

# 黄河泥沙对水泥材料性能及微结构的影响

韩璐<sup>1</sup>,周爱平<sup>1</sup>,孙柯<sup>2</sup>,万田涛<sup>2</sup>,隋高阳<sup>3</sup>,葛智<sup>2</sup>,张洪智<sup>2\*</sup>

(1.山东黄河河务局滨州黄河河务局,山东 滨州 256601; 2.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002; 3.山东省水利勘测设计院有限公司,山东 济南 250013)

**摘要:**为研究黄河泥沙对水泥材料性能的影响,采用黄河泥沙部分替代水泥制备砂浆,研究泥沙质量分数对砂浆流动度、凝结时间、力学性能的影响,并通过微观试验分析泥沙对水泥水化过程、水化产物和微观结构的影响。结果表明:泥沙的掺入导致浆体凝结时间缩短、流动性降低,其28 d活性指数为66.5%,主要发挥物理填充作用贡献基体强度;泥沙中CaCO<sub>3</sub>为水泥水化提供成核位点,加速水泥早期水化进程;CaCO<sub>3</sub>与C<sub>3</sub>A发生反应,生成单碳酸盐(monocarbonate, MC),Ca(OH)<sub>2</sub>参与上述反应,生成半碳酸盐(hemicarbonate, HC),抑制钙矾石(ettringite, AFt)向单硫型硫酸铝钙(monosulphate, AFm)转变。

**关键词:**黄河泥沙-水泥复合体系;流动性;活性指数;水化过程;微观结构

**中图分类号:**TU526

**文献标志码:**A

**引用格式:**韩璐,周爱平,孙柯,等.黄河泥沙对水泥材料性能及微结构的影响[J].山东大学学报(工学版),2025,55(3):121-127.

HAN Lu, ZHOU Aiping, SUN Ke, et al. Influence of Yellow River sand on the mechanical properties and microstructure of cementitious materials[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(3):121-127.

## Influence of Yellow River sand on the mechanical properties and microstructure of cementitious materials

HAN Lu<sup>1</sup>, ZHOU Aiping<sup>1</sup>, SUN Ke<sup>2</sup>, WAN Tiantao<sup>2</sup>, SUI Gaoyang<sup>3</sup>, GE Zhi<sup>2</sup>, ZHANG Hongzhi<sup>2\*</sup>

(1. Shandong Yellow River Bureau Binzhou Yellow River Bureau, Binzhou 256601, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 3. Shandong Provincial Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China)

**Abstract:** In order to study the influence of Yellow River sand on the properties of cement materials, the sand was used to prepare mortar by replacing cement partially. Then, the effect of different sand content on flowability, setting time, and mechanical properties were studied, and the influence of Yellow River sand on cement hydration process, phase composition and microstructure were analyzed through microscopic tests. The results showed that the Yellow River sand shorten the setting time and reduced the fluidity of slurry. The activity index of Yellow River sand on the 28th day was 66.5%, indicating that it played a physical filling role in improving the matrix strength. CaCO<sub>3</sub> in the Yellow River sand provided nucleation sites for cement hydration and accelerated the early hydration process. CaCO<sub>3</sub> also reacted with C<sub>3</sub>A to form monocarbonate (MC). And the Ca(OH)<sub>2</sub> participated in the above reaction to form hemicarbonate (HC), which inhibited the transition from ettringite (AFt) to monosulphate (AFm).

**Keywords:** Yellow River sand-cement composite system; liquidity; activity index; cement hydration; microstructure

## 0 引言

黄河年输沙量约2.4亿t<sup>[1]</sup>,大量泥沙淤积在黄河下游,抬高下游河床,引发洪涝灾害<sup>[2]</sup>,泥沙资源化利用是解决泥沙淤积问题的有效途径。研究表明,黄

河泥沙含有大量SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO,是一种良好的硅酸盐类原料<sup>[3]</sup>,具有制备建筑材料的潜在价值。

不同粒径的黄河泥沙具有不同的物化特性<sup>[4]</sup>,粒径大于200 μm的黄河泥沙常和细集料混合使用,文献[5-6]利用其部分代替河砂制备出变形大、抗渗能力强的塑性混凝土;文献[7]采用Ca(OH)<sub>2</sub>作为激

收稿日期:2024-04-16

基金项目:山东省泰山学者青年专家计划资助项目(tsqn201909032)

第一作者简介:韩璐(1986—),女,山东滨州人,高级工程师,主要研究方向为经济管理。E-mail:reijiesd@126.com

\*通信作者简介:张洪智(1990—),男,山东济南人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为固碳及绿色功能混凝土、材料性能表征与数值仿真。E-mail:hzzhang@sdu.edu.cn

发剂活化泥沙中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 结果表明, 复合材料抗压强度随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量分数增加而提高; 文献[8]以硅酸钠水溶液和  $\text{NaOH}$  为激活剂激发泥沙活性, 结果表明, 养护 90 d 时抗压强度可达 53 MPa。小于  $10\ \mu\text{m}$  的黄河泥沙常被用作硅铝原料, 文献[9]通过高温煅烧使泥沙中石英、方解石、云母等物相转变为玻璃相, 制备出结构致密的陶粒; 文献[10]通过物理研磨证明  $10\ \mu\text{m}$  黄河泥沙砂浆试块 28 d 活性指数达 84.7%, 具有作为辅助胶凝材料的可能性。

上述研究都需通过化学激发或物理研磨激活泥沙活性, 且针对粒径  $10\sim 200\ \mu\text{m}$  黄河泥沙利用的研究鲜有报道。本研究就此开展泥沙掺入对水泥浆体物理性能的影响研究, 并结合水化热、X 射线衍射分析(X-ray diffraction, XRD)、热重-差热分析(thermogravimetry-derivative thermogravimetry, TG-DTG)和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)等表征手段, 揭示黄河泥沙对水泥水化过程、矿物组成、微观结构的影响机理。

表 1 原材料化学成分质量分数  
Table 1 Chemical composition of raw materials

原材料	质量分数/%						
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	$\text{MgO}$	其他
水泥	11.870	27.49	47.800	2.780	3.350	4.530	2.18
黄河泥沙	14.169	65.65	7.455	4.214	0.061	2.711	5.74

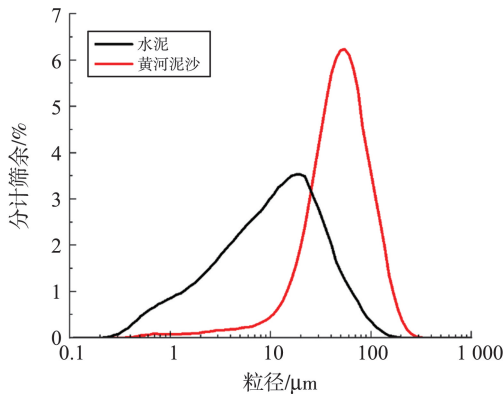


图 1 胶凝材料粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of cementitious materials

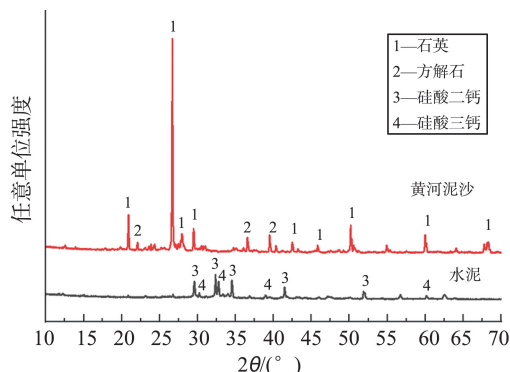


图 2 胶凝材料物相组成

Fig.2 Phase composition of cementitious materials

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

试验采用山水水泥集团有限公司生产的 P·O 42.5 水泥和山东滨博高速滨州黄河公路大桥下的黄河泥沙, 二者的表观密度分别为  $3\ 030\ \text{kg}/\text{m}^3$  和  $2\ 578\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 比表面积分别为  $584.7\ \text{m}^2/\text{kg}$  和  $100.7\ \text{m}^2/\text{kg}$ , 化学成分质量分数如表 1, 粒径分布如图 1 所示, X 射线衍射分析(XRD)如图 2 所示, 黄河泥沙微观形貌(使用 JSM-7610F 扫描电子显微镜拍摄)如图 3 所示。黄河泥沙为带棱角的不规则颗粒, 主要矿物成分为石英( $\text{SiO}_2$ )和方解石( $\text{CaCO}_3$ ), 粒径为  $10\sim 200\ \mu\text{m}$ , D10、D50、D90 分别为 17.33、46.81、104  $\mu\text{m}$ 。参照文献[11]测得黄河泥沙吸水率为 14.23%, 参照文献[12]测得黄河泥沙含泥量为 69.28%, 参照文献[13]测得黄河泥沙需水量比为 104.4%。

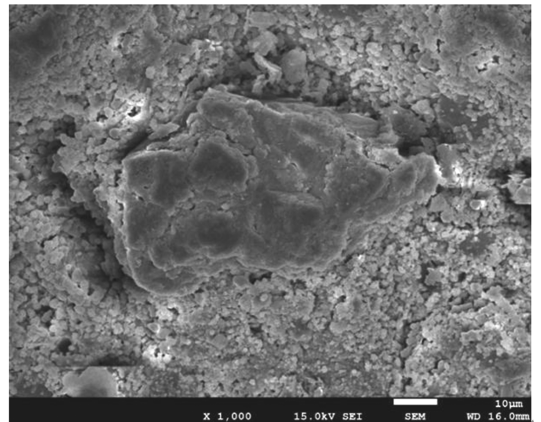


图 3 黄河泥沙微观形貌

Fig.3 Microscopic morphology of Yellow River sand

### 1.2 配合比与试验方法

共设置 4 组对比试验研究泥沙质量分数对水泥浆体物理性能的影响, 编号 Ref、SC30、SC40、SC50 分别代表黄河泥沙替代水泥质量比例为 0%、30%、40%、50%。

凝结时间试验参照文献[14], 流动性试验参照文献[15], 砂浆力学性能参照文献[16]测试。对编号 Ref 和 SC30 分别进行水化热、X 射线衍射分析(XRD)、热重-差热分析(TG-DTG)和扫描电子显微镜(SEM)试验。

## 2 结果及分析

### 2.1 黄河泥沙对物理性能影响

各组试样的凝结时间、流动度和标准砂浆强度如表2所示。由表2可以看出,随着黄河泥沙质量分数的增加,凝结时间缩短,这是因为黄河泥沙吸水率高,浆体拌合与凝结硬化过程中,黄河泥沙吸收大量自由水,降低体系中有效水灰比,水泥颗粒间距减小,水化产物之间更易形成网状结构与骨架<sup>[17]</sup>,降低浆体塑性,缩短了凝结时间。相比 Ref

表2 物理性能试验数据  
Table 2 Physical performance test data

编号	初凝时间/min	终凝时间/min	流动度/mm	标准砂浆抗压强度/MPa		
				3 d	7 d	28 d
Ref	195	245	245	17.8	28.3	44.3
SC30	178	227	237	11.2	18.2	29.4
SC40	167	221	221	9.8	17.2	25.6
SC50	161	203	210	8.8	15.3	22.8

### 2.2 黄河泥沙对水化过程的影响

水化放热总量如图4(a)所示。黄河泥沙-水泥复合体系放热总量远小于水泥净浆体系,这是因为泥沙的掺入降低了水泥的质量分数,水泥水化放热总量减少。泥沙复合体系中单位水泥放热量相比水泥净浆体系差距逐渐减小,这是由于在水化反应

组,SC30、SC40、SC50组胶砂的流动度分别下降3.26%、9.78%、14.3%,这是由于黄河泥沙对自由水的吸收以及不规则的颗粒形态导致,颗粒棱角之间发挥咬合作用降低浆体流动性。与Ref组相比,SC30抗压强度下降幅度较大,根据文献[13]计算黄河泥沙的28d活性指数为66.5%,低于二级粉煤灰的70%,说明其活性较低。对比SC30、SC40、SC50组,抗压强度下降幅度逐渐减小,说明黄河泥沙在基体中发挥物理填充效应,在一定程度上弥补了水化产物减少带来的强度损失。

初期,黄河泥沙吸收自由水,降低体系中有效水灰比,水泥未充分水化,单位水泥放热量小,由于泥沙与水不发生反应,随着反应的进行,泥沙吸附水释放并参与到水化反应中,单位水泥放热量逐步提高,与净浆体系差距逐渐减小。

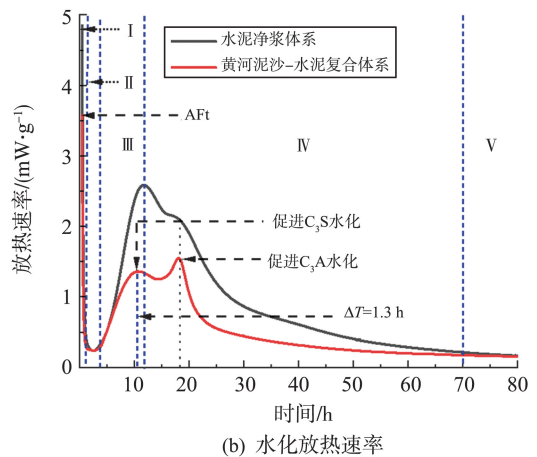
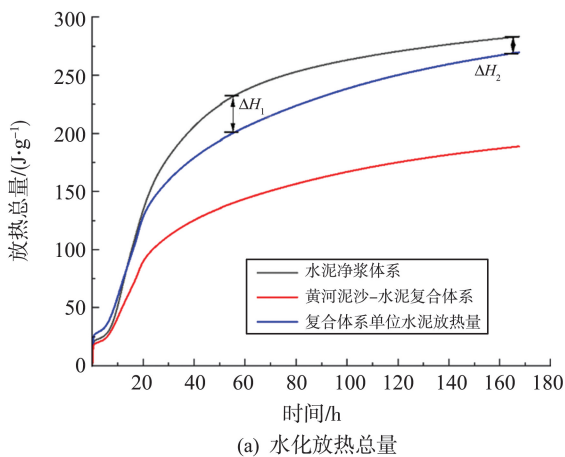
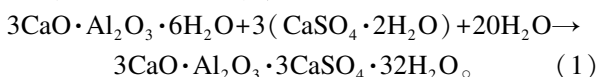
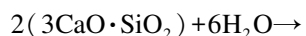


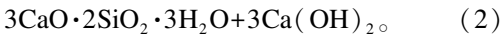
图4 水化热试验结果  
Fig.4 Hydration heat test results

水化放热速率如图4(b)所示,黄河泥沙-水泥复合体系的水化过程与水泥净浆体系相似,分为诱导前期(I)、诱导期(II)、加速期(III)、减速期(IV)和稳定期(V)。在诱导前期,C<sub>3</sub>A率先水化,与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>反应生成钙矾石(AFt),形成第一个放热峰<sup>[18]</sup>,反应方程如式(1)所示。

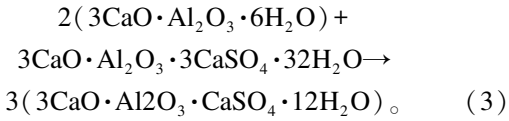


在诱导期,C<sub>3</sub>S中Ca<sup>2+</sup>和OH<sup>-</sup>迅速溶出并生成Ca(OH)<sub>2</sub>和CSH,水化放热速率开始上升,反应进入加速期并形成第二个放热峰<sup>[19]</sup>,反应方程如式(2)所示。黄河泥沙-水泥复合体系的第二个放热峰形成时间比水泥净浆体系提前1.3h,这是由于黄河泥沙中的CaCO<sub>3</sub>为水泥水化提供晶核<sup>[20]</sup>,水化产物依附在CaCO<sub>3</sub>表面,加速水化进程。





水泥净浆体系中减速期第三个峰的形成与  $\text{C}_3\text{A}$ 、 $\text{AFt}$  等反应有关<sup>[21-22]</sup>,当石膏消耗完后, $\text{C}_3\text{A}$  与  $\text{AFt}$  反应生成  $\text{AFm}$ ,反应方程如式(3)所示。

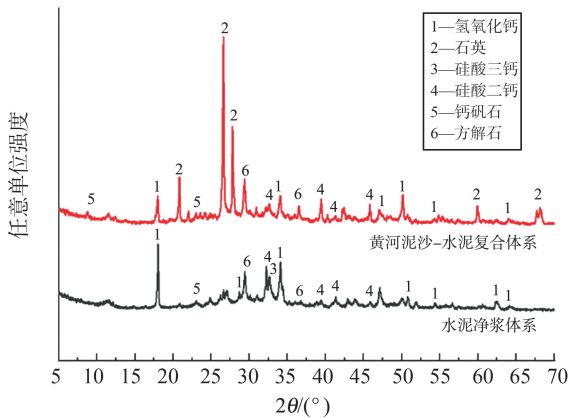


黄河泥沙-水泥复合体系中第三个峰的形成与  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{C}_3\text{A}$  等碳铝酸盐反应相关, $\text{CaCO}_3$  与  $\text{C}_3\text{A}$  反应生成碳铝酸盐( $\text{MC}$ )<sup>[21]</sup>, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  参与上述反应生成半碳铝酸盐( $\text{HC}$ )<sup>[22]</sup>,延缓  $\text{AFt}$  向  $\text{AFm}$  转变。同时, $\text{CaCO}_3$  与  $\text{AFm}$  反应生成  $\text{AFt}$ <sup>[23]</sup>,因此黄河泥

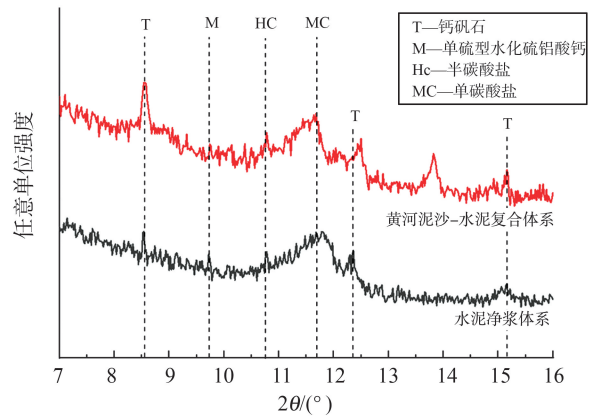
沙-水泥复合体系第三个放热峰高于水泥净浆体系。

### 2.3 黄河泥沙对矿物组成的影响

Ref 与 SC30 组 28 d 的 XRD 谱如图 5 所示,外标法定量分析主要物相百分比结果如表 3 所示。由图 5(a)可知,主要物相包括  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{AFt}$  和  $\text{CaCO}_3$ ,掺入泥沙除了引入  $\text{SiO}_2$  外,对矿物特征峰的分布没有显著影响。图 5(b)为  $2\theta=7^\circ\sim 16^\circ$  的 XRD 局部图,结合图 5(b)和表 3,相比 Ref,SC30 中  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$  体积百分比提高 1.81%、2.34%,说明泥沙体系中水泥水化程度低于净浆体系,这是因为反应初期黄河泥沙吸收自由水,水化反应不充分导致。



(a) 黄河泥沙-水泥复合体系主要物相组成



(b) 7~16° XRD局部图

图5 黄河泥沙-水泥复合体系物相组成

Fig.5 Phase composition of Yellow River sand-cement system

表3 28 d物相定量分析

Table 3 Quantitative phase analysis of mortar for 28 d

编号	体积百分比/%									
	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{CaCO}_3$	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{AFt}$	$\text{AFm}$	$\text{HC}$	$\text{MC}$	$\text{MS}$	$\text{SiO}_2$
Ref	27.00	35.09	22.17	14.36	0.23	0.18	0.87	0.12	0.13	0
SC30	13.61	37.60	23.98	16.70	0.46	0.11	1.26	0.41	0.08	5.86

随着反应进行,泥沙吸附的自由水参与水化反应,生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{AFt}$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{MC}$ 。其中 SC30 组  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{AFm}$  体积分数降低 13.39%、0.07%,但  $\text{AFt}$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{MC}$  相比 Ref 提升 0.23%、0.39%、0.29%,说明泥沙体系中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{AFm}$  参与  $\text{C}_3\text{A}$ 、 $\text{CaCO}_3$  的碳铝酸盐反应生成  $\text{MC}$ , $\text{HC}$  与  $\text{AFt}$ ,这与水化热试验结论一致。

TG-DTG 试验结果如图 6 和 7 所示,三个阶段质量损失比如表 4 所示。第一个失重峰出现在  $100\sim 200^\circ\text{C}$  之间,对应水化产物  $\text{CSH}$ 、 $\text{AFt}$  和  $\text{AFm}$  的脱水分解<sup>[18]</sup>, $400\sim 500^\circ\text{C}$  之间的失重峰由  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  分解为  $\text{CaO}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  引起<sup>[19]</sup>,前两个阶段 SC30 质量损失百分比小于 Ref 组,这是由于泥沙替代水泥导致水化产物数量减少所致,这与水化热试

验和 XRD 试验结论一致。

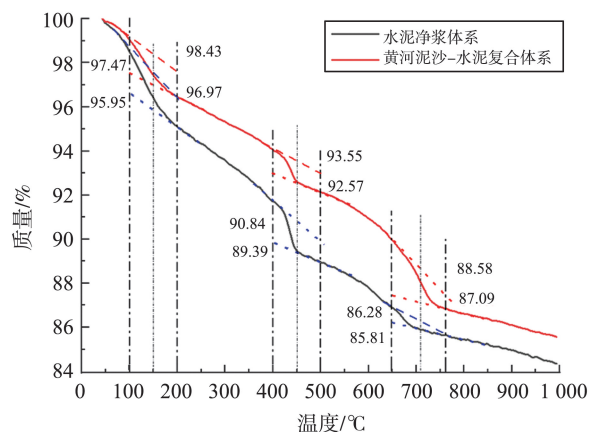


图6 热重曲线

Fig.6 Thermogravimetric curve

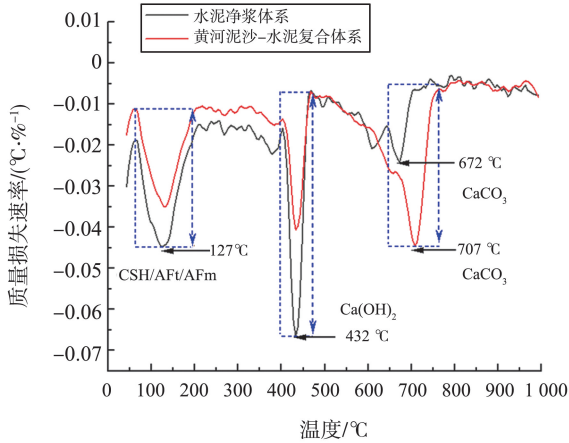


图7 微商热重曲线

Fig.7 Derivative thermogravimetric curve

表4 三个阶段的质量损失百分比

Table 4 Percentage of mass loss in three stages

胶凝材料体系	质量损失百分比/%		
	100~200 °C	400~500 °C	650~760 °C
水泥净浆体系	1.62	1.45	0.47
黄河泥沙-水泥复合体系	1.46	0.98	1.49

650 ~ 760 °C 之间的失重峰代表  $\text{CaCO}_3$  分解<sup>[20]</sup>, SC30 组质量损失百分比和失重峰温度大于 Ref 组,这是由于 Ref 组中  $\text{CaCO}_3$  是胶凝材料碳化反应生成文石和球霏石,SC30 中除了碳化反应生成的文石和球霏石外,还包含黄河泥沙中的方解石,方解石晶体稳定性高<sup>[21]</sup>,因此质量损失百分比和失重温度大。

为进一步分析浆体的水化程度,基于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在 400~500 °C 的质量损失量,按式(4)计算水泥生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量百分比<sup>[22]</sup>,根据式(5)计算各体系在 0~650 °C 化学结合水(BW)质量百分比<sup>[23]</sup>,计算结果如表 5 所示。

表5 氢氧化钙和化学结合水质量百分比

Table 5 Percentage of calcium hydroxide and chemically bound water

胶凝材料体系	质量百分比/%	
	氢氧化钙	化学结合水
水泥净浆体系	2.84	15.06
黄河泥沙-水泥复合体系	2.70	15.83

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 = \frac{W_{400} - W_{500}}{W_{500} \times (1 + w/c)} \times \frac{M_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \times \frac{1}{m_c} \quad (4)$$

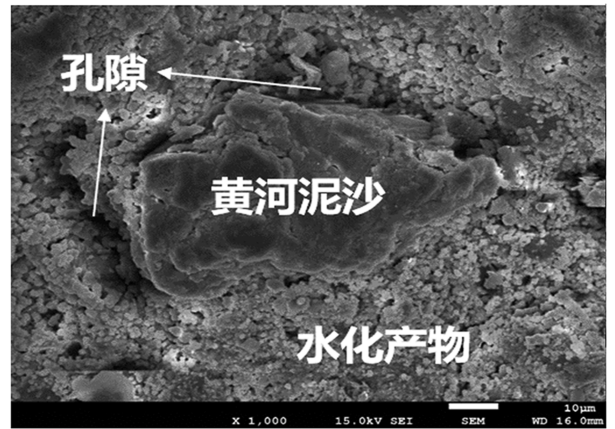
$$\text{BW} = \frac{W_0 - W_{650}}{W_{650}} \times \frac{1}{m_c} \quad (5)$$

式中,  $W_t$  为  $t^\circ\text{C}$  时失重百分比,  $m_c$  为体系中水泥质量百分比,  $w/c$  为水灰比,  $M_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ 、 $M_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的相对分子质量。

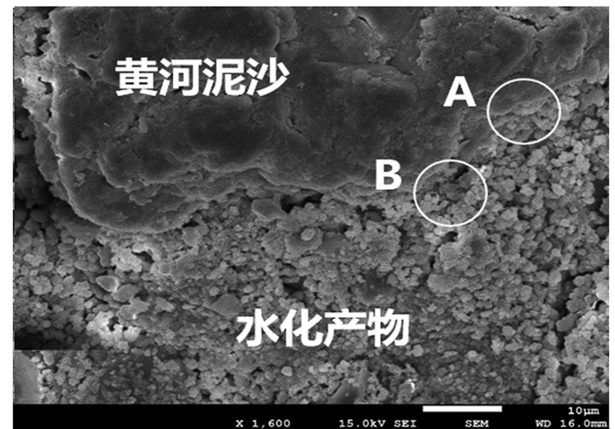
由表 5 可知,随着黄河泥沙的掺入,单位水泥产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量百分比减少,化学结合水增多。这是由于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  参与  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{C}_3\text{A}$  的水化反应,结合更多水,生成 HC,这与 XRD 定量分析的结论一致。

### 2.4 黄河泥沙水泥石微观形貌

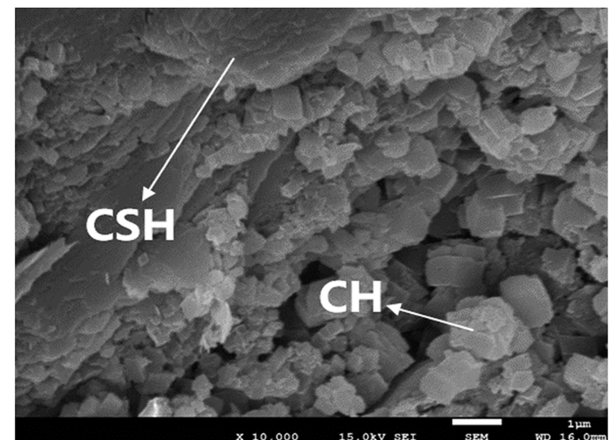
黄河泥沙水泥石微观形貌(使用 JSM-7610F 扫描电子显微镜拍摄)如图 8 所示。



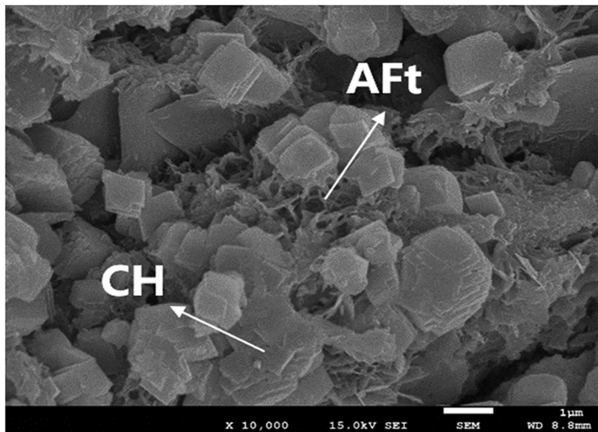
(a) 黄河泥沙微观形貌



(b) 黄河泥沙附近水化产物



(c) A区域放大图



(d) B区域放大图

图8 黄河泥沙水泥石微观形貌

Fig.8 Micro-morphology of Yellow River sand-cement matrix

图8(a)所示黄河泥沙在基体中发挥物理填充作用贡献基体强度,黄河泥沙与基体之间存在孔隙,可能是由于水化初期泥沙吸收自由水,增大界面过渡区处水灰比,水化产物无法充分填充,生成孔隙。图8(c)(d)为图8(b)A、B处局部放大图,观察图8(c)(d),水泥水化生成大量絮状CSH、棒状AFt和板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 凝胶,该处泥沙与基体紧密连接。

### 3 结论

本研究探讨了不同质量分数黄河泥沙对胶凝材料初终凝时间、流动度、抗压强度的影响,并结合水化热、XRD、TG-DTG和ESEM试验,探究了黄河泥沙对胶凝材料水化过程、水化产物、微观结构的影响。结论如下。

(1)黄河泥沙因较大吸水率而降低了浆体的有效水灰比,初终凝时间加快,流动性降低。

(2)黄河泥沙的水化活性较低,主要起到物理填充作用,泥沙的掺入降低了砂浆试块的抗压强度,随着泥沙质量分数增加,抗压强度下降幅度减小,物理填充强度弥补了水化产物减少带来的强度损失。

(3)黄河泥沙中 $\text{CaCO}_3$ 为水泥水化提供成核位点,促进反应进程,并与 $\text{C}_3\text{A}$ 发生反应生成MC。

(4)黄河泥沙-水泥复合体系中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数减少,化学结合水质量分数增多, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 参与 $\text{CaCO}_3$ 与 $\text{C}_3\text{A}$ 的反应生成HC,抑制了AFt向AFm转化。

#### 参考文献:

[1] 魏艳红,贾晓鹏,王远征,等.近70年黄河上游干流水沙

时空变化与周期特征[J/OL].水土保持学报,2025.  
https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.04.010

- WEI Yanhong, JIA Xiaopeng, WANG Yuanzheng, et al. Spatiotemporal variations and periodic characteristics of runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River over the past 70 years[J/OL]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025. https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.04.010
- [2] 王远见,马颖卓,李卢祎,等.黄河泥沙之变——水库清淤与泥沙资源利用探究[J].中国水利,2023(9):4-11.

WANG Yuanjian, MA Yingzhuo, LI Luyi, et al. The change of sediment in the Yellow River: research on reservoir desilting and sediment resource utilization[J]. China Water Conservancy, 2023(9):4-11.

- [3] 刘慧,柴泉雄,李长明,等.黄河泥沙物化特性与改性利用研究进展[J].人民黄河,2023,45(5):41-45.  
LIU Hui, CHAI Xiaoxiong, LI Changming, et al. Research progress of physical-chemical characteristics and modification utilization of sediment in Yellow River[J]. Yellow River, 2023, 45(5):41-45.
- [4] 石华伟,李昆鹏,王远见.黄河泥沙资源利用方向研究进展[C]//中国水利学会2020学术年会论文集第三分册.北京:中国水利学会,黄河水利委员会,2020.

SHI Huawei, LI Kunpeng, WANG Yuanjian. Research progress on the utilization direction of sediment resources in the Yellow River[C]//Volume 3 of the proceedings of the 2020 academic annual meeting of the Chinese hydraulic society. Beijing: China Water Conservancy Society, Yellow River Water Conservancy Commission, 2020.

- [5] 关超.黄河泥沙塑性混凝土性能试验设计[D].郑州:郑州大学,2014.  
GUAN Chao. Experimental study on behavior of plastic concrete with Yellow River sediment[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.

- [6] 张廷毅,汪自力,朱海堂,等.黄河特细砂塑性混凝土渗透性能[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(4):69-75.

ZHANG Tingyi, WANG Zili, ZHU Haitang, et al. Permeability of Yellow River superfine sand plastic concrete[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(4):69-75.

- [7] LI G N, WANG B M, LIU H, et al. Mechanical property and microstructure of alkali-activated Yellow River sediment-coal slime ash composites[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2017, 32(5):1080-1086.

- [8] WANG B M, LI G N, HAN JN, et al. Study on the properties of artificial flood prevention stone made by Yellow River silt[J]. Construction and Building

- Materials, 2017, 144: 484-492.
- [9] 杨丽艳,马鑫,梅锐锋,等.黄河流域沉沙池泥沙制备陶粒及其性能研究[J].无机盐工业,2022,54(5): 109-115.  
YANG Liyan, MA Xin, MEI Ruifeng, et al. Study on preparation and performance of ceramsite from sediment in Yellow River desilting basin [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(5): 109-115.
- [10] 张洪磊,曹明莉.机械粉磨对黄河泥沙颗粒群特性及胶凝活性的影响[J].材料导报,2024,38(13): 144-149.  
ZHANG Honglei, CAO Mingli. Influence of mechanical grinding on the particle groups characteristics and cementitious activity of Yellow River sediment [J]. Materials Reports, 2024, 38(13): 144-149.
- [11] 中国建筑科学研究院.普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准:JGJ 52—2006[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [12] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.矿物掺合料应用技术规范:GB/T 51003—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检测方法:GB/T 1346—2011[S].北京:中国建筑材料联合会,2012.
- [15] 中国建筑材料联合会.水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419—2005[S].北京:全国水泥标准化技术委员会,2005.
- [16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [17] 施潇韵.水灰比对水泥净浆凝结时间的影响[J].四川水泥,2018(7): 8.  
SHI Xiaoyun. Influence of water-cement ratio on setting time of cement paste [J]. Sichuan Cement, 2018(7): 8.
- [18] LAGIER F, KURTIS K E. Influence of Portland cement composition on early age reactions with metakaolin [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37 ( 10 ): 1411-1417.
- [19] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A quantitative study on physical and chemical effects of limestone powder on properties of cement pastes [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 58-69.
- [20] KAKALI G, TSIVILIS S, AGGELI E, et al. Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO<sub>3</sub> [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(7): 1073-1077.
- [21] AVET F, SCRIVENER K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of limestone calcined clay cement (LC3) [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 107: 124-135.
- [22] ANTONI M, ROSSEN J, MARTIRENA F, et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42 ( 12 ): 1579-1589.
- [23] MOHAMED A R, ELSALAMAWY M, RAGAB M. Modeling the influence of limestone addition on cement hydration [J]. Alexandria Engineering Journal, 2015, 54 ( 1 ): 1-5.
- [24] LI Y Q, MI T W, LIU W, et al. Chemical and mineralogical characteristics of carbonated and uncarbonated cement pastes subjected to high temperatures [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 216: 108861.
- [25] LOTHENBACH B, SCRIVENER K, SNELLINGS R. A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials [M]. Boca Raton, USA: Crc Press, 2016.
- [26] LI Y L, EYLEY S, THIELEMANS W, et al. Valorization of deep soil mixing residue in cement-based materials [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 187: 106597.
- [27] SHAH V, SCRIVENER K, BHATTACHARJEE B, et al. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 109: 184-197.
- [28] HALLET V, DE BELIE N, PONTIKES Y. The impact of slag fineness on the reactivity of blended cements with high-volume non-ferrous metallurgy slag [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119400.
- [29] LIU S H, WANG L, LI Q L, et al. Hydration properties of Portland cement-copper tailing powder composite binder [J]. Construction and Building Materials, 2020, 251: 118882.

(编辑:宋艳)