 5　不同养护龄期和海水质量浓度下 HSD-AAM 的微观形貌

Fig.5　Microstructures of HSD-AAM under different seawater mass concentrations and curing ages

由图 5 可以看出，养护龄期为 1 d 时，SW0 试样微观结构中包含片状的 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 和针状的 AFm；SW0.5 和 SW1.0 试样中则可观测到新物质 Friedel 盐，其形态为堆叠在一起的六边形片状晶体。

养护龄期为 3 d 时，SW0 试样中可观察到粗棒状的 AFt 和絮状 C-S-H 凝胶；同时，在 SW0.5 和 SW1.0 试样中可继续观察到 $Ca(OH)_2$ 和 Friedel 盐，说明水化进程仍在继续。

养护龄期为 7 d 时，SW0、SW0.5 和 SW1.0 试样中的 C-(A)-S-H 凝胶均明显增加，孔隙率降低且结构致密。该微观结构演化特征与材料宏观强度随着养护龄期的增长规律一致。

SW0.5 和 SW1.0 试样中，在各养护龄期均可观测到 Friedel 盐，且其含量随着养护龄期的延长而增多。同时，SW0.5 和 SW1.0 试样中 C-(A)-S-H 凝胶形成速度和数量均高于 Friedel 盐，致使 Friedel 盐外表面被 C-(A)-S-H 凝胶包裹。

5　结论

本文研究了海水质量浓度对高流态矿渣-脱硫石膏复合碱激发充填材料(HSD-AAM)早期物理力学性能(凝结时间、流动性、强度)、水化产物和微观结构的影响，并揭示了 HSD-AAM 水化机理，得出以下主要结论。

(1) 随着海水质量浓度的增加，HSD-AAM 凝结时间缩短、流动性降低。与纯净水拌合条件相比，使用 100%质量浓度海水拌合的 HSD-AAM 的初

凝和终凝时间分别缩短了约 28% 和 27%,流动时间降低了约 12%。

(2) 随着海水质量浓度的增加,不同养护龄期下,HSD-AAM 的抗折强度和抗压强度均显著提升,以抗折强度尤为明显。与纯净水拌合条件相比,使用 100%质量浓度海水拌合的 HSD-AAM 在 1 d、3 d 和 7 d 养护龄期下的抗折强度分别提高了约 18%、17%和 27%,抗压强度分别提高了约 19%、13% 和 17%。

(3) C-(A)-S-H 凝胶、AFt 和 Friedel 盐等水化产物是海水拌合下 HSD-AAM 强度形成的主要来源,海水能够加速 HSD-AAM 的水化进程,从而提升其早期强度。但海水对 $Ca(OH)_2$ 晶体的形成和消耗影响不大。

(4) 与传统水泥基材料相比,碱激发剂提供的碱性环境能够加快前驱体与氯离子之间的水化反应,使 Friedel 盐形成时间大幅度提前。因此,碱激发充填材料的早期强度发展速度显著高于传统水泥基材料。

参考文献(References):

[1] 孙开强,刘琳,郑葆陈.碱激发矿渣-粉煤灰胶凝材料力学性能影响因素分析[J].硅酸盐通报,2024,43(9):3313-3319.
SUN Kaiqiang, LIU Lin, ZHENG Hongchen. Analysis of influencing factors on mechanical properties of alkali-activated slag-fly ash binder materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2024,43(9):3313-3319.

[2] 余梦龙,李进,谢剑凯,等.铜选矿废水对碱激发粉煤灰/矿渣胶凝材料性能的影响[J].功能材料,2024,55(3):3165-3169+3183.
YU Menglong, LI Jin, XIE Jiankai, et al. Effect of copper mining wastewater on the properties of alkali-activated fly ash/slag cementitious materials[J]. Journal of Functional Materials,2024,55(3):3165-3169+3183.

[3] 邱俊,阎正卿,杨威,等.赤泥脱碱活化及在胶凝材料中的应用[J].应用化工,2024,53(6):1421-1426.
QIU Jun, YAN Zhengqing, YANG Wei, et al. Research progress on dealkalization and activation of red mud and its application in cementitious materials[J]. Applied Chemical Industry,2024,53(6):1421-1426.

[4] 张兰芳,宋松松,梁秋爽.石膏掺量对碱激发矿渣水泥砂浆性能的影响[J].应用化工,2020,49(9):2168-2172+2177.
ZHANG Lanfang, SONG Songsong, LIANG Qiushuang. Effect of gypsum content on properties of alkali-activated slag cement mortar[J]. Applied Chemical Industry,2020,49(9):2168-2172+2177.

[5] 贺盛,杨红涛,韦海浪,等.碱激发污泥灰-偏高岭土胶砂孔结构与强度关系[J].广西大学学报(自然科学版),2023,48(6):1340-1351.
HE Sheng, YANG Hongtao, WEI Hailang, et al. Relation between pore structure and strength of alkaline activated sewage sludge ash-metakaolin mortar [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2023,48(6):1340-1351.

[6] 张洁林,梅军鹏,李海南,等.二元体系碱激发胶凝材料抗硫酸盐侵蚀性能研究[J].功能材料,2023,54(2):2197-2203.
ZHANG Jielin, MEI Junpeng, LI Hainan, et al. Study on sulfate resistance of alkali-activated cementitious materials in binary system[J]. Journal of Functional Materials,2023,54(2):2197-2203.

[7] ZHANG Peng, WANG Kexun, LI Qingfu, et al. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders:a review[J]. Journal of Cleaner Production,2020,258:120896.

[8] HASSAN H, EL-GAMAL S M A, SHEHAB M S H, et al. Development of green ternary-blended-geopolymers for multifunctional engineering applications[J]. Construction and Building Materials,2023,409:133869.

[9] 毕颖,赵文斌.磷石膏-水泥基复合充填材料的综合性能和细观水化机理[J].矿业研究与开发,2024,44(6):89-94.
BI Ying, ZHAO Wenbin. Comprehensive performance and microscopic hydration mechanism of phosphogypsum-cement based composite filling material[J]. Mining Research and Development,2024,44(6):89-94.

[10] 李公成,刘国磊,何国志,等.不同水化环境的水泥基固废充填材料性能研究[J].矿业研究与开发,2024,44(6):72-80.
LI Gongcheng, LIU Guolei, HE Guozhi, et al. Study on the performance of cement-based solid waste filling materials in different hydration environments[J]. Mining Research and Development,2024,44(6):72-80.

[11] LIANG Guanwei, YAO Wu, WEI Yongqi. A green ultra-high performance geopolymer concrete containing recycled fine aggregate:mechanical properties, freeze-thaw resistance and microstructure[J]. Science of The Total Environment,2023,895:165090.

[12] 侯卫星,秦磊,郭盼盼,等.海水-海砂混凝土研究进展[J].济南大学学报(自然科学版),2024,38(2):184-193.
HOU Weixing, QIN Lei, GUO Panpan, et al. Research progress on seawater-sea sand concrete [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology),2024,38(2):184-193.

[13] 廖宜顺,叶建,汤盛文.海水拌和与偏高岭土对铁铝酸盐水泥水化的影响[J].硅酸盐学报,2023,51(11):2834-2845.
LIAO Yishun, YE Jian, TANG Shengwen. Effect of mixing with seawater and metakaolin on hydration of ferroaluminate cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2023,51(11):2834-2845.

[14] 王传林,刘泽平,张腾腾,等.海水及养护方式对硅酸盐水泥性能的影响[J].材料导报,2022,36(10):74-80.
WANG Chuanlin, LIU Zeping, ZHANG Tengteng, et al. Influence of seawater and curing conditions on the hydration performance of Portland cement[J]. Materials Reports, 2022,36(10):74-80.

[15] QU Fulin, LI Wengui, WANG Kejin, et al. Effects of seawater and undesalted sea sand on the hydration products, mechanical properties and microstructures of cement mortar [J]. Construction and Building Materials,2021,310:125229.

[16] 周芬,李丽娟,彭飞,等.B/CFRP筋海水海砂活性粉末混凝土梁抗弯性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(9):145-154.
ZHOU Fen, LI Lijuan, PENG Fei, et al. Study on flexural behavior of seawater sea-sand reactive powder concrete beams reinforced with B/CFRP bars[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2024,51(9):145-154.

[17] 吴毅彬,叶勇,余林康,等.衬塑钢管海水海砂混凝土组合构件受弯性能研究[J].地震工程与工程振动,2024,44(3):84-95.
WU Yibin, YE Yong, YU Linkang, et al. Study on flexural behavior of seawater sea-sand concrete filled plastic-lined steel tube composite members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2024,44(3):84-95.

[18] WANG Junjie, XIE Jianhe, WANG Yuli, et al. Rheological properties, compressive strength, hydration products and microstructure of seawater-mixed cement pastes[J]. Cement and Concrete Composites,2020,114:103770.

[19] LI Weiwen, JIANG Zhilu, LU Meiyuan, et al. Effects of seawater, NaCl, and Na_2SO_4 Solution mixing on hydration process of cement paste[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2021,33(5):0003673.

[20] WANG Junjie, LIU Engui, LI Liang. Multiscale investigations on hydration mechanisms in seawater OPC paste [J]. Construction and Building Materials,2018,191:891-903.